

工學博士 學位論文

컨테이너 터미널 생산성 향상을 위한 항만하역장비의
예방보전에 관한 연구

A Study on Prevention Maintenance of Container
Terminal Equipments for Increasing Terminal
Productivity

指導教授 金換成

2006年 8月

韓國海洋大學校 大學院

物流시스템工學科 金永鎬

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	vi
Abstract	ix
제 1 장 서론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구내용과 구성	3
제 2 장 하역장비 보전 및 점검	6
2.1 개요	7
2.2 갠트리 크레인	7
2.2.1 갠트리 크레인의 보전	12
2.2.2 갠트리 크레인의 점검	17
2.3 트랜스퍼 크레인	23
2.3.1 트랜스퍼 크레인의 보전	28
2.3.2 트랜스퍼 크레인의 점검	29
2.4 야드 트랙터	31
2.4.1 야드 트랙터의 보전	31
2.4.2 야드 트랙터의 점검	33
2.5 기타 하역장비	34
2.6 고찰 및 요약	37
제 3 장 하역장비의 고장	39
3.1 하역장비의 사고사례	39

3.1.1 기계분야고장에 의한 사고	39
3.1.2 전기분야고장에 의한 사고	40
3.2 하역장비의 보전관리	44
3.2.1 예방보전	46
3.2.2 사후보전	53
3.3 고장분석	54
3.3.1 고장률과 고장확률밀도함수	54
3.3.2 육조곡선	59
3.4 보전성	65
3.4.1 평균수명과 평균고장	65
3.4.2 하역장비의 보전성	69
3.4.3 하역장비의 가동성	71
3.5 하역장비의 고장 분석	73
3.5.1 갠트리 크레인의 고장	73
3.5.2 트랜스퍼 크레인의 고장	82
3.5.3 야드 트랙터의 고장	87
3.5.4 하역장비의 고장 분석결과	88
3.6 고찰 및 요약	89
제 4 장 하역장비의 고장률 및 생산성	91
4.1 컨테이너 터미널의 생산성 모형	91
4.1.1 생산성 평가경향	91
4.1.2 생산성 측정모형	94
4.2 컨테이너 터미널의 생산성 분석	97
4.2.1 생산성 민감도	97
4.2.2 생산성 분석	98
4.2.3 1개 선박당 생산성 분석	99

4.3 고찰 및 요약	101
제 5 장 하역장비 예방보전에 의한 컨테이너 터미널의 생산성 향상	102
5.1 예방보전주기 개선에 의한 방법	102
5.1.1 예방보전 주기	102
5.1.2 예방보전 주기설정	104
5.2 예지보전에 의한 방법	105
5.2.1 상태공간기법에 의한 예지보전	106
5.2.2 고장예지 시뮬레이션	112
5.2.3 생산성 비교 결과	123
5.3 고찰 및 요약	124
제 6 장 결론	126
참고문헌	129

List of Tables

Table 2.1	Items of generalize gantry crane system	10
Table 2.2	General specification of super post panamax gantry crane	11
Table 2.3	Distribution of gantry crane power source	11
Table 2.4	Distribution of prevention maintenance group of gantry crane mechanical part	15
Table 2.5	Distribution of prevention maintenance group of gantry crane electrical part	16
Table 2.6	Items of prevention maintenance of gantry crane mechanical part and check	19
Table 2.7	Items of prevention maintenance of gantry crane electrical part and check	20
Table 2.8	Electrical part fault items of gantry crane	21
Table 2.9	Mechanical part fault items of gantry crane	22
Table 2.10	Items of transfer crane system	26
Table 2.11	General specification of transfer crane	27
Table 2.12	Distribution of prevention maintenance group of transfer crane electrical and mechanical part	29
Table 2.13	Items of transfer crane prevention maintenance and check	30
Table 2.14	Items of transfer crane fault maintenance	30
Table 2.15	Items of yard tractor system	33
Table 2.16	Items of prevention maintenance of yard tractor	34
Table 2.17	Items of prevention maintenance of reach stacker	35
Table 3.1	Technical word explanation of prevention	46
Table 3.2	Optimal maintenance expense calculation data for DC motor	

change	53
Table 3.3 A relation between fault type and $f(t)$	55
Table 3.4 Suspension code of cargo operation	75
Table 3.5 The summary of operation suspended by fault of container terminal crane	88
Table 4.1 The kind of gantry crane productivity	92
Table 4.2 The result of productivity analysis and fault ratio by container terminal equipment	100
Table 5.1 Parameters for gantry crane system	112
Table 5.2 Fault magnitudes and their thresholds	113
Table 5.3 The result of fault diagnosis simulation	123
Table 5.4 The result of prevention maintenance period improvement	124

List of Figures

Fig. 1.1	Flow of study for this thesis	5
Fig. 2.1	Configuration of container terminal cargo working	7
Fig. 2.2	Gantry crane structure	9
Fig. 2.3	A view of gantry crane	12
Fig. 2.4	Structure of transfer crane	25
Fig. 2.5	Cargo working view of transfer crane	27
Fig. 2.6	A view of yard tractor	32
Fig. 2.7	A view of yard tractor and yard chassis	32
Fig. 2.8	A view of reach stacker	36
Fig. 2.9	A view of top handler	36
Fig. 3.1	An accident of mechanical fault (a)	39
Fig. 3.2	An accident of mechanical fault (b)	40
Fig. 3.3	An accident of electrical fault (a)	41
Fig. 3.4	An accident of electrical fault (b)	41
Fig. 3.5	An accident of electrical fault (c)	42
Fig. 3.6	Faults of DC motors	43
Fig. 3.7	Motor piece by insulated destruction	43
Fig. 3.8	An accident by outside vehicles	44
Fig. 3.9	Classification of maintenance	45
Fig. 3.10	Period of time based prevention maintenance, t_p	47
Fig. 3.11	Relation between period of time based prevention maintenance t_p and fault ratio $\lambda(t)$	48
Fig. 3.12	Computation of Optimal maintenance period	50
Fig. 3.13	Bath curve	60
Fig. 3.14	Effect of IFR and PM	62
Fig. 3.15	Analysis of operating and resting time	71

Fig. 3.16 Analysis of fault repair time	74
Fig. 3.17 Occupation ratio of cargo working suspension of gantry crane	77
Fig. 3.18 Analysis of occupation ratio of cargo working suspension of gantry crane	77
Fig. 3.19 Fault ratio of mechanical and electrical parts of gantry crane	78
Fig. 3.20 Ratio of fault repair time of mechanical and electrical parts of gantry crane	78
Fig. 3.21 Fault ratio of gantry crane electrical parts	79
Fig. 3.22 Ratio of fault repair time of gantry crane electrical part	80
Fig. 3.23 Fault ratio of gantry crane mechanical part	80
Fig. 3.24 Ratio of fault repair time of gantry crane mechanical part	81
Fig. 3.25 Fault ratio of mechanical and electrical parts of transfer crane ...	83
Fig. 3.26 Repair time ratio of mechanical and electrical parts of transfer crane	83
Fig. 3.27 Fault occurrence ratio per motion of transfer crane	84
Fig. 3.28 Fault ratio per motion of transfer crane electrical part	84
Fig. 3.29 Fault repair time ratio per motion of transfer crane electrical part	85
Fig. 3.30 Fault ratio per motion of transfer crane mechanical part	86
Fig. 3.31 Fault repair time ratio per motion of transfer crane mechanical part	86
Fig. 3.32 Fault ratio of yard tractor	87
Fig. 5.1 States monitoring by observation technique	106
Fig. 5.2 Coordinate of gantry crane system	107
Fig. 5.3 Fault diagnosis system based on fault estimator	111
Fig. 5.4(a) Actuator residual in actuator fault	114
Fig. 5.4(b) Sensor 1 residual in actuator fault	114
Fig. 5.4(c) Sensor 2 residual in actuator fault	114
Fig. 5.4(d) Sensor 3 residual in actuator fault	114
Fig. 5.4(e) Sensor 4 residual in actuator fault	115

Fig. 5.5(a) Actuator residual in sensor 1 fault	115
Fig. 5.5(b) Sensor 1 residual in sensor 1 fault	115
Fig. 5.5(c) Sensor 2 residual in sensor 1 fault	116
Fig. 5.5(d) Sensor 3 residual in sensor 1 fault	116
Fig. 5.5(e) Sensor 4 residual in sensor 1 fault	116
Fig. 5.6(a) Actuator residual in sensor 2 fault	117
Fig. 5.6(b) Sensor 1 residual in sensor 2 fault	117
Fig. 5.6(c) Sensor 2 residual in sensor 2 fault	117
Fig. 5.6(d) Sensor 3 residual in sensor 2 fault	117
Fig. 5.6(e) Sensor 4 residual in sensor 2 fault	118
Fig. 5.7(a) Actuator residual in sensor 3 fault	118
Fig. 5.7(b) Sensor 1 residual in sensor 3 fault	118
Fig. 5.7(c) Sensor 2 residual in sensor 3 fault	119
Fig. 5.7(d) Sensor 3 residual in sensor 3 fault	119
Fig. 5.7(e) Sensor 4 residual in sensor 3 fault	119
Fig. 5.8(a) Actuator residual in sensor 4 fault	120
Fig. 5.8(b) Sensor 1 residual in sensor 4 fault	120
Fig. 5.8(c) Sensor 2 residual in sensor 4 fault	120
Fig. 5.8(d) Sensor 3 residual in sensor 4 fault	120
Fig. 5.8(e) Sensor 4 residual in sensor 4 fault	121
Fig. 5.9(a) Actuator residual in sensor 1 & 3 faults	121
Fig. 5.9(b) Sensor 1 residual in sensor 1 & 3 faults	121
Fig. 5.9(c) Sensor 2 residual in sensor 1 & 3 faults	122
Fig. 5.9(d) Sensor 3 residual in sensor 1 & 3 faults	122
Fig. 5.9(e) Sensor 4 residual in sensor 1 & 3 faults	122

A Study on Prevention Maintenance of Container Terminal
Equipments for Increasing Terminal Productivity

Young-Ho KIM

Department of Logistics Engineering,
Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

The productivity for container handling in container vessel is an important role in container terminal and it mainly depends on the productivities of gantry crane in quay side work, transfer crane in yard work, yard tractor and other equipments. By the failure of these kinds of equipment, the operation of equipment will be stopped until the repair of the failure is finished.

During these repair time, the loading and discharging to and from container vessel is forced to be suspended and container handling productivity at terminal is negatively affected. Thus, the prevention maintenance is very important in order to keep the whole container handling equipment in optimum operational condition at container terminal.

In this thesis, I propose a failure reduction methods which deal with adjustment of the

period of prevention maintenance and design of a new condition based on maintenance method.

Firstly, I have made an analysis on the failures occurred to all container handling equipment. From this result, I distinguished 4 parts: gantry crane in quay side, transfer crane in yard side, yard tractor and other equipment. From failure analysis I gathered the failure data for each equipment during one month in given test period and distinguished the failure which concerns with prevention maintenance.

Secondly, I show a variable productivities that evaluate quay side work, yard work and gate work in handling containers by each equipment at container terminal. Also, I denote the relationship between the container terminal productivity and the failure rate of each equipment.

Thirdly, I suggest an optimal period determination method for prevention maintenance of each equipment by heuristic method. For verification of proposed method I calculate the total productivity and compare the results with the results which are adapted in the proposed period determination method.

Finally, I propose a novel condition based on maintenance method by steady state equation method. In the method, I can estimate the failure state before generating the fault in each equipment with given mathematic models. In simulation, I show the fault detection and isolation in given failures for gantry crane system..

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

1980년대에 들어 우리나라는 자성대 컨테이너부두 개장과 함께 본격적인 컨테이너 전용 터미널 시대에 들어섰다고 할 수 있다. 그 후 컨테이너 터미널은 부산항을 중심으로 날로 발전하여 규모와 시설 면에서 세계 유수의 항만과 경쟁에서 유리한 지리적 여건과 서비스 강화로 경쟁력을 갖추어 왔다. 전 세계 교역량의 75%가 해상운송에 의존하고 있으며 무역 규모가 커지면서 2006년도 컨테이너 물동량이 약 9%가 증가할 것으로 예측되고 있다. 이에 따라 중국을 비롯한 많은 국가에서 항만개발을 진행하므로 우리항만의 입지가 좁아지고 있는 실정이다.

지하자원이 부족한 우리는 원자재를 수입하여 이를 가공한 후 완제품으로 제작하여 육상운송을 통하여 항만을 경유한 후 해상운송으로 수출하고 있기 때문에 항만 물동량 처리에 따른 많은 이익을 기대할 수 있는 경제구조를 지니고 있다.

그러나 수출입의 교량 역할을 담당하는 항만에서 수출입 물동량을 처리하는 항만시설 미흡이 문제가 되고 있으며 이러한 점 때문에 고부가가치를 창출할 수 없을 뿐 아니라 총생산대비 물류비의 비율이 미국 7%, 일본 11.3%보다 많은 15.7%에 이를 정도로 열악한 것이 현실이다(컨테이너부두공단, 2004). 따라서 항만의 경쟁력 강화를 위해 컨테이너 터미널의 자동화를 목적으로 활발하게 연구가 진행되고 있으며 국책사업으로 신항, 마산항, 광양항 3단계 공사가 진행되고 있다. 또한 항만에 설치된 하역장비의 효율성을 높이기 위해 제어시스템에도 많은 연구개발이 이루어져 최신 하역장비가 도입되고 있다.

항만의 하역장비는 컨테이너 터미널에서 화물을 빠른 시간 내에 양화와 적화, 반출과 반입, 야드 내에서 짧은 시간에 원하는 위치로 이송하는 운반기기를 말한다.

갠트리 크레인은 트랜스퍼 크레인과 같이 엔진을 탑재하여 사용하여 왔으나 부하변동에 따른 전원 불안정으로 인해 잦은 고장이 발생하여 육상전원을 사용하는 방식으로 바뀐 지 오래이다. 갠트리 크레인은 대기환경과 해풍에 직접적인 영향을 받는 안벽(Apron)에 설치되어 대기온도와 기상변화에 따라 고장발생 가능성이 산업용 크레인에 비해 매우 높다. 특히 크레인의 중량과 제어시스템을 간략화 하기 위해 갠트리와 호이스트 그리고 트롤리와 붐 호이스트를 같이 사용하는 시스템으로 구성되어 있어 전기적인 용량과 기계적인 마모로 인하여 갠트리 크레인의 동작 전환 과정에서 고장이 많이 발생한다.

트랜스퍼 크레인 은 야드 내에서 자유롭게 이동을 하기 위해 갠트리 크레인과는 달리 자체적으로 엔진과 발전기를 탑재하고 있으며 컨테이너의 이동을 돕기 위하여 야드 트랙터(Yard tractor)와 연결된 야드채시(Yard Chassis)에 컨테이너를 상·하차를 하고 갠트리 크레인의 양화 및 적화작업을 지원하는 하역장비이다. 최근에는 컨테이너화물중량 증가에 따라 20피트 두개를 동시에 들어올리기 위해 트윈트웬티 스프레더(Twin twenty spreader)를 장착한 더욱 개선했던 9단 6열 적재가 가능한 야드 크레인이 RMGC(Rail Mounted Gantry Crane) 형태로 제작되고 있다.

또한 기존의 트랜스퍼 크레인에도 APIS(Automated Positioning Indicator System)라 불리는 자동위치감지시스템과 같은 다양한 시스템이 장착되어 있지만 야드 지면의 경사도, 굴곡 등 토목환경 요인이 충분히 뒷받침되지 않아 시스템은 잦은 고장으로 활용도가 많이 떨어진다.

그리고 고장발생을 최소화하기 위해 자체발전기를 탑재하지 않고 안정적인 전원 확보를 위해 레일(Rail) 방식의 야드 크레인을 최근에는 많이 채택하고 있다.

2005년 12월 신선대 컨테이너 터미널에서는 ATC(Automated Transfer Crane)라 불리는 RMGC 형태의 무인자동화 하역장비가 상업운전을 시작하여, 그 하역작업 생산성과가 기대된다. 따라서 하역장비의 효율성과 생산성 제고를 실현하기 위해 다양한 기능과 조건들을 하역장비에 적용하고 있으나 이는 고장요소의 증가로 이어져 보다 많은 고장이 발생 할 수 있다.

야드 트랙터는 컨테이너 터미널 내에서 운행되며 육상의 트레일러와 같이 내연기관을 사용하여 채시를 연결하여 컨테이너를 싣고 다니는 하역작업용 차량이다. 야드 트랙터에 고장이 발생하면 운영에는 큰 영향을 미치지 않으나 야드 내의 하역작업 흐름을 일순간 멈추게 하여 병목현상을 유발시킬 수 있다. 특히 좁은 터미널인 경우에 더 많은 문제점으로 지적된다.

그 외 하역장비로는 야드 내 좁은 구간에서 작업이 용이한 리치 스택커(Reach stacker), 탑 핸들러(Top handler) 등이 있으며 내연기관을 사용하여 동력을 만들어 내고 각종 유압장치를 구동하여 하역작업을 실시한다. 좁은 공간에 많은 부품이 집중되어 있기 때문에 고장발생시 수리에 많은 어려움이 있다. 특히 많은 종류의 부품은 국내 생산이 안되는 것이 대부분이므로 부품의 호환성이 떨어져 고장수리비용이 다른 하역장비에 비해 상대적으로 높은점이 단점으로 지적된다. 따라서 가동률에 따라 내연기관과 유압장치의 마모와 누유 그리고 진동, 노이즈(Noise) 등에 의해 고장이 많이 발생한다.

위와 같이 컨테이너 터미널의 생산성은 터미널내 하역장비 가동률, 즉 고장률에 크게 의존되고 있음을 알 수 있다. 하역장비에 고장이 발생하면 빠른 시간 내에 고장수리를 해야 한다.

복잡한 하역장비의 구조 및 화물 중량의 변화 특성에 따라 다양하게 고장이 발생 한다. 이러한 하역장비의 고장은 기계적 피로도 누적, 전동기 수명단축, 제어시스템 손상, 와이어로프 수명단축, 하역작업자의 안전성 위협과 같은 문제를 항상 내포하고 있다.

본 논문에서는 컨테이너 터미널 생산성 향상을 위해 하역장비의 특성에 맞는 철저한 예방보전을 실시하여 하역작업중에 발생하는 고장을 방지하고 사고를 미연에 방지함으로써 하역생산성을 높이는 방안을 제시하고자 한다. 그리고 고장을 미리 예지함으로써 고장발생을 최소화하여 컨테이너 터미널의 생산성 제고와 하역장비의 신뢰성을 높이고 궁극적으로 컨테이너 터미널의 전체 생산성을 높임으로써 대외 신인도를 높이는데 기여하고자 한다.

1.2 연구내용과 구성

항만의 경쟁력을 높이기 위한 연구가 활발히 진행되고 그 연구 결과가 발표되고 있지만 항만사업은 토목공사에 많은 시간과 자본을 필요로 하는 국가기간사업으로 주로 민간기업에서는 SOC 전담부서를 운용하여 수익을 높이려는 목적으로 항만사업에 컨소시엄 형태로 참여하고 있다.

항만사업은 토목, 항만시설과 하역장비로 구분하고 있으며, 현재의 하역장비의 기술은 운전 자동화를 위한 제어기법을 향상시키는데 목적을 두고 있으므로 차세대형 항만운영에는 적절하지 못하다. 따라서 차세대형 자동화 기법으로 운영중인 하역장비와 신규 제작되는 하역장비에 보전개념을 적용하여 고장발생 횟수를 줄이고 가동률을 높혀 미리 고장을 예견하여 대비하고 고장이 발생하는 경우에 신속하게 대처하여 생산성을 높이는 방안으로 하역장비의 신뢰성 향상과 컨테이너 터미널 내에서 하역장비운영의 신뢰성을 높이는 방안을 제시하고자 한다.

본 논문은 부산항 "H" 터미널의 2005년 생산성 자료를 이용하여 하역작업중단비율을 분석하였다. 또한 분석한 자료와 동일한 시기의 고장과 예방보전작업을 통해 갠트리 크레인의 기계와 전기분야의 고장발생비율 및 수리시간비율을 산출하였으며 각 하역장비의 동작별 고장과 수리시간 비율을 기계와 전기분야로 나누어 나타내었고, 이를 동작별 및 시간별로 고장을 분석하였다. 본 논문에서는 상태공간내에서 하역장비의 고장예방보전수리 결정에 관하여 제안하였으며 관측기법에 의해 고장진단을 실행하여 시뮬레이션을 통하여 유효성을 확인하였다.

본 논문의 구성은, 제1장에서는 연구배경 및 목적으로 보전의 중요성과 고장진단의 필요성, 하역장비의 신뢰성 및 생산성 관련, 문제점 및 본 연구의 필요성에 대하여 논하였다. 제2장에서는

컨테이너 터미널 하역장비의 운전특징, 모니터링의 필요성과 각 하역장비의 기술시방, 예방보전특징, 점검항목, 각 하역장비의 고장요소와 조치방안, 수리시간에 대해 기술하였다. 제3장에서는 하역장비의 사고사례에 대해 배경, 고장분석을 통해 예방보전과 사후보전의 중요성을 언급하였고 또한 보전관리에 대한 내용으로 예방보전과 사후보전에 대해 기술하였다. 그리고 고장의 이론적 분석을 통한 고장률을 정의하고, 이를 하역장비의 단위 구성품의 고장률을 나타내어 하역장비의 보전성과 가동성을 정의하였다. 일정기간 동안의 생산성을 통해 고장률을 분석하여 고장의 종류와 형태에 대해 정의하였으며 각 하역장비의 보전을 위한 고장률 및 고장확률밀도를 고장의 육조곡선으로 나타내어 기술하였고, 이를 하역장비의 평균수명과 평균고장, 하역장비의 보전성과 가동성으로 나타내었다.

제4장에서는 컨테이너 터미널의 생산성평가 경향과 측정모형으로 하역장비의 고장률이 생산성에 미치는 영향과 하역장비의 일정기간 동안의 생산성 분석을 통하여 선석접안율, 총선석생산성, 순선석생산성, 총장비생산성 및 순장비생산성으로 기술하였다. 제5장에서는 보전주기 개선방법에 대하여 논하였고, 보전의 동향과 분석된 하역장비의 고장 자료를 이용하여 상태공간 기법에 의한 시뮬레이션을 통하여 생산성의 향상 결과를 나타내었다.

제6장에서는 본 연구의 결론으로써 하역장비보전의 다양성을 통해 생산성을 높이는 방안과 하역장비의 무인화 시대에 대비한 보전의 체계적인 시스템구축의 중요성을 나타내었다. Fig. 1.1에 본 논문의 연구 흐름도를 나타내었다.

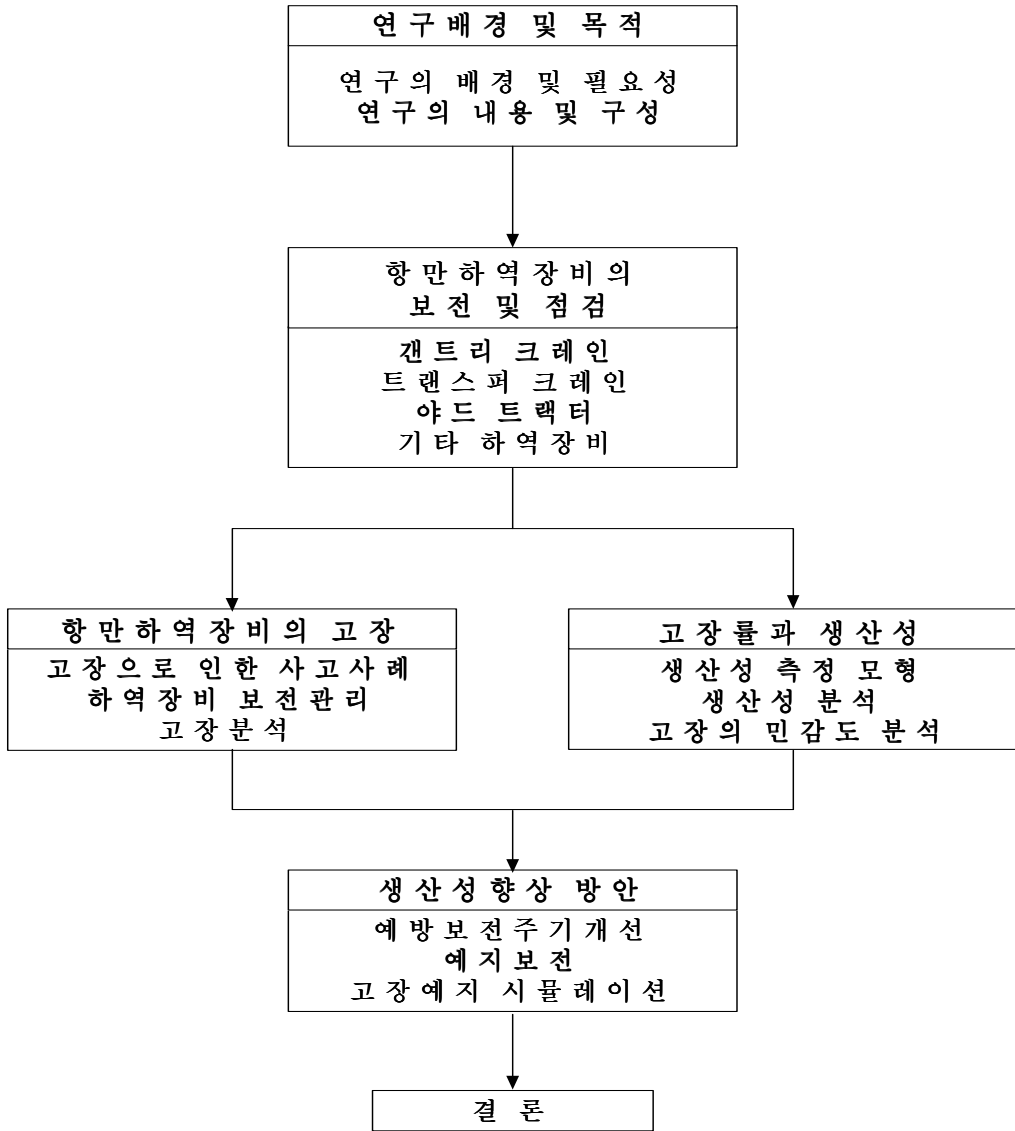


Fig. 1.1 Flow of study for this thesis

제 2 장 하역장비 보전 및 점검

2. 1 개요

컨테이너 터미널의 하역생산성은 단위시간당의 컨테이너 처리량으로 판단하게 되며 이러한 생산성은 하역장비의 가동시간과 밀접한 관계를 가진다. 하역장비의 가동시간 중에 고장 없이 운영이 되는 것은 컨테이너 터미널 생산성을 높이는 데 중요한 요소이다. 최근에 유가급등으로 엔진을 사용하는 하역장비는 연료비 부담이 많아 대기시간을 줄이려는 노력이 절실하고 하역장비의 고장은 대기시간이 증가하여 하역생산성에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 대기시간의 감소는 운영사마다 큰 화두로 떠오르고 있으며 하역장비 제작사는 유류비 부담을 모티브(Motive)로 하여 연료를 절감할 수 있는 제어시스템을 개발하는 데 많은 투자와 연구가 이루어지고 있다.

하역장비의 가동성과 효율성을 높이고자 다양한 방법을 시도하고 있으나, 하역장비의 대기시간에 의해 하역장비의 가동성과 효율성을 평가하고 있으며, 각 터미널 운영사에서는 하역장비의 고장은 필연적으로 발생된다.

컨테이너 터미널에서 실제 하역을 담당하는 하역장비의 예방보전과 점검은 터미널 운영사에 있어서 중요한 부분을 차지하고 있다. 일반적으로 예방보전이라 하면 정해진 주기에 따라 하역장비의 고장이 발생할 수 있는 부분을 미리 찾아서 사전에 방지하는데 그 목적이 있다.

대표적인 예방보전의 점검항목으로 전동기를 포함한 구동부의 윤활유 주유, 마모, 감속기 조립체의 이상 소음 및 진동, 와이어로프, 브레이크 마모상태, 전기절연상태, 스프레더의 콘, 플리퍼의 균열 또는 변형, 각종 실린더 변형 및 작동유 누유와 같은 일상적인 부분들을 들 수 있다. 또한 고장보전이 예방보전과 다른점은 가동중에 일어나는 고장으로써 수리시간의 지연은 화물의 대기시간을 초래하게 된다. 하역장비의 고장은 언제 발생할지 예측하기 대단히 어려운 문제이므로 적정한 양의 예비부품을 확보하여 고장에 대비하고 숙련된 보전요원의 신속한 조치능력을 필요로 한다. 하역장비의 고장보전시간, 보전후 시운전시간 등을 감안하여 하역장비 재가동에 대한 신속한 판단이 있어야 하고 예비하역장비로 대처하는 것이 정확한 결정이지만 현실적으로 많은 수의 하역장비를 보유하고 있지 않고 하역작업위치를 고려할 때 가능한 빠른 시간 내에 보전작업을 마쳐야 하는 부담이 있다. 따라서 예방보전을 통하여 고장을 사전

에 미리 막는 것이 최선의 방법이다.

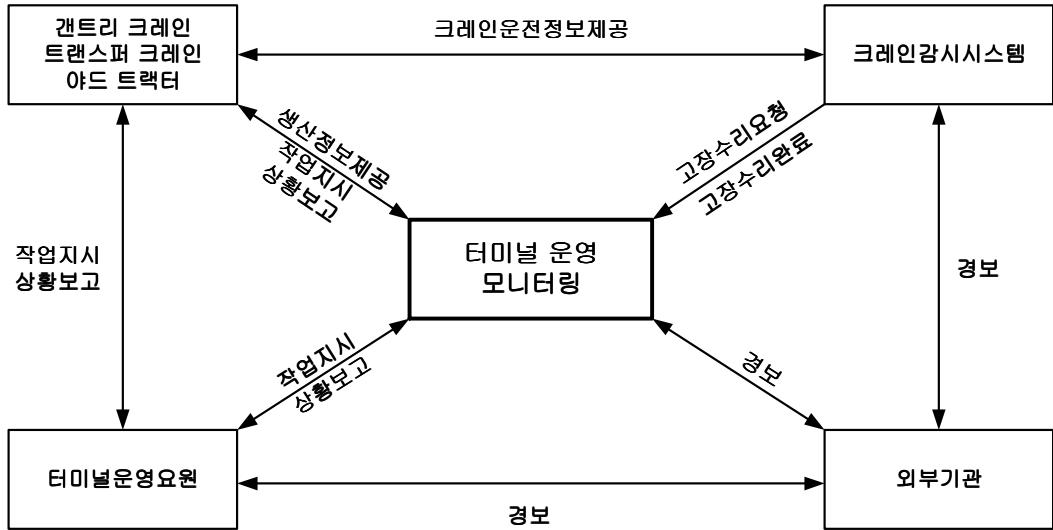


Fig. 2.1 Configuration of container terminal cargo working

Fig. 2.1은 컨테이너 터미널 운영 부서간의 하역작업 흐름에 따른 상호 관계를 나타낸 것이며, 그림과 같이 운영되어야 이상적인 하역작업 상황이지만 크레인감시시스템과 터미널운영모니터링은 서로 연계가 되어 있는 경우는 극히 드물다. 그러나 운영효율을 높이기 위해 상호운영시스템 통합에 많은 노력을 하고 있다. 그리고 하역장비의 고장은 컨테이너 터미널의 전체 하역작업의 흐름을 멈추게 하는 결과를 초래하므로 하역장비의 신뢰성 향상은 생산성에 중요한 문제가 될 것으로 판단된다.

2.2 간트리 크레인

간트리 크레인의 구조를 살펴보면 Fig.2.2와 같다.

간트리 장치(Gantry equipment)의 보기(Bogie)는 8대 또는 16대의 전동기로서 대부분 16조의 차륜을 구동하여 계류 및 작업을 시작할 때 알맞는 작업위치에 정차하는 기능을 갖고 있으며 자연현상과 같은 풍압에 의해 밀리는 것을 방지하기 위하여 레일 클램프(Rail clamp) 또는

휠 클램프(Wheel clamp), 앵카(Anchor) 및 타이타운(Tie down)이 설치되어 있다.

트롤리 장치(Trolley equipment)는 전동기의 정·역회전에 의해 와이어로프를 통하여 트롤리 하부에 설치된 스프레더에 운송물을 매달아 바다 또는 육지쪽으로 이송시키는 장치로 구동부는 기계실 내에 설치되어 있다. 호이스트 장치(Hoist equipment)는 전동기의 정·역회전에 의하여 기계실 내에 있는 와이어드럼(Wire drum)에 감겨있는 와이어로프를 통하여 스프레더에 매달린 운송물의 수직운동을 하는 장치로 스프레더는 트롤리의 수직방향에 호이스트 와이어로프에 의해 매달려 있다.

일반적으로 하역작업을 시작할 때 주행으로 접안 해 있는 본선의 홀드(Hold)에 정확히 맞춘 다음 본선의 주 작업은 트롤리 대차와 호이스팅 동작과 병행운전으로 홀드 단위로 작업을 한다.

스프레더 동작에는 크게 3가지로 분류할 수 있다. 첫째로 컨테이너 네 모서리에 콘(Con)을 끼워 90°로 회전하여 잠그고 풀어주는 트위스트 록(Twist lock) 기능, 둘째로 컨테이너를 잘 집을 수 있도록 네 모서리에 가이드 역할을 하는 플리퍼(Flipper) 기능, 셋째로 국제규격의 컨테이너 길이(20, 40, 45피트)에 맞출 수 있도록 스프레더를 수축, 확장 동작을 의미하는 텔레스코픽(Telescopic) 기능이 있다. 최근에는 20피트 컨테이너 두개를 동시에 취급이 가능한 트윈 트윈티(Twin Twenty) 스프레더가 신규 하역장비에 채택되고 있다.

이외에 로프 텐서너(Rope tensioner) 또는 카트너리(Catenary) 시스템은 트롤리 와이어로프에 장력을 주어 와이어로프와 트롤리 대차와의 간섭을 방지하여 운전을 원활히 하는 장치이며 틸팅장치(Tilting device)는 바르게 놓여있지 않은 컨테이너를 집어 올리기 위해 별도의 주동작 없이 스프레더를 좌우(Trim), 전후(List), 수평회전(Skew)이 가능하도록 하는 장치로서 트롤리 거더(Trolley girder) 후부에 유압장치를 설치하여 실린더를 전·후진하여 동작하거나 최근에는 붐 팁 끝단에 기어드 전동기(Geard motor)를 사용하여 움직이는 형태로 바뀌어 가고 있다.

또한 거더 후부에는 갑작스런 과부하를 방지하는 안티 스내그(Anti-snap) 동작을 하기 위한 실린더가 설치되어 있다. 붐 랫치(Boom latch)는 붐을 올리고 내릴 때 훅(Hook)를 이용하여 붐을 안전하게 걸어들 수 있는 장치이며 컨테이너 하역작업을 마치고 본선이 선석으로 이탈하거나 다른 본선이 선석에 접안할 때 본선의 마스트(Mast)가 컨테이너 크레인의 붐에 충돌하지 않도록 하기 위한 것이다. 컨테이너 선박은 물류비 절감과 수송능력을 향상하기 위해 초대형화(Super post panamax)되고 있으며 이에 따라 갠트리 크레인도 22열로 대형화 되고 있다. 갠트리 크레인의 구조는 A형(A-type)으로 제작이 되어 왔지만 최근에는 수정 A형으로 싱글 트롤리

(Single trolley) 형태가 우리나라 갠트리 크레인의 전체를 차지하고 있다.

Fig. 2.2는 수정 A형 싱글 트롤리형 갠트리 크레인의 구조를 나타낸 것이다. 최근에는 생산성을 높이기 위해 이러한 기본 형태에서 변형된 더블 트롤리(Double trolley)형의 변형된 형태의 갠트리 크레인이 제작되고 있다(하태영, 2004).

Table 2.1은 갠트리 크레인 각부 구조와 일반적인 용어에 대하여 설명하고 있으며 Table 2.2는 최근에 제작되고 있는 슈퍼 포스터 파나막스급 갠트리 크레인의 제원에 대해 설명하였다.

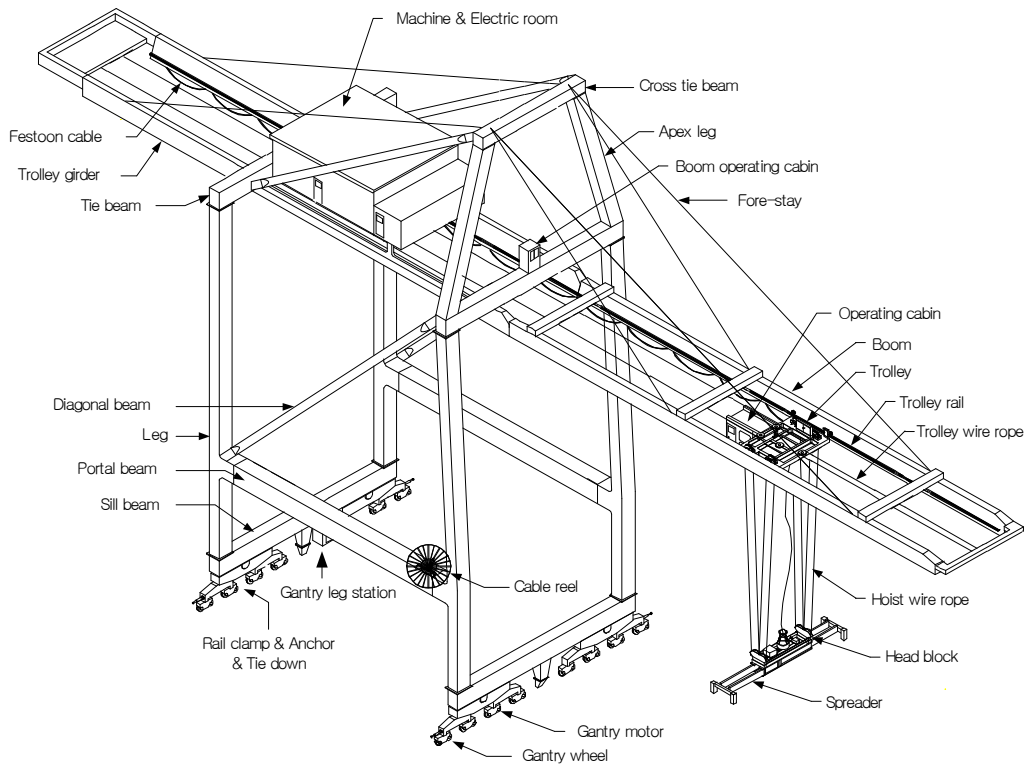


Fig. 2.2 Gantry crane structure

Table 2.1 Items of generalized gantry crane system

번호	용어	구조 설명
1	Travelling	크레인 전체가 좌우로 이동
2	Traversing	횡행 대차를 야드에서 선박으로 전후 이동
3	Hoisting	스프레더가 상하로 이동
4	Boom hoisting	붐 장치의 Up, Down 동작
5	Portal front leg	크레인 전단을 지지하는 기둥
6	Portal rear leg	크레인 후단을 지지하는 기둥
7	Sill beam	Column을 좌우로 잡아 주는 역할
8	Portal beam	Column을 전후로 잡아 주는 역할
9	Tie beam	Column 상부를 좌우로 잡아 주는 역할
10	Diagonal beam	Column을 위에서 아래로 대각으로 잡아주는 역할
11	Super structure	상부에서 Column을 연결하여 잡아주는 역할
12	Cross tie beam	크레인 상부 지지
13	Boom	상부 전후를 지지 및 트롤리 대차 이동 경로
14	Girder	크레인 후부 지지
15	Fore stay	전단 Boom 지지
16	Back stay	트롤리 Girder 지지
17	Checker room	언더맨(Under man) 작업실
18	Boom operating room	붐 운전실
19	Operating room	하역작업을 하기 위한 운전실
20	Machine room	각종 전동기 및 구동부 내장(전기실 포함)
21	Tie down	크레인 전도방지 장치
22	Head block	스프레더를 연결하기 위한 중간 매개체
23	Trolley	운전실과 스프레더를 매달고 횡행하는 장치
24	Anchor	태풍 등 비상시 크레인 고정장치
25	Bogie	주행부 기계구조물
26	Cable reel	전원 공급장치
27	Clamp	강풍에 의한 크레인 전도 및 폭주방지 장치
28	Rope tensioner,	트롤리 운전이 방해가 되는 와이어로프 장력유지 장치
29	Tilting device	스프레더 좌우, 전후, 시계 반시계 방향 운전 장치
30	Boom latch	붐 권상 운전 종료시 붐을 고정시키는 장치

Table 2.2 General specification of super post panamax gantry crane

번호	시방서 설명 및 기준	사양
1	정격하중(스프레더 밑에서)	정격하중 65ton
2	바다쪽 도달거리(바다쪽 레일 중심기준)	최소 63m
3	육지쪽 도달거리(육지쪽 레일 중심기준)	최소 20m
4	상방 권상고도(갠트리 레일 상면기준)	최소 40m
5	하방 권상고도(갠트리 레일 상면기준)	최소 19m
6	전체 권상고도	최소 59m
7	갠트리 레일 간격(Span)	30.5m
8	갠트리 레일 표고	약+4.0m
9	권상속도(정격하중/무부하)	90/180m/min
10	트롤리 횡행속도	240m/min
11	갠트리 주행속도	60m/min
12	붐 권상, 권하 소요시간	각 5분
13	레그간의 내측 간격	최소 18.3m
14	포탈 빔 통과높이	최소 16.5m
15	주행방향 크레인 폭(범퍼 끝에서 범퍼 끝까지)	최대 27m

Table 2.3 Distribution of gantry crane power source

번호	항목	전원의 종류	비고
1	공급전압	AC6,600V, 60Hz, 3 ϕ	입력전원
2	직류전동기	DC450V	직류전동기 구동전원
3	교류전동기	AC440V, 60Hz, 3 ϕ	교류전동기 구동전원
4	브레이크	AC440V, 60H, 3 ϕ , DC220V	브레이크 구동전원
5	제어회로	DC220V, DC24V AC220V, AC110V 60Hz, 1 ϕ	제어전원
6	조명, 기타	AC220V, 60Hz, 1 ϕ AC110V, 60Hz, 1 ϕ	조명전원

갠트리 크레인의 전원은 한전에서 공급되는 안정된 육상전원을 사용한다. 그러므로 선석에 따라 조금은 차이가 나지만 케이블 릴(Cable reel)에 감긴 고압케이블 길이만큼 크레인이 안벽을 따라 움직인다. 보통 주행거리는 좌우 약 300m정도 이동이 가능하도록 제작된다. 기계실 내에 설치된 수·배전반에서 사용전압으로 변환하여 전동기와 컨트롤 전원으로 분류하여 각 부분에 공급한다. Table 2.3은 갠트리 크레인에 인가되는 전원을 나타내고 Fig. 2.3은 신항에 설치된 갠트리 크레인의 모습이다.



Fig. 2.3 A view of gantry crane

2.2.1 갠트리 크레인의 보전

갠트리 크레인은 본선작업에 주로 투입되는 하역작업의 대표적인 장비라고 할 수 있다. 육지에서 본선으로 그리고 본선에서 육지로 적화·양화작업이 이루어지는 가장 중요한 하역장비이다. 갠트리 크레인의 고장은 짧게는 몇 분에서 길게는 몇 시간까지 또는 야간에 발생하는 고장은 매우 긴 시간동안 하역작업이 중단되는 경우도 발생한다.

일반적인 보전은 예방보전과 수시점검에 의해 빈번하게 이루어진다. 고장발생시 미치는 영향이 대단히 크므로 예방보전에 매우 큰 비중을 두게 된다. 가동중 전동기의 경우 고속회전시 발생하는 이상 소음이나 진동, 과전류가 흐를 때 발생하는 소음이 주 점검 대상이 된다.

기계, 전기분야 예방보전은 하역작업에 투입되지 않는 휴지시간에 주로 이루어지며 기계의 예방보전은 윤활유 급유와 와이어로프 점검이 많은 부분을 차지하고 있다. 윤활유 급유는 계획된 일정에 따라서 급유를 하지만 정해진 기간이나 조건보다는 자체적인 계획에 따라 행하여진다. 와이어로프는 제작사의 교체 권장시간보다는 수시로 육안점검과 보전요원의 촉감에 의한 점검으로 이루어지는 경우가 많아 시간과 위험성을 많이 내포하고 있다. 감속기, 시브 등 회전운동을 하는 장치들은 하역작업중 파손이 발생할 경우 작업중단과 교체시간이 많이 소요되므로 수시점검이 매우 중요하다.

전기분야의 예방보전은 계측기기를 사용하는 경우가 많고 기계분야는 육안점검이 많기 때문에 점검이 용이하다는 장점이 있는 반면에 고장이 발생하면 수리기간이 상당히 많이 소요되는 것이 특징이다. 전기분야는 갠트리, 호이스트, 트롤리, 붐 호이스트 전동기와 같이 동작을 많이 하는 전동기와 속도제어기, 대용량 전자접촉기, 부하측정장치, 고압반, 보조전동기, 비상정지장치 등을 위주로 보전을 실시하게 된다. 각각 주 동작 전동기의 냉각전동기 필터교체, 전동기 절연상태와 전동기 자체의 문제점 위주로 보전이 이루어진다.

2004년 이후 신규 제작되고 있는 갠트리 크레인은 주 동작 전동기가 직류전동기에서 교류전동기로 바뀌어 제작되고 있지만 일부 운전자들은 미세 운전을 해야 하는 상황에서는 민감한 제어 감도를 가지고 있는 직류전동기를 선호하고 있다. 아직도 컨테이너 터미널의 갠트리 크레인에서 사용되고 있는 직류전동기의 경우는 전동기 점검시간이 예방보전의 대부분을 차지하고 있다. 직류전동기는 특성상 브러시로 인한 오염이 전동기 내부에서 필연적으로 발생하기 때문에 매우 정밀한 예방보전과 점검이 이루어져야 한다. 내부오염을 제거해야하고 정류자 먼지의 상태를 철저히 점검을 해야 한다.

하역작업중에는 주로 호이스트, 트롤리 전동기가 가장 많이 사용된다. 하역작업중 전동기의 손상이 발생할 경우 많은 교체시간이 소요되고, 호이스트 전동기는 절연저항이 낮을 경우에 운전중 전류가 갠트리 크레인 몸체를 타고 흘러서 충분한 토크를 발생시키지 못해 권상운전 명령이 주어져도 스프레더가 흘러내려 화물의 손상과 인명사고로 연결될 수도 있다.

Table 2.4는 갠트리 크레인의 기계분야에 관련된 예방보전항목을 그룹별로 나타낸 것이다. 기계분야의 주전동기 점검은 이상한 소음으로 전동기 수평유지에 문제가 있는 가를 확인하는

것이다. 기어박스, 휠, 커플링, 와이어드럼은 고장발생시에 소음과 진동으로 나타난다. 와이어 로프는 단선과 마모율을 가지고 교체 여부를 판단하게 된다.

Table 2.4 Distribution of prevention maintenance group of gantry crane mechanical part

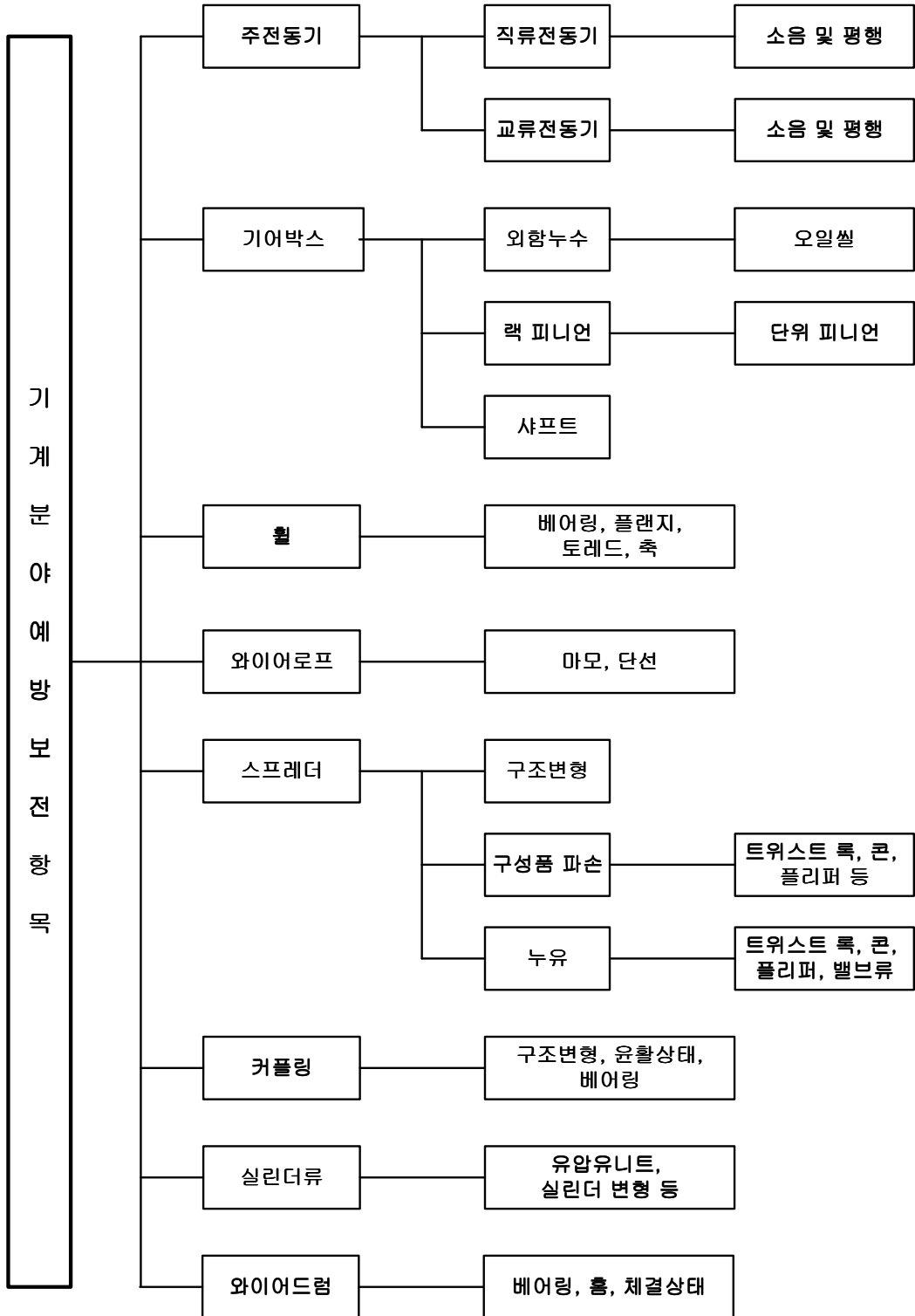


Table 2.5 Distribution of prevention maintenance group of gantry crane electrical part

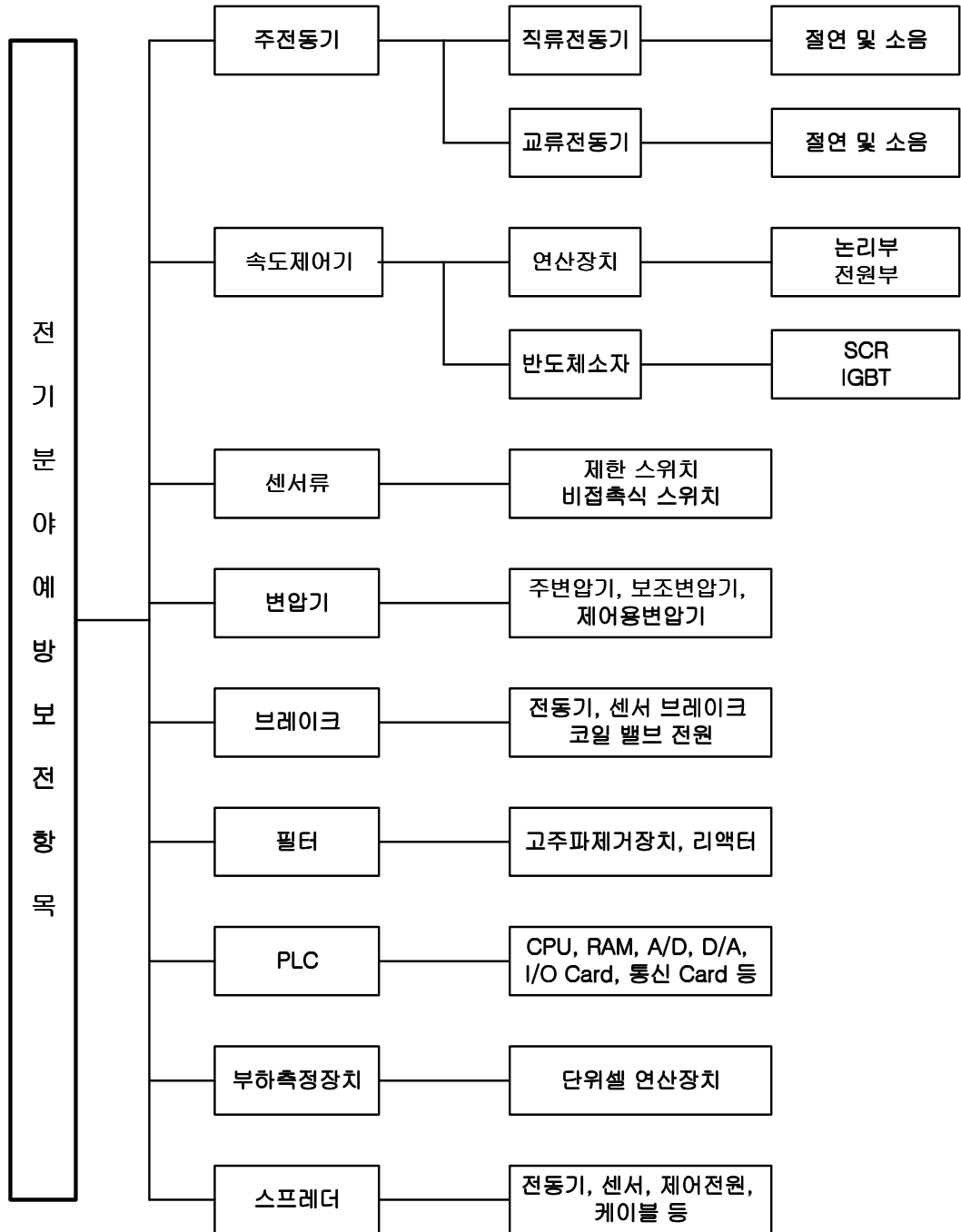


Table 2.5는 갠트리 크레인의 전기분야에 관련된 예방보전항목을 그룹별로 나타낸 것이다. 주전동기는 절연측정과 고속회전시 이상한 소음을 주로 점검하여 절연파괴 등으로 나타나는

과전류의 소음을 확인하기 위한 것이고 속도를 제어하는 속도제어기는 연산장치와 입·출력값이 오차범위 내에서 작동하는가에 대한 여부와 각 파라미터(Parameter)의 설정치 확인, 통신 상태, 반도체 소자의 고유저항값을 점검하게 된다. 또한 PLC에는 각 외부장치에서 들어오는 연산정보가 일정한 형태로 전송이 되는지 부하측정장치는 실제 컨테이너화물의 중량을 나타내는지 여부를 확인한다.

2.2.2 갠트리 크레인 점검

Table 2.6 및 Table 2.7과 같이 계획에 의한 예방보전과 일상점검에 많은 시간과 노력을 해도 가동중 고장이 발생한다. 단지 예방보전은 가동중 고장을 최소화하려는 일부분으로 생각해야 한다. 예방보전은 하역장비의 휴지시간에 이루어지므로 시간적인 여유가 있지만 고장보전은 시간과의 싸움이라고 할 수 있다. 가동중에 발생하는 부분이므로 고장보전의 최대 관건은 신속한 고장원인진단과 조치, 시운전이 이루어져야 하는 특징을 가지고 있다. 이러한 빠른조치를 하는데는 상당한 경험과 노하우(Know-how)를 가진 보전기술포의 노력이 요구된다.

중량물을 취급하는 하역장비의 특성상 고장의 진단과 조치, 시운전과정에서 일어나는 사고를 염두에 두고 충분한 안전확보가 이루어져야 한다. 따라서 각 구성품의 특징을 면밀히 파악하지 않으면 신속한 조치에 상당한 어려움이 발생하게 되고 고장진단에서부터 범위를 좁혀 나아가기가 매우 힘들다. 가동중에 고장보전의 확율은 산술적으로 갠트리 크레인 설치후 1년 이내에 가장 많이 발생하지만 이 경우는 대부분이 사소한 고장들이 많다. 이러한 고장은 설치후 안정화되어가는 과정에서 발생을 한다. 그 후 상업운전이 본격화 되고 가동시간이 늘어나면서 발생하는 문제는 초기의 고장보다는 심각하다고 할 수 있다. 이때부터 부품의 피로도와 내구성과 직결된다. 각 부품마다 가동가능시간이 있지만 이전에 주로 고장이 발생한다.

종래의 각종 하역용 크레인은 시퀀스(Sequence) 회로로 이루어져 있고 전동기는 아날로그(Analog)방식으로 속도제어를 행하였다. 그러나 현재의 하역장비는 모든 동작과 보조장치들이 PLC에 의해 연산되고 마이크로프로세서(Microprocessor)와 단위모듈 상호간의 빠른 통신을 위하여 광통신을 사용하기도 하며 전동기 속도제어기는 SCR(Silicon Controlled Rectifier), IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) 등 스위칭 반도체를 이용한 디지털 연산(Digital logic)을 하므로써 응답속도와 정밀도에서 매우 높은 신뢰성을 가진다. 따라서 정밀 연산과 함께 제어를 하는 하역장비의 고장을 진단하고 고장보전을 하기란 쉽지 않은 일이다.

기계분야는 고장발생시 가동중단으로 인한 여파는 전기고장보다 매우 크다고 할 수 있으며

갠트리 크레인은 특성상 기계실에 많은 단위 구성품이 집중되어 있다. 또한 기계실을 제외한 다른 부분에도 많은 단위 구성품이 있으며, 특히 기계실에는 천장 크레인(Overhead crane)이 있지만 다른 장소에는 예비부품의 이동은 통로가 협소하고 기계 단위 구성품의 하중은 작게는 수십kg에서 크게는 수백kg의 중량을 가지므로 고장이 발생한 위치까지 이동하는 데 어려움이 있다. Table 2.6과 Table 2.7은 기계 및 전기분야 예방보전 항목을 나타낸 것이고 Table 2.8과 Table 2.9는 가동중에 발생하는 전기와 기계분야의 고장보전의 예를 나타낸 것이다. 특히 전기 분야 고장항목 중에는 단위 구성품의 이상이 발생하더라도 교체보다는 프로그램을 수정하는 방법으로 응급조치를 하여 가동하는 방법을 취하기도 한다.

Table 2.6 Items of prevention maintenance of gantry crane mechanical part and check

번호	예방보전품목	예방보전점검항목	비고
1	감속기	외함, 기어, 키, 축, 베어링, 오일씰, 작동유 누유, O-ring, 볼트, 너트 점검	이상발생시 교체 후 시운전
2	와이어로프	로프 클램프, 마모, 단선상태 점검	이상발생시 교체
3	시브	소음, 진동, 마모점검	이상발생시 교체 후 시운전
4	로프텐서너	프레임, 휠, 베어링, 작동유 누유, 오일씰 하이드로 유닛 점검	이상발생시 교체 후 시운전
5	엘리베이터	랙 연결부위 윤활 상태, 진동, 소음, 브레이크 점검	이상발생시 교체 후 시운전
6	붐 힌지	윤활상태, 조립체 진동 점검	이상발생시 교체 후 시운전
7	스프레더	유압펌프 진동, 소음, Twist Lock간 거리, 헤드블록 균열 및 변형, 하이드로 유닛점검	이상발생시 교체 후 시운전
8	붐 옆퍼 힌지	조립체 이상진동, 소음점검	이상발생시 교체 후 시운전
9	휠	플랜지, 트레드, 축, 베어링 마모, 진동, 소음 점검	이상발생시 교체
10	캘리퍼 디스크 브레이크	토오크 설정치 이상 유무, 편마모 점검	이상발생시 교체 후 시운전
11	윤활유	윤활유 주입상태 점검(약 400곳)	정기 주유
12	커플링	조립체 이상 유무, 소음, 진동, 윤활상태 점검	이상발생시 교체 후 시운전
13	틸팅장치	소음, 진동, 누유, 위치 값, 실린더, 하이드로 유닛 점검	이상발생시 교체 후 시운전
14	와이어 드럼	흙, 용접부, 베어링 점검	이상발생시 교체 후 시운전
15	페스톤시스템	고무범퍼, 와이어로프, 행거, 베어링 점검	이상발생시 교체 후 시운전
16	포스테이	링크 핀, 볼트 너트, 윤활유 주입상태 점검	이상발생시 교체 후 시운전
17	휠 브레이크	디스크 라이닝, 레버 로드핀, 볼트 너트 점검	이상발생시 교체 후 시운전
18	트롤리 범퍼	본체 변형파손, 볼트 너트, 윤활유 누유 점검	이상발생시 교체 후 시운전
19	붐 비상 브레이크	압력저하, 작동유 누유, 디스크, 압력밸브 점검	이상발생시 교체 후 시운전
20	케이블 릴 시스템	릴 변형, 파손, 롤러고착 점검	이상발생시 교체 후 시운전

Table 2.7 Items of prevention maintenance of gantry crane electrical part and check

번호	예방보전품목	예방보전점검항목	비고
1	주동작 전동기	온도, 소음, 진동, 절연, 아크, 윤활유, 내부오염 상태점검	이상발생시 교체 후 시운전
2	보조 전동기	소음, 절연상태 점검	이상발생시 교체 후 시운전
3	속도제어기	반도체 소자, 내부 PCB 점검	이상발생시 교체 후 시운전
4	대용량 M/C	Tip 마모 상태점검	이상발생시 교체
5	부하측정장치	부하 연산값 측정	이상발생시 교체 후 실부하 측정
6	스프레더	기능, 제한스위치, 제어전원, 케이블 소손 점검	이상발생시 부품교체 및 스프레더 교체
7	센서류	동작상태 점검	이상발생시 교체
8	케이블 류	외피 소손 점검	이상발생시 교체
9	슬립링	아크 발생 여부 점검	이상발생시 교체 후 시운전
10	주변압기	절연측정, 부스바, 애자청소	이상발생시 교체 후 시운전
11	보조변압기	절연측정, 부스바, 애자청소	이상발생시 교체 후 시운전
12	고조파제거장치	애자청소	이상발생시 교체 후 시운전
13	항공장애등	전원, 축전지 상태, 조도센서 점검	이상발생시 교체 후 시운전
14	엘리베이터	진동, 소음, 브레이크 점검	이상발생시 교체 후 시운전
15	전자브레이크	전원, 간극 점검	이상발생시 교체 후 시운전
16	캘리퍼디스크 브레이크	동작여부, 디스크 편마모, 간극점검	이상발생시 교체 후 시운전
17	유무선 통신장치	프로토콜, 통신단위 모듈, 통신상태 점검	이상발생시 교체 후 시운전
18	PLC 단위모듈	단위모듈별 이상여부 점검	이상발생시 교체 후 시운전
19	조명장치	점등불량조명, 안정기 및 램프 점검	미 점등시 교체
20	냉·난방장치	냉·난방 상태점검	이상발생시 교체 후 시운전

Table 2.8 Electrical part fault items of gantry crane

번호	고장요소	추정원인	조치내용	수리예상시간 (분)
1	주동작 전동기	· 절연과괴 · 토크 저하	· 주동작 전동기 교체	180
2	보조전동기	· 절연과괴 · 전동기 특성 변화	· 보조 전동기 교체	60
3	PLC	· 단위모듈 불량 · 통신 불량	· 단위모듈 교체 · 통신선로 교체	20
4	속도 제어기	· 반도체 소자 불량 · 연산장치 불량	· 반도체 소자 교체 · 연산 장치 교체	60 30
5	부하측정장치	· 단위모듈 불량 · 연산장치 불량	· PLC입력부분 분배 · 연산장치 불량	20 20
6	붐 상·하 운전 시 흔들림	· 붐 페루프 단위장치 불량 · 붐 전동기 특성변화	· 단위 모듈 교체 또는 프로그램 수정 · 붐 전동기 교체	30 60
7	위치제어 불량	· 단위모듈 불량 · 허용오차 과다발생	· 단위모듈 교체 · 프로그램 수정	30 30
8	틸팅장치 불량	· 위치센서 불량 · 위치제어 연산장치 불량	· 위치센서교체 또는 프로그램 수정 · 위치제어연산장치교체	30 30
9	마그네틱 브레이크	· 코일소손 · 공극(Air gap)넓어짐	· 코일교체 · 공극조정 또는 신호라인 Common	30 5~30
10	케이블 릴 장치	· 과장력, 저장력 · 케이블 흘러내림 · 브레이크 디스크	· L/S 교체, 드라이브 조정 및 교체 · 드라이브 조정 및 교체 · 전자브레이크 코일교체, 전원라인 점검	20~30 30 60
11	휠 브레이크	· L/S 불량 · 압력센서 불량 · 전동기 불량	· L/S 교체 · 압력센서 교체 · 전동기 교체	20 20 40
12	캘리퍼 디스크 브레이크	· 감지센서 불량 · 전동기 불량	· 감지센서 교체 · 전동기 교체	20 40
13	스프레더	· 전동기 불량 · 감지센서 불량 · 밸브전원 불량 · 케이블 불량	· 전동기 교체 · 감지센서 교체 · 제어전원라인수리 · 스페어라인사용 및 교체	40 20 20~60 30~180
14	고압케이블 소손	· 고압케이블	· 고압케이블 교체	300

Table 2.9 Mechanical part fault items of gantry crane

번호	고장요소	추정원인	조치내용	수리예상시간 (분)
1	감속기	· 마모 · 진동	· 감속기내부 랙 피니언 교체	180
2	펌프	· 마모 · 진동	· 펌프교체	60
3	시브	· 마모 · 진동	· 시브교체	120
4	커플링	· 고정불량 · 충격완충장치 마모	· 커플링교체	60
5	휠	· 마모 · 진동	· 휠 교체	60
6	봄 비상 브레이크	· 펌프불량 · 압력저하	· 유압펌프 교체 · 압력라인 교체	90 30
7	페스톤 시스템	· 롤러 베어링 불량 · 연결로프 단선 · 레일균열	· 롤러 교체 · 연결 로프 교체 · 레일 교체	30 30 180
8	스트럭처 포스테이	· 윤활유 미주유, 고착 · 구조변형	· 윤활유 주유 · 정밀 진단	30 24시간
9	실린더류	· 실린더 구조변형 · 실린더 오일씰 마모 · 누유	· 실린더 교체 · 오일 씰 교체 · 리버 패킹 교체	120 30 30
10	케이블 릴 장치	· 릴 구조변형 · 디버터 구조변형 · 브레이크 디스크	· 릴 수정 또는 교체 · 디버터 수정 또는 교체 · 디스크 교체	60~180 60~120 60
11	휠 브레이크	· 압력저하 · 펌프불량 · 누유	· 압력센서 및 펌프 교체 · 펌프 교체 · 누유호스 및 부품 교체	30
12	와이어로프	· 마모	· 와이어 교체	120~360
13	브레이크	· 펌프 · 디스크 마모	· 펌프 교체 · 디스크 교체	60~90 30
14	스프레더	· 펌프 · 구성품 파손 · 구조변형	· 교체 · 교체 · 수리	30 30 500
15	횡행레일	· 직진도 불량 · 수평도 불량	· 교체 및 수리 · 교체 및 수리	120
16	주전동기	· 평형상태 · 진동	· 수정 · 수정	30~60 30~60

2.3 트랜스퍼 크레인

트랜스퍼 크레인은 일반적으로 T/C(Transfer Crane), T/T(Tanstainer), RTGC(Rubber tyred Gantry Crane)라는 명칭으로 불리어지며, 컨테이너 터미널의 야드와 내륙에 위치해 있는 CY(Container Yard) 또는 CFS(Container Freight Station)에 주로 설치되어 하역작업을 지원한다. 담당하는 하역작업은 갠트리 크레인의 본선지원과 야드 내 반입과 반출, 본선작업을 원활히 하기 위한 구내 이적에 주로 사용된다. 트랜스퍼 크레인의 특징은 디젤엔진과 교류발전기를 탑재하여 전원을 사용하기 때문에 고장빈도에서 불리한 하역장비이다. 또한 레일 위의 휠이 아닌 타이어방식으로 주행을 한다는 것이 다른 점이라고 할 수 있다.

트랜스퍼 크레인의 구조를 살펴보면 갠트리 장치는 4조의 차륜을 가지고 구동하여 주행동작을 하게 된다. 주행장치는 양쪽에 각 1기씩의 전동기가 대각으로 설치되고 별도의 전동기 출력축과 타이어구동 입력축에 맞물려 회전하는 체인이 설치되어 있다. 주행장치의 전동기와 브레이크는 일체형으로 만들어진 직류 또는 교류전자 브레이크를 사용하고 풍압에 의해 밀리는 것을 방지하기 위하여 주행 타이어에 각 1조씩의 고정장치가 설치되어 있다(손정기, 1997).

주행동작을 위해 지정된 통로가 마련되어 있으나 타이어를 사용하므로 일직선상으로 주행하기 위해 APIS를 사용하기도 한다. 그러나 야드 내 노면의 상태가 좋지 못하여 안전성을 높이기 위하여 스티어링(Steering)을 사용한다. 하역작업의 형태에 따라 야드 내에 원하는 장소로 이동하기 위해 타이어가 0~90°로 회전을 하게 된다.

휠 턴 장치는 엔진과 전기실 하부에 유압 시스템을 장착하고 안쪽과 바깥쪽에 실린더를 설치하여 당기고 미는 방식으로 타이어를 회전시킨다. 회전이 완료된 후에는 바퀴의 위치를 유지하기 위해를 잠금장치가 설치되어 있다.

횡행장치는 트롤리 하부에 설치된 스프레더를 매달고 수평방향으로 움직이고 야드 내 하역작업중 열(Row) 단위로 이동을 하도록 설계되어 있다. 이 동작은 거더 위에 설치된 레일을 따라 움직이며 전·후진시 트롤리 레일 끝단에 설치된 동작용 센서 또는 제한 스위치에 의해 저속과 정지를 할 수 있다. 자체전원은 부하변동이 심한 경우를 대비하여 자동전압조정장치(Automatic voltage regulator)와 속도제어기에 입력전원으로 사용하기 위해 리액터(Reactor)가 설치되어 있다.

스프레더 장치는 ISO 규격에 따라 20, 40, 45피트에 맞출 수 있도록 제작되어 있으나 일반적으로 45피트 컨테이너는 트랜스퍼 크레인의 수직운전 구간이 높지 않아 40피트로 설정하여

플리퍼를 사용하지 않고 45피트를 취급한다.

안티 스웨이(Anti-sway)는 트롤리 상부에 유압장치가 마련되어 4개의 드럼에 가해지는 압력에 의해 흔들림을 방지하는 장치로 되어 있으며 트롤리 급전장치는 페스툰 행거(Festoon hanger) 타입이며 횡행운전시 발생하는 베어링 소음과 케이블이 바람에 날려 구조물에 걸리는 현상으로 손상되는 사고가 가끔 발생을 한다. 이러한 사고는 보전시간이 장시간 소요되므로 에너지 체인(Energy chain)으로 최근에 많이 제작되고 있다. 에너지 체인은 바람의 영향을 작게 받는다는 특징은 가지고 있으나 많은 비용이 소요되고 케이블 소손시 교체 비용이 증가하고 설치가 까다로워 보전측면에서는 더 많은 시간이 소요되는 단점을 가지고 있다.

타이어 타입의 주행장치를 사용하기 때문에 타이어의 공기압력이 항상 일정하게 유지되어야 한다. 타이어는 주행 전동기가 설치된 쪽에 가장 가까운 위치의 타이어가 가장 많은 휠 로드(Wheel load)를 받게 되어 항상 공기압력이 가장 먼저 저하된다. 타이어의 상태가 불량할 경우 이퀄라이저(Equalizer)가 충격을 흡수하고 좌우측의 지면굴곡에 따라 움직이며 부하를 분산시키는 목적이지만 완벽하게 부하를 흡수하기는 어렵다.

따라서 휠 로드가 가장 많이 걸리는 부분의 타이어 마모는 물론이고 주행중 공기압력저하 또는 타이어 손상으로 인해 전복되는 사고가 발생할 우려가 있다. 또한 타이어에 이상이 발생하면 충격과 흔들림이 발생하여 운전자와 작업원에게 영향을 미칠 수 있으므로 중요한 문제점이라고 할 수 있다. 이러한 문제는 운전자에게 심리적 부담으로 작용하여 목표위치로 빠른 시간 내에 이동을 한다는 것은 현실적으로 어렵다. 그러므로 크레인이 분당이동속도를 만족하게 제작되었더라도 운전자 및 운영부서의 요구에 의해 속도를 하향 설정하여 사용하는 경우가 많다. 최근에는 야드의 적재 효율을 높이고자 4단에서 5단 적재를 하기 위해 레그를 연장하는 추세이다. 그러나 단순한 연장공사로 인하여 연결부위의 용접상태가 외부충격 또는 장시간 사용으로 기계적 피로도가 누적되어 연장부위의 크랙이 진행되어 부러지는 현상이 생길 수 있으므로 공사 계획 수립에 있어 충분히 고려해야 한다. Fig. 2.4는 트랜스퍼 크레인의 구조를 나타내고 있으며, Table 2.10은 트랜스퍼 크레인의 용어에 대한 설명이다.

트랜스퍼 크레인의 타이어 구조는 정격하중이 40.6Ton을 기준으로 하는 경우가 일반적이다. 갠트리 크레인과는 다르게 기계실이 없기 때문에 갠트리, 트롤리 전동기의 방수가 필수적으로 고려되어야 한다. Table 2.11은 트랜스퍼 크레인의 제원을 나타낸 것이다. Fig. 2.5는 야드 내에서 상·하차 작업에 사용되는 실제 트랜스퍼 크레인의 모습이다.

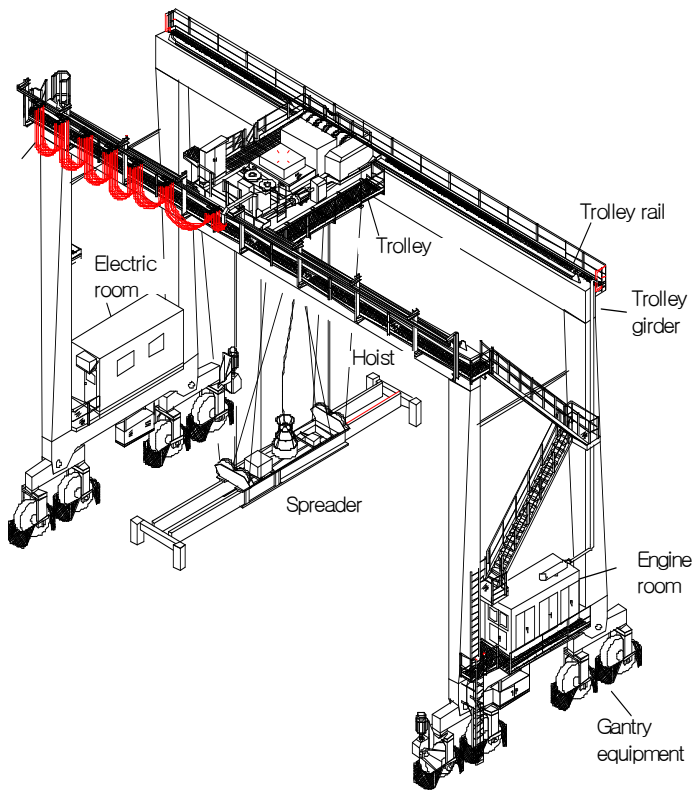


Fig. 2.4 Structure of transfer crane

Table 2.10 Items of transfer crane system

번호	항목	용어설명
1	Travelling	크레인 전체가 좌우로 이동
2	Traversing	횡행 대차를 작업에 따라 전후로 이동
3	Hoisting	스프레더가 상·하로 이동
4	Front leg	크레인 전단을 지지하는 기둥
5	Rear leg	크레인 후단을 지지하는 기둥
6	E-G set	엔진 발전기 세트
7	Pumpback register	수직운동 회생 운전시 발생하는 전력을 열로 소모
8	Festoon device	트롤리 동력 및 제어전원 공급
9	Sprocket	주행 타이어를 구동시켜주는 외측기어
10	Speed regulator	부하변동에 따른 엔진응답보상
11	Battery system	엔진 기동시 필요한 전원공급
12	Lug	트롤리 파손시 본체 낙하방지
13	Girder	크레인 좌·우 상부구조물
14	Travelling chain	주행 구동체인
15	Guard	크레인 충돌시 크레인 몸체보호
16	E-G room	엔진 발전기실
17	E room	각종제어, 연산장치가 설치된 전기실
18	Operating room	하역작업을 하기위한 운전실
19	Trolley	상부수직, 횡행 전동기, 브레이크가 설치된 구조물
20	Steering	주행 운전시 엔진축과 전기실축 주행을 일정하게 조정



Fig. 2.5 Cargo working view of transfer crane

Table 2.11 General specification of transfer crane

번호	항목	시방기준
1	정격하중(스프레더 밑에서)	정격하중 40.6Ton
2	간격바퀴 중심선 사이	최소 23.5m
3	레그 내측 간격	최소 22.0m
4	레그 외측 간격	최소 25.5m
5	권상고도	최소 15.2m
6	휠 베이스	최소 6.9m
7	권상속도(정격하중/무부하)	20/40m/min
8	횡행속도	70.0m/min
9	주행속도(정격하중/무부하)	90/134m/min
10	풍속(가동시/비가동시)	16/49m/sec
11	갠트리 주행속도	60m/min
12	휠 턴	실린더 방식
13	Cycle Time	40개/hr
14	Endurance	24시간 연속운전
15	엔진용량	550Hp이상

2.3.1 트랜스퍼 크레인의 보전

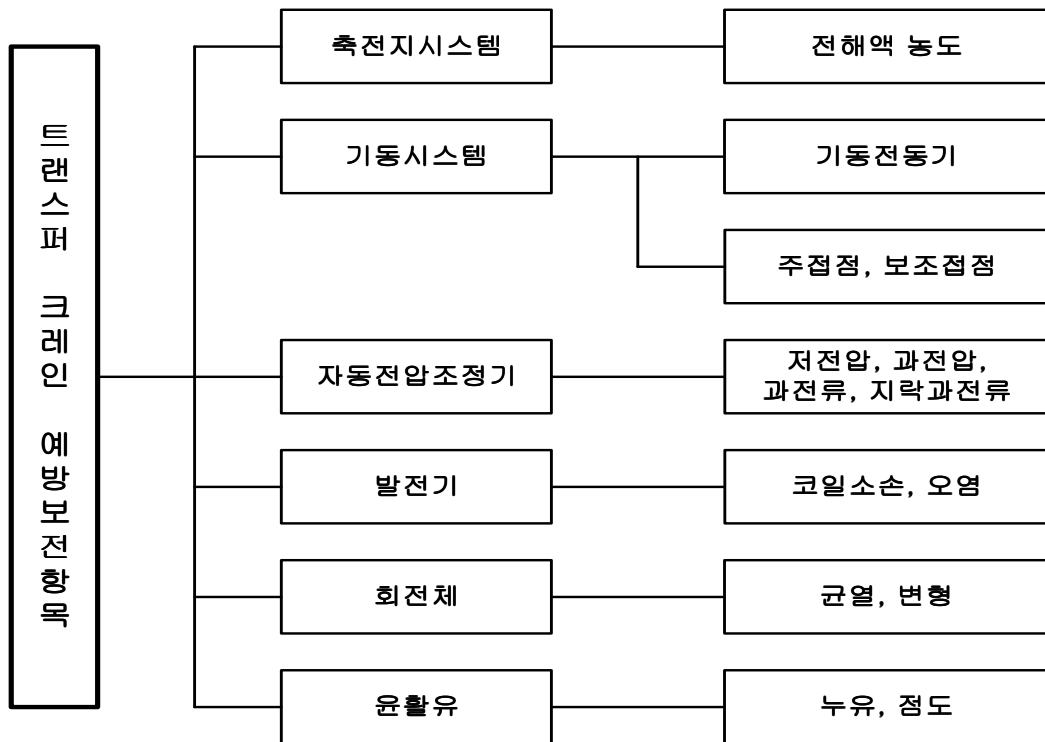
본선계획에 의해 트랜스퍼 크레인은 야드 트랙터를 매개체로 하여 갠트리 크레인에서 컨테이너화물을 야드 내에 적재하거나 적재된 컨테이너화물을 야드 트랙터에 실어 갠트리 크레인으로 보내게 된다. 고장 발생시 작업위치에 선적해야 할 컨테이너가 있다면 견인을 하여 다른 위치로 이동시켜야 하는 경우도 발생한다. 또한 선적해야 할 컨테이너가 열과 열 사이에서 다른 컨테이너보다 낮은 위치에 장치되어 있다면 응급처리가 불가능한 상태이다. 특히 엔진이나 발전기에 고장이 발생하면 전혀 움직일 수 없는 상황이 된다. 주행 전동기는 좌우측으로 각각 1기씩 설치되어 있으며 트롤리와 호이스트의 전동기는 각 1기씩 설치되어 있다. 따라서 주행 전동기의 어느 한쪽에 문제가 생기면 움직일 수 없기 때문에 고장이 발생하면 문제가 크게 되므로 주의를 기울여 대비해야 한다.

크레인의 원활한 주행을 돕기 위해 전동기 회전수를 측정하여 속도제어기에 신호를 전달하는 피드백(Feed back)시스템인 T/G(Tacho-Generator)와 엔코더(Encoder)가 주로 사용된다. 이 피드백 시스템의 고장 또는 오작동이 발생하면 스티어링 제어가 불량하여 한쪽으로 쏠리는 현상이 발생하게 된다. 전기실로 쏠릴 때는 엔진축과 야드에 적재된 컨테이너와의 간격이 매우 좁기 때문에 야드에 적재된 컨테이너와 충돌, 전복되어 화물이 손상되는 경우도 가끔 발생하게 된다.

트랜스퍼 크레인의 예방보전은 기계와 전기분야로 나누어지며, 예방보전은 컨테이너 터미널 내 하역작업의 형태와 하역작업에 투입되는 하역장비 댓수에 따라 본선작업과 관계없이 이루어지기도 한다. 기계분야 예방보전 항목은 기본적인 윤활유 급유, 와이어로프 점검, 유압 시스템의 작동유 상태 점검, 호이스트 와이어드럼, 감속기, 브레이크 등을 주로 점검하게 되며 자체 발전기 탑재로 인해 엔진과 발전기 항목이 추가되어 보전범위가 상대적으로 넓어진다. 전기분야 예방보전 항목은 전동기와 동력을 공급하는 발전기, 회생 운전시 발생하는 전력을 소비하는 저항기, 속도제어기, 대용량 전자접촉기, 부하측정장치, 주행운전시 정해진 통로를 따라 바르게 이동하기 위해서는 서로 대각으로 위치한 2기의 주행 전동기의 회전을 감시하고 조절을 하는 피드백 시스템 등을 주로 보전하게 된다.

Table 2.12는 기계 및 전기분야 예방보전 항목을 분류하여 나타낸 것이다. 단, 트랜스퍼 크레인은 갠트리 크레인과의 시스템적으로 제어방법이 동일하여 엔진-발전기만 나타낸다.

Table 2.12 Distribution of prevention maintenance group of transfer crane electrical and mechanical part



2.3.2 트랜스퍼 크레인의 점검

Table 2.12 및 Table 2.13의 예방보전점검 항목에 따라 정기적으로 점검을 실시하고 있지만 육안검사에 의존하고 있는 부분이 많다. 소모성 자재는 갠트리 크레인은 기계실에 보관을 할 수 있는 공간이 마련되어 있지만 트랜스퍼 크레인은 공간이 부족하여 보관을 할 수가 없다. 또한 보전에 관련된 기구들의 이동이 갠트리 크레인은 유지보수를 하기 위해 마련된 호이스트 장치, 와이어로프를 교체할 수 있는 전동기 등이 마련되어 있다. 이에 비해 트랜스퍼 크레인은 전적으로 보전요원의 인력에 주로 의존하고 있지만 최근에는 짐 크레인(Jib crane)의 형태로 자체에 보전용 크레인을 설치하는 경우도 있다.

Table 2.13 Items of transfer crane prevention maintenance and check

번호	예방보전항목	예방보전점검항목	비고
1	휠턴 시스템	작동유, 윤활유, 로드 핀, 센서, 밸브, 압력펌프 점검.	이상 발생시 관련 부품교체 후 시운전
2	엔진-발전기	자동전압조정장치, 동작 중 Shut Down 윤활유 누유, 냉각장치, 소음, 크로스헤드, 연료 분사기, 크랭크 샤프트균열, 각 제어장치결선 상태, 기동장치, 축전지전압 점검	이상 발생 시 관련 부품교체 후 시운전

트랜스퍼 크레인 은 외부환경에 노출되어 있는 단위 부품들이 많아 우천과 염분에 의한 절연 저하가 심하여 잦은 고장이 발생 한다. Table 2.14는 트랜스퍼 크레인 고장보전의 종류를 나타 낸 것이다. 단, 갠트리 크레인과 중복되는 항목은 제외하였다.

Table 2.14 Items of transfer crane fault maintenance

번호	고장요소	추정원인	조치내용	수리예상시간 (분)
1	엔진	· 엔진과열	· 냉각장치 교체	120
		· 크랭크 샤프트 파손	· 크랭크 샤프트 교체	150
		· 실린더 블록 파손	· 엔진교체	300
		· 기동불량	· 기동모터, 보조모터교체	30~60
2	발전기	· 저전압	· 계전기교체	30
		· 과전압	· 계전기교체	30
		· 자동전압조절장치	· 자동전압조절장치교체	30~60
		· 절연불량	· 발전기교체	300
3	휠턴 시스템	· 압력펌프	· 압력펌프교체, 전원점검	30~60
		· 실린더변형	· 실린더교체	60~90
		· 감지센서	· 센서교체	30
		· 압력밸브	· 압력밸브교체	30

2.4 야드 트랙터

야드 트랙터는 컨테이너 터미널 내에서 본선작업과 구내이적 지원을 담당하는 하역운반용 차량이다. 갠트리 크레인과 트랜스퍼 크레인 사이를 오가며 적화와 양화작업에 투입된다. 그러나 본선작업을 미리 준비하는 차원에서 구내 운송작업이라 불리는 야드 내 장치장 컨테이너화물을 미리 선적하기 용이한 위치로 이동시켜 놓는 작업에 자주 투입된다.

야드 트랙터의 형태는 기본적으로 1인 운전자가 탑승을 하기 위한 구조로 헤드 탑(Head top)이 제작되어 있다는 것과 야드 새시의 잠금과 풀림장치가 공압을 이용한 자동장치라는 것을 제외하면 육상운송용 트레일러와 크게 다르지 않다.

2.4.1 야드 트랙터의 보전

야드 트랙터의 고장은 빈번하게 발생하지 않지만 운행이 불가능할 정도의 고장이라 하더라도 자체에서 보유하고 있는 여분의 야드 트랙터로 대체하여 운행이 가능하다. 다른 야드 트랙터의 운행통로를 막고 있을 경우는 견인차량이나 다른 운송수단을 이용하여 견인을 하면 하역작업의 흐름을 방해하지는 않는다.

그러나 협소한 야드로 인하여 가끔 충돌사고가 발생하기도 한다. 특히 트랜스퍼 크레인의 이동통로에 주차 또는 정차로 인해 충돌사고가 발생하고 때때로 야드 새시를 연결 하였을 경우 회전반경이 넓고 컨테이너를 상차 하였을 경우 높이에 대한 공간 확보가 안된 상태에서 회전을 시도하다가 컨테이너와 트랜스퍼 크레인, 야드 새시와 트랜스퍼 크레인, 야드 트랙터끼리 충돌하는 사고가 발생하는 것이 가장 많은 사고의 형태이다.

Fig. 2.6 및 Fig. 2.7은 실제 작업에 사용되는 야드 트랙터와 새시를 나타낸 것이다. 야드 트랙터의 헤드 탑에는 경광등과 야간에 운행이 편리하고 식별이 가능한 별도의 조명과 비상램프(Emergency lamp)가 설치되어 있다. 컨테이너 상차시 충격으로 인하여 조명과 시그널 램프(Signal lamp)가 빈번하게 교체를 해 주어야 한다. 차체에 가해지는 충격을 흡수할 수 있는 내구성이 우수한 차량을 사용하는 것이 바람직하다.

Table 2.15는 야드 트랙터의 용어에 대한 설명을 나타내었다. 육상용 트레일러와 동일한 용어가 대부분이다. 야드 트랙터는 국내 제작이 되지 않기 때문에 가격이 높고 국내 제작되는 도로 운송용 트레일러와 부품의 호환성이 낮다.



Fig. 2.6 A view of yard tractor



Fig. 2.7 A view of yard tractor and chassis

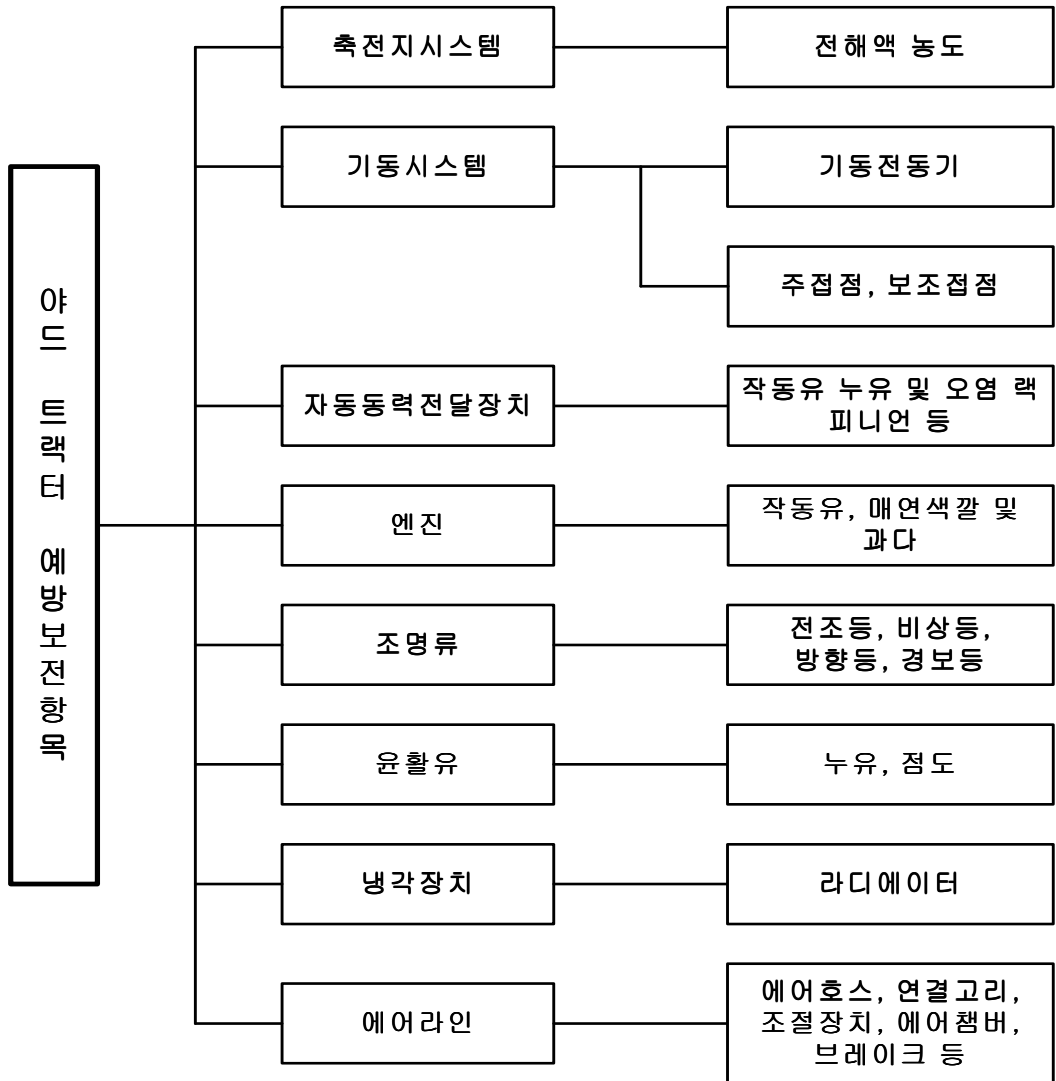
Table 2.15 Items of yard tractor system

번호	항목	구조설명
1	Head top	야드 트랙터의 운전자가 승탑하여 운행하는 공간
2	Pulling plate	야드 새시 잠금, 풀립장치
3	Air chamber	야드 새시 상하 이동장치
4	Air plate	압축공기 연결 커넥터
5	EMG lighting	비상 경광등
6	Air jaw	압축공기 분배장치
7	Steering cylinder	핸들의 조작을 쉽게하는 장치
8	Lower cylinder	새시 연결 치의 높낮이를 조절하는 장치
9	Front suspension	전륜평형 유지장치
10	Rear suspension	후륜평형 유지장치
11	King pin	블록화 된 고정핀

2.4.2 야드 트랙터의 점검

야드 트랙터의 보전은 디젤엔진과 자동동력전달장치의 기계와 기동 및 각종 센서류로 구성된 전기분야로 구분할 수 있다. 엔진은 약 175Hp으로 기동성과 출력이 우수하다. Table 2.16은 야드 트랙터의 보전항목을 나타낸 것이다.

Table 2.16 Items of prevention maintenance of yard tractor



2.5 기타 하역장비

리치 스택커는 야드 내의 좁은 공간을 이동하면서 하역작업을 할 수 있으므로 많이 사용이 되고 있다. 그러나 야드에 배치되어 있는 첫 번째 열만이 하역작업이 가능하다는 단점이 있다. 또한 스프레더가 부착되어 있어 외부충격에 의한 고장이 빈번하게 일어난다. 탑 핸들러는 무거운 중량물을 작업하는 데 구조적인가 문제가 있어 경량 또는 빈 컨테이너(Empty container)

화물을 처리하는 데 사용된다.

스트레들 캐리어(Straddle carrier)는 상·하차와 운송을 동시에 할 수 있는 장점을 가지고 있으나 그 구조와 활용도에서 문제가 많아 최근에는 사용을 하지 않는 하역장비이다.

야드 내에 있는 리치 스택커와 탑 핸들러는 이동에 큰 제약을 받지 않으며 하역작업을 수행해야 하므로 디젤엔진에 의해 구동이 되고 각 동작은 유압시스템에 의해 동작이 된다. 따라서 엔진고장 또는 작동유 누유, 밸브의 소음 등이 많이 발생되고 있다. 또한 차체의 크기를 작게 하기 위해 각 부품의 설치가 비좁게 되어 있어 유지 보수하는 데 많은 어려움이 있다. 하버 크레인(Harbor crane)이라고 불리는 하역장비가 있지만 일반 잡화 부두에서 비규격화물 취급용으로 많이 사용된다.

Table 2.17은 항만에서 많이 사용되는 리치 스택커의 보전항목을 나타낸 것이고 Fig. 2.8과 Fig. 2.9는 리치 스택커와 탑 핸들러의 실제 모습을 나타낸 것이다.

Table 2.17 Items of prevention maintenance of reach stacker

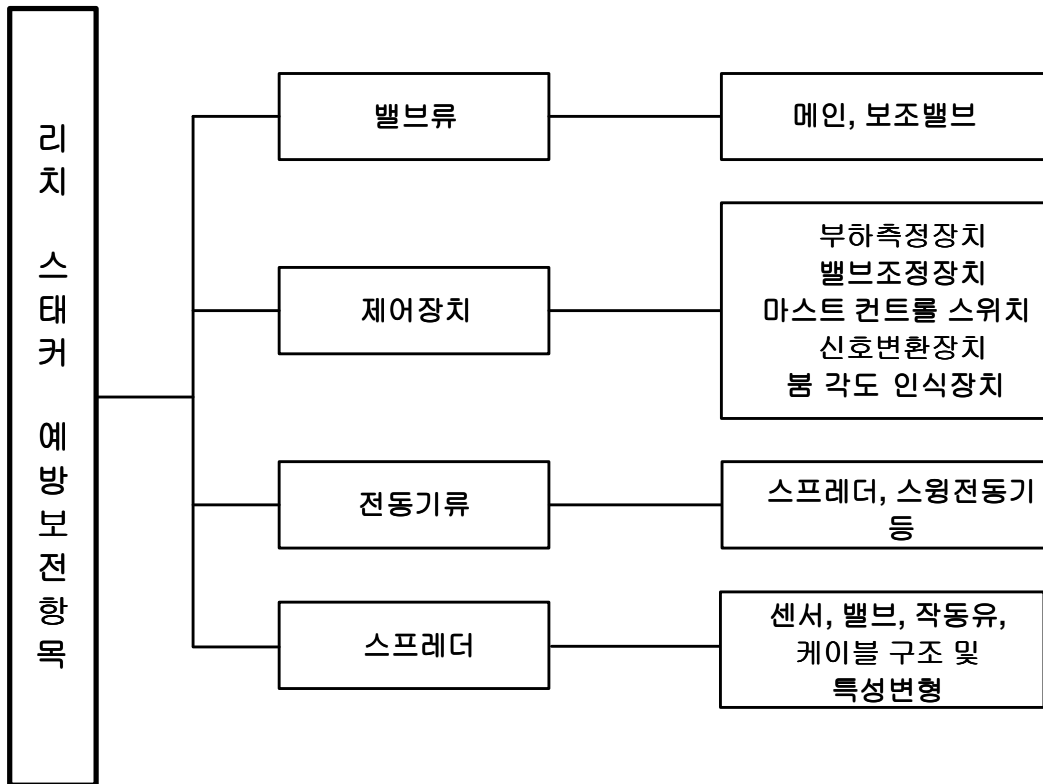




Fig 2.8 A view of reach stacker



Fig 2.9 A view of top handler

2.6 고찰 및 요약

하역장비는 컨테이너화물을 취급하기에 용이하도록 제작되어 있으며 무게가 일정하지 않은 화물을 주 작업대상으로 하므로 큰 구조로 제작되어 있다. 또한 빠른 하역작업 위해 구조의 개선과 각종 제어기법의 발전이 빠르게 진행되고 있다. 특히 대전류를 이용하여 전동기 속도를 효과적으로 제어하기 위해 각 부품의 높은 신뢰성이 요구된다. 그러나 이러한 첨단기술이 도입된 하역장비는 과거의 기술에 비해 고장발생 빈도면에서는 더 많은 고장을 일으키는 요인이 된다. 고장을 원천적으로 막는 것이 보전의 최대 목표이지만 늘 발생하는 고장상황에 신속한 대처는 그리 쉬운 방법이 아니다.

고장의 원인에 따라 보전의 난이도가 결정이 되고 특히 통신, 각종제어, 프로그래밍 등의 복잡한 문제에 직면하게 되면 고장보전이 그리 단순한 문제가 아니다. 교체를 하여도 복구가 되지 않는다면 상황은 좀 더 심각해진다. 원인을 파악하기 위해 통신 프로토콜부터 시작하는 보전이 순차적으로 이루어져야 한다.

이와 같은 통신과 관계되는 단위 모듈뿐만 아니라 하역장비 제어에 소요되는 부품은 대부분 국내에서 생산되지 않는다는 것이다. 이러한 단위부품 확보를 위해 많은 비용을 지불해야 하므로 수리를 반복하여 실시하는 경우가 많다. 따라서 단위부품의 신뢰도는 자연감소되고 고장의 직접적인 원인이 된다. 내구연한이 오래된 제어시스템은 부품의 생산중단 또는 가격의 상승으로 인하여 시스템을 업그레이드하여 사용하는 경우와 제어시스템 전체를 교체하여 사용하는 경우가 있다. 운영사에 따라 차이는 있지만 하역장비의 가동시간이 물동량에 따라 하루 24시간 연속 가동하므로 무리한 가동에 의해 피로도를 누적시킬 수 밖에 없다. 초기 제작단계에서부터 신뢰성을 중심으로 단위구성품의 교체주기를 설정하고 교체가 가까워진 부품은 예방보전을 수행할 때 점검 대상이 되어야 한다.

고장 발생에는 운전자의 실수에 따른 고장, 선박의 구조에 따른 하역장비의 고장 또는 파손, 단위부품의 고장 또는 오류, 통신체계의 이상으로 인하여 발생하기도 하며 하역장비 가동중 발생하는 고장은 시간을 다투는 사후보전이다. 파손이나 변형과 같은 고장, 시스템 이상과 같이 감지되기 어려운 고장에 대처를 빨리 해나가야 한다.

인지하기 쉬운 고장이라 하더라도 고장의 종류에 따라 사후보전에 많은 시간이 필요로 하는 경우도 있다. 따라서 보전요원들의 분해점검 조립순서와 같은 능력을 항상 배가시켜야 하며 단순한 조립작업이라 하더라도 최종 조립후 시운전 과정에서 볼트 하나가 누락되어 고속회전

을 하는 커플링의 경우 토오크의 저하로 장착된 볼트가 파손되어 사고로 이어지거나 2차 고장을 유발할 수도 있기 때문이다. 따라서 보전요원은 하역장비시스템을 인지하고 가동되는 기본 신호체계와 입·출력의 관계와 조건들을 미리 예지하고 있어야 하며, 이것은 하역장비의 동작에 관한 출력상태 조건들을 이해하여 고장에 대처하는 능력과 가동 여부의 정확한 상황판단을 할 수 있어야 한다. 보전의 최대 목표는 언제나 가동 가능한 상태로 유지하는 것이 보전의 초점이다. 하역장비의 보전은 언제라도 가동 할 준비가 되어 있는 상태로 유지하여야 한다. 보전에 따른 하역장비의 가동 상태와 고장은 사고를 유발 시키는 원인이 되기도 한다.

제3장에서는 예방보전과 사후보전의 개념을 다루도록 한다. 갠트리 크레인과 트랜스퍼 크레인의 분야별 고장과 고장수리시간으로 인한 보전형태와 보전관리, 고장분석을 통한 고장률과 갠트리 크레인과 트랜스퍼 크레인의 고장현황에 대하여 분석하며, 실제 컨테이너 터미널의 사례를 통해 고찰하고자 한다.

제 3 장 하역장비의 고장

제2장에서는 컨테이너 터미널에서 사용되는 하역장비의 보전 및 점검 특성에 대해 논의 하였으며, 본장에서는 항만하역장비의 사례분석과 함께 보전관리기법 및 고장분석에 대해 다루 도록 한다. 또한 컨테이너 터미널의 실제 사례를 통해 고장분석 및 고찰을 행하고자 한다.

3.1 하역장비의 사고사례

컨테이너 터미널의 생산성 평가기준은 다양하게 측정할 수 있지만 하역장비의 고장과 사고 가 생산성에 미치는 영향을 분석하는 것은 대단히 중요한 문제이다. 즉, 사고사례를 통하여 이 를 분석하여 효율적인 하역장비의 관리가 필요함을 보이도록 한다. 따라서 본 논문에서는 항 만하역장비를 대상으로 기계 및 전기적인 사고사례를 분석하여 보전의 중요성을 한번 더 상기 시키고자 한다.

3.1.1 기계분야 고장에 의한 사고



Fig. 3.1 An accident of mechanical fault(a)

(1) 사고 개요

Fig. 3.1 및 Fig. 3.2는 2005년 2월 25일 발생한 사고로 와이어로프가 이탈하여 헤드 블록(Head block)의 시브에 걸려 호이스트 동작이 되지 못한 사고이다.



Fig. 3.2 An accident of mechanical fault(b)

(2) 사고분석

이 사고는 와이어로프 제작사에서 권장하는 사용시간 이전에 와이어로프가 소손되어 일부가 노출되어 있는 상태에서 수직으로 회전하는 헤드 블록의 시브 홈의 마모로 인해 벌어진 부분에 끼여 들어가면서 스프레더 한쪽 부분이 움직이지 않아 다른쪽의 늘어진 와이어로프가 스프레더 콘에 걸리면서 발생한 사고이다.

3.1.2 전기분야 고장에 의한 사고

가. 피드백 고장에 의한 사고

(1) 사고개요

Fig. 3.3 및 Fig. 3.4는 2002년 3월 30일 주행동작중 엔진쪽 내측부분이 적재된 컨테이너와 부딪치면서 트랜스퍼 크레인 유압시스템 일부와 구조가 파손되고 적재된 컨테이너가 전복되어

컨테이너와 화물을 손상시킨 사고이다.



Fig. 3.3 An accident of electrical fault(a)



Fig. 3.4 An accident of electrical fault(b)

(2) 사고분석

이 사고는 트랜스퍼 크레인의 전기실과 엔진측에 장착된 주행 전동기의 속도를 감시하고 주행 전동기 회전속도를 속도제어기에 알려주는 T/G에서 발생하는 전압의 이상으로 전기실 쪽

으로 트랜스퍼 크레인이 쏠리면서 발생한 사고이다.

나. 호이스트 전동기의 절연파괴에 의한 사고



Fig. 3.5 An accident of electrical fault(c)

(1) 사고개요

Fig. 3.5는 2002년 10월 3일 갠트리 크레인 권상 동작중에 스프레더가 추락하여 장척 화물용 스프레더가 파손된 사고이다.

(2) 사고분석

Fig. 3.6 및 Fig. 3.7과 같이 주권상 직류전동기의 절연이 파괴되어 전류가 갠트리 크레인의 몸체를 타고 흘러 전동기 토크가 발생하지 않아 일어난 사고이다.



Fig. 3.6 Faults of DC motor



Fig. 3.7 Motor piece by insulated destruction

다. 충돌에 의한 사고



Fig. 3.8 An accident by outside vehicles

(1) 사고개요

Fig. 3.8의 사고는 2002년 2월 26일 트랜스퍼 크레인의 권상 주전동기가 역방향으로 운전할 때 발생하는 전력을 열로 소비하는 펌프 백 저항기(Pump back resistor)가 파손된 사고이다.

(2) 사고분석

트랜스퍼 크레인에서 하이 큐빅 컨테이너(Hi-cubic container)를 실은 외부 트레일러가 주행 방향표식이 있음에도 불구하고 좁은지역에서 회전을 시도하다가 저항기와 컨테이너 윗측 부분과 충돌하여 발생한 사고이다.

3.2 하역장비의 보전관리

예방보전은 시간기준예방보전(TBM : Time-Based Maintenance)과 상태기준예방보전(CBM : Condition-Based Maintenance)의 적절한 선택과 적용을 함으로 하역장비의 고장을 감소시키고 안전하게 작업할 수 있도록 예방보전체계를 수립할 수 있는 합리적인 주기설정의 방법이 된다. 일반적으로 각 운영사에서는 컨테이너 터미널에 하역장비가 설치된 후 보전을 하기 위한 충분

한 자료가 없으므로 제작사에서 발행한 매뉴얼을 최대한 활용하고 보전요원들의 경험에 의해 보전이 실시되고 있다.

따라서 경험과 부품들의 정확한 신뢰성이 검증된 데이터에 의한 자료의 확보가 이루어져야 한다. 이 자료를 바탕으로 시뮬레이션 등 다양한 방법을 통하여 보전주기를 알 수 있다. 이를 바탕으로 보전작업을 수행하는 것이 합리적인 접근 방법이고, 최적의 보전주기를 설정하여 예방보전을 행하는 것이 좋으나 현실과는 거리가 너무 먼 것이 사실이다.

하역장비의 가동률을 높이는 방법은 예방보전(PM : Prevent Management)을 실시하는 것이 가장 좋은 방법으로 알려져 있지만 오버 haul(Over haul)이 끝나고 작업에 투입되기 위해 이동 중에도 고장이 발생하기 때문에 정확한 기준을 설정하는 것은 대단히 어려운 문제이다. Fig. 3.9는 고장점을 기준으로 하여 예방보전과 사후보전에 대해 나타낸 것이다. Table 3.1은 고장점을 기준으로 한 보전용어의 설명을 나타낸 것이다.

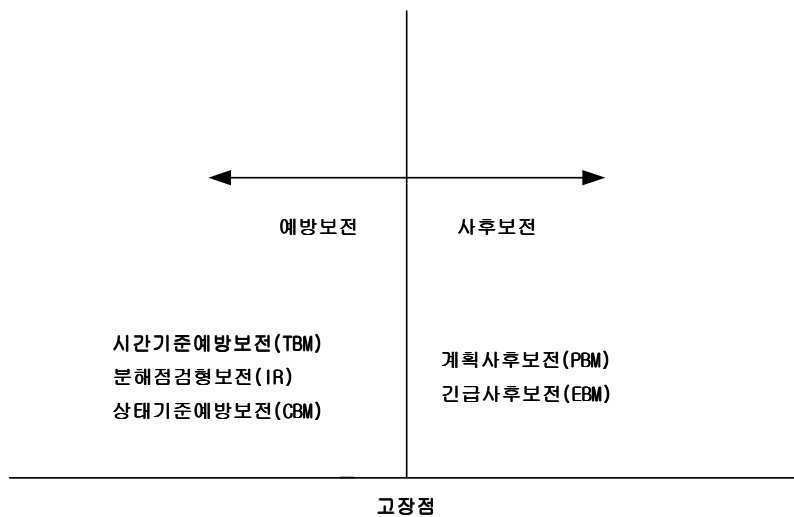


Fig 3.9 Classification of maintenance

Table 3.1 Technical word explanation of prevention

번호	용어	내용
1	시간기준예방보전	가동 또는 사용시간을 기준으로 보전 실시
2	분해점검형보전	장치를 정기적으로 분해 점검하여 상태를 확인한 후 보전 실시
3	상태기준예방보전	설비진단기술에 의해 상태를 관측한 후 그 값에 의해 보전 실시
4	계획사후보전	고장이 날 때까지 사용을 한 후 보전 실시
5	긴급사후보전	가동중 고장이 발생하면 보전 실시

사후보전에서 계획사후보전(PBM : Planned Breakdown Maintenance)은 운영사에서 계획을 세워 정책적으로 실시하는 보전이므로 정확한 데이터에 의하여 실시하는 것이 바람직하며 긴급사후보전(EBM : Emergency Breakdown Maintenance)은 하역장비의 가동중에 생기는 것으로 생산성과 밀접한 관계를 가지므로 그 빈도수가 적을수록 좋다(권오운 외 1인, 2003).

예방보전은 보전을 어떻게 실시하는가에 따라 달라질 수 있고 정확한 데이터에 의해 보전 계획이 수립되고 체계적인 관리가 이루어져야 긴급사후보전과 같은 문제가 발생을 하지 않는다. 이는 하역장비의 가동률과 직결되고 결론적으로 생산성 향상에 도움이 될 수 있을 것이다.

3.2.1 예방보전

시간기준예방보전은 장치의 구성에 따라 제작당시 KS규격 등과 같은 규정에 의하여 제작이 되며 기기구성품의 제작회사에서 정하는 교환주기에 따라 보전주기를 정하는 것이다. 따라서 보전주기는 평균수명(MTBF : Mean Time Between Failure)을 기준으로 하여 평균수명 μ 보다 짧게 하는 것이 좋으며 보전주기(t_p)가 μ 에서 표준편차 σ 의 3배를 뺀 값보다 작은 $t_p \leq (\mu - 3\sigma)$ 가 되도록 설정하여 관리하는데 현실적으로 어려움이 있는 실정이다(유희환, 1999).

하역장비의 단위구성품과 보조장치는 반복적으로 수리를 하여 사용이 가능하므로 사후보전 개념에서는 평균수명인 MTBF의 표준편차를 일일이 구하기 어렵다. 경험에 따라 평균수명보다 짧은주기 부품들은 평균고장시간(MTTF : Mean Time to Failure)을 구해서 MTTF보다 짧은주기(MTTF \times 0.8)에 교환주기를 정해 예방보전을 하도록 한다. 복잡하게 구성되어 있는 하역장비의 장치를 대상으로 한 보전주기는 1년을 기준으로 하는 경우에는 정기적으로 오버홀 기간을 정해 보전을 한다. 정기 오버홀 주기에 관련된 요소는 다음과 같다.

- ① 생산량
- ② 작동횟수
- ③ 작동시간
- ④ 제작사 추천 오버홀 주기
- ⑤ 단위장치 레벨의 평균수명

즉, 위의 요소들을 고려하여 오버홀 간격(TBO : Time Between Overhaul)을 설정하여 보전계획을 수립하고 관리하여야 한다(권오운, 1998).

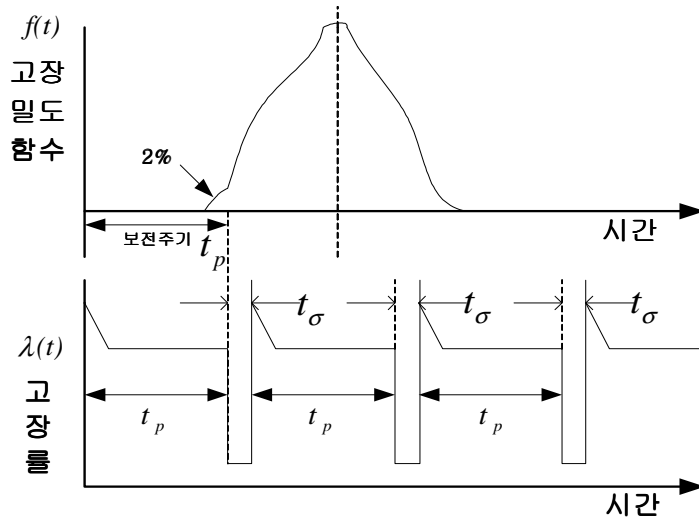


Fig. 3.10 Period of time based prevention maintenance, t_p

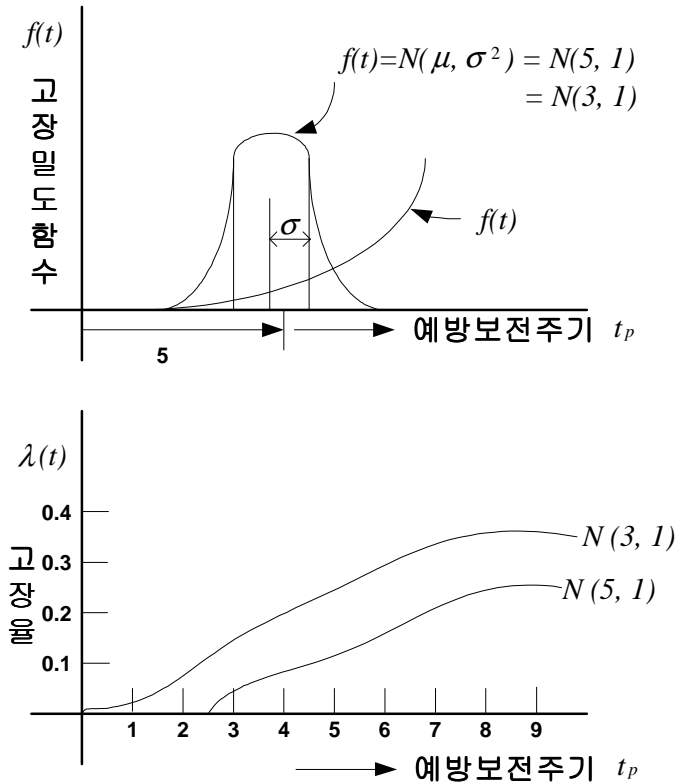


Fig. 3.11 Relation between period of time based prevention maintenance t_p and fault ratio $\lambda(t)$

Fig. 3.10은 시간기준예방보전에 있어서 고장률 $\lambda(t)$ 와 고장밀도함수 $f(t)$ 을 나타내고 있으며 고전적인 예방보전은 전체 2%는 장치의 예방보전이 실시되기 전에 고장이 발생하고 있다 (이홍철, 2003). 또한 예방보전의 실시에 따른 다른 가동중의 보조장치가 초기불량영역으로 되어 고장률 $\lambda(t)$ 가 일시적으로 상승을 한다. 그리고 98%의 보조기계는 아직 충분한 사용시간을 남겨놓고 있음에도 불구하고 예지보전에 의해 교체되어 버리는 경우도 발생한다. 이처럼 시간기준예방보전에 있어서 보전의 타이밍이 중요하게 검토되어야 한다. 통계적인 관점에서 예방보전에 의해 고장률 $\lambda(t)$ 을 충분히 작은 값으로 하기 위해서는 평균수명 μ 에서 표준편차 σ 의 3배 이상을 뺀 짧은 주기로 보전을 해야 한다(권오운, 1998).

Fig. 3.11을 살펴보면 예방보전주기와 고장밀도함수 $f(t)$ 가 정규분포 $N(\mu, \sigma^2)$ 일 때 $N(\mu, \sigma^2) = N(5, 1)$ 부터 알 수 있는 것처럼 평균수명($\mu = 5$)으로부터 3σ (이 경우 $\sigma = 1$)만큼 짧은 $t = 2$ 이전에서 예방보전을 하면 고장률은 거의 $\lambda(t) = 0$ 이 된다는 것을 알 수 있다.

신뢰성 이론에 의하면 TBM에 있어서 고장 또는 고장률 $\lambda(t)$ 을 거의 “0”으로 하기 위해서

는 예방보전주기 t_p 를 다음의 식(3.1)과 같이 표현한다(豊田利夫, 1996).

$$t_p = \mu - 3\sigma \quad (3.1)$$

단, t_p : 예방보전주기

μ : 보전대상설비의 평균주기

σ : 보전대상설비 수명의 표준편차

그러나 설비의 수명데이터 분포의 파라미터는 품질관리 데이터 등과 비교하면 현격하게 다르기 때문에 식(3.1)을 만족하는 예방보전주기 t_p 는 상당히 짧게 된다. 이와 같이 시간기준예방보전 방식에 의한 주기계산에는 다음과 같은 문제가 있다.

- ① 예방보전을 해도 항상 어느 정도의 고장은 발생한다.
- ② 예방보전에 의해 일시적으로 고장률이 상승한다.
- ③ 예방보전주기 t_p 가 통계적으로 결정되기 때문에 과도한 보전의 확률이 높다.
- ④ 복잡한 기계에는 효과가 적다. 즉, 적용할 수 있는 기계(마모 열화형)의 비율이 작으며 약 10% 정도에만 적용할 수 있다.
- ⑤ 보전주기가 짧게 되면 정기적인 예방보전에 의하여 가동성이 떨어진다.

또한, 시간기준예방보전방식을 실무에 적용하기 위해서는 다음과 같은 문제점이 발생한다.

- ① 고장분포에 의한 표준편차, 평균값 등의 파라미터 파악을 위한 신뢰성 있는 데이터 베이스 구축이 어렵다.
- ② 보전주기 설정에 대한 실무에 적용하는 데 어려운 점이 있다.
- ③ 설비가 복잡하여 보전주기의 계획을 수립하였다고 해도 작업의 연속성에 의한 정기보전을 적용하기에는 어려운 점이 있다.
- ④ 다양한 부품의 결합체이므로 정확한 데이터에 의해 보전주기의 계획이 수립되어야 하지만 사용자의 기준에 의거한 보전주기를 설정하므로 그 자료에 신뢰성이 떨어진다.

현실적인 측면을 고려하여 설비의 최적수리주기의 설정은 다음과 같이 나타낼 수 있다(이진식, 1997).

- ① 하역장비의 보전비용과 열화손실비의 합계를 적게 가져가는 것이 경제적이다.
- ② 단위기간당의 열화 손실비는 시간(또는 작업량)이 증가하면 같이 증가한다.
- ③ 단위기간당의 보전비용은 수리주기를 길게 하면 감소한다.
- ④ 열화 손실비와 보전주기곡선이 만나는 지점이 최소비용점이다.
- ⑤ 최소비용점에서 수리하는 것이 가장 경제적이며 이를 최적수리주기라고 한다.

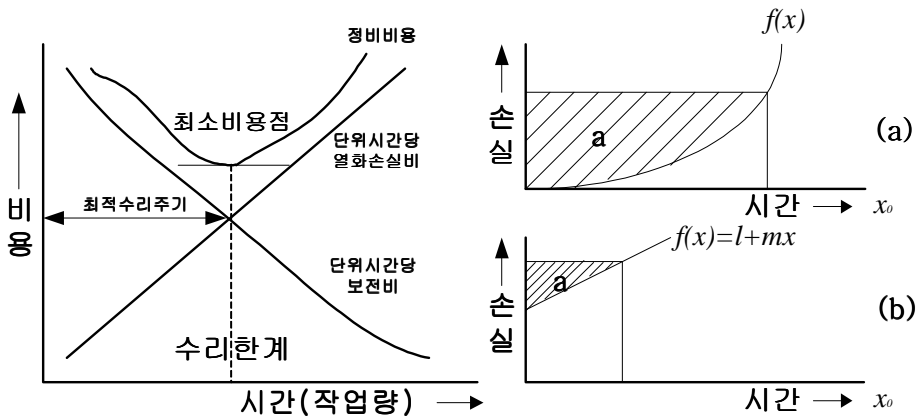


Fig. 3.12 Computation of optimal maintenance period

Fig. 3.12에 있어 열화손실곡선을 $f(x)$, 1회 보전비를 a 원(Constant)라 하고 최적수리(보전) 주기 x_0 를 구하면 다음의 식(3.2)와 같다.

$$\text{단위기간당보전비} = \frac{a}{x} \tag{3.2}$$

$$\text{단위기간당열화손실비합계} = \frac{1}{x} \int f(x)dx \tag{3.3}$$

식(3.2)와 식(3.3)을 합하면 다음의 식(3.4)와 같다.

$$\Rightarrow \frac{a}{x} + \frac{1}{x} \int f(x) dx \quad (3.4)$$

식(3.4)를 미분하여 “0”으로 놓고 x_0 를 구하면 다음과 같다.

$$-\frac{a}{x^2} - \frac{1}{x^2} \int_0^x f(x) dx + \frac{1}{x} f(x) = 0 \quad (3.5)$$

$$-a - \int_0^x f(x) dx + xf(x) = 0 \quad (3.6)$$

$$xf(x) - \int_0^x f(x) dx = a \quad (3.7)$$

식(3.5), 식(3.6) 및 식(3.7)의 물리적인 의미는 Fig. 3.12의 (a)에 있는 빗금부분이 바로 a 원 이 되는 점 x_0 가 구하고자 하는 최적수리보전주기이다(이순요, 1993).

$$x_0 f(x_0) - \int_0^{x_0} f(x) dx = a \quad (3.8)$$

열화손실비가 직선으로 증가할 경우, 열화손실곡선은 Fig. 3.4의 (b)에서

$$f(x) = l + mx \quad (3.9)$$

이면 수리주기 x_0 를 구하기 위해 다음의 식(3.10)과 같이 유도한다.

$$\begin{aligned} \int_0^{x_0} f(x) dx &= \int_0^{x_0} f(l + mx) dx \\ &= [lx + \frac{1}{2} mx^2]_0^{x_0} \\ &= lx_0 + \frac{1}{2} mx_0^2 \end{aligned} \quad (3.10)$$

식(3.10)을 정리하면 식(3.11)과 식(3.12)가 된다.

$$x_0 f(x_0) - \int_0^{x_0} f(x) dx = a \quad (3.11)$$

$$x_0 (l + mx_0) - (lx_0 + \frac{1}{2}mx_0^2) = a \quad (3.12)$$

식(3.11)과 식(3.12)에서 수리주기 x_0 는 다음과 같이 구해진다.

$$x_0 = \sqrt{\frac{2a}{m}} \quad (3.13)$$

단, $a = \text{비용/회}$, $m = \text{비용/일정주기}$ 라 하면 $x_0 = \text{일정주기/회}$ 이다.

이와 같은 문제점을 근본적으로 해결하기 위해서는 상태기준예방보전방식과 예지보전방식을 병행하는 것이 필요하다(日本プラントメンテナンス 協會, 1992).

본 논문에서 모델이 된 갠트리 크레인 호이스트 전동기는 직류타여자전동기이다. 전동기의 제원을 살펴보면 용량 275kw, 중량 약 3ton이며 설치금액은 6천만원이다. 이때 호이스트 전동기에 대한 최적주기 산출방법은 다음과 같이 구할 수 있다. a 는 인건비(보전요원 6명), 준비된 전동기 수리비용, 전동기 감가상각비, 간접지원비, 전동기 교체에 필요한 소모성부품의 비용은 약 1,550만원이 들어간다. m 은 전동기의 교체주기까지 성능유지를 위한 일정기간동안의 반복되는 시운전에 들어가는 비용을 의미한다. 그 비용은 약 50만원으로 가정하였다. 이를 식(3.13)에 의해 산출하면 x_0 는 약 7.8개월이 된다. 이러한 보전주기를 설정하고 계획에 의한 보전이 이루어져야 한다.

Table 3.2 Optimal maintenance expense calculation data for DC motor change

번호	종류	비용(단위 : 원)
1	전동기 오버홀 비용	8,000,000
2	교체작업시 투입 인건비	2,000,000
3	교체시 간접지원비	2,000,000
4	소모성 부품비	500,000
5	감가상각비	1,000,000
6	교체전 간접비	1,000,000
7	교체시 사용되는 장비비	1,000,000
합계		15,500,000

3.2.2 사후보전

사후보전은 계획사후보전과 긴급사후보전으로 나누고 계획사후보전은 어떤 일정주기에 의해 보전을 하는 방식을 취하여 미리 일어날 수 있는 고장을 예견하여 그 원인을 제거하여 생산성을 높이자는 데 그 목적이 있다. 긴급사후보전은 언제 발생할지 모르는 장치의 응급상황에 맞추어 실시하는 보전방식으로 언제 어디에서나 대비하는 시스템의 구축이 필요하다.

계획사후보전은 일정주기에 의한 계획을 미리 세우는 단계에서부터 시작된다. 그러나 계획 단계에서 근거로 활용되는 것이 각 부품의 제작사에서 제공하는 운영지침이나 매뉴얼에 의존하게 된다. 제작사에서 제공된 정보는 컨테이너 터미널의 환경과 다르기 때문에 권장 사용시간이나 횟수보다 일찍 문제가 발생하는 경우가 빈번하게 일어나게 된다.

사후보전은 고장이 발생하고 나서 이루어지는 보전의 형태와 계획을 말한다. 그러나 현재 사후보전은 생산단계에서부터 실시하는 예지보전의 다른 형태로 변하고 있다. 이것을 생산적 보전(TPM : Total Productive Maintenance) 또는 자주보전방식을 의미한다. 여기서 예지보전과 신뢰성 중심의 보전방식이 생산성을 높이는데 기여한 역할이 매우 크다. 따라서 사후보전을 줄이는 것은 고장 발생이 줄어든다는 것을 의미하며 하역장비의 보전 비용의 절감과 생산성을 높일 수 있는 잇점이 있다.

직류 전동기를 기준으로 연간 소요되는 예산을 살펴보면 다음과 같다. 보전인력 700명, 간접비용이 500만원, 소모부품 등을 포함하면 약 1,200만원 정도가 유지보수 비용으로 필요하다. 만약, 직류 전동기에서 교류 전동기로 교체를 하면 예방보전은 직류 전동기를 사용할 때에 비

하여 절반이상으로 낮아진다. 따라서 교류 전동기로 교체를 하면 예방보전주기와 예산을 절감할 수 있을 것이다. 또한 기계분야는 윤활장치의 그리스 주입하는 곳이 약 400개정도이다. 그러므로 인력을 동원하여 사용한다는 것은 현실적으로 많은 어려움이 있다. 윤활장치를 수동에서 자동급유장치로 바꾸어 놓는다면 보전에 많은 도움이 될 것이다

하역장비의 위치제어를 목적으로 설치된 각종 센서류를 보전하기 위해 비좁은 레일위로 올라가는 어려움이 있는 데 보전이 용이하도록 설계 단계부터 센서의 위치조정과 안전네트 등이 설치되면 수리시간을 줄일 수 있을 것이다.

3.3 고장분석

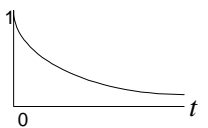
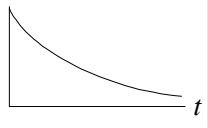

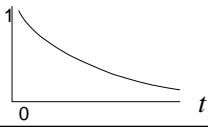
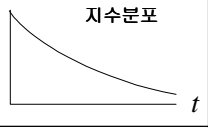
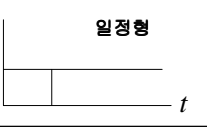
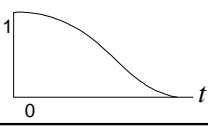

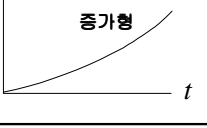
3.3.1 고장률과 고장확률밀도함수

단위시간당 고장이 발생하고 있는가에 대한 고장확률밀도함수의 종류로는 정규분포, 지수분포, Weibull 분포의 3가지가 있다. 부품의 고장확률밀도함수는 대부분 정규분포가 되며 사용의 증가에 따라 고장률 $\lambda(t)$ 는 증가하게 된다. 그러나 많은 부품이 조합되어 만들어진 장치나 시스템의 고장확률밀도함수는 지수분포에 따르게 된다. 또한 설비는 서로 다른 부품의 조립으로 구성되어 있기 때문에 개별 부품의 고장은 설비 전체의 고장률 $\lambda(t)$ 는 시간에 관계없이 일정하게 된다.

Fig. 3.13의 육조곡선에서 고장률 $\lambda(t)$ 이 시간의 증가에 따라 증가하는 증가형 고장률(IFR : Increasing Failure Rate)인 경우 고장확률밀도함수는 정규분포가 되고 고장률이 일정한 일정형 고장률(CFR : Constant Failure Rate)인 경우 고장확률분포는 지수함수가 된다.

Weibull 분포는 일반적으로 수명분포를 나타내는 데 편리하게 고안된 것으로서 형상모수(Shape parameter) m 의 값이 1보다 적으면 감소형 고장률(DFR : Decreasing Failure Rate)의 고장확률밀도함수를 나타낼 수 있다. 또한 형상모수 m 의 값이 1보다 크면 증가형 고장률의 고장확률밀도함수를 나타낼 수 있다. 증가형인 경우의 고장확률밀도함수인 정규분포에 근사하게 된다. 형상모수 m 의 값이 1이면 일정형 고장률인 경우의 고장확률밀도함수인 지수분포가 된다. 이상과 같이 고장률의 형(Pattern)과 고장확률밀도함수와는 일정한 관계를 가지고 있다. 위의 내용을 종합하여 정리하면 Table 3.3과 같다(이상용, 1997).

Table 3.3 A relation between fault type and $f(t)$

고장율의 형	신뢰도함수 $R(t)$	고장확률 밀도함수 $F(t)$	고장율함수 $\lambda(t)$	와이블분포의 형상보수 m
감소형 (DFR)			감소형 	$m < 1$
일정형 (CFR)		지수분포 	일정형 	$m = 1$
증가형 (IFR)		정규분포 	증가형 	$m > 1$

또한, 각각의 부품에 대한 고장시간 분포가 지수분포를 따르며 “Drenick의 정리”에 의하여 혹시 각각의 부품의 수명분포가 지수분포가 아니더라도 지수분포가 아닌 몇 개의 다른 타입의 부품으로 구성되어 만들어진 시스템의 수명분포는 비교적 넓은 조건하에서 근사적으로 지수분포가 된다. 따라서 고장확률밀도함수는 지수분포에 따른다고 보고 신뢰성의 척도를 구하는 경우가 많다. 그리고 고장확률밀도함수가 지수분포에 따르면 고장률은 일정형이 된다. 고장까지의 시간 분포가 지수분포인 경우의 고장확률밀도함수는 식(3.14)와 같다

$$f(t) = \frac{1}{\theta} e^{-\frac{t}{\theta}}, t > 0 \quad (3.14)$$

식(3.14)는 지수형이며 여기서 θ 는 고장밀도함수의 모수(Parameter)이며 평균수명을 의미한다. 그리고 신뢰도 함수 $R(t)$ 를 고려하면 다음과 같다.

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = \int_t^{\infty} \frac{1}{\theta} e^{-\frac{t}{\theta}} dt = e^{-\frac{t}{\theta}} \quad (3.15)$$

또한 고장률함수 $\lambda(t)$ 는 다음과 같이 평균수명의 역수인 상수가 된다.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{1}{\theta} \quad (3.16)$$

갠트리 크레인의 호이스트 전동기의 평균 고장률이 $\lambda = 0.0002/\text{시간}$ 인 지수분포에 따르면 평균수명 θ 는 식(3.16)에 의해 5,000시간이 된다. 이때 이 제품을 500시간 사용한다면, 이때의 신뢰도 $R(t)$ 는 식(3.15)에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$R(t=500) = e^{-\frac{1}{10}} \simeq 0.9$$

즉, 평균수명이 5,000시간인 제품을 500시간 사용하면 10%는 고장이 발생한다는 것을 의미한다.

열화고장과 같이 사용시간 또는 사용횟수의 증가에 따라 고장의 횟수가 증가하게 되는 부품 또는 시스템의 고장이 증가형 고장인 IFR인 고장의 확률밀도함수도 정규분포로 나타낼 수 있다. 정규분포인 경우 확률밀도함수 $f(t)$ 와 누적분포함수 $F(t)$ 는 다음과 같다.

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (3.17)$$

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^t \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dt \quad (3.18)$$

신뢰도함수 $R(t)$ 는

$$R(t) = 1 - F(t)$$

이다.

$\mu = 0$, $\sigma^2 = 1$ 인 표준화 정규분포인 경우 $f(t)$, $F(t)$ 는 다음과 같이 된다.

$$f(t) = \phi(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) \quad (3.19)$$

$$F(t) = \Phi(Z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dt$$

$$F(t) = \Phi(Z) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) \quad (3.20)$$

그리고

$$R(t) \text{는 } R(t) = 1 - F(t)$$

갠트리 크레인의 호이스트 감속기의 고장시간 분포가 $\mu = 20,000$ 사이클, $\sigma = 2,000$ 사이클이라고 가정하고 정규분포를 한다면 $t = 19,000$ 사이클일 때의 신뢰도와 순간고장률은 식(3.19)와 식(3.20)에 의해 다음과 같이 계산된다.

즉, $R(t)$ 와 $F(t)$ 의 관계와 식(3.20)에 의해 신뢰도 $R(t)$ 는 다음과 같다.

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \Phi(Z)$$

이다.

여기에서 Z 는

$$Z = \frac{t-\mu}{\sigma} = \frac{19,000 - 20,000}{2,000} = -0.5$$

이면 $\Phi(Z) = \Phi(-0.5)$ 는 누적정규분포에서 0.3085 이므로 $R(t) = 1 - \Phi(-0.5) = 1 - 0.3085 = 0.6915$ 가 된다.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

단, $\lambda(t)$: 순간고장률 $f(t)$: 고장비율 $R(t)$: 잔존확률

윗 식에서

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\phi(Z)}{\sigma \cdot R(t)}$$

으로 $\phi(Z)$ 는 식(3.19) 또는 정규분포표에 의거 $\phi(-0.5) = 0.3521$ 이다.

따라서 $t = 19,000$ 사이클일 때의 순간고장률은 다음과 같다.

$$\lambda(t) = \frac{0.3521}{(2000)(0.6915)} = 0.000254/\text{사이클}$$

고장확률밀도함수가 지수분포인 경우 고장률함수 $\lambda(t) = \lambda = \text{일정}$ 이 되고, 고장확률밀도함수가 정규분포인 경우 고장률함수 $\lambda(t)$ 는 증가형이 된다. 다시 말하면 고장확률밀도함수에 따라 고장률함수의 분포가 달라진다. 일반적으로 고장률 함수의 분포는 다음과 같다.

- ① 감소형 고장률
- ② 일정형 고장률
- ③ 증가형 고장률

따라서 고장률함수의 분포에 따라 적절하게 고장확률밀도함수를 표현할 수 있도록 만든 확률분포가 필요한데 이것이 스웨덴의 Weibull에 의해 고안된 Weibull 분포이다. Weibull 분포는 다음과 같이 표현되며, 여기서 m 은 형상모수(Shape parameter), η 는 척도모수(Scale parameter) 그리고 r 은 위치모수(Position parameter)라 한다(Mazzuchi, 1996).

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t-r}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{t-r}{\eta}\right)^m\right] \tag{3.21}$$

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-r}{\eta}\right)^m\right] \tag{3.22}$$

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-r}{\eta}\right)^m\right] \quad (3.23)$$

$$\lambda(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t-r}{\eta}\right)^{m-1} \quad (3.24)$$

형상모수 m 은 분포의 형을 결정하는 모수이다.

- ① $m > 1$ 이면 고장률함수는 감소형 고장률에 대응한다.
- ② $m = 1$ 이면 고장률함수는 일정형 고장률이 되고, 고장확률밀도함수는 지수분포에 대응한다.
- ③ $m > 1$ 이면 고장률함수는 증가형 고장률이 되고, 고장확률밀도함수는 정규분포 ($m = 3.5$ 일 때)에 대응한다.

(식 3.22)에서 $m = 1$ 이고, $r = 0$ 이면

$$R(T) = e^{-\frac{t}{\eta}}, F(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\eta}}$$

가 되고, 신뢰도 함수는 지수분포가 된다. 그리고 사용시간 $t = \eta$ 이면 m 의 값에 관계없이

$$R(t = \eta) = e^{-1} = 0.368, F(t = \eta) = 1 - e^{-1} = 0.632$$

의 일정값이 되므로 η 를 특성수명이라 한다. 즉, 특성수명이란 63%가 고장나는 시간을 의미한다.

3.3.2 욕조곡선

설비의 수명곡선은 Fig. 3.13과 같이 되며, 이것을 욕조곡선(Bath curve)라 부른다. 이 곡선에서 좌측은 고장률이 감소하는 부분(DFR)을 초기고장기간이라 하고, 중간은 고장률이 비교적 낮고 일정하게 유지되는 부분(CFR)을 우발고장기간이라 한다. 그리고 우측의 고장률이 증가되고 있는 부분(IFR)을 마모고장기간 또는 열화고장기간이라 부른다(豊田利夫, 1996).

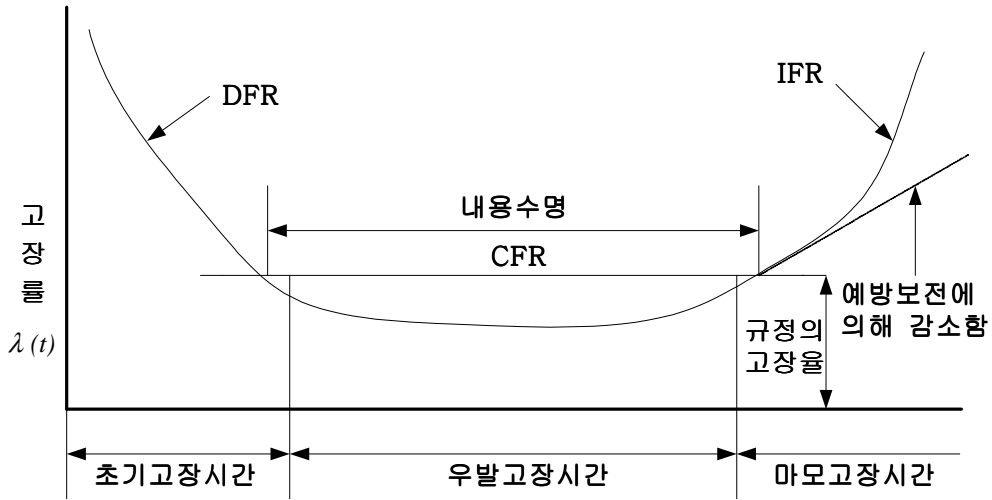


Fig. 3.13 Bath curve

Fig. 3.13에서 초기고장기간에 발생하는 고장의 원인은 다음과 같다.

- ① 표준이하의 단품을 사용
- ② 미흡한 품질관리
- ③ 작업자의 의지 결여
- ④ 제작 설비의 노후화
- ⑤ 불충분한 Debugging
- ⑥ 부품의 빈약한 가공기술 및 취급기술
- ⑦ 부품 조립 불량
- ⑧ 오염
- ⑨ 설치 불량
- ⑩ 기동 불량
- ⑪ 보관 및 운반중의 고장

위와 같은 원인으로 발생하는 하역장비의 초기고장은 품질관리, 시운전 및 최종검사, 상업운전에 주로 발생하게 되는데 이러한 고장이 제작 중 발견되지 않는 경우에는 큰 비용이 소요된다. 따라서 중간 및 최종검사에서 발견하여 펀치 리스트(Punch list)를 작성하여 시정이 되어야 한다.

우발고장기간에 발생하는 고장을 우발고장(Random failure)이라 한다. 우발고장의 원인은 다음과 같다.

- ① 신뢰성이 낮은 부품을 사용
- ② 부하가 기준 값보다 크다
- ③ 강도가 기준 값보다 크다
- ④ 혹사로 인한 누적 피로도
- ⑤ 운영자의 과실
- ⑥ 다양한 검사 기술에도 탐지되지 않는 결함
- ⑦ 디버깅(Debugging) 중에도 발견되지 않는 고장
- ⑧ 예방보전이나, 사후보전으로도 예방될 수 없는 고장
- ⑨ 천재지변

위와 같은 우발고장을 감소시키기 위해서는 여러 가지 조건을 고려하여 설계하여야 한다. 마모고장기간에 발생하는 고장을 일반적으로 마모고장이라고 하며 예방보전에 의해서만 감소시킬 수 있다.

- ① 부식, 산화
- ② 마모, 피로
- ③ 부적절한 오버홀
- ④ 불충분한 보전
- ⑤ 수축, 팽창, 균열, 파손
- ⑥ 사고
- ⑦ 외부환경의 급격한 변화

감소형고장률이 나타나는 초기고장기간에는 실제로 설비가 운영되어지는 기간과 상업운전이 시작되는 시점에 주로 발생한다. 출하 전 번인(Burn-in)에 의해 신뢰성이 낮은 단품과, 제작과 실로 인한 설비의 초기 고장을 찾아내는 디버깅 기간에 해당한다. 설치 후 상업운전이 시작되면 설비는 실제로 일정형 고장률을 갖는 우발고장기간에 있다는 가정이 가장 많다.

육조곡선에서 증가형고장률을 나타내는 마모고장기간에서 만일 일정시간간격으로 예방보전을 실시한다면 Fig 3.14에서 볼 수 있는 것과 같이 고장률이 계속 증가하지 않고 예방보전주기(t_0)에 따라 고장률이 감소하였다가 다시 증가하는 톱니형태가 되고, 예방보전 실시시의 고장률이 예방보전 불실시의 고장률보다 적어진다(이상용, 1997).

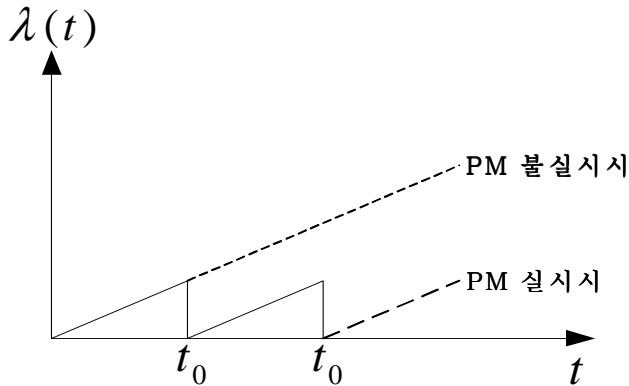


Fig. 3.14 Effect of IFR and PM

따라서 마모고장기간의 고장률을 감소시키기 위해서는 예방보전이 유효하다고 말한다. 일정형고장률을 말하는 우발고장기간에서는 예방보전이 효과가 없고 사후보전이 효과적이다. 이것은 하역장비가 운영사에 설치되고 난 후 시운전과 상업운전 초기에 주로 발생하게 되며, 이유는 각종단위 구성품들은 사용기간이 신뢰성을 의심할 만큼 사용하지 않았다.

하역장비의 동작을 확인하고 감시하기 위한 부품을 예를 들면 동일한 부품들이라도 미세한 차이는 있게 마련이다. 이 미세한 차이를 부품을 교체하는 것은 보전비용의 증가로 이어지고, 단품의 특성을 고려하여 시운전을 병행하여 조정을 하는 것이 효과적이다.

일정형고장률이 의미하는 우발고장기간에서는 예방보전을 실시하든 안하든 고장률에는 큰 변화가 없으므로 예방보전을 실시한다면 비용만 지출되기 때문이다. 일정형고장률은 단품과 단위 구성품들의 신뢰성에 관계되는 문제이다.

시간 t_0 주기로 예방보전을 실시하는 경우의 신뢰도 (t) 라 하면 사용시간 t 가 $0 \leq t \leq t_0$ 이면 (t) 는 다음과 같다.

$$R(t) = R(t) \quad (3.25)$$

그리고 사용시간 t 가 $t_0 \leq t \leq 2t_0$ 이면 $R(t)$ 는 다음과 같다.

$$R(t) = R(t) \cdot R(t - t_0) \quad (3.26)$$

마찬가지로 사용시간 t 가 $2t_0 \leq t \leq 3t_0$ 이면

$$R(t) = R(t_0)^2 \cdot R(t - 2t_0) \quad (3.27)$$

사용시간 t 가 $nt_0 \leq t < (n+1)t_0$ ($n = 0, 1, 2, \dots$)이면 주기 t_0 주기로 예방보전을 실시한 경우의 신뢰도 $Rm(t)$ 는 다음과 같다.

$$Rm(t) = R(t_0)^n \cdot R(t - nt_0) \quad (3.28)$$

만일 고장률이 CFR이면 $R(t) = e^{-\lambda t}$ 가 되고 식(3.27)은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} Rm(t) &= [e^{-\lambda t_0}]^n [e^{-\lambda(t - nt_0)}] \\ &= e^{-n\lambda t_0} \cdot e^{-\lambda(t - nt_0)} \\ &= e^{-\lambda t} = R(t) \end{aligned} \quad (3.29)$$

즉, t_0 주기로 예방보전을 실시하는 경우의 신뢰도 $Rm(t)$ 와 예방보전을 실시하지 않는 경우의 신뢰도 $R(t)$ 는 같기 때문에 일정형 고장률인 경우 예방보전의 효과는 없음이 증명된다.

그러나 만일 신뢰도가 $R(t) = e^{-\left(\frac{t_0}{\eta}\right)^m}$ 인 와이블 분포에 따르면 식(3.25)는 다음과 같이 된다.

$$Rm(t) = \left[e^{-n\left(\frac{t_0}{\eta}\right)^m} \right] \left[e^{-\left(\frac{t - nt_0}{\eta}\right)^m} \right] \quad (3.30)$$

예방보전의 효과를 평가하기 위해 편의상 $t = nt_0$ 로 놓고 $Rm(t)$ 와 $R(t)$ 의 비를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{Rm(nt_0)}{R(nt_0)} &= \frac{[e^{-n(\frac{t_0}{\eta})^m}][e^{-(\frac{nt_0 - nt_0}{\eta})^m}]}{e^{-(\frac{nt_0}{\eta})^m}} & (3.31) \\ &= \frac{e^{-n(\frac{t_0}{\eta})^m}}{e^{-(\frac{nt_0}{\eta})^m}} \\ &= e^{-n(\frac{t_0}{\eta})^{m+\epsilon} - (\frac{nt_0}{\eta})^m} \end{aligned}$$

식(3.31)에서 식(3.32)의 조건에 성립하면 예방보전이 효과적이고, 그렇지 않으면 예방보전의 효과가 없음을 알 수 있다.

$$\left(\frac{nt_0}{\eta}\right)^m > n\left(\frac{t_0}{\eta}\right)^m \quad (3.32)$$

식(3.32)의 조건을 간단히 하면 다음과 같다.

$$(n)^{m-1} > 0 \quad (3.33)$$

따라서 만약 $m = 1$ 일정형 고장률이면 식(3.33)의 조건을 만족시키지 못하므로 예방보전은 효과가 없다. 그러나 $m > 1$ 증가형 고장률이면 만족시킨다. 즉, 고장률이 증가형이면 예방보전에 효과적임이 증명된다. $m < 1$ 감소형 고장률이면 예방보전시 신뢰도가 더 줄어들기 때문에 초기고장기간에는 고장률이 감소하고 있는 현상을 증명해 줄뿐만 아니라 예방보전에는 효과가 없다는 것이 증명된다.

위와 같이 고장률의 패턴에 따라 예방보전과 사후보전의 유효성이 증명되기 때문에 만일 번인에 의한 초기고장률을 빨리 감소시켜 고장률이 일정한 우발고장기간에 진입하게 하고, 예방보전에 의한 마모고장기간의 증가형고장률을 감소시킨다면 고장률이 일정한 우발고장기간은

육조곡선상의 전후로 연장된다.

고장률이 시간적으로 일정한 우발고장기간에서는 고장률 $\lambda(t)$ 는 시간에 따라 변하지 않는 상수로 볼 수 있다. 따라서 이미 설명한 것과 같이 신뢰도 함수 $R(t)$ 는 $R(t) = e^{-\lambda t}$ 와 같이 지수분포가 된다.

지수분포를 특징지어 주는 것은 평균고장률 λ 가 되며, 이것의 역수 $1/\lambda$ 은 시간의 단위를 가지게 되므로 고장발생 시까지 평균수명을 나타낸다. 위에서 언급한 부분들은 육조곡선의 감소형, 일정형, 증가형 세 가지의 고장형태에 의해 나타낸 것이다. 이 세 가지에 대한 고장형태를 각각 설명하면 다음과 같다.

- ① 초기고장기간 : 설비를 새로 설치시 또는 복구 직후의 기간으로서 이 기간은 높은 고장률을 나타내지만 점차 안정되어 일정치를 나타내게 된다.
- ② 우발고장기간 : 고장률이 일정한 기간이다. 이 기간은 고장의 타이밍과 원인에 의한 랜덤(Random)한 시간기준예방보전은 무의미하며, 설비운용 관리 및 예지보전 방식이 유효하다.
- ③ 마모고장기간 : 마모와 피로가 진행되어 고장률이 상승하기 시작하는 기간이다. 이 기간에는 예방보전 방식이 효과적이다.

위의 두번째 항에서의 예방보전이 무의미하다고는 하지만 예방보전이 없는 예지보전의 효과는 매우 낮다고 할 수도 있다. 그 이유는 예지보전을 위한 데이터에 의해 보전작업이 이루어지지만 각 단위 구성품들이 정해진 시간만큼의 사용이 항상 가능하리라고 보기는 어렵다. 따라서 예방보전을 통한 예지보전이 이루어져야 할 것이다.

3.4 보전성

3.4.1 평균수명과 평균고장

평균수명이란 기대시간(Expected time)이기 때문에 확률의 기대값 공식에 의하면 다음과 같다.

$$E(t) = \int_0^t t \cdot f(t) dt \tag{3.34}$$

고장확률밀도함수 $f(t)$ 만 알게 되면 식(3.34)에 의하여 평균수명이 구해진다. 만일 신뢰도함수 $R(t)$ 를 알면 다음 식에 의해서도 평균수명을 구할 수 있다.

$$E(t) = \int_0^{\infty} t \cdot R(t) dt \quad (3.35)$$

이와 같이 $E(t)$ 는 시스템을 수리해 가면서 사용하는 경우, 3.2절에서 언급한 것과 같이 평균수명이라 부르고, 수리하여 사용할 수 없는 경우에는 평균고장이라 부른다. 평균고장 또는 평균수명은 고장확률밀도함수 $f(t)$ 나 신뢰도함수 $R(t)$ 가 정해지면 식(3.34)이나 식(3.35)에 의해 구해진다. 고장확률밀도함수 $f(t)$ 가 지수분포이면 다음 식(3.36)에 의하여 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} R(t) &= \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right] \\ &= \exp[-\lambda(t)] = e^{-\lambda t} \end{aligned} \quad (3.36)$$

따라서 평균수명(MTBF 또는 MTTF) $E(t)$ 는 다음과 같다.

$$E(t) = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (3.37)$$

지수분포인 경우 평균수명은 평균고장률 λ 의 역수가 된다. 만일, 고장확률밀도함수가 지수분포인 어떤 부품을 평균수명만큼 사용한다면 $t=MTBF$,

$\lambda=1/MTBF$ 가 된다. 이때 신뢰도는 $R(t=MTBF)$ 는 다음과 같다.

$$R(t = MTBF) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{MTBF}{MTBF}} = 0.368$$

이 부품을 평균수명만큼 사용한다면 약 37%가 생존하고, 73%는 고장이 발생함을 의미한다. 고장확률밀도함수 $f(t)$ 가 정규분포이면 식(3.16)이 되고, 식(3.34)에 의하여 정리하면 평균수명

$E(t)$ 와 평균수명의 분산 $V(t)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E(t) &= \mu \\ V(t) &= \sigma^2 \end{aligned} \tag{3.38}$$

정규분포의 경우 정규분포의 모수인 μ 가 평균수명이 된다. 만일 고장확률밀도함수가 위치모수 $r=0$ 인 와이블 분포이면 신뢰도함수 $R(t)$ 는 식(3.23)으로부터

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m}$$

이 된다. 이 식을 식(3.35)에 대입하여 풀면 평균수명 $E(t)$ 는

$$E(t) = \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \tag{3.39}$$

이 되고, 평균수명의 분산 $V(t)$ 는 다음과 같다.

$$V(t) = \eta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right) \right] \tag{3.40}$$

여기서 와이블 분포의 경우에는 감마 함수표에 의한다.

고장확률밀도함수 $f(t)$ 지수분포이면 신뢰도함수 $R(t)$ 는 $e^{-\lambda t}$ 가 된다. 이 경우 평균수명 (MTBF, MTTF) $E(t)$ 는 식(3.41)과 같이 된다.

$$E(t) = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \tag{3.41}$$

위 식에서 알 수 있듯이 평균고장률과 평균수명은 역수관계이다. 그러나 고장확률밀도함수가 정규분포나 와이블 분포에 따를 때는 또 달라진다.

누적고장률 $H(t)$ 는 고장률함수 $\lambda(t)$ 를 0에서부터 t 시간까지 적분한 것이다.

$$\int_0^t \lambda(t) dt = -\ln R(t) \quad (3.42)$$

따라서 누적고장률 $H(t)$ 는 식(3.43)과 같이 나타낼 수 있다.

$$H(t) = \int_0^t \lambda(t) dt = -\ln R(t) \quad (3.43)$$

시간 t_1 과 t_2 간의 구간고장률 $FR(t_1, t_2)$ 은 식(3.44)와 같이 시간 t_2 에서의 누적고장률 $H(t_2)$ 에서 시간 t_1 에서의 누적고장률 $H(t_1)$ 을 뺀 값이다.

$$FR(t_1, t_2) = H(t_2) - H(t_1) \quad (3.44)$$

식(3.43)에 의하면

$$H(t_1) = -\ln R(t_1)$$

$$H(t_2) = -\ln R(t_2)$$

가 된다. 구간고장률 $FR(t_1, t_2)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} FR(t_1, t_2) &= -\ln R(t_2) + \ln R(t_1) \\ &= \ln R(t_1) - \ln R(t_2) \end{aligned} \quad (3.45)$$

따라서 시간 t_1 과 t_2 간의 구간평균고장률 AFR(Average Failure Rate)은 다음과 같다.

$$AFR(t_1, t_2) = \frac{\ln R(t_1) - \ln R(t_2)}{t_2 - t_1} \quad (3.46)$$

사용초기인 $t = 0$ 에서부터 T 시간까지의 총평균고장률 $AFR(T)$ 는 다음과 같다.

$$AFR(T) = \frac{-\ln R(T)}{T} \quad (3.47)$$

따라서 고장확률밀도함수가 지수분포를 따르지 않고, 정규분포나 또는 와이블 분포에 따르는 경우에는 구간평균고장률은 식(3.46), 총평균고장률은 식(3.47)에 의하여 얻을 수 있다. 만일 고장확률밀도함수가 위치모수 $r = 0$ 인 와이블 분포에 따른다면

$$-\ln R(t_1) = \left(\frac{t_1}{\eta}\right)^m, \quad -\ln R(t_2) = \left(\frac{t_2}{\eta}\right)^m$$

가 된다. 그러므로 구간평균고장률은 식(3.46)에 의해 다음과 같이 된다.

$$AFR(t_1, t_2) = \frac{\left(\frac{t_2}{\eta}\right)^m - \left(\frac{t_1}{\eta}\right)^m}{t_2 - t_1} \quad (3.48)$$

고장확률밀도함수가 지수분포가 아닌 경우 위와 같은 방법을 사용하여 구할 수 있다.

3.4.2 하역장비의 보전성

신뢰성이란 시간경과에 반비례하며 가동시간, 운전방법 또는 횟수에 따른 피로도 또는 마모에 의한 것과 노화나 부식 등의 열화현상에 의한 것을 들 수 있다. 이와 같은 현상에 대해 수리 가능한 설비를 사용 가능한 상태로 유지시키고, 고장이나 결함을 회복시키기 위한 제반조치 및 활동을 보전이라 한다. 하역장비보전을 행하기 위한 작업에는 다음과 같은 것들이 있다.

- ① 청결, 주유, 유효수명부품의 교체.
- ② 크기와 운영시기에 따라 점검, 검사 또는 오버홀로 구분.
- ③ 조정, 수리, 교체

예방보전은 고장 또는 결함의 발생을 미리 방지하고 언제나 사용가능한 상태로 유지하기 위하여 계획에 의해 보전을 실시하며, 상시 또는 정기적으로 동작 상태를 감시하여 고장 및 결

함을 사전에 검출하는 예방보전과 결함이나 고장이 발생한 후에 이것을 수리행위를 통해 회복시키는 사후보전으로 구분된다.

보전성이란 “주어진 조건이나 정해진 시간에 보전을 완료할 수 있는 성질”이며, 이 성질을 확률로 나타낸 경우 보전도(Maintainability)라 부른다. 여기에서 말하는 주어진 조건이란 다음과 같은 요소를 말한다(이상용, 1997).

① 보전성 설계

- 고장이나 결함이 발생한 부분에 접근성이 좋아야 한다.
- 고장이나 결함의 징조를 용이하게 검출할 수 있어야 한다.
- 고장, 결함부품 및 재료의 교환이 신속하고 용이해야 한다.
- 수리와 복구가 용이해야 한다.

② 보전자의 자질

- 고장이나 결함의 원인탐구능력이 우수해야 한다.
- 충분한 경험을 가지고 있어야 하고, 수리에 숙련도가 높아야 한다.
- 보전규정, 보전 지침서, 설비취급설명서, 시스템 등의 이해도가 높아야 한다.
- 충분한 보전 교육과 책임감이 높아야 한다.

③ 설비 및 예비품의 보전

- 수리용 공구와 공작기계 등의 보전
- 계측기의 정밀도 관리와 보조부품, 재료 및 소모성 부품의 보급이 원활해야 한다.
- 작업환경의 청결

그리고 규정된 조건이란 하역장비의 작업시작시간에 맞추어 가동휴지시간에 보전을 완료하여 하역작업에 차질이 없어야 함을 의미하며, 이러한 보전허용시간을 말한다(백순흠, 2001).

3.4.3 하역장비의 가동성

수리 가능한 시스템의 가동 및 비가동 시간을 분석해 보면 Fig. 3.15와 같다.

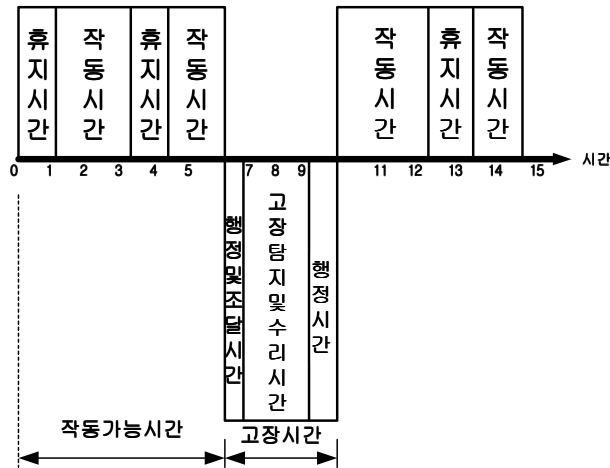


Fig. 3.14 Analysis of operating and resting time

시스템이 언제나 작동 가능한 준비가 되어 있음을 나타내는 척도를 작동준비성(Operational readiness)이라고 하며 다음과 같이 정의한다.

$$\text{작동준비성} = \frac{\text{작동가능시간}}{(\text{작동가능시간} + \text{고장시간})} \quad (3.49)$$

그리고 시스템이 어떤 준비 기간 중에 충분한 성능을 발휘하고 있을 시간의 비율을 가동성(Availability)라 하는데 이것은 다음과 같이 정의한다.

$$\text{가동성} = \frac{\text{작동시간}}{(\text{작동시간} + \text{고장시간})} \quad (3.50)$$

고장시간 중 실제 고장을 탐지하고 수리하는 시간은 시스템 고유의 보전성 설계에 기인하는 것이기 때문에 고장시간을 고장탐지 및 수리시간만으로 나타내어 가동성을 따지는 경우 이것을 고유가동성 (Inherent availability)라 하고 다음과 같이 정의한다.

$$\text{고유가동성} = \frac{\text{작동시간}}{\text{작동시간} + \text{고장탐지 및 수리시간}} \quad (3.51)$$

신뢰도함수 $R(t)$ 가 평균고장률이 λ 인 지수분포에 따르고, 보전도함수 $M(t)$ 가 평균수리율 μ 인 지수분포에 따른다면 신뢰도함수 $R(t)$ 와 보전도함수 $M(t)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R(t) &= e^{-\lambda t} \\ M(t) &= 1 - e^{-\mu t} \end{aligned} \quad (3.52)$$

식(3.52)에서 신뢰도란 설비가 t 시간 이후 가동할 확률을 의미하고, 보전도는 고장난 설비가 t 시간 이내에 복구될 확률을 의미한다. 시스템이 Δt 시간 중에 고장 날 확률은 $\lambda\Delta t$ 이고, 고장 난 시스템이 Δt 시간 중에 회복 될 확률은 $\mu\Delta t$ 이므로 $(t + \Delta t)$ 시간에서의 시스템 기동성 $A(t + \Delta t)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A(t + \Delta t) &= A(t)(1 - \lambda\Delta t) + [1 - A(t)]\mu\Delta t \\ &= A(t) - \lambda A(t)\Delta t + \mu\Delta t - \mu A(t)\Delta t \end{aligned}$$

양변을 Δt 로 나눈 후, Δt 를 0으로 수렴하면

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{A(t + \Delta t) - A(t)}{\Delta t} &= -(\lambda + \mu)A(t) + \mu \\ \frac{d}{dt} A(t) &= -(\lambda + \mu)A(t) + \mu \end{aligned}$$

가 되고, 이것은 $A'(t) + (\lambda + \mu)A(t) = \mu$ 의 미분방정식이므로 이것의 해를 구하면 식(3.53)과 같다.

$$A(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\mu + \lambda)t} \quad (3.53)$$

식(3.53)에서 t 를 ∞ 로 수렴하면 식(3.54)가 된다.

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad (3.54)$$

식(3.54) 우변의 분자와 분모를 각각 $\lambda\mu$ 나누면 다음과 같다.

$$A = \frac{\frac{1}{\lambda}}{\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\mu}} \quad (3.55)$$

지수분포인 경우 평균고장률과 평균수명은 서로 역수관계이다. 이것을 대입하면

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3.56)$$

가 되고, 가동성과 관계되는 식(3.50)과 일치한다.

3.5 하역장비의 고장 분석

3.5.1 갠트리 크레인의 고장

갠트리 크레인의 고장현황은 다양한 형태로 나타난다. 컨테이너화물의 적화와 양화는 선박의 구조, 장치장의 예정 장치위치, 컨테이너의 중량을 고려한 선박내 화물 배치, 컨테이너화물의 목적지에 따른 선박내 화물 배치 등을 고려하여 하역 계획을 수립하게 되며 하역장비의 고장에 대한 부분은 고려되지 않는다.

그러나 지속적인 관리와 통계, 각 단위 모듈의 자료에 의해 고장예견이 가능한 부분도 있으나 이러한 고장은 항상 예고없이 찾아오는 경우가 빈번하다. Fig. 3.16는 Fig 3.15의 고장수리 시간을 상세하게 나타낸 것이다. 고장 발생에서부터 고장 수리 완료후 정상적인 작업 준비시간까지의 과정을 타임차트(Time chart) 형태로 나타내었다.

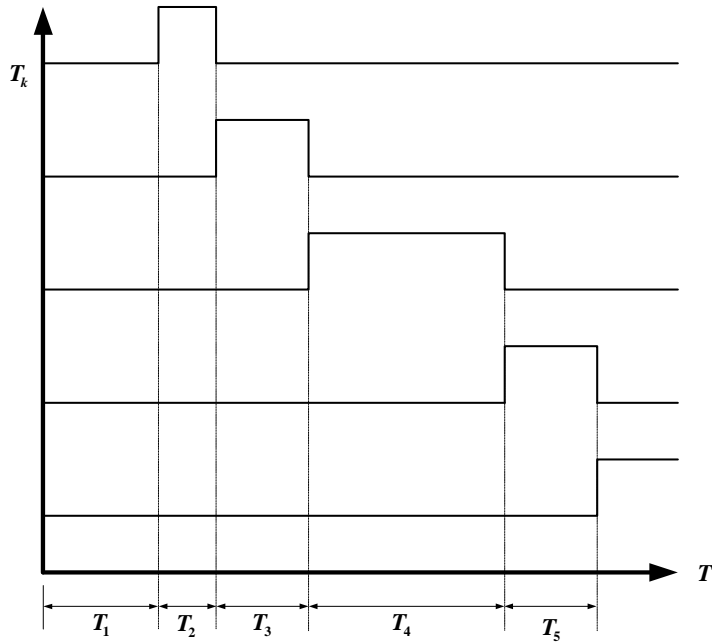


Fig. 3.16 Analysis of fault repair time

$$T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 = T_K \quad (3.57)$$

단, T_1 : 고장발생후 고장진단시간

T_2 : 고장수리 준비시간

T_3 : 고장수리시간

T_4 : 고장수리후 시운전시간

T_5 : 정상하역작업 준비시간

T_K : 고장수리 전체수리시간

식(3.57)은 고장발생부터 수리시간까지를 나타낸 것으로써 정상적인 하역작업은 T_5 시간 이후가 된다. T_K 시간을 줄이는 방안 중에 하나로 하역장비에 설치되는 크레인모니터링시스템(Crane monitoring system)을 사용하기도 한다.

또한, 하역장비 운용을 효율적으로 감시하기 위한 방법의 하나로 위성 또는 다른 통신 매체를 사용하여 현장이 아닌 사무실에서의 하역장비의 가동상태를 파악하며 고장초기 대처시간을

줄이기 위하여 원격모니터링시스템(Remote crane monitoring system)이 실용화되고 있다. 최근에는 Fig. 3.15에 나타낸 것과 같이 각 단계별 시간을 줄이면서 궁극적으로는 전체시간을 줄이기 위한 세부시간분석으로 방안을 강구하는 연구가 진행되고 있다.

위의 고장수리시간을 제외한 본선작업중 발생하는 작업중단 사유는 Table 3.4와 같이 나타내며, 이에 대한 사유는 매우 다양한 형태로 나타난다. 이것은 반대로 그만큼 다양한 형태로 작업중단 사유가 발생된다는 것과 같은 의미이다(허윤수, 2000).

고장수리시간 산정시 투입 하역장비의 댓수를 기초로 하며 단위시간별 갯수로 나타내게 된다. 여기에 작업중단 사유에 해당하는 Table 3.4에 각 항목별 점유율이 들어가게 된다. 즉, 각 작업중단 사유로 인한 시간을 비율로 나타낸 것을 점유율로 표현하고 있다.

Table 3.4 Suspension code of cargo operation

번호	작업중단코드	내용
1	RG	Rigging time(G/C 이동시간)
2	BO	Boom up & down 후 이동시간
3	GT	G/C trouble(G/C 고장에 따른 작업지연)
4	CG	Not arrive cargo on the G/C(화물 미도착)
5	YD	Yard work delay(야드 작업지연)
6	BB	Break bulk 작업
7	ML	Meal time(식사시간)
8	WE	Weather(기상악화로 인한 작업지연)
9	SH	Ship trouble(선체이상으로 인한 작업지연)
10	WD	Waiting documentation(서류지연)
11	EF	Electric power failure(정전)
12	LS	Lashing delay(랫싱작업 지연)
13	FC	Floating crane 작업지연
14	HCC	Hatch cover closed(해치카버 닫음)
15	HCO	Hatch cover open(해치카버 열림)
16	TT	T/C trouble(T/C 고장에 따른 작업지연)
17	GI	G/C interference(G/C 간섭으로 인한 작업지연)
18	TI	T/C interference(T/C 간섭으로 인한 작업지연)
19	OH	Over dimension(장척화물로 인한 작업지연)
20	ETC	기타 작업지연

다음은 본 논문의 모델이 된 "H" 컨테이너 터미널의 2005년도 5개월 동안의 평균 생산성 지표이다.

- ① 생산성 : 74.9 % (컨테이너 갯수 24.4개)
- ② 작업 중단 점유율 : 25.1%
- ③ 투입 G/C : 4기
- ④ 투입 T/C : 8.4기
- ⑤ 투입 Y/T : 10.7기
- ⑥ H/C 수량 : 29.6개
- ⑦ 미 반입 컨테이너 수 : 55.1개
- ⑧ 반입수량 : 337.4개
- ⑨ 반출수량 : 458개
- ⑩ 구내이적 : 50.7개
- ⑪ 장치율 : 73.5개
- ⑫ 총작업시간 : 2,534Min

컨테이너 터미널에서 작업이 중단되는 사유중에서 작업을 하기 위해 이동하는 시간, 붐 상승 및 하강시간 등과 같이 작업에 꼭 필요한 가동시간과 기상악화, 반입지연, 관련서류처리와 같은 여러 가지의 외적인 요인들이 있다. Fig. 3.17에서는 총작업시간을 기준으로 하여 하역작업이 중단된 비율을 나타낸 것이다.

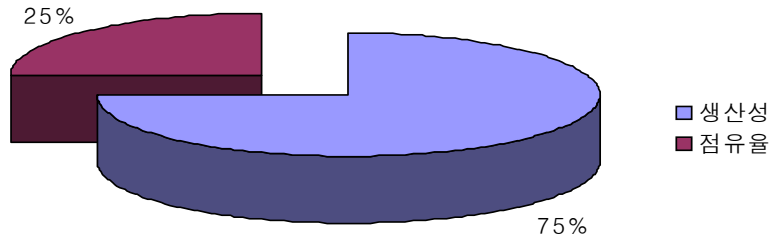


Fig. 3.17 Occupation ratio of cargo working suspension of gantry crane

Fig. 3.18은 컨테이너 터미널 내의 각종 하역장비의 하역 작업이 중단 되는 요인별로 분석을 한 것이며, 갠트리 크레인과 트랜스퍼 크레인의 고장으로 가장 많이 작업이 중단되고 있음을 알 수 있다.

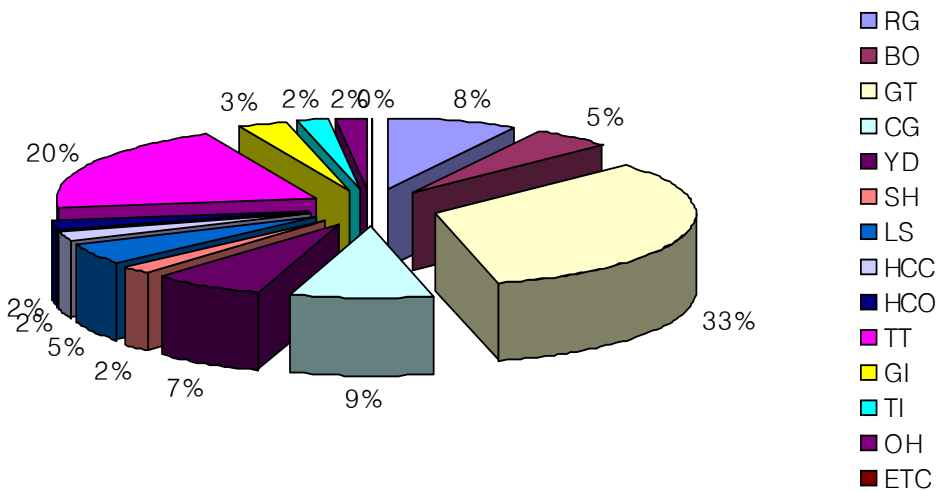


Fig 3.18 Analysis of occupation ratio of cargo working suspension of gantry crane

Fig 3.19는 갠트리 크레인의 고장으로 인한 작업중단비율 33%중 기계와 전기분야로 나누어 분류한 것이며, 전기분야가 고장이 많이 발생됨을 알 수 있다.

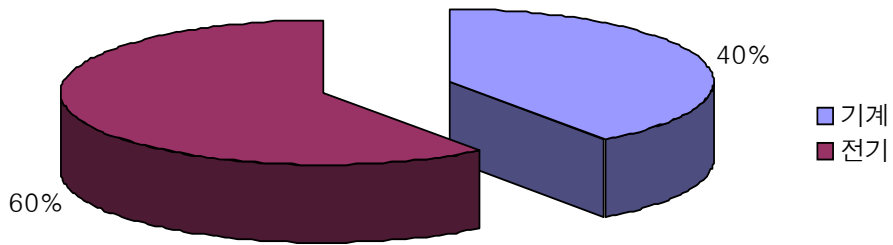


Fig. 3.19 Fault ratio of mechanical and electrical parts of gantry crane

Fig. 3.20은 기계와 전기분야의 고장수리시간을 나타낸 것이다. 고장발생 비율은 전기분야가 많이 발생을 하고 수리하는 데 걸리는 시간은 상대적으로 기계분야가 많다. 기계분야는 장치류의 구조특성상 단순교체를 하는 일은 많지 않다. 일부는 그대로 작업을 진행하는 경우도 빈번히 발생한다. 특히 작동유 누유는 누유되는 양이 극소량일때는 보충하면서 그대로 사용하는 경우가 대부분이다.

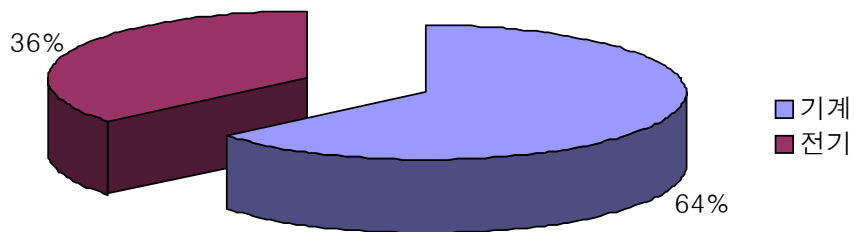


Fig. 3.20 Ratio of fault repair time of mechanical and electrical part of gantry crane

Fig. 3.21은 전기분야 고장의 동작별 분류를 나타낸 것이며, 특히 주행부분과 스프레더에 많은 고장이 발생하는 것을 알 수 있다. 주행부분은 많은 주전동기와 각 전동기마다 부착되어 있는 마그네틱 브레이크 및 휠 브레이크의 수가 많기 때문에 그만큼 고장 포인트가 많다는 것을 의미한다. 그외 고압케이블에 의해 고압의 전원이 공급되기 때문에 안전을 고려하여 고압케이블을 보호하기 위한 안전장치가 매우 많기 때문이다. 스프레더는 직접 화물 및 본선 내의 셸 가이드 등에 직접 접촉하는 부분이므로 상대적으로 많은 고장이 발생하고 있다.

전기분야에서 작업중 발생하는 고장은 주동작 전동기나 반도체 소자 또는 위치센서 등 복잡한 연산과 시간을 나타내는 부분이 아니면 간단한 온 오프(On/Off) 센싱(Sensing) 문제이거나, PLC로의 입·출력 부분이 대부분을 차지하여 수리에 많은 시간을 지체하지 않는다.

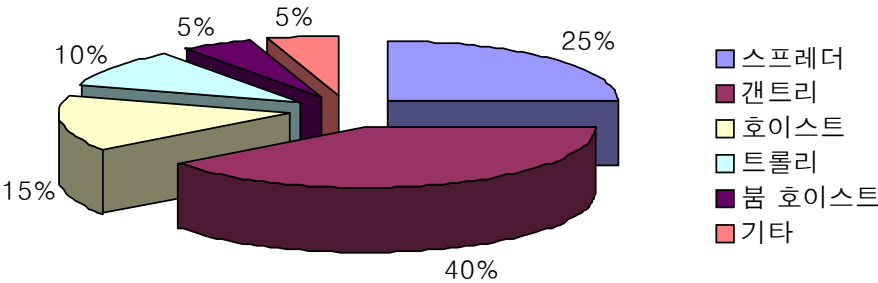


Fig. 3.21 Fault ratio of gantry crane electrical part

Fig. 3.22는 전기 분야 고장 수리 시간별 분류를 나타낸 것이다. 호이스트와 트롤리 부분이 가장 많은 부분을 차지하고 있다. 호이스트와 트롤리가 가장 시간을 많은 비율을 차지하는 것은 동작 시간이 가장 많기 때문에 마모와 피로도가 그 만큼 많이 누적 된다는 반증이기도 하다.

특히 호이스트 부분은 많은 동작빈도와 속도 가·감속과 부하의 중량 변동에 따른 많은 전류가 흐르기 때문에 반도체 소자와 주전동기 그리고 위치제어를 하는 부분에서 누적 공차가 그 만큼 크다는 것을 의미한다.

이 외에 갠트리 크레인의 직접적인 가동을 멈추게 하는 부분은 그다지 많지 않다. 그러나 가동은 되고 있지만 생산성에 직접적인 영향을 주는 부분은 상대적으로 많이 존재한다.

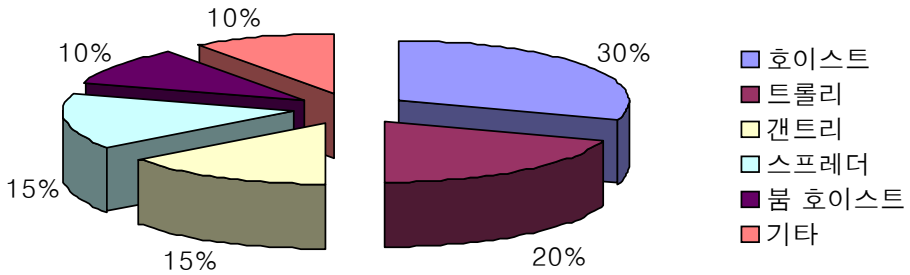


Fig. 3.22 Ratio of fault repair time of gantry crane electrical part

야간작업시 조명 점등 불량, 틸팅장치 불량으로 인한 본선 위에서의 컨테이너를 놓기 위한 위치 조정의 불량은 외부 환경의 영향으로, 특히 바람으로 인한 본선의 흔들림은 틸팅장치의 동작불량은 하역작업 지연이 불가피하다.

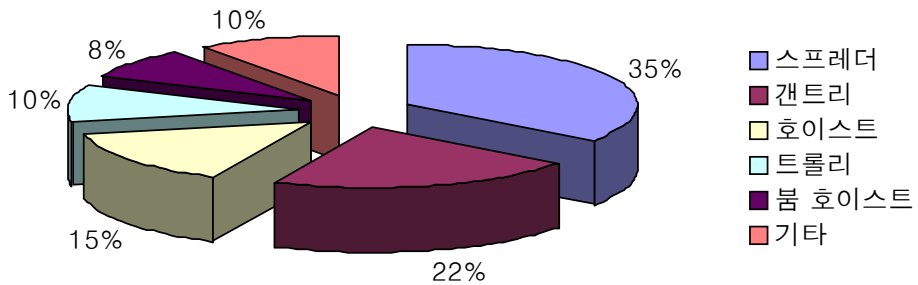


Fig. 3.23 Fault ratio of gantry crane mechanical part

기계분야의 고장비율은 Fig. 3.23에 나타난 것과 같이 구조 변형을 가져오는 스프레더 부분이 가장 많다. 스프레더는 직접 컨테이너화물과 접촉을 하는 부분으로 충격을 가장 많이 받는

부분으로 가장 큰 단위 부품이다.

다음은 전기 분야와 마찬가지로 주행 부분이다. 많은 전장품이 설치되어 있는 부분이므로 고장 빈도수가 높은 부분에 속한다. 기계분야 고장수리 시간별 분류는 Fig 3.24에 나타낸 것과 같이 호이스트 부분이 가장 많다. 가장 많은 구동을 하는 부분이므로 마모율이 가장 높다.

붐 호이스트는 운전시간은 그리 많지는 않지만 붐이라는 구조물 자체 중량이 200~250Ton에 이른다. 무거운 자체중량을 작은 힘으로 들기 위해서는 다른 전동기에 비해 비교적 작은 용량의 전동기로 기어비가 큰 감속기를 통해 최대의 토크로 들어 올리고 내려야 하기 때문이다. 중량이라는 점과 관련 구조물이 매우 크다는 점 때문에 고장 수리에 많은 시간을 소요하게 된다.

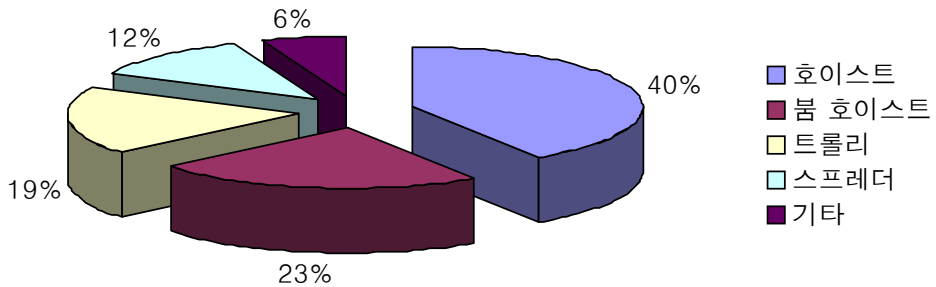


Fig. 3.24 Ratio of fault repair time of gantry crane mechanical part

Fig. 3.17 ~ Fig 3.20은 갠트리 크레인의 고장비율을 살펴보면 고장횟수는 전기부분이 많은 빈도수를 차지하고 있고, 기계분야는 시간에서 많은 빈도수를 차지하고 있음을 알 수 있다. 그리고 기계와 전기분야가 포함되는 경우도 발생하고, 기타 사항은 직·간접적인 영향을 주는 부분이 발생하기도 한다.

3.5.2 트랜스퍼 크레인의 고장

트랜스퍼 크레인은 본선지원과 야드 내 반출·입 작업을 주로 담당하게 된다. 고장의 빈도가 갠트리 크레인보다 더 많은 경우도 발생한다. 가장 큰 주된 이유는 안정된 육상전원을 사용하지 않고, 발전기 전원을 사용한다는데 있다. 이러한 이유로 가동중 잦은 부하변동으로 인한 발전기 전원이 매우 불안정한 경우가 자주 발생한다. 그러므로 노이즈 발생 등 제어기기의 손상과 불안정한 입력전원이 인가되어 주전동기의 동력으로 사용되어 전동기 역시 불안정한 전원으로 인한 손상이 많은 부분을 차지한다.

이 불안정한 전원은 기계분야 역시 영향을 미친다. 제어가 불안하기 때문에 트랜스퍼 크레인 가동시 발생하는 전기분야 고장으로 급정지 또는 비상정지와 같은 상황이 발생하기도 하며, 고장발생 위치에 선적화물이 장치되어 있을 때 부득이하게 트랜스퍼 크레인을 견인하여 이동하는 경우가 발생한다. 주행부의 구조변형과 같은 빠른 시간 안에 발생하지 않지만, 장시간 사용시 문제로 대두되어도 수리에는 엄청난 시간과 비용이 소요되는 경우도 발생한다.

트롤리의 경우 야드 트랙터의 정차 위치에서 컨테이너화물을 들어서 장치장 1열에 장치 할 경우 작은 거리지만 주행을 해야 위치를 맞출 수 있는 경우가 발생한다. 그 위치에서의 장시간 가동시에는 컨테이너화물마다 주행을 반복해야하는 문제가 발생한다. 이것은 주행부의 구조가 변형되어 트롤리 레일의 직진도가 변형되었기 때문이다. 주행과 권상·권하 운전은 제작시 비용문제로 인하여 동일한 제어장치를 사용하는 것이 일반적이기 때문에 동작전환 되는 기계적인 단품들의 전환 시간까지 고려한다면 운전자가 느끼는 대기 시간은 매우 길다고 할 수도 있다.

Fig. 3.25는 트랜스퍼 크레인 기계와 전기분야 고장발생 비율을 나타 낸 것이다. 트랜스퍼 크레인에 전기분야 고장발생이 높은 것은 전원 불안정으로 인한 원인인 것으로 생각된다.

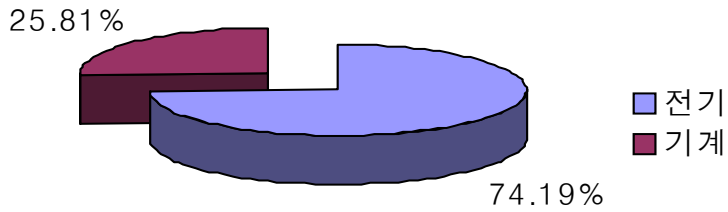


Fig. 3.25 Fault ratio of mechanical and electrical parts of transfer crane

Fig. 3.26은 기계와 전기분야 고장수리시간비율을 나타 낸 것이며 고장 발생빈도나 수리시간 비율이 기계분야보다 매우 많은 것으로 나타났다.

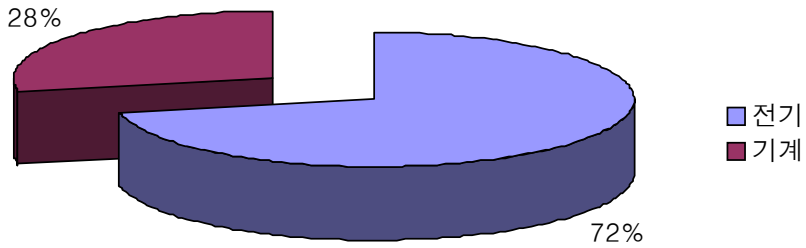


Fig. 3.26 Repair time ratio of mechanical and electrical parts of transfer crane

Fig. 3.27은 트랜스퍼 크레인의 부분별 고장발생비율을 나타내었으며 부속 장치들이 많은 갠 트리동작과 직접 컨테이너화물에 접촉하는 스프레더 순으로 고장이 많이 발생함을 알 수 있

다. 이는 갠트리 크레인과 동일한 비율 순서로 나타났다.

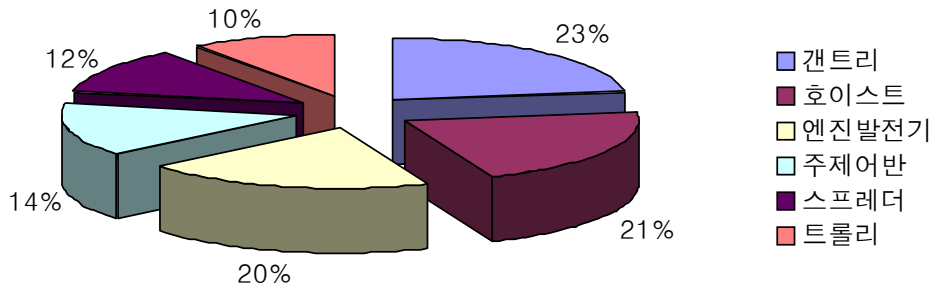


Fig. 3.27 Fault occurrence ratio per motion of transfer crane

Fig 3.28은 트랜스퍼 크레인 전기분야 동작별 고장 발생비율을 나타낸 것이며, 주제어반, 스프레더 및 엔진 발전기 순으로 많은 고장이 발생함을 알 수 있다.

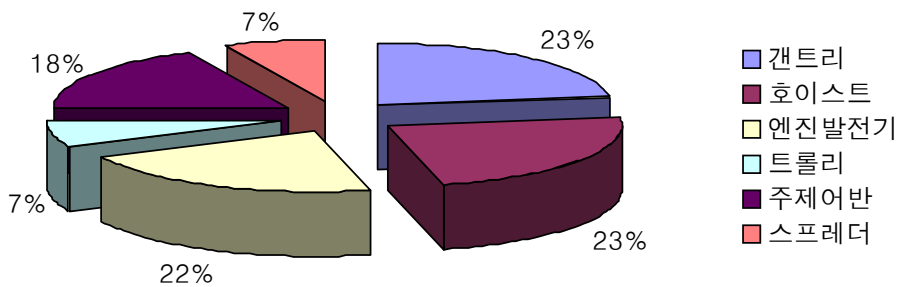


Fig. 3.28 Fault ratio per motion of transfer crane electrical part

Fig 3.29는 트랜스퍼 크레인 전기분야 동작별 고장수리시간비율을 나타낸 것이며 트랜스퍼 크레인의 고장 발생 비율은 권상부분과 갠트리가 비슷한 비율이고 엔진 발전기 부분이 가장 많은 고장이 나타나는 것으로 나타났다.

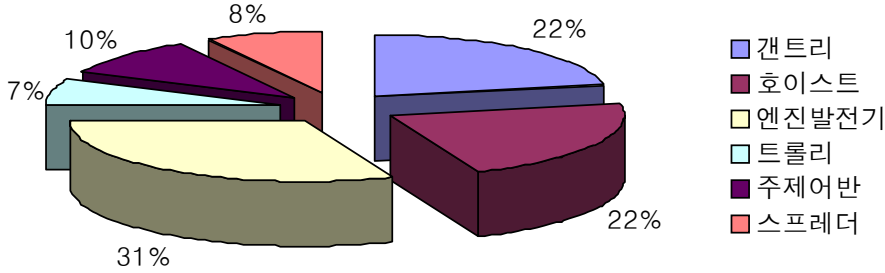


Fig. 3.29 Fault repair time ratio per motion of transfer crane electrical part

갠트리 크레인의 권상 주전동기는 대용량으로 2기이다. 갠트리 크레인은 전동기 1기 고장 시 남은 1기로 응급 가동이 가능하지만, 트랜스퍼 크레인의 권상 주전동기는 1기만 설치되어 있어 따로 응급 가동을 할 여지가 전혀 없다.

그리고 스프레더는 컨테이너 사이에 위치되어 고장이 발생하면 수리 또는 교체라는 방법 밖에는 없는 실정이다. 갠트리 부분 역시 많은 고장을 가져오는 부분이다. 양쪽 1기씩을 주행 전동기로 움직여야 하기 때문에 어느 한쪽이라도 고장이 발생하면 권상과 동일한 조건이다. 그리고 또 갠트리 부분은 야드내 전체를 이동하도록 제작이 되어 있기 때문에 휠턴장치에도 의외로 많은 부분 고장이 발생한다. 휠턴에는 접촉식 센서가 부착되어 있는 경우가 대부분이다. 이는 휠의 잠금과 Y축으로 주행을 가능케 하는 편리한 점도 있지만 중량의 트랜스퍼 크레인 전체의 무게를 안고 턴을 해야 하는 부담을 늘 가지고 있다.

이 위치에서의 접촉식 센서는 항상 대기예 노출되어 있고, 또 접점은 밀폐되어 있어 대기온도 차이에 의한 습기로 겨울철에 특히 접점이 얼어붙는 고장이 자주 발생한다. 최근에는 트랜스퍼 크레인 전체를 들어 올리는 잭 업 리프트(Jack-up lift) 장치가 별도로 설치되기도 하지만 이 역시 기계고장 포인트를 증가시키는 요인이 되기도 한다.

Fig 3.30은 트랜스퍼 크레인 기계분야 고장발생비율을 나타낸 것이다. 전기분야와 달리 주 제어반에 대한 내용은 기계에 포함되지 않았다. 기계분야 고장발생 비율은 스프레더가 가장 많으며, 이는 갠트리 크레인과 같이 직접 컨테이너화물에 접촉하는 단위구성품이기 때문이다.

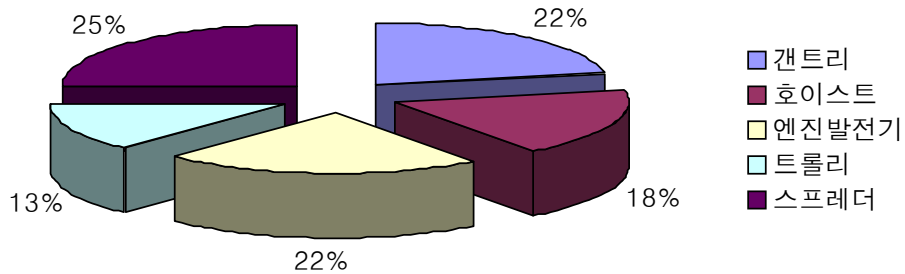


Fig. 3.30 Fault ratio per motion of transfer crane mechanical part

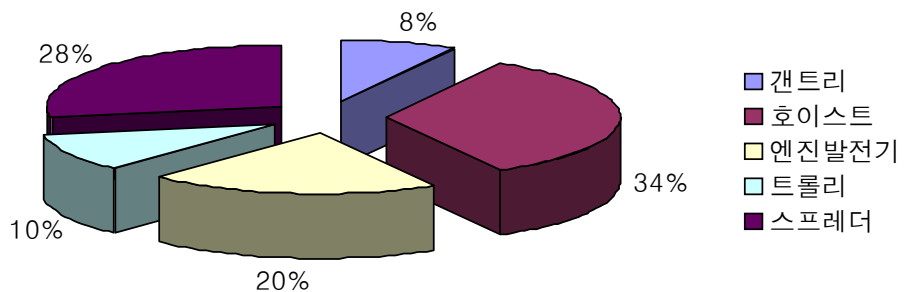


Fig. 3.31 Fault repair time ratio per motion of transfer crane mechanical part

Fig. 3.31은 트랜스퍼 크레인 기계분야 고장수리시간비율을 나타낸 것이다. 이는 가장 사용

빈도가 높은 호이스트 부분이고 다음으로 스프레더에 고장 수리 시간에 많은 시간이 소요됨을 알 수 있다

그리고 엔진 발전기는 기계, 전기분야 동일하게 고장수리에 상당히 많은 시간이 소요되는 것으로 나타난다. 이것은 자체 발전기를 탑재하므로 엔진이나 발전기 고장시 즉시, 모든 동작이 정지됨을 알 수 있는 부분이기도 하다. 또한 엔진 발전기는 고장이 발생치 않더라도 주기적인 교체작업을 통해 최상의 성능을 유지해야 한다. 이 교체 시간은 약 500분 정도 소요되지만 이 시간동안 트랜스퍼 크레인을 사용하지 못한다. 이 부분 역시 하역작업 생산성에 부정적인 영향을 미치는 시간으로 분류하여야 한다.

3.5.3 야드 트랙터의 고장

야드 트랙터의 엔진은 주기적으로 엔진 오버홀을 하게 되며 보통 년 단위 또는 거리 단위로 하게 된다. 엔진출력이 떨어지거나, 매연이 과다하게 발생할 경우 이루어지게 된다. 자동동력 전달장치 역시 주기적인 예방보전시 점검을 하고 고장 발생시 탈거하여 단품으로 교체하게 된다. 그리고 야드 트랙터의 고장은 이러한 이유로 인해 통계에 포함시키지 않는다.

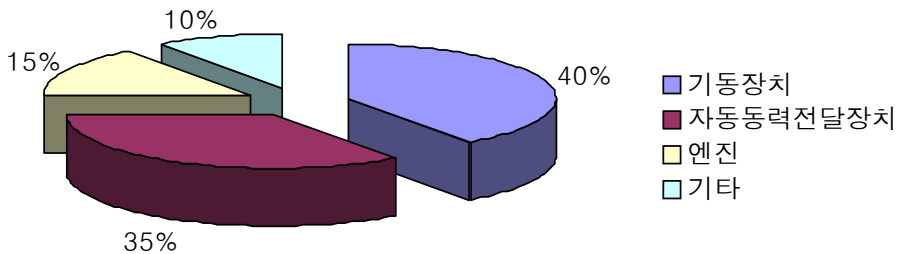


Fig. 3.32 Fault ratio of yard tractor

고장발생분포율은 Fig. 3.32와 같으며 기동장치와 기타 부분에 포함되는 외부 조명이나 냉난방 장치를 제외한 엔진과 자동동력전달장치의 응급 수리는 현장에서 하지 않는 경우가 대부분이다. 이 두 가지 단품은 주기적인 교체를 통하여 실제 가동중 고장사항을 최대로 줄인다.

야드 트랙터의 고장 발생은 운전자의 운전 습관에 따른 고장이 발생하는 경우가 매우 많다.

3.5.4 하역장비의 고장분석 결과

본 논문의 모델이 된 컨테이너 터미널의 하역장비 고장 및 수리시간을 요약하면 Table 3.5와 같다. 단, 야드 트랙터와 그 외 하역장비는 제외하였다.

본 절에서는 하역장비의 고장분석 결과를 다루며, 분석결과 선석당 평균작업시간이 42.23시간에 대하여 21.5%인 10.6시간이 작업중단비율로 나타났으며, 이중에서 G/C 및 T/C의 작업중단비율은 전체 작업중단비율의 13.29%인 5.61시간이고 이는 하역장비 고장으로 인한 중단비율 53%를 의미함을 Fig. 3.18에서 알 수 있다.

Table 3.5 The summary of operation suspended by fault of container terminal crane

선석당 평균작업시간	작업중단시간 (비율)	각 장비별 작업중단시간(비율)		분야별고장시간 (비율)	
42.23hr	10.6hr (21.5%)	G/C	3.5hr (8.29%)	전기	1.26hr (2.98%)
					기계
		T/C	2.11hr (5.0%)	전기	1.52hr (3.60%)
					기계
		소계	5.61hr (13.29%)	전기	2.78hr (8.29%)
				기계	2.83hr (6.71%)

위 결과에서와 같이 컨테이너 전용부두의 생산성은 하역장비의 고장에 의해 크게 영향을 받을 수 있었다. 가장 최적의 시스템은 컨테이너 터미널 내 하역장비의 고장이 없는 형태로 하역작업이 진행되어야 하는 것이 가장 바람직하지만, 현실은 그렇지 못하므로 때문에 고장의 형태를 분석하여 반영하고 고장을 최소화 하는 방향으로 모색되어야 한다.

컨테이너 터미널의 하역 생산성에 대한 정의는 단위시간 내에 얼마나 많은 컨테이너를 처리하느냐 하는 단순한 문제뿐만 아니라 여러 가지 사항이 고려되어야 하며, 주요 내용 다음과 같다.

- ① 외부 반입 반출 컨테이너화물의 대기시간 최소화
- ② 가동중 하역장비의 고장시간 최소화

- ③ 컨테이너 터미널 내 사고의 최소화
- ④ 기상 변화에 대한 적절한 대처로 피해 최소화
- ⑤ 컨테이너 터미널 운영 인력의 능력 극대화
- ⑥ 컨테이너 터미널 외부 조직과의 원활한 업무체제 구축
- ⑦ 관련 문서의 신속한 처리와 최소화
- ⑧ 운영과 하역장비간의 통합 모니터링
- ⑨ 컨테이너화물의 실시간 위치 추적
- ⑩ 생산성 향상을 위한 제도적인 장치 마련

3.6 고찰 및 요약

현재까지 하역장비의 보전 방법은 부품이나 단위부품들의 정확한 작동횟수와 가용 가능시간을 염두에 두지 않고 고장이 발생하면 부품을 교체하는 방식이다. 이러한 보전방법은 보전 비용을 증가시키는 요인으로 생각을 해 왔다. 그러나 가용시간을 기준으로 한 시간기준예방보전이나 하역장비의 상태를 기준으로 한 상태기준예방보전은 하역장비 전체의 많은 단위부품으로 구성된 하역장비에 일률적으로 적용하기는 어렵다. 특히 많은 비용이 소요되는 전동기, 틸팅 장치의 실린더교체는 여러가지 상황을 고려하여 교체를 결정하여야 하므로 예지보전에 중점을 두는 것이 올바른 판단일 것이다.

비교적 교체가 용이한 부품들은 예방보전에 의해 교체가 일률적으로 이루어지는 것이 바람직하다. 부품의 동작특성과 신뢰도는 높으나 하역장비의 운용 환경을 고려하지 않은 부품의 선택은 하역장비설계가 이루어질 때부터 배제되어야 함에도 불구하고 제작사는 현장에서 발생하는 고장을 충분히 인지를 하지 못하며, 운영사는 비용이 많이 소요 되지 않는 부품이라는 생각으로 그대로 사용되는 경우가 매우 많다. 예로서, 트랜스퍼 크레인에 장착되는 제한 스위치는 단품 자체의 신뢰성은 매우 우수하다고 판단되지만 계절적 요인으로 내부에 습기가 발생하여 접점을 부식시켜 고장을 발생시키는 원인이 된다.

본장에서 항만하역장비의 고장분석에서와 같이 갠트리 크레인과 트랜스퍼 크레인의 고장이 전체 하역작업 중단사유의 절반을 넘게 차지하고 있으며, 이것은 작은 고장 하나가 하역작업 전반에 영향을 미치는 것으로 나타난다. 무심코 지나치는 부품 하나가 제 기능을 하지 못하는 상태에서 응급보전으로 이루어진 하역장비를 그대로 사용하는 경우에는 더욱 더 큰 고장과 사

고와 같은 다른 문제가 발생함을 인식하여야 한다.

하역장비의 생산성에 따른 사용시간, 동작횟수가 보전주기 설정의 중요한 근거가 되며 이러한 가동시간과 하역장비의 상태를 기준으로 하여 유지보수를 행한다면 시간이 지남에 따라 높아지는 고장률에 대응하는 현실적인 방법이 될 수 있다. 따라서 사후보전에서 계획사후보전은 운영사의 계획에 의한 보전이므로 하역장비의 특성과 부품의 특성을 고려한 정확한 데이터를 근거로 한 보전계획이 수립되어야 하며, 긴급사후보전은 생산성과 밀접한 관계가 있으므로 충분한 예방보전을 통해 발생 빈도를 줄여야 한다.

이상과 같이 본장에서는 컨테이너 터미널의 실제 사례를 통하여 고장분석 및 고찰을 행하였으며, 예방보전과 사후보전의 명확한 정의를 나타내었다. 또한, 컨테이너 터미널의 작업중단 비율의 절반 이상이 G/C 및 T/C의 고장에 의함을 밝혔다.

위의 내용과 관련하여 제4장에서는 하역작업 생산성 평가방법과 측정모형을 통해 컨테이너 터미널 생산성 모형을 정의하도록하며 생산성 민감도를 통해 생산성을 분석하도록 한다. 주로 1개 선박당의 생산성을 정의하며, 이를 통해 하역장비의 고장률이 생산성에 미치는 영향에 대해 고찰 하도록 한다.

제 4 장 하역장비의 고장률 및 생산성 분석

제3장에서는 컨테이너 터미널에서 발생하는 고장에 대하여 바람직한 예방보전과 사후보전에 대하여 고찰하였으며, 실제 사례를 통하여 컨테이너 터미널 내의 작업중단사유에 대하여 분석하였다. 본장에서는 컨테이너 터미널에서 하역장비의 고장률과 생산성에 관한 분석을 수행하도록 하고, 따라서 분석한 자료는 컨테이너 터미널 생산성 지표를 근거로 수립하도록 한다.

4.1 컨테이너 터미널의 생산성 모형

4.1.1 생산성 평가경향

컨테이너 터미널의 하역 생산성을 결정하는 주요 지표로 안벽에서 컨테이너 선박의 하역작업을 수행하는 갠트리 크레인의 시간당 하역량(lifts/hr)이 주요 지표로 사용된다. 갠트리 크레인의 생산성은 크게 세 가지인 기계적생산성(MP : Machine Productivity), 순작업생산성(NP : Net Productivity) 및 총작업생산성(GP : Gross Productivity)으로 구분할 수 있다. 이들 생산성은 갠트리 크레인의 기계적인 제원에 따른 1회 작업 사이클 정보만으로 기준으로 한 기계적생산성 값이 수치상으로 가장 높게 나타난다. 그 다음으로 순작업생산성 및 총작업생산성의 순서이며, 순작업생산성의 경우는 기본적인 이송 및 야드 작업이 지원되는 상황에서 산출되는 생산성을 의미하고 총작업생산성은 하역장비의 고장, 수리시간 및 작업자의 교대시간 등과 같은 총체적인 터미널 환경을 고려하여 산출하기 때문에 순작업생산성보다 상당 부분 낮게 산정되는 것이 일반적이다.

현재 국내에서 사용되고 있는 컨테이너 터미널의 갠트리 크레인은 모두 싱글 트롤리(Single trolley) 유형으로 갠트리 크레인에 부착된 1개의 트롤리가 선박과 안벽의 작업지점을 선회하며 하역작업을 수행한다. 이러한 단독선회작업방식을 가지는 갠트리 크레인은 현재 기계적생산성은 45개 정도이나 국내 터미널의 순작업생산성과 총작업생산성이 2003년도에 각각 평균 29.8(개/시간) 및 24.7(개/시간)로 집계되고 있다. 이러한 싱글 트롤리형 갠트리 크레인은 먼 작업거리를 1개의 트롤리가 선회하는 방식이기 때문에 점점 대형화되어 가는 컨테이너 선박에서 작업지점까지의 먼 거리에 취약한 점을 가지고 있다.

한편으로, 순작업생산성은 갠트리 크레인의 이송장비와 야드장비와의 연계작업을 병행할 경

우에 처리가능한 시간당 갯수를 나타내므로 교대시간, 식사시간, 본선계획 및 장치장 계획 등의 불확정적인 상황을 총체적으로 고려하여 산출되는 값으로 과거 실적을 토대로 통계적으로 산출되는 컨테이너 터미널의 하역 시스템 상에서의 실질적인 하역생산성이라 할 수 있다.

Table 4. 1은 갠트리 크레인의 생산성 종류에 대한 구분을 나타내었다(하태영, 2004).

Table 4.1 Kind of gantry crane productivity

구분	산출근거
기계적생산성	· 갠트리 크레인의 기계적인 성능만을 기준으로 산출된 시간당 하역량 · 호이스트, 트롤리의 작업속도와 거리를 기준으로 산출 가능한 이론적 생산성
순작업생산성	· 안벽↔이송↔야드 크레인과 연계된 하역시스템의 생산성
총작업생산성	· 시작시점부터 종료시점까지 전체 시간을 생산성으로 산출하는 생산성

컨테이너 터미널에서의 하역장비의 고장은 필연적으로 생산성 저하에 어떤 형태로든지 영향을 미친다. 하역작업은 컨테이너 터미널 운영 계획에 의해 선적과 양화를 하기 위한 컨테이너의 갯수와 작업에 투입할 하역 장비의 댓수, 적정 컨테이너 선박의 입·출항 시간, 미 반입 컨테이너의 갯수와 도착 예정시간 및 지연시간을 감안하여 플래닝을 하게 된다. 이러한 모든 계획은 하역장비가 정상적인 운영을 한다는 전제하에 이루어지게 된다. 그러나 계획에 의한 운영이 하역장비의 고장이라는 변수가 늘 존재하기 때문에 필요 인력을 대기시키는 등 별도요인의 비용이 발생하게 된다.

이러한 고장에는 짧은시간 안에 수리되는 간단한 고장도 발생하지만, 많은 시간을 요하는 고장이 발생하기도 하며, 그리고 때때로 사고로 인한 고장이 발생하기도 한다. 발생한 사고는 처리에 많은 시간이 소요되며 사고로 인한 파손 부위까지의 수리는 더 많은 시간이 요구된다. 일반적으로 컨테이너 전용 터미널에서의 사고의 유형은 다음과 같다.

- ① 갠트리 크레인과 트랙터와 사고
- ② 갠트리 크레인과 선박과의 사고
- ③ 트랜스퍼 크레인과 트랙터와 사고
- ④ 트랜스퍼 크레인과 트랜스퍼 크레인 사고
- ⑤ 외부 트레일러 단독 사고

이중에 특히 트랜스퍼 크레인과 외부 트레일러와의 사고가 가장 많은 비율을 차지하고 있다. 트랜스퍼 크레인은 야드 작업에 적합하도록 제작되어 있으므로 야드에 가장 빈번하게 움직이는 외부 트랙터와의 사고 빈도가 높을 수밖에 없다. 이러한 사고는 컨테이너 터미널의 상호 유기적인 하역 작업의 흐름을 끊음으로서 생산성 저하의 직접적인 요인의 하나로 작용한다는 것은 이미 제3장에서 언급하였다.

컨테이너 터미널 생산성 측정은 투입요소인 장치장 면적, 장비, 종업원, 시설 등의 개별적인 투입요소에 따라 서로 다른 측정 결과가 나온다. 기존의 생산성 평가에 관한 연구는 컨테이너 터미널의 일부분 생산성 측정을 통하여 컨테이너 터미널의 생산성 분석의 연구가 진행 되어 왔다.

생산성 측정 방식은 현재 컨테이너 터미널의 특정 형태에 대한 생산성 저하요인에 대하여 평가하는 방법이다. 그러나 컨테이너 터미널의 경우 각각의 투입요소들이 유기적인 관계를 가지고 있어서 평가대상이 조금씩 다른 형태를 취하고 있다. 컨테이너 터미널의 전체 생산성을 측정하는 방법들 또한 컨테이너 터미널 전반적인 운영 실정에 맞는 생산성 지표로 사용하기에 미흡한 부분들이 있다.

생산성의 평가를 통해 운영조직의 생산활동측정, 현황과약, 개선방향, 지속적인 모니터링과 피드백 활동을 가능하게 할 수 있다. 이러한 활동을 위해서 컨테이너 터미널이나 항만의 생산성 측정 방식에 대해서도 국내외의 많은 연구가 진행되고 있다. 먼저 컨테이너 터미널에서 선박의 접안 시간을 단축하는 것이 항비를 절감시키며, 또한 하역효율을 낮추는 요인이라고 주장하였다(하원익, 2000). 여기에서 생산성 산정의 기준을 시간으로 보고 국내·외 컨테이너 터미널을 비교하고, 국내 컨테이너 터미널의 생산성을 향상시키기 위해서는 선사와 협의를 통하여 화물 반입마감시간을 준수하고 인접 선석 운영사와의 크레인 및 선석의 공동사용 방안을 제시하였다.

또한, 컨테이너 터미널의 생산성을 안벽길이 당 연간 컨테이너 취급량으로 보며 허브항만으로 발전하기 위해 저비용과 편리성을 제공하여야 한다고 하였으며(山出英夫, 2002), 부산항 컨테이너 터미널 생산성을 총선석 생산성과 순선석 생산성, 총크레인 생산성과 순크레인 생산성을 사용하여 평가하여야 한다고 주장하였다(정승호, 1999). 이때 컨테이너 터미널 생산성은 본선작업에 연관된 요소보다는 컨테이너 야드 운영과 관련된 요소에 영향을 받는다고 하였으며, 컨테이너 터미널의 내부환경요소에 관하여 기술하고 있다.

한편으로, 항만 생산성의 다양한 지표에 관해서 설명하면서 항만전문가들이 서로 강조하는

내용이 다를 경우 지표 중에서 가장 유용하다고 생각하는 특정지표를 사용할 수 있다고 주장하였으며(윤동환, 2000), 컨테이너 터미널 생산성 측정을 컨테이너 터미널 자원을 사용하여 작업을 달성할 때와 고객의 필요조건에 대처하는 능력이라고 정의하였다. 또한 생산성 측정 범위를 선박, 야드, 게이트, 장비로 나누어 설명하고 있다(Peter, 2001).

또한 컨테이너 터미널 생산성을 핵심 장비의 사용, 정박 이용 비율, 선박의 하역/적재 비율, 컨테이너 터미널 지역 당 처리량으로 간주 하였다(Thomas, 2000).

위에 소개한 내용들의 대부분은 컨테이너 터미널의 부분 생산성을 이용하여 컨테이너 터미널 전체 생산성을 측정하는 방법으로써 단위 투입물의 생산성을 간단하게 파악할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 투입물 전체를 고려한 생산성을 측정하지 못하므로, 이로써 발생하는 컨테이너 터미널 전체의 실제 생산성에 대한 오류를 유발할 수 있다는 단점이 있다.

이외에도 부분 생산성과는 다른 측면에서 컨테이너 터미널의 생산성을 평가하고자 하는 시도가 있었다. 즉 컨테이너 터미널의 각 부분을 분리해서 생각하지 않고 하나의 유기적인 것으로 생산성 측정을 시도하였으며 이러한 연구는 컨테이너 터미널의 생산성 측정 모델이 되기도 하지만, 하역장비의 고장이 컨테이너 터미널에서 생산성에 직접 관련이 되므로 하역장비의 고장으로 인한 생산성 평가 방법으로는 미흡하다.

즉, 하역장비의 고장은 컨테이너 터미널의 운영 시스템과의 관계 때문에 갠트리 크레인의 고장은 연계된 트랜스퍼 크레인과 야드 트랙터, 장치장의 장치 효율에 영향을 줄 수 밖에 없다.

트랜스퍼 크레인 역시 이러한 연계된 운영 시스템에 같은 맥락이라고 할 수 있다.

4.1.2 생산성 측정모형

컨테이너 터미널 생산성을 평가하는 방법은 각 부분별로 주로 사용되는 생산성을 평가하는 방법을 살펴보면, 하역장비, 선석, 야드면적, 게이트 등 시설물에 의한 생산성의 측정지표는 식(4.1)~식(4.5)와 같다.

$$\text{선석당 생산성} = \frac{\text{본선처리실적}}{\text{선석수}} \quad (4.1)$$

$$\text{안벽 길이당 생산성} = \frac{\text{본선처리실적}}{\text{안벽길이}} \quad (4.2)$$

$$\text{야드 면적당 생산성} = \frac{\text{본선처리실적}}{\text{야드면적}} \quad (4.3)$$

$$\text{갠트리 크레인 1기당 처리량} = \frac{\text{본선처리실적}}{\text{갠트리크레인 보유댓수}} \quad (4.4)$$

$$\text{게이트 처리량} = \frac{\text{게이트총반입물량}}{\text{일일순작업시간} \times \text{연간작업일수}} \quad (4.5)$$

위의 방법은 생산성의 지표가 되는 투입요소에 대한 출력을 가지고 산정해야 하지만 시간과의 연관성이 배제되어 있기도 하다. 또한 컨테이너 터미널에서 생산성에 가장 중요한 근간이 되는 인적자원에 대한 생산성은 근로자이므로 근로자 생산성은 총 근로자 생산성은 순 근로자 생산성으로 나누어진다. 따라서 이러한 기준에 의해 평가지표도 달라진다.

컨테이너 터미널에서 근무하는 1인당 처리하는 작업량으로 산정되는 근로자 1인당 처리량은 컨테이너 터미널의 컨테이너 터미널 운영의 경쟁력과 근로자 채용에 있어서 중요한 기준이 되며 하역작업에 투입되는 순수하역 근로자 1인당 처리하는 작업량으로 선정되는 순 근로자 1인당 처리량은 현장근무자의 노동집약도, 현장근무자 채용의 유연성, 총 하역비 수입 대비 인건비 지출 정도에 따라 자동화 경쟁력 및 자동화 전환 시점을 나타내기도 한다.

근로자를 기준으로 한 생산성 지표는 식(4.6)~식(4.7)과 같다.

$$\text{근로자 1인당 처리량} = \frac{\text{처리실적}}{\text{총근로자수}} \quad (4.6)$$

$$\text{순 하역인력 1인당 처리실적} = \frac{\text{처리실적}}{\text{하역작업참가근로자수}} \quad (4.7)$$

선박작업 생산성은 선박의 선석 이용비율, 컨테이너 터미널에서 핵심장비의 사용비율 등을 이용하여 계산한다. 선박작업을 기준으로 한 생산성 지표는 (식 4.6)~(식 4.12)와 같다.

$$\text{선석 집안율} = \frac{\text{작업일수} \times \text{일일작업시간} \times \text{선석수}}{\text{총집안시간}} \quad (4.8)$$

$$\text{총 선석생산성} = \frac{\text{본선처리실적}}{\text{총접안시간}} \quad (4.9)$$

$$\text{순 선석생산성} = \frac{\text{본선처리실적}}{\text{순작업시간}} \quad (4.10)$$

$$\text{총 장비생산성} = \frac{\text{본선처리실적}}{\text{총작업시간}} \quad (4.11)$$

$$\text{순 장비 생산성} = \frac{\text{본선처리실적}}{\text{총작업시간} - \text{작업중단시간}} \quad (4.12)$$

선석접안율의 경우 접안율이 높으면 선박의 대기시간이 길어지고, 낮으면 컨테이너 터미널 운영 효율성이 낮아지게 되어 적정 접안율 유지가 중요한 관건이다. 따라서 선석당 생산성은 하역요금과 함께 선사의 컨테이너 터미널 선택시 가장 중요한 요인이다. 이때 하역장비의 생산성은 컨테이너 터미널의 주요 장비인 갠트리 크레인의 생산성을 나타내는 지표가 되기도 한다.

첫번째, 생산성 측정에서 사용되는 투입요소인 선석수, 안벽의 길이, 야드 면적, 근로자 수, 하역장비의 수를 사용하여 생산성을 평가한다.

두번째, 투입 요소 중 중복되는 투입요소의 경우 정확하지 않은 투입요소는 제외한다. 평가 대상의 기준이 다른 요소들은 제외시킨다. 선석의 경우 선박의 크기에 따라서는 동일한 안벽에 정박할 수 있는 선박의 수가 틀리므로 선석수는 정확한 투입요소는 사용할 수 없으므로 제외시킨다.

세번째, 정확한 평가를 위해 동일한 조건으로 생산성을 평가하기 위해 하역장비와 인원에 있어서 정확한 투입비용을 사용해서 생산성을 측정한다. 갠트리 크레인이나 트랜스퍼 크레인의 경우 각 컨테이너 터미널이 보유하고 있는 장비의 성능이 차이가 나지만 단순하게 하역장비의 댓수를 투입요소로 사용하는 것은 정확한 생산성 평가를 하는데 방해요인이 된다.

따라서 위의 세 가지 생산성중 두 가지는 시간과는 무관한 내용이다. 그리고 컨테이너 터미널 운영의 모든 요인들이 생산성에 영향을 미치지만, 선박 작업에 대한 생산성이 주요지표로 사용되고 있다. 이것은 직·간접적으로 시간과의 관계를 의미하는 부분이다. 그러므로 연구에서는 컨테이너 터미널의 생산성 측정모형을 1개 선박작업을 기준으로 식(4.13)~식(4.15)와 같이 고려하였다.

$$1\text{개 선박당 생산성}(S_P) = \frac{\text{본선처리실적}(S_n)}{\text{총작업시간}(T_T)} \quad (4.13)$$

$$1\text{개 선박당 순 생산성}(S_{np}) = \frac{\text{본선처리실적}(S_n)}{\text{순작업시간}(W_T)} \quad (4.14)$$

$$\text{장비 생산성}(E_P) = \frac{\text{본선처리실적}(S_n)}{\text{크레인순작업시간}(W_T)} \quad (4.15)$$

단, $T_T = W_T + H_T + E_T$ 이며 H_T 는 고장으로 인한 정지시간을 나타내며 GT 및 TT의 합으로 나타낸다. 또한 E_T 는 기타 준비시간으로서 GT 및 TT를 제외한 나머지 항목의 총합으로 편의상 일정하다고 가정한다.

위의 터미널 생산성 측정모형에서 1개 선박당 생산성이 높기 위해서는 총 작업시간(T_T)이 적어야 하며, 이 중에서 최소한 순작업시간은 장비 성능과 관련된 항목이므로 쉽게 줄어 들 수 없는 것을 고려한다면 고장(H_T) 및 기타시간 (E_T)가 줄어들어야 한다. 즉, 하역장비의 고장시간(H_T)의 감소로 인하여 1개 선박당 생산성이 높아져 터미널 내의 체선시간이 감소하게 된다.

4.2 컨테이너 터미널의 생산성 분석

4.2.1 생산성 민감도

갠트리 크레인의 고장률이 터미널 생산성에 미치는 영향을 계산하기 위해서는 식(4.13)을 H_T 에 대해서 미분을 취함으로서 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dS_P}{dH_T} &= \frac{d}{dH_T} \left(\frac{S_n}{W_T + H_T + E_T} \right) \\ &= - \frac{S_n}{(W_T + H_T + E_T)^2} = - \frac{S_n}{T_T^2} \end{aligned} \quad (4.16)$$

단, 이때 W_T 및 E_T 는 일정하다고 가정한다.

1개 선박당 생산성(S_{P0})에서 생산성이 S_P 로 변하는 경우에 대한 민감도는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{S_P}{S_{P0}} = \frac{\frac{S_h}{W_T + H_T + E_T}}{\frac{S_h}{W_T + H_{T0} + E_T}} = \frac{W_T + H_{T0} + E_T}{W_T + H_T + E_T} \quad (4.17)$$

식(4.17)에서 고장률이 H_{T0} 에서 H_T 로 증가하는 경우는 분모부분이 커지므로 상대적으로 S_P 는 감소하게 된다. 따라서 S_P 를 증가시키기 위해서는 H_T 를 감소시켜야 한다.

4.2.2 생산성 분석

갠트리 크레인이 컨테이너 터미널에서 중요한 부분을 차지하고 있는 이유는 많이 언급되어 왔고, 이는 갠트리 크레인의 고장은 직접 생산성에 영향을 미치는 부분이 그만큼 크다는 것을 의미하며 오래전부터 증명되어 왔다.

먼저, 식(4.8)에서 나타낸 것과 같이 작업일수를 30일 기준으로 하여, 일일작업시간, 선석수와 선박의 총접안시간과의 관계에서 선석접안율은 160.5%로 나타난다. 이는 적정 접안율보다는 높은 것으로 나타났다..

$$\text{선석 접안율} = \frac{\text{작업일수} \times \text{일일작업시간} \times \text{선석수}}{\text{총접안시간}} = \frac{30 \times 10.8 \times 2}{403.08} \times 100 = 160.5\%$$

총선석생산성은 식(4.9)에서 나타낸 것과 같이 본선처리실적과 총접안시간과의 관계를 나타내었으며 87.35TEU의 높은 총생산성으로 나타난 것은 투입 하역장비의 댓수가 고려되지 않았기 때문이다.

$$\text{총 선석생산성} = \frac{\text{본선처리실적}}{\text{총접안시간}} = \frac{35210}{403.08} = 87.35 \text{ TEU}$$

순선석생산성은 식(4.10)에서 나타낸 것과 같이 본선처리실적과 순작업시간과의 관계를 나타

내었으며 50.68TEU로 나타난 것은 총선석생산성과 같이 투입하역장비의 댓수가 고려되지 않았기 때문이다.

$$\text{순 선석생산성} = \frac{\text{본선처리실적}}{\text{총작업시간}} = \frac{35210}{694.72} = 50.68\text{TEU}$$

총장비생산성은 식(4.11)에서 나타난 것과 같이 본선처리실적과 총작업시간과의 관계를 나타내었으며 42.77TEU로 나타났다.

$$\text{총 장비생산성} = \frac{\text{본선처리실적}}{\text{총작업시간}} = \frac{35210}{823.27} = 42.77\text{TEU}$$

순장비생산성은 식(4.12)에서 나타난 것과 같이 본선처리실적과 크레인의 총작업시간과 작업 중단시간과의 관계를 나타내었으며 50.68TEU로 나타났다.

$$\text{순 장비 생산성} = \frac{\text{본선처리실적}}{\text{총작업시간} - \text{작업중단시간}} = \frac{35210}{823.27 - 128.52} = 50.68\text{TEU}$$

위와 같이 순장비 생산성은 매우 높게 나타났다. 이것은 선석당 배정 장비의 수가 항상 일정하지 않고 하역작업 도중에 투입과 제외되는 과정에서 발생한 투입장비수를 제외하여 나타난 결과이다.

4.2.3 1개 선박당 생산성 분석

선박당 투입 하역장비는 선석 및 선박규모에 의해 결정되는 사항이다. 1개 선박당 생산성과 순생산성, 장비 생산성은 모두 하역작업의 처리 실적으로 나타낼 수 있다.

$$1\text{개 선박당 생산성}(S_P) = \frac{\text{본선처리실적}(S_n)}{\text{총작업시간}(T_T)} \quad (4.18)$$

$$1\text{개 선박당 순 생산성}(S_{np}) = \frac{\text{본선처리실적}(S_n)}{\text{순작업시간}(W_T)} \quad (4.19)$$

$$\text{장비 생산성}(E_p) = \frac{\text{본선처리실적}(S_n)}{\text{크레인순작업시간}(W_T)} \quad (4.20)$$

컨테이너 터미널의 하역 생산성은 고장률과 밀접한 관계가 있음을 작업시간과의 관계를 나타낸 식(4.18), 식(4.19) 및 식(4.20)에서 알 수 있다. 이러한 사실은 반대로 고장률을 줄이는 것이 생산성을 높이는 결과를 나타낸다는 것으로 해석 할 수 있다. 따라서 위 내용을 Table 4.2로 정리하였다.

Table 4.2 The result of productivity analysis and fault ratio by container terminal equipment

번호	항목	분석결과
1	선석접안율	160.5%
2	총선석생산성	87.35TEU
3	순선석생산성	50.68TEU
4	총장비생산성	42.77TEU
5	순장비생산성	50.68TEU
6	G/C 고장률	33%
7	T/C 고장률	20%
8	기타 정지	47%
9	작업정지시간	10.6hr
10	순작업시간	31.72hr
11	총작업시간	42.32hr
12	본선처리량	795.4TEU
13	선박당 생산성	18.79TEU
14	선박당 순생산성	23.94TEU
15	장비 생산성	23.94TEU

선박당 순생산성과 장비 생산성이 같은 결과를 나타내었으며 이는 본선처리 실적에 대비하여 순작업시간과 크레인 순작업시간은 각 크레인마다 작업시간이 달리 나타나지만 하역장비 전체의 가동시간이 동일함을 의미하기 때문이다.

4.3 고찰 및 요약

본 연구에서 생산성을 평가하기 위해서 시설물에 의한 평가방법, 선석에 대한 평가방법을 검토하였으며, 안벽길이에 대한 평가방법이 사용된다. 세부적으로는 접안율, 선석당, 선박당, 하역장비당 생산성과 총생산성과 순생산성으로 나누어 평가하였다. 하역장비 고장은 민감도 분석을 1개선박당생산성과 고장률과의 관계를 고려하여 유도하였으며, 이 결과 고장을 제외한 나머지 변수들은 일정하다고 가정하였을 때 고장 시간을 줄여야 1개 선박당 총하역작업시간이 줄어들고 생산성은 하역장비고장을 줄여야 함을 알 수 있다.

본 논문의 모델이 된 컨테이너 터미널의 경우 갠트리 크레인이 생산성에 미치는 영향과 민감도가 가장 높고, 다음은 트랜스퍼 크레인의 순으로 나타났다. 갠트리 크레인은 고장 발생시 생산성에 미치는 영향 및 고장에 대한 민감도가 높은 것은 트랜스퍼 크레인과 야드 트랙터의 하역작업 흐름을 저해하기 때문이다. 트랜스퍼 크레인의 고장은 대기하는 야드 트랙터에 컨테이너화물을 상차할 수 없으므로 갠트리 크레인으로 컨테이너화물을 보낼 수 없어 생산성과 민감도에 영향을 미치는 것으로 사료된다.

하역작업 중단에 영향을 줄이기 위해 보전요원의 수리가능여부와 수리시간 판단이 빨라야 한다. 대체 투입할 트랜스퍼 크레인 여유가 있다고 하더라도 대체 하역장비에 대한 운전자 배치, 하역장비 배치, 작업위치로 빠른 이동경로를 고려 하여야 한다. 이러한 고장으로 인한 생산성 저하에 대한 영향을 최소화하기 위해서는 가동중 고장을 제로(Zero)화 하여야 한다. 고장률 제로화에 따라 운전자는 하역장비에 대한 신뢰로 이어지므로 매우 능동적인 하역작업에 임함으로써 보이지 않는 생산성 향상에 기여할 것이며, 운영자는 하역작업계획수립에 고려하여야 할 변수가 많이 줄어들 것으로 생각된다.

제5장에서는 예방보전주기 개선으로 고장률을 낮추어 하역작업시간을 줄임으로서 전반적으로 생산성을 높이는 방안과 고장예지 알고리즘을 제안하였으며, 제안한 알고리즘을 이용한 시뮬레이션을 통해 고장예지가 가능함을 보이며, 이로써 고장률을 최소화시켜 컨테이너 터미널의 생산성 향상을 보이고자 한다.

제 5 장 항만하역장비 예방보전에 의한 컨테이너 터미널의 생산성 향상

제4장에서는 컨테이너 터미널의 생산성 평가방법은 시설물에 의한 방법, 선석에 대한 방법 및 안벽길이에 의한 방법이 사용되며 또한 기계적생산성, 순작업생산성과 총작업생산성으로 구분된다. 1개 선박당생산성을 높이기 위해서는 총작업시간이 적어야하고 고장시간의 감소가 1개선박당 생산성을 높이고 컨테이너 터미널 전체 체선시간과 접안율이 감소함을 알 수 있었고, 생산성 측정모형을 통해 하역장비와 고장률과의 관계에 대하여 나타내었으며, 이를 통해 하역작업중단 비율과 같이 갠트리 크레인과 트랜스퍼 크레인 순으로 민감도가 높은 것을 알 수 있었다. 본장에서는 가동중 고장을 줄이기 위하여 최적예방보전주기 설정과 상태공간기법에 의한 예지보전 모델링을 통해 고장예지 시뮬레이션을 행하여 고장을 미리 알 수 있음을 나타 내고 이를 근거로 생산성이 향상 되었음을 나타내고자 한다.

5.1 예방보전주기 개선에 의한 방법

5.1.1 예방보전 주기

하역장비가 정기적으로 예방보전이 행해지고, 정기보전 시기내에 고장은 최대한 수리된다는 가정하에서, 예방보전 후 시스템의 고장률이 신장비와 같이 되는 완전 예방보전과 신품과 같이 되지 않고 보전 전과 고장률이 동일하게 되는 경우를 고려할 수 있다. 이러한 경우 정기보전 시기 내에서 최소한의 수리를 할 때 마다 수리비용이 증가하는 시스템 단위시간당 기대비용을 최소로 하는 보전시기를 결정하는 것이 중요한 문제로 되고 있다.

예방보전에 필요한 보전비용이 철강업이나 석유화학, 항공기 등 운수산업에서는 전체 매출액의 10~20%에 달하고 있어 보전비용증가에 커다란 영향을 미친다. 이들 분야에서 설비진단 기술과 신뢰성보전을 리스크(Risk) 관리기법을 사용하여 효율적으로 운용하는 예지보전방식을 채용하여 큰 성과를 얻고 있다. 이후 설비감시기술이나 진단기술의 신뢰성, 경제성의 개발과 함께 리스크 관리에 의한 예지보전방식의 효율화에 의하여 1990년대에는 예지보전 채택률이 90%를 초과하게 되었다.

항공기보전비용은 1997년에는 최대소요비용요인이 되었으나 상태기준예방보전과 신뢰성보전 리스크 관리방법의 도입으로 연료, 인건비의 증가에도 불구하고 보전비용을 일정하게 유지할 수 있었다. 비용절감의 경향은 기계마모나 고장의 근본 원인에 초점을 맞추어 보전해법을 찾는 데 있다. 열화나 고장을 방지하기 위한 사전보전활동을 총칭하여 사전보전행동이라 하며, 이는 열화방지형 보전이며 이에 반해서 고장이나 열화가 된 후에 대응하는 보전을 반응형(Reactive)보전이라 한다. 일부 기업에서는 보전비용을 줄이려는 노력으로 이러한 사전행동형 보전방식을 도입하려 하고 있다(박성규, 2003).

기본적 생각은 일본에서 발생한 종합적 생산보전이라고 해서 “원인을 거슬러 올라가 해법을 찾으라”고 하는 것으로 “설비진단기술을 사용해서 원인계의 변수를 과학적으로 감시 진단하여 열화나 마모 등 고장요인을 사전에 제거하는 것”을 말한다. 외국의 문헌에서는 “예지보전은 고장의 징후를 감시하고 제거하지만 사전행동보전은 고장의 원인을 감시 제거한다.” 라고 하였다.

또한 사전행동보전은 고장사전활동(Failure proactive)으로 종래의 예방보전을 고장 반응형(Failure reactive)으로 표현하였다. 사전보전행동은 종래의 보전전략으로는 달성하지 못하였던 것에 비하여 극적인 보전비용을 절감할 수 있는 보전방식으로 전 세계의 보전 기술자의 주목을 받고 있지만, “원인계로 거슬러 올라가 해법을 찾아라.”고 하는 이념에 따라 원인계에 설비진단기술을 사용해서 열화나 고장의 원인을 검출해서 제거하는 방식이다(마규하, 1999).

사전행동보전에서는 수정행동(Corrective action)의 목표를 고장의 징후가 아닌 고장의 근본 원인을 제거하는데 둔다. 따라서 기계의 수명연장을 위한 보전활동으로서 종래와 같이 고장이 아니지만 안전을 위해 수리하고, 고장은 정기적으로 있는 것, 정기고장이라는 명목아래 중요고장수리를 사전에 행하는 것을 배제하는 것이다.

고장의 근본원인은 고장형태에 의해 은폐되거나 형태자체가 원인이 되는 경우가 있다. 예를 들면 베어링의 고장 원인은 윤활불량으로 처리되는 경우도 있지만 필터의 불량으로 윤활유의 오염, 베어링 볼트너트 체결이 불량한 경우가 더 많다. 일반적으로 시간기준예방보전은 설비의 구성 난이도별 보전주기 및 교환주기의 설정과 깊은 관련이 있다. 이 경우 최적의 부품 교환주기를 설정하여 예방보전을 실시하는 것이 고려되고 있다.

예방보전주기의 설정 및 관리 측면에서 볼 때 마모 부품인 경우 어느 정도 교환주기 예측이 가능하나, 여러 단품들로 이루어진 단위구성품과 보조 장치는 보전주기를 평균수명보다 짧게 관리하고 있다. 제3장에서 언급한 것과 같이, 보전주기(t_p)가 평균값 μ 에서 표준편차 σ 의 3배를 뺀 값보다 작은 주기가 되도록 설정하여 관리하는 것이 바람직하나, 단위 부품 비용의 부

답을 고려하여 실무 적용에 어려움이 있는 실정이다.

5.1.2 예방보전 주기설정

보전비가 최소화될 수 있도록 설비의 최적수리주기의 설정에 대한 정리는 Fig. 3.12와 같이 나타내었다. 예방보전은 하역장비의 휴지시간에 이루어지므로 보전에 필요한 충분한 여유가 있지만, 본선 작업중 발생한 고장에 대한 보전은 피할 수 없다. 따라서 본선 작업중 발생하는 고장은 신속한 고장원인진단과 조치 및 시운전이 이루어져야 하는 특성을 가진다.

이러한 빠른 조치를 하는 데는 상당한 경험과 노하우(Know how)가 필요하며, 이러한 인력은 단시간에 갖추기는 매우 어려운 실정이다. 하역장비의 고장의 원인으로서 무리한 운영자의 작업을 제외하면 하역장비의 사소한 유지보수 및 부품교체의 미비로부터 발생된다.

그러므로 각 단품과 단위구성품의 고장특징을 면밀히 파악하여 이에 대한 적절한 교체주기를 설정하여야 한다. 또한, 하역장비의 특징상 하역작업은 특정 시간, 즉 선박이 부두에 접안 하면서 작업이 시작되며 선박이 출항함으로써 작업이 끝나는 특징을 지니고 있다.

따라서 선박이 출항함으로써 다음 선박이 입항하기에는 약간의 시간이 발생하며(휴지시간), 이를 이용하여 유지보수 및 점검이 행해져야 한다.

이러한 본선작업의 특징을 고려한 장비의 유지보수에 관한 주기는 다음 식(5.1)로 표현된다.

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij} M_{ij} W_{ij} + |t_{pij} - a_{pi}| V_i \right\} \quad (5.1)$$

$$\text{s.t. } t_{pij} \leq (\mu_{ij} - 3\sigma_{ij})$$

단, n : 하역장비 댓수(예, 갠트리 크레인 댓수)

m : 하역장비의 예방보전에 필요한 부품 갯수

C_{ij} : i 하역장비의 j 부품의 부품비용

M_{ij} : i 하역장비의 j 부품의 교체비용

V_{ij} : i 하역장비의 j 부품에 대한 하중함수

a_{pi} : i 하역장비의 평균 작업시간

t_{pij} : i 하역장비의 j 부품에 대한 예방보전 주기시간

V_i : j 하역장비의 작업시간에 대한 하중함수

식(5.1)에서 전반부는 각 하역장비에 대한 유지보수 비용을 나타내며, 후반부는 주기시간변경에 따른 비용을 나타낸다.

위의 식을 만족하는 최적의 예방보전주기 t_{pij} 는 각각 유지보수 비용 및 주기시간 변경에 따른 비용에 대한 하중에 의존하며, 이러한 하중함수값은 각 터미널의 상황 및 가동률을 고려하여 계산하여야 한다.

5.2 예지보전에 의한 방법

현재 하역장비 관련 제조업체들이 시스템의 성능을 향상시키려는 노력으로 하드웨어와 소프트웨어 그리고 제어 시스템 부분에서 많은 기술을 발전시키고, 여기에 다른 신기술을 접목시켜 종래의 하역장비보다 생산성이 매우 향상되었다. 고장으로 인한 문제점을 개선하기 위하여 하역장비의 수명이나 고장을 미리 예측하여 필요한 부품을 사전에 구비하거나 하역장비의 교체시기를 판단할 수 있다면 하역장비의 최소 중단으로 생산 효율을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문의 대상이 된 하역장비는 제작된 지 10여년 된 하역장비이고, 시스템 구조가 직류전동기에서 교류 전동기로 바뀌기 전에 제작되었다. 특히 크레인의 모든 주동작을 담당하는 전동기에 초점을 맞추었다. 그리고 전동기의 상태를 분석하기 위한 데이터로 진동을 사용하였다. 하지만 지금까지 일반적인 진동 데이터의 분석은 전문가의 지식이 요구됨으로써 하역장비의 운영자를 어렵게 해 왔다. 따라서 시스템의 설계에서 전문가가 행하던 분석 및 해결의 과정을 컴퓨터를 이용하여 전문가 시스템의 적용은 당연한 과제이다.

하역장비의 가장 주요한 핵심 부품 중의 하나가 전동기임을 고려해 볼 때 적용범위는 광범위할 것 예상되는데, 전동기에서 발생하는 신호 중 특히, 진동 데이터를 대상으로 함으로써 전동기에 설치된 센서로부터 얻어진 진동 데이터를 푸리에변환(Fast fourier transform)을 통해 쉽게 데이터를 분석할 수 있다. 전동기에서 발생하는 진동이나 소음신호를 요소 주파수 형태로 나타낼 수 있는 푸리에 변환과 관련된 연구는 많이 진행되어 왔다. 하지만, 기존의 소프트웨어 들은 파형 형태의 데이터나 푸리에변환 형태의 데이터를 그래프 형식으로 보여주고 하역장비의 상태 분석은 전문가의 직접적인 판단으로 이루어져 왔다(박성규, 2004).

하역장비를 다루고 있거나 단순관리를 하는 사람들은 장비 자체에 대한 전문 지식을 갖추고 있을지라도 이러한 진동 데이터를 분석할 수 있는 능력이 운영사에는 전무한 것이 현실이다.

이러한 진동 데이터를 분석 할수 있는 전문 인력의 부족이 전문가 시스템을 도입하게 된 계기가 되었다. 진동기의 특성을 고려해 푸리에변환 알고리즘을 활용해 진동기의 상태를 분석하여 교체 시기나 이상 여부를 이 시스템의 운영자에게 통보해주는 예지보전 전문가 시스템을 목적으로 한다. 예지보전을 위한 어플리케이션의 필수 요소는 실시간으로 하역장비의 성능을 모니터링 하여 얻어지는 데이터와 측정값들이다. 작업상태의 지속적인 수집과 분석은 비정상 상태를 바로 수정할 수 있도록 도와준다.

Fig 5.1은 관측기법을 이용한 모니터링을 나타내고 있다. 기준입력값인 작업지령이 특정형태에 의하여 전달되면 이 작업지령을 감시하는 하역장비 모니터링에 의해 정상적인 하역장비 운용이 되는지를 비교하게 된다. 하역장비 운용중 발생하는 에러를 동시에 같이 전달된 작업지령은 상태 모니터링을 통하여 분석하여 고장여부를 판단하여 고장을 분리하고 고장을 진단하게 된다.

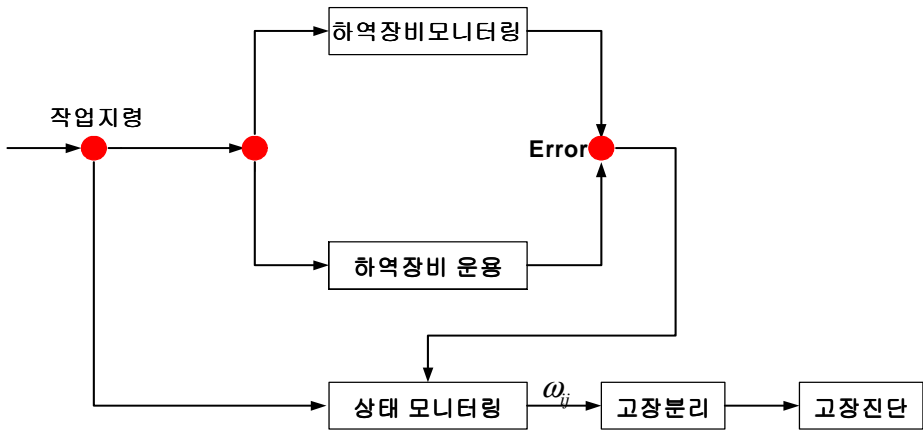


Fig 5.1 State monitoring by observation technique

5.2.1 상태공간기법에 의한 예지보전

Fig. 5.2와 같이 간이화한 갠트리 크레인 시스템의 모델을 고려하자. 먼저, 트롤리의 위치, 속도를 r 및 \dot{r} 로 나타내며 로프의 흔들림 각 및 각속도를 θ 와 $\dot{\theta}$ 로 각각 정의한다. 갠트리 크레인 시스템의 운동방정식을 유도하기 위해 실제 시스템으로부터 다음과 같은 가정을 고려하기로 한다.

- ① 컨테이너의 질량은 스프레더 질량 m_s 와 화물의 질량 m_L 의 합으로 나타내며, 이송중 화물의 질량은 일정하다.
- ② 로프길이 l 은 일정하며, 로프의 질량과 진동마찰은 무시한다.
- ③ 트롤리의 질량 M 에는 구동 휠의 질량과 구동모터의 관성이 포함된다.
- ④ 트롤리의 주행시 횡행마찰계수 D 에는 구동모터의 역기전력 정수도 포함한다.

위의 갠트리 크레인에 대해 Lagrange 운동방정식을 이용하여 다음의 모델을 얻을 수 있다.

$$(M + m_s + m_L)\ddot{r} + D\dot{r} + (m_s + m_L)l\dot{\theta}^2 \sin\theta = (m_s + m_L)l\ddot{\theta} \cos\theta + F \quad (5.2a)$$

$$(m_s + m_L)l^2\ddot{\theta} + (m_s + m_L)gl \sin\theta = (m_s + m_L)l\ddot{r} \cos\theta \quad (5.2b)$$

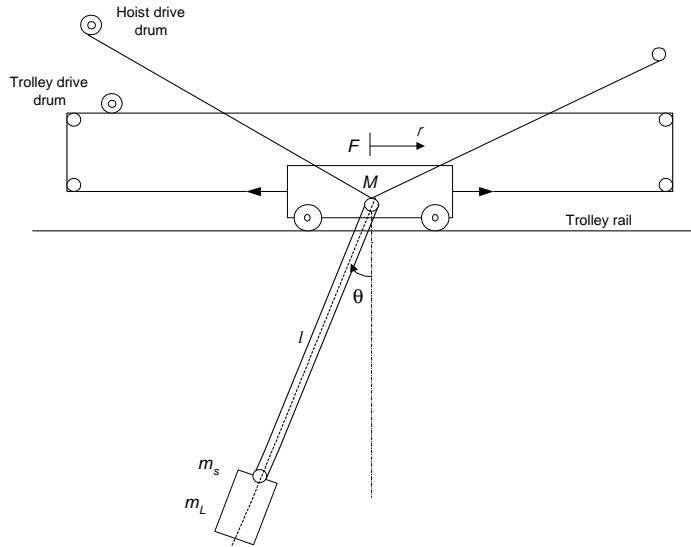


Fig. 5.2 Coordinate of gantry crane system

위 식(5.2a) 및 식(5.2b)를 $\theta = 0$ 주위에서 선형 근사화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M\ddot{r} + D\dot{r} &= -(m_s + m_L)(\ddot{r} - \ddot{\theta}) + F \\ &= -m_s g \theta + F + d \end{aligned}$$

$$\ddot{\theta} + \frac{g}{l}\theta = \frac{\ddot{r}}{l} \quad (5.2b)$$

단, $d(t) = -m_L g \theta(t)$.

윗 식(5.2b)에서 다음과 같은 상태방정식으로 표현할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} + \mathbf{Bd}$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx}$$

$$\text{단, } \mathbf{x} = \begin{bmatrix} r \\ \theta \\ \dot{r} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \mathbf{I}_4, u = F, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{m_s g}{M} & -\frac{D}{M} & 0 \\ 0 & -\left(\frac{m_s g}{lM} + \frac{g}{l}\right) & -\frac{D}{lM} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{M} \\ -\frac{1}{lM} \end{bmatrix}$$

여기서 \mathbf{I}_4 는 4차 단위행렬을 나타낸다.

윗 식에서 $d(t)$ 항은 화물의 변동을 나타내고 있으므로, (A1)의 가정 하에 시스템 행렬 \mathbf{A} 에 포함시킬 수도 있다.

고장예지 알고리즘에 관하여 본절에서는 고장진단에 대한 이전의 연구결과를 이용하도록 한다. 먼저, 고장요소로서는 크게 구동기의 고장과 센서의 고장으로 간주하며, 이들은 입력부 및 출력부에 각각 인가되는 요소로 고려하면 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} + \mathbf{Ba} \quad (5.4a)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Gs} \quad (5.4b)$$

여기서, $\mathbf{a}(t)$ 와 $\mathbf{s}(t)$ 는 각각 구동기 고장벡터와 센서의 고장벡터를 나타낸다.

구체적인 갠트리 크레인의 고장요소는 다음과 같이 가정하였다.

- ① 구동기의 고장
- ② 트롤리 위치센서의 고장
- ③ 트롤리 속도센서의 고장
- ④ 흔들림 각도센서의 고장
- ⑤ 흔들림 각속도센서의 고장

가. 구동기 고장 예지 알고리즘

먼저, 갠트리 크레인의 구동기만의 고장진단을 위해 식(5.4)에서 $\mathbf{s}(t) = \mathbf{0}$ 인 경우에 대해 다음과 같은 고장예지 알고리즘을 고려하자.

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = (\mathbf{A} - \mathbf{K}_P \mathbf{C}) \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_P \mathbf{y} + \mathbf{B} \mathbf{u} + \mathbf{B} \boldsymbol{\omega} \quad (5.5a)$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}} = \mathbf{K}_I (\mathbf{y} - \mathbf{C} \hat{\mathbf{x}}) \quad (5.5b)$$

여기서 $\hat{\mathbf{x}}$ 는 추정한 상태벡터를 나타내며, $\boldsymbol{\omega}$ 는 관측 출력오차의 변환벡터를 나타낸다. \mathbf{K}_P , \mathbf{K}_I 는 각각 고장 예지기의 비례게인과 적분게인을 나타낸다.

다음과 같이 변수를 정의하자.

$$\mathbf{e} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}} \quad (5.7)$$

$$\boldsymbol{\zeta} = \mathbf{a} - \boldsymbol{\omega}$$

구동기 고장 $\mathbf{a}(t)$ 는 저주파 영역에서 거의 변하지 않는다고 가정하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\boldsymbol{\zeta}} = -\boldsymbol{\omega} = -\mathbf{K}_I \mathbf{C} \mathbf{e} \quad (5.8)$$

따라서, 식(5.6)과 식(5.8)을 이용하여 확대계를 구성하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{e} \\ \dot{\zeta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - K_P C B & \\ -K_I C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ \zeta \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

식(5.9)가 안정하도록 고장 예지기가 설계된다면, $e(t) \rightarrow 0$ 과 $\zeta(t) \rightarrow 0$ ($t \rightarrow \infty$)가 되므로, 위에서 시스템의 구동기 고장 $a(t)$ 는 식(5.7)로부터 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{a}(t) = \omega(t), \quad (t \rightarrow \infty) \quad (5.10)$$

크레인 시스템에서 구동기 고장과 화물의 변동 $d(t)$ 는 같은 항에 포함되므로, 구동기의 고장이 없는 경우에는 화물의 변동 $d(t)$ 도 추정할 수 있다. 또한, 위의 원리를 이용하면 화물 질량의 측정을 위한 로드셀 고장 및 풍력에 의한 영향도 추정할 수 있다. 그러나 구동기 고장, 로드셀 고장, 풍력의 영향에 대한 진단은 가능하나 정확한 분리에 대해서는 차후 검토해야 한다.

나. 구동기 및 센서의 고장 예지알고리즘

갠트리 크레인 모델 (식 5.4)와 같이 구동기 및 센서의 복합고장에 대해서는 다음과 같이 지정된 출력정보를 이용한 다중 고장예지 알고리즘을 설계함으로써 고장진단을 행할 수 있다.

$$\dot{\hat{x}}_i = (A - K_{PI} C^i) \hat{x}_i + K_{PI} y^i + Bu + B\omega_i \quad (5.11a)$$

$$\dot{\hat{\omega}}_i = K_{Fi} (y^i - C^i \hat{x}_i) \quad (5.11b)$$

여기서 K_{Pi} 와 K_{Fi} 는 i 번째 고장 예지기 계인을 나타내며, C^i 는 C 행렬의 i 번째 행을 제외시킨 행렬을 나타낸다.

$$\text{단, } \mathbf{y}^i = \begin{bmatrix} y_{i1} \\ \vdots \\ y_{ii-1} \\ y_{ii+1} \\ \vdots \\ y_{ip} \end{bmatrix}, \mathbf{e}_i = \begin{bmatrix} e_{i1} \\ \vdots \\ e_{ii-1} \\ e_{ii+1} \\ \vdots \\ e_{ip} \end{bmatrix}, \boldsymbol{\omega}_i = \begin{bmatrix} \omega_{i1} \\ \vdots \\ \omega_{im} \end{bmatrix}$$

다중 고장예지 진단기를 이용한 고장 진단계의 구성은 Fig.5.3과 같다. 이를 이용한 센서 및 구동기의 고장진단법을 요약하면 다음과 같다.

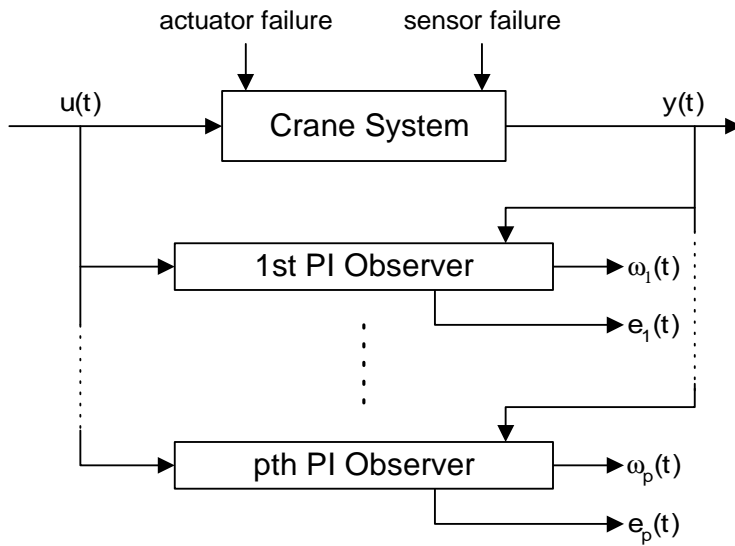


Fig. 5.3 Fault diagnosis system based on fault estimator

센서의 고장진단을 위한 잔사치(Residual)는 다음 식과 같이 주어지며, 잔사치가 1이면 센서 고장을 의미한다.

$$\gamma_{si} = \prod_{k=1(k \neq i)}^{k=p} s_{ki} \quad (5.12)$$

$$\text{단, } s_{ki} = \begin{cases} 1, & \text{if } |e_{ki}| \geq Th_{si} \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

여기서 Th_{si} 는 i 번째 센서 고장을 검지하기 위한 Threshold값이다.

구동기의 고장에 대한 진단법도 잔사치를 이용하여 진단을 행하며 다음과 같이 주어진다.

$$\gamma_{ai} = \prod_{k=1}^{k=p} a_{ki} \quad (5.13)$$

$$\text{단, } a_{ki} = \begin{cases} 1, & \text{if } |\omega_{ki}| \geq Th_{ai} \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

여기서 Th_{ai} 는 i 번째 구동기 고장을 검지하기 위한 Threshold값이다.

5.2.2 고장예지 시뮬레이션

본 절에서는 갠트리 크레인에 발생될 수 있는 고장요소에 대해서 Threshold값 설정법을 고찰하며, 시뮬레이션을 통하여 본 알고리즘의 유효성을 검증하도록 한다. 먼저, 시뮬레이션에 이용되는 갠트리 크레인의 파라미터는 Table 5.1과 같다.

Table 5.1 Parameters for gantry crane system

Symbols	Kind	Values
r	Trolley position	m
θ	Sway angle	rad/s
l	Lope length	20m
M	Trolley weight	5,000kg
D	Damping coefficient	60
M_s	Spreader mass	4,900kg
M_L	Container mass	33,500kg
g	Gravity acceleration	9.8m/s ²

가. Threshold값 설정법

Threshold값을 결정하는 것은 시스템의 고장진단을 행함에 있어서 중요하며, 이 Threshold값의 결정에 따라 고장 진단의 오진이 발생될 수 있다. Threshold값은 주로 크레인의 정상적인 운행에서 나타나는 신호의 크기를 분석하고, 신호의 최대치보다 큰 값으로 결정한다. 그러

나 Threshold값이 지나치게 크게 결정되면 고장 발생시에 고장진단을 행하지 못하므로 예상하는 고장범위 내에서 감도가 충분하도록 설정해야 한다.

Table 5.2는 갠트리 크레인에 대한 진단을 위한 고장의 크기와 이에 대한 Threshold값을 나타내고 있다.

Table 5.2 Fault magnitudes and their thresholds

Items	Fault magnitudes	Thresholds
Actuator	200N	0.0735
Trolley position sensor	-0.05m	0.1
Trolley velocity sensor	-0.01m/s	0.01
Sway angle sensor	-0.1rad	0.2
Sway ang. vel. sensor	-0.0022rad/s	0.011

나. 시뮬레이션 및 고찰

본 절에서는 크레인의 구동기 고장, 센서 고장 및 센서의 복합고장에 대한 여섯 가지의 시뮬레이션을 실시하였으며, 샘플링 주기를 5ms로 하였다. 시뮬레이션에 사용된 고장의 크기 및 Threshold값은 Table 5.2와 같이 하였으며, 시스템의 초기상태는 다음과 같이 고려하였다.

$$\mathbf{x}(0) = [0 \ 0.5 \ 0 \ 0]$$

고장에 대한 시뮬레이션 결과는 구동기 및 센서의 Residual로 나타내었으며 Residual의 크기가 1인 경우는 고장을 나타낸다. 각 고장은 5초에서 발생되도록 시뮬레이션을 행하였으며, 센서의 복합고장의 경우는 5초와 8초에 발생되도록 하였다.

다. 구동기 고장 예지

구동기 고장에 대한 시뮬레이션 결과는 Fig. 5.4(a)~5.4(e)와 같다. Fig. 5.4(a)는 5초에 발생한 구동기 고장에 대해서 1.8초 시간지연을 가지고 진단을 행하고 있다. 이는 갠트리 크레인의 관성모멘트가 크므로 이에 대한 영향으로 사료된다. 또한, Threshold값을 작게 설정하면 지연 시간이 감소되나, 다른 고장에 대해서도 영향이 나타날 수 있어 정확한 분리에 어려움이 있다.

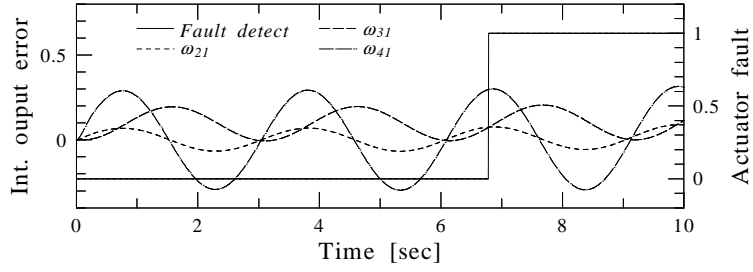


Fig. 5.4(a) Actuator residual in actuator fault

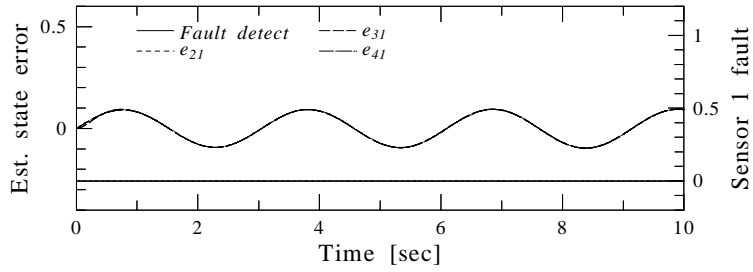


Fig. 5.4(b) Sensor 1 residual in actuator fault

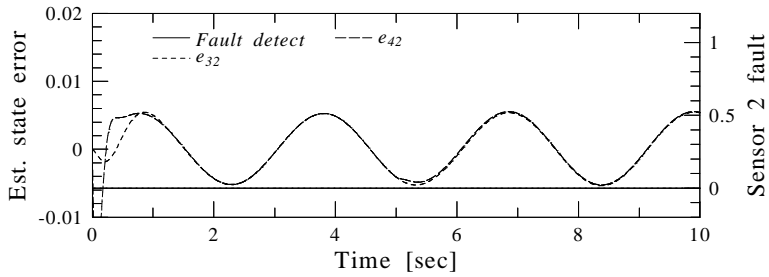


Fig. 5.4(c) Sensor 2 residual in actuator fault

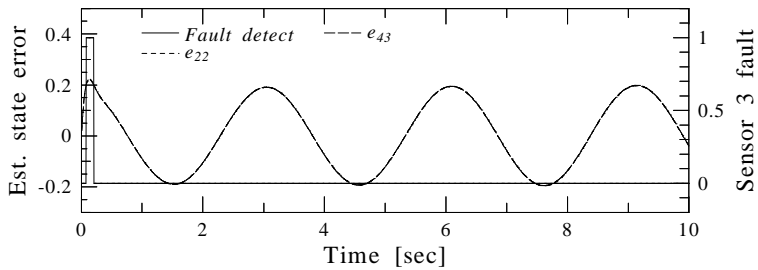


Fig. 5.4(d) Sensor 3 residual in actuator fault

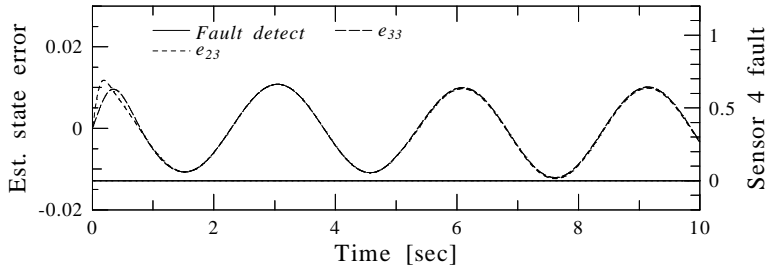


Fig. 5.4(e) Sensor 4 residual in actuator fault

라. 위치 센서의 고장

위치 센서의 고장에 대한 시뮬레이션 결과는 Fig. 5.5(a)~5.5(e)와 같다. 센서의 고장은 Fig. 5.4(b)와 같이 추정 상태 오차 e_{21}, e_{31}, e_{41} 에 의해 정확히 진단되며, 다른 요소에도 비교적 적게 영향을 미친다.

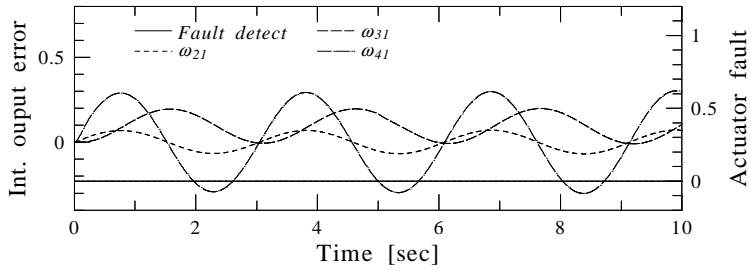


Fig. 5.5(a) Actuator residual in sensor 1 fault

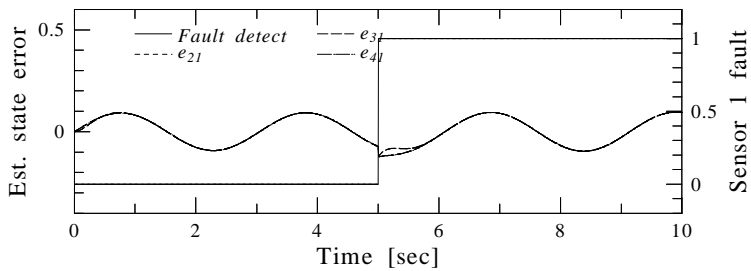


Fig. 5.5(b) Sensor 1 residual in sensor 1 fault

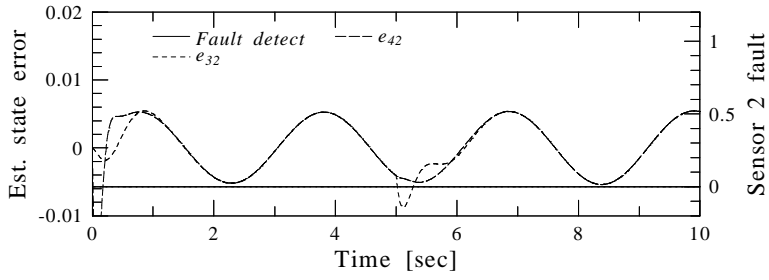


Fig. 5.5(c) Sensor 2 residual in sensor 1 fault

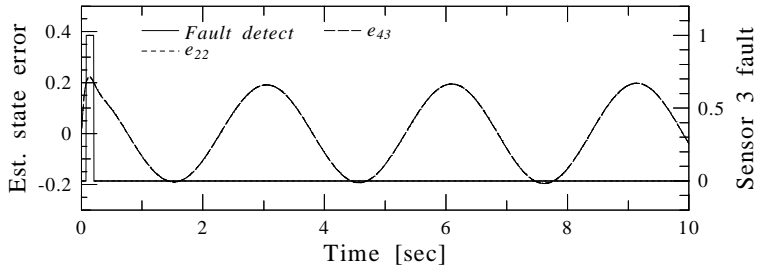


Fig. 5.5(d) Sensor 3 residual in sensor 1 fault

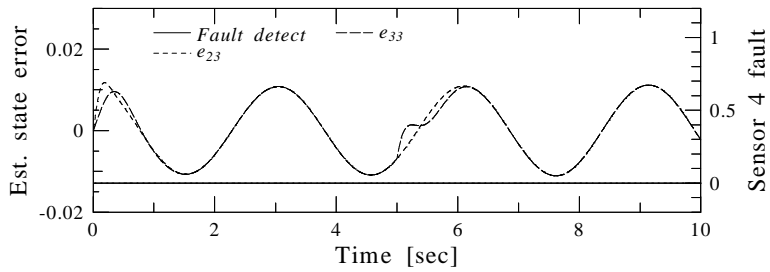


Fig. 5.5(e) Sensor 4 residual in sensor 1 fault

마. 속도 센서의 고장

속도 센서의 고장에 대한 시뮬레이션 결과는 Fig. 5.6(a)~5.6(e)와 같다.

속도센서 고장은 Fig. 5.4과 같이 e_{32} 와 e_{42} 의 크기에 의해서 진단되고 있다. Fig. 5.6(c)와 Fig. 5.6(e)에서와 같이 속도센서 고장으로 인하여 추정오차에 지속적인 정상편차가 발생됨을 알 수 있다.

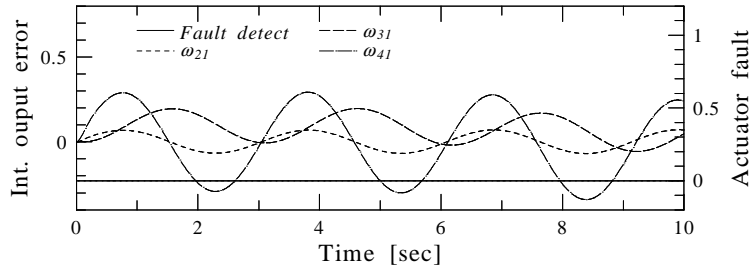


Fig. 5.6(a) Actuator residual in sensor 2 fault

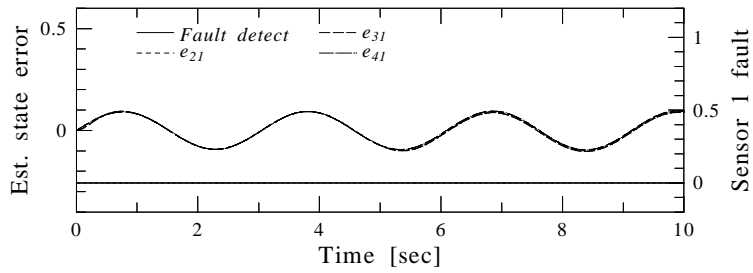


Fig. 5.6(b) Sensor 1 residual in sensor 2 fault

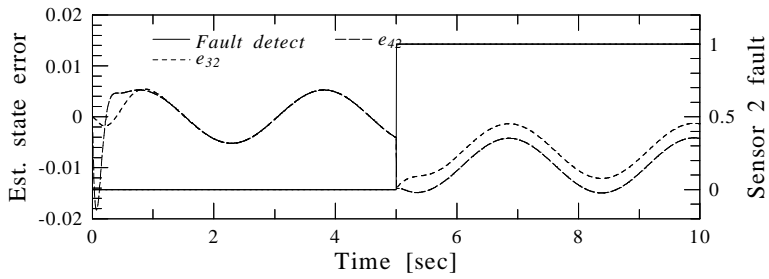


Fig. 5.6(c) Sensor 2 residual in sensor 2 fault

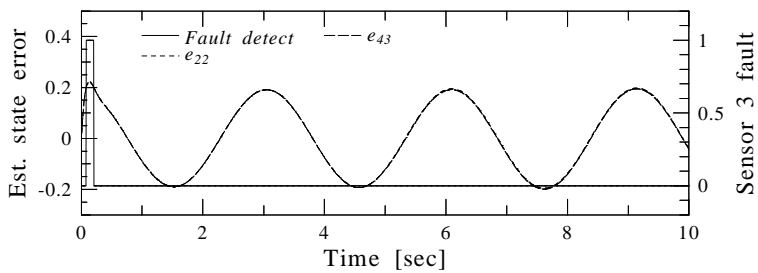


Fig. 5.6(d) Sensor 3 residual in sensor 2 fault

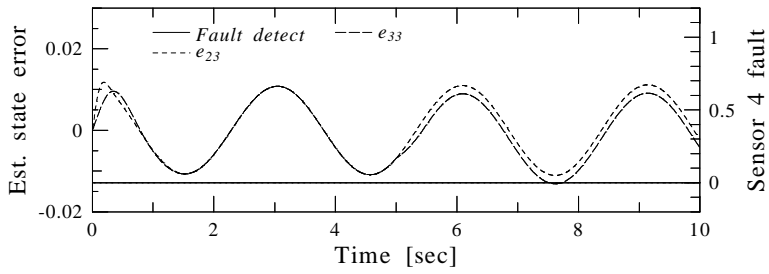


Fig. 5.6(e) Sensor 4 residual in sensor 2 fault

바. 흔들림 각도 센서의 고장

각도 센서의 고장진단 결과는 Fig. 5.7(a)~5.7(e)와 같다. Fig. 5.7(d)와 같이 센서의 고장을 진단하였으며, 다른 센서와 같이 지연시간이 거의 없었으나, Fig. 5.7(b)와 같이 추정오차의 정상편차가 발생하였다.

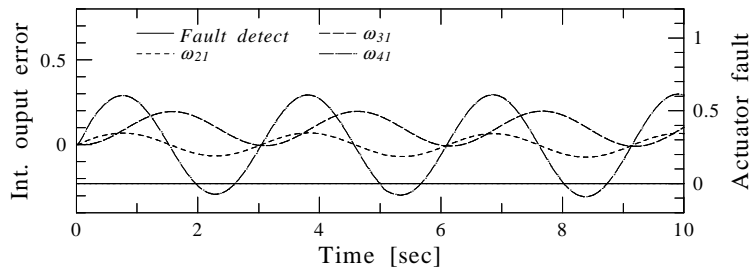


Fig. 5.7(a) Actuator residual in sensor 3 fault

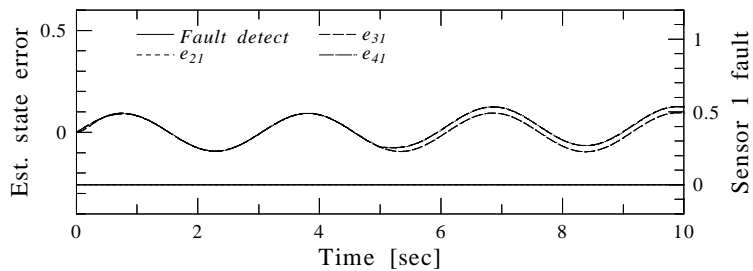


Fig. 5.7(b) Sensor 1 residual in sensor 3 fault

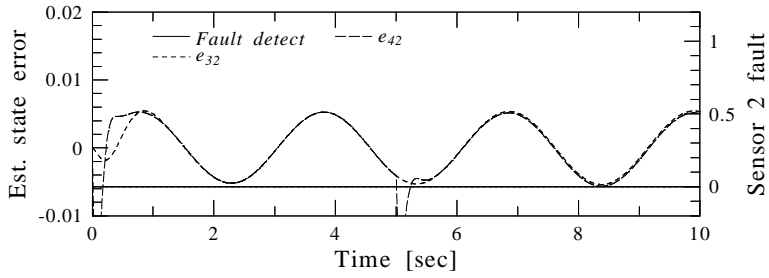


Fig. 5.7(c) Sensor 2 residual in sensor 3 fault

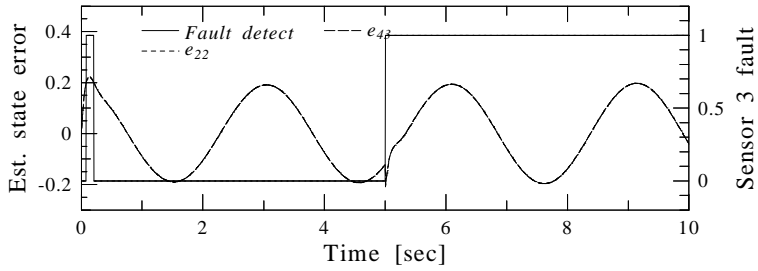


Fig. 5.7(d) Sensor 3 residual in sensor 3 fault

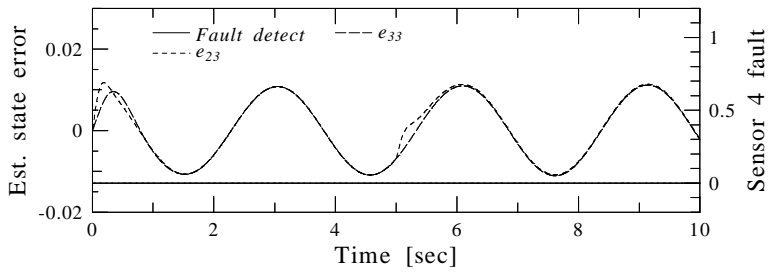


Fig. 5.7(e) Sensor 4 residual in sensor 3 fault

사. 흔들림 각속도 센서의 고장

각속도 센서의 고장진단 결과는 Fig. 5.8(a)~5.8(e)이며, Fig. 5.8(e)와 같이 고장진단을 실시하였다. 그러나 구동기 고장의 경우와 같이 2.5초 정도의 지연시간이 발생하였으며, 이는 화물의 관성모멘트가 큰 원인이라고 사료된다. 또한, 각속도의 고장은 구동기의 고장에 영향을 미치며, 이로 인하여 9.8초 부근에서 구동기의 고장 오진이 발생하였다. 이는 추후 구동기와 각속도 센서의 고장분리에 대한 알고리즘이 요구된다.

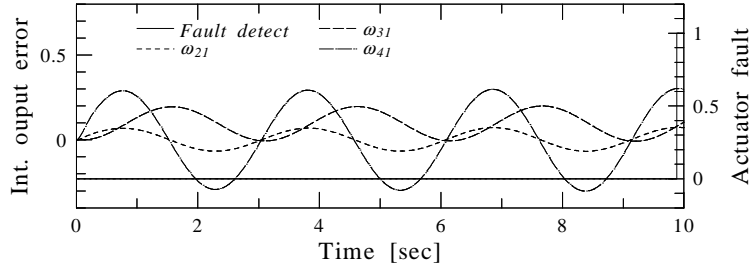


Fig. 5.8(a) Actuator residual in sensor 4 fault

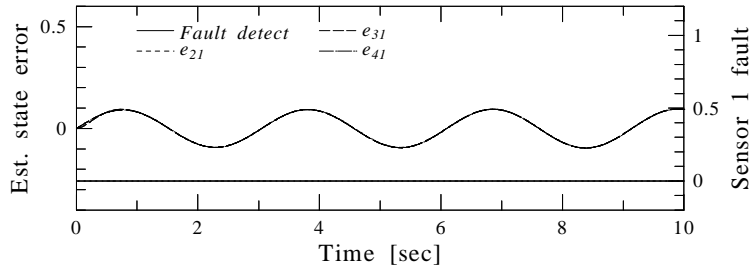


Fig. 5.8(b) Sensor 1 residual in sensor 4 fault

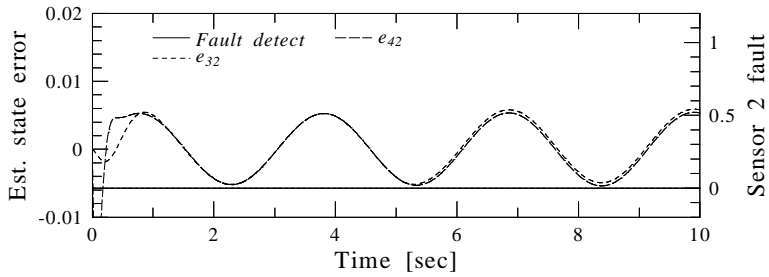


Fig. 5.8(c) Sensor 2 residual in sensor 4 fault

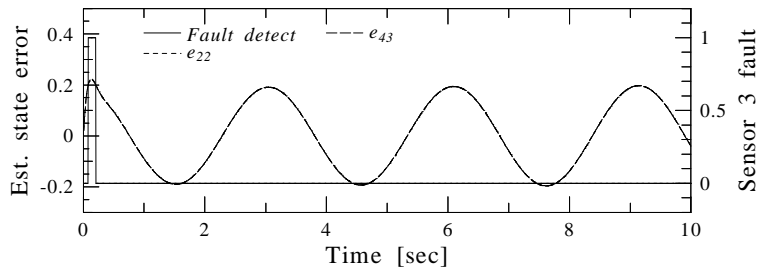


Fig. 5.8(d) Sensor 3 residual in sensor 4 fault

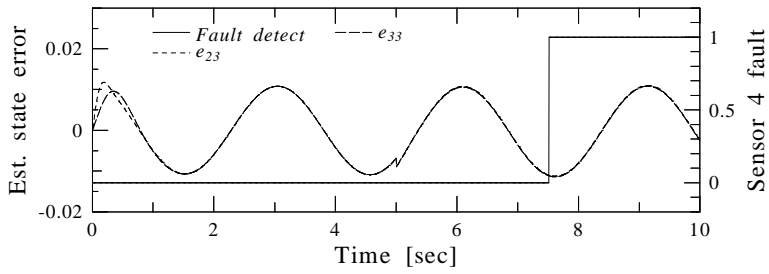


Fig.5.8(e) Sensor 4 residual in sensor 4 fault

아. 센서의 복합 고장

센서의 복합고장에서는 위치센서와 각도센서의 고장을 각각 5초와 8초에 발생시켰으며, 그 진단 결과는 Fig. 5.9(a)~5.9(e)와 같다. Fig. 5.9(b)와 5.9(d)에서와 같이 정확한 진단을 보이고 있다.

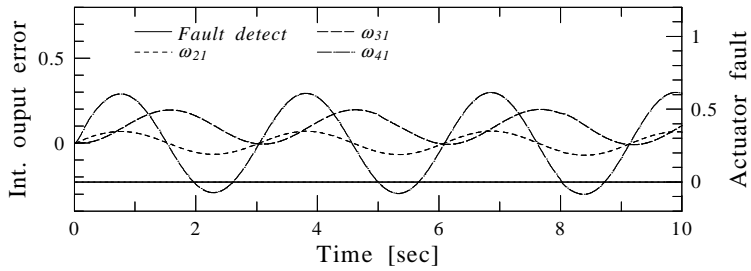


Fig. 5.9(a) Actuator residual in sensor 1 & 3 faults

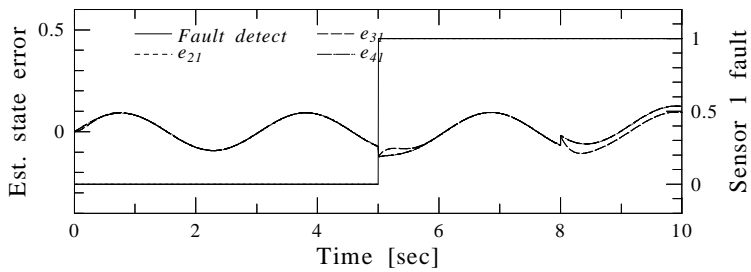


Fig. 5.9(b) Sensor 1 residual in sensor 1 & 3 faults

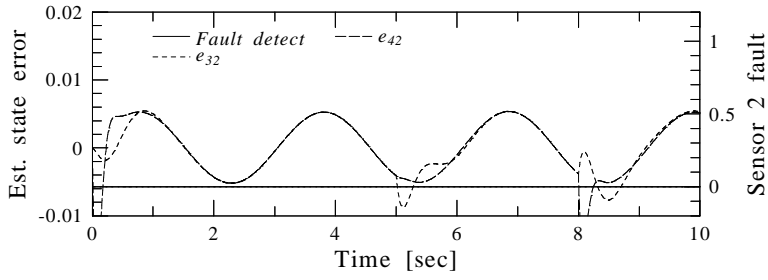


Fig. 5.9(c) Sensor 2 residual in sensor 1 & 3 faults

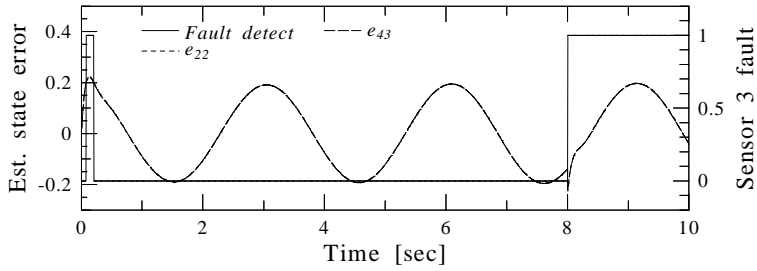


Fig. 5.9(d) Sensor 3 residual in sensor 1 & 3 faults

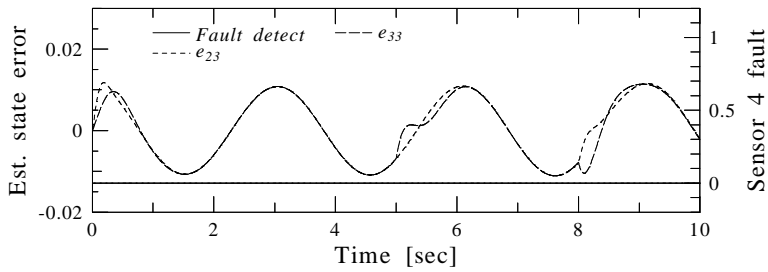


Fig. 5.9(e) Sensor 4 residual in sensor 1 & 3 faults

본 연구에서는 갠트리 크레인을 대상으로 하여 구동기 및 센서의 단일고장에 대하여 고장예지 및 진단이 가능함을 시뮬레이션을 통하여 고찰하였다. 또한 구동기 및 센서류의 복합 고장에 대해서도 동일하게 적용됨을 알 수 있었다. 그러나 몇몇의 복합고장에 대해서는 고장 예지 관측기의 식(5.9)를 만족하는 관측기 계인을 구할 수 없으며, 이는 고장예지 관측기를 구할 수 없음을 의미한다. 그러나 이러한 경우는 이중센서를 이용하는 것이 가능하며, 이러한 시스템에 대해서는 충분히 가능하다.

Table 5.3 The result of fault diagnosis simulation

고장진단항목	고장발생시기	고장진단시간	비고
구동기	5초	1.8초	ω_3 가 초기에 반응하는 이는 초기값 설정에 의함.
위치센서	5초	0초	ω_2 와 ω_4 에서 두드러지게 반응함.
속도센서	5초	0초	ω_4 에서 offset으로 나타남.
흔들림각 센서	5초	0초	ω_1 에서 offset으로 나타남.
흔들림각속도 센서	5초	2.5초	ω_3 에서 offset으로 나타남.
위치센서 & 각도센서	5초, 8초	0초, 0초	ω_2 와 ω_3 에서 두드러지게 반응함.

본 연구에서 실시한 시뮬레이션 결과는 Table 5.3과 같이 정리되며, 각 고장이 스텝으로 발생한다고 가정하여 시뮬레이션을 행하였으며, 구동기 및 흔들림 각속도 센서의 경우 고장진단에 약 1.8초 및 2.5초의 지연시간이 있었으나, 정확히 고장요소 진단 및 분리를 행하였다.

이는 각각 고장이 시간에 따라서 서서히 변화하는 형태로서 지연이 발생된다고 가정하는 경우에도 마찬가지로 고장진단이 가능하다. 즉, 본 연구에서 가정된 Threshold값의 민감도를 고려하여 고장이 서서히 발생된다고 할 때, 충분히 이에 대해서 고장예지 및 고장진단이 가능하다. 따라서 본 연구에서 행하고자 하는 예지보전을 통하여 항만물류장비의 고장률 제로화를 실현시킬 수 있다.

5.2.3 생산성 비교 결과

본장에서는 보전주기를 결정하는 방법과 함께 고장예지를 통하여 정확한 고장을 사전에 진단 및 분리하는 방법을 각각 논하였다. 즉, 항만물류장비의 각 부품에 대하여 정확한 보전주기를 설정하여 교체 및 수리를 행한다면, 장비의 노후화에 수반되는 고장을 사전에 방지할 수 있으며, 또한 On-line으로 장비의 고장예지를 행한다면 고장이 발생할 수 있는 부분을 사전에 차단 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Table 3.5의 선박작업 데이터를 근거로 하여 생산성 증대에 관하여 시뮬레이션을 행하였을 때, 그 결과를 Table 5.4와 같이 나타낼 수 있다.

Table 5.4 The result of prevention maintenance period improvement

항목	개선전	개선후	개선효과
G/C 고장률	33[%]	0%	-
T/C 고장률	20[%]	0%	-
기타 정지	47[%]	47%	-
작업정지시간	10.6[hr]	4.98hr	▽53.1%
순작업시간	31.72[hr]	31.72hr	-
총작업시간	42.32[hr]	36.7hr	▽3.28%
본선처리량	795.4[TEU]	795.4TEU	-
선박당 생산성	18.79[TEU]	21.67TEU	△15.3%
하역작업중단비율	24.9[%]	11.7%	▽13.2%
하역작업생산성	74.1[%]	86.6%	△12.5%

위의 결과에서와 같이 G/C 및 T/C의 고장률이 전혀 발생하지 않는 경우는 작업정지시간이 53.1% 감소하며, 이로서 총 작업시간이 13.28% 감소하고 선박 당 생산성은 15.3% 증가함을 알 수 있다. 여기서 갠트리 크레인과 트랜스퍼 크레인의 고장률 개선후의 값 0%는 목표값을 나타낸 것이다.

5.3 고찰 및 요약

초기 고장률 2%에 의해 같은 단위구성품에 대한 같은 보전주기를 설정하는 것은 단위구성품 적용에 대한 조사가 선행되고 나머지 고장에 대한 주기 설정이 실시되어야 하며 전체보전주기 설정을 고려하기 위한 중요한 기준점이다.

상태공간기법에 의한 예지보전은 입력부 및 출력부에 각각 인가되는 요소가 서로 다르므로 분리하여야 하며, 초기고장과 우발고장에 대하여 예지보전을 통한 사전고장진단을 실시할 수 있기 때문에 예지보전과 예방보전을 통해 가동중 고장률 본 논문에 모델이 된 터미널의 생산성, 작업중단사유 24.9%중 하역장비고장으로 인한 작업중단비율 53%를 제로화 한다면 생산성을 74.9%에서 86.6%로 향상시킬 수 있다는 시뮬레이션 결과가 도출되었다.

그러나 실제 터미널에 적용하기 위해서는 고장진단을 위해 고장률에 대한 정확한 데이터가 분석이 되어져야 한다. 특정 구간 또는 특정 운전상태에서 고장이 발생하였는지 여부와 운전자의 운전 형태에 따른 시스템의 구성요소에 대한 고장이 여기에 해당한다.

갠트리 크레인은 주행부에 동일한 전동기를 사용하더라도 바다측에 설치된 것과 육지측에

설치된 것에 대한 보전 주기를 달리하여야 한다. 갠트리 크레인의 주행 전동기는 바다쪽에 설치된 전동기 수명이 육지쪽 보다는 매우 짧다.

몇 해전 부산항에 내습한 태풍으로 인하여 갠트리 크레인의 전복사고와 침수와 같은 많은 피해를 입었다. 이때 갠트리 크레인의 주행 전동기는 방수 레벨이 IP67인 전동기를 사용하였지만 바다쪽과 육지쪽에 설치된 같은종류의 전동기 피해는 다르게 나타났다. 이와 같이 동일한 단위구성품이라도 조건에 따라 보전주기를 달리하여야 하지만 보전인력, 터미널의 하역작업 여건이 서로 다르므로 상황에 맞는 보전주기를 설정하여야 한다.

본 장에서는 하역장비의 고장을 줄이기 위한 방법으로 예방보전주기설정 방법과 상태공간에서의 예지보전을 행하기 위해 갠트리 크레인에 대해 수학적 모델링을 실시하여 구동기 및 센서의 고장을 고려한 예지 알고리즘을 설계하였다. 이를 근거로 하여 고장예지 시뮬레이션을 행하여 고장 발생을 줄이고 전체 생산성이 향상되었음을 확인 하였다.

제 6 장 결 론

항만하역장비의 가동에 따른 신뢰성은 컨테이너 터미널에서 생산성 제고와 경쟁력 강화에 중요한 변수로 작용하고 있으며 하역장비의 고장은 작업중단을 의미하기 때문에 계획된 생산성에 차질이 생기는 것은 당연한 결과이다. 생산성 저하는 해당 운영사에도 많은 어려움을 가져다주지만 선박의 체선·체화로 연결되므로 항만과 국가물류경쟁력강화에 큰 손실을 가져다준다. 최근 항만물류산업의 경쟁력 강화를 위한 방법 중에서 하역장비의 자동화 제어시스템의 개발과 실용화에 많은 연구개발이 진행되고 있으나, 이는 시스템의 복잡성 등으로 인하여 고장이 더 많이 발생할 수 있는 요인을 내포한 시스템이며 하역장비의 가동률에 따라 상대적으로 고장률이 증가하게 된다.

본 논문에서는 하역장비의 가동에 따른 신뢰성을 높이고 고장을 사전에 예측하여 올바르게 보전하는 방법을 다음과 같이 제시하였다.

첫째, 하역장비의 보전형태는 보전요원의 접근성, 보전시간, 운영효율성을 설계시점부터 적용해야하고 장치의 신뢰성이 검증된 부품을 사용하여 최적의 보전주기설정에 함수를 근거로 하여 신뢰도와 고장률 함수에 의한 최적의 보전주기를 설정할 것을 제안하였다.

둘째, 사고사례에 따른 예방보전과 예지보전을 비교 검토하여 보전비용의 최소비용점을 확인하였다. 하역장비별, 보전분야별, 주동작별, 수리시간별로 구분하여 고장의 형태를 정리하여 분석하였고, 지수분포, 정규분포, Weibull분포에 따른 고장을 분석하고 초기고장, 우발고장, 마모고장을 줄일 수 있는 방식을 제안하였다.

셋째, 일반적으로 항만의 생산성 평가모형을 시설, 인력, 선석으로 구분하였으나 평가모형에 같은 선석이라도 선박의 크기와 하역작업량, 하역장비의 댓수와 인력의 투입이 다르게 나타나므로 본 연구에서는 생산성 평가모형에 선박당 생산성 평가를 제안하였다. 본 논문에서 대상으로 하는 컨테이너 터미널의 운영자료를 근거로 선석접안율, 총선석생산성, 순선석생산성, 총장비생산성, 순장비생산성으로 분석하였다. 또한 민감도 분석을 통하여 민감도와 고장률 관계로부터 작업중단 비율이 높게 나타나는 갠트리 크레인 고장이 민감도가 높은 것으로 나타났다. 생산성의 평가모형에 하역장비 고장에 대한 부분을 고려하였으며, 하역장비 가동중 고장을 "0"으로 한다면 하역작업중단 비율을 13.2% 줄일 수 있는 것을 확인하였다.

넷째, 하역작업의 특징을 고려한 장비의 보전주기를 제안하였고, 관측기법에 의한 상태 모니터링으로 고장여부를 판단하고 고장을 분리 진단하는 방법을 제안하였다.

다섯째, 상태공간기법에 의한 고장예지 알고리즘을 구현하기 위해 갠트리 크레인의 고장진단을 행한 결과, 구동부를 포함한 센서의 고장 진단이 가능함을 확인하였으며 이를 통하여 생산성 향상에 필요한 데이터를 구축하였다. 이로써 고장의 형태를 확인하고 원인별로 고장을 예지할 수 있는 방법을 확인하였으며, 또한 생산성 지표가 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

현재 컨테이너 터미널에서 하역장비 부품들의 교체와 보전주기를 설정한 모니터링이 되어 있다고는 하지만, 이런 모니터링은 제작사의 권고 사항에 맞춰서 프로그램되어 있기 때문에 실제 프로그램에 맞게 교체와 보전이 이루어지기는 현실적으로 어려운 부분들이 많다. 그리고 컨테이너 터미널 내부환경과 주위여건이 주로 선박의 체항시간에 의존하고 있으므로 정확한 보전주기에 의해 관리되기 어려운 실정이다. 따라서 보전요원과 운전요원의 다양한 경험과 의견, 각 항만의 고장정보를 공유하여 예지보전에 이용하는 방법도 필요하다.

이와 더불어 최근에는 무인 하역장비가 상업운전에 들어가면서 하역장비의 예지보전과 예방보전에 대한 새로운 환경을 맞이하고 있다. 갠트리 크레인을 비롯한 각 하역장비의 성능과 속도는 높아져 가고 있지만, 신뢰성 측면에서는 이를 따라 가지 못하는 경향이다. 즉, 하역장비 성능 향상은 각 부품들의 신뢰성향상이 같이 이루어져야 한다.

그리고, 항만장비의 운영시 인간공학적 측면이 적절히 고려되어야 한다. 운전자의 영역인 운전실의 안락한 배치, 보전요원이 작업효율을 높일 수 있는 설계 등 많은 부분에 이르기까지 하역장비는 발전을 할 것이다. 하역장비의 시스템이 발전되어 가는 것과 발 맞추어 고도의 신뢰성이 확보되어야 하며 이를 위해서는 고장보전에도 전문가의 진단과 수리가 요구된다. 앞으로는 무인 하역장비는 물론이고, AGV, 냉동컨테이너 취급 시스템, 위험물 취급 시스템 분야에서도 지속적으로 연구가 이루어져야 하며, 이는 컨테이너 터미널에서 운영시스템과의 호환성, 연계성과 관련하여 매우 중요한 문제이다. 지금까지는 하역장비의 개발은 구조와 하역장비의 가동에 필요한 부분에 초점이 맞추어져 있다. 이러한 부분들을 통합하는 연구 진행에 신뢰성을 높이는 보전 방향의 제시도 필요할 것으로 생각된다. 하역장비의 예방보전은 단순하게 이루어지는 일련의 예방점검도 포함되어 있고 예방보전에 예지보전의 개념이 같이 추가되어야 할 것으로 판단된다.

그러나 예방보전이 아닌 고장보전은 이미 부품들의 고장의 징후를 미리 나타내는 신호이므로 이것을 미리 감지하여 고장에 대비한다면 하역장비의 실가동중에 발생하는 고장은 많은 부분 줄일 수 있다. 그리고 통계에 의한 체계적인 데이터에 의한 보전 프로그램의 관리가 반드시 수반되어야 한다. 앞으로 하역장비는 무인화로 가는 추세를 거스르기는 어려울 것으로 판단되며, 하역장비의 무인화시대를 미리 대비하고, 최적의 보전계획을 세우기 위해서는 고장 정보만의 모니터

링이 아닌 원인과 판단에 의한 모니터링이 되어야 하며, 이런 추세에 맞게 향후 항만 산업에서 미래 수요에 부응하기 위한 항만장비의 현대화 및 무인화에 대비한 연구분야를 정리하면 다음과 같다.

첫째, 단순한 교체를 위한 보진요원이 아닌 체계적인 교육을 통해서 고장 원인진단과 고장 수리, 시운전과 항만하역장비의 보진전문가 시스템을 구축하여야 하며, 최종적으로 하역장비의 재가동을 결정할 수 있는 운영 시스템과의 연계가 필요하다.

둘째, 우리나라의 컨테이너 터미널 운영 역사 30여년간 고장 발생 자료를 수집 정리, 각 운영사들의 정보를 공유시켜 각 요소의 DB 구축과 함께 체계적인 하역장비관리가 필요하다.

셋째, 하역장비의 제어기법에 휴먼신뢰성을 이용한 무인화 시스템이 적용될 것이며 현재의 무인 하역장비의 직선운동만을 하는 일차원적인 형태에서 3차원적 공간 개념 형태로 발전하므로 이에 대한 다양한 센서기술 및 인간의 감각을 고려한 알고리즘 개발이 요구된다.

參 考 文 獻

- 한국컨테이너부두공단. “컨테이너화물 유통추이 및 분석”, 2004.
- 하태영, “차세대컨테이너 크레인 생산성비교분석”, 월간 해양수산 통권 제243호, 2004.
- 권오운, 이홍철, “설비예방보전을 위한 TBM의 최적보전주기 설정모델 연구”, 한국경영과학회/대한산업공학회 춘계공동학술대회, pp.105~117, 2003.
- 권오운, “설비상태에 의한 예지보전(CBM) 방식의 추진방법”, KSA 공장 혁신지, 1998.
- 이현용, 송준엽, 김동훈, “자동창고의 예방보전 및 진단시스템 개발”, 안전경영과학회 추계학술대회 논문집, pp. 123~131, 1999.
- 이선용, 최형림, 박남규, 권해경, 임성택, “DEA 기법을 이용한 컨테이너터미널 생산성 측정에 관한 연구”, 한국항해항만학회 제28권 제2호 추계학술대회논문집, pp. 331~326, 2004.
- 정영배, “불완전보전을 고려한 시스템의 최적 정기 예방보전 시기”, 공업경영학회지 제17권 제17권 제32호, pp.221~226, 1994.
- 김호균, 조형수, “두 가지 고장형태를 고려한 생산 및 예방보전 정책”, 품질경영학회지 제30권 제3호, pp.53~65, 2001.
- 유희한, 城后入郎, 橋本武, 하주식, “동적계획법을 이용한 선박용기기 및 부품의 최적보전시기 결정에 관한 연구”, 한국선용기관학회지 제23권 제6호, pp.63~71, 1999.
- 이현용, 송준엽, 김동훈, “자동창고의 예방보전 및 진단시스템 개발” 안전경영과학회 추계학술대회, pp.123~131, 1999.
- 김환태, “차세대 보전관리와 전개” 과학기술부 과학기술정보연구원 보고서
- 하주식, “기기 또는 시스템 고장과 신뢰성 및 보전성” 한국박용기관학회지 제11권 제1호, pp 10~28, 1987
- 하태용, 최용석, 김우선. “자동화 컨테이너 터미널의 이송장비 운영평가를 위한 시뮬레이션 모델” 한국항해항만학회 춘계학술대회, 2004
- 권오운, “시간기준예방보전(TBM) 방식의 보전주기 설정에 대한 방안” KSA 공장 혁신지 1998.
- 최승영, 김선호, “크레인의 전기고장진단시스템 개발”, 산업공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 660~666, 1994.
- 송준엽, 안철홍, 김동훈, “Stacker Crane 이상진단용 Case Base구축”, 대한산업공학회춘계학

술대회, pp.131~125, 1995.

박동호, 염준근, 정기문, “Optimal Policy for Periodic Preventive Maintenance” 한국통계학회
춘계학술발표회논문집, pp.177~182, 1998.

방중혁. “수리 가능한 시스템의 최적예방보전 및 교체정책”, 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
정기문. “A Study on Optimal Periodic Preventive Maintenance Policy of a Repairable
System”, 동국대학교 대학원 박사학위논문.

정종태 “증가수리비용을 가지는 경우의 최적예방보전정책” 서울대학교 대학원 석사학위논문
차지환, 정종태, 김재주. “수리 가능한 시스템에서의 최적예방보전정책” 품질경영학회지 제29권
제2호, pp.46~47, 2001

허윤수, 하원익, 정승호, “부산항 컨테이너 전용 터미널 운영 개선을 위한 연구”, 한국항만학
회지 제14권 제1호 pp.13~26, 2000

정승호, 하원익, “컨테이너터미널 생산성 산정에 관한 실증 연구” 해운학회지 66호, 1999

윤동환, “항만 생산성 최신 개념소개”, 항만시스템연구실, 2000

박성규, 심민석, 이현영, 이명재, “FFT 알고리즘을 이용한 장비 예지보전 전문가 시스템의
설계”, 한국정보과학회 가을학술발표논문집 Vol.30. No.2, 2003.

마규하, “최근의 설비진단 기술과 예지보전” 과학기술부 과학기술정보연구원 보고서.

김상봉, 하주식 “메카니칼 제어시스템” 도서출판 한미, pp 65~73, 1992.

손정기, “컨테이너 크레인의 하역생산성 향상을 위한 강인한 제어기 설계” 부경대학교 박사
학위논문 2004.

김영호, 김환성 “GPS를 이용한 야드 크레인 위치제어” 항해항만학회 추계논문집 2005.

최재준. “퍼지-LQ 기법을 이용한 컨테이너 크레인의 강인한 제어기 설계” 한국해양대학교
박사학위논문 2002.

이선용, 최형림, 박남규, 권해경, 임성택, “DEA 기법을 이용한 컨테이너터미널 생산성 측정에
관한 연구”, 한국항해항만학회 제28권 제2호 추계학술대회논문집, pp. 331~226, 2004.

유명중, 남기찬, 송용식, “컨테이너 터미널 유형 평가”, 한국항해항만학회 제27권 제5호 pp.
577~584, 2003.

권오운, 이홍철, “설비예방보전을 위한 TBM의 최적보전주기 설정모델 연구”, 한국경영과학회
/대한산업공학회 춘계공동학술대회, pp.105~117, 2003.

이순요, “설비보전관리 시스템에의 IT 활용기술” 과학기술부 과학기술정보연구원 보고서.

- 정영배, “불완전보전을 고려한 시스템의 최적 정기 예방보전 시기”, 공업경영학회지 제17권 제32호 pp.221~226, 1994.
- 김호균, 조형수, “두 가지 고장형태를 고려한 생산 및 예방보전 정책”, 품질경영학회지 제30권 제3호 pp.53~65, 2001.
- 유희한, 城후入郎, 橋本武, 하주식, “동적계획법을 이용한 선박용기기 및 부품의 최적보전시기 결정에 관한 연구“, 한국선용기관학회지 제23권 제6호 pp.63~71, 1999.
- 한성실, 정기문, 권영섭, “주기적인 예방보전정책의 베이스 접근방법” 품질경영학회지 제29권 제3호 pp.39~48, 2002.
- 이현용, 송준엽, 김동훈, “자동창고의 예방보전 및 진단시스템 개발” 안전경영과학회 추계학술대회, pp.123~131, 1999.
- 이진식. “최신공정관리” 형설출판사, 서울, 1997.
- 이순요, “신설비 관리론”, 양영각, pp.245~246, 1993.
- 이상용, ‘신뢰성 공학’, 형설출판사, pp.12~54, 1997.
- 강영식, 백종배, 이근오. “신뢰성공학”, 도서출판 동아기술, pp.15~90, 2002.
- 권영국, “산업안전공학”, 형설출판사, pp.63~89, 2002.
- 정해성, 박동호, 김재주. “신뢰성 분석과 응용” 영지문화사.
- 山出英夫, ‘국제허브항의 경제성“ 해양한국 통권 제345호, 2002.
- 백순흠, 양성현, “신뢰성공학 및 관리” 웅보출판사, 2001.
- 日本プラントメンテナンス協會(JIPM), 新TPM展開 フロケラム, 加功組立編, Tokyo, 1992.
- Mazzuchi. T. A, Soyer. R. "A Bayesian perspective on some replacement strategies" Reliability Engineering and System Safety" Vol 51, pp 295~303, 1996.
- 日本プラントメンテナンス協會(JIPM), 新TPM展開 フロケラム, 裝置組立編, Tokyo, 1992.
- 日本プラントメンテナンス協會(JIPM), 설비관리편람, p.53, Tokyo, 1992.
- 豊田利夫, “豫和保全(CBM)의 進め方” 日本プラントメンテナンス協會, Tokyo, 1996.
- Peter R. Vandermat, “Productivity Measurement Standards for International terminal Operators”, TOC 2001.
- Thomas Higgins, Maged Dessouky, Randolph Hall. “Port Operations”, Center for Development of transportation Technologies Final Report, 2000.
- M. Bevilacqua, M. Braglia, “The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy

selection" Elsevier Science, March. 2000.

Yu Qian, Xiuxi Li, Yanrong Jiang, Yanqin Wen. "An expert system for real time fault Diagnosis of complex chemical process", Elsevier Science, Expert System with Application pp.425~432, 2003.

Cooley. J. W, J. W. Turkey. "An algorithm for the machine calculation of complex fourier series" Math. Comp Vol. 19 pp.297~301, 1965.

Benjamin C, Kuo. "Automatic Control Susyems"Prentice Hall International Edition pp.135~150.

Robert L, Woods. Kent L, Lawrence. "Modeling and Simulation of Dynamic systems" Prentice Hall International Edition, pp.426~434.

Katsuhiko Ogata. "System Dynamic" Prentice Hall Fourth Edition, pp.8~53.

Yu Qian, Xiuxi Li, Yanrong Jiang, Yanqin Wen. "An expert system for real time fault Diagnosis of complex chemical process" Elsevier Science, Expert System with Application pp. 425~432, 2003.

Cooley. J. W, J. W. Turkey. "An algorithm for the machine calculation of complex fourier series" Math. Comp Vol. 19, pp.297~301, 1965.

M.Bevilacqua, M.Braglia, "The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection" Elsevier Science March. 2000.

Groenevelt. H, L. Pintelon, A. Seidmann. "Production Lot Sizing with Machine Break downs" Management Science Vol. 38 pp.104~123, 1992a.

Groenevelt. H, L. Pintelon, A. Seidmann." Production Batching with Machine Break downs and Safety Stocks" Operation Research Vol. 40 pp.959~971, 1992b.

Lee. H. L, M. J. Rosenblatt. "Simultaneous Determination of Production Cycle and Inspection Schedules in a Production System" Management Science Vol 33 pp. 1124~1136, 1987.

Canfield. R. V, "Cost Optimization of periodic Preventive Maintenance" IEEE, Transaction on Reliability Vol 35 pp 78~81, 1986.

Nakagawa, T. "Periodic and sequential preventive maintenance policies" Journal of Applied Proability Vol 23 pp. 536~542, 1986.

Park. D. H, Jung. G. M, Yun, J, K. "Cost minimization for periodic maintenance policy of

a system subject to slow degradation" Reliability Engineering and System Safety Vol 68 pp. 105~112, 2000.

Sheu. S. H, Yeu. R. H, Lin, Y, B. Juang. M. G, "A Bayesian perspective on age replacement with minimal repair" Reliability Engineering and System Safety Vol 65 pp. 55~64, 1999.

Soland. R. M, "Bayesian analysis of the Weibull process with unknown scale and shape parameter" IEEE Transactions on Reliability, Vol 18 pp. 181~184, 1969.