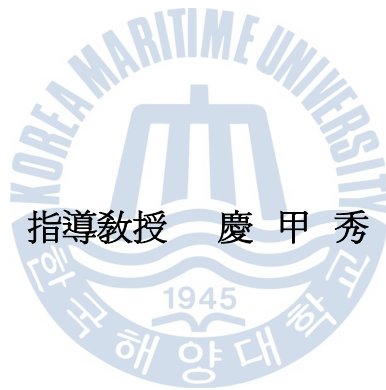


工學碩士 學位論文

개단면리브 강바닥판교의 재하특성에 따른
구조상세부의 거동 분석

Analysis on Behavior of Structural Details for Open Ribs
Orthotropic Steel Deck according to Load Patterns



2010 年 10 月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科

李 誠 珍

本 論 文 을 李 誠 珍 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

委 員 長 工 學 博 士 李 熙 賢



委 員 工 學 博 士 金 度 三



委 員 工 學 博 士 慶 甲 秀



2010 年 12 月 28 日

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

목 차

목차	i
표목차	iii
그림목차	iv
ABSTRACT	vi
요약	viii
1장. 서 론	1
1.1 연구의 배경과 목적	1
1.2 연구 동향	3
1.3 연구의 범위 및 방법	5
2장. 강바닥판의 피로균열 및 피로수명	6
2.1 강바닥판의 피로균열	6
2.2 피로수명 평가	9
2.2.1 피로수명 평가 개요	9
2.2.2 응력빈도해석	10
2.2.3 잔존수명 평가	11
3장. 대상교량의 제원 및 계측데이터 분석	16
3.1 대상교량 제원 및 특성	16
3.2 피로균열 현황	18
3.3 현장계측 개요	23
3.3.1 재하하중에 의한 계측	23
3.3.2 실교통류 흐름하에서의 계측	25
3.4 실교통류 흐름하의 계측 분석	26
3.4.1 변위 계측 결과 분석	26
3.4.2 변형률 계측 결과 분석	29

3.5 피로수명 및 잔존수명 평가결과	33
4장. 구조해석을 통한 거동 특성 분석	36
4.1 재하하중에 의한 구조해석	36
4.1.1 구조해석 모델 검증	36
4.1.2 재하하중에 의한 상세 해석	39
4.1.3 재하하중에 의한 구조해석 결과	40
4.2 실교통 하중에 의한 구조해석	45
4.2.1 구조해석 모델 검증	45
4.2.2 구조해석을 통한 거동 특성 분석	48
5장. 결 론	62
5.1 결론	62
5.2 향후 과제	63
참고문헌	64



표목차

표 2-1. 강바닥관교 피로손상 분석 정리표	8
표 2-2. 일본 강구조협회의 기본 허용응력범위	15
표 3-1. 대상교량 피로균열 수량	22
표 3-2. 재하차량 중량	24
표 3-3. 장래에 주행하는 각 차량에 의해서 발생하는 최대응력범위	35
표 3-4. 최대응력범위에 대한 1년간 등가반복회수	35
표 3-5. 피로수명 및 잔존수명 평가결과	35
표 4-1. 재하시험 계측값과 구조해석의 변위 비교	38
표 4-2. 추정된 차량의 실제 중량	47
표 4-3. 교통류 흐름하의 계측과 구조해석 결과 비교	48



그림목차

그림 1-1. 강바닥판의 구조	1
그림 1-2. 개단면 세로리브 형상	2
그림 1-3. 폐단면 세로리브 형상	2
그림 2-1. 실제 교량의 피로손상 사례	6
그림 2-2. 강바닥판교의 피로균열 예	7
그림 2-3. 강바닥판교의 내력작용 예	7
그림 2-4. Rainflow Counting method	11
그림 2-5. Pamglen-Miner의 법칙($\Delta f - N$ 선도)	12
그림 2-6. 피로 설계 곡선	15
그림 3-1. 대상교량의 전경	17
그림 3-2. 대상교량의 단면제원	17
그림 3-3. 강바닥판 상세도	18
그림 3-4. 대상교량의 피로균열 사진(1)	19
그림 3-5. 대상교량의 피로균열 사진(2)	21
그림 3-6. 대상교량의 피로균열 사진(1)	22
그림 3-7. 재하시험 구간	24
그림 3-8. 재하차량 제원	24
그림 3-9. 재하시험에서의 센서부착 위치	24
그림 3-10. 실교통류 흐름하 계측에서의 센서부착 위치	25
그림 3-11. 실교통류 흐름하 계측에서의 센서 설치 현황	26
그림 3-12. 시간대별 교통량 조사 사진	26
그림 3-13. G3의 변위 실시간 데이터	27
그림 3-14. 변위 이력곡선의 일례	28
그림 3-15. 단일 하중 재하시 변형률 이력곡선 일례	31
그림 3-16. G3 및 G4가 max일 경우 변형률 이력곡선	33

그림 3-17. 응력이력곡선 일례	34
그림 3-18. 응력빈도 그래프 일례	34
그림 4-1. 재하하중에 의한 구조해석 모델	37
그림 4-2. 계측 및 구조해석에서 얻어진 변위의 횡분배	38
그림 4-3. 하중재하 경우(G3R4)	39
그림 4-4. 하중재하 경우(G4R1)	40
그림 4-5. 재하차량의 교축방향 이동에 따른 응력변화	41
그림 4-6. 재하차량의 교축직각방향 이동에 따른 응력변화	43
그림 4-7. 횡방향 최대 및 최소응력 발생 위치에서의 응력변화	44
그림 4-8. 실교통 하중에 의한 구조해석 모델	46
그림 4-9. 추정된 실제 재하차량	47
그림 4-10. 추정된 실제 트럭 재하 경우	47
그림 4-11. 교축직각방향 이동에 따른 응력변화	49
그림 4-12. 교축직각방향 최대응력 발생 위치에서 S2의 교축방향 응력변화곡선 ..	51
그림 4-13. S2가 최대응력일 때 하중재하 위치 및 변위	52
그림 4-14. 교축직각방향 최소응력 발생 위치에서 S2의 교축방향 응력변화곡선 ..	54
그림 4-15. S2가 최소응력일 때 하중재하 위치 및 변위	55
그림 4-16. 교축직각방향 최대응력 발생 위치에서 S6의 교축방향 응력변화곡선 ..	57
그림 4-17. S6가 최대응력일 때 하중재하 위치 및 변위	58
그림 4-18. 교축직각방향 최소응력 발생 위치에서 S6의 교축방향 응력변화곡선 ..	60
그림 4-19. S6가 최소응력일 때 하중재하 위치 및 변위	61

Analysis on Behavior of Structural Details for Open Ribs Orthotropic Steel Deck according to Load Patterns

by
Lee, Sung Jin

Department of Civil and Environment Engineering
Graduate School of Korea Maritime University

ABSTRACT

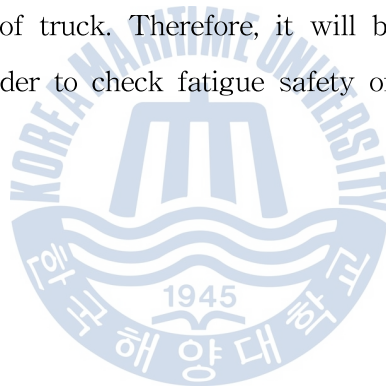
Orthotropic steel deck consists that comparative thin shredder is assembled by welding. Therefore, several structure details such as welding hitch is very complex stress state. Also, possibility that defect and transformation etc by welding happen is very high.

Fatigue crack is happening from welding hitch of secondary member that main member is not in actuality orthotropic steel deck. but stress examination is consisting to main member at design of bridge. Detail stress examination and analysis on behavior characteristic for structure detail that fatigue crack happens are not consisting.

Therefore, this research investigated cause that fatigue crack happens to orthotropic steel deck that 28 years pass while use in common. And analyzed behavior characteristic of structure detail though measure under loading test and field test under actual traffic flow. While use in common also, forecast survival fatigue life through stress frequency measure, and examined fatigue safety of existing bridge.

Executed structural analysis to structure details that fatigue crack is happened. Also, investigated behavior characteristic of orthotropic steel deck by transfer load. Through this, wished to examine closely occurrence cause of fatigue crack.

Result of study, the main girder in the steel deck bridge shows the stress pattern with long period by influence of the whole truck loading, but the stress pattern of rib is different to it. Its wave has short period and is complex not only because of its local behavior but of direct influence of each axle loading of the truck. And the loading position that gives the maximum stress at the structural detail affected by its local behavior is same as the location that gives the maximum stress to the main girder, however, its position corresponding to the minimum stress should be found by using the its influence line. Also, the stress variation of the structural member affected by its local behavior is similar regardless of number of truck. Therefore, it will be more efficient to use single truck only in order to check fatigue safety of it.



개단면리브 강바닥판교의 재하특성에 따른 구조상세부의 거동 분석

이 성 진

한국해양대학교
토목환경공학부 토목공학과

요 약

강바닥판 교량은 비교적 얇은 강판을 사용하여 종·횡리브 및 가로보 등이 용접에 의해 조립되는 구조이므로 연결부 등 여러 구조상세에서의 응력 상태가 매우 복잡하며, 용접에 의한 결함과 변형 등이 발생할 가능성이 매우 높다.

실제 강바닥판 교량에서 피로균열은 주부재가 아닌 2차부재의 용접연결부에서 발생하고 있다. 그러나 교량의 설계 시에는 주부재를 대상으로 한 응력 검토만 이루어지고 있으며, 피로균열이 발생하는 구조상세에 대한 상세 응력 검토 및 거동 특성 분석은 이루어지지 않고 있다.

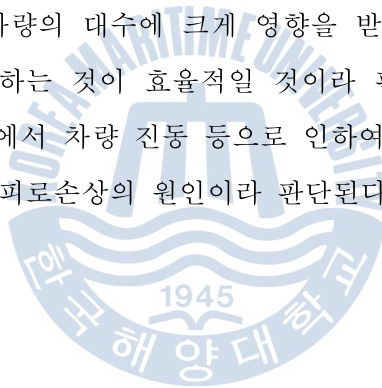
따라서 본 연구에서는 공용년수 29년된 강바닥판 교량을 대상으로 피로균열이 발생한 원인을 조사하고, 재하시험 및 실험통류 흐름하에서의 계측을 통하여 대상 구조상세의 거동 특성을 분석하였다. 또한 공용중 응력빈도계측을 통해 잔존 피로수명을 예측하고, 기존 교량의 피로안전성을 검토하였다.

피로균열 발생이 보고되고 있는 세로리브 및 다이아프램 용접부를 대상으로 격자해석 및 상세해석을 실시하고, 강바닥판에 대한 상세 영향면해석을 이용하여 하중 이동에 따른 강바닥판의 거동 특성을 조사하였다. 이를 통하여 대상교량의 피로균열 발생 원인을 규명하고자 하였다.

연구 결과, 주거더의 응력파형은 전체 하중의 영향을 받아 장주기의 파형을 나타내나 대상 구조상세의 응력파형은 차축의 영향을 크게 받아 단주기의 응력파형을 나타내는 것으로 나타났다.

공용중 응력빈도계측을 통한 피로안전성 검토 결과, 피로균열이 발생한 구조상세는 거의 잔존피로수명이 없는 것으로 나타났으며, 조속한 유지·보수 방안이 강구되어야 할 것으로 판단된다.

그리고 구조해석 결과, 대상 구조상세에서의 최대응력 발생 위치는 주거더의 최대응력 발생 위치와 거의 일치하나 최소응력 발생 위치는 국부거동을 나타내는 대상 구조상세의 영향선해석에 기초하여 평가하는 것이 바람직하다고 판단된다. 또한 국부거동의 영향을 받는 구조상세에 대한 최대응력 및 최소응력의 변화는 재하차량의 대수에 크게 영향을 받지 않으므로 피로평가는 1대의 재하트럭을 사용하는 것이 효율적일 것이라 판단된다. 세로리브 용접부 등과 같은 구조상세에서 차량 진동 등으로 인하여 면외응력이 발생하였으며, 이러한 면외응력은 피로손상의 원인이라 판단된다.



1장. 서론

1.1 연구의 배경과 목적

바닥판은 교통하중을 직접 지지하여 하중을 주거더나 주구도에 전달하는 역할을 한다. 바닥판의 대표적인 예로는 보통 중소지간의 교량에 흔히 사용되는 철근콘크리트 바닥판과 장대교에 사용되는 강바닥판이 있으며, 그 외에 프리캐스트 바닥판, 강판과 콘크리트의 합성바닥판 등이 있다.

강바닥판 구조는 그림 1-1과 같이 강바닥판을 세로리브와 가로리브로 보강한 구조로 가로리브를 관통하여 세로리브를 배치하는 형태를 취하고 있다. 세로리브는 교량 종방향으로 배열되어 구조계에 작용하는 하중에 저항할 수 있게 한다. 그림 1-2 및 그림 1-3에 나타난 바와 같이 강바닥판을 지지하는 세로리브는 개단면형과 폐단면형으로 분류할 수 있다. 현재 사용되고 있는 것의 대부분은 그림 1-2(a) 및 (b)에 나타난 평강, 벌브플레이트와 그림 1-3(a)에 나타난 U리브 등이다. 특히 U리브는 가로리브 간격을 길게 할 수 있기 때문에 수년 전부터 강바닥판의 주류를 이루고 있다.

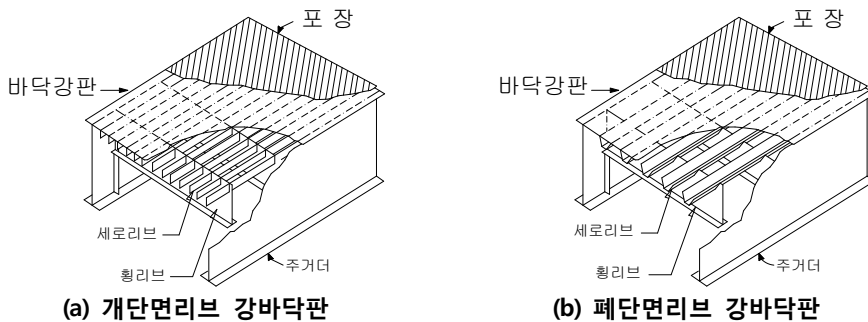


그림 1-1. 강바닥판의 구조

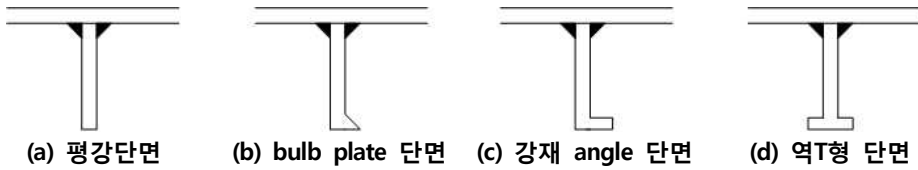


그림 1-2. 개단면 세로리브 형상

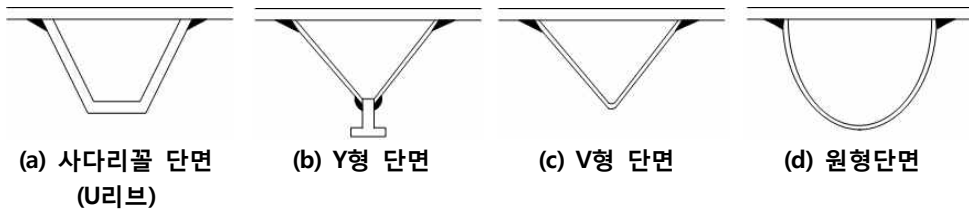


그림 1-3. 폐단면 세로리브 형상

한편, 국내에서는 1973년에 준공된 남해대교를 시점으로 강바닥판이 사용되기 시작하였으며, 최근 시공기술의 발전과 사회적 요구에 따라 강바닥판의 사용실적이 점차 늘어나고 있는 실정이다. 그러나 강바닥판 구조는 비교적 얇은 강판을 사용하여 종·횡리브 및 가로보 등이 용접에 의해 조립되는 구조이므로 연결부 등 여러 구조상세에서의 응력 상태가 매우 복잡하며, 용접에 의한 결함과 변형 등이 발생할 가능성이 매우 높다. 또한 현재 공용중에 있는 교량에서도 교통량의 증가와 차량 하중의 증가로 높은 변동응력이 예상되므로 피로손상의 발생 가능성이 더욱 커질 것으로 예상된다.

이러한 강바닥판의 피로손상이 문제가 되면서 국내에서도 강바닥판 구조상세에 대한 피로실험을 수행하는 등 연구가 이루어지고 있으나 대부분 표준형 U리브를 대상으로 한 연구가 이루어지고 있을 뿐, 강바닥판 건설 초기의 역T형 리브 형식에 대한 연구는 이루어지지 않고 있다. 또한 실제 교량에서의 피로균열은 세로리브 용접연결부 등과 같은 2차부재의 국부상세에서 발생하는데, 교량의 설계 시에는 주부재의 영향선해석에 의한 응력검토만 이루어지고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 공용년수 29년된 역T형 리브형식의

강바닥판 교량을 대상으로 피로균열이 발생한 원인을 조사하고, 재하시험 및 실험교통류 흐름하에서의 계측을 통하여 대상 구조상세의 거동 특성을 분석하였다. 또한 공용중 응력빈도계측을 통해 잔존 피로수명을 예측하고, 기존 교량의 피로안전성을 검토하였다. 또한 피로균열 발생이 보고되고 있는 세로리브 및 다이아프램 용접부를 대상으로 격자해석 및 상세해석을 실시하고, 강바닥판에 대한 상세 영향면해석을 이용하여 하중 이동에 따른 강바닥판의 거동 특성을 조사하였다. 이를 통하여 대상교량의 피로균열 발생 원인을 규명하고자 하였다.

1.2 연구 동향

현재 강바닥판의 세로리브 적용에 있어서 도로교설계기준(2008)에서는 폐단면 리브를 표준으로 하고, 곡선교나 교량폭이 변하는 경우 부분적으로 개단면 리브를 사용할 수 있도록 제안하고 있다. 또한 강도로교 상세부설계획지침(2006)에서는 원칙적으로 폐단면 사용을 추천하며 보도부 등에 부분적으로 개단면을 사용하도록 하고 있다. 이에 대한 국내의 대표적인 연구결과는 다음과 같다.

최동호(2000) 등은 강바닥판의 실물 대형시험체를 제작하여 정적시험 및 피로시험을 실시하였다. 정적 및 영향면 재하시험 결과를 통하여 다이아프램의 유무에 따른 강바닥판 슬릿부의 면내와 면외응력을 검토하였으며, 피로시험결과로부터 강바닥판의 피로거동, 피로균열의 발생과 진전에 대한 연구를 수행하였다.

박영석(2002) 등은 강바닥판 교량의 거동을 파악하고 피로강도에 유리한 스캘럽 형상을 찾기 위하여 피로시험을 수행하였다. 피로시험을 통하여 초기 균열 발생에 따른 응력반복횟수와 발생위치 등을 찾아내어 세로리브의 비틀림에 의한 구조 상세부의 피로거동을 파악하였다.

최준혁(2005) 등은 강바닥판의 세로리브와 가로리브 교차부의 주변에 대한 국부응력과 피로거동을 조사하기 위하여 실물크기의 시험편을 제작하여 정적 및 피로시험을 실시하였다. 정적거동에 있어서는 세로리브 절취부의 가로리브 하단 돌림 용접부 주변에 이축방향으로 변형률을 측정하여 응력을 구하고 이를 해석결과와 비교하여 응력발생 양상을 평가하였다.

최준혁(2005)은 강바닥판의 세로리브와 가로리브 교차부의 국부변형, 응력 집중, 재하하중의 의한 국부응력 등에 의한 복잡한 응력분포로 공칭응력의 계산 및 그에 기초한 피로강도 평가가 매우 어렵기 때문에 국부응력에 기초한 피로강도 평가를 하였다. 이를 위해서 대형시험체를 이용한 피로시험을 수행하고 실측과 유한요소 해석결과로부터 여러 가지 방법으로 정의된 국부응력의 적용성을 비교, 분석하였다.

오순택(2006)은 국내외의 여러 가지 세로리브와 가로리브 연결 상세 중, 유한요소 해석 결과를 분석하여 국내의 강도로교 상세부 설계지침 상에서 제시하고 있는 폐단면 세로리브 표준 형태와 유럽에서 널리 사용되고 있는 토끼형(rabbit type) 상세를 대상으로 개선 상세가 적용된 3차원 실물 모형체를 제작하여 정적 및 일정 진폭 피로 실험을 수행하였다.

신재철(2007) 등은 강바닥판 구조형식의 피로성능 향상 효과가 큰 교차부에 스캘럽을 두지 않는 동시에 세로리브 내부에 가로리브 복부판면과 일치되게 다이아프램을 설치하면 컷아웃부 및 교차부에서의 응력집중 감소효과가 크며, 특히 다이아프램의 설치가 컷아웃부에서의 응력집중 감소효과에 큰 영향을 미치고 있는 연구결과를 바탕으로 다이아프램 상하부면 곡률반경을 대상으로 매개변수해석을 수행하였다.

그러나 앞의 모든 연구는 강바닥판의 폐단면 U리브와 가로리브, 다이아프램을 대상으로 한 연구만 있을 뿐, 강바닥판 역T형 리브에 대한 연구는 전무한 것으로 조사되었다.

1.3 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 피로균열이 발생한 강바닥판 교량의 유지관리를 위하여 응력빈도계측에 기초한 구조해석을 실시하여 대상 구조상세의 거동 및 특성을 분석하기 위하여 다음과 같은 연구를 수행하였다.

본 논문은 총 5장으로 구성되며, 각 장의 주요내용은 다음과 같다.

제 1장에서는 본 연구의 배경 및 목적, 연구의 내용 및 범위에 대해 기술하였다.

제 2장에서는 대상교량에서 발생한 피로균열의 특성분석을 하기 위하여 대상교량을 선정하였으며, 외관조사에서 조사된 피로균열의 현황과 현장계측의 개요에 대하여 기술하였다.

제 3장에서는 실패통류 흐름하 계측을 통하여 얻어진 변형률데이터를 통하여 대상교량의 거동 특성을 분석하였으며, 응력빈도해석 및 Miner rule에 기초하여 피로수명 및 잔존수명을 평가하였다.

제 4장에서는 현장계측값과 비교를 통하여 구조해석 모델을 검증하였으며, 검증된 구조해석 모델을 이용하여 차량하중별 대상 구조상세의 거동 특성을 분석하였다. 또한 실패통류 흐름하의 계측값과 비교하여 대상교량에서의 실제교통하중을 추정하여 구조해석을 실시하였으며, 구조해석 결과를 통하여 대상 구조상세의 거동을 분석하였다.

제 5장에서는 본 연구로부터 도출된 결론을 서술하였다.

2장. 강바닥판의 피로균열 및 피로수명

2.1 강바닥판의 피로균열

강바닥판은 본래 철근콘크리트 바닥판과 같이 운하중을 직접 받는 부재로서 피로균열이 발생할 가능성이 많은 구조부재이다. 강바닥판교의 일반 부재는 차량이 한 대 통과할 때마다 1회의 응력변동을 받게 되나, 바닥판 시스템은 구조특성상 바퀴 하나가 통과할 때마다 응력 변동이 발생하게 되며 그때마다 피로피해가 누적되어 피로손상이 발생한다. 그림 2-1에 실교량에서 발생한 피로균열 사진을 나타내었다.

Kind of Cracks					
Photo					
Location	Fillet weld at connection of trough rib and end diaphragm	Fillet weld at connection of trough rib and transverse rib / on weld toe of transverse rib	Fillet weld at connection of trough rib and transverse rib / from slit of transverse rib side	Fillet weld of transverse rib and web of box girder	Fillet weld of deck plate and trough rib / on root of weld
Kind of Cracks					
Photo					
Location	Site butt weld of trough rib / along bead direction	Fillet weld of deck plate and V-stiffener / on weld toe of deck plate	Fillet weld of hunger plate stiffener	Butt weld of main girder stiffener	Site butt weld of longitudinal rib / along bead direction

그림 2-1. 실제 교량의 피로손상 사례

또한 외국에서 조사된 강바닥판교의 피로손상 사례와 피로손상에 따른 균열 위치를 그림 2-2에, 내력과의 작용 형태는 그림 2-3에 나타내었다. 이에 따른 결과는 표 2-1과 같다.

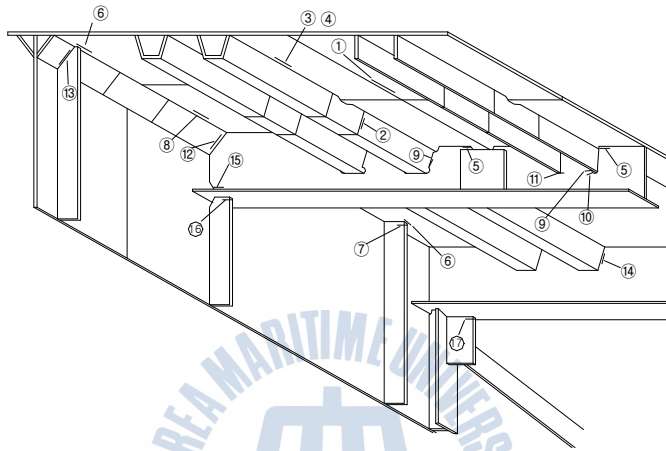


그림 2-2. 강바닥판교의 피로균열 예

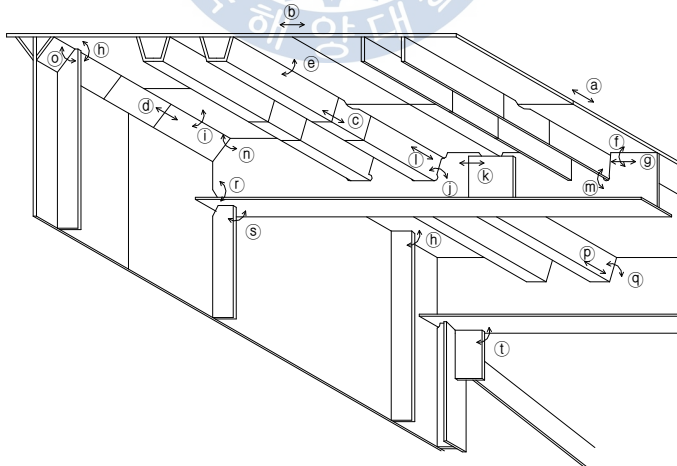


그림 2-3. 강바닥판교의 내력작용 예

2.2 피로수명 평가

2.2.1 피로수명 평가 개요

피로균열이 확인된 경우에는 긴급대책의 필요성, 보수·보강방법 또는 유사개소에서 손상발생 가능성 등에 관한 검토가 필요하다. 이 경우 대책시기의 설정 및 효율적인 유지관리 계획을 수립하기 위해서는 손상부나 유사부위에서의 손상도를 정량적으로 평가하는 것이 중요하다. 또 예방적인 측면에서의 사전유지관리 실시 및 계획적인 예산조치의 실시 또는 투자계획의 입안을 실시하기 위해서는 손상도와 함께 어떤 한계상태에 도달할 때까지의 잔존수명을 평가하는 것이 중요하다.

일반적으로 여러 이음에 대한 대부분의 피로시험은 일정응력진폭 시험조건에서 실시한다. 그러나 교량에서는 차량 등의 하중 작용에 의해 각 부재·부위에 발생하는 응력이 시간에 따라 변동하는 복잡한 응력파형을 나타내고 있다. 일정응력진폭에 의해 얻어진 시험결과를 이용하여 피로수명을 추정하거나 손상도를 평가하기 위해서는 실제 교량에서의 실동응력과 일정진폭의 시험결과와 관련짓는 것이 중요한 사항이 된다. 또 실제 교량에서의 피로손상은 일반적인 설계에서 응력검토를 하지 않는 2차적인 부위에서 국부적인 2차응력 및 집중응력이 원인이 되어 발생하는 경우가 대부분이므로 실동상태에서 이와 같은 2차응력에 대해 피로평가를 실시하는 것이 필요하다. 각종 이음에 대한 기존 시험에서는 시험편 또는 시험부재에 작용하는 공칭응력을 이용하여 피로수명곡선을 구하고 있으므로 공칭응력 정의가 곤란한 부위의 손상에 대해서는 공칭응력으로 정리된 피로수명곡선을 그대로 적용하는데 무리가 있는 등의 점에 대해서는 평가시 유의하여야 한다.

2.2.2 응력빈도해석

실동응력상태에서의 응력파형과 기존의 일정응력진폭에서의 피로시험결과와 관련지어 실동응력상태에서의 피로강도나 피로수명을 추정하는 방법이 필요하다. 이를 위해서 먼저 적당한 방법으로 실동응력파형을 일정응력과 성분의 집합형태로 정리하는데 이를 응력빈도해석법이라 한다.

응력빈도해석의 목적은 피로손상도나 피로수명을 추정하기 위해 실시하는 것만이 아니라 최대응력의 크거나 발생빈도 또는 각 응력성분의 분포상태를 파악하고 이로부터 피로에 대한 평가나 보강 효과를 확인하기 위해 실시한다.

지금까지 많은 응력빈도해석방법이 개발되었으나 응력범위빈도분포의 계산은 Rainflow Counting Method를 사용하여 응력범위 빈도분포를 작성하는 것이 가장 보편적인 방법으로 알려져 있다. Rainflow Counting Method는 계속해서 나타나는 4개의 변동응력치 f_1, f_2, f_3, f_4 가 $f_1 \geq f_3 \geq f_2 \geq f_4$ 또는 $f_1 \leq f_3 \leq f_2 \leq f_4$ 라고 하는 조건을 만족하는 경우에 $|f_2 - f_3|$ 을 응력범위로서 계산하는 것이다. 따라서 f_2 와 f_3 을 변동응력 파형에서 제외한다. 이 과정을 반복하면 그림 2-4와 같은 점중, 점감하는 변동응력 파형이 남으며, 이로부터 최대의 극대값과 최소의 극소값의 차, 두 번째의 극대값과 극소값의 차 등을 응력범위로 하여 계산한다. 이 방법은 변동응력의 극치수열을 단축하게 되고, 계산기의 기억용량과 계산시간을 간략화 시키는 효과가 있고, 동시에 변동진폭응력 하에서의 피로수명평가에 있어서 가장 적절하다고 알려져 있다. 한편, 응력범위빈도분포를 작성할 때, 그 응력범위의 분할폭을 설정할 필요가 있다. 일본강구조협회(JSSC) 지침에서는 분할폭을 최대 응력범위의 20등분 이상으로 하는 것을 추천하고 있다.

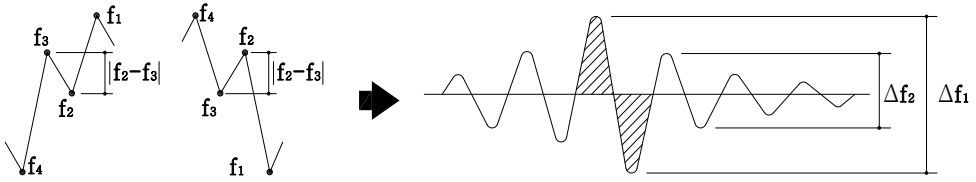


그림 2-4. Rainflow Counting method

2.2.3 잔존수명 평가

선형누적피로피해를 이용한 피로수명 평가방법은 Pamglen-Miner 법칙에 기초하며, 다음과 같은 가정에 근거한다.

- 1) 임의의 응력수준에서의 피로손상의 진행은 그 응력만에 의해 일시적으로 결정되며, 선형으로 누적된다.
- 2) 각 응력수준에 있어서 피로손상의 총합이 일정 값에 도달하면 피로파괴가 된다.

임의의 응력범위 Δf_1 이 반복적으로 작용하여 반복회수 N_1 에서 파괴되는 이음이 있다고 하면 이 이음은 각 하중사이클(cycle)마다 $1/N_1$ 의 피로피해를 받는 것이 되고 그 응력범위가 n_1 번 반복될 경우에는 n_1/N_1 의 피로피해를 입는다. 이 피로피해의 총합이 1이 되면 피로파괴 되며, 식(2.1)과 그림 2-5와 같이 나타낼 수 있다.

$$D = \sum (n_1/N_1) = 1 \quad (2.1)$$

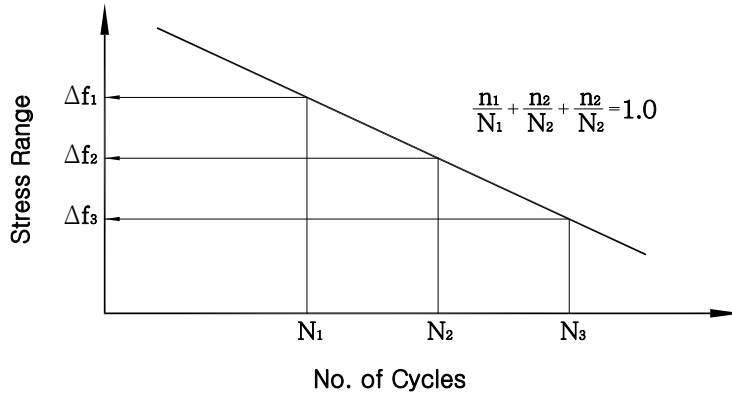


그림 2-5. Palmgren-Miner의 법칙($\Delta f - N$ 선도)

이 법칙을 기존구조물의 피로수명 평가에 적용하는 경우에는 구조물의 피로손상정도를 현재까지 누적된 피로손상 D_{pT} 와 장래에 받게 될 피로손상 D_{aT} 로 구분하여 식(2.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{pT} + D_{aT} = 1 \quad (2.2)$$

식(2.3)에 나타낸 피로손상도는 k 개의 응력범위에 대한 각각의 반복회수와 각 응력범위에 대한 피로수명을 n_i, N_i 로 표시한 것이다. 이것을 다루기 용이하도록 대상으로 하는 응력범위를 임의적으로 정한 1종류의 응력범위로 환산하며, 이 경우에 기준이 되는 응력범위는 일반적으로 검토대상 구조상세의 $N_0 = 2 \times 10^6$ 회의 피로강도이다. 피로손상정도가 등가로 되는 반복회수 N_{0eq} 는 식 (2.4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = \frac{N_{0eq}}{N_0} \quad (2.3)$$

$$N_{0eq} = \sum_{i=1}^k n_i \left(\frac{\Delta f_{i\alpha}}{\Delta f_{f0}} \right)^m \quad (2.4)$$

여기서,

N_0 : 2×10^6 회

$\Delta f_i, n_i$: 변동응력을 응력범위 빈도해석한 i 번째 응력범위와 반복회수

Δf_{f0} : 그 이음의 2×10^6 회 강도

k : 빈도해석한 응력범위의 종류 수

m : 그 이음의 $\Delta f-N$ 선도의 기울기를 결정하는 계수

α : 실응력비(특별히 정하지 않은 경우에는 $\alpha=1.0$ 로 한다)

식(2.2)에 나타낸 관계식과 잔존수명 T_r 을 이용하면 장래에 받을 피로손상 정도는 식(2.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{aT} = (\text{장래에 받을 피로손상정도의 연간누적}) \times T_r \quad (2.5)$$

즉,

$$D_{aT} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{k_a} \left\{ n_{aeq(i)} \left[\frac{\Delta f_{a(l+i)\max(i)} \cdot \alpha}{\Delta f_{f0}} \right]^m \right\} \cdot T_r \quad (2.6)$$

여기서,

N_0 : 2×10^6 회

Δf_{f0} : 그 이음의 2×10^6 회 강도

$\Delta f_{a(l+i)\max(i)}$: 장래에 주행하는 각 차량에 의해서 발생하는 최대응력범위

m : 그 이음의 $\Delta f-N$ 선도의 기울기를 결정하는 계수

$n_{aeq(i)}$: 통과하는 각 차량의 최대응력범위에 대한 1년간 등가반복회수

k_a : 장래에 주행할 것으로 예상되는 차량의 종류 수

α : 실응력비(특별히 정하지 않은 경우에는 $\alpha=1.0$ 로 한다)

$$n_{aeq(i)} = \sum_{j=1}^{mj} \left\{ n_{(i)} \left[\frac{\Delta f_{(i)}}{\Delta f_{a(l+i)\max}} \right]^m \right\} \cdot N_y \quad (2.7)$$

여기서,

$\Delta f_{(i)}, n_{(i)}$: 변동응력에 대한 빈도해석을 통해 얻어진 각 응력범위와 그 반복회수

mn : 1대의 차량이 통과할 때의 응력범위의 수

N_y : 1년간 통과한 차량대수

n_{ad} : 1일 통과대수

따라서 구조물의 잔존수명은 식(2.8)과 같이 계산된다.

$$T_r = \frac{N_0(1 - D_{pT})}{\sum_{i=1}^{ka} \left\{ n_{aeq(i)} \left[\frac{\Delta f_{a(l+i)\max(i)} \cdot \alpha}{\Delta f_{f0}} \right]^m \right\}} \quad (2.8)$$

즉, 잔존수명 T_r 은 현재까지 받은 피로손상정도의 누적 D_{pT} 와 장래 통행할 차량에 의한 최대응력범위 및 차량 1대당 등가반복회수에 의해 결정된다.

피로안전성 평가시 적용된 일본 강구조협회(JSSC)의 피로설계곡선 및 기본 허용응력범위($m=3$)는 그림 2-6 및 표 2-2와 같다.

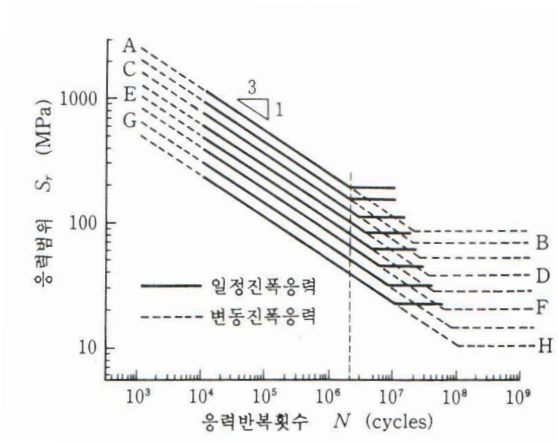


그림 2-6. 피로 설계 곡선

표 2-2. 일본 강구조협회의 기본 허용응력범위

피로등급	2.0×10^6 회에 대한 기본허용응력범위 Δf_f	변동진폭응력범위에 대한 하한계 Δf_{ve}
A	190	88 (2.0×10^4)
B	155	72 (2.0×10^4)
C	125	53 (2.6×10^4)
D	100	39 (3.4×10^4)
E	80	29 (4.4×10^4)
F	65	21 (5.6×10^4)
G	50	15 (7.7×10^4)
H	40	11 (1.0×10^8)

(단위 : MPa)

3장. 대상교량의 제원 및 계측데이터 분석

3.1 대상교량 제원 및 특성

본 연구의 대상교량은 고속도로에 위치한 1981년 준공된 강바닥판 박스거더교로서 총경간수는 20개이고 18경간의 본교와 양측에 단순경간의 육교로 구성되어 있다. 1995년, 대상교량의 종집측 3경간 연속부는 기존 교량의 램프 및 선형을 개량하여 4차선에서 8차선으로 확장하였다.

대상교량은 6개의 3경간 연속구조(252.9m(=3@84.3m))로 구성되어 있으며, 일반구간의 교폭은 22.0m로서 16.6m의 4차선도로와 양측에 2.7m의 보도로 구성되어 있다. 특히 이 교량은 강바닥판위에 8cm 두께의 아스팔트포장을 시공하여 가능한 고정하중을 경감시킨 구조로 되어 있다. 대상교량의 상부 및 측면 전경을 그림 3-1에 나타내었다.

대상교량의 단면제원을 그림 3-2에 나타내었다. 대상교량의 바닥판은 강바닥판으로 되어있으며, 강박스거더의 상부플랜지 돌출부위에 강바닥판이 볼트로 연결되어 있다. 즉, 강박스구간에서는 강박스의 상부플랜지가 바닥판의 역할을 하며, 강박스 사이의 구간에서는 리브로 보강된 강바닥판이 바닥판의 역할을 하고 있다. 교량의 바닥판을 강바닥판으로 시공한 이유는 경간장을 크게 하기 위해 교량 상부구조물의 자중을 최대한 경감시킬 필요가 있었기 때문으로 추정된다. 강바닥판의 특징은 단일공중으로 시공성이 양호하고 공기가 단축되는 반면 강바닥판의 큰 변형으로 인해 아스팔트포장의 손상이 쉽게 발생하는 경향이 있고, 큰 경간장과 상대적으로 작은 강성으로 인해 상부구조물의 진동이 크다는 단점이 있다.

그림 3-3에 나타난 바와 같이 대상교량의 강바닥판 구조형식은 세로리브가

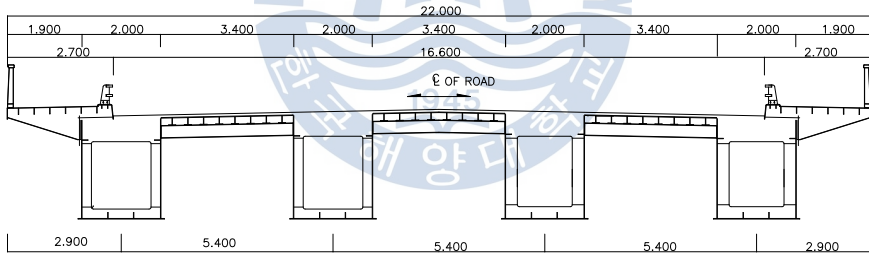
개단면 리브(역T형)으로 구성되어 있고, 세로리브 간격은 40cm이다. 또한 세로리브는 2.4m 간격으로 설치되어 있는 H형상 가로보에 의해 강박스거더와 연결되어 있다.



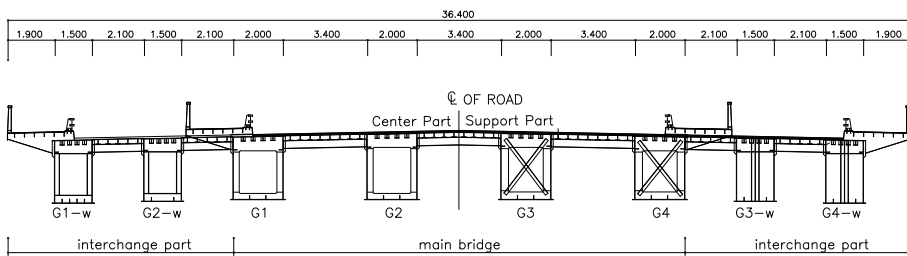
(a) 상부전경

(b) 측면전경

그림 3-1. 대상교량의 전경



(a) 시점측 단면 제원(재하시험 계측단면)



(b) 종점측 단면제원(교통류 흐름하의 계측단면)

그림 3-2. 대상교량의 단면제원

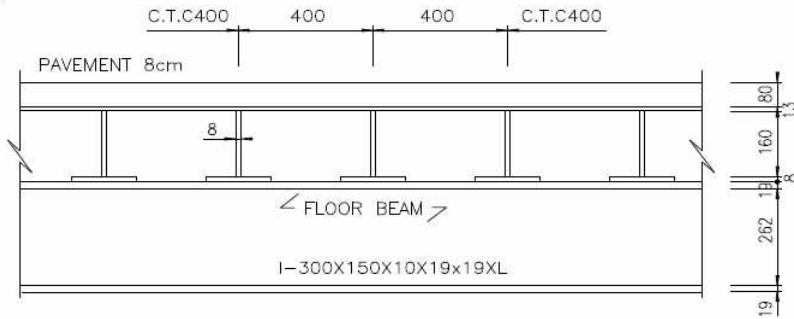


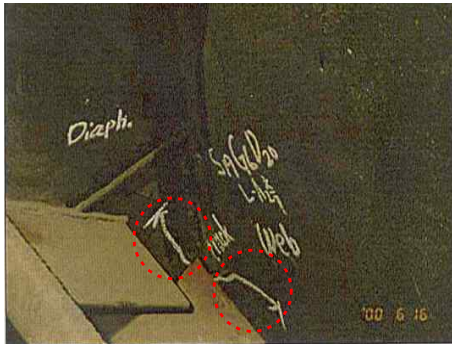
그림 3-3. 강바닥판 상세도

3.2 피로균열 현황

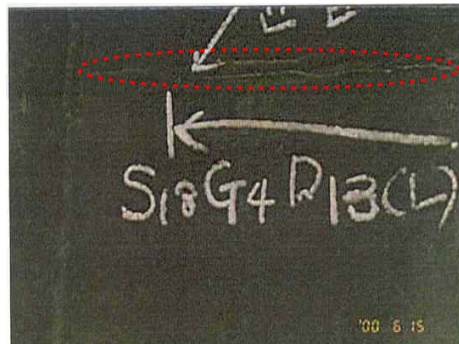
관련 자료(한국도로공사, 2000)에 의하면 대상교량은 1981년 준공된 교량으로, DB-18로 설계되어 있으나 중차량이 빈번히 통행하여 균열이 다수 발생한 상태이다. 피로균열은 주로 브레이싱, 다이아프램 및 가로보 등 2차부재의 용접부에서 발생하였으며, 방치할 경우 주부재로까지 발전할 가능성이 있으며, 전반적으로 균열의 초기 발전단계로 판단되었다. 그림 3-4에 대상교량의 피로균열 사례를 나타내었다.

그림 3-4(a)에 나타낸 바와 같이 대상교량의 확폭구간에서 기존교량의 외측주형에서 복부균열이 8개소 발견되었으며 이는 확폭교량과 기존교량의 브레이싱 개수의 차이로 인한 처짐불균등 및 응력집중에 의한 것으로 판단되었다. 대상교량의 박스내부 다이아프램은 4개의 판으로 용접하여 구성되어 있으며 그림 3-4(b)에 나타낸 것과 같이 일부 다이아프램 용접부에서 균열이 발견되었다. 내부 다이아프램은 주부재는 아니지만 과하중에 의한 손상징후를 보이고 있다. 내부 다이아프램과 세로리브의 접속부측에서는 그림 3-4(c)에 나타낸 것과 같이 하향 45° 방향으로 균열이 발견되었으며 일부 다이아프램에서는 균열 발생 후 이미 강판보강을 한 흔적도 발견되었다. 그림 3-4(d)~(f)에 나타낸 것과 같이 거셋용접부 균열, 가로보 단부 및 중앙부 균열, 가

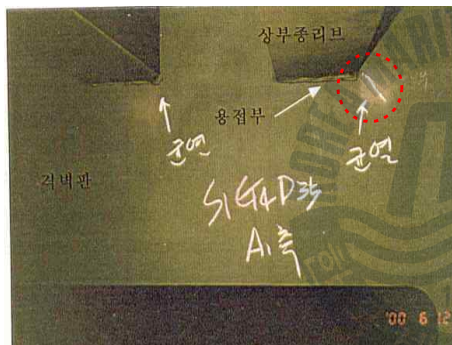
로보 거셋연결부 용접부 및 볼트주변 균열 등도 조사되었으며, 발생한 균열들은 설계하중을 초과하는 중차량들에 의해 발생한 것으로 추정되었다.



(a) 복부



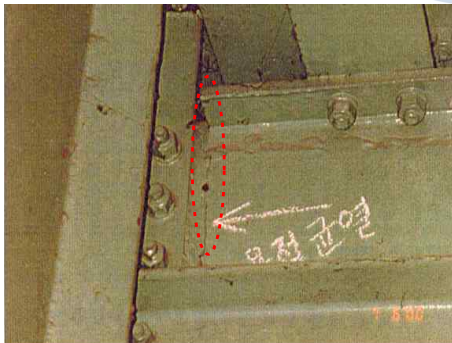
(b) 내부다이아프램 용접이음부



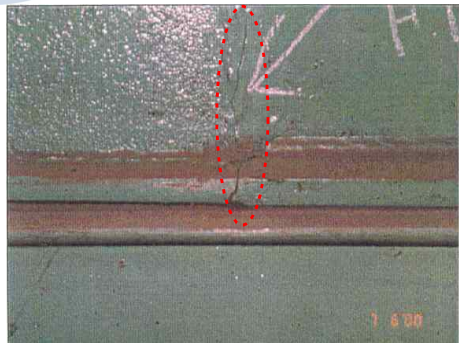
(c) 다이아프램과 세로리브 연결부



(d) 브레이싱 거셋용접부



(e) 가로보 지점부 보수용접부



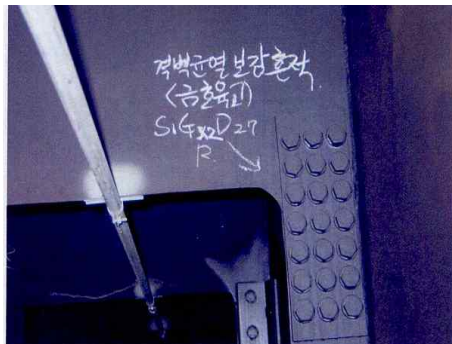
(f) 단부가로보 중앙부

그림 3-4. 대상교량의 피로균열 사진(1)

대상교량에 관한 다른 자료(한국도로공사, 2005)에 의하면, 기존에 발생한 복부의 균열은 덧댐판으로 보강이 완료되었으나, 가로보 단부, 브레이싱 거셋 플레이트 용접부, 다이아프램 수평 용접부, 다이아프램 개구부 모서리, 세로 리브 용접부 모서리 등 다양한 균열이 추가로 발생되었고, 균열의 발생개소가 증가한 것으로 조사되었으며, 그림 3-5에 대표적인 추가 피로균열 사례를 나타내었다. 대상교량의 확폭구간에서 조사된 외측주형의 복부균열에 대해서는 그림 3-5(a)에 나타난 것과 같이 X-브레이싱을 추가로 설치하여 처짐불균 등 및 응력집중 현상을 해소한 것으로 판단된다. 그림 3-5(b)~(c)에 나타난 것과 같이 대상교량의 박스내부 다이아프램은 기존 균열보수부 외에 추가로 다이아프램 용접부에서 균열이 발생되었다. 다이아프램 개구부 모서리에서 균열이 발생하였고, 수평보강재와 스킵 구멍에서 균열이 시작되었으며, 이 균열은 수평보강재와 다이아프램 용접부를 따라 발전되고 복부까지 균열이 발생하였다. 그림 3-5(e)~(f)에 나타난 것과 같이 브레이싱부의 주요결함으로는 기존 X-브레이싱에서 발견되었던 상·하부 거셋용접부 균열, 가로보 단부 균열 등이 조사되었으며 균열의 형상, 위치 등이 다양하고 광범위하게 발생되어 있는 상태로 추가 설치된 브레이싱에서는 손상이 발견되지 않았다.



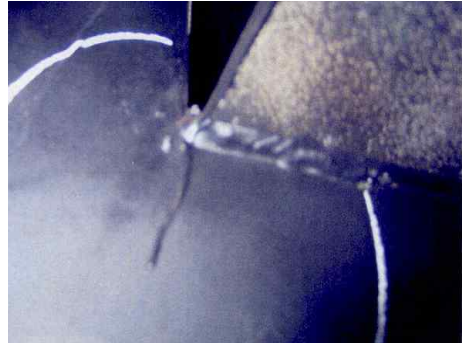
(a) 브레이싱 보강현황



(b) 내부 다이아프램 용접이음부 보수부



(c) 다이어프램 균열부 확대사진



(d) 다이어프램 세로리브 연결부



(e) 거룻용접부



(f) 단부가로보 용접부

그림 3-5. 대상교량의 피로균열 사진(2)

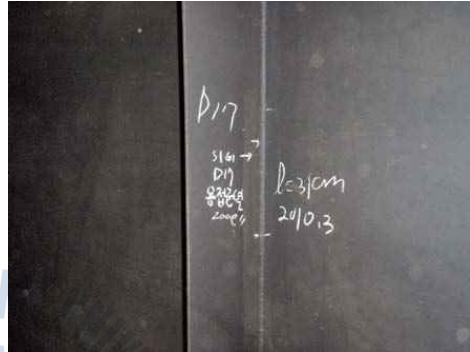
2010년에 실시한 대상교량에 대한 정밀안전점검에서 조사된 피로균열의 수량을 표 3-1에 대표적인 균열사례를 그림 3-6에 나타내었다. 표 3-1에서 나타난 바와 같이 세로리브 용접부 및 다이어프램 용접부에서 다수의 균열이 발견되었으며, 다이어프램 용접부 균열로 인해 균열보수가 실시된 부위 외에 다이어프램 용접부에서 추가로 균열이 발견되었다. 강바닥판 교량의 특성인 큰 진동과 처짐에 의해 강박스의 변형이 비교적 크게 발생하고, 이로 인해 다이어프램 용접부 중에서 용접 품질이 상대적으로 저하된 부분을 중심으로 균열이 발생한 것으로 판단된다. 특히, 다이어프램 전·후방측 복부판에 그림 3-6(d)와 같이 길이 약 6cm의 균열이 발견되었다. 이 균열은 다이어프램의 균열이 주부재인 복부판으로 진행된 것이다. 다이어프램은 강박스의 형상을 유지시켜 원래의 기능을 발휘하게 하는 보조부재로써 다이어프램에 발생한

표 3-1. 대상교량 피로균열 수량

결함내용	세로리브 용접부	다이아프램 균열	다이아프램 용접부	복부 균열
수량	36EA	15EA	28EA	2EA (격벽전·후)



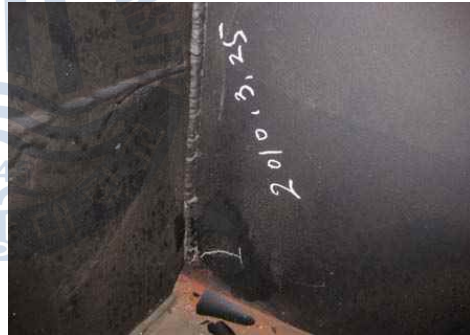
(a) 다이아프램 용접부 균열



(b) 복부판과 다이아프램 용접부 균열



(c) 다이아프램 균열



(d) 다이아프램 용접부 균열의 복부판
진전

그림 3-6. 대상교량의 피로균열 사진(3)

균열은 교량의 내하력에 직접적인 영향을 미치지 않는으나, 방치할 경우 균열이 진전되어 주부재인 상·하부 플랜지나 복부판의 손상으로 진행될 가능성이 있으므로, 균열보수를 실시하여 성능저하를 사전에 방지해야 할 필요가 있다.

상부플랜지 세로리브와 다이아프램과의 용접부에서 발생한 균열은 세로리

브와 다이어그램의 상대 변형으로 인해 발생한 것으로서 대부분 용접부에 국한된 균열이며, 다이어그램으로 진전된 일부 개소는 빠른 시일 내에 보수·보강을 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

3.3 현장계측 개요

3.3.1 재하하중에 의한 계측

의사정적 재하시험은 정·동적 특성시험을 연계하여 수행할 수 있으며, 축중을 알고 있는 시험차량을 시험대상 경간에 저속(20km/h 이하)으로 주행시켜서 계측한 응력 파형상의 동적효과를 제거함으로써 정적효과를 얻을 수 있는 재하시험이다. 의사정적시험을 통하여 차량의 교축방향 위치에 따른 전반적인 교량의 거동특성을 규명한 후 구조계산에서 산출된 이론값과 비교하여 내하력 평가를 수행할 수 있으므로 재하시험 결과 분석 오류를 최소화 할 수 있는 장점이 있다.

대상교량의 재하시험은 대상교량의 전체적인 구조거동 특성을 조사하기 위하여 그림 3-7에 나타난 것과 같이 6개의 3경간 중 시점측 측경간에 대해서 실시하였다. 재하차량은 총중량이 각각 312.9kN, 292.6kN 덤프트럭을 사용하였으며, 재하차량의 축중 및 제원은 표 3-2 및 그림 3-8과 같다. 처짐 및 변형률센서 부착위치는 그림 3-9에 나타난 것과 같이 측경간 정모멘트부를 대상으로 하였다.

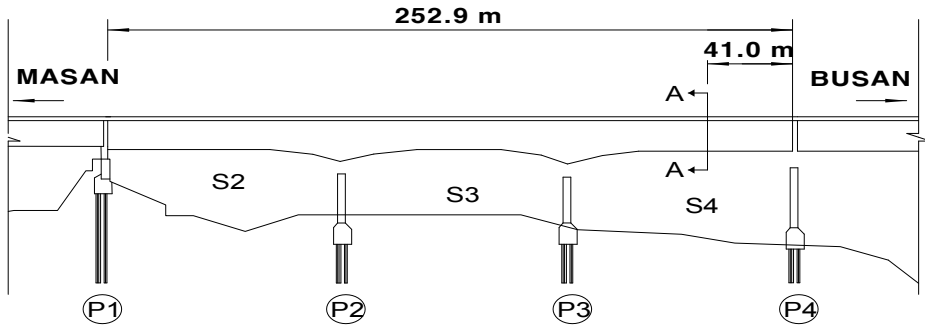


그림 3-7. 재하시험 구간

표 3-2. 재하차량 중량

	First Axle	Second Axle	Third Axle	Gross Weight
A 트럭	59.1	126.9	126.9	312.9
B 트럭	66.2	113.2	113.2	292.6

(단위 : kN)

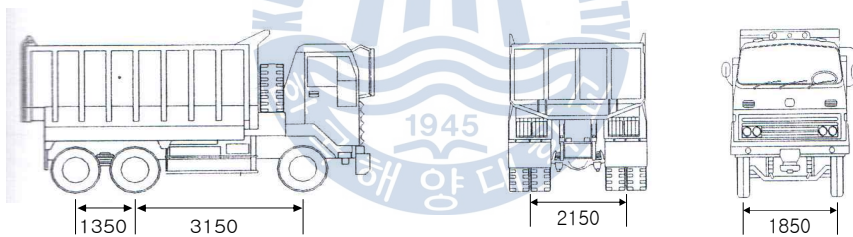


그림 3-8. 재하차량 제원

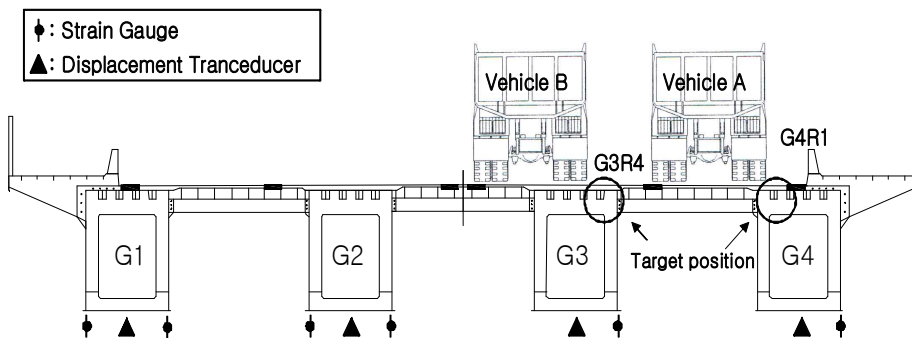


그림 3-9. 재하시험에서의 센서부착 위치

3.3.2 실교통류 흐름하에서의 계측

대상교량의 주거더에 대한 응력범위 계측은 관련 자료를 통해 균열이 확인된 구조상세를 대상으로 실시하였으며, 이 중 계측이 용이한 S18경간 L/2 지점을 대상으로 실시하였다. 계측센서 부착위치 및 설치현황을 그림 3-10 및 그림 3-11에 나타내었다. 계측센서는 다이아프램의 용접부 및 우각부에 2개소, 강바닥판과 다이아프램, 세로리브와 다이아프램 및 강바닥판과 세로리브의 필렛용접부에 각 2개소씩 총 8개소에 변형률센서를 설치하였다. 측정방법은 통행차량의 주행속도 및 교통량 등을 고려하여 오전 8~10시, 오후 2~4시, 오후 10~12시까지 2시간씩 1일 3회에 걸쳐 측정하였다. 또한 그림 3-12와 같이 공용중 실교통량을 파악하기 위해 측정시간대별 교통량조사도 실시하였다.

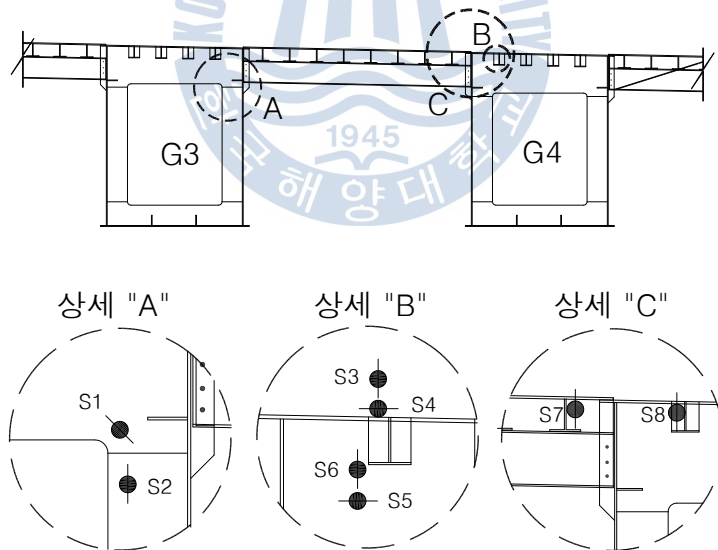
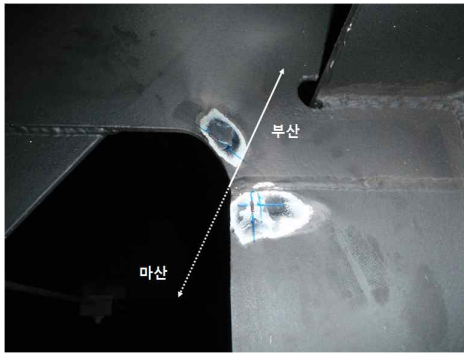
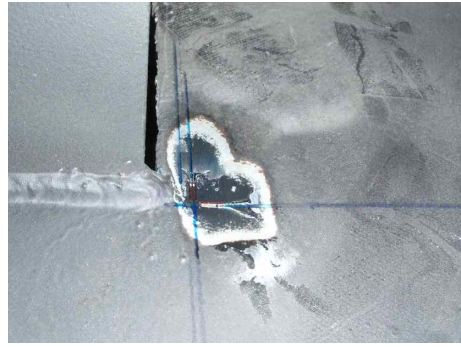


그림 3-10. 실교통류 흐름하 계측에서의 센서부착 위치



(a) 다이어프램 용접부(S1, S2)



(b) 다이어프램 세로리브 용접부(S5, S6)

그림 3-11. 실교통류 흐름하 계측에서의 센서 설치 현황

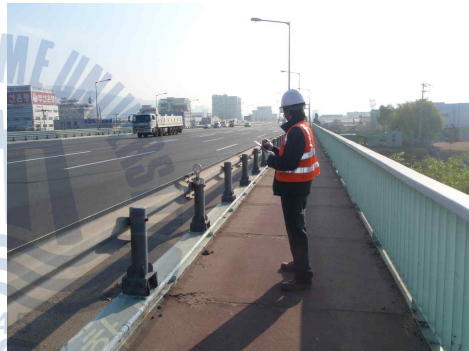


그림 3-12. 시간대별 교통량 조사 사진

3.4 실교통류 흐름하의 계측 분석

3.4.1 변위 계측 결과 분석

실교통류 흐름하에서의 계측에 의해 얻어진 데이터를 데이터후처리 프로그램인 OriginPro 7.5를 사용하여 실시간 파형을 해석하기 용이하도록 변환하였다. 그림 3-13에 G3 변위의 실시간 데이터에 대한 필터링 결과의 일례를 나타내었다.

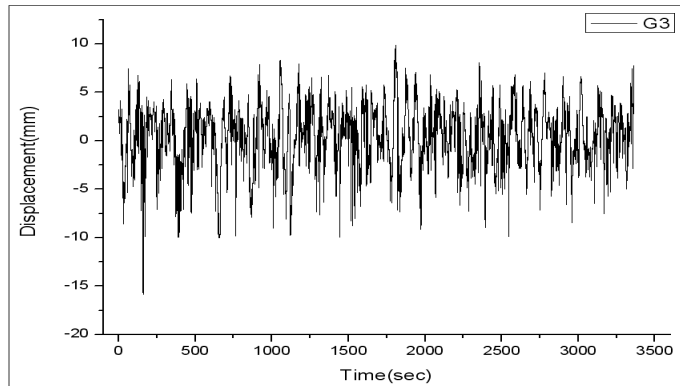
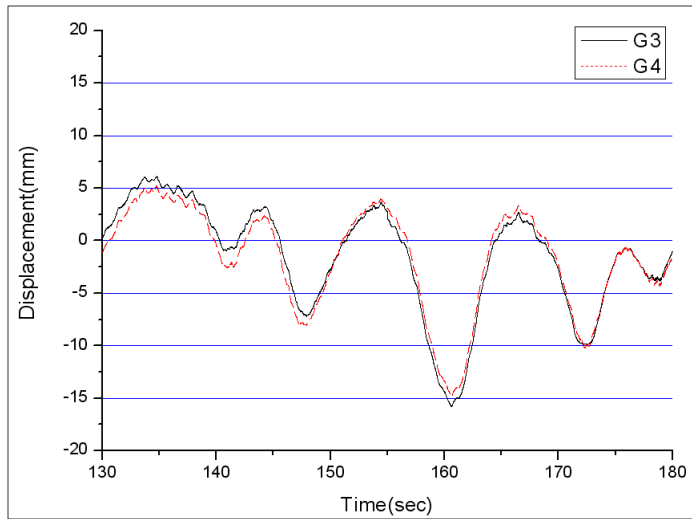


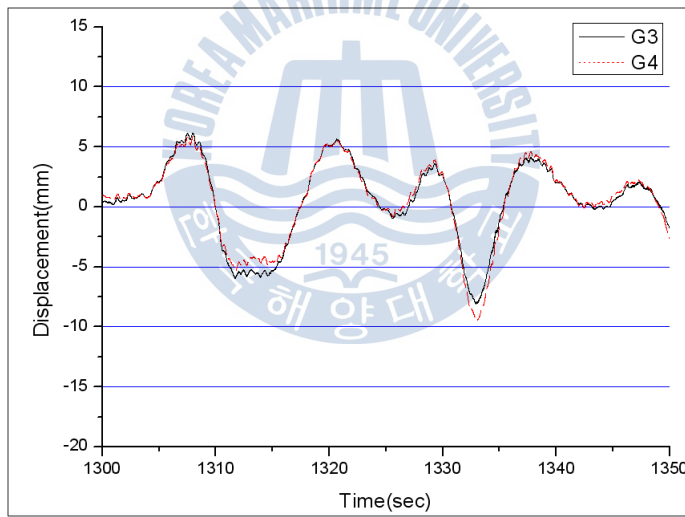
그림 3-13. G3의 변위 실시간 데이터

변환된 실시간 변위 및 변형률데이터를 사용하여 대상교량의 구조적 거동 및 특성을 분석하였다. 대상교량은 교통량이 많은 왕복 8차선 교량이므로 응력분포 특성을 파악하기 어렵기 때문에 상대적으로 교통량이 적고 응력분포 특성이 가장 잘 나타난 시간대의 데이터를 사용하여 분석을 실시하였다.

그림 3-14에 1시간대 측정데이터 중에서 최대변위가 발생하는 구간에 대하여 변위이력곡선을 나타내었다. 그림 3-14(a)에 나타낸 바와 같이 거더 G3의 최대 하향변위는 15.81mm가 발생하였으며 이때 거더 G4의 최대 하향변위는 14.81mm로 나타났다. 그림 3-14(b)에 나타낸 바와 같이 거더 G4의 최대 하향변위는 9.42mm로 나타났으며 이때 거더 G3의 최대 하향변위는 8.94mm로 나타났다. 8시~9시 데이터에서 최대 변위가 발생하였을 시 거더의 상대변위는 약 6.7% 이며, 15시~16시 데이터에서 최대 변위가 발생하였을 시 거더의 상대변위는 약 5.4% 이다. 또한 그림 3-14(b)에서 거더 G3와 거더 G4의 최대 변위가 교번으로 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 거더별 변위차이가 상대적인 면외변위를 유발하게 되어 피로균열의 발생 원인의 하나가 되었을 것으로 판단된다.



(a) 8시~9시



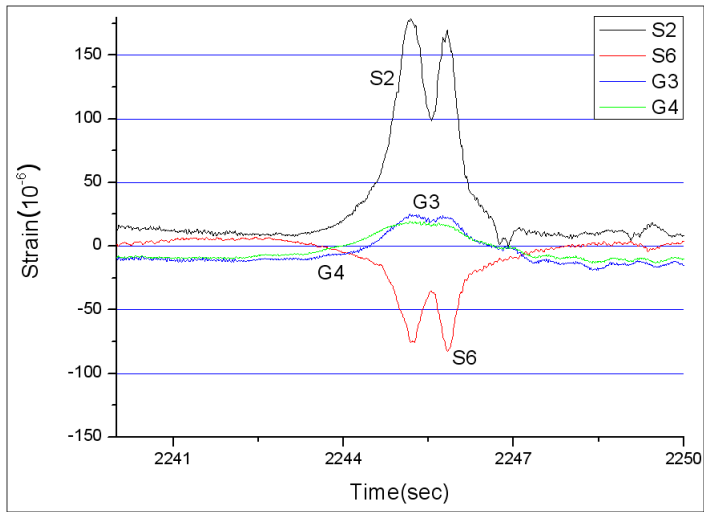
(b) 15시~16시

그림 3-14. 변위 이력곡선의 일례

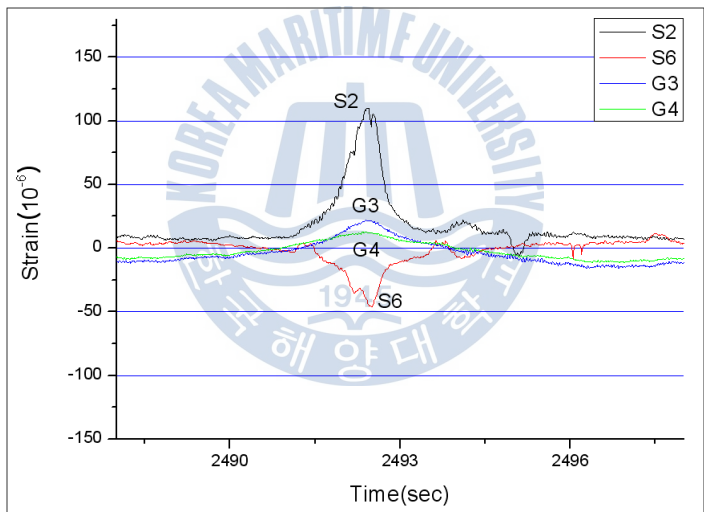
3.4.2 변형률 계측 결과 분석

이 절에서는 실교통류 흐름하 계측에서의 변환된 변형률 데이터를 사용하여 대상교량의 구조적 거동 및 특성을 분석하였다.

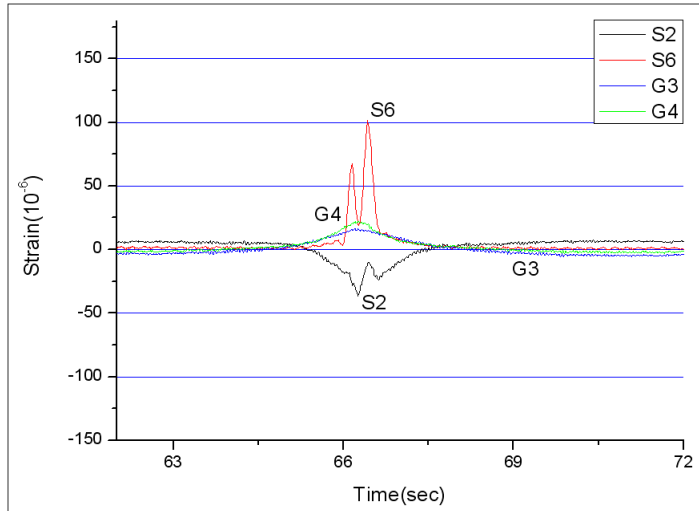
그림 3-15에 15~16시 및 23~24시에 측정한 데이터에서 단일 차량이 이동함에 따라 발생하는 변형률 이력곡선의 일례를 나타내었다. 그림 3-15(a)~(b)에 나타낸 것과 같이 거더 G3의 변형률이 거더 G4의 변형률보다 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 거더 G3 위로 차량이 주행하기 때문이라 판단된다. 거더 G3 위로 차량이 주행할 시 거더 G3의 다이어프램에 부착되어 있는 S2가 차량 하중의 영향을 받아 변형률이 크게 나타나며, S6의 경우 S2와는 반대의 응력범위를 나타내었다. 그림 3-15(c)~(d)에 나타낸 것과 같이 거더 G4의 변형률이 거더 G3의 변형률보다 크게 나타났다. 이는 거더 G4 위로 차량이 주행하는 것이라 판단되며, 거더 G4의 세로리브 용접부에 부착되어 있는 S6가 차축의 영향을 직접적으로 받아 큰 응력 파형을 나타내고 있다. 거더 G3의 다이어프램에 설치된 S2는 비교적 아래에 설치되어 있기 때문에 차축의 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났다. 또한 S2의 변형률은 S6의 변형률보다 긴 파형을 나타내었으며, 거더와 비슷한 장주기의 파형을 나타내었다. 이는 S2가 설치되어 있는 다이어프램은 차량 전체 하중에 의한 면외변형을 일으키기 때문이라 판단된다.



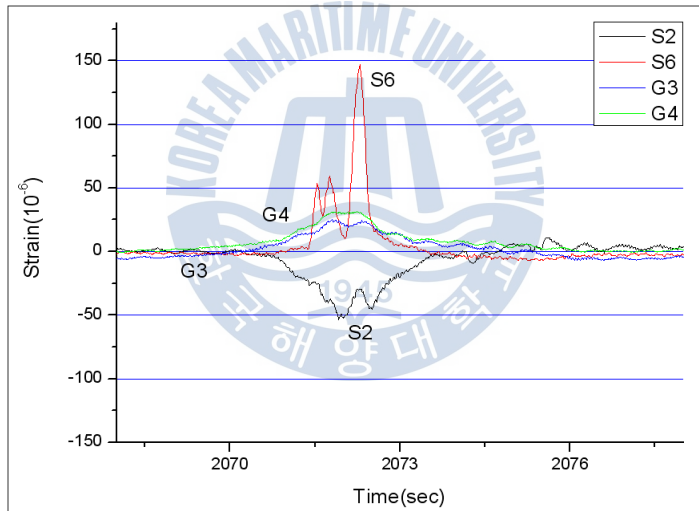
(a) 15시~16시(2245sec)



(b) 15시~16시(2492sec)



(c) 23시~24시(66sec)

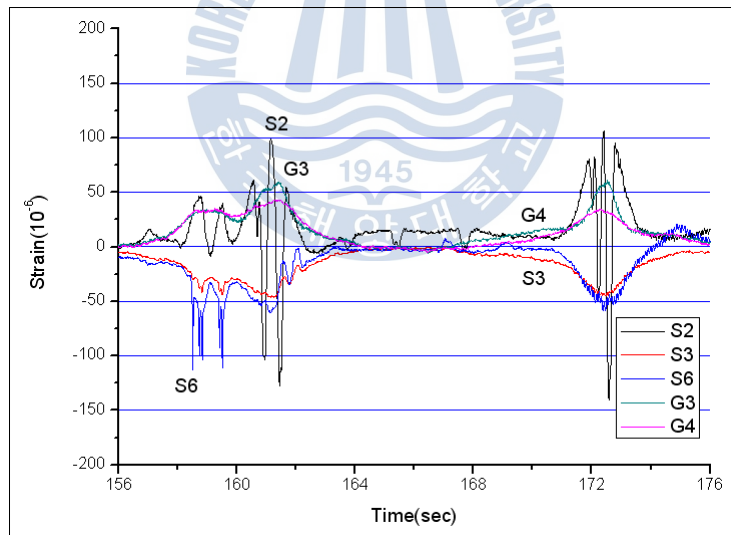


(d) 23시~24시(2072sec)

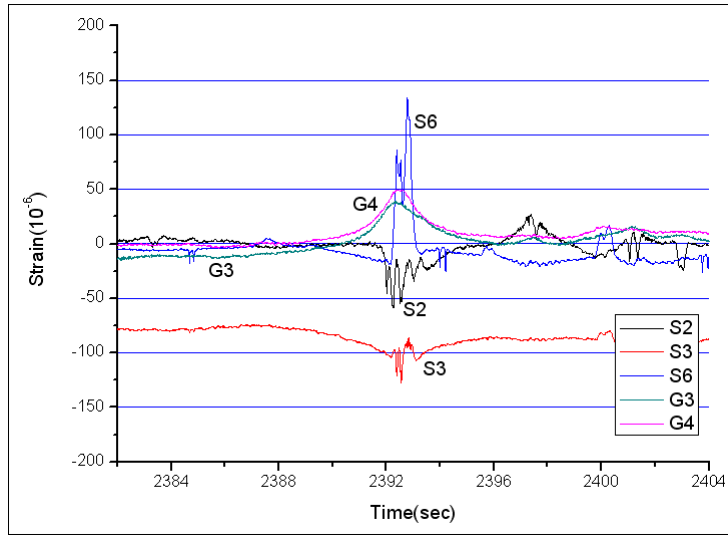
그림 3-15. 단일 하중 재하시 변형률 이력곡선 일례

그림 3-16에 G3 및 G4의 최대 변형률이 발생한 시간대의 변형률 이력곡선을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 거더의 거동 특성과 구조상세의 거동 특성은 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, 강바닥판 교량에서 거더의 파형은 전체 하중 크기에 영향을 받는 장주기의 파형을 나타내나, 세로리브 등과 같이 국부거동의 영향을 받는 구조상세에 대한 파형은 재하차량의 축중

및 축간격의 영향을 직접적으로 받아 단주기의 파형을 나타내고 있다. 또한 그림 3-16(a)의 160~164초에서 S2의 파형이 그림 3-15(a) 및 (b)의 단일하중이 재하시와는 다르게 교번으로 나타나는 것은 거더 G3 뿐만 아니라 반대방향으로 주행하는 거더 G2에서도 차량이 지나감에 따라 대상 구조상세는 교차되는 차량하중을 받기 때문이라 판단된다. 그림 3-16(a)의 173초 전후 S2의 파형에서도 같은 이유로 인한 응력파형이 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 이로부터 하중재하의 직접적인 영향을 받는 구조상세와 간접적인 영향을 받는 구조상세의 거동은 다른 특성을 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 피로 균열은 주거더가 아니라 재하하중의 영향에 따라 인장 또는 압축성분의 교번 특성을 나타내고 있는 2차부재 용접부 등의 구조상세에서 발생 가능성이 크다는 것을 알 수 있다.



(a) G3 max



(b) G4 max

그림 3-16. G3 및 G4가 max일 경우 변형률 이력곡선

3.5 피로수명 및 잔존수명 평가결과

실교통류 흐름하에서 얻어진 실시간 변형률과의 계측데이터를 Rain Flow 법에 의하여 빈도해석을 실시하고 이를 토대로 대상교량의 구조상세에 대한 피로평가를 실시하였다.

그림 3-17 및 그림 3-18은 응력계측을 통해 얻어진 응력시간이력곡선과 이에 대한 빈도해석결과의 일례를 나타내었다. 이러한 계측자료와 2.2절에서 설명한 방법에 따라 센서 위치별 최대응력 범위 및 1년간 등가반복횟수를 구한 것을 표 3-3 및 표 3-4에, 표 3-5는 센서 위치별 피로수명 및 잔존수명을 추정된 결과를 나타내었다. 각 대상 구조상세에 대한 피로수명은 그림 3-17 및 그림 3-18에 나타낸 것과 같은 응력범위 히스토그램을 사용하고 Miner rule 에 기초하여 계산되었다. 표 3-5에서의 피로범주는 도로교설계기준의 피로범주 및 허용피로응력범위를 적용하였다. 또한 피로수명은 기존 연구결과에 기초하여 등가응력법과 누적손상도법으로 정리하여 나타내었다. 여기서의 피로

수명은 절대적인 물리적인 의미를 가지는 것이 아니라 상대적인 피로손상의 개념에 의한 피로수명이다. 따라서 이 개념에 의한 피로수명은 향후 유지관리에서 우선도의 지표로 사용하면 유효할 것으로 판단된다.

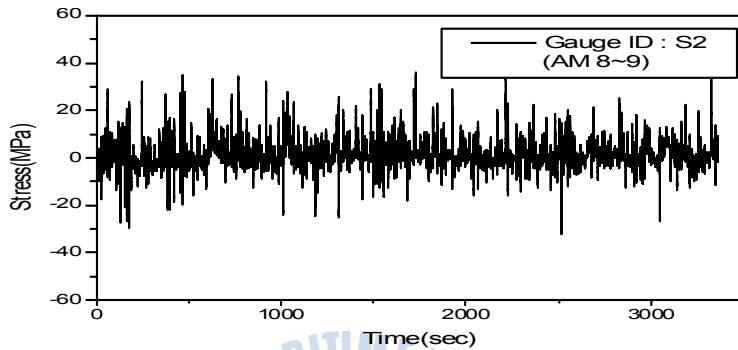


그림 3-17. 응력이력곡선 일례

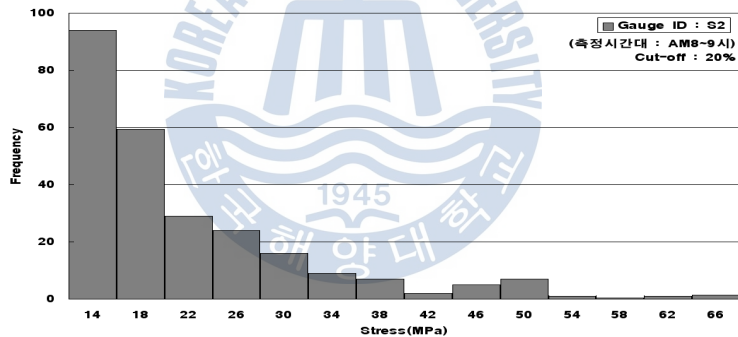


그림 3-18. 응력빈도 그래프 일례

표 3-5에의 결과로부터 대상교량의 주요 구조상세에 대한 피로수명 및 잔존수명을 평가한 결과, 피로균열이 발생하지 않은 강박스 상부플랜지(S3, S4) 및 강바닥판(S7)은 공용년수를 고려하더라도 어느정도의 피로수명을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 다이아프램 용접부(S2) 및 세로리브와 다이아프램의 필렛용접부(S6)의 피로수명은 60년, 잔존수명은 32년으로 추정되었으며, 이들 부재는 기존 연구에서도 피로균열이 보고되었던 구조상세이므로 주기적인 유지관리를 통해 피로안전성을 확보하여야 할 것으로 판단된다.

표 3-3. 장래에 주행하는 각 차량에 의해서 발생하는 최대응력범위

Gauge No	$\Delta f_{a(l+i)\max(i)}$					
	AM 8~9	AM 9~10	PM 2~3	PM 3~4	PM 10~11	PM 11~12
S1	45.100	45.000	39.000	41.000	26.650	25.350
S2	66.000	69.700	98.000	82.000	51.250	49.200
S3	36.900	71.750	22.550	23.400	51.450	20.500
S4	23.500	18.500	18.500	15.600	20.500	20.500
S5	13.325	11.890	12.095	10.250	11.700	7.400
S6	12.300	12.095	12.300	10.250	9.250	7.800
S7	8.147	13.325	11.890	12.095	10.250	11.700
S8	7.505	12.300	12.095	12.300	10.250	9.250

(단위 : MPa)

표 3-4. 최대응력범위에 대한 1년간 등가반복회수

Gauge No	$n_{aeq(i)}$					
	AM 8~9	AM 9~10	PM 2~3	PM 3~4	PM 10~11	PM 11~12
S1	11736.94	14607.30	22580.36	13223.22	11177.76	9990.78
S2	25085.72	19320.18	11329.60	13481.64	5832.70	3057.24
S3	2756.48	730.00	9744.04	5311.48	778.18	2317.02
S4	9196.54	15785.52	15906.70	14932.88	3379.90	3442.68
S5	4311.38	13944.46	14627.74	6679.50	3733.22	4368.32
S6	7234.30	14951.86	15167.94	13372.14	3997.48	4254.44
S7	15413.22	29350.38	19945.06	21895.62	5875.04	11894.62
S8	18978.54	19844.32	15305.18	16933.08	8933.74	10957.30

주) N_y 는 6시간 측정을 하나의 차량으로 간주하고 1일간 4대, 1년에 1460대가 통과하는 것으로 간주

표 3-5. 피로수명 및 잔존수명 평가결과

Gauge No	$\sum_{i=1}^{k_n} \left\{ n_{aeq(i)} \left[\frac{\Delta f_{a(l+i)\max(i)^\alpha}}{\Delta f_{f0}} \right]^m \right\}$	피로등급	허용피로응력 범위 (Δf_f) (MPa)	피로수명 (년)	잔존수명 (년)
S1	2577	C	125	775	747
S2	33000	D	100	60	32
S3	1394	E	80	1433	1405
S4	851	E	80	2350	2322
S5	7556	E	80	264	236
S6	32873	E	80	60	32
S7	159	D	100	12585	12557
S8	129	D	100	15453	15425

주) 잔존수명은 피로수명에서 대상교량의 준공 후 공용년수(29년)만큼 감산하여 추정

4장. 구조해석을 통한 거동 특성 분석

일반적으로 격자모델을 이용한 영향선 해석은 주거터를 대상으로 한다. 그러나 앞에서 기술한 바와 같이 실제 피로균열은 국부거동의 영향을 받는 2차 부재에서 대부분 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 대상교량의 실제 거동을 모사하기 위하여, 격자구조와 판요소를 결합한 모델을 사용하여 재하 위치 변화에 따른 응력 특성 및 구조거동을 해석적으로 평가하였다.

4.1 재하하중에 의한 구조해석

4.1.1 구조해석 모델 검증

현장계측 결과와의 비교를 통하여, 대상교량의 전체적인 거동을 평가하고 구조해석의 타당성 검증을 위해 구조해석을 실시하였다. 구조해석 구간은 대상교량의 본선 구간이며 주된 구조형식인 3경간 연속교에 대하여 수행하였다. 구조해석은 그림 4-1(a)와 같은 격자구조 및 그림 4-1(b)와 같이 격자구조와 판요소를 결합하여 모델링한 상세구조모델을 사용하여 실시하였다. 그림 4-1(c)는 판요소로 모델링한 부분을 나타내었다. 상세구조모델에서 박스의 판은 판요소만 사용하면 비틀림, 전단지연 현상을 과대하게 평가하기 때문에 격벽, 상·하부 세로리브, 수평보강재를 구조해석 모델에 포함시켜서 박스의 판에 작용하는 수직응력이 실구조물의 응력과 가능한 동일한 결과가 도출되도록 모델링 하였다. 빔요소와 판요소는 Rigid Link를 사용하여 연결하였으며, 상세구조모델에서 판요소의 최소 크기는 5mm로 분할하여 구조해석을 실시하였다. 구조해석에서 경계조건은 일반적인 연속교의 경계조건을 적용하였

으며, 하중은 표 2-1 및 그림 2-8에서 나타내었던 재하시험시 사용한 덤프트럭 하중을 사용하였다. 구조해석은 범용구조해석 프로그램인 MIDAS 2009 ver 2.0.0을 사용하였다.

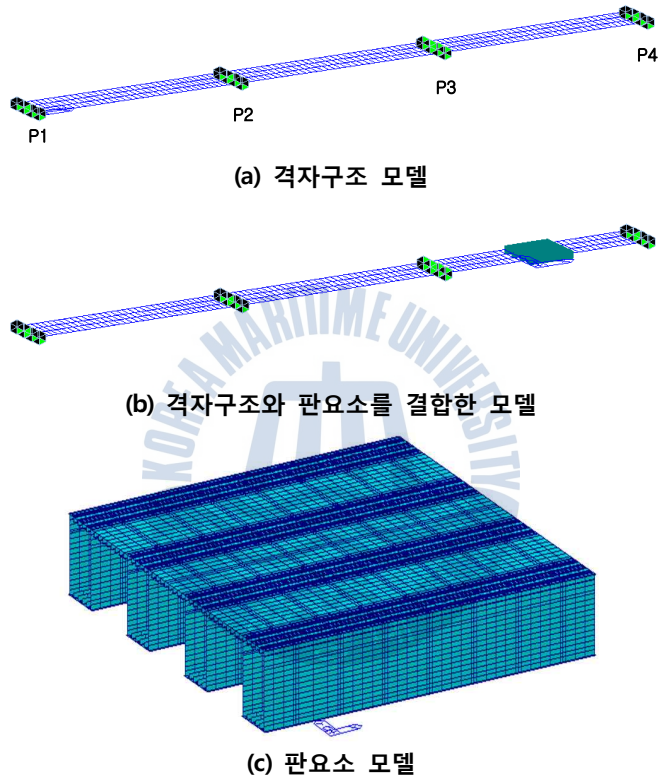


그림 4-1. 재하하중에 의한 구조해석 모델

격자구조와 판요소를 결합한 모델을 사용하여 영향선 재하에 의해 산출된 구조해석 결과와 20km/h 주행 하에서의 계측 결과를 정리하여 표 4-1에 나타내었다. 그림 4-2는 재하차량을 이용한 주행시험(20km/h) 및 구조해석에 의해 얻어진 변위를 비교한 것이다. 여기서의 측정값은 측정데이터에서 충격의 영향을 없앤 데이터의 최정점 값과 같다. 충격의 ddugid를 제거하는 방법으로는 측정 데이터를 0.8~1.0Hz의 적절한 Low Pass Filter를 이용하여 충

격과형을 Smoothing화하여 얻어졌다. 표 4-1에 나타난 것과 같이 구조해석 결과는 계측 결과와 다소 차이가 있는 것을 알 수 있다. 구조해석 결과가 계측치보다 다소 크게 나타나는 것은 구조해석시 차량의 횡방향 재하위치의 차이와 포장 및 2차부재 등의 구조상세가 모두 모델링 되지 않아 전체적인 강성 차이 등에 의한 것으로 판단된다. 그러나 그림 4-2에 나타난 것과 같이 계측치와 구조해석 결과값의 전체적인 횡분배는 매우 유사한 거동을 나타내므로 대상교량에 대한 구조해석 모델은 타당성을 갖고 있는 것으로 판단된다.

표 4-1. 재하시험 계측값과 구조해석의 변위 비교

	G1	G2	G3	G4
계측값	12.03(0.59)	14.53(0.71)	18.38(0.91)	20.31(1.00)
격자해석	16.35(0.66)	19.29(0.78)	22.30(0.91)	24.63(1.00)
상세해석	15.71(0.61)	19.30(0.75)	24.05(0.93)	25.89(1.00)

() : 거더 G4의 변위에 대한 다른 거더의 변위 비

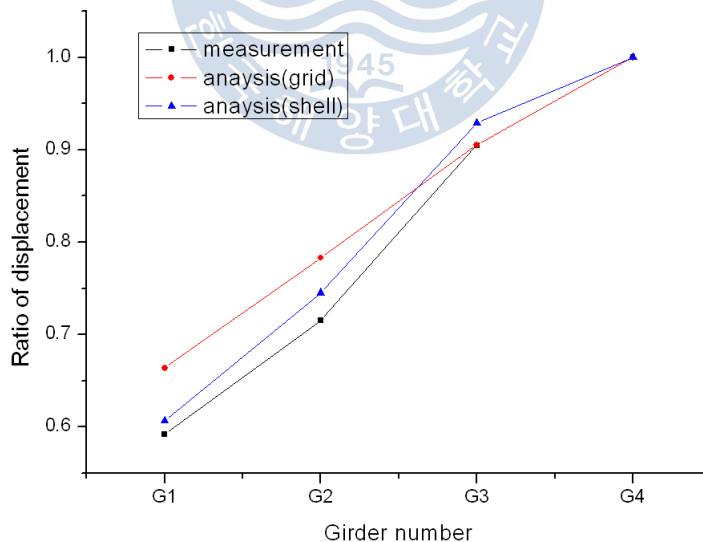


그림 4-2. 계측 및 구조해석에서 얻어진 변위의 횡분배

4.1.2 재하하중에 의한 상세 해석

본 연구에서는 그림 2-9에서의 대상 구조상세인 G3R4 및 G4R1에 대하여 주거더의 최대응력이 발생하는 위치를 적용하여 응력변화를 검토하고 구조적인 거동을 평가하였다. 또한 차량의 주행방식에 따라 최대응력이 변할 수 있음을 고려하여 그림 4-3 및 그림 4-4에 나타낸 것과 같이 경우별에 대해 영향면 해석을 실시하였다. 차량간 간격은 도로교설계기준의 하중재하방법 및 차선, 차량제원을 고려하여 1.8m로 결정하였다. 횡방향 하중재하위치는 기존 자료에서 편측으로 재하한 것과 차선을 고려하여 교량 중심으로부터 거리 d_1 및 d_2 를 0.6m, 5.5m 떨어진 위치에 재하하였다. 교축방향 하중재하 범위는 검토 대상 구조상세와 첫 번째 차축까지의 거리인 l_1 및 l_2 가 대상 상세에서 양쪽 가로리브 간격인 2.4m(양쪽 4.8m)를 완전히 통과하는 것으로 하였다.

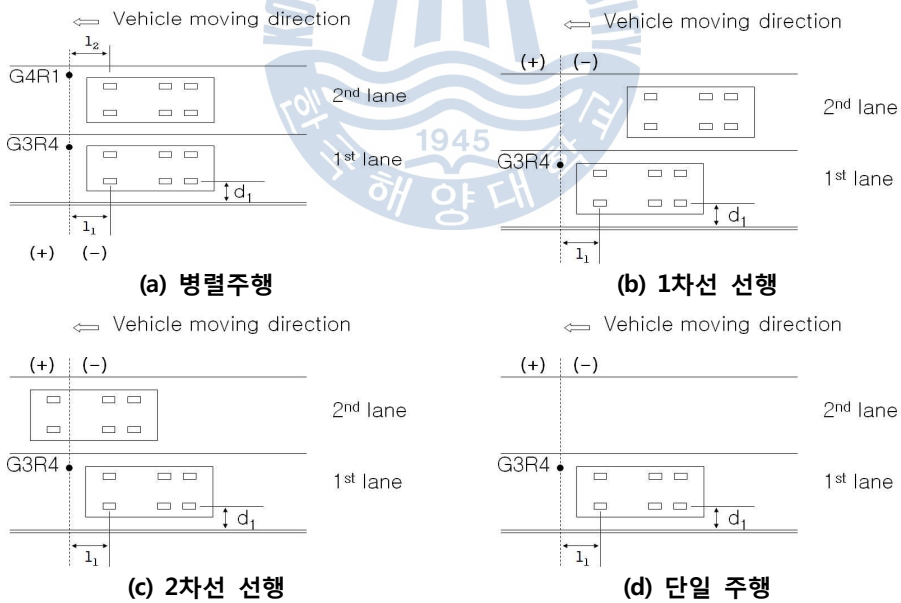


그림 4-3. 하중재하 경우(G3R4)

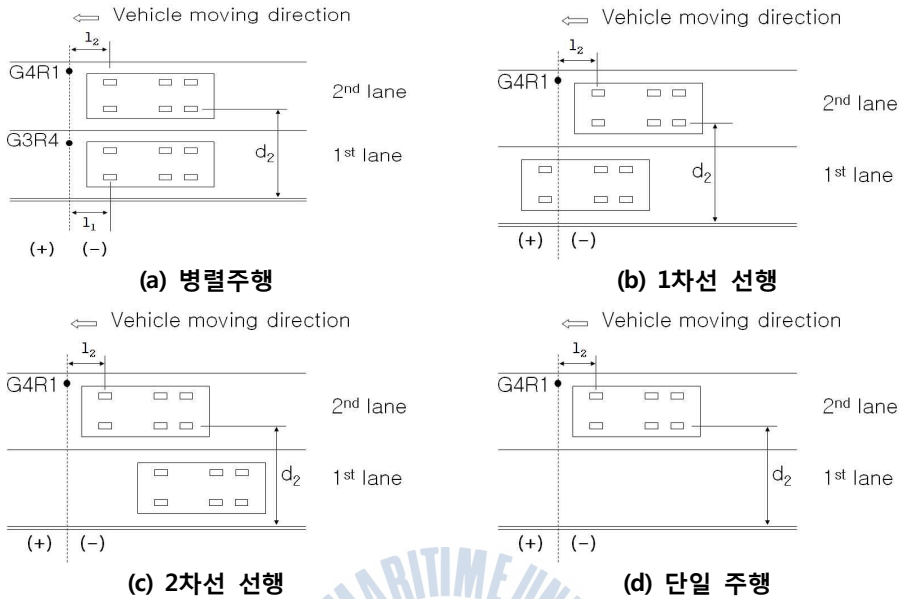
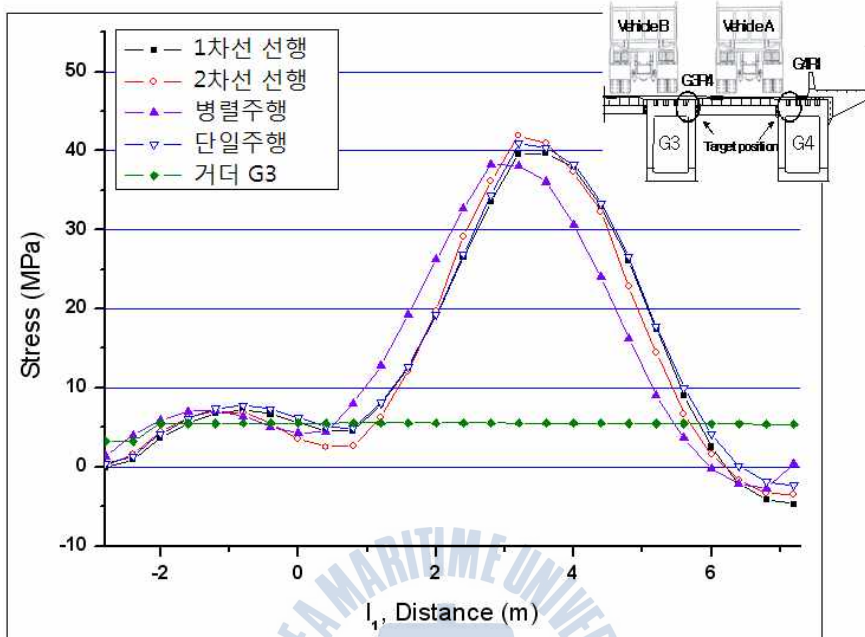


그림 4-4. 하중재하 경우(G4R1)

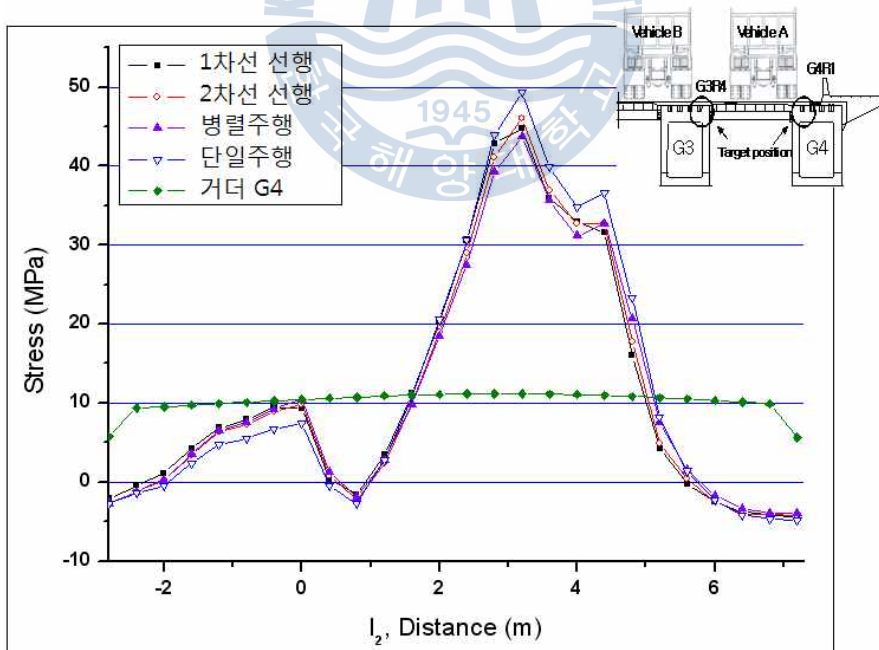
4.1.3 재하하중에 의한 구조해석 결과

(1) 교축방향 하중재하에 따른 응력 변화

그림 4-5에 재하차량의 교축방향 이동에 따른 구조해석 결과를 나타내었다. 해석결과 내측에 위치한 G3R4의 경우 외측에 위치한 G4R1에 비해 축중의 영향이 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 G3R4가 재하위치로부터 더 멀리 떨어져 축중의 직접적인 영향이 적고, 또한 축하중 횡분배 등의 영향에 의한 것으로 판단된다. 한편 G3R4 및 G4R1의 하중재하별 응력변화는 재하형식 및 차량대수에 관계없이 차축의 영향을 크게 받아 거더의 응력변동 범위보다 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 또한 G4R1의 경우 단일 트럭재하의 경우에서 최대응력이 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 G4R1이 축중의 직접적인 영향을 받는 것과 외측 거더이기 때문에 하중의 횡분배의 영향이 적기 때문이라 판단된다.



(a) G3R4의 응력곡선

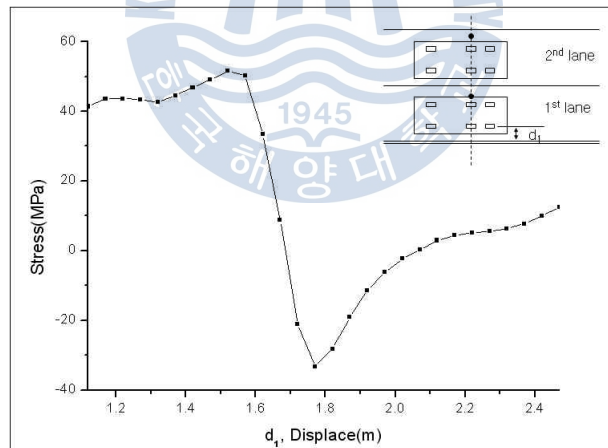


(b) G4R1의 응력곡선

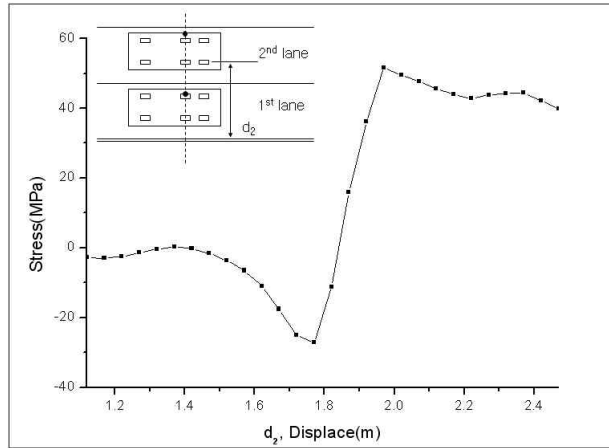
그림 4-5. 재하차량의 교축방향 이동에 따른 응력 변화

(2) 교축직각방향 하중재하에 따른 응력 변화

교축방향 최대응력이 발생하는 위치에서 재하차량의 교축직각방향 이동에 따른 G3R4 및 G4R1의 응력 변화를 알아보기 위하여 교축직각방향인 2차선 방향으로 0.05m씩 이동 재하하면서 구조해석을 실시하였다. 여기서의 차량간 간격은 앞에서와 동일한 1.8m 간격으로 하였다. 그림 4-6에 재하하중의 교축직각방향 이동에 따른 응력변화를 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 교축직각방향 재하위치 변화에 따라 최대응력의 변화가 급격히 변하는 것으로 나타났다. 여기서 교축직각방향 하중이동에 따른 최대응력의 발생 위치는 G3R4의 경우 교량 중심부에서 d_1 이 1.57m일 때이며, G4R1의 경우 d_2 가 1.97m일 때로 나타났다. 이로부터 대상 구조상세는 교축방향의 하중이동에 따른 영향 뿐만 아니라 교축직각방향의 하중 이동에 따른 영향도 매우 큰 것으로 판단된다.



(a) G3R4의 응력 곡선

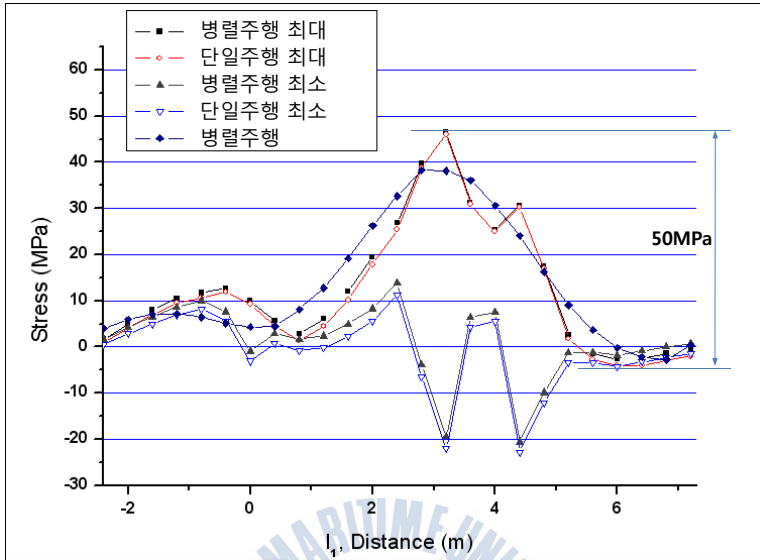


(b) G4R1의 응력 곡선

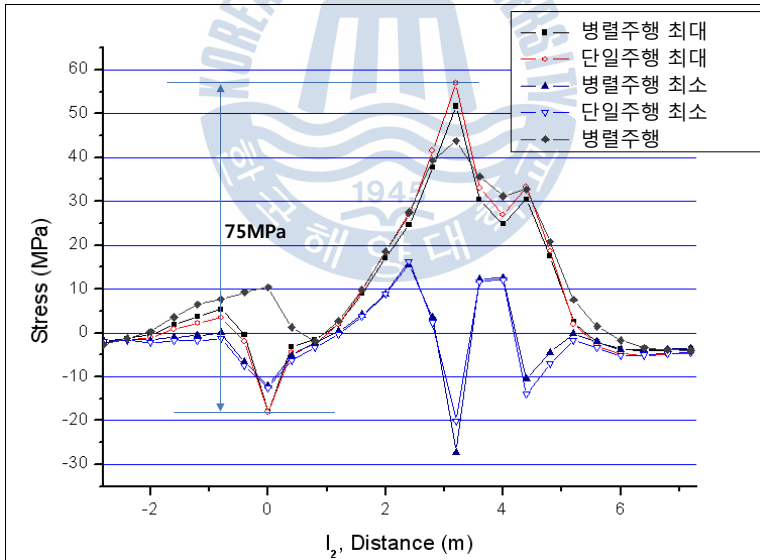
그림 4-6. 재하차량의 교축직각방향 이동에 따른 응력변화

(3) 교축방향 하중재하에 따른 최대응력 변화

교축직각방향 하중 이동에 따른 최대응력 발생 위치와 최소응력 발생 위치에 기초하여 교축방향 영향선 해석을 재 실시하였다. 그림 4-7에 재하차량의 교축방향 이동에 따른 해석 결과를 나타내었다. 그림에서 나타낸 것과 같이 교축방향 하중재하에 따른 최대응력은 그림 4-5에서 얻어진 재하시험 하중조건의 응력에 비하여 약 20% 정도 증가한 것을 알 수 있다. 이것은 재하차량의 교축직각방향 이동에 따라 대상 구조상세에서의 면외응력 성분 증가 및 하중의 직접적인 영향 등의 요인이 원인이라 판단된다. 또한 G3R4 및 G4R1의 최대응력범위는 50MPa 및 75MPa로 나타났으며, 이는 대상 구조상세의 피로허용응력범위인 31MPa을 상당히 초과하여 피로균열 발생가능성이 높은 것으로 판단된다. 한편 본 연구의 경우, 최대응력 및 최소응력의 변화는 재하차량 대수의 영향을 받지 않아, 재하차량을 2대 동시에 재하한 경우의 응력 변화와 1대만을 재하한 경우의 응력변화가 거의 유사한 거동을 하는 것으로 나타났으며, 하중의 횡분배의 영향이 적은 1대만을 재하한 경우의 응력범위가 더 크게 나타났다. 따라서 국부거동의 영향을 받는 구조상세에 대한 피로평가는 1대의 재하트럭을 사용하는 것이 효율적일 것으로 판단된다.



(a) G3R4의 최대 및 최소응력 곡선



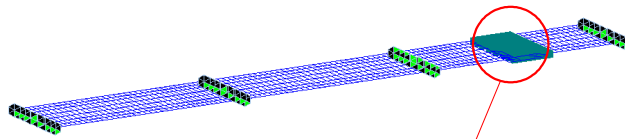
(b) G4R1의 최대 및 최소응력 곡선

그림 4-7. 횡방향 최대 및 최소응력 발생 위치에서의 응력변화

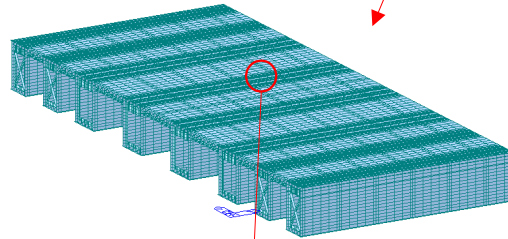
4.2 실교통 하중에 의한 구조해석

4.2.1 구조해석 모델 검증

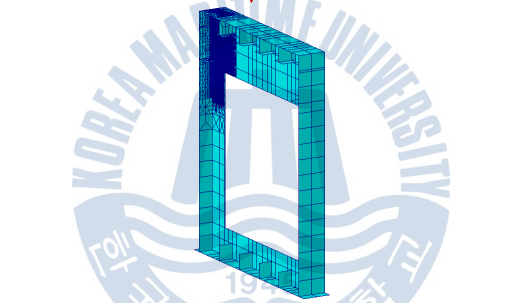
실교통 하중에 의한 대상 구조상세의 국부적인 거동 특성 분석 및 구조해석 모델의 검증을 위해 구조해석을 실시하였다. 구조해석 구간은 대상교량의 종점측 확폭부 구간이며 3경간 연속교에 대하여 수행하였다. 구조해석은 그림 그림 4-8(a)와 같이 격자구조와 판요소를 결합하여 모델링한 상세구조모델을 사용하여 실시하였다. 그림 4-8(b)는 판요소로 모델링한 부분을 나타내었으며 그림 4-8(c)는 센서 근처 상세구조해석 모델을 나타내었다. 상세구조모델에서 박스의 판은 판요소만 사용하면 비틀림, 전단지연 현상을 과대하게 평가하기 때문에 격벽, 상·하부 세로리브, 수평보강재를 구조해석 모델에 포함시켜서 박스의 판에 작용하는 수직응력이 실구조물의 응력과 가능한 동일한 결과가 도출되도록 모델링 하였다. 빔요소와 판요소는 Rigid Rink를 사용하여 연결하였으며, 상세구조모델에서 판요소의 최소 크기는 5mm로 분할하여 구조해석을 실시하였다. 구조해석은 범용구조해석 프로그램인 MIDAS 2009 ver 2.0.0을 사용하였다.



(a) 격자구조와 판요소를 결합한 모델



(c) 판요소 모델



(c) 센서 부근 다이아프램의 상세구조해석 모델
그림 4-8. 실교통 하중에 의한 구조해석 모델

구조해석에서 경계조건은 일반적인 연속교의 경계조건을 적용하였으며, 재하하중은 트럭 및 대형버스 등 중차량의 교통량이 많은 것을 고려하여 그림 4-9 및 표 4-2와 같이 실제 트럭하중을 2차선으로 재하하였다. 대상교량에서 재하패턴 30가지 경우에 대한 구조해석을 실시하고 그림 3-7(a)의 실측 변형을 이력곡선과 비교하여 그림 4-10과 같은 실제 트럭하중의 하중 재하위치를 추정하였다. 또한 추정된 하중 재하위치에서의 구조해석 결과와 실교통류 흐름하의 계측값을 비교하였다. 그림 4-10에 표시한 시간은 그림 3-7(a)에서의 최대응력 발생시간이다.

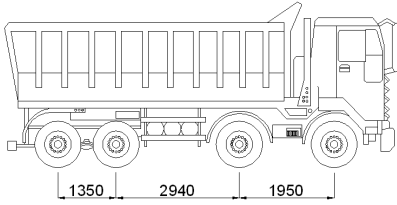


그림 4-9. 추정된 실제 재하차량

표 4-2. 추정된 차량의 실제 중량

First Axis Load	Second Axis Load	Third Axis Load	Forth Axis Load	Gross Weight
49.6	49.6	160.4	122.4	382.0

(단위 : kN)

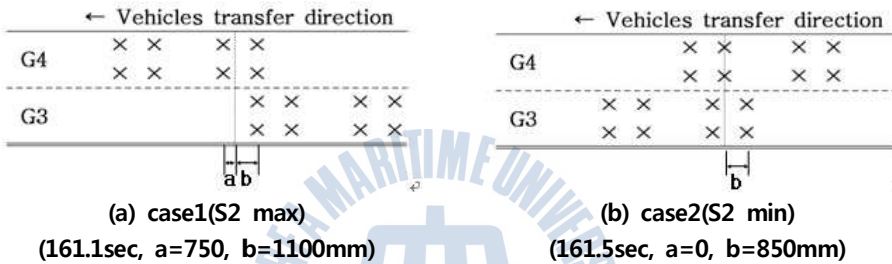


그림 4-10. 추정된 실제 트럭 재하 경우

추정된 하중 재하위치에서의 구조해석 결과와 계측값의 응력 및 변위를 비교하여 표 4-3에 나타내었다. 측정당시 대상교량에서의 교통상황은 러쉬아워의 영향으로 다양한 차량하중들이 거의 정체된 상태에서 측정구간을 통과하고, 컨테이너 트럭 등의 대형차량이 경우에 따라서는 연행하여 통과하는 사례도 빈번하게 관측되었으나, 구조해석에서는 2대의 차량만으로 하중의 재하위치 및 중량을 추정하여 재하하였으므로 실제 교량의 상황을 모두 재현하지 못하여 실측값과 구조해석값이 다소 차이가 있다고 판단된다. 그러나 표 4-3에 나타낸 바와 같이 실제 계측값과 구조해석 결과는 오차범위 10% 내외로 매우 비슷한 것을 알 수 있으며, 따라서 구조해석 모델 및 추정된 재하차량의 중량과 위치는 비교적 적정한 것으로 판단된다.

표 4-3. 교통류 흐름하의 계측과 구조해석 결과 비교

		응력(MPa)				변위(mm)	
		S2	S6	G3	G4	G3	G4
case1	계측값	20.73	-12.72	10.99	8.36	-14.99	-13.99
	해석값	20.23	-10.93	10.70	10.60	-15.12	-15.74
case2	계측값	-26.86	-6.84	12.20	8.94	-14.60	-13.60
	해석값	-27.08	-5.53	12.90	10.40	-16.12	-16.05

4.2.2 구조해석을 통한 거동 특성 분석

(1) 교축방향 하중 이동에 따른 응력 변화

외관조사에 의해 발견된 피로균열과 균열 발생 원인을 규명하기 위해서 추정된 실제 트럭하중을 이용하여 구조해석을 실시하였다. 구조해석 모델은 앞에서 사용한 상세구조모델을 사용하였으며, 하중 재하방법은 4.1.2절과 같은 방법을 사용하였다.

먼저 4.1.3절에서 언급한 바와 같이 대상 구조상세의 최대응력 발생위치는 격자해석에서 주거더의 최대응력 발생위치와 동일하며, 1대의 재하트럭만으로 구조해석을 실시하는 것이 효율적이라 하였기 때문에 여기서는 1대의 재하트럭을 사용하여 교축직각방향 하중 이동에 따른 구조해석을 먼저 실시하였다. 추정된 실제 트럭하중에서 가장 무거운 세 번째 축이 대상 구조상세를 지날 때 최대응력이 발생할 것이라 판단되므로, 먼저 교축직각방향으로 추정된 실제 트럭하중을 이동 재하시키면서 구조해석을 실시하였다. 하중의 이동 범위는 교량의 중심으로부터 0.3m~8.25m까지 실시하였으며, 0.05m 간격으로 이동하면서 하중을 재하하였다.

그림 4-11에 추정 트럭하중의 교축직각방향 이동에 따른 구조해석 결과를 나타내었다. 추정된 실제 트럭하중의 교축직각방향 이동에 따른 구조해석 결과, 다이어그램에 위치한 S2는 차축의 이동에 따른 응력변화가 크지 않은 반면 세로리브 용접부에 위치한 S6는 직접적인 차축의 직접적인 영향을 받아

응력변화가 매우 큰 것을 알 수 있다. 여기서 S2의 최대 및 최소응력이 발생하는 위치는 교량 중심부로부터 4.0m, 1.0m 떨어진 곳이며, S6의 최대 및 최소응력이 발생하는 위치는 교량 중심부로부터 5.6m, 5.4m 떨어진 위치인 것으로 나타났다.

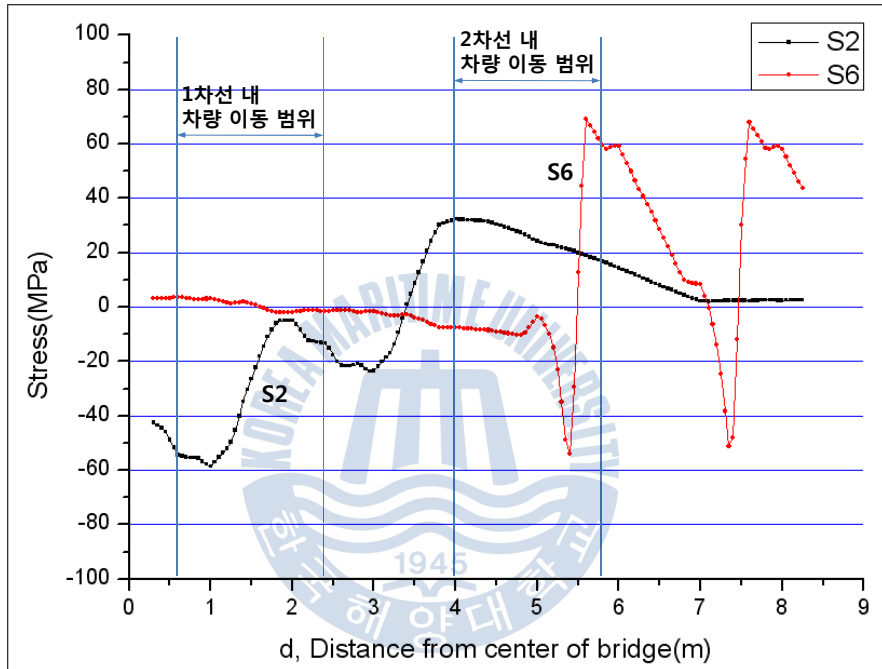


그림 4-11. 교축직각방향 이동에 따른 응력변화

(2) 교축방향 하중이동에 따른 최대 및 최소응력 변화

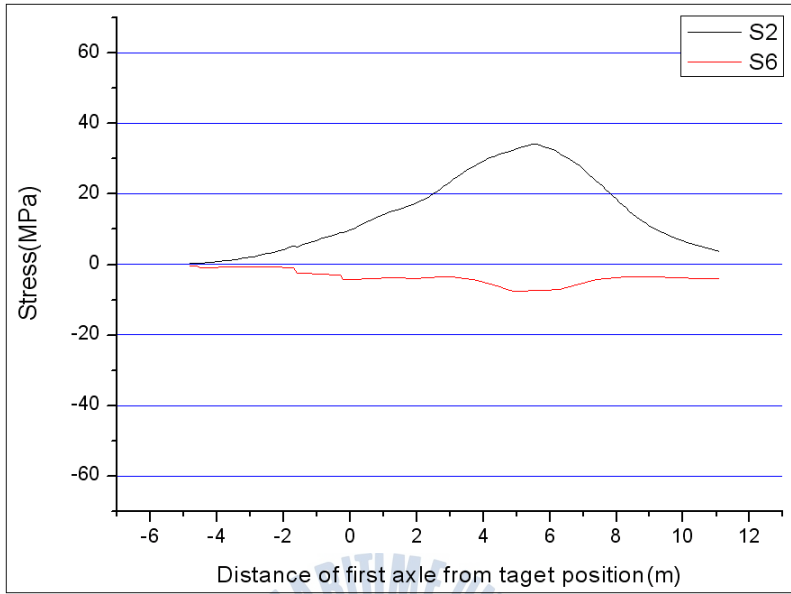
① S2가 최대일 때

교축직각방향 하중 이동에 따른 최대응력 발생 위치와 최소응력 발생 위치를 바탕으로 교축방향으로 차량이 주행하였을 경우 대상 구조상세의 거동 특성을 알아보기 위하여 구조해석을 재실시하였다. 추정 트럭하중의 교축방향 이동은 대상 구조상세와 추정 트럭하중의 첫 번째 차축까지의 거리가 -4.8m ~ 11.1m까지 이동하는 것으로 하였으며, 보다 국부적인 거동을 알아보기 위하여 추정된 실제 트럭하중을 0.1m씩 이동시키면서 구조해석을 실시하였다.

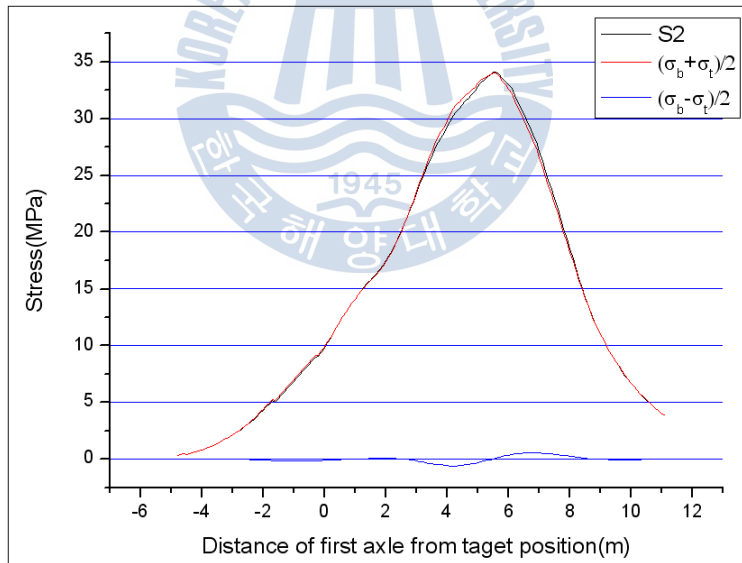
그림 4-12에 교축방향 이동에 따른 S2의 응력변화곡선을 나타내었다. 그림 4-13에는 S2가 최대응력을 나타낼 때의 하중재하 위치 및 변위를 나타내었다. 구조해석 결과 그림 4-12(a)에 나타낸 것과 같이 S2의 최대응력 발생 위치에서의 응력 파형은 그림 3-3(a) 및 (b)와 같은 실교통류 흐름하에서의 응력 파형과 상이하게 나타났다. 이는 그림 4-12(b)에 나타낸 바와 같이 구조해석에서는 S2 위치에서 면외응력 성분의 거의 없으나 실제 계측에서는 대상 구조상세의 한쪽면에만 센서를 설치하여 계측하였으므로 면외응력 성분이 대상 구조상세의 응력을 결정하였기 때문이라 판단된다.

앞에서 대상 구조상세의 최대응력이 발생하는 위치는 격자해석에서 최대응력이 발생하는 위치와 동일한 위치일 것이라 판단되었으나, S2의 경우 최대응력이 발생하는 교축방향 위치는 그림 4-13(a)에서와 같이 가장 무거운 세 번째 차축이 대상 구조상세 위를 조금 지나친 위치인 것으로 나타났다.

그림 4-13(c)에서 나타낸 바와 같이 S2 위치에서 최대응력이 발생하였을 때의 하중은 강바닥판 위를 지나고 있으며, 전체적인 변위는 아래로 향하고 있으나 그림 4-12(d)에서 나타낸 바와 같이 S2가 설치되어 있는 다이어프램은 차축 하중의 영향으로 휘게 되면서 게이지 부착 방향은 인장력을 받는 것으로 나타났다.



(a) 교축직각방향 최대위치에서 하중의 이동에 따른 S2의 응력변화



(b) S2의 면내응력 및 면외응력 곡선

그림 4-12. 교축직각방향 최대응력 발생 위치에서 S2의 교축방향 응력변화곡선

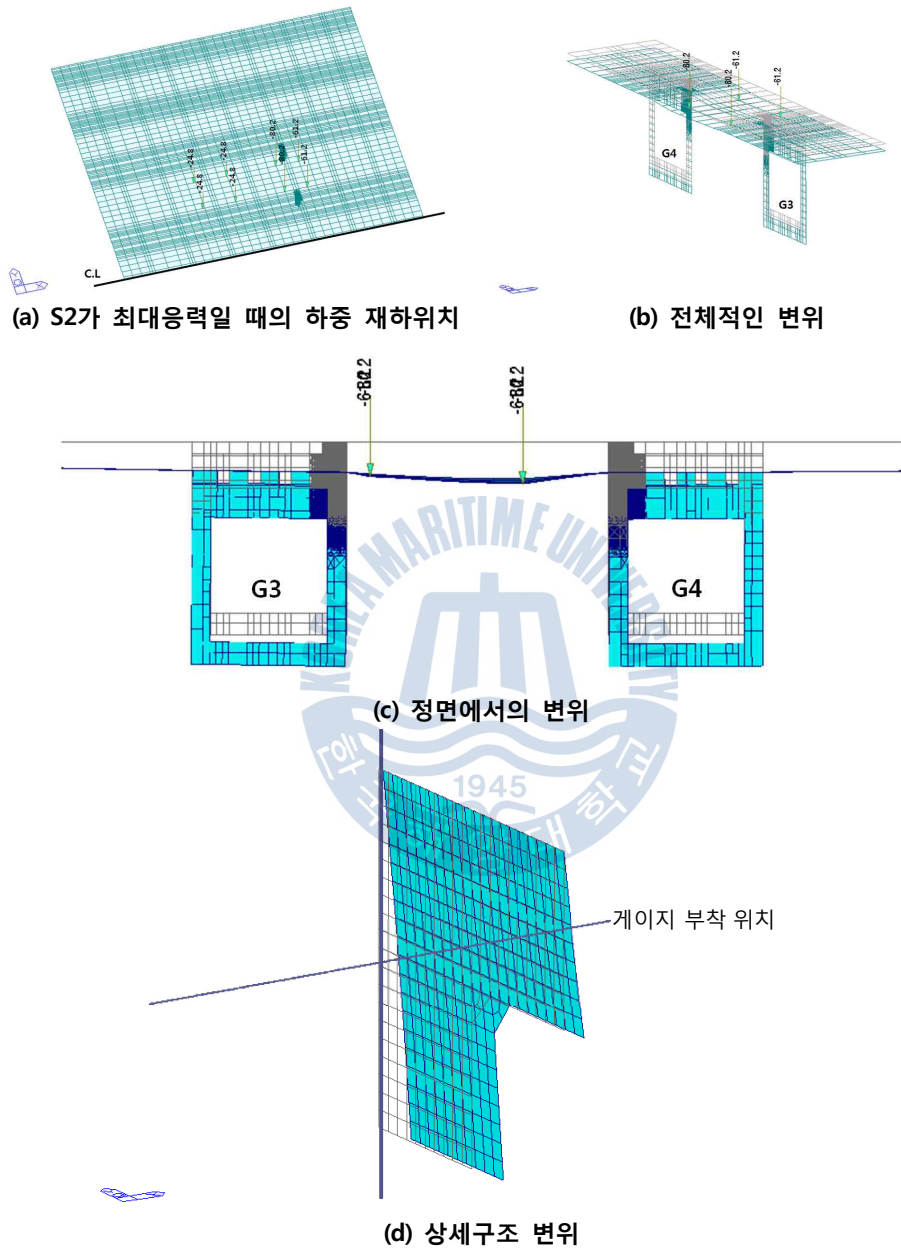
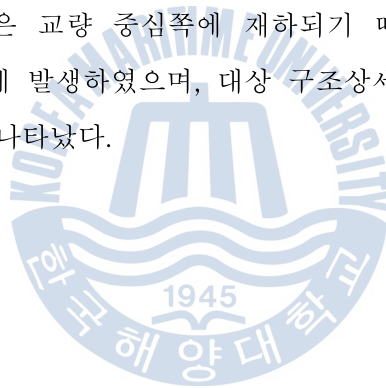


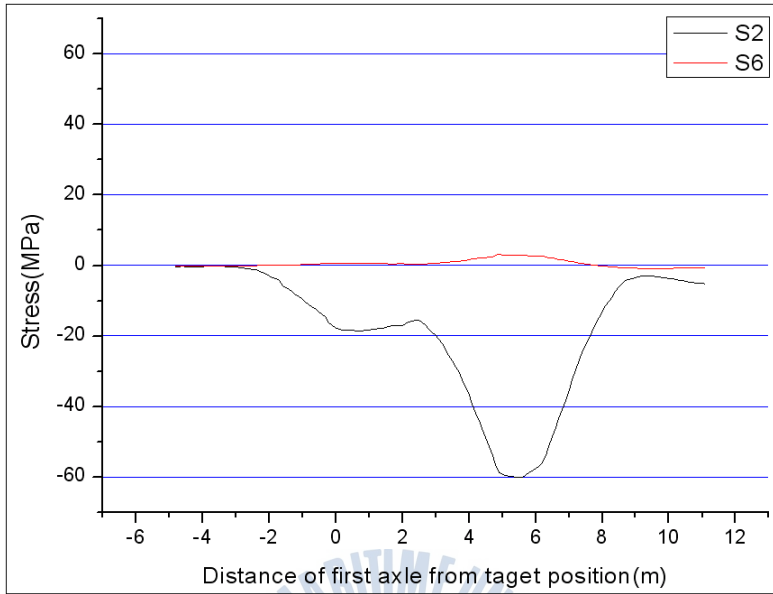
그림 4-13. S2가 최대응력일 때 하중재하 위치 및 변위

② S2가 최소일 때

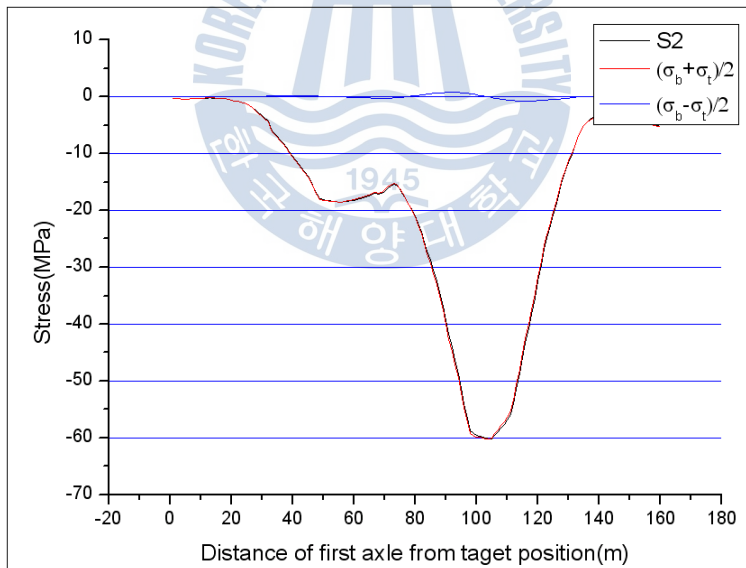
그림 4-14에 교축방향 이동에 따른 S2의 최소응력변화곡선을 나타내었다. 그림 4-15에는 S2가 최소응력을 나타낼 때의 하중재하 위치 및 변위를 나타내었다. 구조해석 결과 그림 4-14(a)에 나타낸 것과 같이 S2의 최소응력 발생 위치에서의 응력 파형은 그림 3-3(c) 및 (d)와 같은 실교통류 흐름하에서의 응력 파형과 유사하게 나타났으며, 그림 4-14(b)에 나타낸 바와 같이 면외 응력 성분은 거의 없는 것으로 나타났다.

S2에서 최소응력이 발생하는 교축방향 위치는 그림 4-15(a)에서와 같이 가장 무거운 세 번째 차축이 대상 구조상세 위를 조금 지나친 위치인 것으로 나타났다. 또한 그림 4-15(c)에서 나타낸 바와 같이 S2 위치에서 최소응력이 발생하였을 때의 하중은 교량 중심쪽에 재하되기 때문에, 전체적인 변위도 교량의 중심쪽에서 크게 발생하였으며, 대상 구조상세서의 변위 또한 압축응력이 발생하는 것으로 나타났다.





(a) 교축직각방향 최소위치에서 하중의 이동에 따른 S2의 응력변화



(b) S2의 면내응력 및 면외응력 곡선

그림 4-14. 교축직각방향 최소응력 발생 위치에서 S2의 교축방향 응력변화곡선

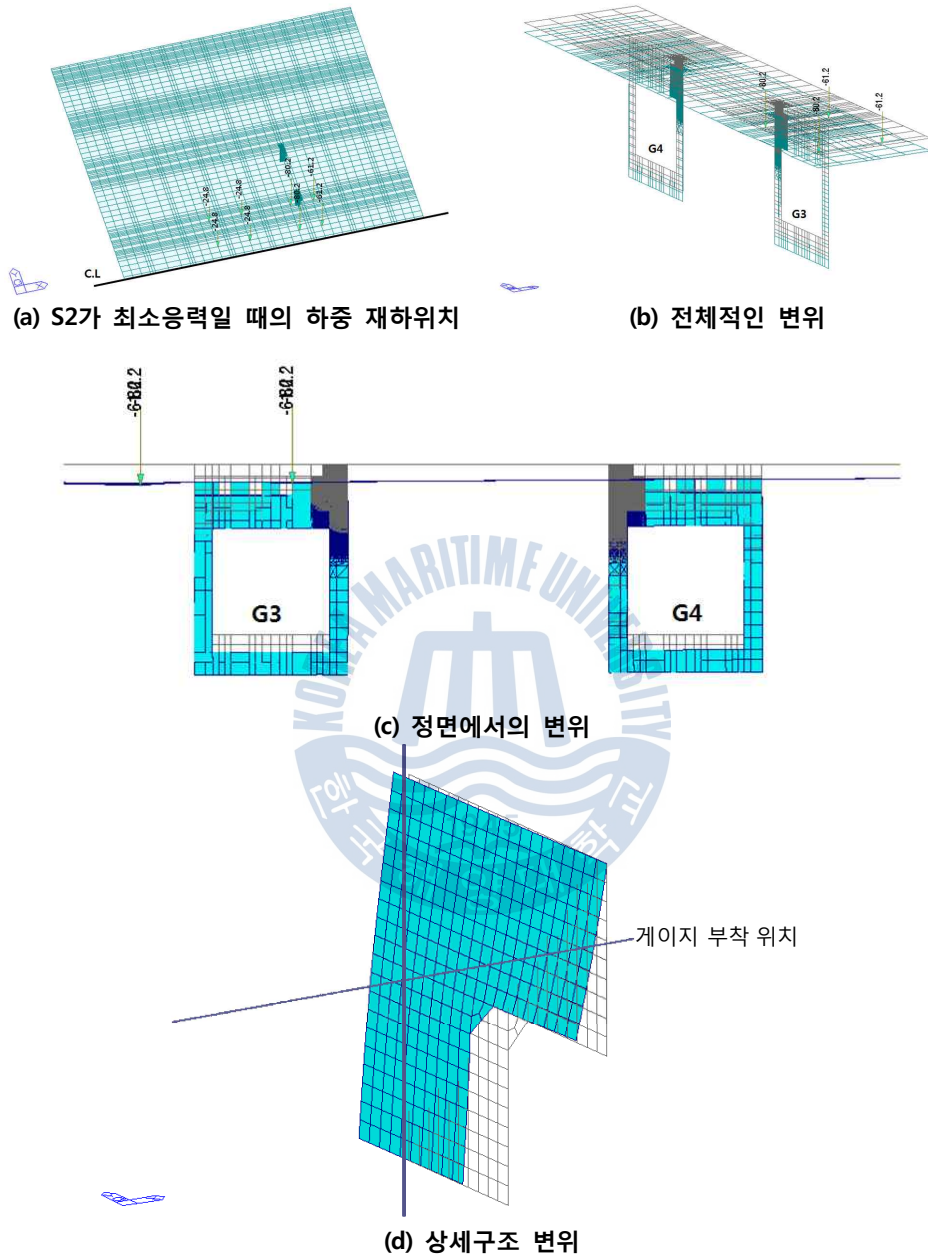


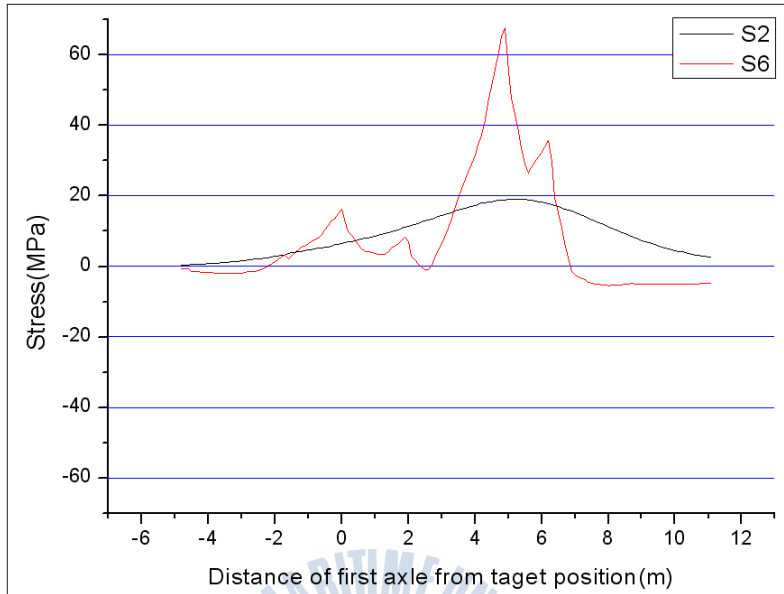
그림 4-15. S2가 최소응력일 때 하중재하 위치 및 변위

③ S6가 최대일 때

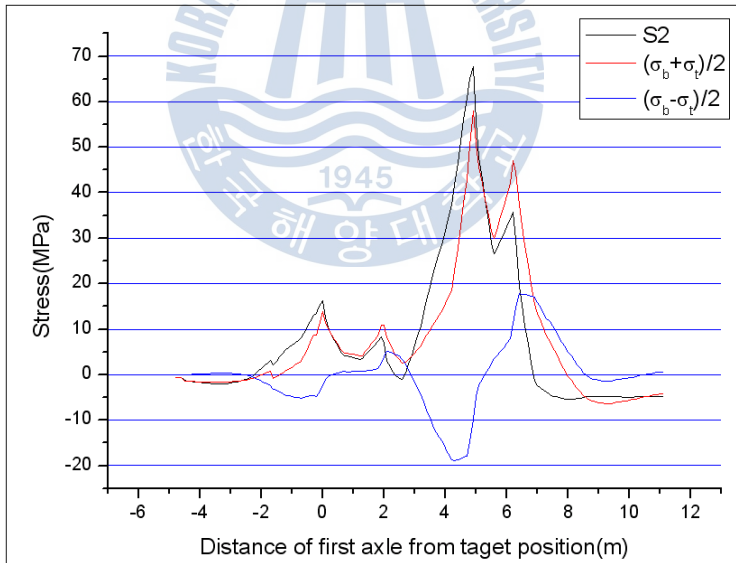
그림 4-16에 교축방향 이동에 따른 S6의 응력변화곡선을 나타내었다. 그림 4-17에는 62가 최대응력을 나타낼 때의 하중재하 위치 및 변위를 나타내었다. 구조해석 결과 그림 4-16(a)에 나타낸 것과 같이 S6의 최대응력 발생 위치에서의 응력 파형은 그림 3-3(c) 및 (d)와 같은 실교통류 흐름하에서의 응력 파형과 유사하게 나타났으며, 차축의 영향도 크게 받아 응력 변동도 큰 것으로 나타났다. 또한 그림 4-16(b)에 나타낸 바와 같이 대상 구조상세인 S6는 면내응력 성분뿐만 아니라 면외응력 성분도 함께 작용하는 것으로 나타났다.

앞에서 대상 구조상세의 최대응력이 발생하는 위치는 격자해석에서 최대응력이 발생하는 위치와 동일한 위치일 것이라 판단되었으나, S6에서 최대응력이 발생하는 교축방향 위치는 그림 4-17(a)에서와 같이 가장 무거운 세 번째 차축이 대상 구조상세 위를 조금 지나친 위치인 것으로 나타났다.

그림 4-17(c)에서 나타낸 바와 같이 S6 위치에서 최대응력이 발생하였을 때의 하중은 S6 위를 지나고 있으며, 전체적인 변위는 아래로 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 그림 4-17(d)에서 나타낸 바와 같이 S6가 설치되어 있는 구조상세는 휨 뿐만 아니라 비틀림도 크게 발생하는 것을 알 수 있으며, 면외응력 성분이 크게 나타나는 것은 이러한 비틀림의 영향인 것으로 판단된다.



(a) 교축직각방향 최대위치에서 하중의 이동에 따른 S6의 응력변화



(b) S6의 면내응력 및 면외응력 곡선

그림 4-16. 교축직각방향 최대응력 발생 위치에서 S6의 교축방향 응력변화곡선

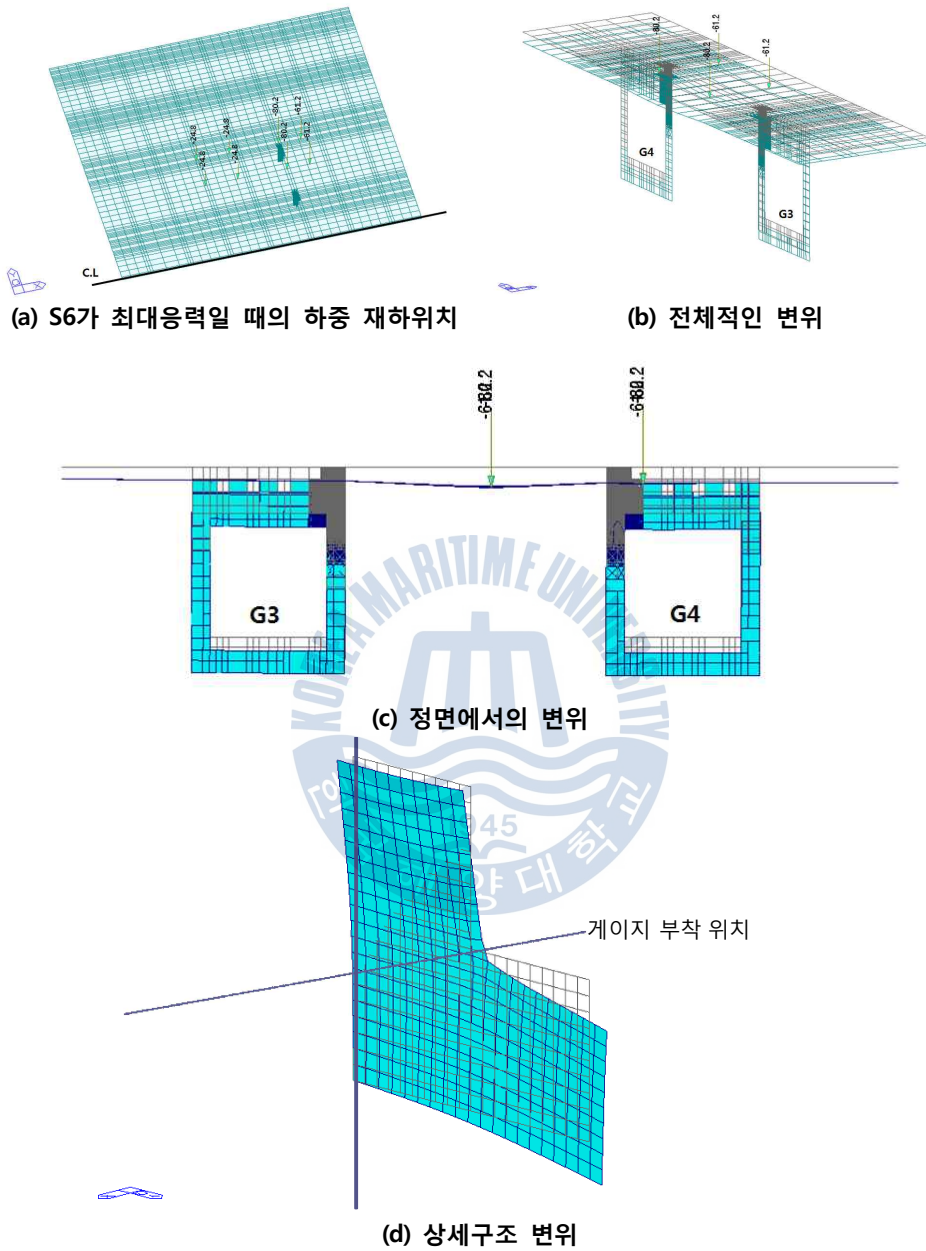


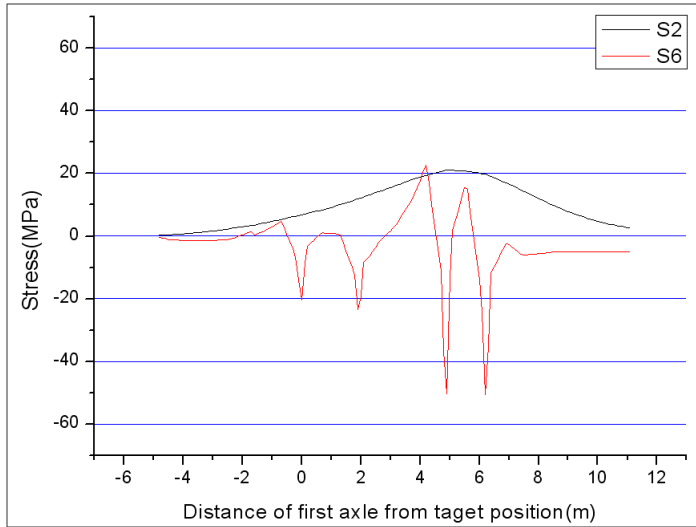
그림 4-17. S6가 최대응력일 때 하중재하 위치 및 변위

④ S6가 최소일 때

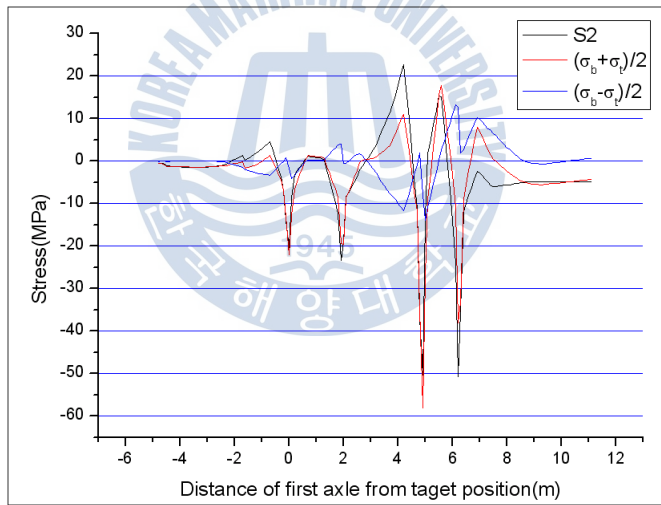
S6에서 최소응력이 발생할 때의 변위 및 응력 변화를 그림 4-18 및 그림 4-19에 나타내었다. 구조해석에서는 그림 4-19(a)에 나타낸 바와 같이 전체적인 응력 변화는 실교통류 흐름하에서의 응력 파형과 유사하게 나타났으며, 차축의 영향도 크게 받는 것으로 나타났다. 또한 그림 4-15(b)에 나타낸 바와 같이 대상 구조상세에는 면내응력 성분뿐만 아니라 면외응력 성분도 함께 작용하는 것으로 나타났다. 그림 4-14(a)에 나타낸 바와 같이 하중이 대상 구조상세 바로 위를 지나기 때문에 차축의 직접적인 영향을 받아 응력 범위도 매우 크게 나타났다.

그림 4-18에 교축방향 이동에 따른 S6의 응력변화곡선을 나타내었다. 그림 4-19에는 S6가 최소응력을 나타낼 때의 하중재하 위치 및 변위를 나타내었다. 구조해석 결과 그림 4-18(a)에 나타낸 것과 같이 S6의 최소응력 발생 위치에서의 응력 파형은 그림 3-3(a) 및 (b)와 같은 실교통류 흐름하에서의 응력 파형과 유사하게 나타났으며, 차축의 영향도 크게 받아 응력 변동도 큰 것으로 나타났다. 또한 그림 4-18(b)에 나타낸 바와 같이 대상 구조상세인 S6는 면내응력 성분뿐만 아니라 면외응력 성분도 함께 작용하는 것으로 나타났다.

S6에서 최소응력이 발생하는 교축방향 위치는 그림 4-19(a)에서와 같이 가장 무거운 세 번째 차축이 대상 구조상세 위를 조금 지나친 위치인 것으로 나타났다. 그림 4-19(c)에서 나타낸 바와 같이 S6 위치에서 최대응력이 발생하였을 때의 하중은 S6 위를 지나고 있으며, 전체적인 변위는 아래로 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 그림 4-19(d)에서 나타낸 바와 같이 S6가 설치되어 있는 구조상세는 휨 뿐만 아니라 비틀림도 크게 발생하는 것을 알 수 있으며, 대상 구조상세 위로 하중에 지나가기 때문에 차축의 영향이 확연하게 나타났다.

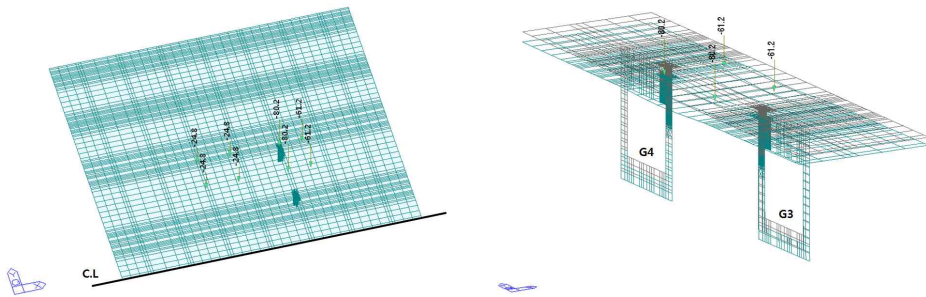


(a) 교축직각방향 최소위치에서 하중의 이동에 따른 S6의 응력변화



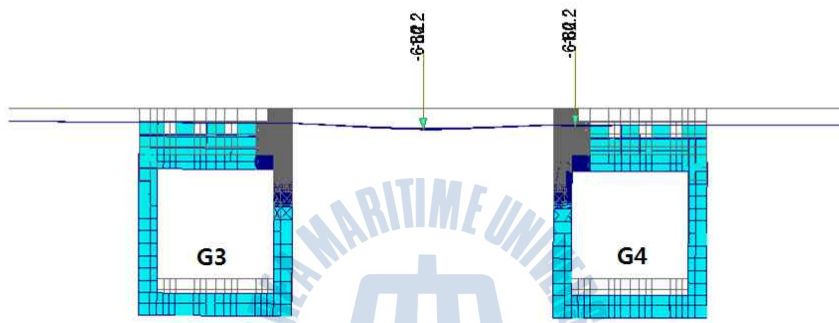
(b) S6의 면외응력 및 면외응력 곡선

그림 4-18. 교축직각방향 최소응력 발생 위치에서 S6의 교축방향 응력변화곡선

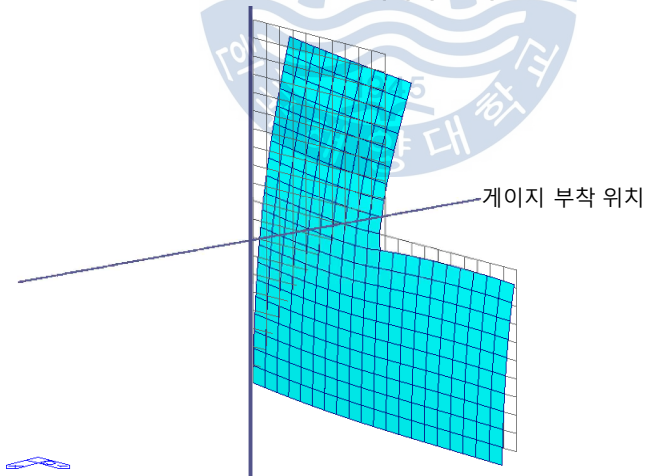


(c) S6가 최소응력일 때의 하중 재하위치

(b) 전체적인 변위



(c) 정면에서의 변위



(d) 상세구조 변위

그림 4-19. S6가 최소응력일 때 하중재하 위치 및 변위

5장. 결 론

5.1 결론

본 연구에서는 29년간 공용된 강바닥판교량에서 발생된 피로균열 위치에서 발생원인을 조사하고, 재하시험 및 실교통류 흐름하에서의 계측을 통하여 대상 구조상세의 거동 특성을 분석하였다. 실교통류 흐름하에서의 계측을 통하여 피로균열이 발생한 상세를 대상으로 피로수명 및 잔존수명을 평가하였으며, 구조해석을 실시하여 대상 구조상세의 국부적인 거동 특성을 분석하였다.

이상의 연구과정에 의하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 강바닥판 교량에서의 거더응력은 전체하중의 크기에 영향을 받는 장주기의 응력파형을 나타내나, 세로리브 등과 같이 국부거동의 영향을 받는 구조상세에 대한 응력은 재하차량의 축중 및 축간격의 영향을 직접적으로 받아 단주기의 응력파형을 나타낸다.
- (2) 강바닥판에서 국부거동을 하는 구조상세에 대한 교축방향 최대응력 발생 위치는 거더에서의 최대응력 발생 위치와 일치하나, 최소응력 발생 위치는 국부거동을 나타내는 구조상세에 대한 교축방향의 영향선 해석에 기초하여 평가하는 것이 타당하다.
- (3) 국부거동의 영향을 받는 구조상세에 대한 최대응력 및 최소응력의 변화는 재하차량의 대수에 크게 영향을 받지 않으므로 피로평가는 1대의 재하트럭을 사용하는 것이 효율적일 것이라 판단된다.
- (4) 세로리브 용접부 등과 같은 구조상세에서 차량이 이동함에 따라 휨 및

비틀림이 발생하였으며, 이로 인하여 면외응력이 발생하였다. 이러한 면외응력은 피로손상의 원인이라 판단되며, 대상 구조상세에서는 피로균열이 발생되었으므로 조속한 보수·보강 조치를 강구하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

5.2 향후 과제

본 연구에서는 29년간 공용된 강바닥판교량의 피로균열이 발생한 구조상세에 대한 거동 특성을 분석하였다. 본 연구에서는 추정트럭하중을 절점하중으로 가정하여 대상 구조상세에 대한 거동 특성을 파악하였으나, 향후에는 다양한 하중의 조합과 접지면적을 고려한 하중을 적용한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 많은 강바닥판교량을 대상으로 연구를 실시하여 구조상세에 대한 피로손상의 원인을 규명하고 피로손상도나 내하력을 정량적으로 평가할 수 있는 방법을 개발하여야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

건설교통부(2006), 강도로교 상세부설계지침

건설교통부(2008), 교량현황조사서

권순철(2008), 2거더교의 합리적 구조상세 제안과 적용에 따른 경제성 및 경관에 관한 연구

대한토목학회(2008), 도로교설계기준·해설

박영석, 심낙훈(2002), 종리브의 비틀림에 의한 강상판 용접연결부의 피로강도에 관한 실험적 연구, 대한토목학회 논문집, 제22호, 제4-A호, pp.905~912

박진은(2010), 곡선거더교에서 발생한 피로균열의 특성분석 및 보강방안의 적정성 평가

선창원(2009), 재하하중에 따른 강바닥판 거동 특성에 관한 연구

신동호(2006), 강바닥판 구조상세부의 정적거동 및 보강상세에 관한 해석적 연구

신재철, 안주욱, 윤태양(2007), 강바닥판의 피로성능 향상을 위한 다이아프램 구조상세, 한국강구조학회 논문집, 제19권 6호, pp.559~573

우상익, 김현성, 정경섭(2000), 강교량 용접부재의 잔류응력이 피로강도에 미치는 영향, 대한토목학회 논문집, 제20권, 제2-A호, pp.225~234

오순택(2006), 강바닥판교의 설계 및 시공성 향상방안:강바닥판교 3차원 실물 모형체의 피로강도, 한국강구조학회 논문집, 제18권 1호, pp.23~32

오제택(2005), 교량계획과 설계, 반석기술

용환선, 정경섭(1989), 강교량의 실동피로하에서 잔존수명의 추정, 한국강구조학회 논문집, 제7권 1호, pp.140~146

용환선, 정경섭, 이희현(1995), 실교통 하중하에서 강교량 용접부의 피로수명 예측, 한국강구조학회 논문집, 제7권 1호, pp.125~134

이명구, 경갑수, 이승용(2004), 플레이트거더 용접구조상세의 피로균열발생 및 성장 특성, 대한토목학회 논문집, 제24호, 제1A호, pp.151~157

일본도로협회, 박정용, 박연수, 경갑수(2004), 강교의 피로와 보수보강

조효남(1999), 교량공학, 구미서관

주석범(2006), 재하크기가 개단면 리브 보강판의 처짐에 미치는 영향, 한국강구조학회 논문집, 제18권 5호, pp.563~574

최동호, 최항용(2002), 강바닥판 데크플레이트와 종리브 현장연결 스캘럽부의 피로강도 평가, 한국강구조학회 논문집, 제14권 6호, pp.683~690

최동호, 최항용(2000), 강바닥판 종리브와 횡리브 교차부의 피로거동에 대한 종리브내 다이어프램의 영향, 한국강구조학회 논문집, 제12권 3호, pp.239~250

최준혁(2005), 국부응력에 기초한 강바닥판 종·횡리브 교차부의 피로강도, 대한토목학회 논문집, 제25호, 제3A호, pp.531~536

최준혁, 김성훈(2005), 강바닥판에서의 종리브와 횡리브 교차부의 국부응력 및 피로균열 평가, 대한토목학회 논문집, 제25권, 제6A호, pp.1053~1060

포항종합제철주식회사 강구조연구소(1998), 강도로교의 피로설계요령

한국강구조학회(2005), 강바닥판교 Q&A

한국도로공사(2000, 2005, 2010), ○○교 정밀안전진단보고서

한국도로교통협회(2005), 도로교설계기준

American Association of State Highway and Transportation Officials,
(2004), LRFD bridge design specifications.

Gurney, T.(1992), Fatigue of Steel Bridge Decks, State of the Art
Review 8, TRRL

Kolstein, H. & Wardenier, J.(1998) A New Type of Fatigue Failures in
Steel Orthotropic Bridge Decks, Proceedings of Fifth Pacific
Structural Steel Conference, Seoul Korea

K.S.Kyung, S.J.Lee, J.E.Park, H.H.Lee, H.S.Hwang(2010), Fatigue
Evaluation and Retrofitting Method of Cracks Found in Orthotropic
Steel Deck, International Association for Bridge Maintenance and
Safety

Mori, T. Lee, H & Kyung, K.(2007) Fatigue life estimation parameter
for short and medium span steel highway girder bridge,
Engineering Structures

S.J.Lee, K.S.Kyung, J.E.Park, H.H.Lee, H.S.Hwang(2010), Fatigue
Evaluation and Retrofit of Orthographic Steel Deck Bridge ;
Analysis of Fatigue Behavior of Orthotropic Steel Deck Bridge,
2010 FHWA Bridge Engineering Conference

Wolchuk, R. (1990) Lessons from Weld Cracks in Orthotropic Decks
on Three European Bridges, Journal of Structural Engineering

감사의 글

어느덧 한국해양대학교를 다닌지 9년이라는 시간이 흘렀습니다. 지금에 와서야 학교 생활을 되돌아보면 참 많은 일들이 있었으나 무언가 부족하고 참된 시간을 보낸 것 같지는 않아 조금은 후회스럽고 안타까운 마음이 듭니다. 그러나 이렇게 학부와 대학원을 무사히 마칠 수 있도록 열정을 다해 저를 돌봐주신 경갑수 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 항상 조언을 아끼지 않으셨던 주셨던 김도삼 교수님, 학부 때부터 많은 가르침을 주시던 김태곤 교수님, 이중우 교수님, 김태형 교수님께 깊이 감사드립니다.

항상 바쁘신 와중에도 강의를 해주시고 논문을 지도해 주신 이희현 박사님, 만날 때마다 웃음으로 맞아주신 이강무 상무님, 전준창 박사님, 이승용 교수님께 감사를 드립니다. 어려운 일이 있을 때마다 도움을 주셨던 정지영 상무님, 이영일 이사님, 노동오 부장님, 김동수 과장님께 감사 드립니다.

멀리 떨어져 있지만 항상 전화해서 연구실 생활을 열심히 하도록 조언해 주시는 순철이형, 연구실 생활의 모범이 되었던 창원이형, 처음부터 끝까지 참 많은 것을 배우게 되는 진은이형, 힘들어도 내색하지 않고 분위기를 이끌어주었던 혜연이, 일만 시켜서 미안하기만 한 은경이, 항상 옆에서 든든한 지원자가 되어주는 현기, 참 많은 어록을 만들어 웃음을 주었던 종엽이, 말은 안 듣지만 그래도 시키면 하는 효상이, 힘들어도 꾀꾀히 잘 해가는 민선이, 짧은 시간이었지만 유지와 진곤이에게 감사를 드립니다. 그리고 지금 같이 생활하지는 않았지만 만날 때마다 좋은 얘기 들려주시는 영직이형, 진우형, 준호형, 지윤이누나, 경진이형에게도 감사 드립니다.

학부 생활을 하면서 참 많은 추억을 쌓았던 02학번 동기들, 조기졸업하고 선배 노릇 했던 선욱이, 연구실보다 실험실을 더 좋아하는 영준이, 술자리에서 안주거리를 제공했던 상길이, 대학원하면서 먼저 돈 벌러 나간 남우, 말 많고 탈 많았던 재학이, 하단에서 모르는 사람이 없는 길태, 술 못 마신다고 빼던 선현이, 우리 동네 옆집 형 포스 성용이형에게 감사 드립니다.

같은 과 다른 전공을 하며 연구실에서 고생하고 있는 웅기형, 수정이누나, 유나, 진호, 성규, 먼저 나간 진우, 동진이, 성심이, 그리고 나 대신 공학인증 때문에 고생하는 보배에게 감사 드립니다.

마지막으로 아낌없이 지켜봐주신 아버지와 어머니, 나 때문에 사회에 나가 고생하는 동생에게 너무 감사 드립니다. 지금이 끝이 아니기에 더 열심히 해서 꼭 보답하는 아들, 오빠가 되도록 하겠습니다.

2010. 12. 31

이 성 진 올림