



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

物流學碩士 學位論文

STS 크레인의 FCM 검사를 통한 내구년수
연장에 관한 연구

A Study on the Useful Life Extension through Fracture Critical
Member Inspection on STS Crane

The seal of Korea Maritime & Ocean University is a circular emblem. It features a central stylized figure resembling a crane or a traditional Korean symbol. The text "KOREA MARITIME & OCEAN UNIVERSITY" is written in an arc at the top. At the bottom, the Korean text "한국해양대학교" is written in an arc. The year "1945" is inscribed in the center of the seal.

指導教授 金時顯

2020年 2月

韓國海洋大學校 글로벌物流大學院

海運港灣物流學科

曹 禎 炫

本 論文을 曹禎炫의 物流學碩士 學位論文으로 認准함

위원장 : 김 환 성



위 원 : 김 율 성



위 원 : 김 시 현



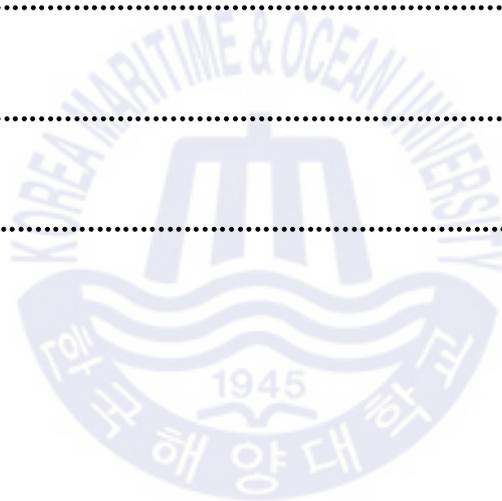
2019년 12월

한국해양대학교 글로벌물류대학원

< 목 차 >

표 목차	III
그림목차	IV
초 록	V
Abstract	VII
제1장 서 론	1
제1절 연구의 배경	1
제2절 연구의 내용	2
제2장 이론적 배경	4
제1절 크레인 제조사에서 제시하는 정밀 진단 주기	4
제2절 기술 시방서 사례(BS2573 Part1)	8
제3절 H'사 STS 크레인에 적용되는 KPI	21
제4절 H'사 STS 크레인 개요	28
제3장 FCM 검사	30
제1절 비파괴 검사의 방법 및 이론	30
1. MT(자분탐상검사)	30
2. UT(초음파탐상검사)	31
제2절 용접부위 비파괴 검사 적용 구간 상세	32
1. 검사대상장비 상세	32
2. FCM 비파괴 검사 범위	35
3. 비파괴 검사	41
제4장 FCM 검사 후 크레인 구조물의 설계수명 및 수명예측 44	
제1절 수명예측방법론	44
1.1 Palmgren - Miner's Rule	45

1.2 Miner의 가법	46
1.3 BS5400 Part10 규격의 통계 데이터와 신뢰도 계산	46
제2절 크레인 구조물의 신뢰도 및 수명 예측	51
2.1 비파괴 검사 결과	51
2.2 H'사 QC122호 구조계산서	52
제3절 보수, 보강 방안	66
제5장 결론	71
제1절 연구의 요약 및 시사점	71
제2절 연구의 한계 및 향후과제	72
참고문헌	73
감사의 글	74
부록	75~97



<표 목차>

[표 2.1] 제조사 권장 검사 주기	4
[표 2.2] 기계 장비 설계등급	9
[표 2.3] 핀 연결부의 허용 면압	14
[표 2.4] 피로상쇄 신뢰도	17
[표 2.5] 안정도 조합기준	18
[표 2.6] 차륜하중(Wheel Load) 조합 기준	19
[표 2.7] 강도 계산 하중 조합 기준	20
[표 2.10] H'사 STS 크레인 상세	28
[표 3.1] 대상장비 및 상세 사양	32
[표 3.2] 검사부위 검사방법	34
[표 3.3] 붐, 거더 광과 측정 결과	36
[표 3.4] 붐 처짐 광과 측정 결과	37
[표 3.5] A-Frame 편평도 광과 측정 결과	38
[표 3.6] 레그 전, 후 수직도 광과 측정 결과	39
[표 3.7] 레그 좌, 우 수직도 광과 측정 결과	40
[표 3.8] 검사 결과	42
[표 3.9] FCM 검사 결과	43
[표 4.1] 파괴 확률 적용 범위	47
[표 4.2] 부재의 허용 누적 손상 K_1 과 K_2 를 계산한 상수	48
[표 4.3] 피로 상세 신뢰도	49
[표 4.4] 이동 하중 위치 계산 부 상세	54
[표 4.5] FCM 별 응력 산출 결과	57
[표 4.6] FCM 잔존 내구 사이클	63
[표 4.7] QC122호 도입 후 컨테이너 처리 수(단위:VAN)	64
[표 4.8] QC122호 잔존 내구 사이클 및 내구년수	65

[그림 목차]

[그림 1.1] 연구의 구성과 흐름	3
[그림 2.1] FCM Diagram	6
[그림 2.3] 설계 주기 스펙트럼	15
[그림 2.4] TLC 작동 조건	23
[그림 2.5] MMBF 산출 예시	24
[그림 2.6] MTTR 산출 예시	25
[그림 2.7] H'사 STS 크레인 CMS(Crane Monitoring System)	26
[그림 2.8] H'사 STS 크레인 Performance Indicator 추이(2013~2018)	27
[그림 2.9] H'사 기계,전기 파트 별 정비건수 및 Man Hour 추이(2013~2018)	27
[그림 2.10] H'사 STS 크레인	29
[그림 3.1] 자분탐상모식도, 자분탐상장비	30
[그림 3.2] 초음파탐상모식도, 자분탐상장비	31
[그림 3.3] 대상장비전경(QC122~124)	32
[그림 3.4] 붐, 거더 광과 측정 범위	35
[그림 3.5] 부하 장착 후 붐 처짐 측정	37
[그림 3.6] A-Frame 편평도 측정 부위	38
[그림 3.7] 레그 전, 후 수직도 측정 부위	39
[그림 3.8] 레그 좌, 우 방향 직진도 측정 부위	40
[그림 3.9] 레그 좌, 우 수직도 그래프	41
[그림 4.1] $\sigma_r - N$ 곡선 요약도	47
[그림 4.2] BS5400 Part10내 전형적인 상세 등급	50
[그림 4.3] 이동 하중 위치 계산 부위	54
[그림 4.4] STTAD PRO V8i 화면	55
[그림 4.5] 각 부재 번호 부여	56
[그림 4.6] 각 부재 별 명칭	57
[그림 4.7] 균열 발생 부 보수 용접 구간 적용 기준	66

초 록

STS 크레인의 FCM검사를 통한 내구년수 연장에 관한 연구

조 정 현

해운항만물류학과
한국해양대학교 글로벌물류대학원

부산항은 1977년 자성대 컨테이너 터미널의 개장 이후, 처리 물량 증가로 인해 세계적인 항만으로 자리 매김 해오고 있으며, 전용 컨테이너 터미널을 중심으로 날로 발전하여 규모와 시설 면에서 세계적인 항만과 비교해도 손색이 없을 정도의 질적, 양적 성장을 거듭해 왔다.

그런 끊임없는 발전과 더불어 항만하역장비에 적용되는 제어기술 및 성능의 향상이 계속적으로 진행되고 있으며, 2006년 부산신항만 1-1단계 개장 이후 부산신항만 지역에 도입되는 항만하역장비들은 육상 크레인의 경우 반자동 기술까지 발전되어 컨트롤러에서 1인이 제어하는 육상 크레인(RMGC)이 4대에 까지 이르는 기술 개발이 이루어졌다.

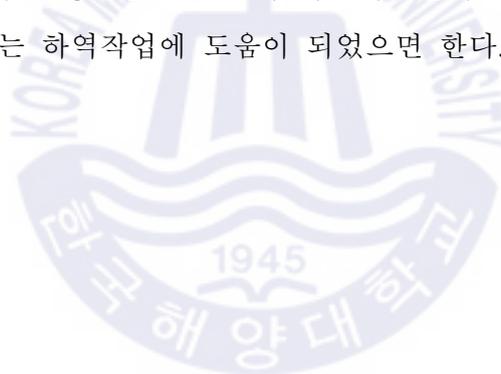
그러는 동안 항만하역장비에게 어느 사물이나 마찬가지로 내구년수란 것이 주어지게 되는데 강철로 이루어진 STS 크레인은 서로 다른 모재로 용접 접합을 통해 만들어진 구조물이기 때문에 용접부위에 응력(Stress)이라는 반발력(인장, 압축)이 필수불가결하게 발생되어 접합부위의 균열(Crack)을 초래하게 된다.

그 중 FCM(Fracture Critical Member, 붕괴유발부재)이라는 크레인을 구성하는 부재 중 이 부재의 용접 부위가 파단 될 시 크레인의 즉각적인 붕괴 및 파괴로 이어질

수 있는 부재의 검사를 실시할 필요가 있다. Hutchison Port에서 적용하는 STS 크레인의 내구년수는 30년으로 정의되어 있으며 컨테이너 터미널 내에서 제일 중요한 자산을 이야기하자면 구매금액이 가장 높은 STS 크레인이라고 할 수 있다.

자성대 컨테이너 터미널에 운용중인 STS크레인은 노후화가 진행되어 주기적으로 FCM검사를 실시해 왔다. 불행히도 전국에 있는 컨테이너 터미널 중 FCM검사를 실시한 회사는 HKT(Hutchison Korea Terminals Co. LTD)가 유일했다. 본인은 2014년 , 2017년 실시한 FCM검사를 통해 허용 기준 초과 개소를 보수 후 BS5400 Part10(강, 콘크리트 및 복합 교량의 피로에 적용하는 영국규격)을 적용하여 기존 30년의 STS 크레인의 내구년수가 얼마나 연장될 수 있는지 이론적, 산술적 수치를 파악하고자 한다.

기존에 국내의 타 컨테이너 터미널에서 본 검사를 실시한 경우가 없어 일반화 시키는 데 어려움이 있을 수 있지만 본 과업을 통해 타 터미널에서도 주요 자산인 크레인의 주기적인 정밀진단을 통해 사고 및 물적 손해를 미연에 방지하여 생산성 및 끊임없는 하역작업에 도움이 되었으면 한다.



Abstract

A Study on the Useful Life Extension through Fracture Critical Member Inspection on STS Cranes

Jo, JungHyun

Department of Global Shipping and Port Logistics
Graduate School of Global Logistics

The port of Busan has been the global port with continuous increase in handling volume ever since Jasungdae container terminal was opened in 1977, and it has been developed as one of the biggest global ports comparing with the other ports worldwide in quality and quantity of handling volume and facility.

With the continuous effort, the control technology and performance applying to harbor equipment has been developed, and with opening of Busan Newport phase 1-1 in 2006, newly introduced RMGCs in Busan Newport area are adopting semi-auto technology which runs 4 cranes per only 1 person in control center.

Meanwhile, all equipments are supposed to have endurance life like all things in nature, STS crane which is assembled and welded structure with other steel plates has the inner repulsive power (tension and compression) called "stress" at each welded members inevitably and it could cause cracks on those spots.

Among those members, there is the member called FCM (Fracture Critical Member) which could cause instant demolition or destruction of crane if it has cracked spot on welded members, so it needs to have precision

inspection on those members. The endurance life of STS crane in Hutchison Port group is defined 30 years and the most expensive asset in container terminal can be STS crane in container terminal.

The endurance life of the STS cranes in HKT(Hutchison Korea Terminal Co.Ltd) is got being old, and HKT has been conducting the precision inspection on FCM(Fracture Critical Member) periodically. Unfortunately, HKT was the only container terminal that had the inspection on FCM.

Through the actual FCM inspection that HKT conducted in 2014 and 2017, I'd like to calculate how many endurance life can be extended currently that of STS crane is 30 years theoretically and numerically after repairing all the rejected parts of the inspection on FCM based on BS5400 Part10 which is British Standard that applies to fatigue of steel, concrete, and composite material bridge.

Of course there are difficulties to generalize this work as theory that none of container terminals have conducted this inspection, but I'd like to give suggestion to prevent from the safety accidents and damage of STS crane which is the most expensive asset in other container terminals and promotion on productivity and continuous loading and unloading work through having the inspection on FCM periodically.

제1장 서론

제1절 연구의 배경

1960년대에 수출입 화물의 효율적인 운송을 위하여 컨테이너 운송수단이 미국에서 도입된 이래 국내에서도 1970년도부터 현재에 이르기까지 부산항을 중심으로 컨테이너 전용터미널이 운용되고 있다. 현재 부산항은 2018년 기준 연간 1,977TEU의 컨테이너를 처리하는 세계 5위 항만에 위치하고 있으며 꾸준한 투자로 규모와 시설 면에서 주변국 경쟁 항만과 동북아의 허브 터미널 위상 확보를 위하여 상호 경쟁하고 있다.

중국을 비롯한 주변 항만과의 치열한 경쟁 상황에서 항만의 생산성과 항만의 서비스 수준은 항만의 경쟁력을 확보 할 수 있는 중요한 요소가 되었으며, 항만의 서비스의 좋고, 나쁨을 결정하는 핵심 요소로서 항만하역장비의 안전한 운영과 단위 시간당 높은 컨테이너 처리의 확보가 중요한 사항이 되었고, 이를 달성하기 위해 항만하역장비의 효율적인 운영은 필수 항목이 되었다.

컨테이너 터미널에서 보유하고 있는 장비의 효율적인 관리 및 유지 보수를 위해 핵심 지표인 가동율(Utilization)을 높이며 고장(Breakdown)을 줄이기 위해 장비가 관리되어야 하며 고장 발생 시 고장정비 시간을 줄이며 고객(선사, 화주)서비스의 질을 높여야 한다. 최근 도입되는 항만하역장비들은 최첨단 기술들이 적용되어 20피트 컨테이너를 동시에 작업하는 Twin리프트 방식의 스프레더가 이미 도입 된지는 오랜 시간이 지났고, 부산 신항 및 중국항만은 40피트 컨테이너 2개를 동시에 작업하는 Tandem 방식의 스프레더도 운용하고 있는 실정이다.

이러한 고 중량 작업들은 강철 모재의 용접 접합을 통해 건조된 크레인의 주요 부재에 부하를 초래하게 된다. 이 부재들의 파괴로 인해 크레인이 단 기간 내에 심각한 손상으로 이어지는 않지만, 크레인의 각종 부재에 연속적인 저,고 중량의 작업이 지속되게 되면 각종 접합부위에 부하가 누적되어 용접부위에 균열 및 심한 경우 부재의 좌굴(Buckling)이 발생할 수 있는 피로파괴(Fatigue Failure)로 이어질 수 있다.

실제로 HKT에서 하역작업 중 선사에서 제공한 화물중량이 STS크레인의 정격하중(Safe Working Load)내에 화물이라고 서류상으로 표시되어 있지만 실제 작업 시 크레인의 안전장치 중 하나인 하중감지장치(Loadcell)에서 감지된 컨테이너의 중량이 크레인의 정격하중을 초과하여 하중감지장치의 개입을 차단하고 강제동작을 시킨 사례가 빈번히 발생하고 있다.

이러한 고 중량 작업들은 크레인의 설계 시 계산된 내용 년수의 축소를 초래하며 정밀진단을 실시하지 않고 보수, 유지를 시행하지 않으면 심각한 파손 및 붕괴를 초래할 수 있다. 이에 본 논문에서는 2014년 및 2017년에 HKT에서 실제로 시행한 FCM(Fracture Critical Member:붕괴유발부재)검사 후 보수, 보강을 통한 내용년수 연장에 관한 방안을 제시하고자 한다.

제2절 연구의 내용

본 연구는 문헌 연구 및 실제 시행 데이터를 바탕으로 STS 크레인의 붕괴유발부재에 시행된 비파괴검사를 통하여 용접 부에 발생된 균열 개소를 집계하여 BS5400 Part10에 의거 보수 시행 후 크레인에 주어진 내용년수가 얼마나 연장이 될 수 있는지 파악하고자 하며, 또한 아직 비교적 노후도가 심하지 않은 부산 신항의 STS크레인들의 참고자료가 될 수 있도록 활용 방안을 모색해내고자 한다.

본 연구의 내용은 다음과 같이 구성되어 있다.

제1장에서는 연구의 배경을 설정하고 연구방법과 구성을 기술하였다.

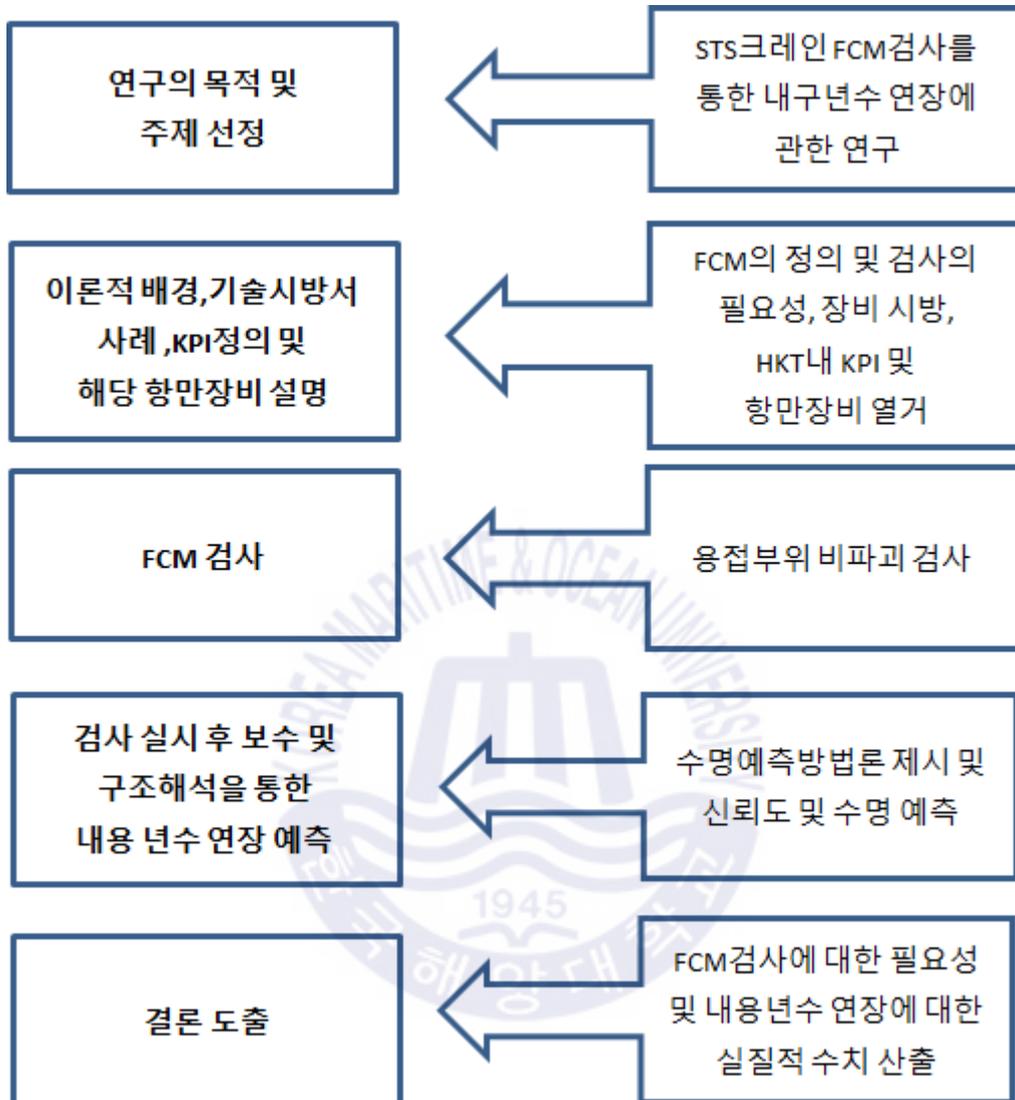
제2장에서는 본 연구의 이론적 배경 및 항만장비 개요 및 주요 KPI에 대하여 기술하였다.

제3장에서는 FCM 검사에 대한 실제 실시한 과정과 결과를 기술하였다.

제4장에서는 FCM 검사 후 크레인 구조물의 설계수명 및 수명예측을 기술하였다.

제5장에서는 결론으로 연구결과를 요약하고, 본 연구의 시사점과 한계점 및 향후 연구과제의 방향을 제시하였다

본 연구의 구성내용을 도식화하면 다음 [그림 1.1]과 같다.



[그림 1.1] 연구의 구성 및 흐름

제2장 이론적 배경

제1절 장비 정비 지침서에 명시된 권장 구조물 정밀 진단 주기

1. 크레인 제조사에 제시하는 정밀 진단 주기

2004년 북항 H'사에 도입된 50.8톤 22열 STS 크레인 4대의 제조사인 현대중공업 기계/구조 정비지침서에 기재된 내용에 따르면 구조 정비 지침은 합리적인 해석을 기초로 검사절차 및 정기 검사주기 등으로 이루어져 있으며, 용접 구조물은 도장에 가려져 있기 때문에 항상 발견되지 못하는 결함들 즉 균열을 가질 수 있다. 결함은 매우 작은 것이라도 반복적인 응력에 의해 발전한다, 그러나 피로 결함이 적은 부위의 무작위 검사는 시간과 돈의 투자가 필요하지는 않다.

주기적인 검사를 통한 크레인 구조물의 중대한 피로 파괴를 예방하기 위하여 결함 부위를 찾아내는 것이 중요하다. 구조물 검사는 육안검사와 더불어 MT(자분탐상검사), UT(초음파탐상검사)등 비파괴 검사를 병행하여 실시하여야 한다.

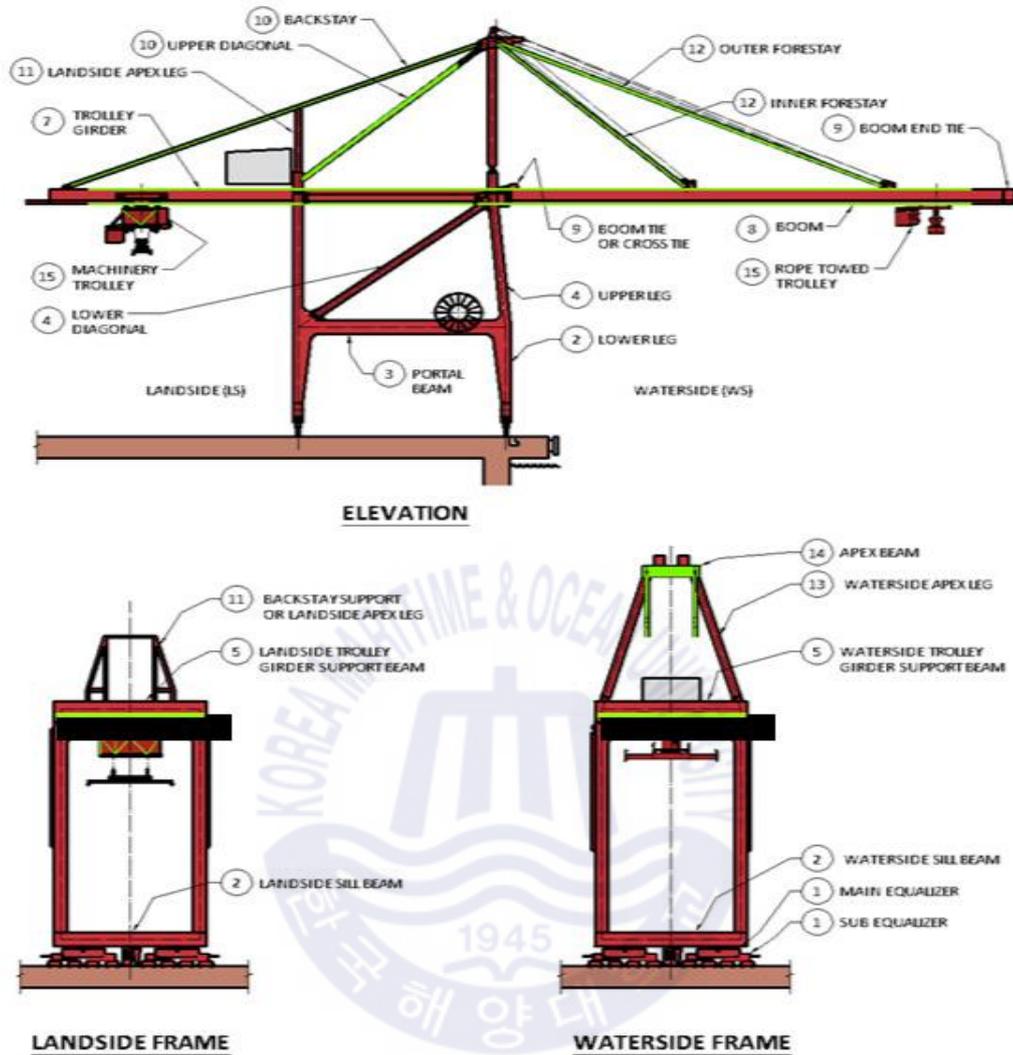
검사주기는 상업 운행 개시 후 18개월 이후에 최초 실시하고, 그 이후 6개월 단위로 실시하여야 하며, 이후 36개월까지는 9개월마다 <표 2-1>과 같이 육안 검사를 실시하도록 제조사에서는 권장하고 있다.

[표 2.1] 제조사 권장 검사 주기

항 목	검 사 주 기		
	운전개시~18개월	18개월~36개월	36개월~
철 구조물	6개월(육안)	9개월(육안)	3년(종합)
볼트 및 너트			
체결 상태			
피로 파괴 상태			
크랙(균열)			
도장상태			

[표 2.1]은 제조사에서 권장하는 크레인의 검사 주기를 표시하고 있다.

터미널 운영사별로 정비부서는 항만법 내 항만시설장비 관리규칙 제3조(시설장비의 자체점검)에 의거 주간, 분기, 특별점검을 실시하여야 하며, 기록을 남겨야 한다고 지침이 내려져 있다. 넓은 관점에서 생각하면, [표 2.1]의 내용들은 각 터미널 운영사별로 월례, 일일예방정비란 방식으로 시행되고 있지만 상업 운전 개시 36개월 이후부터 실시하여야 하는 종합 검사에 대해서는 항만법 내에서 강제적인 사항이 아니기 때문에 고 비용의 검사방식이 수반되는 수시검사에 해당하는 구조물 정밀진단을 터미널 운영사에서 권장 검사 주기에 실시하는 것은 비용면에서 많은 부담이 따를 수밖에 없는 것이 현실이다. 실제로 수행한 과업에서 2017년 시행한 FCM검사에서 크레인 1대당 검사비가 23,000,000원이 사용되었다. 물론 단기적으로 봤을 때는 크레인의 구조물은 각 부재에 인장, 압축이 지속되지만, 단기간 내에 파괴의 조짐이 보여 지는 것은 아니다. 그러나 주어진 내구년수 30년 안에 크레인을 신뢰하고 아무런 정밀 진단없이 사용 중에 이런 파괴의 조짐을 간과하고 운용하여 용접부위에 심각한 균열을 발견하지 못한다면 실제 크레인의 붕괴로 이어질 수 있다. 실제로 예방정비를 실시하는 부서에서 크레인의 핸드레일이 있는 구간에 한해 사람이 직접 접근해서 육안 점검을 시행할 수 있지만, FCM검사에서 검사를 시행하는 부분은 대부분이 고소 작업차에 검사자가 탑승해서 비파괴검사를 실시하여야 하는 부분이 대부분이다. 이처럼 분명 각 터미널 운영사의 엔지니어링 부서에서는 이러한 사실을 인지하고 있지만 단지 겉으로 보여 지지 않아서, 검사가 고비용이라서, 검사에 관한 기술과 관련 지식이 없어서 검사를 실시하지 않는 것은 위험하다고 할 수 있다.



[그림 2.1] FCM Diagram

출처 : PEMA-IP09-Practical-Structural-Examination-in-Ports-and-Terminals

[그림 2.1]은 STS크레인 FCM의 위치를 나타내고 있다. 가변 또는 반복 하중에 따라 철강 구조는 크게 자신의 정적 강도 아래 부하에서 사용 중 파괴로 이어질 수 있다. 가변 하중 하에서 균열의 성장으로 인해 기인하는 이러한 형태의 손상은 피로파괴라고 알려져 있다. 크레인 구조 부품의 거의 모든 파괴는 피로에 기인한다.

용접 철 구조물은 항상 특히 용접 이음에서 발견 할 수 없는 균열이 포함되어 있다. 작은 값으로 시작하여 그것을 넘어서는 응력 변동은 균열 성장, 결국 취성 파괴에 의한 갑작스런 파괴를 야기한다. "초기 파괴"라고 언급되는 손상이 크레인의 상업 운전 초기 몇 년 안에 일어날 수도 있다. 그러나 감지 될 수 있는 위험한 균열의 발생이 15 년 이상에 걸쳐 오래 동안 걸릴 수 있다.

세계항만업계에서 컨테이너 터미널 배상 청구를 담당하는 보험 회사 TT 클럽의 데이터에 따르면 전 세계적으로 터미널 운영사에서 발생하고 있는 세 가지의 배상 청구건 중 첫 번째로 전체의 약 10 %를 구성하는 것이 피로 파괴이다. 또한 배상 청구의 나머지 가장 큰 두 가지 사항은 운영 및 날씨 관련이 있다. STS 크레인에 포트 장비에서 피로 파괴는 터미널 운영에 있어 중요한 작업자의 안전, 경제적 위험, 이러한 잠재적 위험은 크레인에 대한 중요 부재의 주기적 구조 검사로써 크게 감소 될 수 있다.

터미널 운영자는 피로 파괴의 발생 시 경우에 따라 크레인 운영에 위협하고 수리 비용이 높은 사고로 이어질 것이라는 일반적인 생각을 가지고 있다. 그러한 파괴의 개수가 작고, 정보가 통상적으로 공유되지 않으면, 그 사고는 크레인의 구조 검사를 위한 터미널 업계에 광범위하게 적용되는 기준의 향상에 대한 요구를 충족시키지 못한다.

크레인의 안전한 운영에 관해 설명한 영국 규격 BS 7121-2-9내 2-9 검사 항목내에 컨테이너 크레인의 유지 보수 및 검사에 관한 지표에 대해 서술하고 있다. 상업 운전 중 검사에서 제 6.3 항목은 피로 문제에 대해 설명하고 있고, 검사를 어떻게 시행할건지에 대해 구체적인 방안을 정의하고 있다.

피로 파괴를 방지하면 균열이 크레인 구조의 심각한 변형을 발생할 수 있다. 컨테이너 터미널 자체 정비 규정에 크레인의 안전에 영향을 미치기 전 균열을 발견할 방법을 크레인의 응력이 집중되는 부재에 구조 검사를 포함시켜야 할 것이다.

크레인 부재의 균열 징후가 있는 경우 크레인에 주의해야 하며, 전문 인력이 필요한 경우 철저한 검사를 위해 비파괴검사를 8 절에 따라 수행되어야한다

검사 체계에서 크레인의 안전에 영향을 줄 수 있을 정도까지 균열을 감지하기 위한 조치를 포함해야한다. 따라서 서비스 검사는 크레인의 높은 응력 영역의 구조

검사를 포함해야 한다.

항만 보험 회사 TT 클럽에서 발행한 STS 크레인의 유지 보수 가이드와 국제 노동기구 (ILO) 협약 152항목에도 비슷한 조항이 있다. 육안 검사로 진행되는 권장되는 검사 주기를 구조물 요소에 대한 심층적인 부분에 적용 할 수는 없고, 구조물 요소의 검사 요구 사항은 파괴 역학 및 허용 위험 접근법에 기초한다.

대부분의 STS 크레인 설계의 경우, 합리적인 신뢰성을 유지하기 위한 일반적인 검사 기간은 3년에서 24년 사이이다. 정기적인 육안 검사가 유용하지만, 자분탐상 검사, 염료 침투, 또는 구성 요소의 초음파 탐상 검사를 대체 할 수는 없다.

크레인이 인증기관에 의해 검사가 실시, 부하 테스트가 진행되고, 검사보고서를 수령한 후의 피로 파괴에 대한 일반적인 오해는 그 다음 해에 피로 파괴가 발생하지 않을 것이라는 것이다.

크레인의 검사합격증과 부하테스트를 진행했다는 자료는 크레인 설계 하중을 만족할 수 있다는 합리적 확신을 시사한다. 그러나 이러한 것들은 크레인의 현재 상태와 피로 균열의 성장 또는 피로 파괴의 가능성에 대해 아무것도 나타내는 바는 없다고 이야기 할 수 있다.¹⁾

제2절 기술 시방서 사례(BS2573 Part1)

2.1 크레인 분류

크레인은 어떠한 기후 조건 하에서도 정격하중으로 최대 24시간동안 연속 사용 할 수 있도록 설계되어야 한다. 크레인의 구조물과 기계장비의 설계는 각각 아래에서 설명한 것과 같이 규정한 분류와 동일하거나 그 이상이 되어야 한다.

2.1.1 구조물 (BS2573 Part1)

- 1) 사용등급 : U8(4백만 부하 사이클)
- 2) 부하상태 : Q3(Heavy)
- 3) 균 분류 : A8(4×10^6)

1)PEMA(2016), "PEMA-IP09-Practical-Structural-Examination-in-Ports-and-Terminals", 「PEMA Information paper」, pp.7-8.

- 4) 충격계수 : 1.4
- 5) 작업계수 : 0.9
- 6) 부하 스펙트럼 계수 : 0.8

2.1.2 기계장비

[표 2.2] 기계장비 설계등급 (BS2573 Part2 “Rules for the design of cranes”)

장치 구분	사용등급	부하상태	군분류	비 고
권상	T8	L3	M8	
트롤리	T8	L3	M8	
주행	T5	L2	M5	
뮴	T4	L3	M5	

[표 2.2]는 크레인 설계 시 적용하는 크레인의 운동별 설계 등급을 보여주고 있다.

2.2 설계하중

크레인의 설계 적용 규격은 원칙적으로 법규와 표준을 기준으로 하고 고려해야 할 주요하중은 아래와 같다. 계약자는 여기에 서술하지 않았지만 크레인에 발생될 수 있는 하중들이 존재하면 설계 시에 함께 고려해야 한다.

1) 사하중(DL)

크레인의 구조물 및 부속물 하중으로 정상운전 중에 변화가 없는 하중이다.

2) 트롤리 하중(TL)

트롤리 자체하중으로 횡행 운전 중 그 위치가 변하는 하중이다.

3) 권상시스템 하중(LS)

헤드블럭, 스프레더, 권상 와이어 로프 일부를 포함한 하중이다.

4) 권상하중(LL)

스프레더에 매달린 하중으로서 컨테이너와 그 내용물의 하중 합이 50.0톤 이다.
하중은 권상 중앙선에 좌우대칭으로 작용한다.

5) 피로 권상하중(LLF)

0.8 × LL의 하중이며 권상 중앙선에 좌우대칭으로 작용한다.

6) 편심 권상하중(LLE)

컨테이너의 중심으로부터 컨테이너 길이 방향으로 1,280mm, 폭 방향으로 230mm로 각각 무게 중심이 편심된 하중이다.

7) 횡 방향 주행하중(LATG)

주행의 가 감속 시 크레인에 작용한 S 하중이며 주행 평행방향으로는 $0.05 \times (TL + DL + LS)$ 인 하중이다.

8) 횡 방향 트롤리하중(LATT)

트롤리의 가 감속 시 크레인에 작용하는 하중이며, 횡행 평행방향으로는 $0.1 \times (LS + TL + LL)$ 인 하중이다.

9) 충돌하중(COLL)

갠트리가 다른 정지된 크레인에 전원 업이 또는 정지 시 전속력으로 충돌할 경우, 또는 트롤리가 그 Stopper에 전원 연결 없이 최대속력으로 충돌할 경우의 힘으로 동적 분석에 따라 결정된다. 이 힘은 단지 과부하 합성하중에만 고려된다.

10) 권상 하중 가속 시의 충격하중(IMP)

충격하중은 기본사용 조건으로 $0.4 \times (LL + LS)$

11) 작업 풍하중(WLO)

20 m/sec 풍속에서 크레인에 작용하는 하중이며, $q=245(h/20)^{0.16} \text{ N/m}^2$ 의 속도압을 적용해야 하고 풍력계수는 BS2573 Part1 표 8을 따른다. 또한 크레인 작업 시 가장 크게 작용하는 사풍(Angled Wind)을 고려해야 한다.

12) 휴지 풍하중(WLS)

60 m/sec 풍속에서 크레인에 작용하는 하중이며, $q=2206(h/20)^{0.16} \text{ N/m}^2$ 의 속도압을 적용해야 하고 풍력계수는 BS2573 Part1 표 8을 따른다. 또한 크레인 휴지 시 크레인에 가장 크게 작용하는 사풍(Angled Wind)을 고려해야

한다.

13) 작업 지진하중(EQOL)

작업 시 수평으로 작용하는 지진하중으로 $0.2 \times (TL + DL)$ 을 적용한다.

14) 휴지 지진하중(EQSL)

휴지 시 수평으로 작용하는 지진하중으로 $0.2 \times (TL + DL)$ 을 적용한다.

15) 트롤리 스큐 하중(SKT)

트롤리 사행(Meandering Movement)에 의해서 발생하는 하중으로 $0.04 \times (TL + LS + LL)$ 을 적용한다.

16) 갠트리 스큐 하중(SKG)

갠트리 사행에 의해서 발생하는 하중으로 $0.05 \times (TL + DL + LL + LS)$ 을 적용한다.

17) 스톨(Stall) 토크 하중(STL)

모터의 스톨이나 Breakdown에 의해서 발생하는 하중이다.

18) 일반화물용 인양빔 시스템 하중(CBLS)

일반화물을 취급할 때 사용하는 권상시스템으로 인양빔, 헤드블럭, 권상 와이어 로프 일부를 포함한 하중이다.

19) 일반화물 인양빔 정격 하중(CBRL)

인양빔에 매달린 일반화물의 정격 권상하중이 70Ton이다.

2.3 설계조건

2.3.1 개요

컨테이너 크레인용 항만법, 모든 구조 철강 구성품에 수반된 도면, 관련 장비 및 이 장에서 기술된 기준의 요구조건에 준하여 설계되어야 한다. 크레인 구조물에 사용되는 원자재, 용접자재 및 부품자재는 KS, JIS, ASTM 또는 ASME 규격 재질을 사용해야 하며, 주요 구조물에 사용되는 붕괴유발부재(FCM) 및 비붕괴유발부재(NFCM)는 ASTM A709에서 명시한 ZONE 1의 충격시험요건의 최소 평균 V노치 충격에너지 값을 보증하는 고장력 용접 구조용 강(SM“B”등급이상)으로 한

다. 크레인 주요 구조물에서는 철판이나 강재 단면의 두께가 6mm이하인 것은 사용할 수 없다. 단, 수밀 파이프는 예외로 하나 4mm이상으로 한다. 사람이 들어갈 수 없는 밀폐 박스 거더로 제작되는 주요 부재에서는 수밀박스 거더에 대해서는 수밀 성 나사형 개구부를 설치한다. 만약 그렇지 않다면 응력편심을 고려하도록 한다. 강재의 허용응력 및 처짐 기준은 항만 시설장비 검사기준 별표4를 기준으로 한다. 모든 구조물 요소는 브러싱과 주기적인 코팅이 가능하도록 설계되어야 하며, 특히 내부 방식을 고려하여 제작한다.

별개의 부품들(와이어 드럼, 가이드 롤러, 핀, 시브, 기계류, 모터, 전기부품 등)은 통상의 유지보수와 청소를 위해 쉽게 접근할 수 있도록 고려되어야 하며, 필요한 곳에는 어느 곳에든지 플랜지형 검사용 개구부를 설치한다.

거더의 수평상판 면상의 우수 배수에 유의하며, 트롤리를 지지하는 거더 및 붐에 특히 주의한다. 볼트 결합부의 외부와 볼트 머리부와 너트의 주위에는 이와 접촉되어 있는 철판의 표면이나 볼트자체의 방청을 위해서 수밀재료 도장을 조립 작업 중에 시행한다. 수밀 재료는 우수한 점착성을 갖추어야 하고 구조물의 설계수명 한계까지 충분한 탄성을 유지해야 한다.

2.3.2 철 구조물

주요 프레임은 Built-Up 박스형으로 제작한다. 레그(Leg), 포탈 빔(Portal Beam) 및 실 빔(Sill Beam)은 완전 밀폐 상자 형으로 한다. 붐과 트롤리 거더는 박스형으로 제작되어야 하며, 붐이 휴지상태에서 작업 상태인 수평으로 내려왔을 때 붐이 자동적으로 거더에 장착 및 연결될 수 있는 장치를 붐과 거더 박스 하부에 설치해야 한다. 작업 시 붐에 작용하는 수평 및 수직하중은 이 장치를 통하여 거더에 전달되어야 하고 붐의 주 힌지에 작용하지 않도록 설계되어야 한다.

또한 이 장치는 트롤리 레일의 정확한 배열을 유지할 수 있어야 한다. 붐은 전면 에 2개의 포스테이(Forestay)에 지지된다. 붐 권상 시 포 스테이가 원활하게 접혀질 수 있도록 내측 및 외측 포 스테이는 각각 2개 및 4개의 유동 힌지(Moving Hinge)를 갖도록 한다. 단, 톱빔(Top Beam) 및 붐에 있는 포 스테이의 힌지들은 고정 힌지(Fixed Hinge)로 간주한다.

봄을 완전히 상승한 상태에서 마스트 구조체에 봄을 안전하게 걸 수 있도록 스텔러스터로 작동하는 걸쇠(Latch)가 구비되어야 하며, 봄이 걸쇠에 걸려 있을 때 강풍에도 움직이지 않도록 설비하고, 봄에 부착된 어떠한 돌출부도 해측 주행레일의 중심선에서 해측으로 2.5미터 이내에 들어와야 한다. 이러한 조건을 만족하는 봄의 각도를 결정한 후 봄 권상장치가 설계되어야 한다.

스테이(Stay)와 거더, 봄, 트롤리 거더 지지빔의 인장 플랜지 등과 같은 붕괴유발부재(FCM)의 피로 상세 등급은 책임기술자가 결정해야 하고 발주자의 승인을 받아야 한다. 붕괴유발부재의 피로 상세 등급이 “G”가 존재해서는 안되며 “F2” 또는 더 양호한 피로 상세 등급으로 설계되어야 한다.

붕괴유발부재 및 비 붕괴 유발부재(실질적으로 피로누적손상이 큰 부분으로 피로 상세 등급 “F”보다 취약한 부재)는 주기적인 구조검사를 위해 접근이 가능하도록 설계되어야 한다.

Built-up하는 부재의 용접부분에 있어서, 용접부의 용접목 두께, 용접의 형상과 위치, 관두께에 따른 국부 수축 구속력, 구조물의 수축력 및 용접의 예열 등에 따라 요구되는 판의 면적 감소율, 즉 요구되는 Z값을 산정하여 강제 발주 시에 반드시 재료 성적서에 요구해야하고 이를 보증하는 재료 성적서를 제출해야 한다.

강재의 사용할 용접상세와 산정한 Z값을 강제 발주 전에 제출하여 발주자의 승인을 받아야 한다. 용접 후 감독원의 입회하에 비파괴검사(UT, MT)를 해야 한다. 이 비파괴 검사에서 Lamellar Tear가 발생되면 반드시 수정해야 한다.

구조물의 용접 연결부에 있어서 Wrap Around 용접이 되는 상세는 허용되지 않는다. 단, 부득이하게 Wrap Around 용접 상세일 경우 계약자는 별도의 개선된 용접 절차를 제출하여 승인을 받아야 한다.

트롤리 거더 지지빔과 거더의 연결방법에 있어서 용접 연결은 허용되지 않으며 Long Stud 볼트로 연결해야 한다. 이 경우 볼트에 굽힘과 전단이 작용하지 않도록 트롤리 횡행방향과 갠트리 주행방향으로 Shear Bar를 구조물과 차이가 나지 않도록 설치해야 한다.

구조물의 처짐은 아래의 명시된 치수를 넘지 않도록 한다.

가) 프레임 강성

LATG를 작용시켰을 때 트롤리 거더지지빔의 연결점에서 붐의 직각 방향으로 허용처짐량은 60mm이하로 설계해야하며, 3배의 LATT의 축력을 작용시켰을 때 트롤리 거더지지빔의 연결점에서 붐의 평행방향으로 허용처짐량은 35mm이하 및 크레인 자중과 해측최대 도달 거리에서 정격하중에 의한 트롤리 횡행방향으로 처짐량이 7.5mm이하를 만족하도록 설계해야 한다.

나) 붐의 처짐량

최대 Outreach에서 권상장치 아래에 정격하중이 작용할 때 붐 끝단에서 측정된 중력 방향으로 허용 처짐량은 155mm이하가 되도록 설계해야한다. 최대 Outreach에서 정격하중을 들고 0.5m/sec²의 갠트리 주행 가속도가 작용할 때 갠트리 주행 방향으로 붐 끝단에서 측정된 수평 처짐량은 250mm를 초과하지 않도록 설계해야 한다.

다) 트롤리 횡행방향으로 공진 주기가 1.5sec이하로 크레인 강성을 설계하여 동적 공진 문제가 발생하지 않도록 설계해야 한다. 각종 핀 연결부의 허용 면압은 표2.4와 같다.

[표 2.3] 핀 연결부의 허용 면압

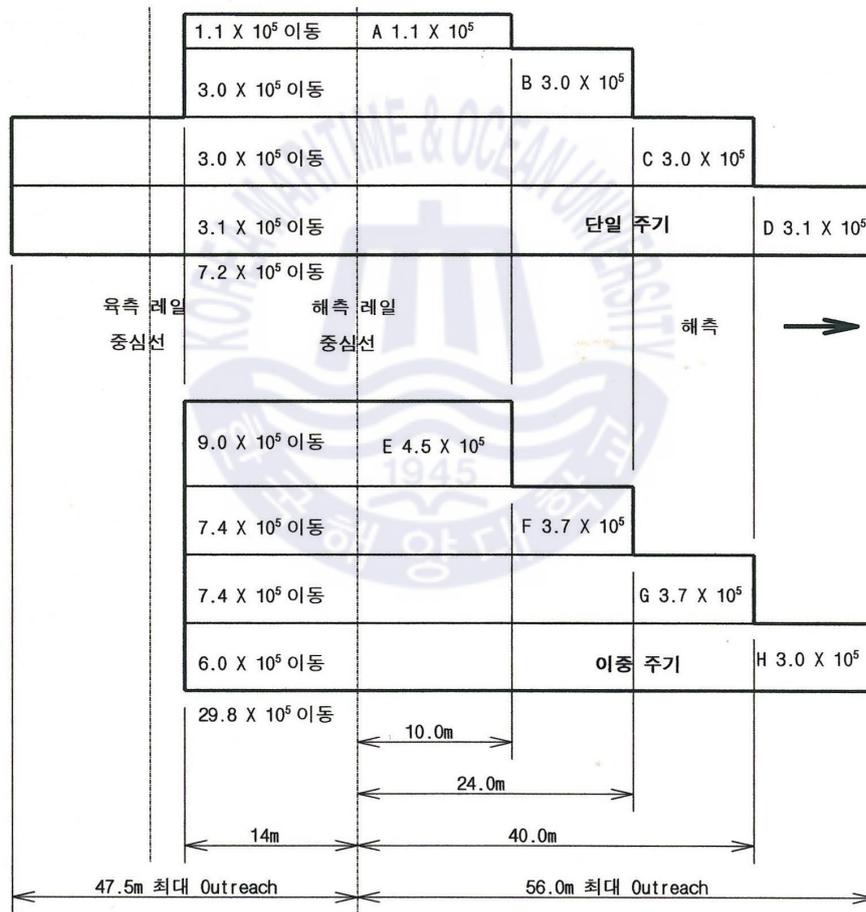
	이퀄라이저 핀 연결부의 허용면압(t/cm ²)	비이퀄라이저 핀 연결부의 허용면압((t/cm ²)
작업 시	0.84	0.4 × 항복응력
과 하중 시	1.26	1.5 × 0.4 × 항복응력
휴지 시	1.18	1.4 × 0.4 × 항복응력

크레인 구조물은 [그림 2.3]의 설계 주기 스펙트럼에 따라 총 4백만 사이클 이상의 작업량에 견딜 수 있도록 내피로 설계가 되어야 한다. 여기에서 사용되는 이동과 사이클의 정의는 다음과 같다.

- 1회 이동: 선박으로부터 컨테이너를 권상 및 트롤리로 횡행한 다음 컨테이너를

도크에 놓는 것을 말한다.(혹은 역순)

- 단일 사이클: 선박으로부터 컨테이너를 권상 및 트롤리를 횡행하여 컨테이너를 도크에 놓고, 권상장치만을 올려 선박으로 돌아와 다음 컨테이너를 권상 준비하는 것을 말한다.(혹은 역순) 단일 사이클 당1회 이동이 존재한다.
- 이중사이클: 선박으로부터 컨테이너를 권상 및 트롤리로 횡행한 다음 컨테이너를 도크에 놓고, 도크에 있는 컨테이너를 권상하여 선박으로 돌아와 선박에 컨테이너를 내려놓고 다음 컨테이너를 권상 준비를 하는 것을 말한다.(혹은 역순) 이중 사이클 당 2회 이동이 존재한다.



총 40.0 X 10⁵ 이동(단일과 이중 주기의 합)

[그림 2.3] 설계 주기 스펙트럼

허용피로누적손상은 BS5400 Part10(1980)의 통계 해석 결과 평균-선과 관련된 상수(K_0)을 이용한다. 붕괴유발부재(FCM)의 허용누적손상(K_2)은 평균-선 아래의 표준편차의 수 2를 적용, 즉 파손확률 2.28%를 갖도록 설정하고, 비 붕괴유발부재(Non-FCM)의 허용누적손상(K_1)은 평균-선 아래의 표준편차의 수 1을 적용, 즉 파손확률 16%를 갖도록 설정한다.

철관의 두께(t)가 50mm이상인 경우 비 붕괴유발부재 및 붕괴유발부재에 대한 허용누적손상 K_1 및 K_2 로부터 다음과 같이 K_{1R} 및 K_{2R} 을 수정하여 적용해야 한다.

$$K_{1R} = K_1 \times \left(\frac{t}{50}\right)^{\frac{m}{4}}$$

$$K_{2R} = K_2 \times \left(\frac{t}{50}\right)^{\left(\frac{m}{4}\right)}$$

링크 시스템으로 구성된 모든 부재들은 신뢰도 해석의 기본 법칙을 이용하여 파손확률 또는 신뢰도가 결정되어야 한다. 링크 구조 시스템 속에 포함된 붕괴유발부재들은 최대 파손확률이 2.28%, 즉 설계 신뢰도 최소 0.9772이상인 되도록 피로설계를 해야 한다.

두 개 이상의 부재로 링크구조 시스템이 구성되어 진다면, 일련의 붕괴유발부재들의 조합 신뢰도는 각 링크들의 신뢰도의 곱으로 하고 최소 0.9772이상인 되어야 한다. 뿔에는 내측 포스테이(Inner Forestay), 외측 포스테이(Outer Forestay)를 설치하고 바깥 포스테이는 5개의 힌지(Hinge)로 구성된 링크 시스템(Link System)으로 설계해야 한다.

포 스테이, 백 스테이 및 프레임의 인장부들은 링크 시스템이다. 피로 누적 손상과 허용 누적 손상이 비에 따른 각 피로 상세 등급별 신뢰도는 [표 2.4]와 같다.

[표 2.4] 피로상세 신뢰도

상 세	피로 누적 손상과 허용 누적 손상의 비				
	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6
F2	0.9772	0.9954	0.9995	1.000	1.000
F	0.9772	0.9957	0.9996	1.000	1.000
E	0.9772	0.9946	0.9992	0.999	1.000
D	0.9772	0.9960	0.9996	1.000	1.000
C	0.9772	0.9973	0.9999	1.000	1.000
B	0.9772	0.9987	1.0000	1.000	1.000
S	0.9772	0.9968	0.9998	1.000	1.000

크레인은 귀퉁이 부분이나, 움푹 들어간 곳에 물이 고이지 않도록 제작되어야 한다.

봄 현지 핀, 보기 핀, 브레이싱 핀, 스페이 핀, 텐션 바 핀 등은 크레인 전체 수명이 다할 때까지 견딜 수 있어야 한다.

빔의 좌굴(Buckling) 계산은 전단, 압축 및 강성의 합성 효과(P- δ 법)를 고려하여 정의된 좌굴 설계 기준에 따라 계산한다. 또한 양축 응력이 포함되어야 한다.

판 좌굴(Plate Buckling)의 계산에는 양축 응력과 합성 응력의 효과를 고려한 DIN, FEM, JIS Code를 따라야 한다. 보강재의 크기, 위치, 개수에 따른 판의 임계 좌굴응력과 실제 작용 좌굴 조합응력과의 비를 계산한 후 허용된 규격에서 명시하고 있는 안전율을 만족해야 한다.

트롤리가 육측 최대 도달거리에서 해측 최대 도달거리까지 횡행할 때 트롤리 횡행 레일이 거의 수평을 이룰 수 있도록 camber를 주어야 한다. 특히 봄의 경우에는 해측 최대 도달 위치에서 아래의 하중조합에 의한 중력방향 처짐량이 "0"이 되도록 포스테이 길이를 조정해야 한다. 이 때 내측 및 외측 포스테이의 각각의 길이, 단면적 및 작용 하중에 따른 탄성 에너지를 감안하여 camber량을 계산해서 링크 길이를 설계한다. camber 계산을 위한 하중 조건은 다음과 같다.

$$DL + TL + LS + 0.5 \times LL$$

단, 다음의 기준을 만족하지 못할 경우 camber를 고려해야 한다.

- 트롤리 거더지지빔 사이의 횡행 레일 처짐량이 Span의 1/800이하 일 때
- 붐 끝단의 처짐량이 해측 최대 도달거리의 1/400이하 일 때
- 포스테이 연결부 사이의 횡행 레일 처짐량이 Span의 1/800이하 일 때
- 붐 힌지와 내측 포스테이 연결부 횡행 레일의 처짐량이 Span의 1/800이하 일 때
- 거더 끝단의 처짐이 육측 최대 도달거리의 1/400이하 일 때

2.3.3 안정도

크레인의 안정도는 항만시설장비 검사 기준의 제7조 1항 안정도 조합 기준을 적용하여 각각의 경우에 따라 계산된 전도모멘트가 안정모멘트보다 작아야 하며, 입찰자는 모든 운전 조건 하에서의 크레인에 대한 상세 안정도 계산서를 제출해야 한다.

[표 2.5] 안정도 조합기준

구 분		작업시			휴지시
		경우1	경우2	경우3	경우4
안정도 하중명		경우1	경우2	경우3	경우4
사하중(Dead Load)	DL	1.0	1.0	1.0	1.0
트롤리 하중(Trolley Load)	TL	1.0	1.0	1.0	1.0
권상 장치(Lifting System)	LS	1.0	1.0	1.0	1.0
권상 하중(Lifted Load)	LL	1.35	1.35	1.35	-
충격 하중(Impact)	IMP	-	1.0	-	-
횡 방향 트롤리하중	LATT	1.0	-	-	-
횡 방향 주행하중	LATG	1.0	-	-	-
작업 풍하중	WLO	-	1.0	1.0	-
충돌하중(Collision Load)	COLL	-	-	1.15	-
휴지 풍하중(Stowed Wind Load)	WLS	-	-	-	1.5

2.3.4 차륜하중

크레인의 차륜하중은 항만시설장비 검사기준 제7조 3항 별표 3의 차륜하중 조합기준에 따라 계산되어야 하며 각각의 경우에 계산된 차륜하중이 허용 차륜하중보다 작아야 한다.

[표 2.6] 차륜하중(Wheel Load) 조합기준

구 분 하 중 명		작 업 시		휴 지 시	
		경우1	경우2	경우3	경우4
사하중	DL	1.0	1.0	1.0	1.0
트롤리 하중	TL	1.0	1.0	1.0	1.0
권상장치 하중	LS	1.0	1.0	1.0	1.0
권상하중	LL	1.0	1.0	-	-
충격하중	IMP	-	1.0	-	-
횡 방향 주행하중	LATT	1.0	-	-	-
작업 풍하중	WLO	-	1.0	-	-
휴지 풍하중	WLS	-	-	1.0	-
휴지 지진하중	EQSL	-	-	-	1.0

(표에서 하중에 대한 숫자는 해당하중의 배수를 의미함)

2.3.5 강도 계산 하중 조합

설계자는 크레인의 정상 가동, 과 하중 및 휴지 시에 예상되는 각종 하중조합에 의한 크레인 구조물의 응력을 해석한 계산서를 제출해야 하며, 가장 엄격한 하중 조합을 충족시킨다는 것을 입증해야 한다.

[표 2.7] 강도 계산 하중 조합 기준

구분		작업시			과하중시			휴지시
하중명		경우1	경우2	경우3	경우4	경우5	경우6	경우7
사하중	DL	DL	DL	DL	DL	DL	DL	DL
트롤리 하중	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL
권상장치 하중	LS	LS	LS	-	-	LS	LS	LS
인양빔								
시스템 하중	CBLS	-	-	CBLS	-	-	-	-
인양빔 정격								
하중	CBRL	-	-	CBRL	-	-	-	-
권상하중	LL	-	-	-	-	LL	LL	-
편심 권상하중	LLE	LLE	LLE	-	-	-	-	-
충격하중	IMP	-	IMP	IMP	-	-	-	-
횡 방향								
트롤리 하중	LATT	-	LATT	-	-	-	-	-
횡 방향								
주행하중	LATG	-	-	-	-	-	-	-
트롤리 스퀘								
하중	SKT	-	SKT	-	-	-	-	-
간트리 스퀘								
하중	SKG	SKG	-	-	-	-	-	-
작업 풍하중	WLO	-	WLO	WLO	WLO	WLO	-	-
스톨(Stall)								
토크 하중	STL	-	-	-	STL	-	-	-
충돌 하중	COLL	-	-	-	-	COL	-	-
휴지 풍하중	WLS	-	-	-	-	L	-	WLS
휴지 지진하중	EQSL	-	-	-	-	-	EQSL	-

2.3.6 강성(처짐량)계산 하중조합

TL + LS + LL

2.3.7 피로계산 하중조합

TL + LS + LLF + IMP

[표 2.7]은 크레인 설계 시 강도계산하중조합 기준에 대한 사항을 설명하고 있다.

제3절 HKT STS 크레인에 적용되는 KPI

1. Performance Indicator

GTO(Global Terminal Operator)인 Hutchisonports는 전 세계적으로 운영되고 있는 Hutchisonports 그룹 내의 컨테이너 터미널에서 각 Engineering 부서에서 고유의 방법으로 각자 다른 방법으로 산출해내는 STS 크레인의 고장, 가동율과 같은 KPI를 하나의 통일된 형태로 만들 필요가 있다고 판단했다.

각 크레인 별 제어시스템과 장비 구조가 틀리지만 크레인이 가지고 있는 4개의 큰 동작(Hoist, Trolley, Gantry, Boom)은 동일하기 때문에 순수하게 각 동작별로 가지고 있는 Hour meter를 개별로 설치하여 서로 다른 형태의 크레인들을 동일 선상에서 크레인의 KPI를 정의할 수 있게 되었다. 2003년 Hutchisonports에서 그렇게 해서 만들어진 것이 Performance Indicator라고 불리는 지표들이다.

2. 전 세계 Hutchisonports내 STS크레인에 적용되는 KPI 정의

- 2.1 Tem: Total time for emergency maintenance (요청정비 전체시간)
- 2.2 Tps: Total time for preventive maintenance (예방정비 전체시간)
- 2.3 Fem: Frequency of emergency breakdown (고장건수)
- 2.4 TLC: Twistlock count[Lock+hoisting-lowering+unlock] (컨테이너 처리횟수)
- 2.5 Top: Total operating time of crane (순수 작업시간)순수작동시간
(Gantry+Boom hoist+Main hoist+Trolley-overlapping motion of Main hoist & Trolley)
- 2.6 Tno: Net operating time(Main hoist+ Trolley-overlapping M.Hoist/Trolley)
대각선 작동 배제한 전체 시간
- 2.7 Toc: Total occupied time(control source ON)
(승무시간)콘트롤 전원이 들어간 시간
- 2.8 Tmc: Total machine time(24 hrs/day for 24hrs terminal operations)
(이론 가동가능시간)
- 2.9 MMBF: Mean Move Between Failure(고장 1cycle당 컨테이너 처리수량)

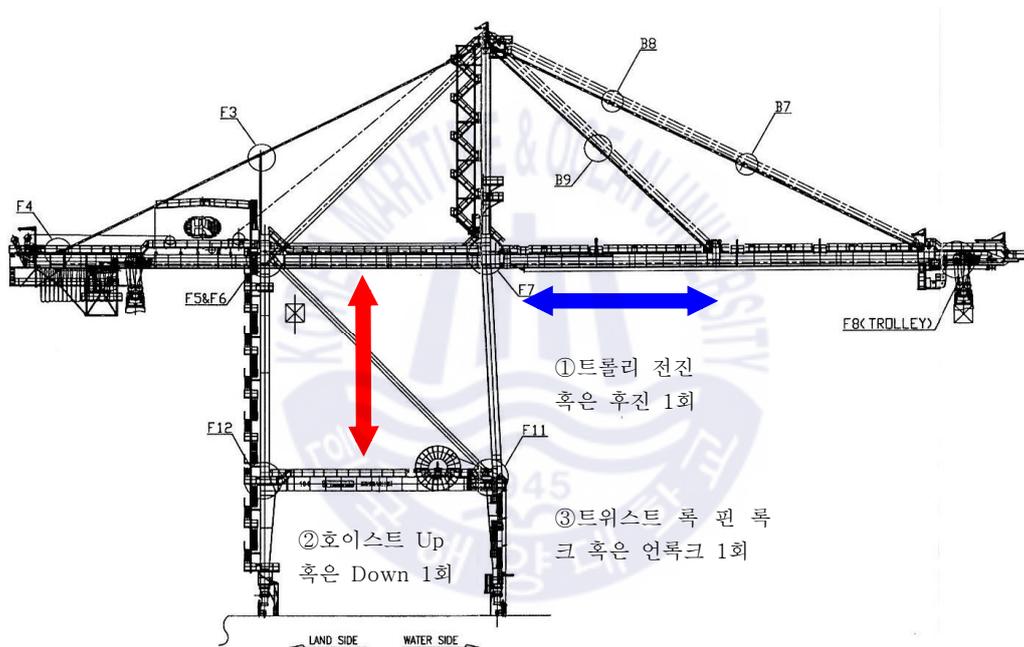
- 산출식: TLC/Fem
- 2.10 MTTR: Mean Time To Repair(고장 1cycle당 정비시간)
산출식: Tem/Fem
- 2.11 Utilization: 가동율
산출식: $(Top/(Tmc - Tps - Tem)) \times 100\%$
- 2.12 Ai: Overall Availability(총가용율)
산출식: $((Tmc - Tem - Tps)/Tmc) \times 100\%$
- 2.13 Ao: Availability per Occupied Time(가동 가용율)
산출식: $((Toc - Tem)/Toc) \times 100\%$
- 2.14 Breakdown Percentage: 가동 고장율
산출식: $1 - Ao\%$
- 2.15 PM: Planned Maintenance(예방정비율)
산출식: $(Tps/Tmc) \times 100\%$
- 2.16 EM: Emergency Maintenance(고장정비율)
산출식: $(Tem/Tmc) \times 100\%$
- 2.17 TDT: Total Down Time(총 입고율)
산출식: $1 - Ai \text{ or } (PM\% + EM\%)$
- 2.18 Net Cycle Time: 컨테이너 1van 순 처리시간
산출식: $(Tno \times 60) / TLC$
- 2.19 Theoretical Handling Capacity: 1시간당 컨테이너 이론적 처리 가능 수량
산출식: $60/Net \text{ Cycle Time}$

위에 언급된 KPI의 정의, 산출 식과 표준 양식은 모두 2003년 Hutchisonports 본사에서 하달되었으며, 시간을 적용할 때 순수하게 예방 또는 고장정비를 위해 장비의 작동이 멈춰진 시간만을 적용한다. 이 뜻은 여러 명의 작업자들이 특정 호기에 서로 다른 정비 행위(전기, 기계 또는 외주정비)를 진행하더라도 같은 동시간대에 작업이 이뤄지면 각자 다른 정비를 하더라도 그 특정 시간의 절대치만 검출한다. 위에 수많은 지표 중에서도 컨테이너 터미널이 제일 중점적으로 관리하고 대

표적인 지표는 MMBF와 MTTR이라고 할 수 있다.

3. MMBF(Mean Move Between Failure)

MMBF가 산출되는 식을 보면 TLC(컨테이너 처리 개수, 단위: VAN) / Fem(고장 정비건수)으로 정의되어 있다. 이 말을 해석하면 분모에 해당하는 크레인이 외부적 요인이 아닌 크레인 자체의 부품 결함으로 인해 작업이 중지되어 정비가 필요한 상황일 때 이것을 고장 1건으로 표시한다. 분자에 해당하는 TLC의 작동 조건은 다음과 같다.

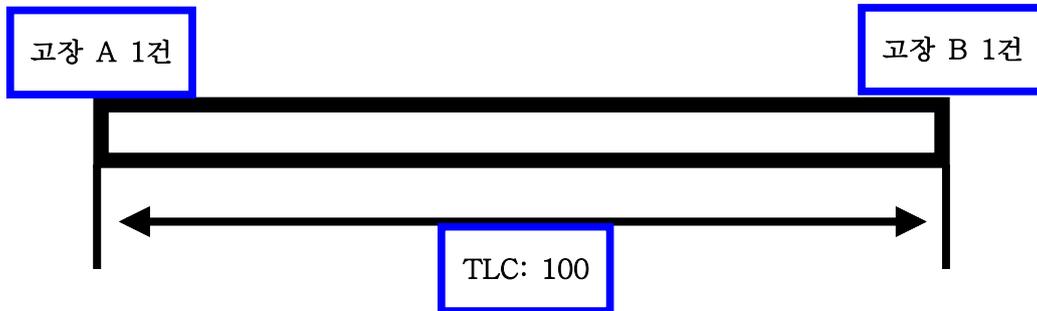


[그림 2.4] TLC 작동 조건

[그림 2.4]에 표시된 TLC 작동 조건에서 TLC의 카운터가 하나가 상승 누적되면 ①과②(순서 무관)의 동작 후 ③번의 신호가 주어져야 카운터가 하나 상승 누적된다.

MMBF는 크레인이 하역 작업 도중 가령 A라는 고장 1건과 B라는 고장1건 사이

에 얼마나 많은 컨테이너를 처리했는지를 수치로 표시한 것이다. 이것을 산술적으로 표시하면 다음의 예시와 같다.



[그림 2.5] MMBF 산출 예시

[그림 2.5]에서 2건의 고장 사이에 TLC가 100이라고 하면 MMBF의 결과치는 다음과 같다.

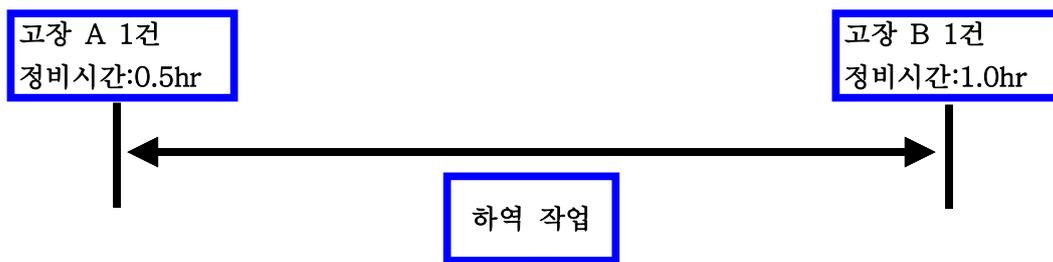
$$MMBF = \frac{TLC}{Fem} \rightarrow \frac{100}{2} = 50 \text{ VAN} / Fem$$

MMBF의 결과수치는 50이 된다. 단순히 하나의 숫자로 표시된 것이지만 이 지표는 엔지니어링 부서에 중요한 의미를 내재하고 있다. 그것은 엔지니어링 부서에서 얼마나 평소에 많은 시간과 자원을 투자해서 예방정비를 많이 시행해 크레인이 잦은 기후의 변화와 장시간의 고 중량 작업이라는 극한의 조건에서도 고장 없이 연속적인 작업이 가능하도록 준비와 노력을 쏟아 부었다는 결과가 되는 것이다. HKT에서 STS 크레인에 적용하는 MMBF 수치는 1,200이상을 목표로 한다.

4. MTTR(Mean Time To Repair)

MTTR이 산출되는 식을 보면 T_{em} (고장정비시간, 단위:hr) / F_{em} (고장정비건수)으로 정의되어 있다. 이 말을 해석하면 분모에 해당하는 크레인이 외부적 요인이 아닌 크레인 자체의 부품 결함으로 인해 작업이 정지되어 정비가 필요한 상황일

때 이것을 고장 1건으로 표시한다. 분자에 해당하는 T_{em} 은 크레인의 고장으로 인해 작업 중 크레인이 정지된 시작 시간부터 고장정비를 즉각 시행해 수리 완료 후 작업에 재투입되기까지의 시간으로 정의한다. MTTR은 크레인이 하역 작업 도중 가령 A라는 고장 1건에 걸린 정비 시간과 B라는 고장 1건에 걸린 정비 시간이 있다면 다음과 같이 산술적으로 표시할 수 있다.



[그림 2.6] MTTR 산출 예시

[그림 2.6]에서 서로 다른 2건의 고장과 그 단위 고장정비시간이 주어진다면 MTTR은 다음의 값이 도출된다.

$$MTTR = \frac{T_{em}}{F_{em}} \rightarrow \frac{(0.5 + 1.0)}{2} = 0.75 \text{ hr}/F_{em}$$

MTTR의 결과수치는 0.75가 된다. 이 수치가 의미하는 바는 작업 중 고장 발생 시 단위 고장건당 정비를 얼마나 신속하게 진행하여 크레인이 하역작업에 재투입하기까지의 시간을 검출하기 위한 수치이다. 이 수치를 줄이기 위한 노력으로는 엔지니어링 부서의 종사자들로 하여금 지속적인 크레인의 전문 지식과 숙련성, 그리고 장비의 속성을 파악하는 노력이 필요하다.

기계적인 부분은 육안으로 그리고 증상으로 고장 진단이 신속하게 진행되어 부품의 교체 및 수리로 신속하게 대응이 가능하지만 전기와 제어계통에서 일어나는 고장들은 수많은 숨어있는 전장품 중에서 고장 난 부분을 찾아야하기 때문에 각 크레인들마다 설치되어 있는 CMS(Crane Monitoring System)의 사용법과 관독 법

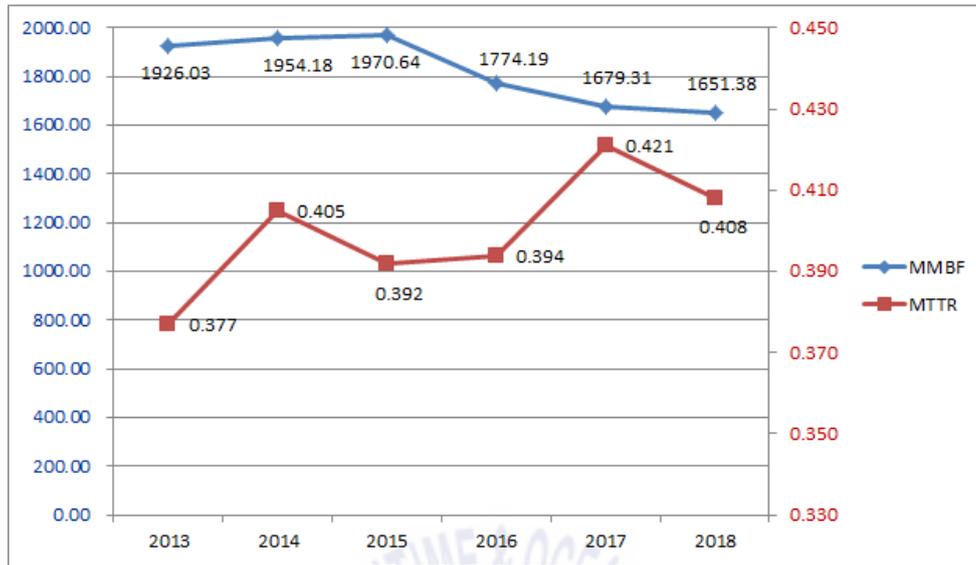
을 익혀야 하고 장비의 보호를 위한 각종 인터록(Interlock)을 이해하는 노력이 필요하다. HKT에서 STS 크레인에 적용하는 MTTR의 수치는 0.4 hr이하를 목표로 한다.



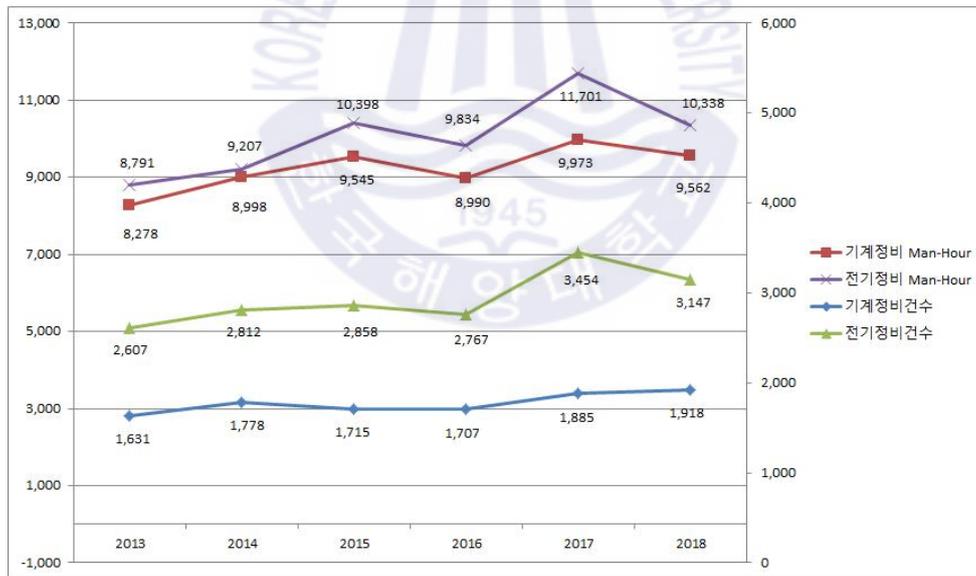
[그림 2.7] H' 사 STS 크레인 CMS(Crane Monitoring System)

[그림 2.7]은 H'사에서 사용 중인 STS 크레인의 고장 및 크레인 내 기재들의 상황을 모니터링 할 수 있는 Crane Monitoring System을 보여주고 있다.

5. H'사 Performance Indicator(2013~2018)



[그림 2.8] H'사 STS 크레인 Performance Indicator 추이(2013~2018)



[그림 2.9] H'사 기계, 전기 파트 별 정비건수 및 Man-Hour 추이(2013~2018)

자료출처: H'사 Performance Indicator, 정비 파트별 정비 현황

상기 [그림2.8] 과 [그림2.9]의 결과로 유추할 수 있는 것은 터미널의 지속적인 물량 증가 및 장기간 지속된 고 중량 작업의 누적으로 기인한 크레인 구조물의 피로도 증가로 인해 MMBF의 수치는 감소하고 있으며 그에 반해 기계파트의 정비 건수 및 Man-Hour는 꾸준히 증가하는 것을 알 수 있다. 상세한 결과치는 부록 75~80페이지에 걸쳐 기록하였다.

제4절 H'사 STS 크레인 개요

1. STS 크레인

[표 2.10] H'사 STS 크레인 상세

장비번호	수량	제작사	제작년도	정격하중	사용년수	내구년수
111,112,113	3	현대중공업	2001.09.29	50.8 ton	17.85	30
115	1	두산중공업	1989.04.29	40.6 ton	30.27	
117	1	삼성중공업	1982.09.06	40.6 ton	36.92	
116,118	2			40.6 ton	36.92	
122,123,124	3	대우중공업	1997.09.10	40.6 ton	21.90	
109,110	2	현대중공업	2004.10.08	50.8 ton	14.82	
107,108	2		2004.11.18	50.8 ton	14.71	

1.1 QC(Quay side Crane)

RMQC(Rail Mounted Quay Crane) 혹은 포테이너(Portiner), C/C(Container Crane) 또는 STS(Ship To Shore) 크레인으로도 부르기도 한다. 용도로는 부두의 안벽에 설치되어 컨테이너선으로부터 컨테이너를 부두로 하역하고 부두에 있는 컨테이너를 배에 선적하는 기능을 갖고 있는 컨테이너를 취급하는 겐트리 타입 크레인 으로 간혹 스프레더(Spreader) 대신 리프팅 빔(Lifting Beam)을 사용하여 일반화물을 취급하기도 하며 능력표시방법은 권상 하중으로 표시한다.

종류로는 대소형 구분에 따라 컨벤셔널형(Conventional Type), 4세대형으로 나누기도 하고 크레인의 형상에 따라 Modified A-Frame type, Articulated Type, Low Profile type으로 구분하고 트롤리 형식에 따라 로프 트롤리식, 세미로프 트롤리식,

그라브 트롤리 형식으로 구분한다.

크레인의 특징으로 구조부는 붐, 거더, 레그, 탑레그, 탑 빔, 다이어그널, 텐션바등으로 이루어져 있고 기계장치로는 크레인 전체를 이동시키는 주행 장치, 트롤리를 붐과 거더상으로 이동시키는 횡행 장치, 스프레더와 컨테이너를 수직으로 이동시키는 권상장치, 선박의 입출항시에 붐을 상하로 이동시키는 기복장치, 또한 기타 부속장치로 스네그 로드(Snag Load) 방지 장치, 캐트너리 로프장치(Catenary Rope Support System)등이 있다.



[그림 2.10] H'사 STS 크레인

[그림 2.10]는 부산항 북항에 위치한 H'사의 STS크레인을 보여주고 있다.

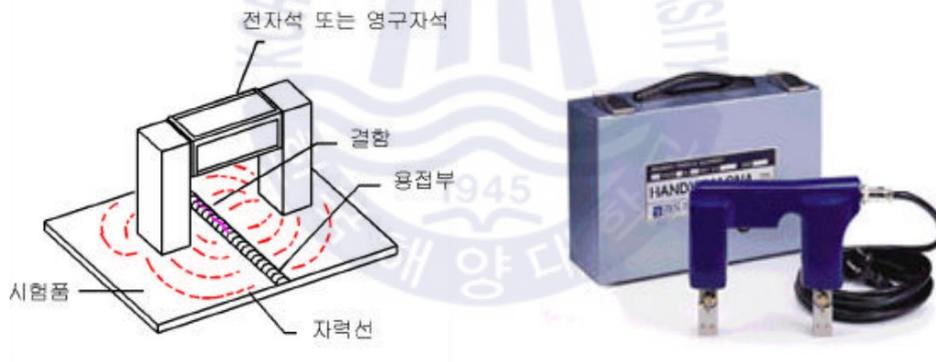
제3장 FCM 검사

제1절 비파괴 검사의 방법 및 이론

1. MT(자분탐상검사): 전자석 또는 영구자석을 이용하여 모재를 일시 자화 시킨 후 자분을 적용하여 자분의 응집상태를 관찰함으로써 시험 체 표면부의 결함을 검출하는 방법이다.

1.1 시험 원리

철강재료 등 강자성체를 자화하게 되면 시험 체에 많은 자속이 발생하는데 자속은 자기의 흐름으로 나타난다. 시험 체 표면부에 결함이 존재하면 자속은 결함 부를 피해가려는 성질에 의해 시험 체 표면공간으로 새어 나가며, 이를 누설자속이라 한다. 누설자속은 인접 자속보다 상대적으로 자력이 강하여 이 부위에 자분을 투입하면 결함형상으로 자분이 응집한다. 이를 관찰함으로써 결함을 검출하며, 강자성체의 표면 부 균열 검출에 매우 효과적이다.



[그림 3.1] 자분 탐상 모식도, 자분 탐상 장비

1.2 적용 범위

맞대기 용접부 및 겹치기이음, T 이음 필렛 용접 부 등에 적용한다.

1.3 대상 결함

용접 부 표면결함(피로균열 등) 조사

1.4 분석 및 평가 방법

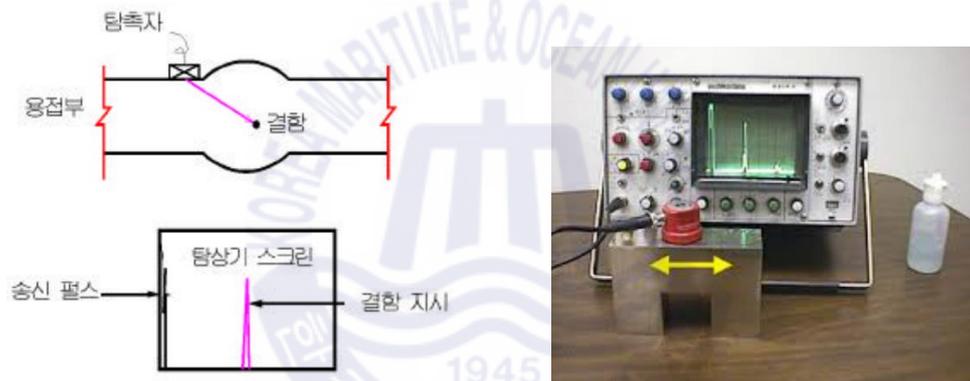
용접부의 건전도 및 결함여부는 시험 용접 부 표면에서 자분이 응집하는 모양을

관찰함으로써 결함종류 및 크기 등을 조사한다.

2. UT(초음파탐상검사): 모재에 초음파를 전달하여 내부에 존재하는 결함으로부터 반사한 초음파의 신호를 분석함으로써 시험체 내부의 결함을 검출하는 방법이다.

2.1 시험 원리

초음파는 탐촉자를 통하여 모재 내부로 전달되며, 동일 매질(모재)에서는 직진하지만 다른 매질(결함)과 접하는 계면에서는 각 매질의 물리적 상태 및 성질(음향임피던스)의 차이에 의하여 반사 또는 굴절한다. 이 중 반사하는 초음파를 탐촉자가 수신하여 탐상기 CRT상에 펄스신호 형태로 결함지시를 나타내며 이 신호를 분석하여 결함의 위치, 종류, 크기 등을 측정한다.



[그림 3.2] 초음파 탐상 모식도, 초음파 탐상 장비

2.2 적용 범위

주로 부재두께 6mm이상의 맞대기 용접부에 적용하거나 한번 조립이 되면 탈착이 어려운 빔과 빔을 연결하는 축과 핀에 적용한다.

2.3 대상 결함

용접부 내부결함(기공, 슬래그, 용입 부족, 균열 등) 조사

2.4 결함분석 및 평가방법

용접부의 건전도 및 결함여부는 용접결함 위치에서 반사되어 오는 초음파 에코펄스의 강도, 펄스형태, 반사유형, 초음파의 전파시간, 전파속도 등을 분석함으로써 결함의 종류 및 위치, 크기 등을 측정한다.

제2절 용접부위 MT(자분탐상검사) 적용 구간 상세

1. 검사대상장비 상세

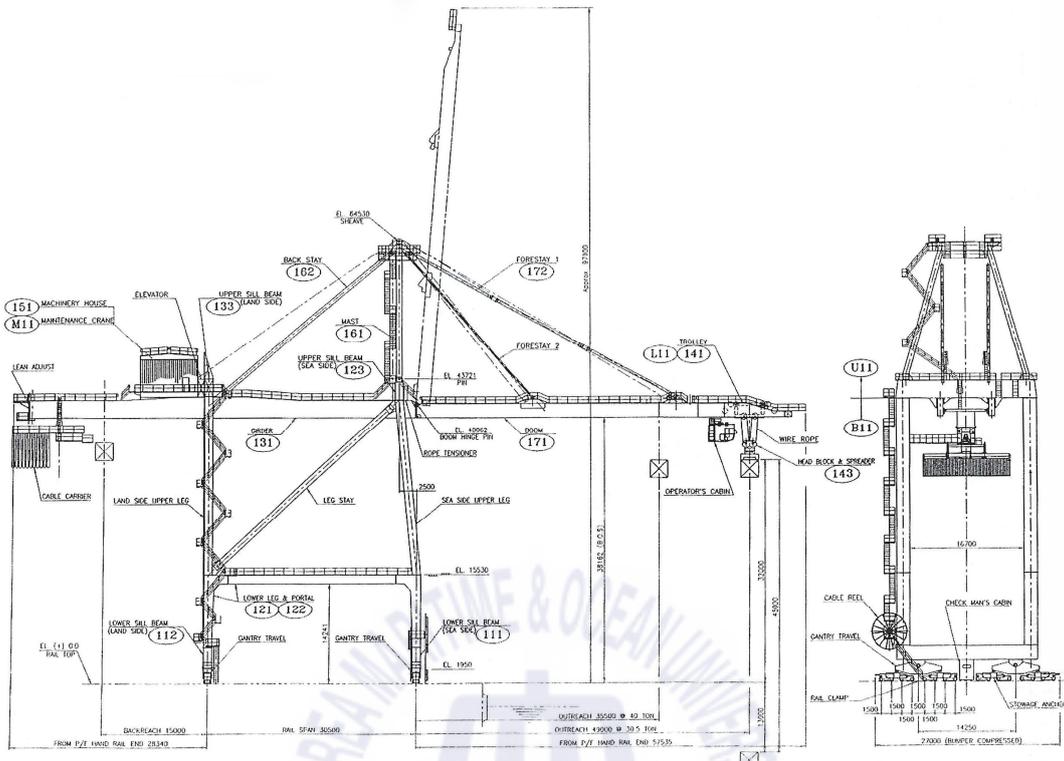


[그림 3.3] 대상장비전경(QC122~124)

구 대우중공업에서 1997년에 건조한 3기중 QC122호 1대에 대한 검사를 2014년 시행하였다.

[표 3.1] 대상 장비 및 상세사양

터미널	장비번호	제작사	제작년도 (사용년수)	비 고
북항 H'사	122	대우중공업	1997.09 (21년)	



제작사	대우중공업	붐 길이	49m (18열)
제작년도	1997	붐 형태	Box
인양하중 (~45m)	40.6톤	붐 연장	2001. 01
인양하중 (45~49m)	30.5톤		

위에 다이어그램과 표는 QC122호의 상세 사양을 표기하고 있다.

2. FCM 비파괴 검사 범위

2.1 검사범위

- FCM 상태평가 (외관검사)
- 구조물 치수측정
- 비파괴 측정

[표 3.2] 검사부위 검사방법

구 분	Description	비 고
Gantry	Alignment of Gantry Wheels	3 Dimension check
	Alignment of Trucks, Equalizer Beams and Large Beams	
	Gantry King Pins	NDE
	Gantry Tie Down device & Strom Anchor	NDE
Sill Beam	Sill Beams Internal	
	Sill Beams External	3 Dimension check
	Assembled parts between Sill Beams and Legs	Bolting check, NDE 10%
Leg	Straightness of Legs	
	Straightness of the assembled parts between Legs and Portal Beams (Tie Beam)	
	Assembled part of Diagonal Brace	Bolting check, NDE 10%
	Assembled part between Leg and TGSB (Shoulder Beam)	Bolting check, NDE 10%
Girder & Boom	Straightness and deformation of Girder and Boom	
	Deformation of Trolley Festoon Hanger Rail & Hangers	
	Assembled part of Fore Stays	Pins check, NDE 10%
	Assembled part of Back Stays	Pins check, NDE 10%
	Assembled part between Girder and Machinery House	Bolting check, NDE 10%
	Assembled part of Boom Wire Rope Sheave frame	Pins check, NDE 10%
	Welded part of Boom up stop pin	NDE 10%
A-Frame	Assembled part of A-Frame	Bolting check, NDE 10%, 3 Dimension check
Stay	Connecting part of link	NDE 10%

2.2 FCM 비파괴 검사 범위

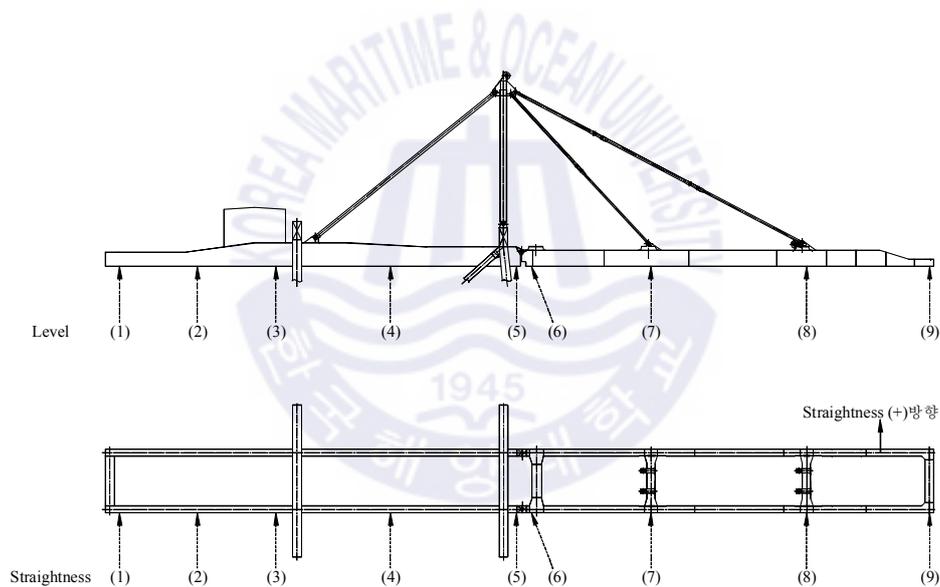
- 비파괴 검사의 범위는 FCM 부재의 용접 전체 길이의 10% 적용
- 필렛 및 부분 용입부는 MT 시행, 완전 용입부는 UT 및 MT 병행 시행

2.3 신뢰성 평가 기준

- 잔존수명 평가는 크레인 Type별 1기(총 1종) 수행함
- BS5400 Part 10에 따른 피로 누적 손상량 계산으로 피로상세 범주에 따른 허용 누적 손상량과의 비에 따른 신뢰도를 평가하여 잔존수명 예측

2. QC122호 상세과업내용

2.1 붐, 거더 광과측정(무 부하)



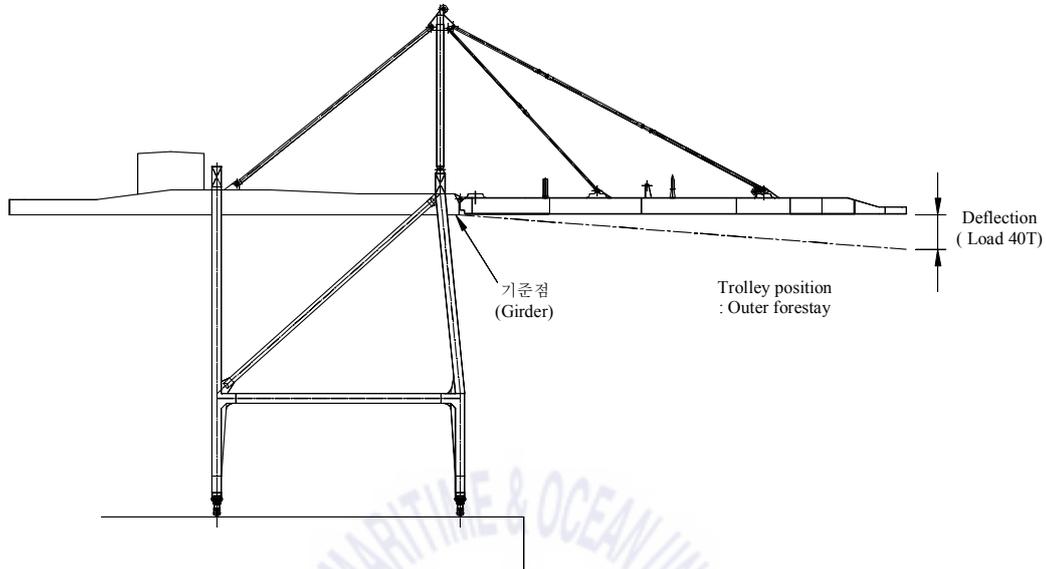
[그림 3.4] 붐, 거더 광과측정 부위

[표 3.3] 붐,거더 광과 측정 결과

구 분		Girder					Boom				비 고
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Straightness	Girder, Boom 직진도(1-5, 6-9번 기준)	0	-4	-6	-13	0	0	+19	+28	0	(직진도 기준적용)
Boom Alignment	Girder 기준 (1-5번 기준)	0	N/A			0	-2	+26	+46	+27	
Level	Boom 평탄도 (6-9번 기준)	N/A					0	-11	-21	0	(평탄도 기준적용)
	Boom tip-up 상태 (Girder 3-5번 기준)	N/A		0	N/A	0	+10	+44	+88	+156	
	Actual Level (Girder 5번 기준)	+144	+77	-15	+19	0	+11	+52	+104	+178	
* 용접구조물 직진도, 평탄도 허용기준 : DIN 8570 Part 3 "G" 등급 - 20001mm 이상 : ±25mm * Boom alignment 허용기준 (RMQC 제작 시방서 참조) - Boom alignment : ±50mm											

위 [표 3.3]은 [그림 3.2]에 표시된 부위에 광과를 측정 후 기존 설계 수치보다 얼마나 구조물의 아래쪽 방향으로 처짐이 발생하였는지를 표시하고 있고, 그중 거더, 붐의 직진도 측정 8번 부위에서 기준치를 초과하는 결과가 발견되었다. 이는 브라켓 보강이나 핀 부위에 부싱 삽입 등으로 교정이 필요할 것으로 판단된다.

2.2 Boom Deflection(40톤 부하)



[그림 3.5] 부하 장착 후 붐 처짐 측정

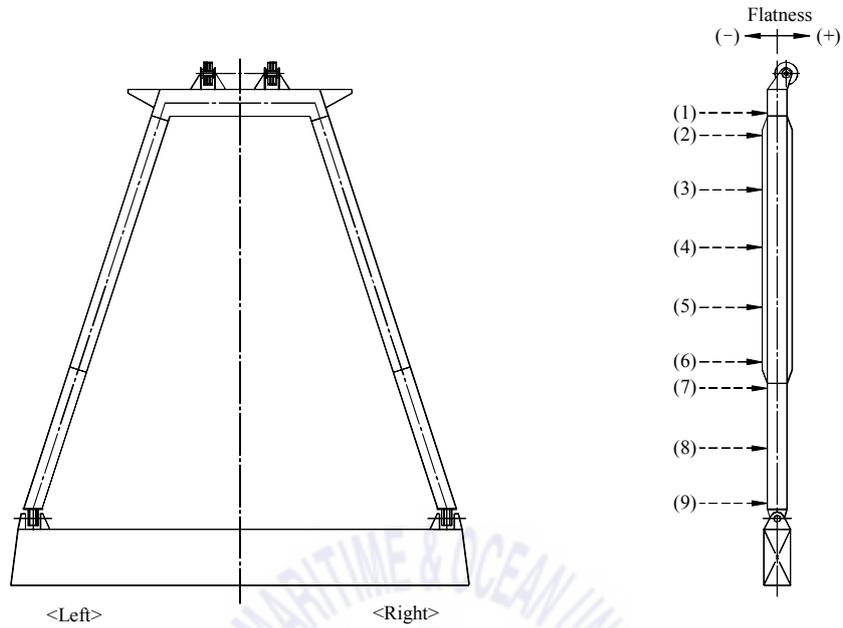
[표 3.4] 붐 처짐 광파 측정 결과

(mm)

구 분		Girder (기준점)	Boom tip	Deflection	비 고
QC 122	No Load	0	+178	154	
	40T		+24		

위 [표 3.4]는 40.6톤의 정격하중을 장착 후 스프레더를 붐 끝으로 이동시켜 붐이 얼마나 수직방향으로 처지는 지를 수치적으로 보여주고 있다.

2.3 A-Frame 편평도 측정



[그림 3.6] A-Frame 편평도 측정 부위

[표 3.5] A-Frame 편평도 광과 측정 결과

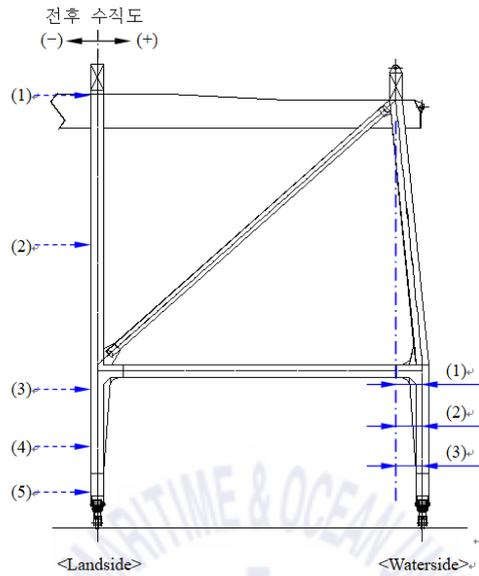
측정 No.	A-Frame 편평도 (122호)				측정 결과	비 고
	Left		Right			
1(기준)	0	(0)	0	(0)	-	
2	+6	(-152)	+7	(-151)	(양호)	(보강부)
3	+2	(-156)	-1	(-159)	(양호)	
4	-2	(-160)	-7	(-165)	(양호)	
5	+2	(-156)	-8	(-166)	(양호)	
6	-4	(-162)	-5	(-163)	(양호)	
7	-4	(-4)	-8	(-8)	(양호)	
8	-1	(-1)	-4	(-4)	(양호)	
9(기준)	0	(0)	0	(0)	-	

* 용접구조물 직진도, 평탄도 허용기준 : DIN 8570 Part 3 "G" 등급
 - 16001 ~ 20000mm : ±25mm
 * (1), (2)번의 편차 도면치수 : 158mm

위 [표 3.5]는 A-frame이 제작된 최초 수치보다 얼마나 변형이 왔는지 광과를 측정하여 편평도를 측정하였다.

2.4 Leg 수직도

2.4.1 전,후 방향 수직도



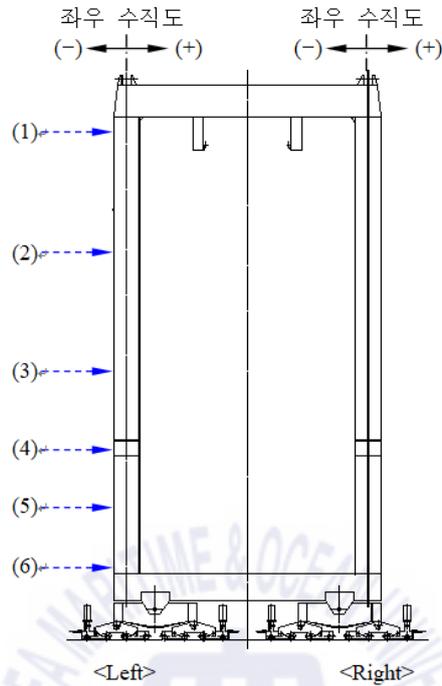
[그림 3.7] 레그 전, 후 수직도 측정 부위

[표 3.6] 레그 전,후 수직도 광과 측정 결과

(mm)

측정 No.	Leg 전후 수직도 (122호)				비 고
	Landside Leg		Waterside Leg		
	Left	Right	Left	Right	
1	(기준) 0	(기준) 0	2513 (+13)	2506 (+6)	
2	+3	+15	2516 (+16)	2511 (+11)	
3	+7	+10	2511 (+11)	2509 (+9)	
4	+3	-5	* (1), (2), (3)값의 도면치수 : 2500mm		
5	-1	-5			
6	(기준) 0	(기준) 0			
* Landside Leg 직진도, 평탄도 허용기준 : DIN 8570 Part 3 "G" 등급 - 20001mm 이상 : ±25mm					
* Waterside Leg 길이 허용기준 : DIN 8570 Part 1 "C" 등급 - 2001 ~ 4000mm : ±11mm					

2.4.2 좌,우 방향 수직도



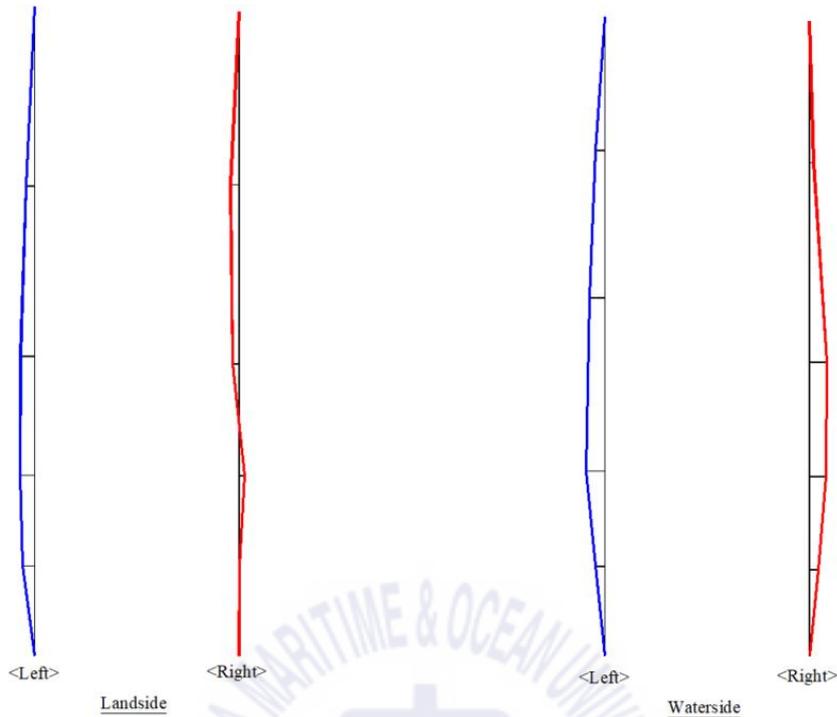
[그림 3.8] Leg 좌,우 방향 직진도 측정 부위

[표 3.7] 레그 좌,우 수직도 광파 측정 결과

(mm)

측정 No.	Leg 좌우 수직도 (122호)				비 고
	Landside Leg		Waterside		
	Left	Right	Left	Right	
1	(기준) 0	(기준) 0	(기준) 0	(기준) 0	
2	-14	-14	-16	+7	
3	-23	-11	-25	+29	(Waterside Leg 허용기준 초과)
4	-24	+9	-31	+27	
5	-19	+1	-16	+15	
6	(기준) 0	(기준) 0	(기준) 0	(기준) 0	

* Leg 직진도, 평탄도 허용기준 : DIN 8570 Part 3 "G" 등급
 - 20001mm 이상 : ±25mm



[그림 3.9] 레그 좌,우 수직도 그래프

위 [표 3.6]은 [그림 3.5]에 표시된 전체 해측, 육측 4개 레그 부위에 4개 방향으로 광파 측정을 실시하여 설계시의 수치보다 얼마나 4개 방향으로 변형이 왔는지를 측정하였다. 그 중 해측 좌 방향의 레그 1,2번 부위에 수직도에 기준을 초과하는 부분이 발생하였으며, 이 부분은 붕괴유발부재이므로 브라켓 보강 혹은 교체등의 즉각적인 조치가 필요할 것으로 판단되었다.

3. 비파괴 검사

3.1 검사방법

- 자분탐상 검사 (MT)
 - 자화방법 : Yoke
 - 자분종류 : Visible-wet
 - 장비형식 : NAWOO MY-2
 - 적용규격 : KS D 0213
- 초음파탐상 검사 (UT)
 - 탐상방법 : Contact/Straight
 - 장비형식 : SITESCAN150S
 - 탐 측 자 : 4C8X9A70, 4C10N
 - 적용규격 : KS B 0896 / GR.2

3.2 검사결과

[표 3.8] 검사 결과

No.	Description	NDE	검사결과 (122호)			비 고
			검사수량	Accept	Reject	
1	Gantry Part	UT	12	12	-	
		MT	16	12	4	
2	Sill Beam + Leg	MT	16	12	4	
3	Portal Beam	MT	16	11	5	
4	Diagonal	MT	14	5	9	
5	Leg + TGSB	MT	16	14	2	
6	W/S TGSB + Girder	MT	8	8	-	
7	Backstay Gausset	UT	4	4	-	
		MT	4	2	2	
8	Backstay	UT	4	4	-	
		MT	12	12	-	
9	Boom Hinge	UT	2	2	-	
		MT	12	10	2	
10	Boom Latch Link	MT	10	10	-	
11	Boom Hoist Sheave Frame (Inner)	MT	8	8	-	
12	Boom Hoist Sheave Frame (Outer)	MT	8	8	-	
13	Boom Extension Structure	MT	12	12	-	
14	Inner Forestay Gausset	UT	4	4	-	
		MT	4	4	-	
15	Inner Forestay	UT	6	6	-	
		MT	24	22	2	
16	Outer Forestay Gausset	UT	4	4	-	
		MT	4	1	3	
17	Outer Forestay	UT	6	6	-	
		MT	24	17	7	
18	A-Frame	MT	12	12	-	
합 계		UT	42	42	-	
		MT	220	180	40	

3.3 FCM 검사결과

[표 3.9] FCM 검사 결과

구 분	검사결과 (122호)			비 고
	검사 수량	Accept	Reject	
FCM	202	175	27	
Non-FCM	60	47	13	
소 계	262	222	40	

붕괴유발부재 202개소와 비붕괴유발부재 60개소에 대한 비파괴검사(MT, UT병행) 실시를 실시하여 균열이 발생한 부분의 결과가 산출되었다. 그 중 균열이 발생하지 않은 부위는 222개소였으며, 균열이 발생한 부분은 40 개소가 확인되었다. 균열이 발생한 부위 상세사항은 부록 81~97페이지에 기술하였다.



제4장 FCM 검사 후 크레인 구조물의 설계수명 및 수명예측

제1절 수명예측방법론

제2장과 3장은 H사 내 STS 크레인의 성능과 기능을 결정짓는 기본 설계와 설계 과업을 기술하였다. 크레인이 제작된 후 상업 운영을 시작한 시점부터 크레인의 내구수명은 임계점을 향해 나아가고 있는 상황에서 제1장에 언급한 것처럼 주어진 내구년수 안에서 끊임없는 유지관리를 진행해야만 그나마 주어진 내구년수 만큼 운영할 수 있는 것이 현실이다. 그러므로 터미널 내 크레인의 안전에 대한 신뢰도 및 수명 예측 평가는 터미널 운영자로 하여금 크레인을 유지 보수 또는 폐기에 대한 경제성 검토와 새로운 크레인의 발주 시기 등을 뒷받침하기 위한 정보가 필요하다.

본 글의 대상 STS 크레인이 도입된 시점부터 현재까지 상업 운전 년수는 21년이다. 이 크레인의 구조물을 대상으로, 전원이 투입된 가동시간을 근거로 피로 해석에 의한 설계 수명과 붕괴유발부재에 대한 비파괴 검사를 실시하여 발견된 허용기준 초과 개소를 기반 하여 BS5400 Part10에 포함된 Palmgren-miner's Rule을 이용하여 피로도를 해석하여 크레인 구조물에 신뢰도 및 잔존 수명을 예측, 허용기준 초과 개소를 보수하여 잔존 수명이 얼마나 증가될 수 있는지를 예측하였다.

피로 해석 및 크레인의 신뢰도 및 수명 예측 해석에 사용된 자료는 강, 콘크리트 및 복합 교량의 피로에 적용하는 영국 규격인 BS5400 Part10(1980)을 이용하였다.²⁾

2) 허철원(2002), “이중 링크 형식 수평 인입 집 크레인의 설계 및 수명 예측에 관한 연구”, 부경대학교 대학원 기계공학학연협동과정, p.86.

1.1 Palmgren-Miner's Rule

3) Miner의 선형누적손상가설은 응력-수명 또는 S-N방법으로 피로를 정량화하고 이해하는데 처음으로 시도한 접근이다. 이 법칙은 영국 규격인 BS5400 파단은 무수한 피로하중에 의한 작업이 모재가 한계 값까지 도달했을 때 일어나고 피로에 의한 손상은 최대응력이 피로한도보다 큰 경우에만 일어난다는 가정 아래 유도된 것이다. 작용하는 응력이 주로 재료의 탄성 범위 안에 있고 하중이력이 광범위하고 피로한도 이상의 응력이 대부분인 경우 비교적 좋은 평가 방법이 된다. 하나의 사이클에 의해 야기되는 damage는 다음과 같다.⁴⁾

$$D = 1 / N \quad (4.1)$$

n회의 부하가 적용된 경우에 손상은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$n \times D = n / N \quad (4.2)$$

여기서 n/N 을 손상비라고 이야기한다.

N은 파단이 일어나는 평균 수명과 같은 사이클의 반복 횟수이다. 모든 비의 합이 1 이상일 때 균열이 발생한다는 가정으로 다음과 같이 표시한다.

$$D_1 + D_2 + \dots + D_{i-1} + D_i \geq 1 \quad (4.3)$$

Palmgren-Miner의 법칙에서 손상비 D_i 는 임의의 응력 수준에서의 작용 사이클 수와 그 응력 수준에서 파손에 이르는 총 사이클 수의 비에 선형적으로 비례한다고 가정한다.

$$D_i = n_i / N_i \quad (4.4)$$

3) 김정훈, 이학, 지광습, 박병훈, 공정식(2002), “응력-수명 방법을 이용한 피로수명 예측”, 한국강구조학회 학술발표논문집.

4) 허철원(2002), “이중 링크 형식 수평 인입 집 크레인의 설계 및 수명 예측에 관한 연구”, 부경대학교 대학원 기계공학학연협동과정, p.87,88.

식(4.4)를 이용하여 식(4.3)을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sum_{j=1}^i \frac{n_j}{N_j} \geq 1 \quad (4.5)$$

식(4.5)는 Palmgren-Miner 법칙 또는 선형 손상 법을 전형적으로 나타낸 식이다.⁵⁾

1.2 Miner의 가법

Palmgren-Miner가 고안한 선형 손상법을 근거로 한 누적 손상 가법으로서 작용된 피로 누적 손상 L은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$L = \sum (F_{r_i}^m \times n_i) \quad (4.6)$$

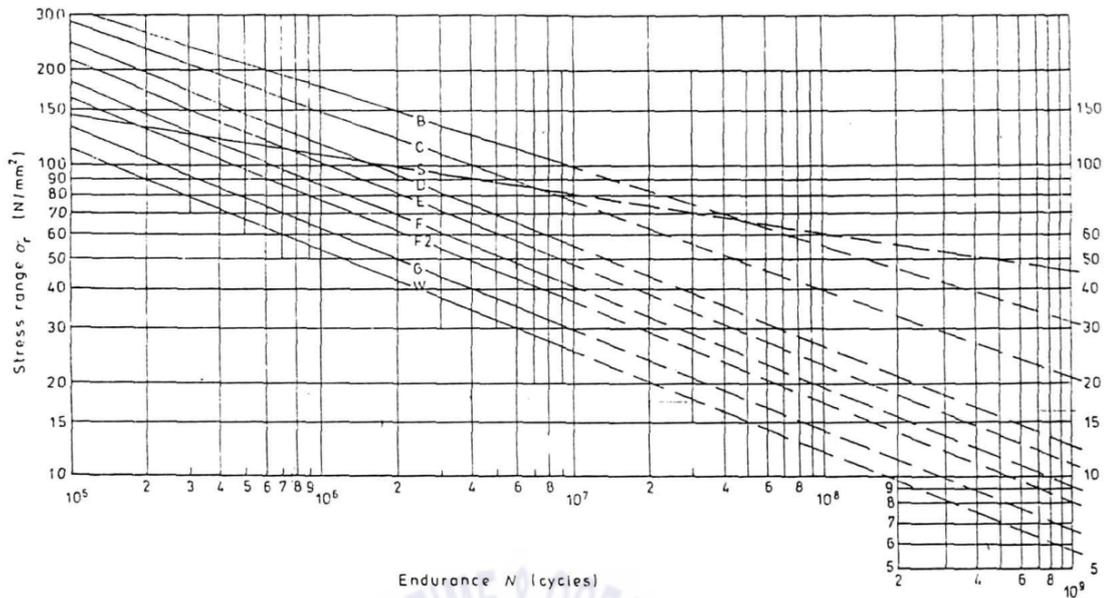
여기서 L은 정적으로 작용되는 전체 누적 손상, F_{r_i} 는 응력 스펙트럼에서 저수장법을 사용해 계산한 i 번째 응력진폭, m 은 $\log F_r - N$ 곡선의 역수이며, n_i 는 대상 구조물의 응력진폭의 발생 횟수이다.

1.3 BS5400 Part10 규격의 통계 데이터와 신뢰도 계산

응력 대 수명의 대수-대수 도표로 나타낸 $\sigma_r - N$ 곡선의 기본 피로 데이터는 주기 하중을 받는 구조물의 설계에 기초적인 정보를 제공한다.

임의의 주어진 응력 수준의 피로 시험 결과에서 나온 피로 수명 데이터들은 산포되기 때문에 주어진 재료에 대하여 하나의 S-N곡선뿐만 아니라 매겨 변수로써 파손 확률을 내포한 $\sigma_r - N$ 곡선 군이 피로 설계에 필요할 것이다.

5) 허철원(2002), “이중 링크 형식 수평 인입 집 크레인의 설계 및 수명 예측에 관한 연구”, 부경대학교 대학원 기계공학학연협동과정, p.88.



NOTE 1. The use of these curves for calculation purposes is not recommended
 NOTE 2. For endurance greater than 10^7 cycles adjustments should be made in accordance with 11.3.

[그림 4.1] $\sigma_r - N$ 곡선 요약도

출처: BS5400 Part10 Figure15. Summary design $\sigma_r - N$ curves

[그림 4.1] 은 BS5400 Part10에 포함된 응력과 파손이 예상되는 사이클의 수를 표시하고 있다.

[그림 4.1]에서 나타낸 바와 같이 임의의 시험 평균, 표준 편차 및 표준 편차의 수를 포함한 하나의 $\sigma_r - N$ 곡선의 함수를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\log N = \log(K_1 \text{ 또는 } K_2) - m \log \sigma_r^{(6)} \quad (4.6)$$

(4.6)의 식은 다음과 같이 변환 될 수 있다.

$$N \times \sigma_r^m = K_1 \text{ 또는 } K_2 (= K_0 \times \Delta^d) \quad (4.7)$$

6) 허철원(2002), “이중 링크 형식 수평 인입 집 크레인의 설계 및 수명 예측에 관한 연구”, 부경대학교 대학원 기계공학학연협동과정, p.90.

여기서 N 사용가능 작업 횟수, σ_r^m 은 응력진폭, K_0 은 정량적 분석 결과의 평균선과 관련된 상수값, Δ 는 $\log N$ 의 표준 편차의 반 \log 의 역수, d 는 평균 선 아래의 표준 편차의 수 또는 확률 인자라 나타낸다.

[표 4.1] 파괴 확률 적용 범위

파괴 확률	d	적용 범위	K상수값
50.00%	0	기본 $\sigma_r - N$ 곡선	K_0
16.00%	1	비 붕괴유발부재(Non-FCM)	K_1
2.30%	2	붕괴유발부재(FCM)	K_2

출처: BS5400 Part10 Table 10 Probability factors

[표 4.1]은 BS5400 Part10에 기술된 붕괴유발부재와 비붕괴유발부재에 적용하는 파괴 확률 상수인 K적용값을 보여주고 있다.

[표 4.2] 부재의 허용 누적 손상 K_1 과 K_2 를 계산한 상수

Detail Class	m	K_0	Δ	K_1 (Non-FCM)	K_2 (FCM)
W	3	$0.37 \cdot 10^{12}$	0.654	$0.24 \cdot 10^{12}$	$0.16 \cdot 10^{12}$
G	3	$0.57 \cdot 10^{12}$	0.662	$0.38 \cdot 10^{12}$	$0.25 \cdot 10^{12}$
F2	3	$1.23 \cdot 10^{12}$	0.592	$0.73 \cdot 10^{12}$	$0.43 \cdot 10^{12}$
F	3	$1.73 \cdot 10^{12}$	0.605	$1.05 \cdot 10^{12}$	$0.63 \cdot 10^{12}$
E	3	$3.29 \cdot 10^{12}$	0.561	$1.85 \cdot 10^{12}$	$1.04 \cdot 10^{12}$
D	3	$3.99 \cdot 10^{12}$	0.617	$2.46 \cdot 10^{12}$	$1.52 \cdot 10^{12}$
C	3.5	$1.08 \cdot 10^{12}$	0.625	$6.75 \cdot 10^{12}$	$4.23 \cdot 10^{12}$
B	4	$2.34 \cdot 10^{12}$	0.657	$1.53 \cdot 10^{12}$	$1.01 \cdot 10^{12}$

출처: BS5400 Part10 Table 8. $\sigma_r - N$ relationships and constant amplitude non-propagating stress range values, Table 9. Mean-line $\sigma_r - N$ relationships

[표 4.2]는 BS5400 Part10에서 통계 해석 결과 평균선과 관련된 상수 K_0 를 이용하여 식(4.6)의 $\sigma_r - N$ 관계식을 이용하여 붕괴유발부재의 허용누적손상 K_2 는 평균선 아래의 표준편차의 수 2를 적용, 즉 파손확률 2.28%를 갖도록 설정하고, 비 붕괴유발부재의 허용누적손상 K_1 는 평균-선 아래의 표준편차의 수 1을 적용, 즉 파손확률 16%를 갖도록 설정한다.

링크 시스템으로 구성된 모든 부재들은 신뢰도 해석의 기본 법칙을 고려하여 링크 구조 시스템 속에 포함된 붕괴유발부재들은 최대 파손확률이 2.28%, 즉 설계 신뢰도 최소 0.9772이상 이 되도록 피로 설계를 해야 한다.

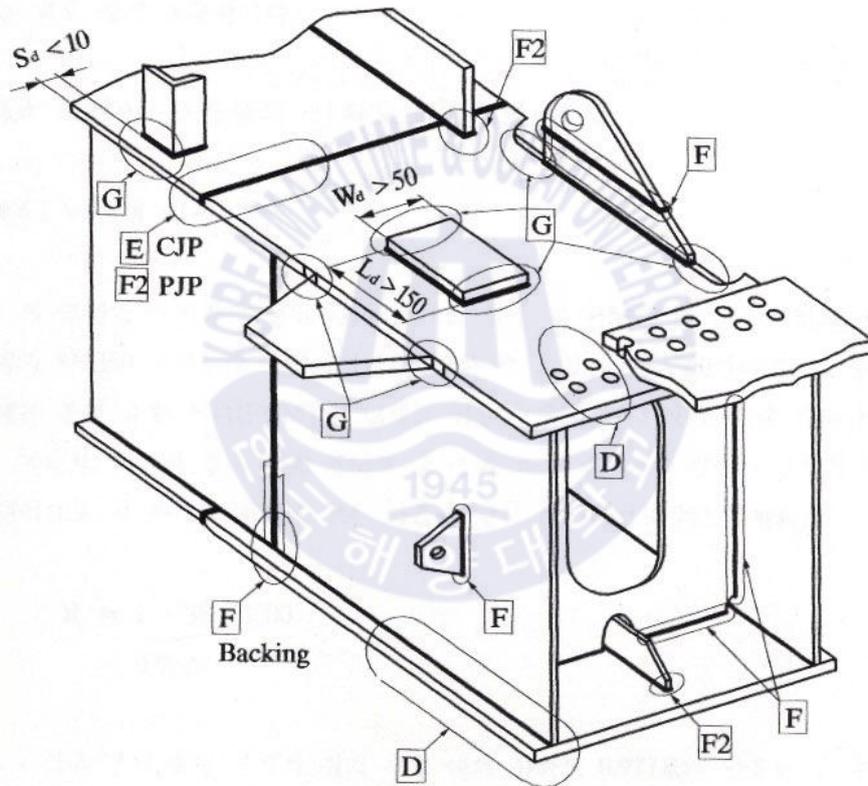
[표 4.3] 피로 상세 신뢰도

Detail	Ratio L/K_2			
	1.0	0.8	0.6	0.4
W	0.977	0.994	0.999	1.000
G	0.977	0.944	0.999	1.000
F2	0.977	0.992	0.999	1.000
F	0.977	0.993	0.999	1.000
E	0.977	0.991	0.999	1.000
D	0.977	0.993	0.999	1.000
C	0.977	0.993	0.999	1.000
B	0.977	0.994	0.999	1.000

두 개 이상의 부재로 링크 구조 시스템이 구성되어 진다면, 일련의 붕괴유발부재들의 조합 신뢰도는 각 링크들의 신뢰도의 곱으로 한다.

여기서 W, G, F2 ,F ,E ,D, C, B는 파괴 형태와 관련 있는 상세 등급으로써 내피로의 수준을 나타낸다. W 등급은 작용 응력의 방향에 수직 또는 평행하게 필렛(Fillet) 또는 부분 용입 맞대기 용접된 하중 전달 연결부로서, 프렌지에 지압 보강재의 연결과 같은 파동 하중이 지압으로 전달될 수 있는 연결부들이 이것에 포함된다. G등급은 [그림 4.2]에서 모재 끝단에서 용접 부재의 용접 선단까지의 거리,

즉 가장자리 거리 S_d 가 10mm보다 작은 경우 또는 프렌지에 작용 하중 방향에 평행 및 수직인 방향으로 각각 150mm 및 50mm 이상인 덮판이 용접되는 경우 상세 등급이다. F2등급은 프렌지에 보강재의 끝단 용접 또는 프렌지 이음 용접이 부분 용입 맞대기 용접일 때 상세 등급이고, F등급은 부재내부에 설치되어 있는 격막(Diaphragm)의 용접 또는 복부판(web)이 연결부의 등판(backing)을 사용한 용접일 때 상세 등급이고, E등급은 프렌지의 이음부에 완전 용입 맞대기 용접의 경우에, D등급은 고 장력 볼트 이음 부 상세의 경우에 대한 상세 등급이다.



[그림 4.2] BS5400 Part10내 전형적인 상세 등급

크레인 피로 설계에서 붕괴 유발 부재는 인장 또는 인장과 압축을 교차로 받는 부

재, 비 붕괴유발부재는 압축만을 받는 부재로 구분하고 있다. 실제 크레인 구조물에는 다양한 피로 상세들이 존재한다. [그림 4.2]는 크레인구조물에 존재하는 전형적인 피로 상세들으로써, BS5400 Part10에서 규정하고 있는 피로 상세 등급들이다.⁷⁾

제2절 크레인 구조물의 신뢰도 및 수명 예측

2.1 비파괴 검사 결과

검사를 진행한 대상 크레인의 비파괴 검사는 자분 탐상 검사(MT) 220 포인트, 초음파 탐상 검사(UT)로 42포인트를 수행하였다. 발견된 허용 기준 초과 범위 밖에 있는 균열의 수는 40개였고, 이중 붕괴유발부재에서 27포인트, 비 붕괴유발부재에서 13포인트가 발견되었다. 이 부분들은 제3장에 있는 [표 3.8] 검사 결과에 자세하게 기재되어 있다. 비파괴 검사 262포인트 중 붕괴유발부재에서 발견된 균열의 수가 27포인트이므로 이 부재들의 신뢰도 R은 다음과 같이 계산하면 0.896947이란 수치가 도출되었다.

$$\begin{aligned} R &= 1 - (27/262) \\ &= 0.896947 \end{aligned}$$

이 수치가 의미하는 것은 붕괴유발부재의 설계 수명 내의 신뢰도 0.977보다 낮으므로 즉, 이것은 검출된 균열의 수로 볼 때 아직 크레인이 설계 수명 내에 있다는 것을 증명한 것이다.

7) 허철원(2002), “이중 링크 형식 수평 인입 집 크레인의 설계 및 수명 예측에 관한 연구”, 부경대학교 대학원 기계공학학연협동과정, p.96,98.

2.2 H'사 QC122 구조계산서

2.2.1 적용 규격 및 설계 기준

- 적용규격

BS 2573, Part 1 : Rules for the Design of Cranes

BS 5400, Part 10 : Code of Practice for Fatigue

FEM, Book 6 : Allowable Stress

- 크레인 분류

Class of Utilization : U 8 (4.0 * 10 Cycles)

State of Loading : Q 3

Group Classification : A 8

Impact Factor : 1.4

Duty Factor : 0.9

Load Spectrum Factor : 0.8

- 기후 조건

풍속

작동 시: 최고 20 m/s

휴지 시: 최고 70 m/s

- 철판 , 압연형강

Girder & Boom : SM400B

Other main plates : SM490B

Pipe & Tubes : STK 400

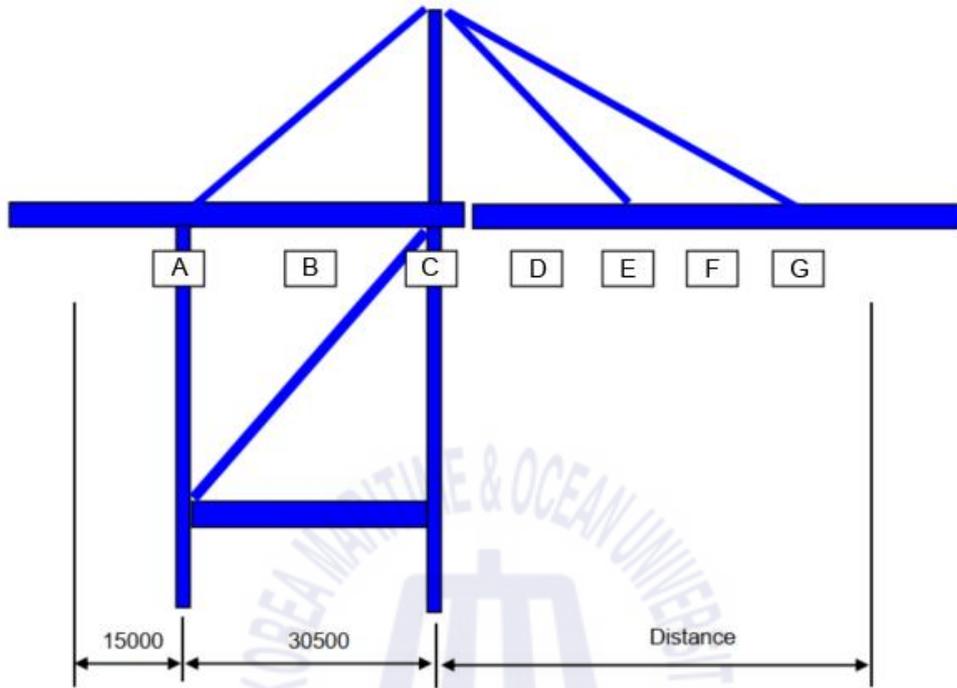
Others : SS400

2.2.2 하중 조합 조건

하중	설명	적용 요소	무게	kN
DL	Dead Load	메인 프레임 & 기계장치	818.1	8027.2
TL	Trolley Load	트롤리 프레임 & 기계류	28.7	281.6
LS	Lift System	스프레더	12.3	120.7
LL	Lifted Load	아웃리치 35.5m 지점에서의 정격하중	40.6	398.4
		아웃리치 49.0m 지점에서의 정격하중	3.05	299.3
LLE	Eccentric Lifted Load	LL @ 610mm C/L. off in Z-dir & @ 230mm C/L. off in X-dir		
LLF	Fatigue Lifted Load	0.8*LL	32.5	318.9
IMP	Vertical Impact Load	0.4 (LS+LL)	21.2	208
LATG	Gantry Lateral Load	0.054(DL+TL+LS+LL)		
LATT	Trolley Lateral Load	트롤리 운동 방향 내0.1(TL+LS+LL)		
		주행 운동 방향 내0.025(TL+LS+LL)		
COLL	Collision Load	충격하중=1.5*LATG		
SKG	Gantry Skew Load	0.05(DL+TL+LS+LL)		
SKT	Trolley Skew Load	Not applied(By twin rope system)		
OWL	Operation Wind Load	Vo=20m/s		
		qo=0.613*Vo ² = 157 N/m ²		
SWL	Stowed Wind Load	Vs=70m/s		
		qs=0.613*Vs ² =1533 N/m ²		
EQO	Operating Earthquake Load	0.1(DLD+TL+LS+LL)		
EQS	Stowed Earthquake Load	0.1 (DLU + TL + LS + LL)		

보수 후 QC122호에 적용한 각 부위의 하중 조합 조건들을 보여주고 있다.

2.2.3 하중 이동 위치 응력 계산 부위



[그림 4.3] 이동 하중 위치 응력 계산 부위

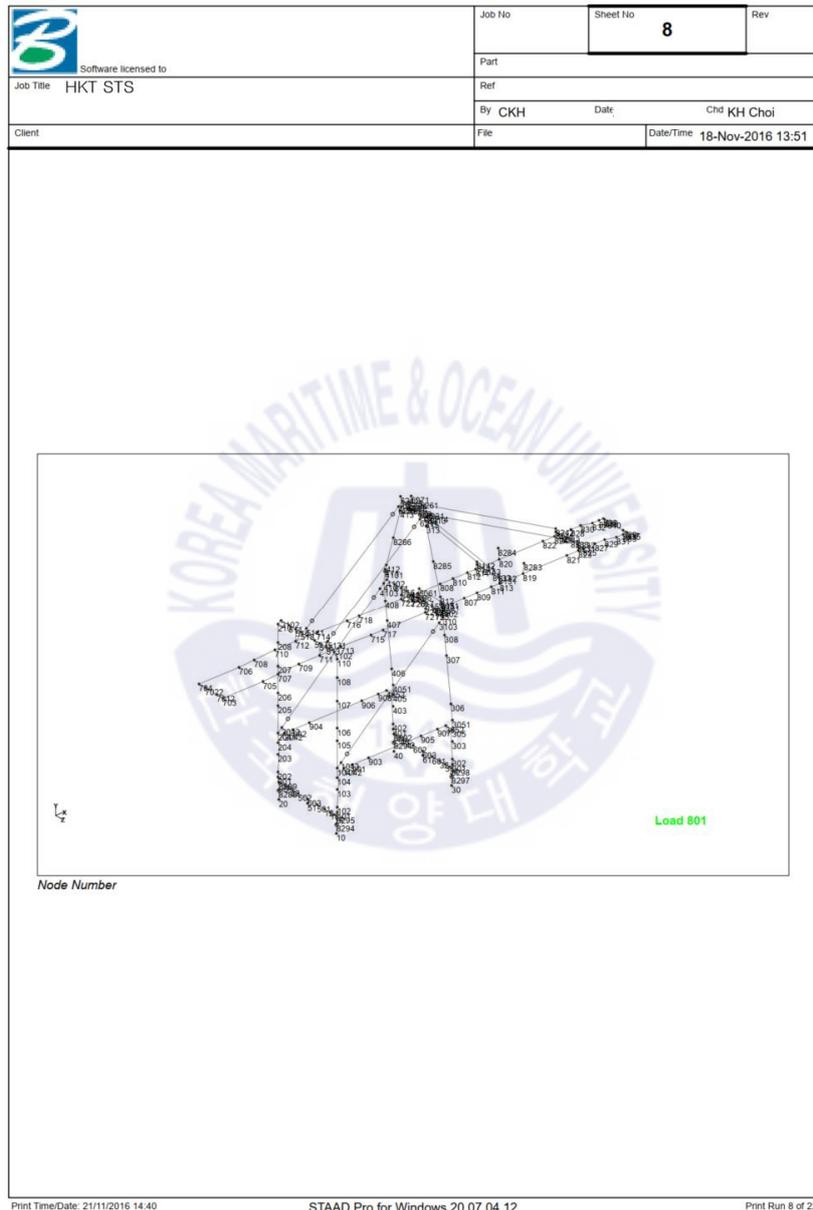
응력진폭 계산을 위해 A부터 G부위까지 모델링을 하여 정격하중 40.6톤 조건에서 각 부위에 발생하는 응력진폭을 계산해 보았다.

[표 4.4] 이동 하중 위치 계산 부 상세

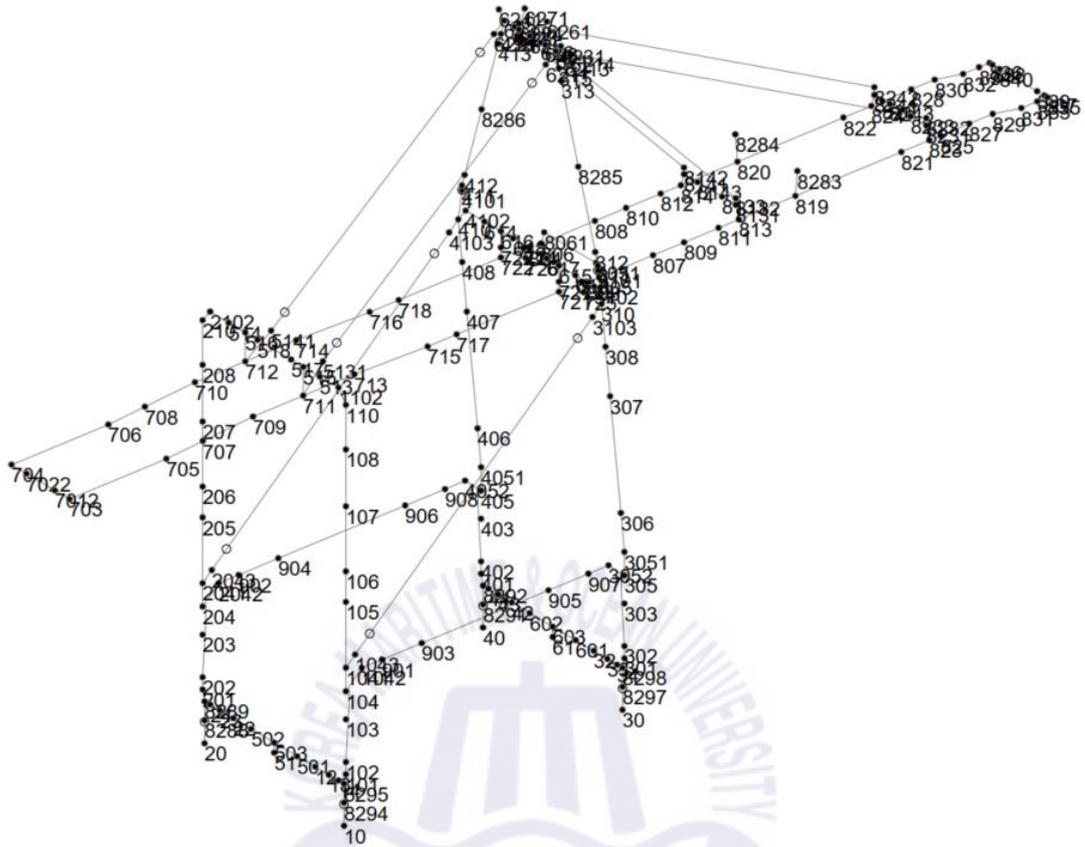
No	Position	Distance	Remark
1	A	30500	40.6 Ton
2	B	15250	40.6 Ton
3	C	0	40.6 Ton
4	D	8600	40.6 Ton
5	E	172000	40.6 Ton
6	F	27630	40.6 Ton
7	G	35500	40.6 Ton

각 부재 별 내구년수 계산을 위한 변수인 응력진폭 산출을 위해 크레인의 구조해석 프로그램인 “STAAD PRO V8i”를 사용하였다.

아래 [그림 4.4]는 (4.7)의 식 $N \times \sigma_r^m = K_2$ 에서 응력진폭 σ_r^m 을 계산하기 위해 각 부재에 적용한 고유번호를 표시하고 있다.

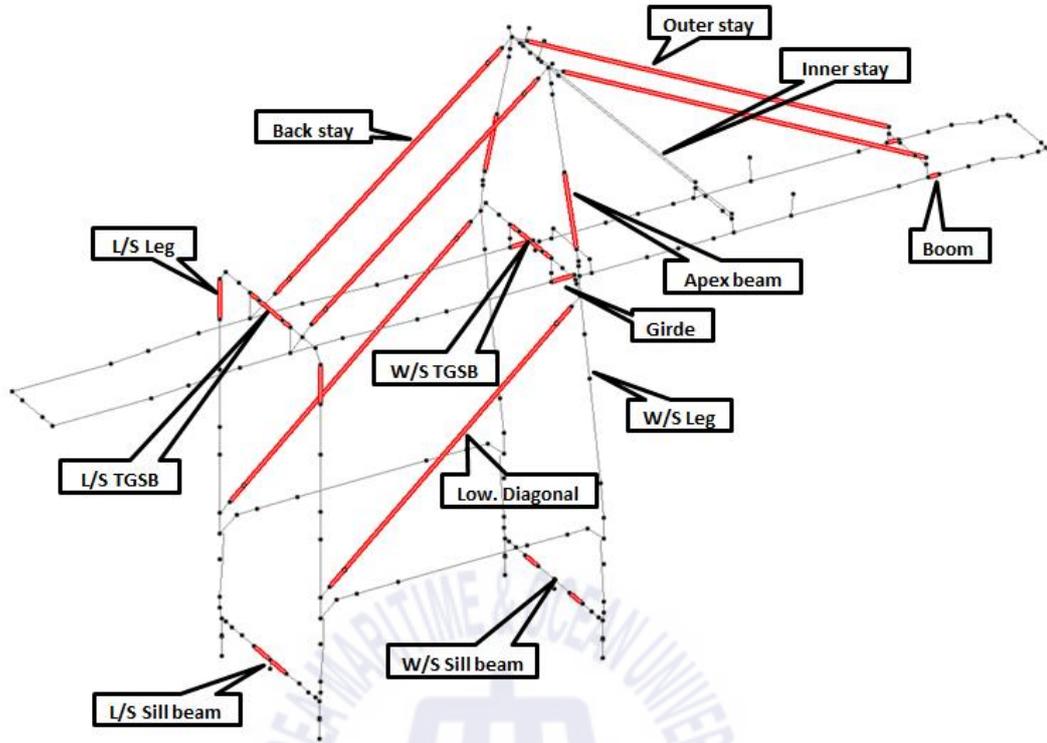


[그림 4.4] STAAD PRO V8i 화면



[그림 4.5] 각 부재 번호 부여

[그림 4.5]는 [그림 4.4]를 확대하여 보여주고 있다. 각 부재에 부여된 번호는 자의적으로 설정된 것이며, 이해를 용이하게 하고자 컨테이너 터미널에서 쓰는 각 부재별 명칭을 부여하면 다음과 같이 표시할 수 있다.



[그림 4.6] 각 부재 별 명칭

[표 4.5] FCM 별 응력 산출 결과

Beam	Corner Stress				최대응력	부재 명칭
	Corner1 N/mm2	Corner2 N/mm2	Corner3 N/mm2	Corner4 N/mm2		
101 최대값	-1.672	-0.623	6.82	6.041	6.82	LS leg
102 최대값	-2.321	-1.518	7.777	7.924	7.924	LS leg
103 최대값	-2.729	-2.906	8.23	9.11	9.11	LS leg
104 최대값	-0.723	-2.602	4.586	7.512	7.512	LS leg
105 최대값	-1.214	-3.652	5.621	9.209	9.209	LS leg
106 최대값	-0.799	-1.56	1.404	8.97	8.97	LS leg
107 최대값	-1.058	0.425	-1.304	9.281	9.281	LS leg

108 최대값	-1.127	2.977	-1.259	9.943	9.943	LS leg
201 최대값	-0.624	-1.672	6.041	6.82	6.82	LS leg
202 최대값	-1.519	-2.321	7.924	7.777	7.924	LS leg
203 최대값	-2.906	-2.729	9.111	8.231	9.111	LS leg
204 최대값	-2.601	-0.722	7.512	4.586	7.512	LS leg
205 최대값	-3.651	-1.215	9.209	5.621	9.209	LS leg
206 최대값	-1.558	-0.798	8.969	1.418	8.969	LS leg
207 최대값	0.424	-1.058	9.281	-1.305	9.281	LS leg
208 최대값	2.977	-1.127	9.943	-1.26	9.943	LS leg
301 최대값	6.236	2.562	10.312	14.164	14.164	W/S leg
302 최대값	18.367	21.216	5.217	1.365	21.216	W/S leg
304 최대값	21.054	23.518	3.446	-2.589	23.518	W/S leg
305 최대값	19.386	20.197	13.223	13.073	20.197	W/S leg
306 최대값	19.53	20.322	16.113	15.192	20.322	W/S leg
307 최대값	14.374	15.698	15.213	11.297	15.698	W/S leg
308 최대값	11.616	14.64	15.567	9.868	15.567	W/S leg
310 최대값	21.953	14.579	14.579	21.952	21.953	W/S leg
311 최대값	8.351	8.683	22.725	22.392	22.725	W/S leg
312 최대값	24.315	24.94	39.456	38.819	39.456	W/S leg
313 최대값	28.76	29.241	26.284	25.794	29.241	W/S leg
314 최대값	11.699	11.416	14.06	14.342	14.342	W/S leg
315 최대값	11.868	11.614	14.073	14.328	14.328	W/S leg
401 최대값	2.562	6.235	14.165	10.312	14.165	W/S leg
402 최대값	21.215	18.367	1.365	5.217	21.215	W/S leg
404 최대값	23.518	21.054	-2.61	3.461	23.518	W/S leg
405 최대값	20.197	19.386	13.073	13.223	20.197	W/S leg
406 최대값	20.322	19.53	15.192	16.113	20.322	W/S leg
407 최대값	15.699	14.374	11.297	15.213	15.699	W/S leg
408 최대값	14.641	11.617	9.867	15.567	15.567	W/S leg
410 최대값	14.578	21.953	21.953	14.578	21.953	W/S leg
411 최대값	8.683	8.352	22.393	22.725	22.725	W/S leg
412 최대값	24.942	24.318	38.819	39.456	39.456	W/S leg

413 최대값	29.244	28.765	25.792	26.282	29.244	W/S leg
414 최대값	11.416	11.698	14.343	14.062	14.343	W/S leg
415 최대값	11.614	11.866	14.328	14.075	14.328	W/S leg
501 최대값	1.852	0.903	1.753	0.804	1.852	LS sill beam
502 최대값	1.852	0.903	1.754	0.805	1.852	LS sill beam
503 최대값	3.308	4.953	2.884	4.803	4.953	LS sill beam
504 최대값	3.308	5.034	2.884	4.803	5.034	LS sill beam
505 최대값	5.768	8.109	5.173	7.515	8.109	LS sill beam
506 최대값	5.768	8.109	5.174	7.515	8.109	LS sill beam
507 최대값	1.852	0.903	1.753	0.804	1.852	LS sill beam
508 최대값	0.903	1.852	0.805	1.754	1.852	LS sill beam
511 최대값	4.4	4.253	4.338	4.191	4.4	LS TGSB
512 최대값	4.4	4.253	4.338	4.191	4.4	LS TGSB
513 최대값	5.932	5.535	5.883	5.486	5.932	LS TGSB
514 최대값	5.932	5.535	5.883	5.485	5.932	LS TGSB
515 최대값	6.884	7.018	7.015	7.149	7.149	LS TGSB
516 최대값	6.884	7.018	7.015	7.149	7.149	LS TGSB
517 최대값	6.885	7.018	7.015	7.149	7.149	LS TGSB
601 최대값	3.472	3.437	3.081	3.046	3.472	WS sill beam
602 최대값	3.472	3.437	3.081	3.046	3.472	WS sill beam
603 최대값	2.938	3.578	1.984	3.151	3.578	WS sill beam
604 최대값	2.786	3.578	1.833	3.151	3.578	WS sill beam
605 최대값	-2.454	-0.032	-2.606	-1.497	-0.032	WS sill beam
606 최대값	-2.454	-0.193	-2.606	-1.659	-0.193	WS sill beam
607 최대값	3.472	3.437	3.081	3.046	3.472	WS sill beam
608 최대값	3.437	3.472	3.046	3.081	3.472	WS sill beam
611 최대값	20.027	10.445	19.409	5.034	20.027	WS TGSB
612 최대값	20.027	10.446	19.409	5.034	20.027	WS TGSB
613 최대값	45.762	20.284	45.092	19.613	45.762	WS TGSB
614 최대값	45.762	20.284	45.092	19.614	45.762	WS TGSB
615 최대값	46.271	24.432	44.577	22.738	46.271	WS TGSB
616 최대값	46.271	24.432	44.576	22.737	46.271	WS TGSB

617 최대값	46.271	24.432	44.577	22.738	46.271	WS TGSB
621 최대값	7.456	6.147	1.527	2.836	7.456	Apex beam
622 최대값	7.458	6.149	1.525	2.834	7.458	Apex beam
623 최대값	7.457	6.147	0.91	2.836	7.457	Apex beam
624 최대값	7.458	6.149	0.915	2.835	7.458	Apex beam
625 최대값	7.457	6.148	0.482	2.505	7.457	Apex beam
626 최대값	6.149	7.457	2.512	0.482	7.457	Apex beam
703 최대값	8.944	3.993	3.993	8.944	8.944	Boom
704 최대값	3.993	8.944	8.944	3.993	8.944	Boom
705 최대값	0.933	-0.733	4.907	3.241	4.907	Boom
706 최대값	-0.733	0.932	3.242	4.907	4.907	Boom
707 최대값	2.823	-0.041	3.994	1.129	3.994	Boom
708 최대값	-0.042	2.823	1.129	3.995	3.995	Boom
709 최대값	4.011	-0.138	4.011	-0.138	4.011	Boom
710 최대값	-0.138	4.011	-0.138	4.011	4.011	Boom
711 최대값	3.314	0.241	5.335	5.752	5.752	Boom
712 최대값	0.241	3.314	5.752	5.334	5.752	Boom
713 최대값	2.761	3.49	6.883	7.313	7.313	Boom
714 최대값	3.493	2.763	7.314	6.883	7.314	Boom
715 최대값	7.265	9.256	9.566	11.557	11.557	Boom
716 최대값	9.26	7.268	11.56	9.568	11.56	Boom
717 최대값	8.287	12.481	12.08	17.798	17.798	Boom
718 최대값	12.485	8.281	17.802	12.083	17.802	Boom
721 최대값	12.704	11.33	20.536	12.911	20.536	Boom
722 최대값	11.329	12.724	12.911	20.545	20.545	Boom
773 최대값	9.61	4.789	9.443	4.457	9.61	Boom
774 최대값	4.788	9.61	4.457	9.443	9.61	Boom
775 최대값	4.114	13.72	4.406	13.496	13.72	Boom
951 최대값	7.166	6.03	11.217	6.03	11.217	Low. dia
952 최대값	7.165	6.03	11.218	6.03	11.218	Low. dia
955 최대값	36.08	36.08	36.08	36.08	36.08	Backstay
956 최대값	36.08	36.08	36.081	36.081	36.081	Backstay

961 최대값	44.226	44.226	44.226	44.226	44.226	Inner stay
962 최대값	44.218	44.218	44.218	44.218	44.218	Inner stay
965 최대값	47.877	47.877	47.877	47.877	47.877	Outer stay
966 최대값	47.879	47.879	47.879	47.879	47.879	Outer stay
803 최대값	11.006	9.396	9.396	11.615	11.615	Girder
804 최대값	9.397	11.01	11.616	9.397	11.616	Girder
805 최대값	46.538	44.552	30.451	28.127	46.538	Girder
806 최대값	44.563	46.546	28.156	30.474	46.546	Girder
807 최대값	50.077	48.451	30.734	28.226	50.077	Girder
808 최대값	48.469	50.092	28.257	30.76	50.092	Girder
809 최대값	50.077	48.451	30.947	29.709	50.077	Girder
810 최대값	48.469	50.092	29.71	30.948	50.092	Girder
811 최대값	34.085	29.983	33.696	32.127	34.085	Girder
812 최대값	29.991	34.092	32.133	33.697	34.092	Girder
817 최대값	33.388	28.316	45.892	40.82	45.892	Girder
818 최대값	28.322	33.394	40.827	45.898	45.898	Girder
819 최대값	60.39	57.823	49.111	56.588	60.390	Girder
820 최대값	57.822	60.389	56.59	49.111	60.389	Girder
821 최대값	43.325	39.435	46.429	55.444	55.444	Girder
822 최대값	39.434	43.325	55.445	46.43	55.445	Girder
823 최대값	94.245	81.92	96.4	84.076	96.400	Girder
824 최대값	81.922	94.246	84.078	96.402	96.402	Girder
825 최대값	77.804	67.138	79.96	69.293	79.960	Girder
826 최대값	67.139	77.805	69.295	79.961	79.961	Girder
827 최대값	42.179	35.547	44.466	37.834	44.466	Girder
828 최대값	35.548	42.181	37.835	44.468	44.468	Girder
829 최대값	30.145	25.26	31.348	26.462	31.348	Girder
830 최대값	25.261	30.147	26.464	31.349	31.349	Girder
831 최대값	-1.893	2.208	0.792	6.98	6.980	Girder
832 최대값	2.209	-1.894	6.981	0.794	6.981	Girder
881 최대값	8.894	4.122	4.122	8.894	8.894	Girder
882 최대값	4.122	8.894	8.894	4.122	8.894	Girder

883 최대값	10.672	3.004	9.17	3.22	10.672	Girder
884 최대값	3.004	10.671	3.22	9.166	10.671	Girder
885 최대값	11.798	9.253	11.021	8.477	11.798	Girder
886 최대값	11.797	9.252	11.02	8.475	11.797	Girder
887 최대값	11.798	2.672	11.021	1.895	11.798	Girder
901 최대값	12.793	11.869	8.284	9.359	12.793	Girder
902 최대값	11.87	12.793	9.358	8.285	12.793	Girder
903 최대값	11.038	11.124	-1.14	0.87	11.124	Girder
904 최대값	11.123	11.04	0.862	-1.138	11.123	Girder
905 최대값	8.891	6.304	12.156	9.569	12.156	Girder
906 최대값	6.304	8.891	9.569	12.155	12.155	Girder
907 최대값	7.797	5.277	12.102	9.264	12.102	Girder
908 최대값	5.277	7.797	9.263	12.102	12.102	Girder
909 최대값	3.015	1.505	11.501	9.223	11.501	Girder
910 최대값	1.498	3.017	9.223	11.5	11.5	Girder
전체 최대값	94.245	94.246	96.4	96.402	96.402	

[표 4.5]는 “STTAD PRO V8i”에서 산출된 각 FCM의 응력 결과 값 들이다.

구조해석 프로그램을 통해 [표 4.5]의 응력 값이 계산되었으며, 그 중 식(4.7)의 $N \times \sigma_r^m = K_2$ 에서 응력진폭 σ_r^m 에 [표 4.5]의 응력 값들 중 최대 응력 값을 적용한다. 식(4.7)은 다음과 같이 변환될 수 있다.

$$N = \frac{K_2}{\sigma_r^m} \quad (4.8)$$

BS5400 Part10에 기술되어 있는 [표 4.2]에 설명된 STS크레인에 적용하는 가장 낮은 운전 사이클인 Detail Class “G”에 해당하는 FCM에 적용하는 K_2 상수 (0.25×10^{12})를 사용하여 각 부재 별 운전 사이클 N 을 계산하면 [표4.6]과 같다.

[표 4.6] FCM 잔존 내구 사이클

FCM 명칭	응력진폭	BS5400 Part10 Detail Class	잔존 내구 사이클
L/S leg	9.943	G	254,324,202
W/S leg	39.456	G	4,070,060
L/S sill beam	8.109	G	468,854,520
L/S TGSB	7.149	G	684,233,160
W/S sill beam	3.578	G	5,457,817,380
W/S TGSB	46.271	G	2,523,558
Apex beam	7.458	G	602,660,700
Boom	20.545	G	28,828,469
Girder	96.402	G	279,050
Low. dia	11.218	G	177,089,863
Back stay	36.081	G	5,322,361
Inner stay	44.226	G	2,890,061
Outer stay	47.879	G	2,277,743

[표 4.6]에서 표현한 잔존 내구 사이클은 제2장에서 기술한 [그림 2.4] “TLC 작동 조건”과 일치한다. 즉 TLC(컨테이너 처리 개수)라고 할 수 있다.

2.2.4 잔존 내구년수 산출

QC122호가 상업운전을 시작한 1997년 9월 10일부터 2019년 9월30일까지의 사용년수를 계산하면 22.07년이란 결과가 나온다. 이 수치를 통해 현재까지 QC122호가 처리한 컨테이너 개수를 토대로 앞으로 얼마나 컨테이너 처리를 할 수 있을지 예상할 수 있다. [표 4.7]은 대상 장비인 QC122호의 도입 후부터 2019년 9월까지의 컨테이너 처리 개수를 나타내고 있다.

[표 4.7] QC122호 도입 후 컨테이너 처리 수(단위:VAN)

구분	97년	98년	99년	00년	01년	02년	03년	04년	05년	06년	07년	08년
122	40,913	87,713	70,973	94,802	101,688	91,078	92,958	106,413	105,465	109,485	103,906	108,576

구분	09년	10년	11년	12년	13년	14년	15년	16년	17년	18년	19년 ~9월	합계
122	93,510	63,973	60,111	39,334	33,958	47,835	50,380	57,167	69,401	64,771	66,740	1,761,150

자료출처: H'사 CONTAINER 취급물량분석

[표 4.7]의 수치를 바탕으로 2019년 9월30일을 기준하여 상업 운전 22.07년도의 작업 평균을 내면 76,572 VAN/yr라는 컨테이너 처리 개수를 예측 할 수 있다. 이 숫자를 기준하여 향후의 각 FCM 별 잔존 내구년수를 예측해 낼 수 있다.

[표 4.8] QC122호 잔존 내구 사이클 및 내구년수

FCM 명칭	응력 진폭	BS5400 Part10 Detail Class	잔존 내구 사이클	예상 내구 사이클	잔존 년수	상업운전+ 잔존년수 (A)	크레인 내구년 수-(A)
L/S leg	9.943	G	254,324,202	1,163,286	15.19	37.26	7.26
W/S leg	39.456	G	4,070,060	18,617	0.24	22.31	-7.69
L/S sill beam	8.109	G	468,854,520	2,144,554	28.01	50.08	20.08
L/S TGSB	7.149	G	684,233,160	3,129,702	40.87	62.94	32.94
W/S sill beam	3.578	G	5,457,817,380	24,964,211	326.02	348.09	318.09
W/S TGSB	46.271	G	2,523,558	11,543	0.15	22.22	-7.78
Apex beam	7.458	G	602,660,700	2,756,587	36.00	58.07	28.07
Boom	20.545	G	28,828,469	131,862	1.72	23.79	-6.21
Girder	96.402	G	279,050	1,276	0.02	22.09	-7.91
Low. dia	11.218	G	177,089,863	810,014	10.58	32.65	2.65
Back stay	36.081	G	5,322,361	24,345	0.32	22.39	-7.61
Inner stay	44.226	G	2,890,061	13,219	0.17	22.24	-7.76
Outer stay	47.879	G	2,277,743	10,418	0.14	22.21	-7.79

[표 4.8]에 계산된 크레인 내구년수-(A)의 값에서 너무 큰 편차가 있는 W/S sill beam의 값을 뺀 나머지 FCM 내구년수의 평균을 내면 **3.19년**이라는 잔존 내구년수가 산출된다. FCM 중에서도 거더 상부에서 직접 적으로 부하를 감당하는 부

위(해측 TGSB, 해측 Leg, 붐, 백 스테이 바, 포 스테이 바, 거더)가 피로도가 누적되어 내구년수가 이미 초과했음을 알 수 있다. 이 부위는 즉각적인 보강 작업과 수리를 통해 안전성을 높일 필요가 있다.

제3절 보수, 보강방안

3.1 용접부 균열

3.1.1 보수보강안

균열 발생개소는 실제 균열길이의 양끝단 50mm를 추가하여 전체 길이에 대한 균열부 Gouging 및 보수용접 수정



[그림 4.7] 균열 발생 부 보수 용접 구간 적용 기준

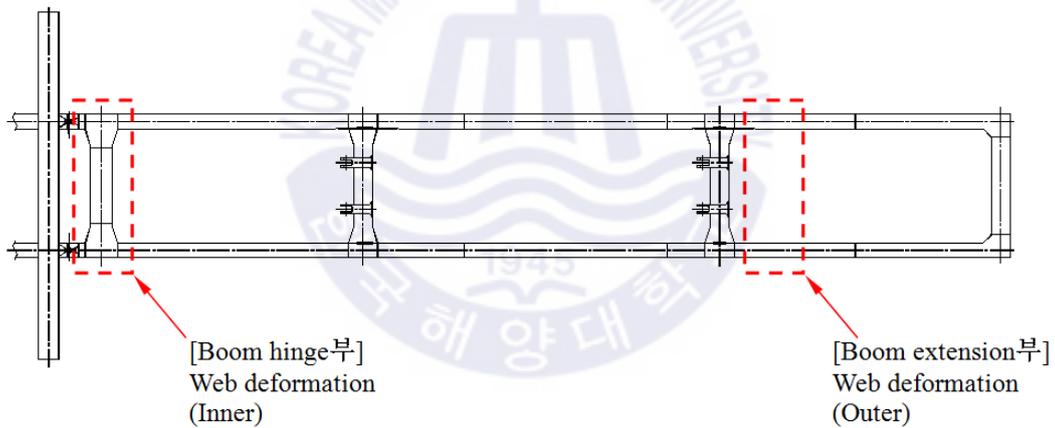
3.1.2 보수용접 절차

Gouging → Grind → 예열 (250°C) → 보수용접 → 후열 (250°C) → Grind → 비파괴 (MT, UT) → 보수도장

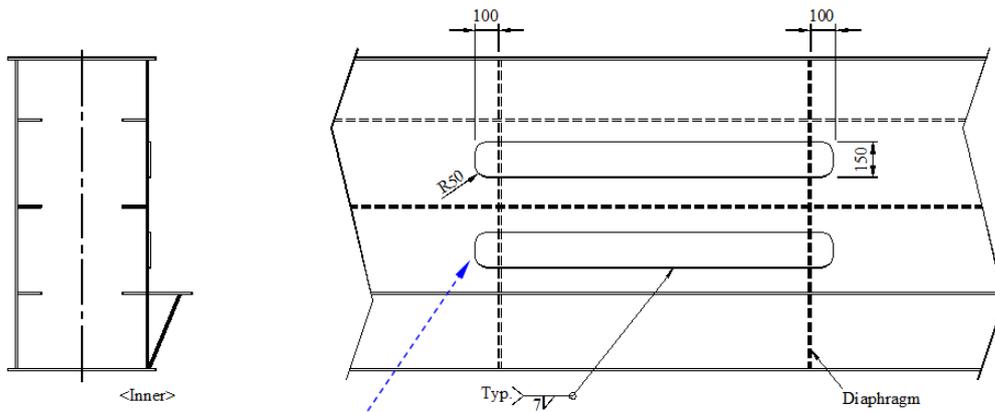
3.1.3 Forestay 관련 Crack의 경우 Boom을 3 ~ 5° Up하여 Forestay가 Tension을 받지 않는 상태에서 보수용접 실시

구 분	관련사진	비 고
<p>[Boom web]</p> <p>다수의 구간에 Web 변형 발생</p> <p>→ 일부 보강 및 Monitoring</p>		
		

- 상기 Boom web 보강 필요 부

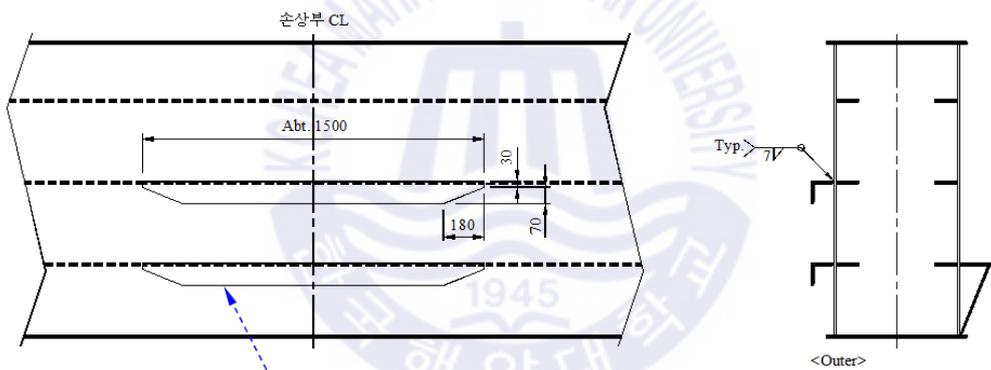


- 뚫힌지 부 보수보강안



Inner web 변형 부 교정 및 10t 보강 판 용접 설치
 (보강 판의 길이는 Diaphragm 간격보다 200mm 크게 현장맞춤 실시해야 함)

- 뚫힌지 구간 보수보강안



Outer web 변형 부 교정 및 Angle 100×100×10t 보강
 (Angle 길이는 약 1,500 정도 추정되며, 상세 치수는 현장에서 맞춤 실시)

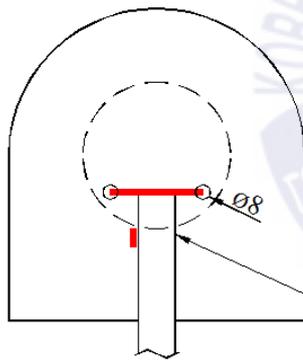
구 분	관련사진	비 고
Diagonal (Right측 /Waterside) Crack 20+10mm		

보수보강안

[QC122호 Sampling 확인 (Landside Left/Right측)]

- QC122의 Diagonal Cover Plate 제거 후 슬롯 홀 가공 상태 확인 및 노치제거
- QC122의 Diagonal Cover 내부 모재 균열 상태 확인

[CASE 1 : QC122 Diagonal 모재 균열 미발생시]



<Cover Plate 균열부>

- 가로방향으로 존재하는 큰 결함(20~50mm)에 대하여는 Cover를 제거하지 않는 상태에서 균열부 양쪽 끝단부 Ø8 Drill 가공 후 Gouging 및 보수용접 실시 (표면은 Smooth grinding)
- 기타 미세한 균열부는 일반적인 용접수정 절차에 따라 Gouging 및 보수용접 실시 (표면은 Smooth grinding)

[CASE 2 : QC122 Diagonal 모재 균열 발생시]

- 전개소 Diagonal 모재 균열 확인 필요
- Diagonal 모재 균열부 보수용접
- Cover Plate 재시공시 도면에 따른 시공 요함 (미 용접부 Sealant 또는 Seal Welding)

제5장 결론

제1절 연구의 요약 및 시사점

1977년에 개장한 최초의 전용컨테이너 터미널인 자성대 컨테이너 터미널은 부산항이라는 세계 5대 항만 중 하나의 일원으로서 끊임없는 노력과 생산성향상을 위한 기술 투자로 2002년 Hutchisonports로 인수되기 전까지 항만의 선구자역할을 해왔다.

42년 이라는 운영기간동안 과거 한국중공업(현 두산중공업), 삼성중공업, 대우중공업(현 대우조선해양), 현대중공업의 수많은 이종의 크레인들을 건조, 운용하면서 생기는 각종 문제들에 대해 시행착오를 겪으며 다양한 기술축적을 해왔다. 42년의 기간 동안 장비에 축적되는 노후도와 각종 기계적 피로도 증가로 인한 부재 및 부재와 부재 연결부 사이의 파단 및 좌굴로 인한 보수 개선 경험과 2003년도에는 태풍 매미를 겪으며 STS 크레인 2대의 붕괴를 경험하면서 기존 장비들에 대한 기계적 정밀진단의 필요성을 깨닫게 되었다.

그 이후로 Hutchisonports내 STS 크레인 중 15년 이상 상업 운전을 하고 있는 장비에 대해 FCM 검사를 실시하게 되었으며, 그 결과는 본 논문에 설명된 것처럼 절대 간과해서는 안 될 사항이라는 것을 알게 되었다. 사람과 마찬가지로 기계는 피로가 누적되면 반드시 결국에는 그 부하를 받는 부재의 변형 및 파단이 생기게 되어있다. 그러나 모든 부재의 연결부는 도장 면 내부에 가려져 있어 엔지니어링 부서에서조차도 부재의 파괴를 육안으로 식별하는 것은 현실적으로 불가능에 가깝다. 이런 이유로 전문 검사기관에 의뢰하여 FCM에 대한 정밀 검사가 필요 되어 지며, 부재의 파단이나 변형이 발견되었을 시 즉각적인 보수가 시행되어야할 것은 자명한 일이다.

컨테이너 터미널에서 제일 중요한 자산이라면 사람 그 다음에는 STS크레인이라고 할 수 있을 것이다. Hutchisonports 그룹내에서 STS 크레인 신조 시 시방서에 반영되는 30년, 4백만 사이클을 지켜내기 위해서는 제조사에 제시하는 매뉴얼 만큼에 빈도로 정밀진단을 실시하지는 못하더라도, 적어도 엔지니어링

어령 부서에서는 FCM이라는 것의 중요성을 인지하고 어느 정도 상업 운전이 진행된 시점에 반드시 FCM에 대한 정밀 검사를 실시할 필요가 있다고 판단된다. 물론 고 비용의 검사비와 항만장비관리법에 명기된 수시검사에 해당하는 항목이라 강제성이 없다는 문제가 이 검사에 필요성을 둔화시키지만 중요한 자산인 크레인의 안정성 확보, 안전사고 예방 및 끊임없는 생산성 유지와 향상을 위해서는 필요가 되는 부분이다.

마지막으로 본 논문 제4장에 서술된 구조해석을 통해 FCM검사 실시 후 보수를 통해 얼마나 많은 내구년수가 연장되어질 수 있는 지 산술적인 결과가 제시되었다. 신조 시 고비용이며 수많은 검토와 필요성을 타진한 후 도입이 결정되는 STS크레인의 내구년수가 연장되어 질 수 있다면 비록 검사 실시 당시 검사비용이 고비용으로 다가오더라도 검사 실시 후 충분히 유지보수를 통해 검사비용을 넘어서는 금전적 이익이 있다고 판단되며, 이는 장기적인 관점에서 최적의 운영효율 및 신조 시 외국 장비 제조사에 지불되는 외화 지불을 줄임과 동시에 아직 FCM검사를 실시하지 않은 타 컨테이너 터미널에 참고자료가 될 수 있을 것으로 생각된다.

제2절 연구의 한계 및 향후과제

본 연구는 노후화가 진행된 STS 크레인의 FCM의 비파괴검사를 통해 각 부재간 접합 부위의 파단 상태 확인 및 구조해석을 통한 각 FCM별 응력진폭을 계산하여 보수 후 잔존 사이클을 산출, 제시하였다.

하지만 현재까지 전국 항만에서 본 검사를 실시한 곳이 당 터미널밖에 없어 일반화 시키는 것에 많은 어려움이 있었다. BS5400 Part10에 기술된 피로상세등급 또한 최대의 부하에서 제일 낮은 사이클 즉 가혹한 부하 사이클을 적용하는 것이 옳은 것인지에 대한 고민이 있었지만 언제나 크레인은 최악의 조건에서 작동한다는 것을 가정해서 결과치를 도출하였다. 향후 이 연장된 내구년수는 후속 연구가 축적된다면 더 많은 방법이 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

<국·내외 문헌>

PEMA-IP09-Practical-Structural-Examination-in-Ports-and-Terminals.

허철원(2002), “이중 링크 형식 수평 인입 집 크레인의 설계 및 수명 예측에 관한 연구”, 부경대학교 대학원 기계공학학연협동과정

김정훈, 이학, 지광습, 박병훈, 공정식(2002), “응력-수명 방법을 이용한 피로수명 예측”, 한국강구조학회학술발표논문집.

심영석(2003), “구조물 파손사례 분석”, 부산대학교 고장 분석 및 신뢰성연구센터.

BS5400 Part10 Steel, Concrete and Composite Bridges.

BS2573 Part1,2 Rules for the Design of Cranes.

Liftech(2006), “Technical Specifications Crane Procurement for California United Terminals Long Beach, California, U.S.A and Washington United Terminals Tacoma, Washington, U.S.A

<참고 사이트>

PEMA, <http://www.pema.org/>

感謝의 글

2004년 한국해양대학교 기계공학과 졸업 이후 다시 한국해양대학교로 돌아왔던 2018년 2월 겨울이 아직도 생생한데, 벌써 모든 과정을 다 마무리 하게 된 시점을 맞이하게 되니 정말 감회가 새롭습니다. 지난 2년간 만나게 된 교수님, 선배님 그리고 사랑하는 一期一會 26기 동기들과 함께 동고동락하며 많은 것을 배우고 성장하게 된 뜻 깊은 시간이었습니다. 특히 마지막 4학기 논문을 준비하면서 과연 이 과정을 무사히 마칠 수 있을까 하는 의구심에 사로잡힌 마지막 6개월을 보냈었는데, 이런 순간순간들이 제 인생에 커다란 토대가 되었음을 믿어 의심치 않습니다.

바쁘신 일정 속에서도 논문 지도에 열정을 쏟아주신 김시현 지도교수님께 진심으로 감사드리며, 이번 사업단을 잘 이끌어주신 김환성 교수님, 신영란 교수님과 김울성 교수님께도 감사의 말씀 드립니다.

그리고 회사 생활과 학업을 병행하는데 큰 도움을 주셨던 김현식 부장님, 본 논문관련 많은 경험과 지식을 공유해주신 코리아테크인스펙션(주)의 최근호 이사님께 깊은 감사의 마음 전합니다.

또한, 육아와 직장 때문에 바쁜 와중에도 많은 이해와 내조에 신경써준 아내 최혜진과 우리 하나님의 선물 아들 조하경에게 사랑한다는 말을 전하며 마지막으로 논문준비 기간 동안 광야를 걷는 힘들고 긴 시간의 터널을 포기하지 않고 통과 할 수 있도록 허락하시고, 환란 중에 도우시는 만군의 주 여호와께 감사와 영광 올려 드립니다.

2019년 12월

조 정 현

[부 록]

1. H'사 STS크레인 Performance Indicator(2013~2018)

2013년

Equip No.	Equip Type	MMBF	MTTR	TLC	Breakdown Frequency	Utilization%	OverallAvailability Ai%	Availability per Occupied Time Ao%
107	0	1218.28	0.346	65787	54	27.97%	95.38%	99.48%
108	0	1244.66	0.404	73435	59	31.11%	95.02%	99.39%
109	0	1877.05	0.405	69451	37	30.16%	94.81%	99.60%
110	0	1564.64	0.357	70409	45	30.83%	95.39%	99.58%
111	0	2172.06	0.352	108603	50	44.74%	94.79%	99.63%
112	0	2258.87	0.387	119720	53	49.23%	93.84%	99.60%
113	0	2274.23	0.402	106889	47	44.36%	94.64%	99.59%
115	0	2007.73	0.378	22085	11	9.03%	95.31%	99.54%
116	0	6846.63	0.353	54773	8	21.93%	96.12%	99.86%
117	0	4243.67	0.347	50924	12	20.63%	95.86%	99.78%
118	0	3002.20	0.500	30022	10	12.40%	95.77%	99.57%
122	0	1383.21	0.369	38730	28	14.15%	95.33%	99.29%
123	0	1669.61	0.359	63445	38	22.67%	94.95%	99.42%
124	0	1831.03	0.368	71410	39	25.18%	94.32%	99.48%
Total				945683	491			
Ave.		1926.03	0.377	67549	35	27.41%	95.11%	99.56%

Equip No.	BKDN Percentage%	PM%	EM%	Total downtime%	Net Cycle Time (min/container)	Theoretical Handling Capacity (container/hr)	
107	0.52%	4.36%	0.26%	4.62%	1.59	37.74	
108	0.61%	4.65%	0.33%	4.98%	1.58	37.91	
109	0.40%	4.98%	0.21%	5.19%	1.61	37.28	
110	0.42%	4.39%	0.22%	4.61%	1.63	36.86	
111	0.37%	4.97%	0.24%	5.21%	1.54	39.00	
112	0.40%	5.88%	0.28%	6.16%	1.52	39.45	
113	0.41%	5.10%	0.26%	5.36%	1.53	39.14	
115	0.46%	4.64%	0.06%	4.69%	1.43	41.83	
116	0.14%	3.84%	0.04%	3.88%	1.45	41.34	
117	0.22%	4.08%	0.06%	4.14%	1.47	40.90	
118	0.43%	4.16%	0.07%	4.23%	1.50	39.92	
122	0.71%	4.53%	0.14%	4.67%	1.30	46.05	
123	0.58%	5.73%	0.22%	5.95%	1.30	46.31	
124	0.52%	5.48%	0.20%	5.68%	1.27	47.14	
Total							
Ave.		0.44%	4.71%	0.18%	4.89%	1.50	40.11

2014년

Equip No.	Equip Type	MMBF	MTTR	TLC	Breakdown Frequency	Utilization%	Overall Availability Ai%	Availability per Occupied Time Ao%
107	0	1932.17	0.443	67626	35	27.97%	94.91%	99.56%
108	0	1574.92	0.414	80321	51	33.77%	94.80%	99.49%
109	0	2524.16	0.373	78249	31	33.54%	94.79%	99.72%
110	0	1783.69	0.427	85617	48	36.78%	95.68%	99.53%
111	0	1984.20	0.410	119052	60	47.40%	94.55%	99.51%
112	0	1574.43	0.373	127529	81	51.58%	94.13%	99.45%
113	0	1992.35	0.396	113564	57	46.32%	93.68%	99.54%
115	0	2222.62	0.423	28894	13	11.66%	94.66%	99.53%
116	0	4047.46	0.461	52617	13	21.84%	94.71%	99.69%
117	0	4998.08	0.458	59977	12	23.89%	94.68%	99.75%
118	0	1027.05	0.397	21568	21	9.35%	94.74%	99.08%
122	0	2653.60	0.400	53072	20	19.11%	94.91%	99.59%
123	0	1737.10	0.381	67747	39	24.55%	92.12%	99.43%
124	0	1623.48	0.417	77927	48	26.71%	93.27%	99.24%
Total				1033760	529			
Ave.		1954.18	0.405	73840	38	29.60%	94.40%	99.52%

Equip No.	BKDN Percentage%	PM%	EM%	Total downtime%	Net Cycle Time (min/container)	Theoretical Handling Capacity (container/hr)	
107	0.44%	4.87%	0.21%	5.09%	1.54	38.93	
108	0.51%	4.91%	0.29%	5.20%	1.57	38.27	
109	0.28%	5.05%	0.16%	5.21%	1.58	37.87	
110	0.47%	4.04%	0.28%	4.32%	1.59	37.75	
111	0.49%	5.11%	0.34%	5.45%	1.48	40.48	
112	0.55%	5.45%	0.42%	5.87%	1.50	40.08	
113	0.46%	6.01%	0.31%	6.32%	1.49	40.36	
115	0.47%	5.26%	0.08%	5.34%	1.41	42.49	
116	0.31%	5.21%	0.08%	5.29%	1.47	40.79	
117	0.25%	5.25%	0.08%	5.32%	1.42	42.27	
118	0.92%	5.14%	0.11%	5.26%	1.53	39.29	
122	0.41%	4.98%	0.11%	5.09%	1.28	46.76	
123	0.57%	9.03%	0.24%	9.27%	1.26	47.61	
124	0.76%	6.45%	0.28%	6.73%	1.22	49.20	
Total							
Ave.		0.48%	5.39%	0.21%	5.60%	1.46	41.04

2015년

Equip No.	Equip Type	MMBF	MTTR	TLC	Breakdown Frequency	Utilization %	Overall Availability Ai%	Availability per Occupied Time Ao%
107	0	1727.56	0.370	77740	45	32.44%	93.88%	99.58%
108	0	1384.42	0.392	88603	64	37.37%	94.76%	99.44%
109	0	2584.03	0.397	87857	34	37.25%	94.73%	99.69%
110	0	1785.98	0.364	92871	52	40.04%	94.61%	99.60%
111	0	2027.57	0.395	117599	58	47.67%	93.48%	99.55%
112	0	1577.98	0.391	127816	81	51.84%	93.64%	99.42%
113	0	1809.39	0.414	115801	64	47.72%	93.54%	99.47%
115	0	2745.88	0.392	46680	17	18.36%	95.14%	99.63%
116	0	3985.06	0.470	67746	17	28.23%	95.89%	99.69%
117	0	6293.22	0.407	56639	9	20.89%	96.27%	99.83%
118	0	2437.00	0.383	24370	10	10.41%	95.70%	99.62%
122	0	2124.11	0.352	57351	27	20.80%	94.54%	99.55%
123	0	1931.10	0.406	92693	48	31.98%	93.08%	99.41%
124	0	1688.49	0.385	102998	61	32.05%	94.46%	99.34%
Total				1156764	587			
Ave.		1970.64	0.392	82626	42	32.57%	94.55%	99.54%

Equip No.	BKDN Percentage%	PM%	EM%	Total downtime%	Net Cycle Time (min/container)	Theoretical Handling Capacity (container/hr)	
107	0.42%	5.89%	0.23%	6.12%	1.54	39.05	
108	0.56%	4.90%	0.35%	5.24%	1.57	38.16	
109	0.31%	5.08%	0.19%	5.27%	1.57	38.12	
110	0.40%	5.13%	0.26%	5.39%	1.58	37.97	
111	0.45%	6.21%	0.32%	6.52%	1.49	40.18	
112	0.58%	5.93%	0.44%	6.36%	1.49	40.17	
113	0.53%	6.09%	0.36%	6.46%	1.51	39.86	
115	0.37%	4.76%	0.09%	4.86%	1.42	42.40	
116	0.31%	4.00%	0.11%	4.11%	1.51	39.71	
117	0.17%	3.68%	0.05%	3.73%	1.33	45.20	
118	0.38%	4.25%	0.05%	4.30%	1.55	38.81	
122	0.45%	5.33%	0.13%	5.46%	1.29	46.36	
123	0.59%	7.82%	0.32%	8.14%	1.23	48.61	
124	0.66%	5.21%	0.32%	5.54%	1.13	53.20	
Total							
Ave.		0.46%	5.22%	0.23%	5.45%	1.44	41.54

2016년

Equip No.	Equip Type	MMBF	MTTR	TLC	Breakdown Frequency	Utilization %	Overall Availability Ai%	Availability per Occupied Time Ao%
107	0	1299.51	0.385	79270	61	33.21%	95.57%	99.45%
108	0	1476.59	0.374	94502	64	40.51%	95.82%	99.51%
109	0	1593.63	0.393	89243	56	37.83%	96.01%	99.53%
110	0	1503.86	0.384	96247	64	41.54%	95.63%	99.51%
111	0	1763.22	0.399	118136	67	47.95%	96.36%	99.51%
112	0	1239.81	0.423	128940	104	52.87%	94.63%	99.23%
113	0	1303.80	0.384	113431	87	47.76%	95.00%	99.36%
115	0	3500.41	0.431	59507	17	22.74%	95.67%	99.68%
116	0	3795.39	0.528	68317	18	28.26%	96.19%	99.64%
117	0	5628.23	0.358	73167	13	29.71%	96.30%	99.84%
118	0	3326.00	0.379	36586	11	15.53%	95.95%	99.73%
122	0	3108.48	0.393	65278	21	24.21%	95.79%	99.67%
123	0	2380.47	0.384	102360	43	33.74%	95.60%	99.54%
124	0	1550.16	0.366	99210	64	35.46%	94.44%	99.33%
Total				1224194	690			
Ave.		1774.19	0.394	87442	49	35.07%	95.64%	99.50%

Equip No.	BKDN Percentage%	PM%	EM%	Total downtime%	Net Cycle Time (min/container)	Theoretical Handling Capacity (container/hr)
107	0.55%	4.10%	0.32%	4.43%	1.58	38.02
108	0.49%	3.86%	0.33%	4.18%	1.63	36.79
109	0.47%	3.69%	0.30%	3.99%	1.61	37.36
110	0.49%	4.03%	0.34%	4.37%	1.60	37.52
111	0.49%	3.27%	0.37%	3.64%	1.54	38.90
112	0.77%	4.77%	0.60%	5.37%	1.53	39.29
113	0.64%	4.54%	0.46%	5.00%	1.56	38.44
115	0.32%	4.23%	0.10%	4.33%	1.40	42.93
116	0.36%	3.68%	0.13%	3.81%	1.51	39.77
117	0.16%	3.63%	0.06%	3.70%	1.49	40.29
118	0.27%	3.99%	0.06%	4.05%	1.56	38.51
122	0.33%	4.09%	0.11%	4.21%	1.31	45.68
123	0.46%	4.92%	0.27%	5.19%	1.21	49.55
124	0.67%	5.24%	0.32%	5.56%	1.31	45.93
Total						
Ave.						
	0.50%	4.09%	0.27%	4.36%	1.49	40.27

2017년

Equip No.	Equip Type	MMBF	MTTR	TLC	Breakdown Frequency	Utilization %	Overall Availability Ai%	Availability per Occupied Time Ao%
107	0	1014.80	0.448	84228	83	37.91%	94.58%	99.96%
108	0	1127.98	0.400	101518	90	44.37%	95.44%	99.96%
109	0	1984.41	0.431	91283	46	39.43%	95.31%	99.98%
110	0	1503.67	0.427	96235	64	43.90%	94.72%	99.97%
111	0	1488.92	0.446	125069	84	51.59%	94.54%	99.97%
112	0	1787.14	0.410	128674	72	54.24%	95.33%	99.98%
113	0	1542.77	0.403	120336	78	51.29%	94.87%	99.97%
115	0	1497.88	0.398	73396	49	27.12%	94.78%	99.97%
116	0	4099.47	0.456	77890	19	34.05%	95.88%	99.99%
117	0	3868.52	0.514	88976	23	37.05%	94.25%	99.99%
118	0	3807.08	0.416	45685	12	19.70%	95.32%	99.99%
122	0	2157.67	0.376	84149	39	29.36%	95.75%	99.98%
123	0	1642.78	0.419	106781	65	37.90%	94.61%	99.97%
124	0	1559.29	0.415	109150	70	39.24%	94.50%	99.97%
Total		1333370			794			
Ave.		1679.31	0.421	95241	57	39.07%	94.99%	99.97%

Equip No.	BKDN Percentage%	PM%	EM%	Total downtime%	Net Cycle Time (min/container)	Theoretical Handling Capacity (container/hr)
107	0.04%	4.91%	0.51%	5.42%	1.68	35.69
108	0.04%	4.07%	0.50%	4.56%	1.66	36.13
109	0.02%	4.42%	0.27%	4.69%	1.62	37.02
110	0.03%	4.90%	0.38%	5.28%	1.67	35.94
111	0.03%	4.94%	0.52%	5.46%	1.54	38.94
112	0.02%	4.27%	0.41%	4.67%	1.59	37.85
113	0.03%	4.69%	0.43%	5.13%	1.58	37.91
115	0.03%	4.95%	0.27%	5.22%	1.34	44.78
116	0.01%	4.00%	0.12%	4.12%	1.59	37.68
117	0.01%	5.59%	0.16%	5.75%	1.49	40.22
118	0.01%	4.61%	0.07%	4.68%	1.58	37.88
122	0.02%	4.04%	0.20%	4.25%	1.27	47.12
123	0.03%	5.91%	0.44%	6.35%	1.29	46.53
124	0.03%	5.10%	0.40%	5.50%	1.31	45.77
Total						
Ave.						
	0.03%	4.68%	0.33%	5.01%	1.52	39.58

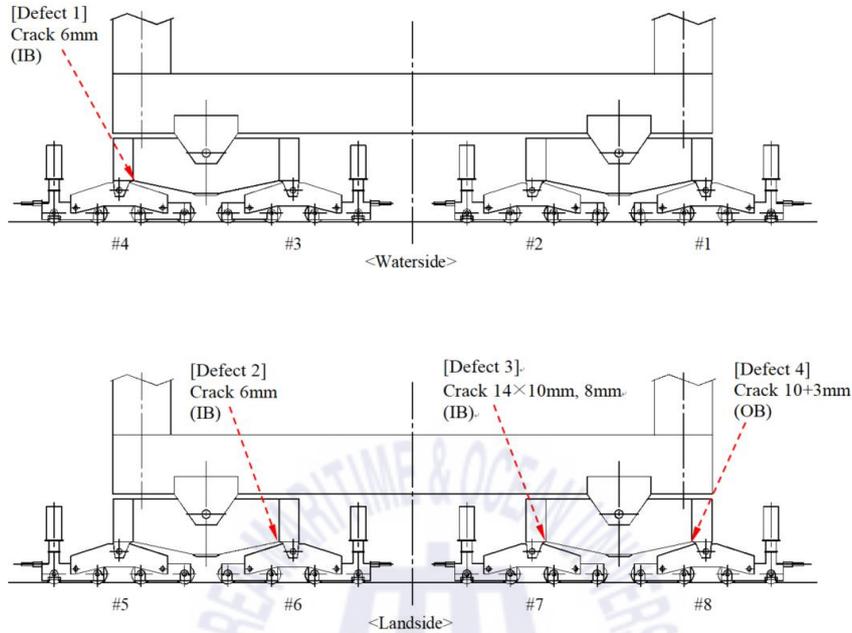
2018년

Equip No.	Equip Type	MMBF	MTTR	TLC	Breakdown Frequency	Utilization %	Overall Availability Ai%	Availability per Occupied Time Ao%
107	0	1315.97	0.450	76326	58	33.86%	95.28%	99.37%
108	0	1181.49	0.439	88612	75	40.15%	95.62%	99.34%
109	0	1364.73	0.405	76425	56	35.23%	95.20%	99.48%
110	0	1168.28	0.381	87621	75	40.43%	95.12%	99.39%
111	0	1497.91	0.410	115339	77	49.64%	95.43%	99.33%
112	0	1577.05	0.417	123010	78	51.44%	95.66%	99.44%
113	0	1285.59	0.392	109275	85	48.26%	95.38%	99.38%
115	0	2105.32	0.381	71581	34	26.68%	94.84%	99.58%
116	0	2766.31	0.388	71924	26	31.62%	95.83%	99.72%
117	0	5679.00	0.404	85185	15	35.11%	95.75%	99.85%
118	0	4067.00	0.418	48804	12	21.12%	96.92%	99.82%
122	0	1927.70	0.368	77108	40	28.25%	95.53%	99.61%
123	0	1825.37	0.426	94919	52	35.30%	94.96%	99.43%
124	0	1684.02	0.413	90937	54	34.52%	94.60%	99.41%
Total				1217066	737			
Ave.		1651.38	0.408	86933	53	36.53%	95.44%	99.49%

Equip No.	BKDN Percentage%	PM%	EM%	Total downtime%	Net Cycle Time (min/container)	Theoretical Handling Capacity (container/hr)	
107	0.63%	4.36%	0.36%	4.72%	1.67	35.90	
108	0.66%	3.92%	0.45%	4.38%	1.72	34.85	
109	0.52%	4.49%	0.31%	4.80%	1.73	34.74	
110	0.61%	4.48%	0.39%	4.88%	1.70	35.30	
111	0.67%	4.14%	0.44%	4.57%	1.62	37.12	
112	0.56%	3.90%	0.45%	4.34%	1.58	38.01	
113	0.62%	4.16%	0.46%	4.62%	1.64	36.52	
115	0.42%	4.99%	0.18%	5.16%	1.35	44.43	
116	0.28%	4.04%	0.14%	4.17%	1.60	37.42	
117	0.15%	4.16%	0.08%	4.25%	1.50	39.96	
118	0.18%	3.01%	0.07%	3.08%	1.62	36.97	
122	0.39%	4.27%	0.20%	4.47%	1.34	44.88	
123	0.57%	5.57%	0.36%	5.93%	1.36	44.05	
124	0.59%	5.09%	0.31%	5.40%	1.39	43.24	
Total							
Ave.		0.51%	4.27%	0.30%	4.56%	1.56	38.46

2. 붕괴유발부재 비파괴 검사 시 발견된 결함상세

- Gantry part : 결함 4개소

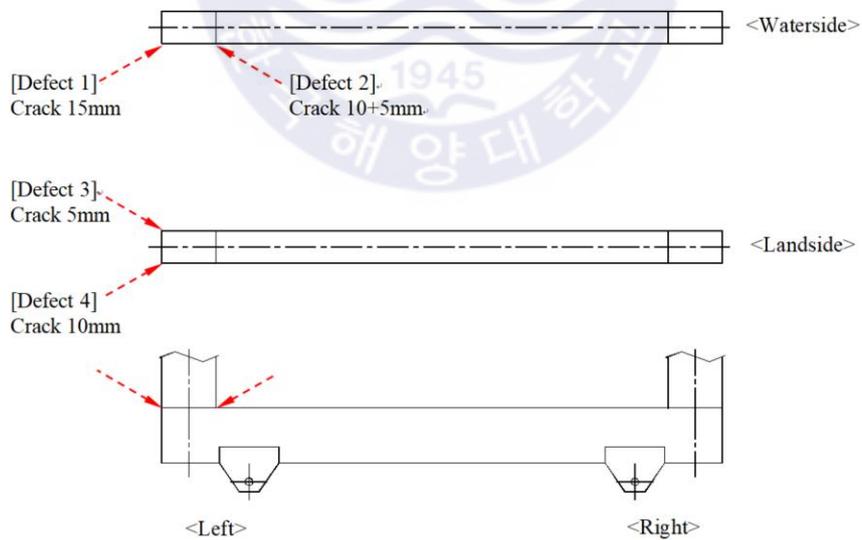


실범 Reject부 위치

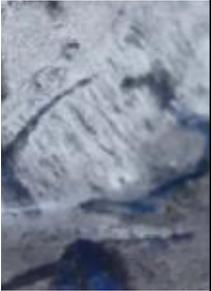
구 분	NDE	관련사진	비 고
[Defect 1] Gantry equalizer beam (#4-IB) Crack 6mm	MT		
[Defect 2] Gantry equalizer beam (#6-IB) Crack 6mm	MT		

구 분	NDE	관련사진	비 고
[Defect 3] Gantry equalizer beam (#7-IB) Crack 14×10mm, 8mm	MT		
[Defect 4] Gantry equalizer beam (#8-OB) Crack 10+3mm	MT		

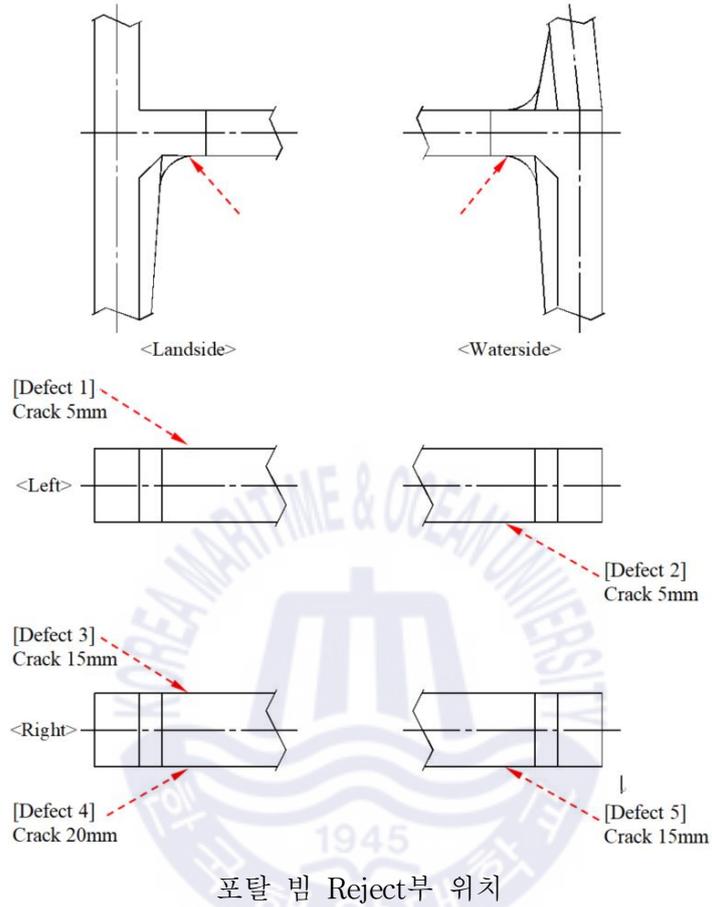
- Sillbeam & Leg : 결함 4개소



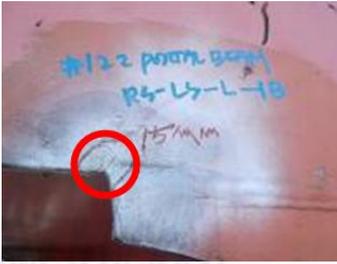
실범, 레그 Reject부 위치

구 분	NDE	관련사진	비 고
[Defect 1] Sillbeam + Leg (Left 측/Waterside) (LTS-WS) Crack 15mm	MT		
[Defect 2] Sillbeam + Leg (Left 측/Waterside) (LTS-WS) Crack 10+5mm	MT		
[Defect 3] Sillbeam + Leg (Left 측/Landside) (LTS-LS) Crack 5mm	MT		
[Defect 4] Sillbeam + Leg (Left 측/Landside) (LTS-LS) Crack 10mm	MT		

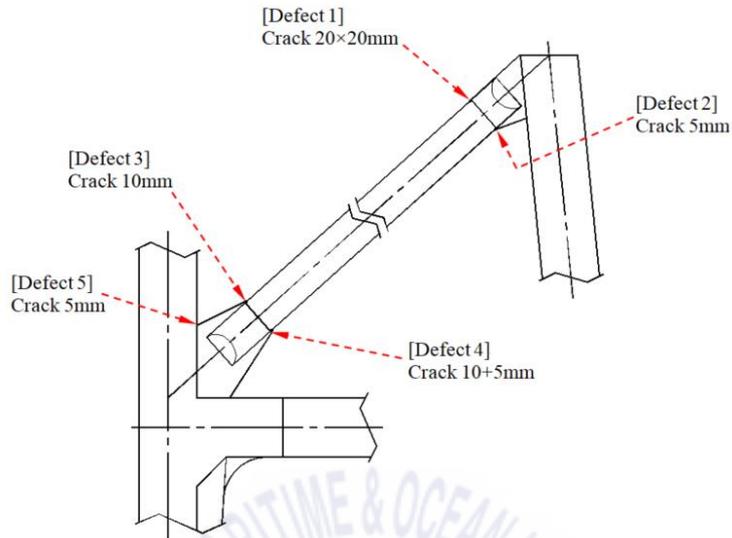
- Portal beam : 결함 5개소



구 분	NDE	관련사진	비 고
[Defect 1] Portal beam (Left측 /Lower) (LTS-LS-OB-L) Crack 5mm	MT		

구 분	NDE	관련사진	비 고
[Defect 2] Portal beam (Left측 /Lower) (LTS-WS-IB-L) Crack 5mm	MT		
[Defect 3] Portal beam (Right측 /Lower) (RS-LS-IB-L) Crack 15mm	MT		
[Defect 4] Portal beam (Right측 /Lower) (RS-LS-OB-L) Crack 20mm	MT		
[Defect 5] Portal beam (Right측 /Lower) (RS-WS-OB-L) Crack 15mm	MT		

- Diagonal pipe : 결함 9개소
- 좌측 Diagonal

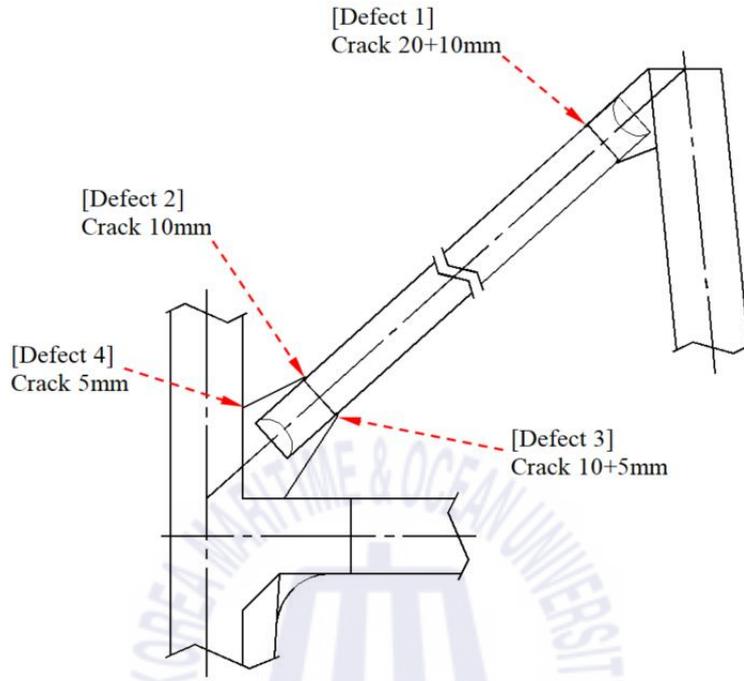


좌측 다이어그널 파이프 Reject부 위치

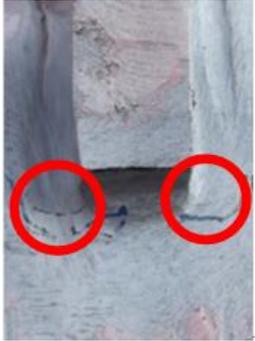
구 분	NDE	관련사진	비 고
[Defect 1] Diagonal (Left측 /Waterside) (LTS-WS-U) Crack 20×20mm	MT		
[Defect 2] Diagonal (Left측 /Waterside) (LTS-WS-L) Crack 5mm	MT		

구 분	NDE	관련사진	비 고
[Defect 3] Diagonal (Left측/ Landside) (LTS-LS-U) Crack 10mm	MT		
[Defect 4] Diagonal (Left측/ Landside) (LTS-LS-L) Crack 10+5mm	MT		
[Defect 5] Diagonal (Left측/ Landside) (LTS-LS) Crack 5mm	MT		

- 우측 Diagonal

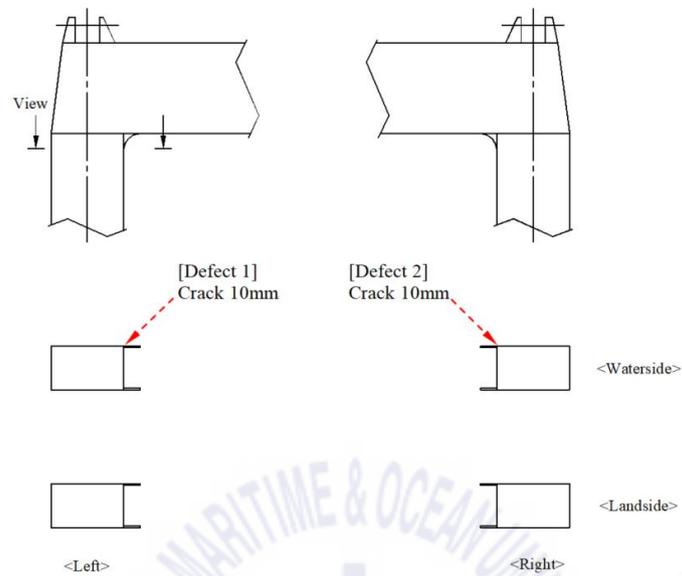


우측 다이어그널 파이프 Reject부 위치

구 분	NDE	관련사진	비 고
[Defect 1] Diagonal (Right 측/Waterside) (RS-WS-U) Crack 20+10mm	MT		

구 분	NDE	관련사진	비 고
[Defect 2] Diagonal (Right 측/Landside) (RS-WS-U) Crack 10mm	MT		
[Defect 3] Diagonal (Right 측/Landside) (RS-LS-L) Crack 10+5mm	MT		
[Defect 4] Diagonal (Right 측/Landside) (RS-LS) Crack 5mm	MT		

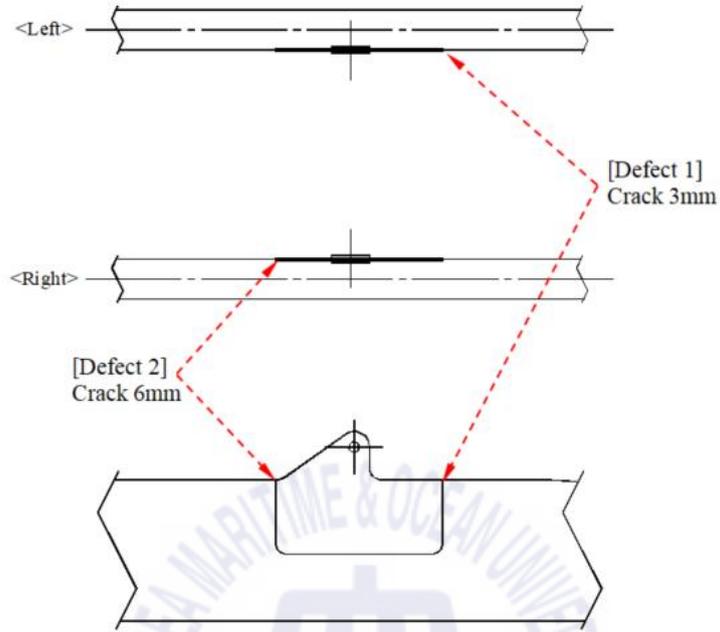
- Leg + TGSB(Trolley and Girder Supporting Beam) : 결함 2개소



레그 + TGSB Reject부 위치

구 분	NDE	관련사진	비 고
[Defect 1] Leg + TGSB (Left 측/Waterside) (LTS-WS-L) Crack 10mm	MT		
[Defect 2] Leg + TGSB (Right 측 /Waterside) (RS-WS-L) Crack 10mm	MT		

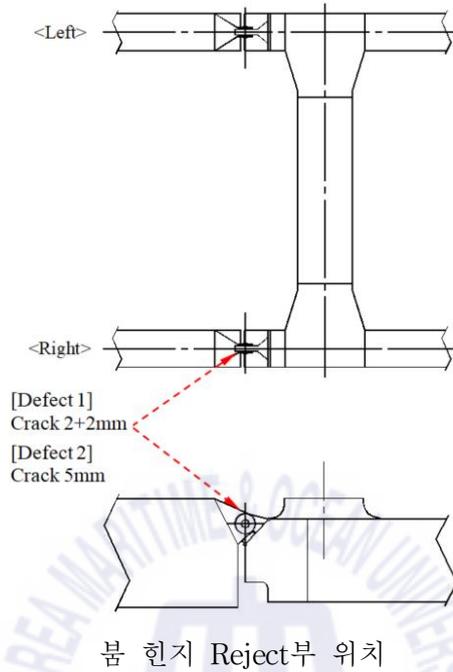
- Backstay Gausset : 결함 2개소



Backstay Gausset Reject부 위치

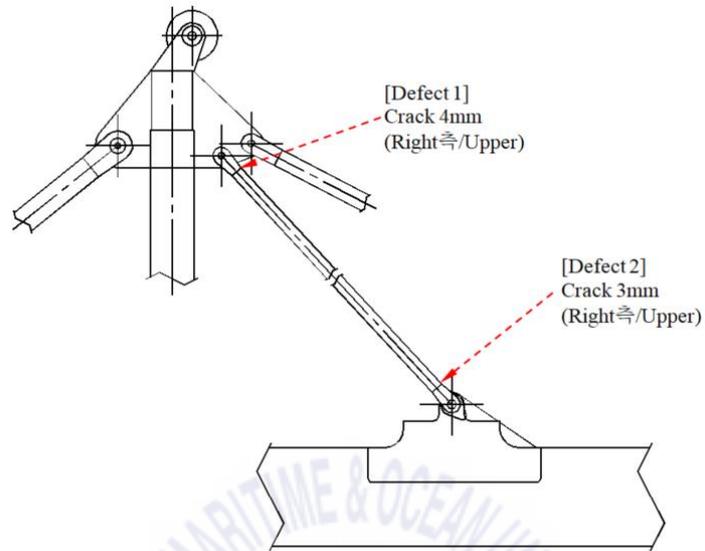
구 분	NDE	관련사진	비 고
[Defect 1] Backstay Gausset (Left측) (LTS-WS) Crack 3mm	MT		
[Defect 2] Backstay Gausset (Right측) (RS-LS) Crack 3mm	MT		

- 붐 힌지 : 결함 2개소

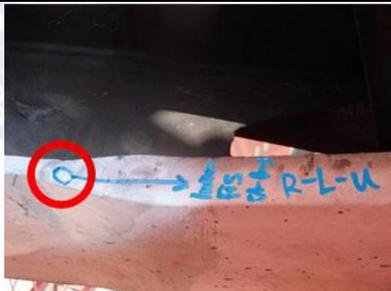


구 분	NDE	관련사진	비 고
[Defect 1] Boom Hinge (Right측) (RS-LTS) Crack 2+2mm	MT		
[Defect 2] Backstay Gussset (Right측) (RS-RS) Crack 5mm	MT		

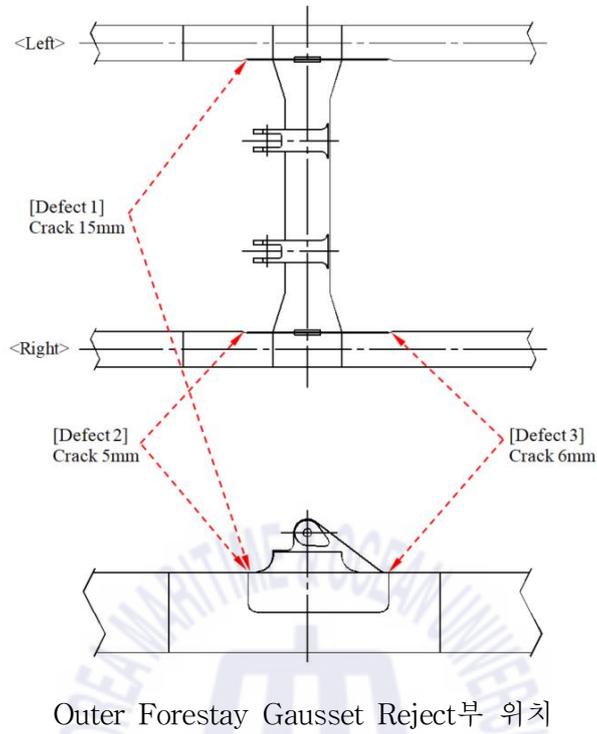
- Inner Forestay : 결합 2개소



Inner Forestay Reject부 위치

구 분	NDE	관련사진	비 고
[Defect 1] Inner forestay (A-frame측/Right측) (RS-LTS-U) Crack 4mm	MT		
[Defect 2] Inner forestay (Boom측/Right측) (RS-RS-U) Crack 3mm	MT		

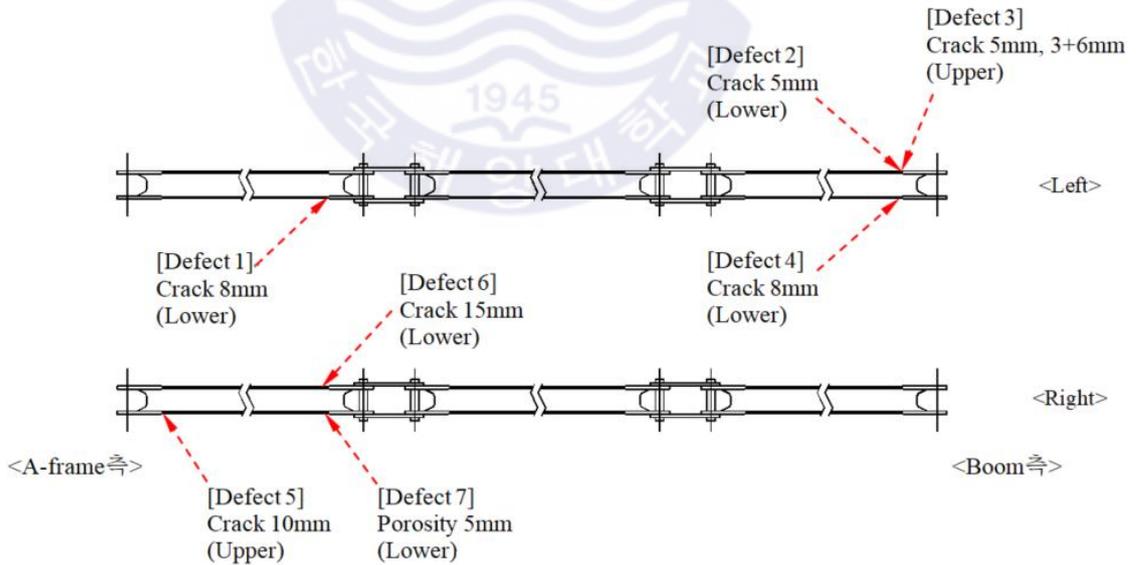
- Outer Forestay Gausset : 결함 3개소



구 분	NDE	관련사진	비 고
[Defect 1] Outer forestay gausset (Left 측)(LTS-LS) Crack 15mm	MT		

구 분	NDE	관련사진	비 고
[Defect 2] Outer forestay gusset (Right 측) (RS-LS) Crack 5mm	MT		
[Defect 3] Outer forestay gusset (Right 측) (RS-WS) Crack 6mm	MT		

- Outer Forestay : 결함 7개소



Outer Forestay Reject부 위치

구 분	NDE	관련사진	비 고
[Defect 1] Outer forestay (Link측/Left측) (LTS-RS-L) Crack 8mm	MT		
[Defect 2] Outer forestay (Boom측/Left측) (LTS-LTS-L) Crack 5mm	MT		
[Defect 3] Outer forestay (Boom측/Left측) (LTS-LTS-U) Crack 5mm (모재) Crack 3+6mm (용접부)	MT		
[Defect 4] Outer forestay (Boom측/Left측) (LTS-RS-L) Crack 8mm	MT		

구 분	NDE	관련사진	비 고
[Defect 5] Outer forestay (A-frame측/Right 측) (RS-RS-U) Crack 10mm	MT		
[Defect 6] Outer forestay (Link측/Right측) (RS-LTS-L) Crack 8mm	MT		
[Defect 7] Outer forestay (Link측/Right측) (RS-RS-L) Porosity 5mm	MT	