

工學碩士 學位論文

세로리브 내부 보강상세에 따른 강바닥판
연결부의 피로거동 특성에 관한 해석적 연구

*Analytical Study on the Characteristic of Fatigue Behavior of
Connection Parts in Orthotropic Steel Decks according to the
Retrofit Details inside Longitudinal Rib*

指導教授 慶 甲 秀

2007 年 2 月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

土 木 環 境 工 學 科

朴 敬 珍

工學碩士 學位論文

세로리브 내부 보강상세에 따른 강바닥판
연결부의 피로거동 특성에 관한 해석적 연구

*Analytical Study on the Characteristic of Fatigue Behavior of
Connection Parts in Orthotropic Steel Decks according to the
Retrofit Details inside Longitudinal Rib*

指導教授 慶 甲 秀

2007 年 2 月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

土 木 環 境 工 學 科

朴 敬 珍

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

委 員 長 工 學 博 士 金 度 三 (印)

委 員 工 學 博 士 金 泰 亨 (印)

委 員 工 學 博 士 慶 甲 秀 (印)

2007 年 2 月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

土 木 環 境 工 學 科

朴 敬 珍

*Analytical Study on the Characteristic of Fatigue Behavior of
Connection Parts in Orthotropic Steel Decks according to the
Retrofit Details inside Longitudinal Rib*

by

Park, Kyung-Jin

*Department of Civil & Environment Engineering
Graduate Korea Maritime University*

ABSTRACT

In the orthotropic steel deck has many advantages that a shortly term of works because it does not work about concrete after construction bridge and it makes slim shape by low crossbeams. but it is not avoid many weldings because it make complex shape with having thin steel plate by weldings, so orthotropic steel decks have been pointed out to the problem on welding defect, residual stress, in plane or out plane strain. with like this reason, The foreign countries have many data by experiments and researches about fatigue damages, case of domestic has progress the research but have not sufficient data which is suitable in domestic actually.

In this paper, accomplished a FEM analysis about longitudinal rib, longitudinal rib and cross rib connect part, corss rib slip where the fatigue crack of the orthotropic steel decks. the result, optimum reinforcement details appeared that vertical rib size 50mm and it is visible a low stress which it attach in lower part direction than longitudinal rib and cross rib connect part. also, the case where the production error will occur rather stress concentration more than stress reduction. so we will be necessary more correct production process and research.

세로리브 내부 보강상세에 따른 강바닥판 연결부의 피로거동 특성에 관한 해석적 연구

박 경 진

한국해양대학교 대학원
토목환경공학과

요 약

강바닥판은 사하중 절감이 절실히 요구되는 장대 교량에 있어서 매우 유리한 구조를 가지기 때문에 외국에서는 강바닥판을 이용한 교량의 시공 사례가 많고 국내에서도 다수의 강바닥판교가 시공 또는 계획되고 있다. 또한 강바닥판은 교량을 가설한 후에 콘크리트 공사가 없기 때문에 그만큼 공기를 단축할 수 있는 점이나 들보의 높이가 적어져서 날씬한 형상으로 할 수 있기 때문에 미관을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 가설 공사비를 절감시킬 수 있는 등 많은 장점을 갖고 있다. 강바닥판은 이상과 같이 많은 장점을 갖는 구조이지만 비교적 얇은 강판을 복잡한 형상으로 용접하여 조립함에 따라 많은 양의 용접을 피할 수 없고, 이로 인한 용접 결함, 잔류응력, 면내 및 면외 변형의 발생 등이 문제점으로 지적되고 있다. 더욱이 자동차 하중을 직접 지지하고 이들을 주구조로 전달하고 있기 때문에 도로교의 각 부재중에 피로손상이 생기기 쉬운 부분이라고 말할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 강바닥판 교량의 피로균열이 빈번히 발생하는 세로리브 및 세로리브와 가로리브 연결부, 가로리브 슬릿부를 대상으로 세로리브 내의 보강상세에 따른 구조거동을 분석하기 위하여 벌크헤드 및 수직리브에 대해서 형상 및 부착위치에 따른 변수로 정밀 구조해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 도출하였다. 세로리브 내에 보강상세를 적용하는 것이 보강상세 없는 경우보다 응력 감소에 효과가 있었으며, 벌크헤드 플레이트 보다는 수직리브 상세가 보다 효과가 있는 것으로 나타났다. 수직리브 크기는 50mm, 부착위치는 가로리브 스켈럼 연결부보다 아래 방향에 설치하는 것이 더 낮은 응력 거동을 보이는 것을 알 수 있었다. 또한 보강상세 적용에 있어 제작오차가 발생할 경우에는 응

력 경감보다는 오히려 응력집중을 더욱 유발함을 알 수 있었다. 따라서 향후 이에 대한 보다 정확한 제작공정 및 연구가 필요할 것으로 판단된다.

목 차

ABSTRACT	i
요약	ii
목차	iv
표 목차	vi
그림 목차	vii
제 1장 서 론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 연구동향	3
1.3 연구 내용 및 구성	5
제 2장 강바닥판 구조와 피로균열 원인비교	6
2.1 강바닥판 기본개념	6
2.2 강바닥판 손상사례	10
2.3 설계기준 비교	16
제 3장 강바닥판 전체계해석과 국부해석 검토	18
3.1 전체해석 및 국부해석 모델링	18
3.2 전체해석과 소블럭 국부해석 비교·분석	24
제 4장 고내구성 강바닥판 정적실험 및 국부해석 검토	26
4.1 실험방법	26
4.2 강바닥판 구조상세부의 정적거동 및 구조해석 분석	30
제 5장 강바닥판 세로리브 내부 보강상세 매개변수 해석	32
5.1 벌크헤드 플레이트 부착에 따른 강바닥판 보강상세 영향 분석	32
5.2 수직리브 부착에 따른 강바닥판 보강상세 영향 분석	49
5.3 강바닥판 최적 보강상세를 위한 비교·분석	58

제 6 장 결 론	66
참고 문헌	67
감사의 글	69

표 목차

표 2-1	국내와 일본의 설계기준비교	16
표 2-2	세로리브와 가로리브 연결부 설계기준 비교	17
표 3-1	반력 검토	24
표 3-2	사하중에 대한 모멘트 검토	25
표 3-3	전체해석과 소블럭 국부해석 공칭응력 비교	25
표 5-1	벌크헤드 형상에 따른 세로리브측 주응력 범위	38
표 5-2	벌크헤드 형상에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위	39
표 5-3	벌크헤드 형상에 따른 가로리브측 슬릿부 주응력 범위	40
표 5-4	부착위치에 따른 세로리브측 주응력 범위	42
표 5-5	부착위치에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위	43
표 5-6	부착위치에 따른 가로리브측 슬릿부 주응력 범위	44
표 5-7	곡률변화에 따른 세로리브측 주응력 범위	46
표 5-8	곡률변화에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위	47
표 5-9	곡률변화에 따른 가로리브측 슬릿부 주응력 범위	48
표 5-10	수직리브 부착위치에 따른 세로리브측 주응력 범위	50
표 5-11	수직리브 부착위치에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위	51
표 5-12	수직리브 크기 변화에 따른 가로리브측 슬릿부 주응력 범위	52
표 5-13	수직리브 크기에 따른 세로리브측 주응력 범위	54
표 5-14	수직리브 크기에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위	55
표 5-15	수직리브 크기에 따른 가로리브측 슬릿부 주응력 범위	56
표 5-16	오차 미발생에 따른 세로리브측 주응력 범위	59
표 5-17	오차 미발생에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위	60
표 5-18	오차 미발생에 따른 가로리브측 슬릿부 주응력 범위	61
표 5-19	오차 발생에 따른 세로리브측 주응력 범위	62
표 5-20	오차 발생에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위	63
표 5-21	오차 발생에 따른 가로리브 슬릿부 주응력 범위	64

그림 목차

그림 2-1	폐단면리브를 사용한 강바닥판	7
그림 2-2	개단면 리브를 사용한 강바닥판	7
그림 2-3	바닥판 응력분포	8
그림 2-4	전단변형 유발 피로균열	11
그림 2-5	세로리브측 피로균열 사진	12
그림 2-6	세로리브와 가로리브 연결부 피로균열 사진	13
그림 2-7	가로리브 슬릿부의 피로균열 사진	14
그림 2-8	강바닥판교 피로균열 예	14
그림 2-9	강바닥판교 내력작용 예	15
그림 3-1	대상교량 단면도	19
그림 3-2	전체 모델링 형상	20
그림 3-3	전체해석 중 Shell 모델링 부분	20
그림 3-4	전체해석 Shell 요소 중 가로리브(관측대상)	21
그림 3-5	강바닥판 형상 및 치수	22
그림 3-6	부분 모델링 방법	23
그림 3-7	사하중에 대한 모멘트 선도	25
그림 4-1	상세 모델링 형상	28
그림 4-2	강바닥판 실험	29
그림 4-3	게이지 부착위치	29
그림 4-4	공칭응력 검토	30
그림 4-5	실험체 지점형상	30
그림 4-6	최대주응력 비교	31
그림 5-1	하중 재하 형상	33
그림 5-2	접지면적 선정	33
그림 5-3	응력관측 지점	34
그림 5-4	모델링 방법	34
그림 5-5	상세 모델링 형상	35
그림 5-6	벌크헤드 형상	36
그림 5-7	포락선 정의	37
그림 5-8	벌크헤드 형상에 따른 세로리브측 주응력 범위	38
그림 5-9	벌크헤드 형상에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위	39
그림 5-10	벌크헤드 형상에 따른 가로리브측 슬릿부 주응력 범위	40

그림 5-11	곡선벌크헤드 부착위치	41
그림 5-12	부착 위치에 따른 세로리브측 주응력 범위	42
그림 5-13	부착 위치에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위	43
그림 5-14	부착 위치에 따른 가로리브측 슬릿부 주응력 범위	44
그림 5-15	벌크헤드 형상	45
그림 5-16	곡률변화에 따른 세로리브측 주응력 범위	46
그림 5-17	곡률변화에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위	47
그림 5-18	곡률변화에 따른 가로리브측 슬릿부 주응력 범위	48
그림 5-19	수직리브 모델링 형상	49
그림 5-20	수직리브 부착위치 형상	50
그림 5-21	수직리브 부착위치에 따른 세로리브측 주응력 범위	51
그림 5-22	수직리브 부착위치에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위	52
그림 5-23	수직리브 부착위치에 따른 가로리브측 슬릿부 주응력 범위	53
그림 5-24	수직리브 크기 변화	54
그림 5-25	수직리브 크기 변화에 따른 세로리브측 주응력 범위	55
그림 5-26	수직리브 크기 변화에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위	56
그림 5-27	수직리브 크기 변화에 따른 가로리브측 슬릿부 주응력 범위	57
그림 5-28	최적 보강상세 형상	58
그림 5-29	오차 미발생에 따른 세로리브측 주응력 범위	59
그림 5-30	오차 미발생에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위	60
그림 5-31	오차 미발생에 따른 가로리브측 슬릿부 주응력 범위	61
그림 5-32	오차 발생에 따른 세로리브측 주응력 범위	62
그림 5-33	오차 발생에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위	63
그림 5-34	오차 발생에 따른 가로리브 슬릿부 주응력 범위	64

1장. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

강도로교의 바닥판에는 일반적으로 철근콘크리트바닥판, 강바닥판이 사용되며, 최근에는 I 형강격자바닥판, 프리캐스트바닥판도 사용되고 있다. 이들 중에 강바닥판을 제외한 다른 바닥판은 콘크리트 구조이며, 이들 콘크리트바닥판에 비해서 강바닥판이 단위면적당 약 30~50% 이상의 사하중이 절감된다. 따라서 강바닥판은 사하중 절감이 절실히 요구되는 장대 교량에 있어서 매우 유리한 구조를 가지기 때문에 외국에서는 강바닥판을 이용한 교량의 시공 사례가 많고 국내에서도 다수의 강바닥판교가 시공 또는 계획되고 있다. 또한 강바닥판은 교량을 가설한 후에 콘크리트 공사가 없기 때문에 그만큼 공기를 단축할 수 있는 점이나 들보의 높이가 적어져서 날씬한 형상으로 할 수 있기 때문에 미관을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 가설 공사비를 절감시킬 수 있는 등 많은 장점을 갖고 있다. 이러한 장점으로 독일 그리고 미국에서 사하중 절감을 위해 1930년도부터 사용하기 시작하였으며, 일본에서는 1959년에 처음으로 채택되었다.

한편, 국내에서는 1973년 준공된 남해대교를 시점으로 영종대교, 광안대교 등과 같은 장대교량이나 도시고가도로 등에서도 사용되고 있으며 그 사용실적이 점차 늘어나고 있는 실정이다.

강바닥판은 이상과 같이 많은 장점을 갖는 구조이지만 비교적 얇은 강판을 복잡한 형상으로 용접하여 조립함에 따라 많은 양의 용접을 피할 수 없고, 이로 인한 용접 결함, 잔류응력, 면내 및 면외, 변형의 발생 등이 문제점으로 지적되고 있다. 더욱이 자동차 하중을 직접 지지하고 이들을 주구조로 전달하고 있기 때문에 도로교의 각 부재중에 피로손상이 생기기 쉬운 부분이라고 말할 수 있다.

강도로교에서 피로손상이 문제화되기 시작한 것은 외국의 예를 보면 미국은 1970년대, 일본은 1980년경부터이다. 강바닥판의 피로손상에 대해서는 영국의 Severn교, Wye교 등의 사례가 잘 알려져 있으며, 일본의 도로교에서도 교통량이 많은 노선에 있는 강바닥판에서 발견되기 시작하고 있다. 국내에서는 남해대교의 세로리브 형장용접 연결부등에서 피로균열이 보고되었고, 서부산 낙동강교에서도 피로균열이 발견되는 등 여러 교량에서 피로균열이 보고되고 있기 때문에 강바닥판의 피로거동 및 피로강도 향상방안에 관한 연구가 필요한 것이다. 이러한 이유로 국내에서는 많은 연구가 수행 되었으며, 이 중에서 바닥강판의 두께 증가로 인한 바닥강판 피로균열의 발생량이 감소한다는 결과를 도출하였다. 특히 국내에서는 바닥강판 피로균열보다는 세로리브와 가로리브 연결부에서 많은 피

로균열이 발생하고 있다. 이를 해결하기 위한 방안으로 세로리브 내의 보강상세에 대한 적용이 피로향상에 효과적이라는 연구가 있는 반면 역효과가 발생한다는 연구 결과도 나타났다. 이처럼 국내에서는 강바닥판에 대한 자료가 부족하며, 연구자료 또한 아직까지 실용적인 측면에서 적용성이 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 점을 보완하기 위해 현재 강도로교 설계지침(2006)에서 제시하고 있는 강바닥판 연결부 상세를 대상으로 피로균열이 빈번히 발생하는 가로리브와 세로리브 연결부 및 세로리브, 가로리브 슬릿부에 대해서 국내에서 적용되고 있는 무보강상세와 보강상세의 적합성을 비교하고자 세로리브내의 보강상세인 벌크헤드 및 수직리브를 대상으로 형상 및 크기 변화, 부착위치에 따른 변수로 정밀 구조해석을 수행하여 보다 효율적인 구조상세를 제시하고, 강바닥판의 적극적인 활용화에 그 목적이 있다.

1.2 연구동향

공용중인 교량의 강바닥판에서 피로균열이 관측된 것은 1980년대 후반으로서 독일, 영국 등 유럽과 일본을 중심으로 많은 손상사례가 보고되어 왔다.

그래서 각 국에서는 강바닥판의 구조상세에 대해 피로균열의 발생원인을 규명하고 피로손상의 방지와 피로강도 향상을 위한 여러 구조상세를 선정하고, 이에 대한 응력해석이나 구조상세를 모델화한 시험체를 이용한 피로시험을 실시하여 피로거동을 분석하는 등 많은 연구가 진행되고 있다. 다음은 국내의 강바닥판 연구 자료를 간략히 기술하였다.

신동호(2006)은 강바닥판 구조상세부의 정적거동 및 보강상세에 관한 해석적 연구에서는 강바닥판교의 피로균열이 빈번히 발생해 가장 문제가 되는 세로리브와 가로리브 연결 상세부와 바닥강판과 세로리브 연결부의 발생응력을 최소화할 수 있도록 이에 가장 큰 영향을 미칠 것이라 판단되는 바닥강판 두께, 가로리브 스켈럽 상세, 가로리브 연결길이, 벌크헤드 플레이트나 수직 리브와 같은 보강상세의 부착에 따른 변수로 정밀 구조해석을 수행하여 바닥강판 두께로는 16mm가 타당하며, 가로리브 스켈럽은 현재 20R 보다는 35R, 가로리브 연결길이는 70%가 타당할 것으로 기술하고 있다. 또한 보강상세로서 벌크헤드 플레이트는 전체적으로 주응력 경감에는 효과를 가져 오나 피로균열이 빈번히 발생하는 용접 지단부에서는 오히려 응력 집중을 유발한다고 보고하고 있다.

박영섭(2002)은 실물모형 강바닥판 구조상세부의 피로강도에 관한 실험적 연구에서는 세로리브와 가로리브 용접단부의 종방향 응력은 하중을 가로리브의 가운데 채하 하는 것보다 우측에 채하하면 가로리브 좌측의 응력값은 증가하고, 우측의 응력값은 감소하며, 이러한 응력변화는 하중이 가로리브의 중앙보다 외측에 채하 될 때 세로리브의 비틀림에 의한 영향이 크기 때문인 것으로 보고 있으며, 가로리브와 세로리브의 용접단부에서 발생하는 종방향 인장응력이 더 크게 나타난다고 보고하고 있다. 이것은 세로리브의 비틀림에 의한 응력집중 때문인 것으로 보고 있으며, 피로설계시에는 이러한 용접단부의 응력집중을 고려한 설계가 필요하며, 세로리브와 가로리브의 하부스켈럽 용접단부에 발생한 피로균열은 세로리브의 인장응력이 큰 위치에서 먼저 발생하여 피로균열의 발생은 비틀림에 의한 영향보다는 종방향 휨인장응력이 지배적인 것으로 나타내고 있다.

이춘학(2002)은 강바닥판의 용접상세에 대한 피로강도평가에 대한 논문에서는

세로리브·가로리브 연결부의 슬릿형상은 슬릿측의 응력집중의 완화에 큰 영향을 준다고 보고했다. 또한 설계상의 응력이 높지 않더라도 끝돌림 용접부 지단부의 용접노치로 인한 응력집중이 균열발생의 원인으로 판단되므로 슬릿의 형상을 개선하여 끝돌림 용접 지단부의 응력집중을 감소시켜 피로강도를 향상시킬 수 있음을 기술하고 있다.

최동호(2000)은 강바닥판 슬릿부의 피로거동에 대한 세로리브내의 다이아프램의 영향 연구에서는 강바닥판의 정적 및 영향면 재하시험 결과를 통하여 다이아프램의 유무에 따른 강바닥판 슬릿부의 면내와 면외응력을 검토하였으며, 피로시험결과로부터는 강바닥판의 피로거동, 피로균열의 발생과 진전에 대한 연구를 수행하였다. 다이아프램이 설치된 상세는 설치되지 않은 상세에 비하여 지정조건에 상관없이 세로리브·가로리브 연결부의 세로리브측으로는 약 50%의 응력경감 효과가 있으나, 가로리브측 하단부에는 오히려 상당히 큰 응력을 야기한다고 기술하고 있으며, 측정자료와 FEM 해석을 통하여 공칭응력과 핫스팟 응력에 의한 피로강도를 추정 한 결과, 다이아프램이 설치되지 않은 상세는 규정된 피로등급에서 안전한 것으로 판단되나 다이아프램이 설치된 상세는 피로등급이하의 거동을 보인다고 하였다.

전상호(2000)은 실물 모형 강바닥판 접합상세부의 피로강도에 관한 실험적 연구에서 세로리브와 가로리브의 하부스켈럽 용접단부에 발생한 피로균열은 세로리브의 인장응력이 큰 위치에서 먼저 발생하였다. 따라서 피로균열의 발생은 비틀림에 의한 영향보다는 시험체의 중방향 휨인장응력이 지배적인 것으로 보고했다. 또한 피로시험결과를 S-N 선도상에 도시하여 보면, 대부분의 피로등급이 E 등급보다 높게 나타났으며, 대부분의 균열은 세로리브와 가로리브의 용접단부에서 발생하여 용접선을 따라 진전되다가 결국에는 모재(세로리브)로 진전 된다고 기술하고 있다.

김도균(1998)은 스켈럽의 형상에 강바닥판 연결부의 피로강도가 달라지는 것을 해석적으로 확인해 본 결과, 하부 스켈럽의 곡률을 세로리브의 복부판 경사와 유사하도록 조정 한 것이 피로강도 증대에 가장 유리한 구조상세임을 규명하였으며, 일반적으로 사용되는 강바닥판의 세로리브와 가로리브에 대한 피로실험 결과 시방서에 규정된 피로강도 D등급임을 확인하였다. 또한 시편의 피로 파괴 수명이 연결 상세부의 용접 품질이나 하중의 균등한 분배, 시편제작의 정밀성에 크게 좌우된다는 것을 규명하였다.

1.3 연구 내용 및 구성

본 연구에서는 남향대교의 강바닥판 소블럭을 대상으로 시험체를 제작하여 실험을 실시하고, 구조해석을 수행하여 강바닥판 주요 피로균열 발생개소인 세로리브, 세로리브와 가로리브 연결부, 가로리브에 대하여 검토하고, 벌크형상의 변화, 벌크곡률 변화, 벌크위치변화, 수직보강재 크기 변화, 수직보강재 위치변화에 따른 매개 변수로 구조해석을 수행하여 최적의 강바닥판 상세를 도출하였다. 본 논문은 다음의 제 6장으로 구성되어 있다.

제 1장에서는 강바닥판에 대한 기존의 연구결과와 보고서 등을 참고로 하여 한국의 연구동향을 제시하고 연구의 목적과 내용을 서술하였다.

제 2장에서는 강바닥판 일반 개념 및 국가별 설계기준의 상이성으로 인한 피로균열 원인을 규명하였다.

제 3장에서는 유한요소 해석 프로그램을 통하여 전체계해석과 부분해석을 실시하여 해석 결과를 검토하여 국부해석의 타당성을 검증하였다.

제 4장에서는 강바닥판 보강상세 타당성을 위한 시험체를 제작하여 실험을 실시하고, 구조해석을 통하여 실험값과 비교·분석하였다.

제 5장에서는 강바닥판의 보강상세를 통한 피로강도 향상을 위하여 벌크형상의 변화, 벌크곡률 변화, 벌크위치변화, 수직보강재 크기 변화, 수직보강재 위치변화에 따른 매개 변수로 구조해석을 수행하였다.

제 6장에서는 본 연구를 통하여 최적의 강바닥판 상세를 도출하였다.

제2장 강바닥판 구조와 피로균열 원인비교

2.1 강바닥판 기본 개념

일반적으로 교량에 쓰이는 강상판은 촘촘히 배치된 세로리브와 그것에 직교하여 비교적 개략적으로 배치된 가로리브로 구성되어 있다. 이러한 세로리브와 가로리브는 강성이 다르기 때문에 두 개의 주방향으로 탄성 거동을 보이므로 직교이방성 판이라고 부른다. 이러한 강바닥판은 얇은 판으로 구성되어 있기 때문에 다음과 같은 장단점을 갖고 있다.

- ① 강바닥판은 철근 콘크리트 바닥판에 비해 30% ~ 50% 가볍기 때문에 기초 구조의 지지력에 유리
- ② 주거터와 함께 일체로 거동하게 되므로 일반교량과 비교할 때 같은 시간과 교폭, 같은 하중하에서 재료를 55%까지 절감할 수 있다
- ③ 제작의 거의 전 과정을 공장제작하게 되므로 품질의 신뢰성을 높일 수 있다.
- ④ 현장 조립의 간편성과 교량가설 후의 콘크리트 타설 등의 공정이 없으므로 그만큼 공기를 단축시킬 수 있다.
- ⑤ 상대적으로 형고를 낮출 수 있어 미관을 향상시킬 수 있다.

따라서 강바닥판은 사하중 절감이 절실히 요구되는 장대교량에 있어서 매우 유리한 구조이나 강바닥판은 비교적 얇은 강판을 복잡한 형상으로 용접하여 조립함에 따라 많은 양의 용접을 피할 수 없고, 이로 인한 용접결함, 잔류 응력, 면내 및 면외 변형의 발생 등 문제점으로 지적되고 있다. 이러한 결함요인은 결국 강바닥판의 피로강도를 저하시키는 결과를 초래한다.

2.1.1 강바닥판의 구조

강바닥판은 촘촘히 배치된 세로리브(Longitudinal Rib)와 비교적 넓게 배치된 가로리브(Cross beam)에 의해 보강된 바닥강판(Deckplate)으로 구성된다. 세로리브는 크게 개단면 리브와 폐단면 리브 단면으로 분류할 수 있는데, 초기에는 개단면 리브가 주로 사용되었으나, 요즘에는 V형이나, 사다리꼴 같은 폐단면 리브가 주로 사용된다. 폐단면의 리브는 휨강성 및 비틀 강성이 크고 횡방향 유효중분배가 좋으며, 한쪽 필렛용접 때문에 바닥강판의 잔류응력 발생이 적다는 특징

을 가지고 있다. 따라서 우리나라에서는 거의 폐단면리브 형태와 접합상세부 형태가 표준화 되고 있다. 그림 2-1과 그림 2-2에 개단면 리브, 폐단면 리브를 사용한 강바닥판 교량의 구조를 나타내었다.

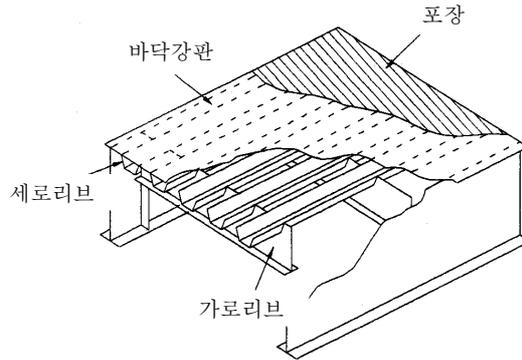


그림 2-1 폐단면 리브를 사용한 강바닥판

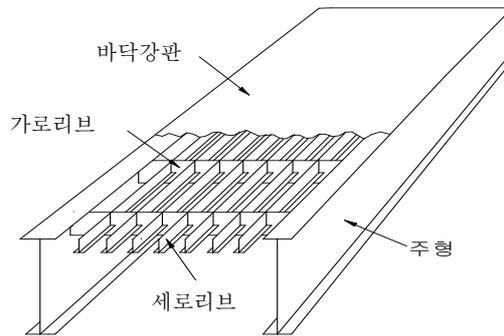


그림 2-2 개단면 리브를 사용한 강바닥판

2.1.2 강바닥판의 기본 구조 시스템

하중을 받고 있는 강바닥판교의 바닥판 응력은 교량구조 중에서 바닥판이 받는 여러 가지 기능이 조합된 결과로 발생한다. 이들 기능과 그 기능에 대한 결과로 생기는 응력은 서로 상관관계에 있으며 명확한 이해와 설계상의 편의를 위하여 다음과 같은 기본구조 시스템으로 나누어 볼 수 있다.

거동 1 - (교량 주부재의 일부로서 작용하는 바닥판) : 가로리브가 존재하는 교량

에 있어서, 바닥판은 가로리브에 견고히 연결된 세로리브 보강재와 함께 주형의 상부 플랜지로서 거동한다.

거동 2 - (세로·가로리브 공동의 상부 플랜지로서의 작용) : 바닥판과 주형사이를 모두 수평 전단 연결재로 가정하여 교량의 독립구조로 취급한다. 따라서 바닥판은 주형에 얹혀 있는 것으로 본다. 주형으로부터의 종방향 힘은 전달되지 않고, 바닥판에 실린 외부하중의 국부적인 영향만을 받을 뿐이다.

거동 3 - (세로리브 사이에서 작용하는 바닥판) : 집중 윗하중을 직접 지지하고 그 하중을 각 리브에 전달한다. 국부적으로 리브 위의 연속부재로서 작용한다.

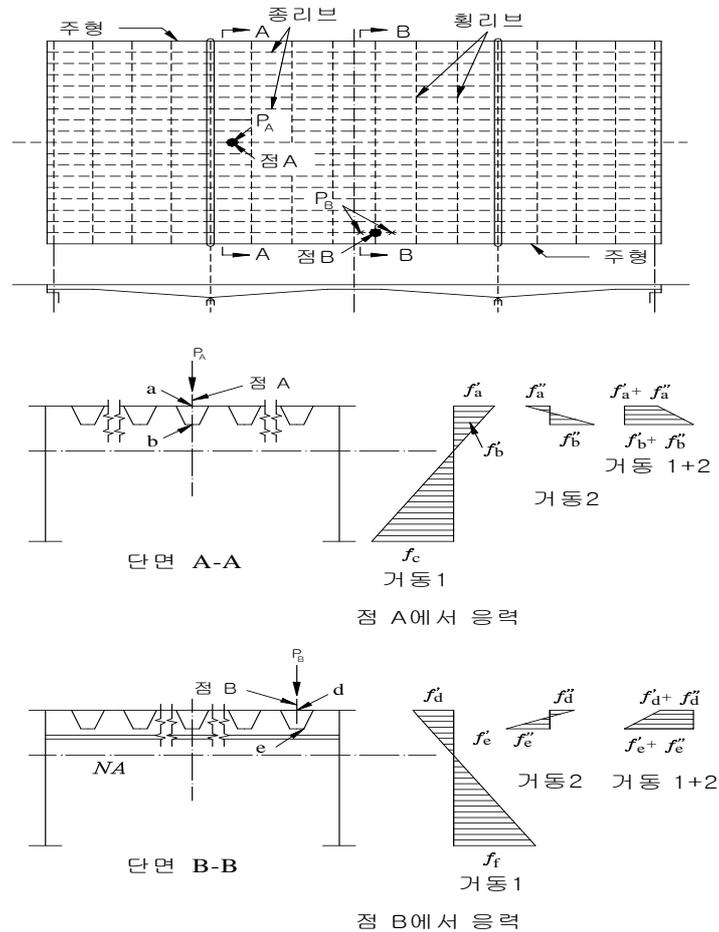


그림 2-3 바닥판 응력분포

작용하중하에 있는 강바닥판 임의부재의 최대응력을 구하려면 앞서 논한 기본적인 3가지 거동으로부터 부재의 분담에 따른 응력성분을 그림 2-3과 같이 적절히 중첩함으로써 얻을 수 있다. 그러한 응력의 중첩은 하중과 응력과의 직선비례가 개개 거동의 상호작용 영향을 받지 않는다는 가정 하에 성립된다. 그림 2-3과 같은 교량에서 바닥판의 거동1 작용은 주형 정모멘트의 범위에서는 압축응력을, 부모멘트 범위에서는 인장응력이 바닥판에 발생 한다. 거동1의 축응력에 교축방향 거동2의 휨응력이 합해져야 한다. 거동3에서 바닥판의 응력은 주로 교축 직각 방향에 작용하여, 거동1·거동2의 응력중첩시 거동3의 응력은 무시된다.

2.2 강바닥판의 손상사례

일반적으로 피로균열의 문제는 다음의 두 가지로, 균열을 유발하는 응력범위의 원인이 되는 하중의 경계조건에 따라 하중에 의해 유발되는 균열과 뒤틀림(distorsion)에 의해 유발되는 균열로 구분된다. 직교이방성 강바닥판의 균열문제는 이 두 가지 형태를 모두 포함한다.

2.2.1 세로리브 모재균열

기존 연구에서 강바닥판 시스템의 경우 세로리브가 가로리브와 필릿용접에 의해 연결 지지되도록 하고 있어, 세로리브에 인장응력 발생시 세로리브와 가로리브의 연결상의 용해부족부가 노치로 작용하여 쉽게 균열이 발생되곤 하였다. 또한 세로리브의 공칭 휨응력을 적용하여 이 부위를 AASHTO LRFD(참고문헌 16) 설계기준에서는 E' 범주로 평가하고 있으며, 이러한 문제를 개선하기 위해 세로리브를 가로리브에 관통시켜 연결하는 Continuous Stiffener Method 상세로 개선된 후 피로강도 D 범주로 규정하고 있다. 또 다른 예로 세로리브의 현장 이음부에 대해 받침대를 적용해 용접한 경우 세로리브 연결부를 E 범주로 제시하고 있다.

뒤틀림 유발 피로균열은 전형적으로 면외 변형에 기인한 2차응력으로부터 유발된다. 이러한 균열을 유발하는 응력은 정량화하기 매우 어려우며, 일반적으로 유한요소법을 적용한 상세해석으로도 이러한 응력을 정확히 산정할 수 없다. 정확한 계산에 기초한 설계방법이 현재 불가능하므로 개선된 상세 표준적인 작업 조건을 지키면서 품질관리를 하는 것으로 뒤틀림 유발 피로균열을 방지할 수 있을 것이다. 따라서 AASHTO LRFD는 2차적으로 발생하는 힘을 충분히 지지하는 하중경로를 갖게 하고(벌크헤드 플레이트 설치 등), 최소 판두께와 같은 요구조건을 제시함으로써 뒤틀림 유발 피로균열이 일어나지 않도록 하고 있다. 뒤틀림 유발 피로균열은 가로리브와 연속 세로리브에서 여러 가지 이유로 발생하게 되는데, 그 중 하나는 가로리브의 전단변형에 의한 것으로 특히 큰 전단력이 발생하는 캔틸레버부에서 심각하게 나타난다(더욱이 캔틸레버 단부에 대형차량 차선이 있어 큰 하중이 작용하게 됨). 또한 뒤틀림은 포아송 효과로 인해 발생하기도 하나, 앞서 언급한 전단에 의한 뒤틀림 보다는 덜 심각하다.

그림 2-4는 호주의 Westgate Bridge(참고문헌 20)에서는 벌크헤드 플레이트가 없는 경우로서 세로리브와 가로리브 연결부에서 피로균열이 발생하였는데 이는 가로리브로부터 전달되는 힘을 지지할 벌크헤드 플레이트가 없어 캔틸레버부의

가로리브와 연결된 세로리브의 단부에 대한 전단변형으로 인해 유발된 것으로 분석되었다. 따라서 Williamsburg Bridge의 강바닥판 재시공 시 캔틸레버부에 벌크헤드 플레이트를 설치하는 안이 제시되었으며, 실제 시공 시 벌크헤드 플레이트를 적용하였다.

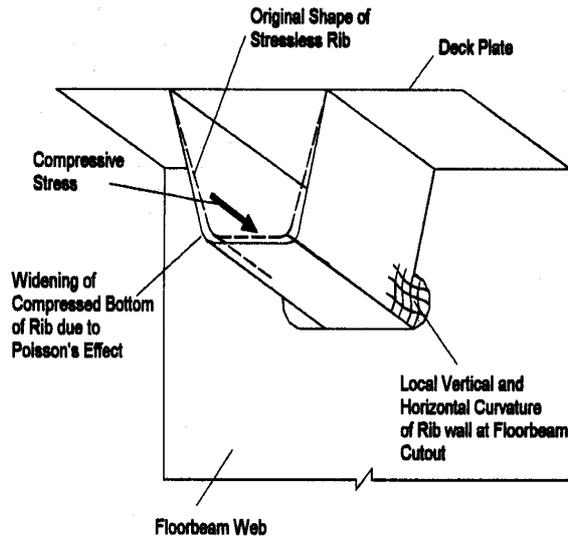


그림 2-4 전단변형 유발 피로균열

그림 2-5는 세로리브측 피로균열의 한 예로 가로리브와 바닥강판, 바닥강판과 세로리브, 가로리브와 세로리브의 용접선과 Corner-Cut을 용접 메움한 곳의 루트부에서 시작된 것으로 판단되는 균열이 용접선을 따라 진전, 세로리브로 발전되었고, 이 균열이 진전하여 세로리브를 관통하는 균열로 발전되었다. 물론 이러한 균열은 직 재하부의 세로리브, 가로리브 교차부에서 발견되는 균열로서 높은 응력집중으로 인해 재하판 밑의 교차부 전부에서 발생하여 용접선을 따라 진전된다. 하중 또한 교차부 바로 위에 위치하고 있으므로 하중 재하시 복잡한 변형과 응력상태를 보이고 있다. 하중재하 상태에서 중앙 세로리브 면은 상부쪽에서 세로리브 바깥으로 급격한 곡률을 갖는 변형이 일어나며, 또한 가로리브의 구속으로 인해 가로리브와 맞닿은 부분은 다시 안쪽으로 들어가는 변형이 발생한다. 이로 인해 바닥강판·가로리브·세로리브 교차부에서는 큰 응력집중이 생겨서 초기 균열이 발생된 것으로 판단되고 이 균열이 모재가 아닌 용접선을 따라 진전되다가 바닥강판에서 세로리브로 전이, 세로리브 두께를 관통하면서 진전된 것으로 판단되며, 이러한 균열은 가로리브 사이로 종방향으로 각각 진전되는 상황에

서 서로 만나던가 아니면 빗겨서 진행되고 있다.

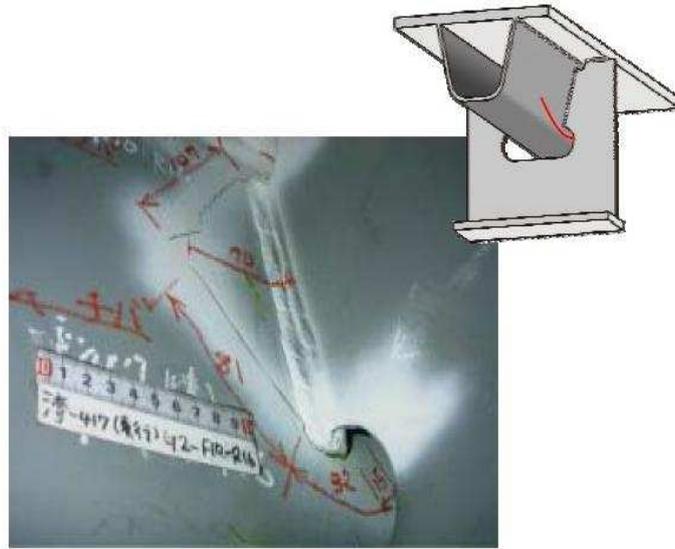


그림 2-5 세로리브측 피로균열 사진

2.2.2 세로리브와 가로리브의 연결부

세로리브와 가로리브 연결부의 피로손상은 그 동안 많은 보고가 있었다. 그림 2-8 ⑨의 위치에 그림 2-9 ① 내력으로서 피로균열이 발생한다. 아래 그림 2-6은 외국 A 교량에서 최근에 세로리브와 가로리브의 연결부에서 균열이 발생한 것을 나타내었다(피로 균열은 빨간색으로 표시된 부분이다). 그림 2-6은 세로리브와 가로리브의 연결부의 피로 균열 발생 사례로 세로리브로부터 전단력을 확실히 가로리브로 전할 수 있는 구조로 해야 한다. 교량단부에서 단부가로보에 붙임을 하는 경우이나 가로리브를 경계로 하여 세로리브의 단면이 변화되는 경우를 제외 하고는, 세로리브는 가로리브를 관통하여 연속시키는 것이 바람직하다. 세로리브와 가로리브의 교차부와 같이 용접선이 집중하는 개소에서는 스캘럽을 두는 방법과, 용접의 크기에 유의하여 용접변형이 될 수 있는 한 적게 되도록 하고, 시공성도 좋도록 배려해야 한다.

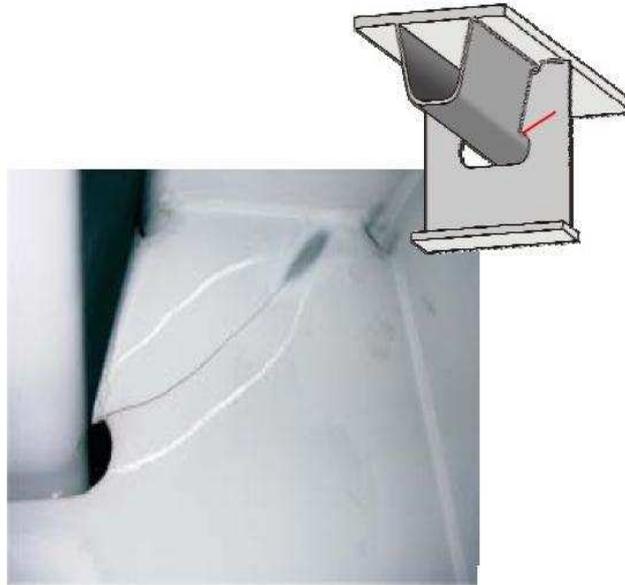


그림 2-6 세로리브와 가로리브 연결부 피로균열 사진

위와 같은 피로 균열을 야기시키는 내력작용 형태를 자세히 분석해 보면 세로리브의 면외 비틀림에 의한 변형, 가로리브의 면내 전단에 의한 변형, 가로리브 면내 휨모멘트에 의한 변형에 의한 가로리브 면내 거동, 세로리브의 교축방향 휨모멘트로 인한 곡률로 가로리브의 면외 회전으로 인한 가로리브의 면외 거동 발생 등에 의해 가로리브의 곡률부와 용접단부는 이러한 면내거동과 면외거동 조합에 의한 응력집중으로 큰 응력상태를 보이게 되어 높은 변동응력 때문에 피로손상이 유발된다.

2.2.3 가로리브 슬릿부 균열

기존 연구의 시험체 정적실험이나 구조해석 결과에서 나타난 바와 같이 스캘럽부에서 발생하는 응력이 상당히 크므로 적은 반복재하에서도 균열이 발생하였다고 기술하고 있다. 그림 2-7과 같이 균열의 발생위치를 보면 스캘럽부 중간, 즉, 최대주응력이 일어난 부분과 주응력이 가장 크게 작용하는 부분 바로 밑 부분에 위치하고 있었고, 후자인 경우가 전단응력이 크게 작용하는 부분으로 해석되었다. 그림 2-8 ㉑의 위치에 그림 2-9 ㉓ 내력으로서 피로균열이 발생한다.

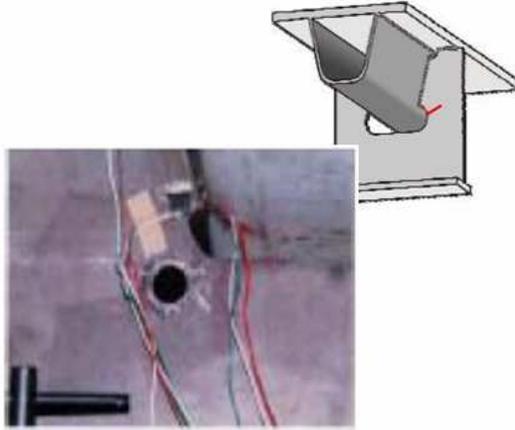


그림 2-7 가로리브 슬릿부 피로균열 사진

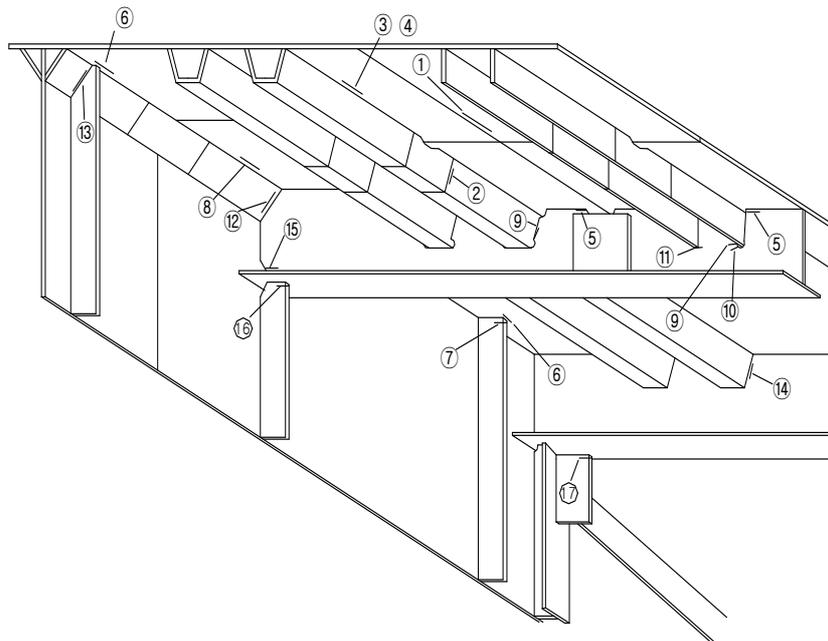


그림 2-8 강바닥판교 피로균열 예

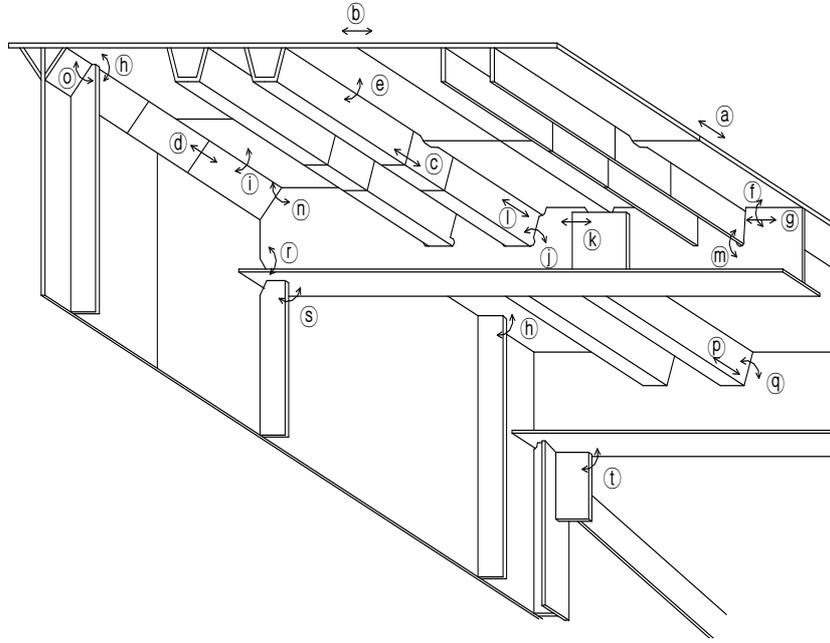


그림 2-9 강바닥판교 내력작용 예

2.3 설계기준 비교

국내와 국외의 강바닥판 설계기준을 비교하면 표 2-1~2-2와 같이 상이하다. 즉 바닥강판의 두께와 다이아프램의 허용여부, 스캘럽 곡률이 다른 형상을 보이고 있다. 그러나 이러한 설계기준의 상이함은 강바닥판의 내구성에 상당한 차이를 유발함을 알 수 있다. 그러한 증거로 현재 국외(일본, 유럽)는 바닥강판의 두께가 국내는 14mm인데 반하여 12mm이기 때문에 많은 교량의 개소에서 바닥강판에 피로균열이 발생되고 있는 실정이며, 국내에서는 아직 발생하지 않았다. 또한 세로리브와 가로리브 연결부 및 가로리브 슬릿부에서는 대부분의 국가에서 손상사례가 보고되고 있으며, 이러한 연결부의 피로등급을 향상 시키는 방안으로 국외에서는 세로리브내 보강상세(수직리브, 벌크헤드 플레이트)를 적용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 피로균열이 많이 발생하고 있는 세로리브와 가로리브 연결부를 대상으로 하였으며, 이를 보강하기 위해 국외의 경우와 같이 보강상세를 적용하여 피로강도 향상에 기여하고자 한다.

표 2-1 국내와 국외의 설계기준 비교

	설계기준대상	국내	국외
종리브와 데크플레이트	바닥강판 두께	차도부분 $t=0.036b \geq 14\text{mm}$ 보도부분 $t=0.0256b \geq 10\text{mm}$ 여기서 $b = \text{종리브의 간격(mm)}$	차도부분 $t=0.037b \geq 12\text{mm}$ (B활하중) $t=0.035b \geq 12\text{mm}$ (A활하중) 주거터로서의 작용 일부를 받는 보도부 $t=0.025b \geq 10\text{mm}$ 여기서 $b = \text{세로리브의 간격}$

표 2-2 세로리브와 가로리브 연결부 설계기준 비교

	설계기준대상	국내	국외
세로리브와 가로리브 연결부	세로리브 최소두께	개단면 - 6mm 폐단면 - 8mm	세로리브 판두께 - 8mm *다만 부식 고려시 폐단면 세로리브 - 6mm
	바닥판 두께	14mm	12mm(일본)
	수직리브	설치 사례없음	Bronx-Whitestone(미국)
	세로리브내 다이아프램 설치여부	녹산대교	Williamsburg(미국)
	스캘럽 형상	스캘럽 곡률 35R	스캘럽 곡률 20R(일본)

제3장 강바닥판 전체계해석과 국부해석 검토

강바닥판은 바닥강판, 리브 및 가로리브 등으로 구성되어 하중 재하시 스켈럽이 존재하는 각각의 연결부에서 가로리브의 면내응력과 면외응력, 세로리브의 면외응력의 조합으로 인한 응력이 발생하는 등 국부적인 거동이 지배하게 되는 바닥판 구조이다. 따라서 향후 국부해석을 통한 강바닥판 최적보강상세를 찾고자 본 장에서는 전체계해석과 소블럭 국부해석을 비교 하였다. 이러한 이유는 보다 정밀한 결과 값은 실구조물과 똑같이 모델링하여 FEM을 수행하여야 하나 경제성과 효율성을 고려하여 전체 교량을 대상으로 해석한 결과값과 이 전체 교량중 작은 소블럭을 대상으로 도출한 응력집중을 받지 않는 부분에 대해서 공칭응력 값을 비교하여 국부해석의 타당성을 검증하고자 한다.

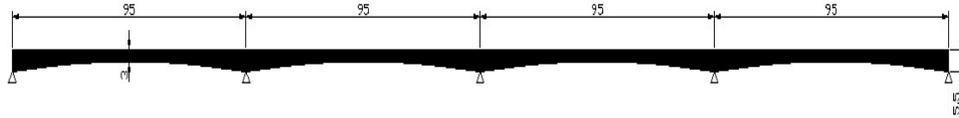
3.1 전체해석 및 국부해석 모델링

3.1.1 전체모델링

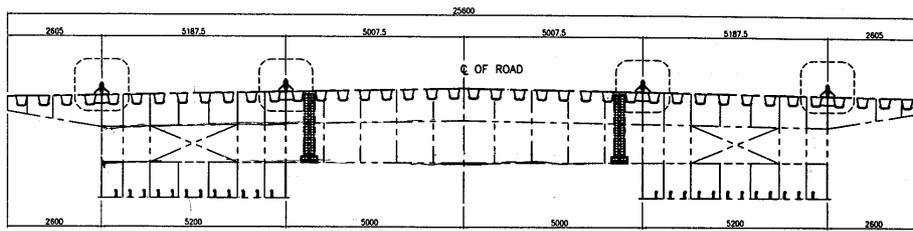
1) 대상교량

대상 교량은 현재 시공 중에 있는 남향대교로 선정하였다. 본 연구에서 사용한 상세 모델링은 남향대교의 제원과 같으나 스켈럽 형상에 대해서는 ‘구조상세부의 정적거동에 따른 고 내구성 강바닥판 개발’ (경갑수, 2006)에서 제안한 구조상세를 적용하였다. 이는 1장의 연구동향(신동호 논문)에서 살펴 보았듯이 현재 적용된 상세보다는 스켈럽 형상 및 바닥판 두께에 대해서 제안된 구조상세가 현재 국내에서 적용되고 있는 강바닥판 기준 보다 피로저항이 향상되었기 때문이다. 따라서 이 후 연구에서는 바닥강판 16mm, 가로리브 스켈럽 형상 35R, 가로리브 연결길이를 70%로 하여 적용하였으며, 이외의 일반사항은 남향대교 상세를 적용하였다.

교량은 그림 3-1과 같이 전체 4경간(4@95=380m)으로 중앙 지점을 중심으로 2경간 대칭이다. 교폭은 25.6m이고, 가로보의 간격은 전 경간에 걸쳐서 5m간격이며, 주형내부의 가로리브는 2.5m 간격이 구간별로 구분되어 있다. 대상교량은 연속교로서 박스의 복부 높이가 변하는 변단면 구조물로 대상 경간 중앙부의 복부의 높이는 3m이고, 지점부 복부의 높이는 5.5m이다.



(a) 전체도



(b) 단면도

그림 3-1 대상교량

2) 유한요소해석

모델링은 실구조물을 가장 근사적으로 모사할 수 있는 3차원 모델을 사용하였으며, 범용 유한요소해석 프로그램인 LUSAS 1.3-7을 적용하여 모델링의 효율성을 위해서 관측하고자 하는 부분에는 8절점 Shell 요소를 사용하여 구조검토를 수행하였다. 전체계해석에서 사용된 요소는 총 108,952이며, 국부해석에서 사용된 요소는 84,410으로 모델링을 구성하였다. 대상교량의 재료 특성치로 탄성계수는 210GPa, 포아송 비는 0.3을 적용하였으며, 단위중량은 7.85GPa을 사용하였다.

3) 모델링 형상

그림 3-2와 같이 전체해석 모델은 4경간 연속 380m중 367.5m는 빔 모델을 사용하고, 본 연구의 주요 관심대상 위치인 12.5m 구간은 주형 및 바닥판을 모두 셸로 모델링해서 국부해석 단면의 모든 지점 요소에서 보다 정확한 구조 거동의 평가 및 해석 시간의 경제성을 도모할 수 있는 방법을 제시했다. 빔과 셸은 Rigid Rink를 사용하여 중립축을 일체화 시켜 요소 모델 차이로 인한 거동특성을 고려하였다. 하중재하 면적은 그림 3-3과 같이 도로교 설계기준·해설(2003)의 DB-24(1등급) 트럭하중에 의한 차륜 접지면적을 사용하여 그림 5-2에서 보는 것과 같이 접지면이 580×230mm이 되도록 하여 총하중 96kN 하중을 가로리브 직상부에 재하 하여 구조해석을 수행하였다.

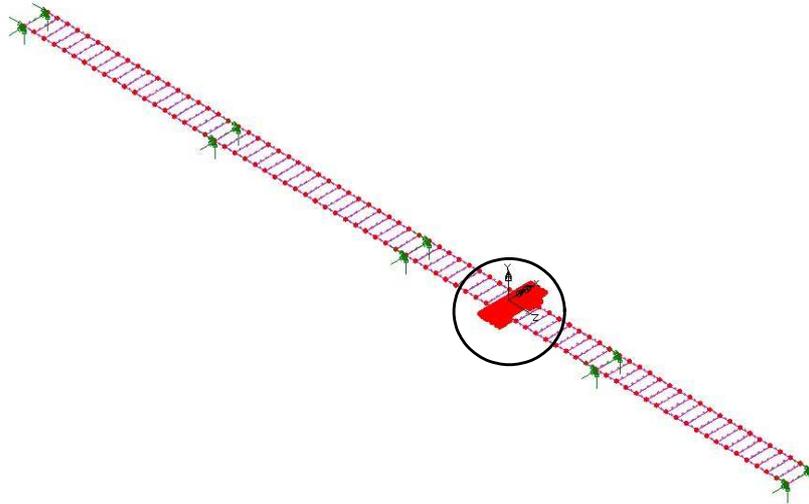


그림 3-2 전체 모델링 형상

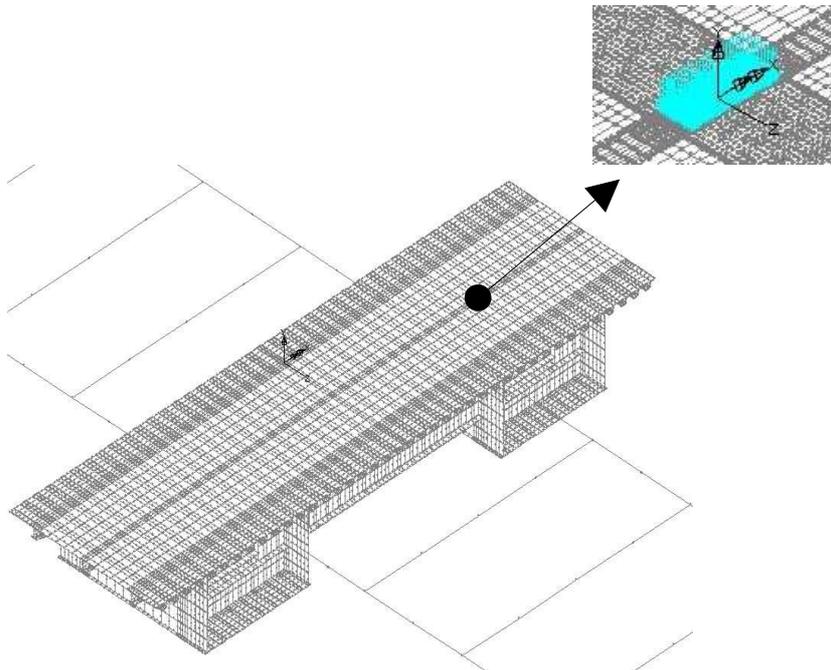


그림 3-3 전체해석중 Shell 모델링 부분

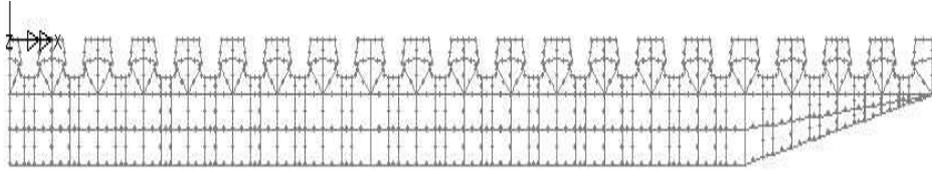
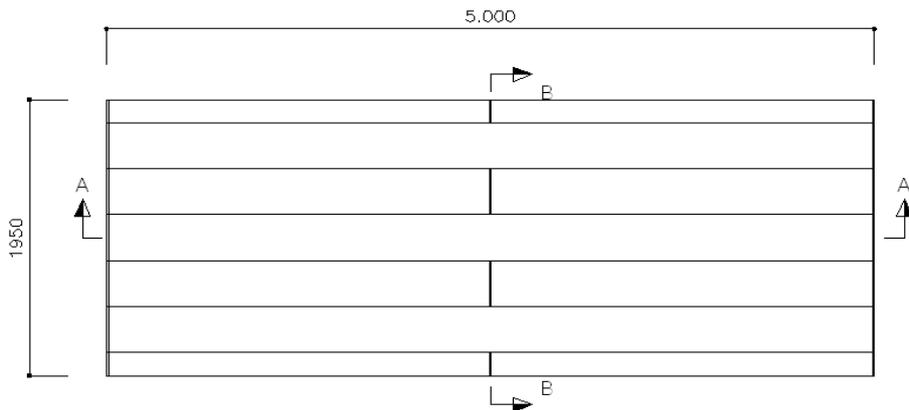


그림 3-4 전체해석 Shell 요소중 가로리브(관측대상)

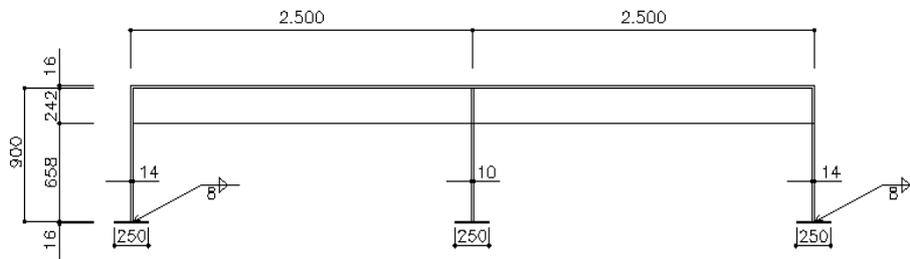
3.1.2 소블럭 국부해석 모델링

1) 대상 교량

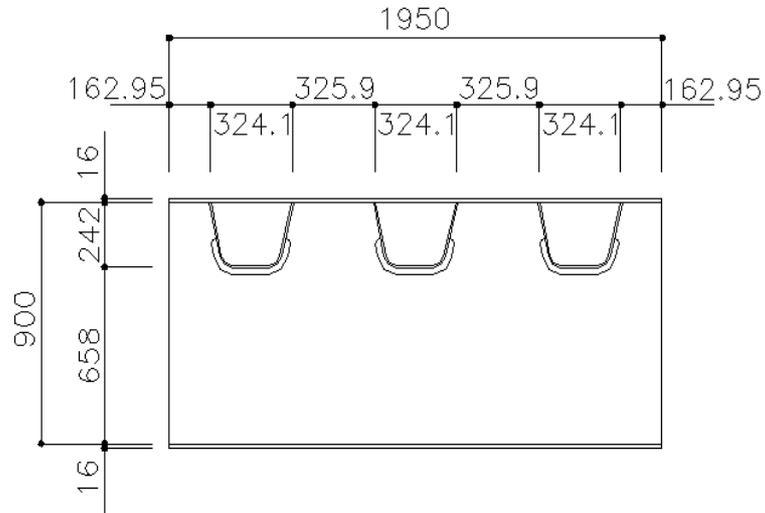
대상교량은 전체모델링과 같이 남향대교를 대상으로 하였으며, 모델링 형상은 그림 3-5에서 보는 것과 같이 3개의 세로리브와 3개의 가로리브, 데크로 구성된 소블럭을 대상으로 하였다.



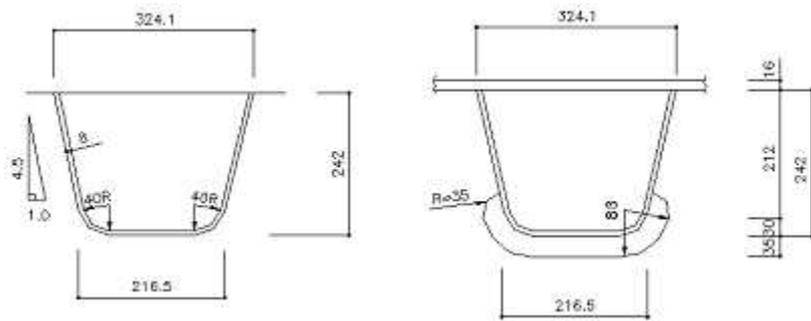
(a) 평면도



(b) 측면도



(c) 정면도



(e) 제안상세

그림 3-5 강바닥판 형상 및 치수

2) 모델링 형상

부분적 모델링 형상 및 전체 모델링 형상은 그림 3-6과 같다. 지점조건으로는 인접한 종방향 거더 사이의 가로리브, 세로리브, 바닥강판으로 이상화한 구조물 이므로 가로리브 양측의 종방향 거더가 가로리브에 대한 구속은 단순지지 형식으로 볼 수 있기에 가로리브측에 양단을 단순지지 형식으로 하여 6지점으로 모델링 하였다.

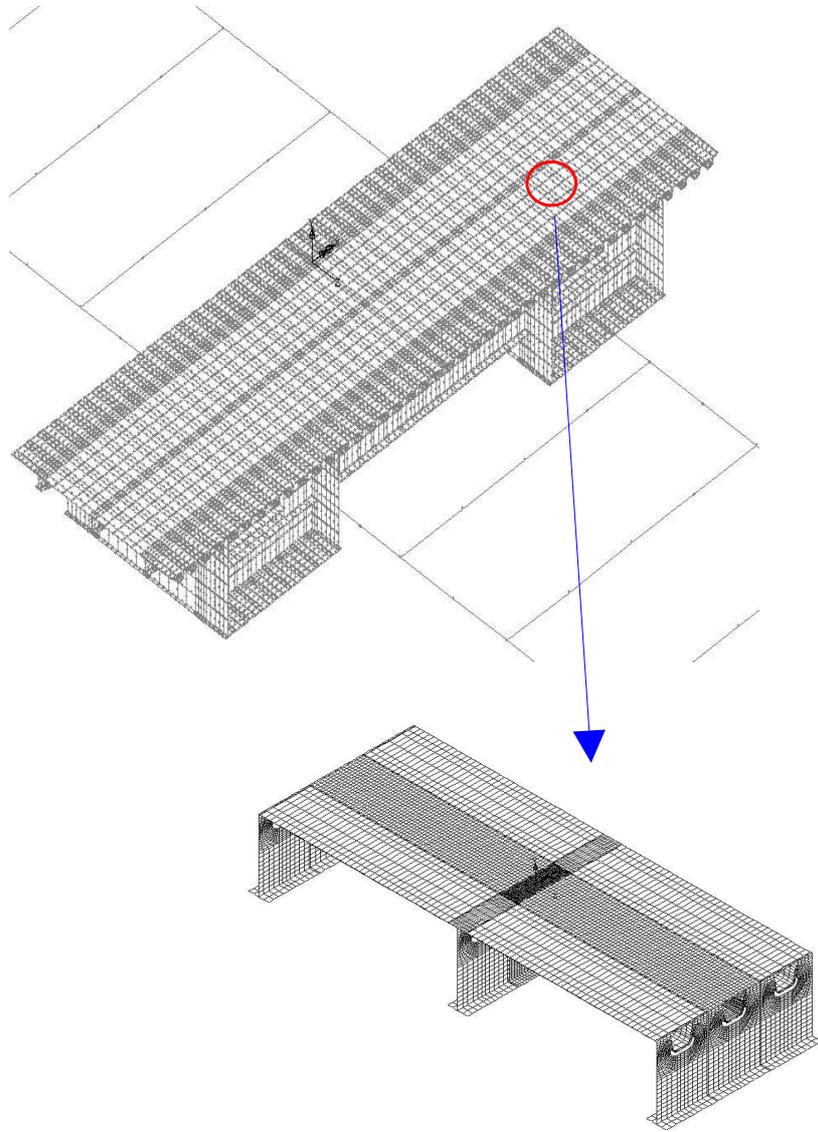


그림 3-6 부분모델링 형상

3.2 전체해석과 소블럭 국부해석 비교·분석

3.2.1 구조모델링 타당성 검토

전체모델링의 타당성을 검증하기 위하여 사하중을 대상으로 반력 및 모멘트 값을 구조계산서 값과 비교 하고자 한다. 해석결과 표 3-1에 나타난 것과 같이 구조계산서 값과 해석값이 지점 4, 5번에서 다소 차이를 보이고 있는데 이는 실제 교량은 4, 5경간이 곡선부로 되어 있으나, 본 연구에서는 곡선부를 직선으로 보고 해석을 수행하여 차이가 있는 것으로 판단되며, 이외의 위치에 대해서는 거의 같은 값을 보이고 있다. 또한 구조계산서의 사하중에 대한 모멘트 값을 검토한 결과 표 3-2에서와 같이 구조해석 및 구조계산서의 값이 거의 같은 값을 보이고 있으며, 모멘트선도 역시 그림 3-8과 같이 일치됨을 알 수 있었다. 따라서 본 전체계 구조해석의 모델링은 타당하다고 판단된다.

표 3-1 반력 검토(KN)

		구조해석 반력	구조계산서 반력값
G1	1	3,090	3,080
	2	12,110	12,140
	3	8,790	8,740
	4	12,110	13,560
	5	3,090	3,510
G2	1	3,090	3,080
	2	12,110	12,140
	3	8,790	8,770
	4	12,110	10,740
	5	3,090	2,630

표 3-2 사하중에 대한 모멘트 검토(kN · m)

	구조해석 반력	구조계산서 반력값
최대정모멘트	53,727	55,167
최대부모멘트	-128,950	-134,392

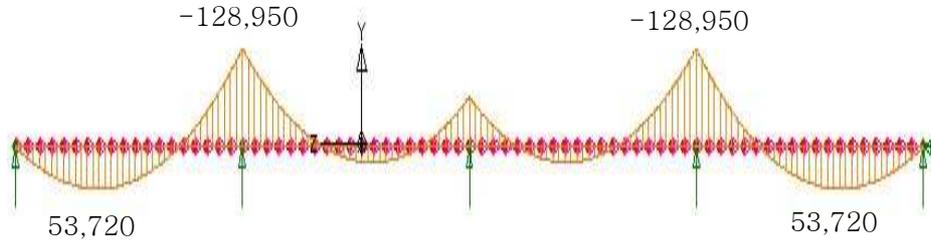


그림 3-7 사하중에 대한 모멘트 선도

3.2.2 전체해석과 소블럭 국부해석 공칭응력 검토

소블럭 국부해석의 타당성을 검증하기 위하여 전체계해석과 국부해석의 공칭응력을 바닥강판에 대해서 검토하여 표 3-3에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 전체해석의 공칭응력 값이 국부해석의 공칭응력 값보다 5%정도 오차를 보이고 있는데 이는 전체 모델과 국부모델간의 경계조건의 차이 및 강성의 차이, 하중조건의 차이 등에 의한 결과라고 판단되며 그 차이가 미소하므로 부분해석으로 구조해석을 수행하여도 적합하다고 판단된다.

표 3-3 전체해석과 소블럭 국부해석 공칭응력 비교(MPa)

	전체계해석	부분해석	비교
공칭응력	-31.4	-29.9	5% 오차

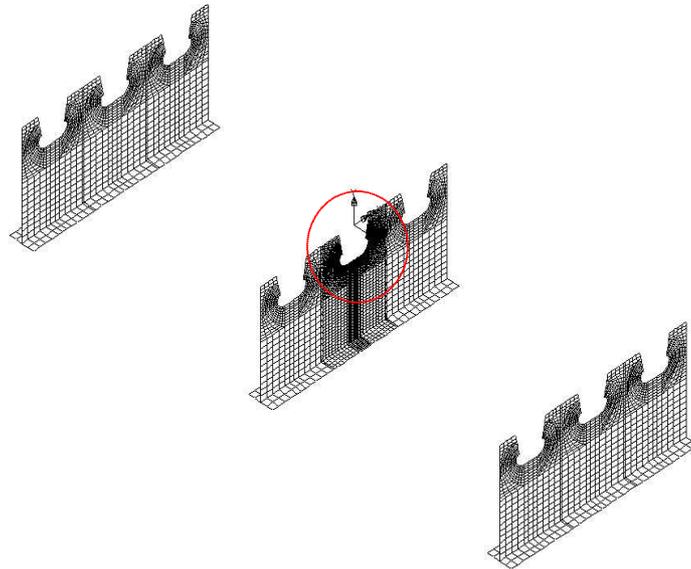
제4장 고내구성 강바닥판 정적실험 및 국부해석 검토

본 장에서는 3장에서 기술한 전체해석과 국부해석의 검증을 바탕으로 강바닥판 실험체를 제작하여 정적실험을 실시하고 소블럭 상세해석을 통하여 공칭응력값을 비교하여 소블럭 상세해석의 적절성을 판단하고자 한다.

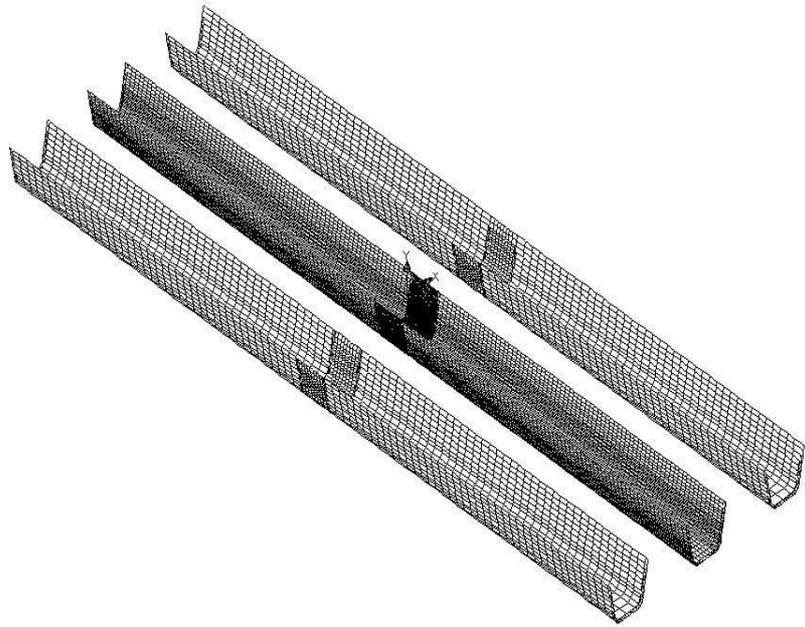
4.1 실험방법

4.1.1 모델링 형상

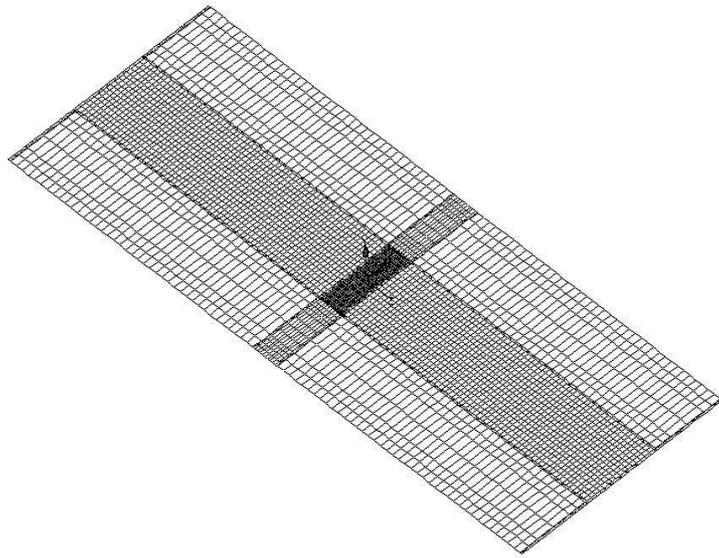
대상교량은 그림 3-5의 제원을 사용하여 3개의 세로리브와 3개의 가로리브, 데크로 구성된 소블럭으로 모델링하였다. 상세 모델링 형상은 그림 4-1과 같고, 원으로 표시한 부분이 관측하고자 하는 대상 위치로 mesh 분할을 다른 부분에 비해 작은 요소로 분할하였다. 이러한 이유는 mesh 크기에 따라 구하고자 하는 응력값의 크기가 변화하므로 보다 정밀한 해석값을 도모할 수 있기 때문이다. 해석에서 사용된 요소는 총 84,410이며, 대상교량의 재료 특성치로 탄성계수는 210GPa, 포아송 비는 0.3을 적용하였으며, 단위중량은 7.85GPa을 사용하였다.



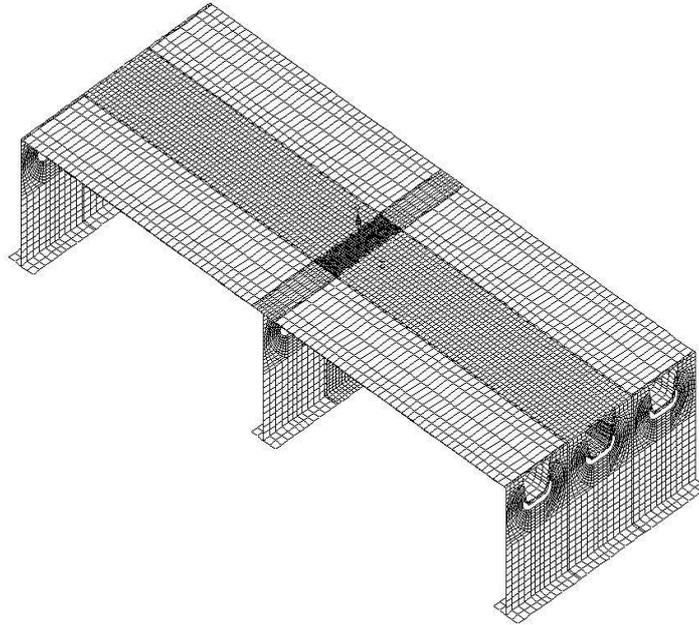
(a) 가로리브



(b) 세로리브



(c) Deck



(d) 전체모델링 형상

그림 4-1 상세모델링 형상

4.1.2 정적시험 하중위치 및 측정점

전체해석과 국부해석의 검증은 바탕으로 실교량의 강바닥판과 유사한 대형시험체를 제작하여 정적실험을 실시하고, 국부해석의 적절성을 판단하기 위해 실험값과 국부해석 값을 검토하였다. 시험은 그림 4-2와 같이 대형 시험체를 지지보 위에 거치시켜 가로리브의 양단이 힌지가 되도록 하였다. 하중재하 면적은 도로교 설계기준·해설(2003)에 의한 설계시 트럭의 차륜 접지면적을 사용하여 접지면이 200mm×500mm이 되도록 하여 최대하중 24t를 재하하여 실험을 실시하였다. 재하위치 선정은 세로리브와 가로리브의 면내 및 면외거동을 고려할 수 있도록 재하위치를 선정하였으며, 여기서 차륜의 접지면은 DB 18(2등교) 하중의 각 차륜에 대해 하나의 사각형으로 간주하며 이 지사각형의 폭과 길이의 비는 2.5:1로 하여 적용하였다. 또한 실험에서 다양한 하중을 재하하여 실험을 실시하였으나, 본 논문에서는 공칭응력을 보고자 실험값중 최대하중에 대한 값에 대하여 검토하였다. 차량의 측정점으로는 그림 4-3과 같이 기존 연구자료를 바탕으로 피로

균열이 많이 발생하는 세로리브와 가로리브 연결부 및 가로리브측 슬릿부, 세로리브와 바닥강판 용접부를 대상으로 선정하였으며, 대상위치에 3축게이지를 설치하여 x, y, z 축에 대한 최대주응력 값을 측정하여 상세 구조해석 값과 비교하였다.

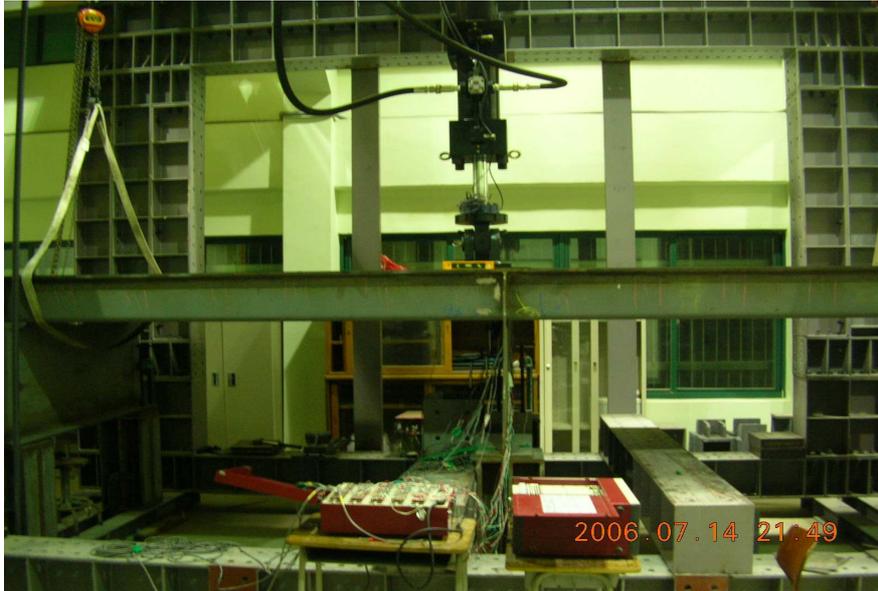


그림 4-2 강바닥판 실험

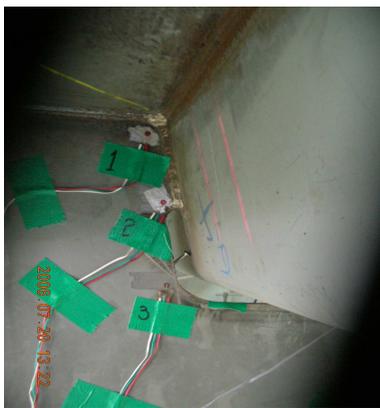


그림 4-3 게이지 부착위치

4.2 강바닥판 구조상세부의 정적거동 및 구조해석 분석

본 연구에서는 하중 재하위치에 따른 각 구조부위에서의 응력특성을 분석, 평가하기 위해서 대상부위를 세로리브와 바닥강판 용접부, 세로리브와 가로리브 연결부, 가로리브 슬릿트부로 구분하였다. 이들 대상위치에서 실험체의 응력분포를 검토하였으며, FEM 해석을 통하여 각 구조상세에 대한 거동을 분석하였다.

그림 4-4에서 국부적인 영향을 받지 않는 세로리브의 한 측정점(No.14)을 대상으로 최대하중 24t 작용 시 공칭응력을 조사한 결과 실험값은 3.36MPa로 나타났으며, 해석값은 2.82MPa로 나타났다. 이는 두 값의 차이가 16.1%정도 오차를 보이는데 이는 그림 4-5에서 보는 것과 같이 실험체 형상이 많이 뒤틀려져 있었고, 이로 인해 지점부분에서 상당부분 위로 올라가는 현상을 볼 수 있었다. 이러한 이유로 다소 오차를 보이는 것으로 판단된다.



그림 4-4 공칭응력 검토



그림 4-5 실험체 지점형상

그림 4-6은 피로균열이 빈번히 발생하는 세로리브와 바닥강판 용접부, 세로리브와 가로리브 연결부, 가로리브 슬릿트부를 대상으로 실험값과 해석값의 최대주응력을 나타내었다. 그림에서 나타내듯이 전체적으로는 비교적 비슷한 양상을 보이고 있으나 세로리브와 가로리브 연결부(계이지부착위치 2, 5)에서는 다소 차이를 보고 있는 것을 알 수 있다. 일반적인 거동은 하중재하 위치가 바닥강판 중앙에 위치하므로 해석값과 같이 대칭성을 보여야 하나 실제 실험값은 그렇지 못하고 있다. 이러한 이유는 세로리브와 가로리브 연결부는 곡률 접합부로 실제로 제작시 슬릿측의 일률적인 제작성 확보는 불가능한 일이며, 큰 응력집중이 일어나는 부분이어서 앞서서도 기술한 것과 같이 시험체 거치 상태 및 형상에 따라 약간의 오차로도 큰 차이를 보이는 것으로 사료된다. 따라서 보다 정확한 자료 및

연구를 위하여 세심한 노력이 필요할 것으로 판단된다.

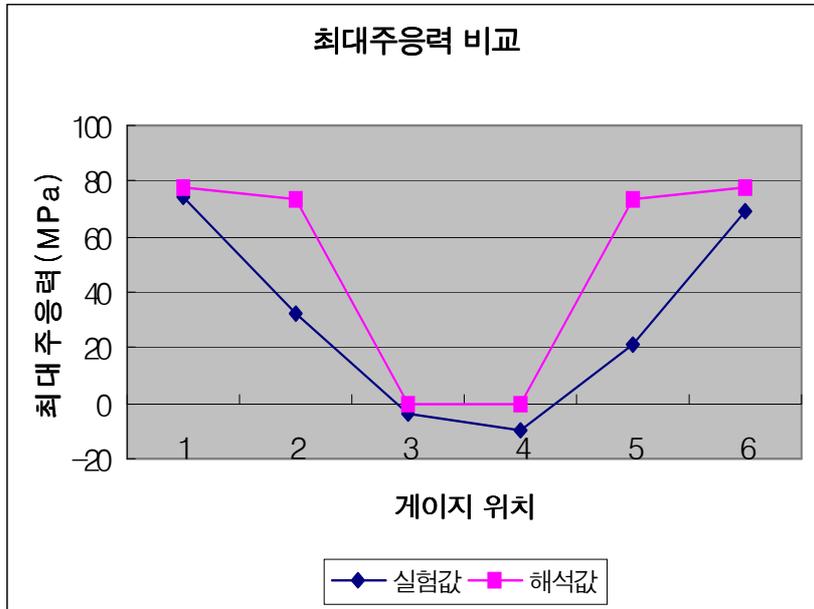


그림 4-6 최대주응력 비교

구조해석 결과 최대주응력 값을 비교했을 시 실험값과 소블럭 국부해석 값이 거치상태 및 실험체 제작상의 오차로 인한 세로리브와 가로리브 연결부에서 다소 차이를 보이고 있으나, 그 이외의 관측점에서는 같은 경향을 보이고 있으므로 소블럭 국부해석의 데이터가 다소 신뢰성이 입증되므로 향후 5장에서는 소블럭 국부해석을 통하여 최적 보강상세를 제시하고 한다.

제5장 강바닥판 세로리브 내부 보강상세 매개변수 해석

최적의 강바닥판 시스템 구성을 위한 보강상세에 대해 연구를 수행하기 위하여 국부해석을 대상으로 강바닥판 구조상세에 대해 벌크헤드 플레이트 유무 및 형상변화에 따른 주응력 범위를 비교하였고, 수직리브 크기 및 부착 위치를 변수로 하여 피로 취약부를 대상으로 주응력 범위를 줄일 수 있는 최적의 강바닥판 상세를 도출하고자 한다.

5.1 벌크헤드 플레이트 부착에 따른 강바닥판 보강상세 영향 분석

이 절에서는 강바닥판 대상교량을 상세 구조해석을 수행하여 벌크헤드 플레이트 유무 및 벌크헤드 플레이트 형상변화, 벌크헤드 플레이트 부착 위치를 매개변수로 하여 구조해석을 수행하였다. 측정점은 앞서도 언급했듯이 일반적으로 상당한 피로균열이 발생하는 세로리브·가로리브 연결부 및 세로리브측, 가로리브측 슬릿부 부분을 대상으로 주응력을 비교하고자 한다. 따라서 다음에 기술한 유한요소 모델과 하중 및 경계조건을 적용하여 정적 구조해석을 수행하고 각 하중 경우에 대한 주응력 범위를 구하였다.

5.1.1 모델링 일반사항

1) 대상 교량

대상 교량은 3.1절의 전체해석 및 국부해석 모델링에서 소블럭 상세해석의 모델링 형상 및 mesh 요소 등의 일반사항과 같다.

2) 재하 조건 및 응력 관측점

슬릿트 곡률 변수에 따른 응력 경향을 분석하기 위하여 2장에서 알아본 세로리브 측의 피로손상 원인인 세로리브의 비틀거동과 가로리브의 구속력, 가로리브 측의 피로손상 원인인 가로리브의 면외거동과 세로리브의 비틀거동에 따른 세로리브의 구속 영향을 모두 고려할 수 있는 재하조건인 L1-1~L1-6, L2-1~L2-6, L3-1~L3-6의 총 18개 재하조건하에서 구조해석을 하였다. 하중재하 형상은 그림 5-1에 나타내었다.

하중재하 면적은 도로교 설계기준·해설(2003)의 DB-24(1등교) 트럭하중에 의한 차륜 접지면적을 사용하여 그림 5-2에서 보는 것과 같이 접지면이 580×230mm 이 되도록 하여 총하중 96kN 하중을 재하 하였다. 이는 1등교 후륜하중인 96kN

인데, 도로교 설계기준에서 차륜의 접지압이 필요한 경우에 접지면적은 차륜의 중량에 비례하므로 $5P/36(\text{cm}^2)$ 으로 하고 이 면적에 차륜하중이 등분포로 작용하는 것으로 하였는데 이는 전륜 후륜 구분 없이 0.72MPa 의 접지압으로 하였다. 또한 응력 관측점은 그림 5-3에 나타난 것과 같이 피로 균열이 많이 발생하고 있는 세로리브·가로리브 연결부 및 세로리브측, 가로리브측의 슬릿부 부분에 대해서 관심을 가지고 측정하였다.

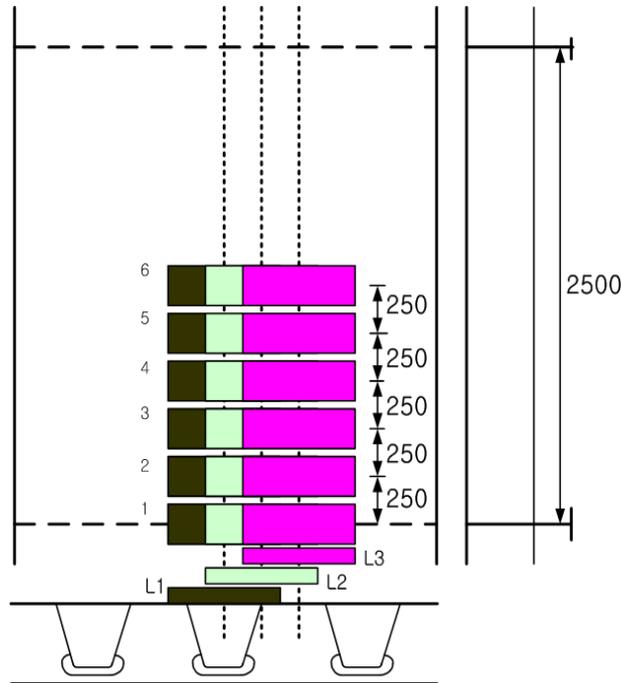


그림 5-1 하중재하 형상

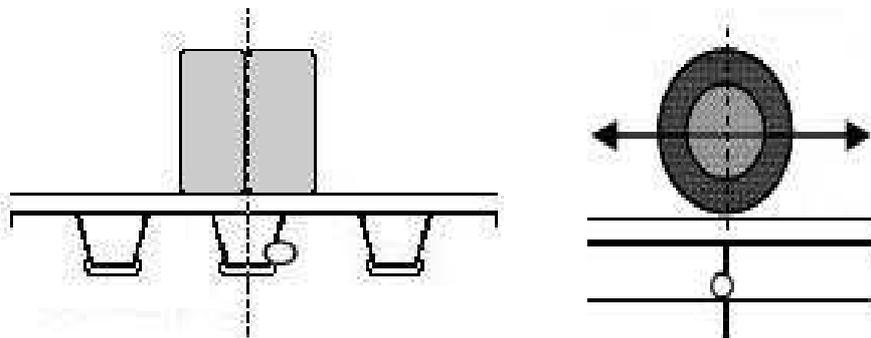


그림 5-2 접지면적 선정

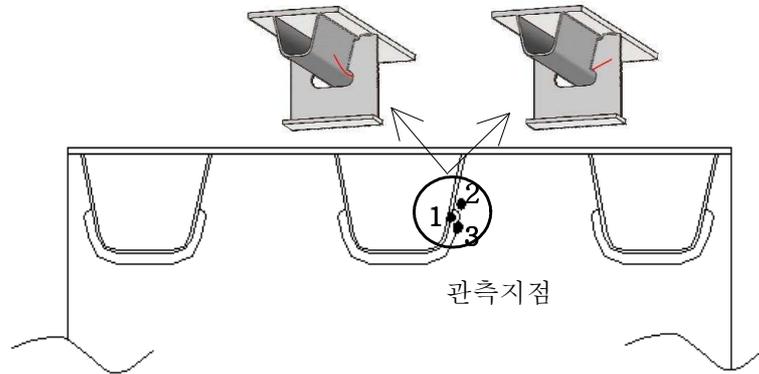


그림 5-3 응력관측 지점

3) 모델링 형상

모델링에 있어 Shell 요소를 사용하므로 실제 강바닥판 교량은 두께를 갖는 요소이므로 모든 요소에 대해서는 그림 5-4에서 보는 것과 같이 중립축을 연결하여 모델링 하였다. 여기서 T_b 는 강바닥판 교량의 강판의 두께를 나타내고 있으며, 강판의 사용 부위에 따라 다르다.

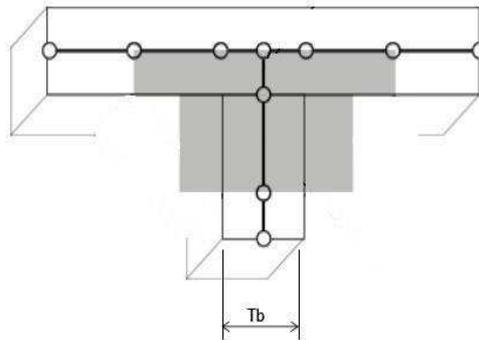


그림 5-4 모델링 방법

모델링 형상은 크게 세로리브, 가로리브, 바닥강판으로 구분할 수 있다. 부분적 모델링 형상 및 전체 모델링 형상은 2장의 그림 3-7과 같다. 그림 5-5에 나타난 세부 모델링에서 원으로 표시한 부분이 피로균열에 대한 응력 측정 지점으로 세로리브·가로리브 연결부 및 세로리브측, 가로리브측 슬릿부 위치이며, 이는 기존 연구보고서 및 논문을 참고로 하여 선정하였다. 지점조건으로는 인접한 종방

향 거더 사이의 가로리브, 세로리브, 바닥강판으로 이상화한 구조물이므로 가로리브 양측의 종방향 거더가 가로리브에 대한 구속은 단순지지 형식으로 볼 수 있기에 가로리브측에 양단을 단순지지 형식으로 하여 6지점으로 모델링 하였다.

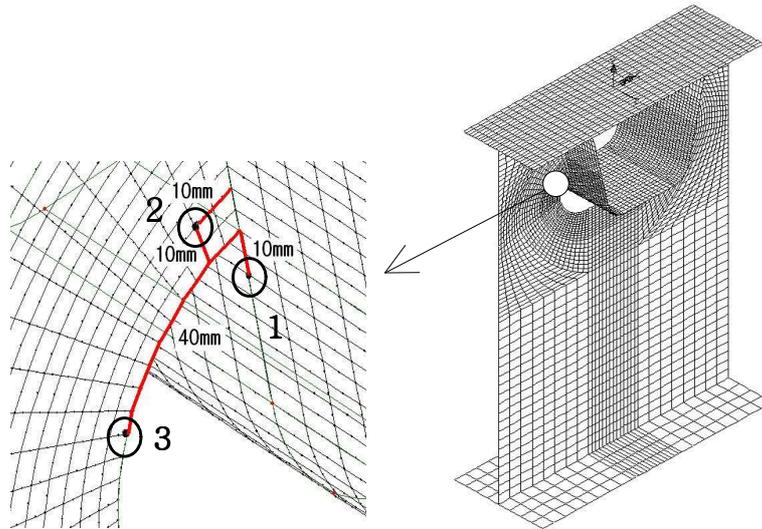


그림 5-5 상세 모델링 형상

4) 유한요소해석

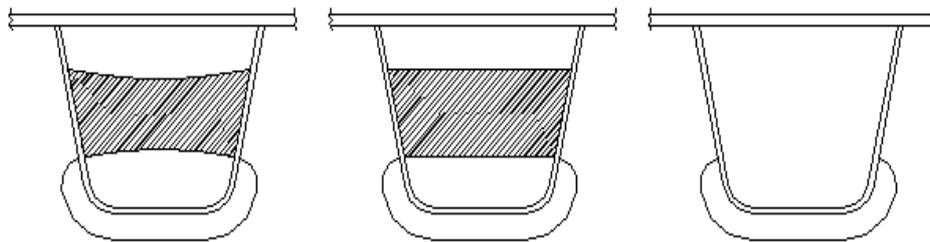
실구조물을 가장 근사적으로 묘사할 수 있는 3차원 모델을 사용하였으며, 범용 유한요소해석 프로그램인 LUSAS 1.3-7을 적용하여 모델링의 효율성을 위해서 관측하고자 하는 부분에는 8절점 Shell 요소를 사용하고, 이외의 부분에서는 4절점 Shell 요소를 사용하여 구조검토를 수행하였다. 모델링에 사용된 Shell 요소는 680개를 사용하였고, Shell mesh는 38,551개를 사용하여 구성하였다. 대상교량의 재료 특성치로 탄성계수는 2.10GPa, 포아송 비는 0.3을 적용하였으며, 단위중량은 7.85GPa을 사용하였다. 그리고 본 측정위치에 대해서는 연결 상세가 용접부이므로 8절점 shell 요소를 감안해 각장의 1/2의 크기를 묘사할 수 있도록 대략 5mm로 요소 한 변의 길이를 분할하였다. 여기서 용접부의 각장 크기의 1/2로 나눈 이유는 용접부 각장의 1/2정도로 요소 사이즈가 분할되어야 용접부를 유한요소해석 하는 경우 해석 데이터가 신뢰도를 갖는다는 IIW(1993)의 기준에 따른 것이다.

5.1.2 벌크헤드 유·무 및 형상에 따른 주응력 검토

이 소절에서는 5장 1절의 모델링 일반조건을 사용하여 벌크헤드 플레이트가 없는 경우와 벌크헤드 플레이트 형상이 직선인 경우와 곡선인 경우로 분류하여 같은 조건하에서 주응력 범위를 검토하였다. 세로리브 내의 보강상세는 신동호(2006) 논문 및 공병승(2003) 등의 기존의 연구자료를 토대로 하여 적용하였다.

1) 벌크헤드 형상

벌크헤드 형상은 그림 5-6과 같이 벌크헤드 없는 상세와 직선벌크헤드 상세와 곡선벌크헤드 상세 3부분으로 분류하여 모델링 하였으며, 곡선벌크헤드 경우 곡률은 10°을 적용하였다. 그림 5-6과 같이 보강상세 위치를 선정 한 이유는 2장에서 살펴본 바와 같이 바닥강판 두께 증가로 인한 바닥강판 피로 균열보다는 세로리브와 가로리브 연결부에서 피로균열이 많이 보고되고 있으며, 경제성을 고려하여 다음과 같이 위치를 선정하였다.



(a) 곡선벌크헤드

(b) 직선벌크헤드

(c) 벌크헤드 없음

그림 5-6 벌크헤드 형상

2) 해석 결과 및 고찰

(1) 해석 결과 데이터 정리 양식

본 절부터는 해석 결과 데이터를 포락선을 사용한 주응력 범위를 적용하였다. 그림 5-7은 포락선 적용 사례로 무보강상세 대한 최대주응력과 최소주응력을 각 하중 case별로 나타내었다. 이 중에서 최대하중에서 가장 큰 응력값과 최소하중에서 가장 작은 응력값을 계산하여 하중재하 위치에 따른 주응력 범위를 0m, 250m, 500m, 750m, 1000m, 1250m의 6포인트로 나타낼 수 있다. 이러한 포락선을 사용한 이유는 다음과 같다

- ① 슬릿트 곡률변화에 따른 각 곡률별 슬릿트 응력 경향을 도표와 그림으로 표현함으로써 쉽게 파악할 수 있다.
- ② 관측지점에 제일 가혹한 하중 상태가 L1, L2, L3이므로 주응력 범위= 최대 주응력포락선 - 최소주응력포락선으로 고려함으로써 소블력을 대상으로 하는 본 해석에서 고려치 못할 실교량이 연속교이므로 발생할 수 있는 부모멘트부에서의 영향을 고려할 수 있고, 또한 관측점에서 같은 거리에 있는 L1, L2, L3의 최대값과 최소값을 사용함으로써 모든 가능한 하중 조건이 고려된 응력 범위이다.

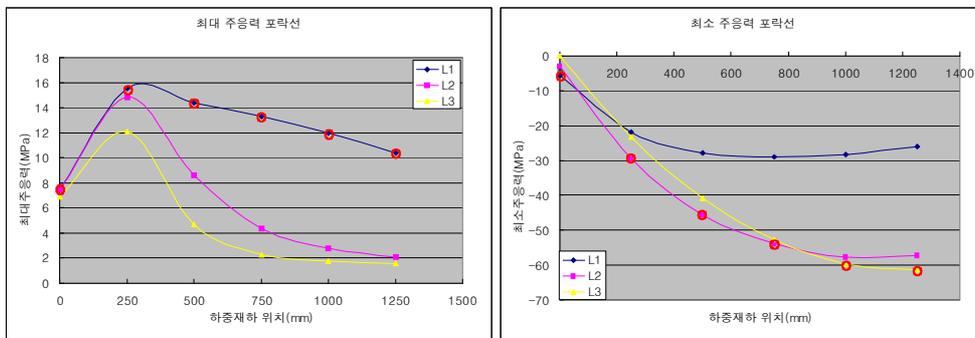


그림 5-7 포락선 정의

(2) 주응력 범위에 대한 해석결과 및 고찰

구조해석은 세로리브측, 세로리브와 가로리브 연결부, 가로리브측 슬릿부 세부 분으로 나누어 결과값을 도출하였다.

그 결과 세로리브측에 대해서는 표 5-1 및 그림 5-8과 같이 보강상세 있는 경우를 1로 가정하면 보강상세 없는 경우에서 주응력 범위가 증가하는 것을 알 수 있었다. 특히 하중이 직접 재하 되는 0mm 재하위치에서 약 1.45배정도 증가하는 것을 알 수 있으며, 직선벌크헤드 플레이트와 곡선벌크헤드 플레이트 주응력 범위를 비교 했을 시 거의 같은 값을 보이지만 가로리브 측 슬릿부에서는 직선 벌크헤드 플레이트가 유리하고 그 외의 상세에서는 곡선벌크헤드 플레이트가 다소 낮은 응력 범위를 보이고 있다. 이는 곡선벌크헤드 플레이트가 가로리브 단면 전체를 통한 일체적인 구조로서 가로리브의 면외변형과 면내변형 억제를 강화시켜 주어, 직선형 벌크헤드 플레이트보다 기하학적으로 뒤틀림이나 국부변형에 유리하기 때문인 것으로 판단된다.

표 5-1 벌크헤드 형상에 따른 세로리브측 주응력 범위 (MPa)

거리(mm)	벌크헤드 없음	직선벌크헤드	곡선벌크헤드
0	12.9 (1.00)	18.7 (1.45)	18.1 (1.40)
250	45.0 (1.00)	49.4 (1.10)	49.1 (1.10)
500	59.9 (1.00)	62.0 (1.04)	62.2 (1.04)
750	67.2 (1.00)	70.3 (1.05)	70.2 (1.05)
1000	71.7 (1.00)	75.9 (1.06)	75.6 (1.05)
1250	71.7 (1.00)	76.1 (1.06)	75.7 (1.06)

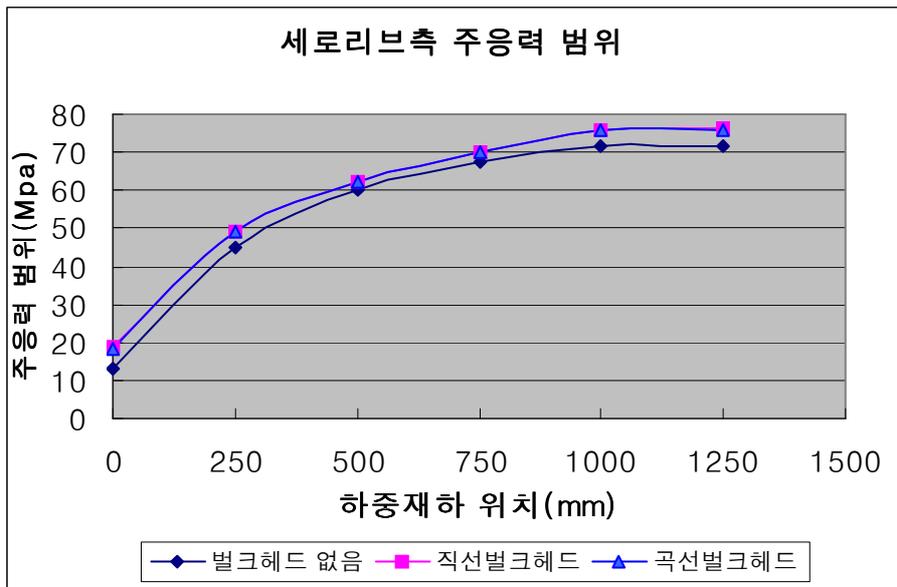


그림 5-8 벌크헤드 형상에 따른 세로리브측 주응력 범위

세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위를 검토한 결과 표 5-2 및 그림 5-9와 같이 세로리브와 마찬가지로 보강상세 있는 경우가 전체적으로 응력이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 다른 위치에 비해 하중재하위치 0mm에서 가장 큰 응력 증가를 보이고 있으며, 직선벌크헤드 상세가 더 많은 응력 증가를 나타내고 있다.

표 5-2 벌크헤드 형상에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위(MPa)

거리(mm)	벌크헤드 없음	직선벌크헤드	곡선벌크헤드
0	42.5 (1.00)	55.6 (1.31)	53.9 (1.27)
250	61.6(1.00)	74.3 (1.21)	72.5 (1.18)
500	65.0 (1.00)	73.4 (1.13)	72.2 (1.11)
750	62.4 (1.00)	69.3 (1.11)	68.5 (1.10)
1000	57.8 (1.00)	63.8 (1.10)	63.4 (1.10)
1250	53.1 (1.00)	57.9 (1.09)	57.7 (1.09)

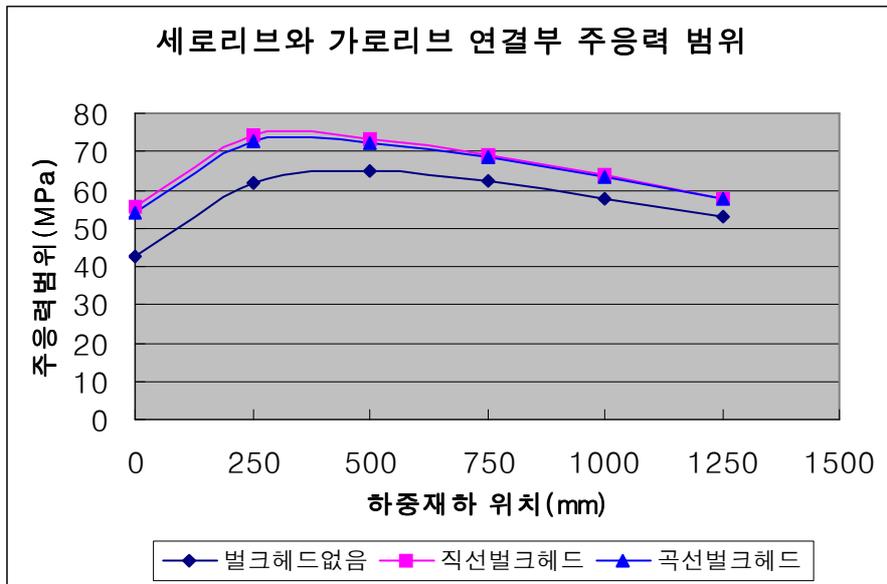


그림 5-9 벌크헤드 형상에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위

가로리브 슬릿부 주응력 범위를 검토한 결과 표 5-3 및 그림 5-10과 같이 보강상세 있는 경우가 보강상세가 없는 경우보다 전체적으로 응력이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 하중재하위치 250mm에서 가장 큰 응력 감소를 보이고 있는데, 이는 벌크헤드 플레이트가 가로리브의 뒤틀림에 대한 변형을 구속하므로 응력이 감소하는 것으로 판단된다.

표 5-3 벌크헤드 형상에 따른 가로리브측 슬릿부 주응력 범위 (MPa)

거리(mm)	벌크헤드 없음	직선벌크헤드	곡선벌크헤드
0	84.1 (1.00)	82.9 (0.98)	82.9 (0.99)
250	103.0 (1.00)	95.6 (0.93)	97.4 (0.95)
500	98.7 (1.00)	93.4 (0.95)	94.8 (0.96)
750	88.2 (1.00)	85.2 (0.97)	86.3 (0.98)
1000	76.5 (1.00)	75.2 (0.98)	75.9 (0.99)
1250	64.5 (1.00)	63.4 (0.98)	64.8 (1)

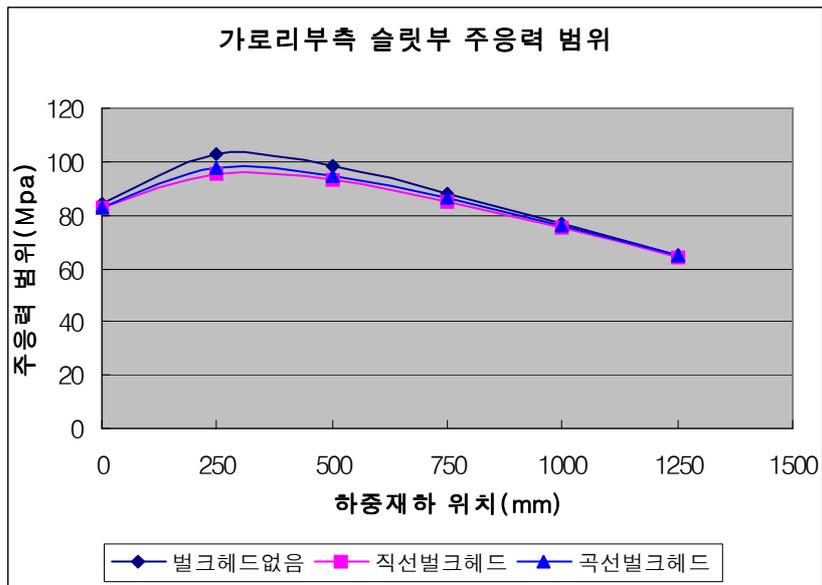


그림 5-10 벌크헤드 형상에 따른 가로리브측 슬릿부 주응력 범위

세로리브측 및 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위에서는 벌크헤드 플레이트가 없는 상세가 더 낮은 응력범위를 보이고 있으나, 가로리브측 슬릿부 부분에 대해서는 벌크헤드 플레이트가 없는 경우보다는 있는 경우에 주응력 범위가 작아지는 것을 알 수 있었다. 가로리브와 세로리브의 피로균열은 슬릿부 보다는 용접지단부에서 많이 발생하므로 벌크헤드 플레이트의 형상으로는 곡선형 벌크헤드플레이트가 추천된다. 이는 지단부에서는 곡선형 벌크헤드 플레이트가 힘의

방향을 원활하게 전달하여 응력의 분포가 적절히 이루어지기 때문으로 판단되며, 슬릿부에서는 강성의 증가에 의한 내구성의 향상이 직선형이 더 좋기 때문에 곡선형보다는 직선형의 벌크 헤드 플레이트가 보강효과가 더 좋게 나타난다고 판단된다. 이러한 결과는 공병승(2003) 연구보고서의 결과와 일치하는 것을 알 수 있었다. 따라서 벌크헤드 플레이트의 변수해석시 곡선형을 대상으로 변수해석을 수행하였다.

5.1.3 곡선벌크헤드 부착 위치에 따른 주응력 검토

이 소절에서는 5장 1절의 모델링 일반조건을 사용하여 벌크헤드 부착위치 변화에 따른 주응력 범위를 검토하였다.

1) 곡선벌크헤드 곡률변화 형상

곡선벌크헤드 플레이트 부착위치는 그림 5-11에서 보는 것과 같이 3가지 위치에 대해서 모델링하여 비교·분석하였다. 곡선벌크헤드 플레이트 두께는 가로리브와 같은 10mm로 적용하였다.

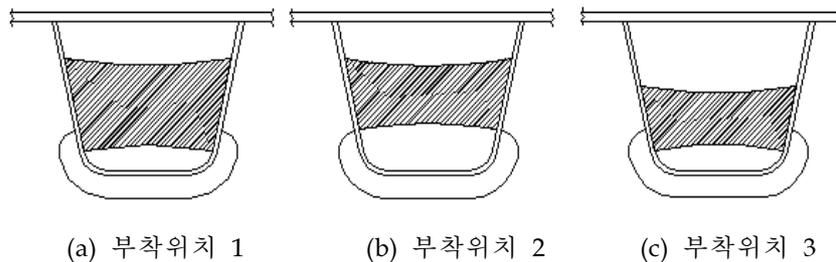


그림 5-11 곡선벌크헤드 부착 위치

2) 주응력 범위에 대한 해석결과 및 고찰

벌크헤드 부착 위치에 따른 세로리브측 구조해석 결과 표 5-4 및 그림 5-12와 같이 부착위치 1번 상세를 기준으로 부착위치 2, 부착위치 3 모두 응력 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 부착위치 2번에서 상당한 응력 증가를 보이는데 이는 부착위치 2번 상세의 경우 보강상세 연결부를 가로리브 슬릿부와 연결한 경우로 하중 작용시 용접부의 응력 집중으로 인한 급격한 응력 증가를 나타내고 있다. 이에 반해 부착위치 3번의 경우 크기는 다르나 보강상세 연결부에 있어서 가로리브 슬릿부 보다 아래 방향에 설치한 것으로 작은 응력 증가를 보이고 있

다. 이는 부착위치를 가로리브 스켈럽과 일치하는 경우보다 가로리브보다 아랫방향에 설치하는 경우가 가로리브 뒤틀림에 의한 면내 및 면외 변형을 구속하므로 낮은 주응력 범위를 보인다고 판단된다.

표 5-4 부착위치에 따른 세로리브측 주응력 범위 (MPa)

거리(mm)	부착위치1	부착위치2	부착위치3
0	9.6 (1.00)	18.4 (1.91)	8.9 (0.93)
250	24.4 (1.00)	49.3 (2.02)	24.8 (1.02)
500	29.0 (1.00)	62.1 (2.14)	29.5 (1.02)
750	29.7 (1.00)	70.1 (2.36)	30.1 (1.01)
1000	28.7 (1.00)	75.4 (2.63)	29.1 (1.01)
1250	26.2 (1.00)	75.6 (2.88)	26.6 (1.02)

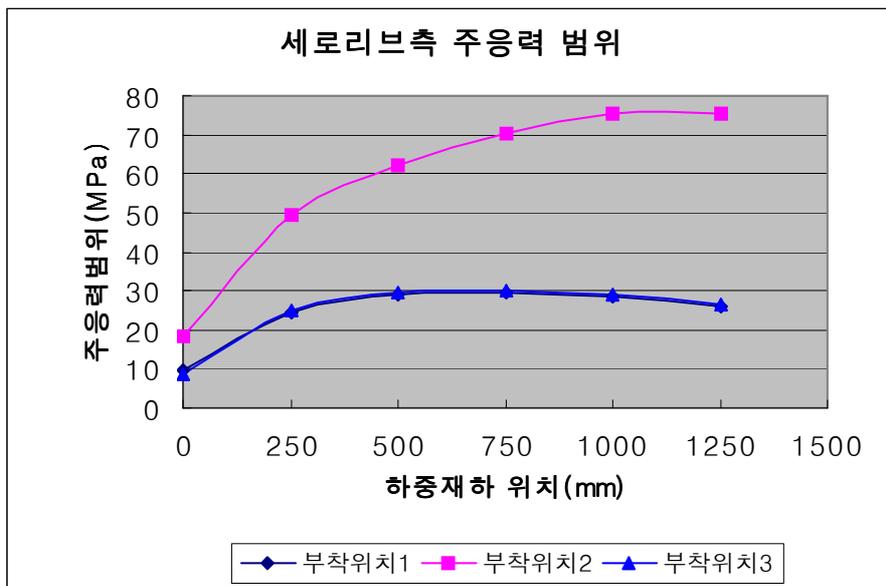


그림 5-12 부착위치에 따른 세로리브측 주응력 범위

세리리브와 가로리브 연결부에 대해서는 표 5-5 및 그림 5-13과 같이 부착위치 1을 기준으로 부착위치 2번 상서는 주응력 범위가 증가하나 부착위치 3번 상서는 주응력 범위가 작지만 감소하는 것을 알 수 있다.

표 5-5 부착위치에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위 (MPa)

거리(mm)	부착위치1	부착위치2	부착위치3
0	57.3 (1.00)	54.6 (0.95)	53.8 (0.94)
250	75.0 (1.00)	73.3 (0.98)	72.2 (0.96)
500	72.5 (1.00)	72.6 (1.00)	71.7 (0.99)
750	67.2 (1.00)	68.8 (1.02)	65.5 (0.97)
1000	60.7 (1.00)	63.5 (1.05)	59.5 (0.98)
1250	57.2 (1.00)	57.7 (1.01)	52.4 (0.92)

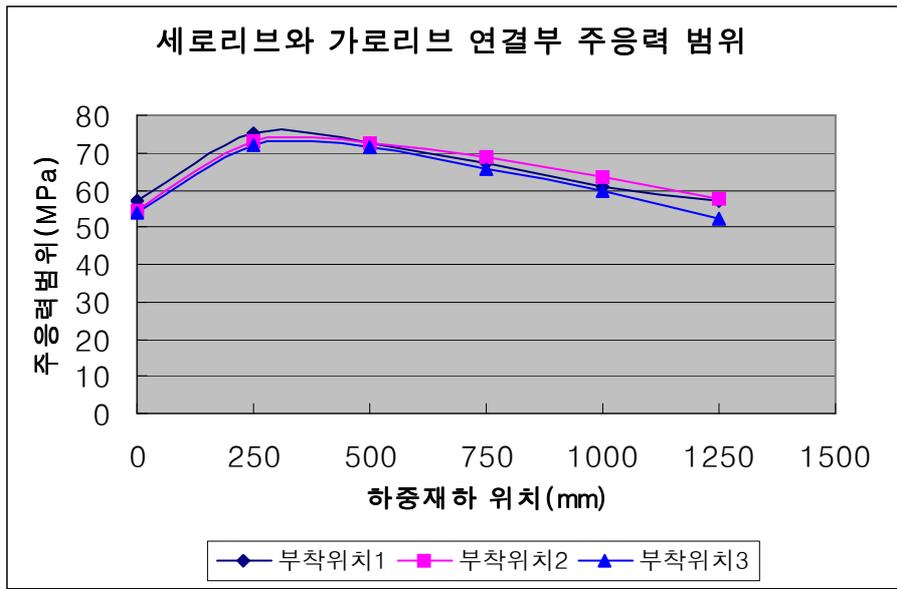


그림 5-13 부착위치에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위

표 5-6 및 그림 5-14와 같이 가로리브측 슬릿부에서는 부착위치 1번 상세와 2번 상세는 거의 같은 값을 보이고 있으며, 부착위치 3번 상세는 다른 상세에 비해 약 5%정도 응력이 증가하는 것을 볼 수 있다.

표 5-6 부착위치에 따른 가로리브측 슬릿부 주응력 범위 (MPa)

거리(mm)	부착위치1	부착위치2	부착위치3
0	8.3 (1.00)	8.3 (1.00)	8.3 (1.00)
250	9.6 (1.00)	9.7 (1.00)	10.2 (1.07)
500	9.4 (1.00)	9.4 (1.00)	10.0 (1.06)
750	8.6 (1.00)	8.6 (1.00)	9.0 (1.05)
1000	7.6 (1.00)	7.6 (0.99)	7.9 (1.04)
1250	6.5 (1.00)	6.5 (0.99)	6.7 (1.04)

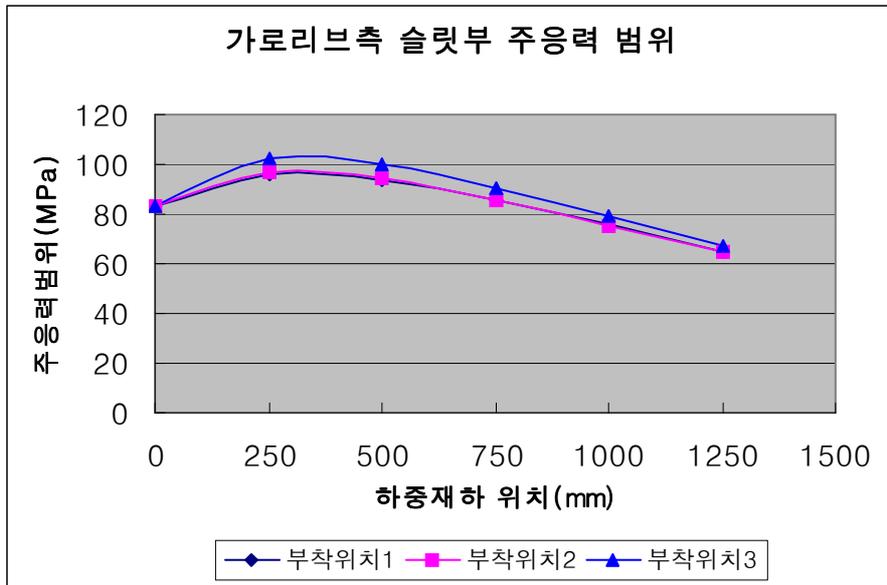


그림 5-14 부착위치에 따른 가로리브측 슬릿부 주응력 범위

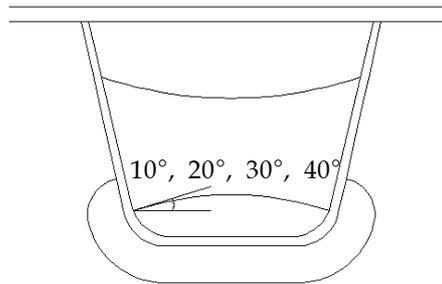
각각의 경우를 고찰하면 세로리브 측에서 부착위치 1번이 가장 유리한데 이것은 세로리브의 면외변형에 의한 뒤틀림 현상을 제어하는데 1번 상세가 가장 강성이 커서 다음과 같은 결과가 도출되었다고 판단된다. 또한 세로리브와 가로리브 연결부는 벌크헤드 플레이트가 양쪽 가로리브를 하중전달형으로 연결하여 국부적인 응력집중이 발생하는 것이므로 부착위치 3이 다른 위치에서보다 강성의 감소로 국부적인 응력집중이 다소 완화된 결과를 나타내기 때문에 이와 같은 결과가 도출되었다고 판단된다.

5.1.4 곡선벌크헤드 곡률변화에 따른 주응력 검토

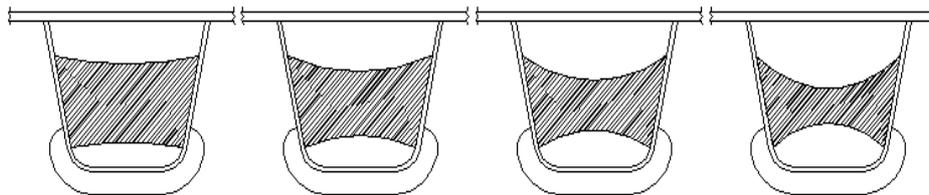
이 소절에서는 5장 1절의 모델링 일반조건을 사용하여 5장 3절에서 도출한 곡선벌크헤드 플레이트를 대상으로 곡률 형태의 변화를 이용하여 응력 경향을 판단하고 적절한 곡률을 선정하고자 한다.

1) 곡선벌크헤드 곡률변화 형상

곡선벌크헤드 플레이트 형상은 그림 5-15에 보는 것과 같이 곡률의 허용치를 고려하여 곡률부를 10°, 20°, 30°, 40°로 모델링하여 구조해석을 수행하였다.



(a) 곡률 선정



(a) 10°

(b) 20°

(c) 30°

(d) 40°

(b) 곡률 형상

그림 5-15 벌크헤드 형상

2) 주응력 범위에 대한 해석결과 및 고찰

벌크헤드 곡률변화에 따른 세로리브측 주응력 범위는 표 5-7 및 그림 5-16과 같이 10°를 기준으로 곡률이 증가할수록 20°, 30°, 40° 모두 20%~30%정도 증가하는 것을 알 수 있었다.

표 5-7 곡률 변화에 따른 세로리브측 주응력 범위 (MPa)

거리(mm)	10°	20°	30°	40°
0	9.6 (1.00)	11.3 (1.18)	11.5 (1.20)	11.7 (1.22)
250	24.4 (1.00)	31.5 (1.29)	31.7 (1.30)	32.0 (1.31)
500	29.0 (1.00)	37.2 (1.28)	37.8 (1.30)	38.4 (1.32)
750	29.7 (1.00)	38.1 (1.28)	38.8 (1.31)	39.6 (1.33)
1000	28.7 (1.00)	36.9 (1.29)	37.7 (1.31)	38.7 (1.35)
1250	26.2 (1.00)	33.8 (1.29)	34.7 (1.32)	35.7 (1.36)

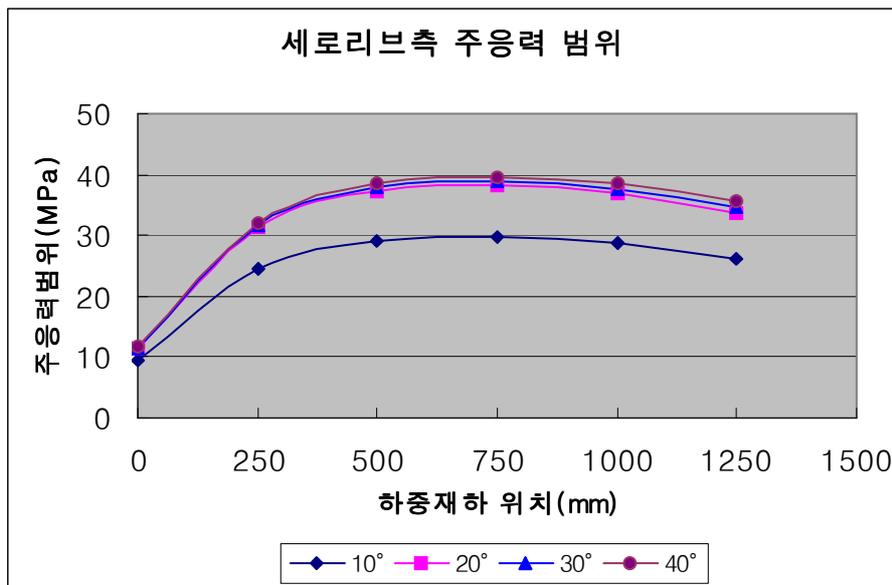


그림 5-16 곡률 변화에 따른 세로리브측 주응력 범위

세로리브와 가로리브 연결부에서는 표 5-8과 같이 곡률변화에 따라 응력의 증감이 미소하며, 거의 같은 값을 보이고 있다. 그 중에서도 40°에서 가장 작은 주응력 범위를 보이고 있어 세로리브와 가로리브 연결부에서는 40°가 가장 적합하다고 판단된다.

표 5-8 곡률 변화에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위 (MPa)

거리(mm)	10°	20°	30°	40°
0	57.3 (1.00)	57.1 (1.00)	56.4 (0.98)	55.0 (0.96)
250	75.0 (1.00)	74.9 (1.00)	74.4 (0.99)	73.1 (0.97)
500	72.5 (1.00)	72.6 (1.00)	72.2 (1.00)	71.2 (0.98)
750	67.2 (1.00)	67.2 (1.00)	67.0 (1.00)	68.6 (1.02)
1000	60.7 (1.00)	60.7 (1.00)	60.7 (1.00)	60.4 (1.00)
1250	57.2 (1.00)	53.5 (0.94)	53.7 (0.94)	53.7 (0.94)

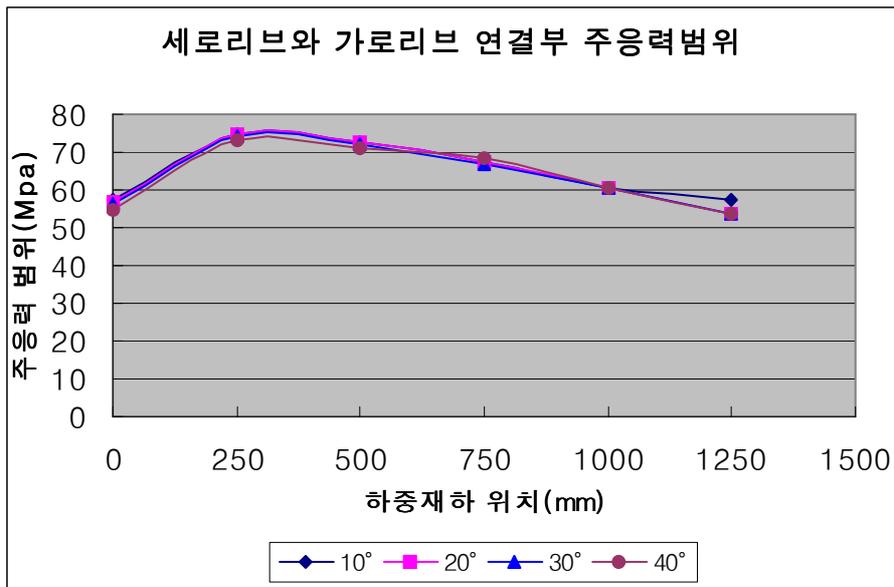


그림 5-17 곡률 변화에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위

가로리브측 슬릿부 주응력 범위는 표 5-9 및 그림 5-18과 같이 곡률이 증가할수록 응력 값도 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 그 값이 아주 미소하므로 곡률변화에 따른 가로리브 슬릿부는 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

표 5-9 곡률 변화에 따른 가로리브측 슬릿부 주응력 범위 (MPa)

거리(mm)	10°	20°	30°	40°
0	83.0 (1.00)	83.1 (1.00)	83.0 (1.00)	82.7 (1.00)
250	95.8 (1.00)	96.6 (1.01)	97.7 (1.02)	99.1 (1.03)
500	94.0 (1.00)	94.7 (1.01)	95.5 (1.02)	96.5 (1.03)
750	86.0 (1.00)	86.5 (1.01)	87.1 (1.01)	87.7 (1.02)
1000	76.1 (1.00)	76.4 (1.00)	76.8 (1.01)	77.1 (1.01)
1250	65.1 (1.00)	65.4 (1.00)	65.6 (1.01)	65.7 (1.01)

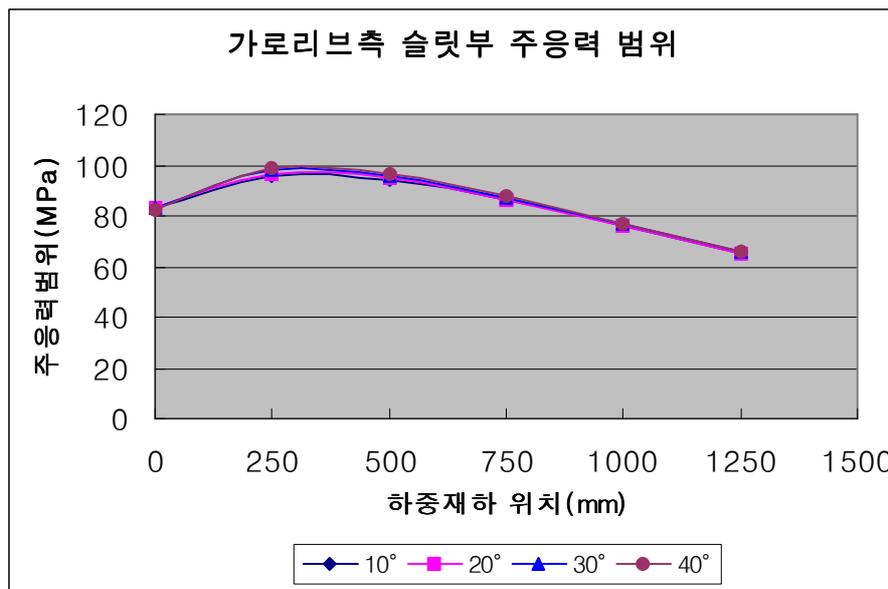


그림 5-18 곡률 변화에 따른 가로리브측 슬릿부 주응력 범위

곡률변화에 따른 주응력 검토 결과 세로리브·가로리브 연결부에 대해서는 곡률 40°에서 작은 응력 감소를 보이거나 세로리브측 및 가로리브측 슬릿부 부분에 대해서는 벌크헤드 곡률을 10°로 하는 것이 세로리브와 가로리브의 면내 및 면외 변형에 대해서 응력의 흐름을 원활하게 하여 작은 주응력 범위를 보이고 있으므로 곡률을 10°로 하는 것이 가장 유리한 것으로 판단된다.

5.2 수직리브 부착에 따른 강바닥판 보강상세 영향 분석

이 절에서는 강바닥판의 피로향상을 위한 일환으로 미국의 Bronx-whitestone에 현재 새롭게 적용된 수직리브에 대해서 수직리브 크기 변화 및 수직리브 부착 위치를 매개변수로 하여 보강상세인 수직리브 부착시 피로개선에 대한 보강효과를 검토하고자 한다.

5.2.1 모델링 일반조건

대상 교량은 기존과 동일하게 그림 5-1의 남향대교 소블럭을 대상으로 하였으며, 그림 5-19와 같이 세로리브에 수직보강재를 부착하였다. 모델링의 요소 크기 및 재료특성 등의 일반사항은 5.1과 같다. 수직리브의 상세는 미국의 Bronx-whitestone에서 적용된 형상을 대상으로 하여 본 연구의 세로리브에 적합하도록 소폭 변화하였다.

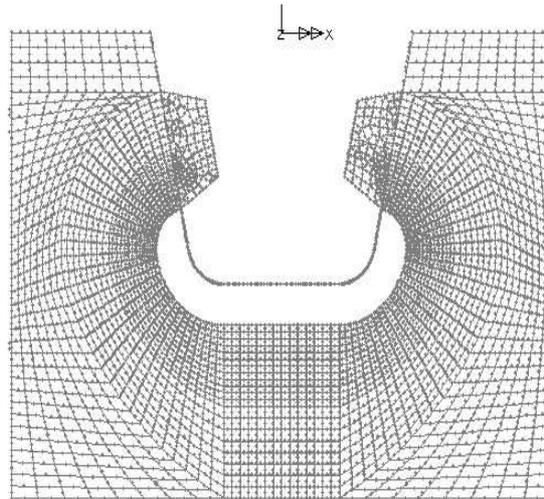


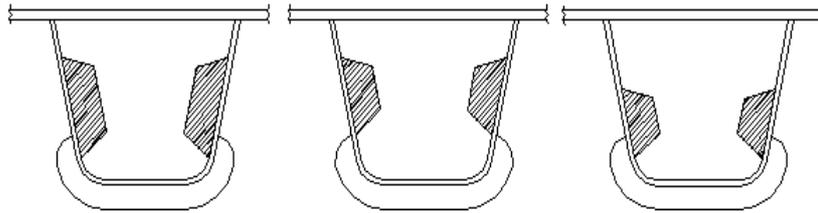
그림 5-19 수직리브 모델링 형상

5.2.2 수직리브 부착 위치에 따른 주응력 검토

1) 수직리브 부착 위치 변화 형상

수직리브 부착위치에 따른 강바닥판 응력 거동을 파악하고자 그림 5-20와 같이 수직리브를 부착하였다. 부착위치는 벌크헤드와 비교 분석하기 위하여 같은 위치

를 고려하였으며, 기존연구를 배경으로 선정하였다. 두께는 벌크헤드 플레이트 두께와 같은 10mm를 적용하였다.



(a) 부착위치 1 (b) 부착위치 2 (c) 부착위치 3

그림 5-20 수직리브 부착위치 형상

2) 수직리브 부착위치에 따른 주응력 검토

수직리브 부착위치에 따른 세로리브측 주응력 범위를 검토한 결과 표 5-10 및 그림 5-21과 같이 부착위치 1, 3번 상세는 거의 같은 값을 보이고 있으나, 부착위치 2번 상세는 2~2.5배 가량 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 앞서 기술한 벌크헤드 상세의 결과와 마찬가지로 가로리브 스킵과 일치하는 것보다는 아랫방향으로 설치하는 것이 가로리브의 뒤틀림에 의한 변형을 구속하므로 낮은 주응력 범위를 보인다고 판단된다.

표 5-10 수직리브 부착 위치에 따른 세로리브측 주응력 범위 (MPa)

거리(mm)	부착위치1	부착위치2	부착위치3
0	8.4 (1.00)	15.3 (1.83)	8.1 (0.96)
250	25.6 (1.00)	47.6 (1.82)	25.5 (1.00)
500	30.4 (1.00)	63.0 (1.86)	30.4 (1.00)
750	31.4 (1.00)	70.5 (2.07)	31.4 (1.00)
1000	30.5 (1.00)	75.9 (2.25)	30.6 (1.00)
1250	28.1 (1.00)	75.7 (2.49)	28.2 (1.00)

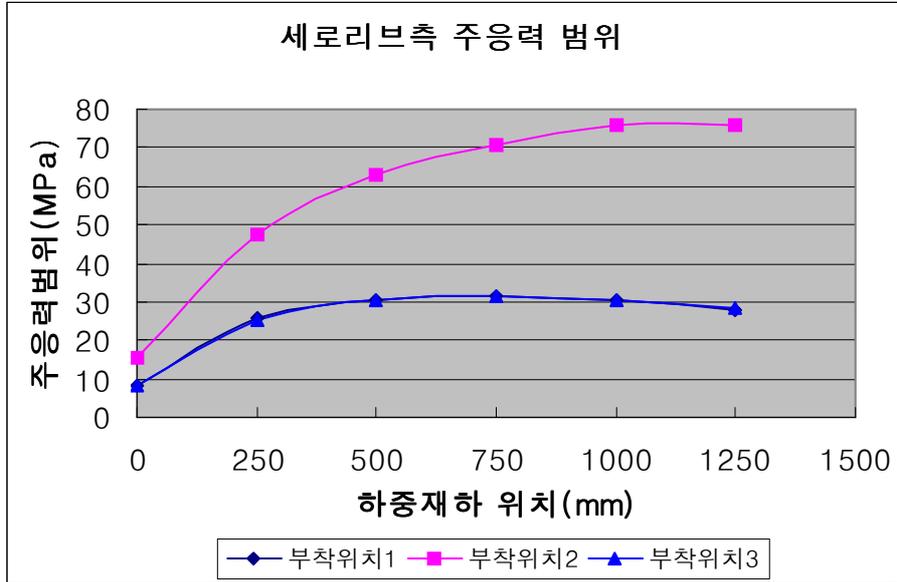


그림 5-21 수직리브 부착 위치에 따른 세로리브측 주응력 범위

세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위를 검토한 결과 표 5-11 및 그림 5-22와 같이 세가지 부착위치 상세 모두 거의 같은 값을 보이고 있다. 따라서 세로리브와 가로리브 연결부는 부착위치에 영향을 받지 않는다고 판단할 수 있다.

표 5-11 수직리브 부착 위치에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위 (MPa)

거리(mm)	부착위치1	부착위치2	부착위치3
0	47.7 (1.00)	46.0 (0.96)	46.9 (0.98)
250	66.4 (1.00)	65.6 (0.99)	65.8 (0.99)
500	67.6 (1.00)	68.0 (1.01)	67.6 (1.00)
750	62.7 (1.00)	64.2 (1.02)	63.3 (1.01)
1000	57.0 (1.00)	58.8 (1.03)	58.7 (1.03)
1250	51.2 (1.00)	52.5 (1.03)	53.2 (1.04)

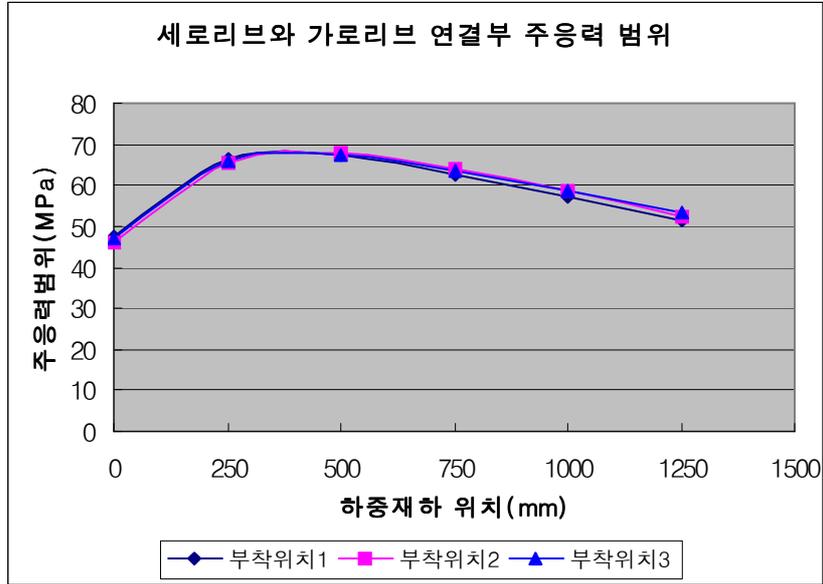


그림 5-22 수직리브 부착 위치에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위

가로리브측 슬릿부 주응력 범위를 검토한 결과 표 5-12 및 그림 5-23과 같이 세로리브와 가로리브 연결부와 마찬가지로 거의 주응력 값의 변화 없이 일정함을 알 수 있다.

표 5-12 수직리브 부착 위치에 따른 가로리브측 슬릿부 주응력 범위 (MPa)

거리(mm)	부착위치1	부착위치2	부착위치3
0	83.5 (1.00)	83.8 (1.00)	83.9 (1.00)
250	101.1 (1.00)	101.4 (1.00)	102.2 (1.01)
500	96.5 (1.00)	97.2 (1.01)	97.4 (1.01)
750	85.8 (1.00)	86.9 (1.01)	86.4 (1.01)
1000	73.9 (1.00)	75.3 (1.02)	74.3 (1.01)
1250	61.9 (1.00)	63.6 (1.03)	62.1 (1.00)

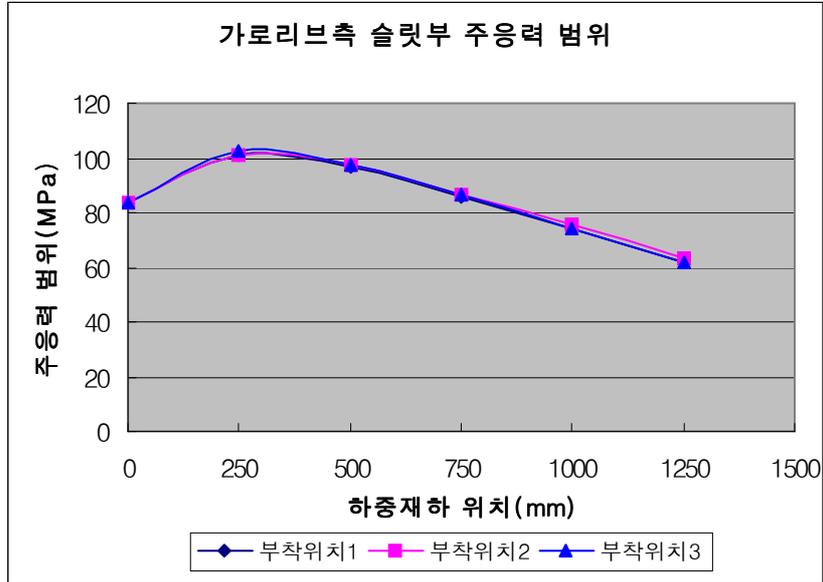


그림 5-23 수직리브 부착위치에 따른 가로리브측 슬릿부 주응력 범위

세로리브·가로리브 연결부 및 가로리브측의 슬릿부 부분에서는 부착위치 변화에 따른 주응력 범위가 거의 같음을 알 수 있으나, 세로리브측에 대해서는 그림 5-21에서 보는 것과 같이 부착위치 1, 3에서 낮은 주응력 범위를 나타내고 있다. 이러한 이유는 아래쪽에 연결된 상세가 가로리브의 면외변형을 구속하여 이를 보완하므로써 낮은 주응력 범위를 갖는 것으로 판단된다. 이는 4.1절의 벌크 헤드 플레이트 부착위치와 같은 경향을 나타내는 것으로 향후 세로리브측 피로 개선을 위하여 이러한 보강상세의 적용이 필요할 것으로 판단된다.

5.2.3 수직리브 크기 변화에 따른 주응력 검토

1) 수직리브 크기변화 형상

수직리브 부착위치에서 도출한 결과를 바탕으로 수직리브의 크기 변화에 따른 강바닥판 거동을 분석하고자 수직리브의 크기를 30mm, 50mm, 70mm 3가지 경우에 대하여 구조해석을 수행하였다. 수직리브 부착위치는 동일하며, 형상은 그림 5-24에서 보는 것과 같다. 수직리브 두께는 가로리브와 같은 10mm로 적용하였다.

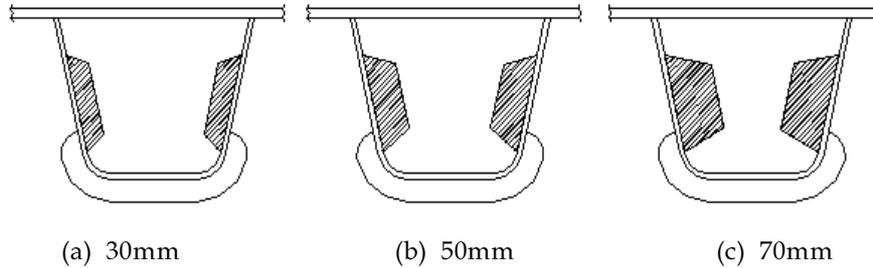


그림 5-24 수직리브 크기 변화형상

2) 수직리브 크기에 따른 주응력 검토

수직리브 크기에 따른 세로리브측 주응력 범위를 검토한 결과 표 5-13 및 그림 5-25와 같이 50mm 크기에서 주응력 범위가 20% 정도 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 Bronx-whitestone 교량에서 적용된 수직리브 크기와 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 수직리브의 적절한 강성이 하중 재하시 면내 및 면외의 변형에 대해 어느 정도 허용할 수 있는 상세가 응력 감소에 효과적이라고 판단된다. 그러나 표 5-14와 그림 5-26의 세로리브·가로리브 연결부 및 표 5-15와 그림 5-27의 가로리브측 슬릿부 부분에서는 크기 변화에 따른 주응력 범위가 거의 같거나 미소한 차이를 보이고 있어 크기 변화에 따른 영향을 다소 적게 받는다고 판단된다.

표 5-13 수직리브 크기에 따른 세로리브측 주응력 범위 (MPa)

거리(mm)	30mm	50mm	70mm
0	19.9 (1.00)	8.4 (0.42)	9.7 (0.49)
250	30.1 (1.00)	25.6 (0.85)	32.6 (1.08)
500	37.7 (1.00)	30.4 (0.81)	37.8 (1.00)
750	39.5 (1.00)	31.4 (0.79)	38.2 (0.97)
1000	38.8 (1.00)	30.5 (0.79)	36.9 (0.95)
1250	36.0 (1.00)	28.1 (0.78)	33.8 (0.94)

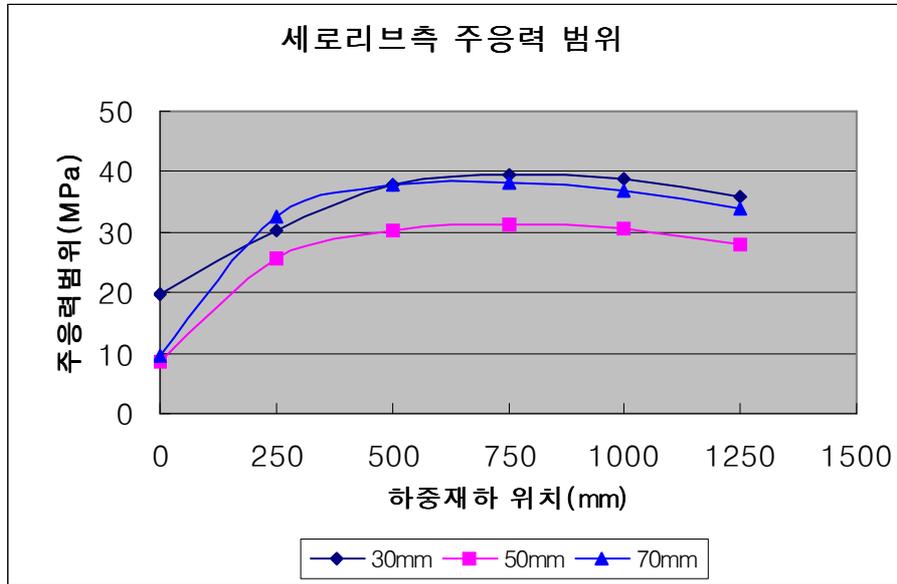


그림 5-25 수직리브 크기에 따른 세로리브측 주응력 범위

표 5-14 수직리브 크기에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위 (MPa)

거리(mm)	30mm	50mm	70mm
0	46.8 (1.00)	47.7 (1.02)	48.0 (1.03)
250	66.0 (1.00)	66.4 (1.01)	66.2 (1.00)
500	68.2 (1.00)	67.6 (0.99)	67.0 (0.98)
750	64.1 (1.00)	62.7 (0.98)	61.8 (0.96)
1000	58.4 (1.00)	57.0 (0.98)	56.0 (0.96)
1250	53.9 (1.00)	51.2 (0.95)	50.0 (0.93)

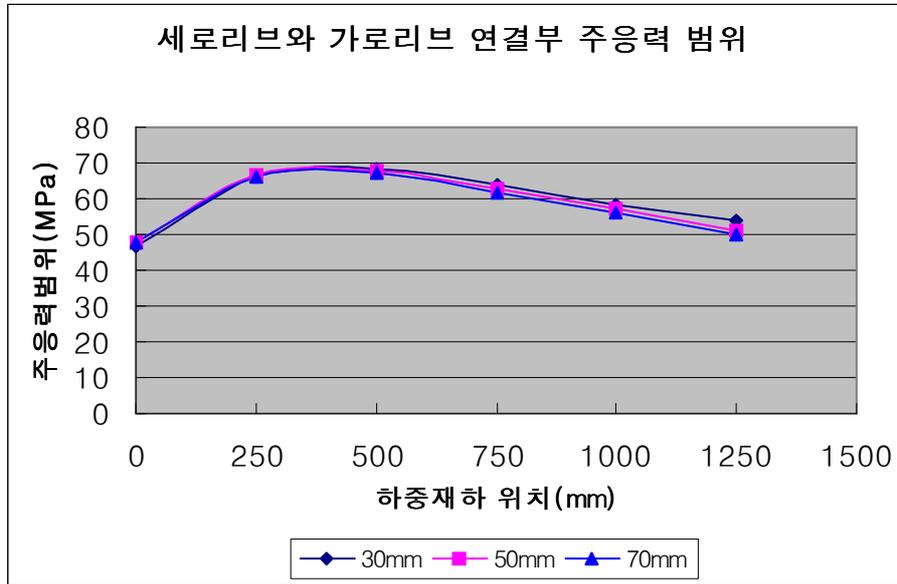


그림 5-26 수직리브 크기에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위

표 5-15 수직리브 크기에 따른 가로리브측 슬릿부 주응력 범위 (MPa)

거리(mm)	30mm	50mm	70mm
0	83.6 (1.00)	83.5 (1.00)	83.5 (1.00)
250	101.4 (1.00)	101.1 (1.00)	101.1 (1.00)
500	96.7 (1.00)	96.5 (1.00)	96.4 (1.00)
750	86.0 (1.00)	85.8 (1.00)	85.7 (1.00)
1000	74.1 (1.00)	73.9 (1.00)	73.8 (1.00)
1250	62.1 (1.00)	61.9 (1.00)	61.8 (1.00)

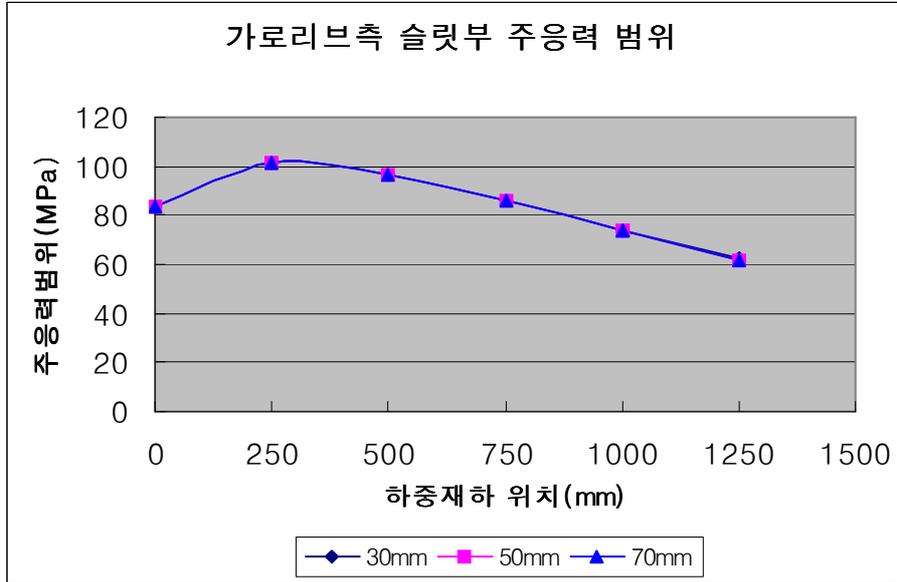


그림 5-27 수직리브 크기에 따른 가로리브측 슬릿부 주응력 범위

수직리브 크기 변화에 따른 구조해석 검토 결과 수직리브의 크기는 세로리브·가로리브 연결부 및 가로리브측의 슬릿부 부분에 영향을 주지 않으나, 세로리브측 국부변형에 대해서는 다소 큰 영향을 보이고 있다. 따라서 이 후 수직리브 부착위치에 따른 해석에서는 50mm 크기를 적용하여 구조해석을 수행하고자 한다.

5.3 강바닥판 최적 보강상세를 위한 비교·분석

이 절에서는 강바닥판의 피로향상을 위해 앞서 분석한 벌크헤드 플레이트 유무 및 수직리브 부착에 대해서 세로리브·가로리브 연결부 및 세로리브측, 가로리브측 슬릿부 부분의 피로 개선을 위한 가장 합리적인 보강상세를 검토하고자 가로리브와 보강상세 제작에 있어 오차가 없는 경우와 있는 경우로 분류하여 구조해석을 수행하였다. 이는 강바닥판 제작시 수동으로 작업하기 때문에 보강상세 제작과정에서 오차 발생 가능성을 고려한 것이다.

5.3.1 가로리브와 보강상세 일체형

앞에서 도출한 벌크헤드 없는 상세와 벌크헤드 플레이트 상세, 수직리브 상세에 대해서 가로리브와 보강상세 연결부에서 제작오차가 발생하지 않고 일체형일 때 측정대상에 대해서 주응력 값을 분석하여 최적의 상세를 도출하고자 한다.

벌크헤드 플레이트 및 수직리브에 대한 검토 결과 그림 5-28에서 보는 것과 같이 가장 합리적인 상세를 통하여 보강상세가 없는 상세와 비교·분석하고자 세로리브측에 대해서 표 5-16~5-18 및 그림 5-29~5-31에 주응력 범위를 나타내었다.

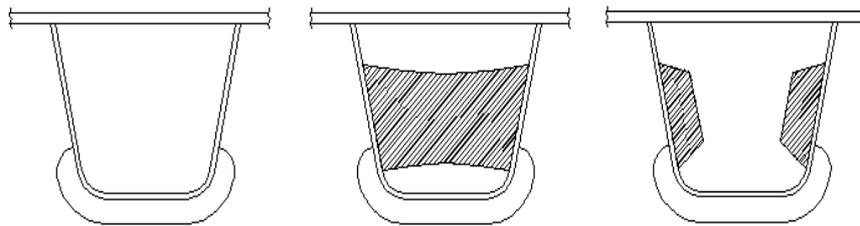


그림 5-28 최적 보강상세 형상

표 5-16 및 그림 5-29에서 보듯이 보강상세 있는 경우가 없는 경우 보다 세로리브측 주응력을 현저히 감소시키는 것을 알 수 있다. 여기서 종방향 리브는 Deck plate에 일방향 fillet 용접으로 연결되는데 이 연결부에서 용입되지 않은 노치의 프라인 및 용접 루트부의 균열을 유발하는 뒤틀림(distortion)으로 인한 횡방향 모멘트가 발생하는데, 이러한 균열 제어 방법으로 강바닥판 보강상세의 적용이 피로개선에 상당한 효과가 있는 것으로 판단된다.

표 5-16 오차 미발생에 따른 세로리브측 주응력 범위 (MPa)

거리(mm)	벌크헤드 없음	곡선벌크헤드	수직리브
0	12.9 (1.00)	9.6 (0.74)	8.4 (0.65)
250	45.0 (1.00)	24.4 (0.54)	25.6 (0.57)
500	59.9 (1.00)	29.0 (0.48)	30.4 (0.51)
750	67.2 (1.00)	29.7 (0.44)	31.4 (0.47)
1000	71.7 (1.00)	28.7 (0.40)	30.5 (0.43)
1250	71.7 (1.00)	26.2 (0.37)	28.1 (0.39)

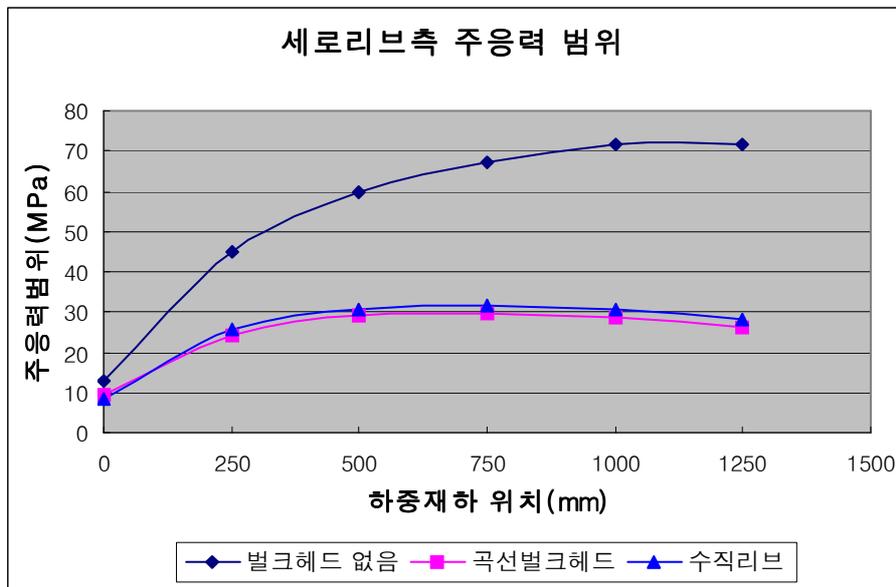


그림 5-29 오차 미발생에 따른 세로리브측 주응력 범위

표 5-17 및 그림 5-30에서 세로리브와 가로리브 연결부의 주응력에 대하여 보강상세 있는 경우가 보강상세가 없는 경우보다 높은 주응력 범위를 보이고 있다. 또한 개방된 수직리브보다 밀폐된 곡선벌크헤드 플레이트에서 더 높은 주응력 범위를 나타내고 있다. 이는 세로리브와 가로리브 연결부에 있어서 밀폐된 보강상세가 국부적인 응력집중을 크게 유발하기 때문으로 판단된다.

표 5-17 오차 미발생에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위 (MPa)

거리(mm)	벌크헤드 없음	곡선벌크헤드	수직리브
0	42.5 (1.00)	57.3 (1.35)	47.7 (1.12)
250	61.6 (1.00)	75.0 (1.22)	66.4 (1.08)
500	65.0 (1.00)	72.5 (1.12)	67.6 (1.04)
750	62.4 (1.00)	67.2 (1.08)	62.7 (1.00)
1000	57.8 (1.00)	60.7 (1.05)	57.0 (0.99)
1250	53.1 (1.00)	57.2 (1.08)	51.2 (0.96)

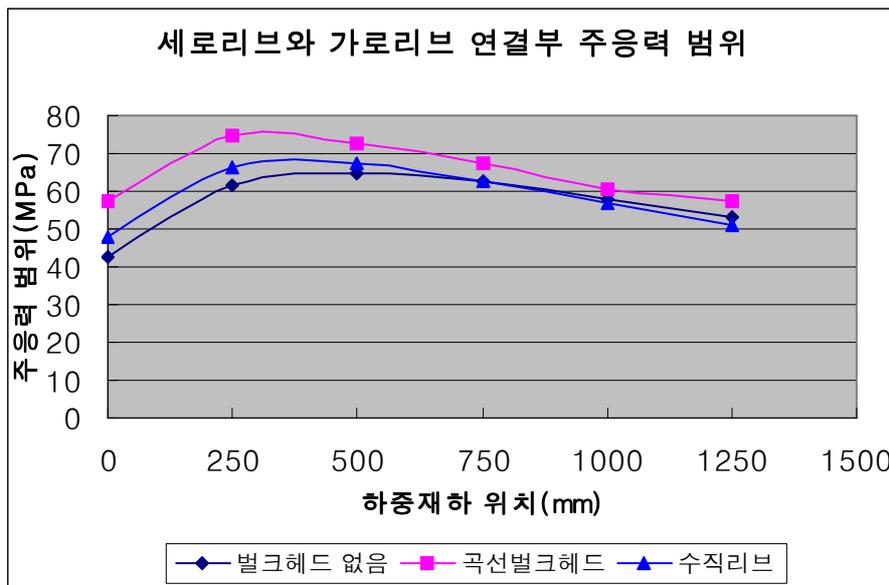


그림 5-30 오차 미발생에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위

표 5-18 및 그림 5-31에서 보강상세 있는 경우가 세로리브측 경우와 같이 가로리브측 슬릿부 주응력을 감소시키고 있으며, 곡선벌크헤드 플레이트가 수직리브보다 주응력 범위가 다소 작은 것을 알 수 있다. 이는 앞서서도 기술하였듯이 곡선벌크헤드 플레이트는 힘의 흐름을 원활하게 전달하여 응력의 분포가 적절히 이루어지기 때문으로 판단된다.

표 5-18 오차 미발생에 따른 가로리브측 슬릿부 주응력 범위 (MPa)

거리(mm)	벌크헤드 없음	곡선벌크헤드	수직리브
0	84.1 (1.00)	83.0 (0.99)	83.5 (0.99)
250	103.0 (1.00)	95.8 (0.93)	101.1 (0.98)
500	98.7 (1.00)	94.0 (0.95)	96.5 (0.98)
750	88.2 (1.00)	86.0 (0.98)	85.8 (0.97)
1000	76.5 (1.00)	76.1 (0.99)	73.9 (0.97)
1250	64.5 (1.00)	65.1 (1.01)	61.9 (0.96)

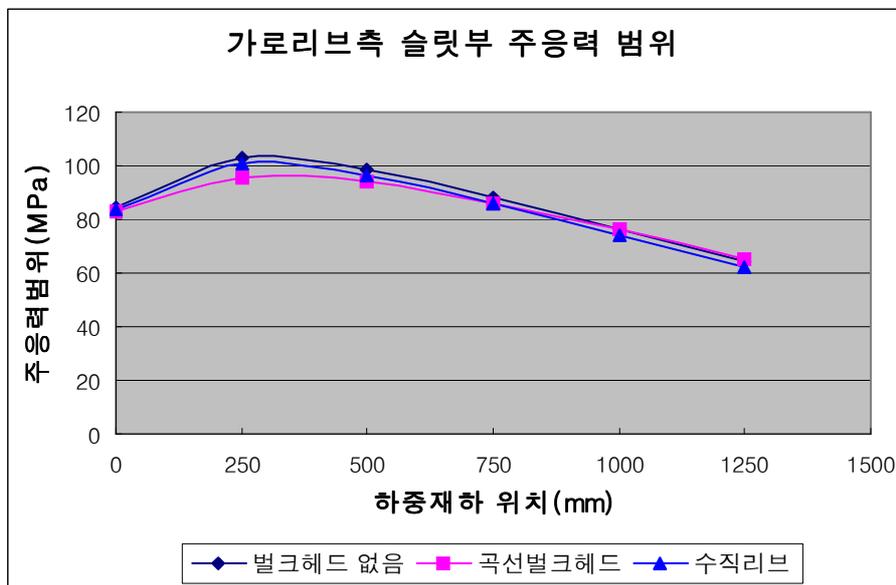


그림 5-31 오차 미발생에 따른 가로리브측 슬릿부 주응력 범위

구조해석 결과 표 5-16~5-18과 같이 세로리브와 가로리브 연결부에서는 보강상세 없는 경우가 더 낮은 주응력 범위를 보이고 있으나, 세로리브측 및 가로리브 슬릿부측에 대해서는 보강상세 있는 경우가 보다 주응력 범위를 감소시키는 것을 알 수 있다. 이와 같이 한 상세에 대해 모두 만족할 수 있는 것이 없으며, 전체적인 검토결과 보강상세 있는 경우가 더 효율적이며, 보강상세 중에서도 벌크헤드 보다는 수직리브상세가 보다 응력 감소에 적합하다고 판단된다. 여기서 보강상세는 복부판 전단력을 분담하고 가로리브의 면회방향 회전에 대한 강성을 증가시키는 역할을 하는 것뿐만 아니라, 세로리브의 비틀림을 적절히 분배해주는 역할을 하여 뒤틀림에 의한 피로균열을 제어하기 때문으로 생각할 수 있다.

5.3.2 가로리브와 보강상세 연결부 오차 발생시

벌크헤드 없는 상세와 벌크헤드 플레이트 상세, 수직리브 상세에 대해서 가로리브와 보강상세 연결부에서 제작오차가 5mm 발생한 것으로 가정하여 구조해석을 수행하고, 측정대상에 대해서 주응력 값을 분석하여 강바닥판의 응력 거동을 검토하고자 한다.

제작에 따른 오차 발생에 대한 해석결과 표 5-19 및 그림 5-32와 같이 하중재하 위치 0mm에서 2.5~3배정도 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 세로리브측 주응력 범위는 하중이 가로리브에 직 재하될 때 뒤틀림에 의한 면내 및 면외 변형에 의한 응력집중으로 인해 급격히 증가하는 것으로 판단된다. 이외의 위치에서는 거리가 멀어질수록 점점 작아지는 양상을 보이고 있다.

표 5-19 오차 발생에 따른 세로리브측 주응력 범위 (MPa)

거리(mm)	벌크헤드 없음	곡선벌크헤드	수직리브
0	12.9 (1.00)	33.1 (2.57)	42.3 (3.28)
250	45.0 (1.00)	41.8 (0.93)	44.6 (0.99)
500	59.9 (1.00)	48.3 (0.81)	52.3 (0.87)
750	67.2 (1.00)	49.1 (0.73)	56.1 (0.83)
1000	71.7 (1.00)	47.5 (0.66)	56.4 (0.79)
1250	71.7 (1.00)	43.8 (0.61)	54.3 (0.76)

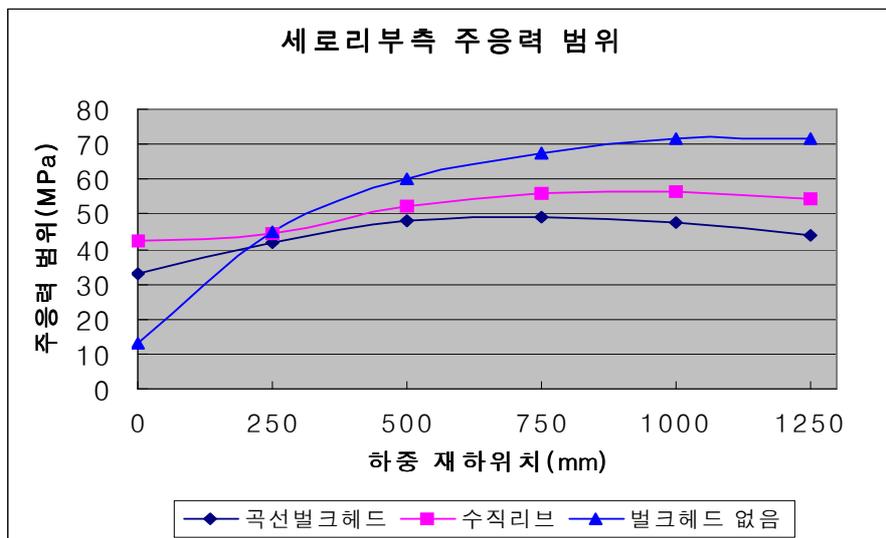


그림 5-32 오차 발생에 따른 세로리브측 주응력 범위

표 5-20 및 그림 5-33에서 보듯이 세로리브측 주응력과 마찬가지로 하중재하 거리 0mm에서 가장 큰 응력 증가를 보이고 있으며, 거리가 멀어질수록 오히려 응력값이 작아지는 것을 볼 수 있다. 이는 보강상세 있는 경우가 없는 경우보다 강성이 증가하여 작은 응력 범위를 보이는 것으로 판단된다.

표 5-20 오차 발생에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위 (MPa)

거리(mm)	벌크헤드 없음	곡선벌크헤드	수직리브
0	42.5 (1.00)	140.1 (3.30)	134.4 (3.16)
250	61.6 (1.00)	66.0 (1.07)	63.1 (1.02)
500	65.0 (1.00)	64.9 (1.00)	64.4 (0.99)
750	62.4 (1.00)	60.4 (0.97)	60.1 (0.96)
1000	57.8 (1.00)	55.1 (0.95)	54.2 (0.94)
1250	53.1 (1.00)	48.7 (0.92)	47.8 (0.90)

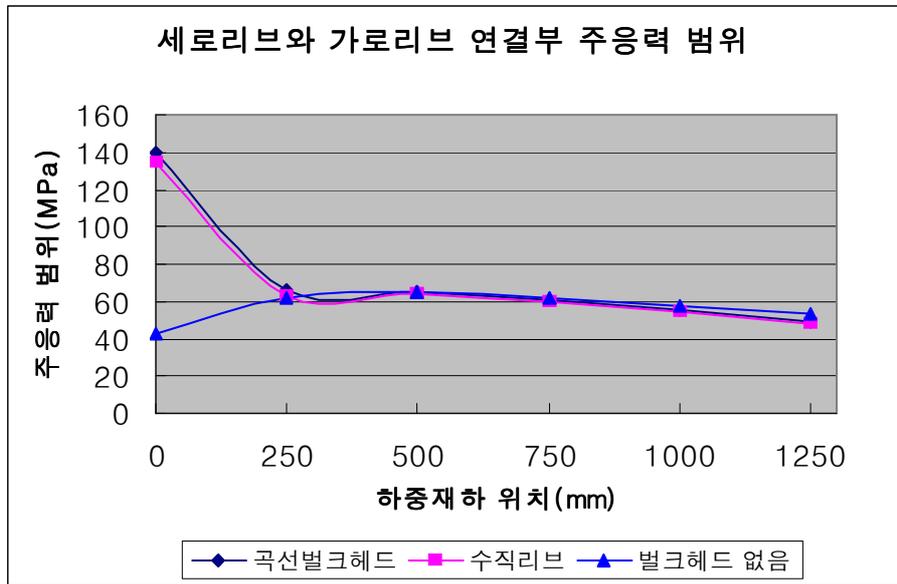


그림 5-33 오차 발생에 따른 세로리브와 가로리브 연결부 주응력 범위

표 5-21 및 그림 5-34에서 보듯이 가로리브측 슬릿부 주응력은 다른 관측대상과 같이 하중재하 거리 0mm에서 2.9배 정도의 큰 응력 증가를 보이고 있으며, 이외의 하중 재하 위치에서는 거의 같은 값을 보이고 있다. 이는 다른 측정점에 비하여 제작 오차에 따른 영향을 작게 받는 것으로 나타났다.

표 5-21 오차 발생에 따른 가로리브 슬릿부 주응력 범위 (MPa)

거리(mm)	벌크헤드 없음	곡선벌크헤드	수직리브
0	84.1 (1.00)	245.7 (2.92)	235.3 (2.8)
250	103.0 (1.00)	98.3 (0.95)	102 (0.99)
500	98.7 (1.00)	96.2 (0.97)	97.8 (0.99)
750	88.2 (1.00)	88.0 (1.00)	87.5 (0.99)
1000	76.5 (1.00)	77.9 (1.02)	76 (0.99)
1250	64.5 (1.00)	66.9 (1.04)	64.2 (1.00)

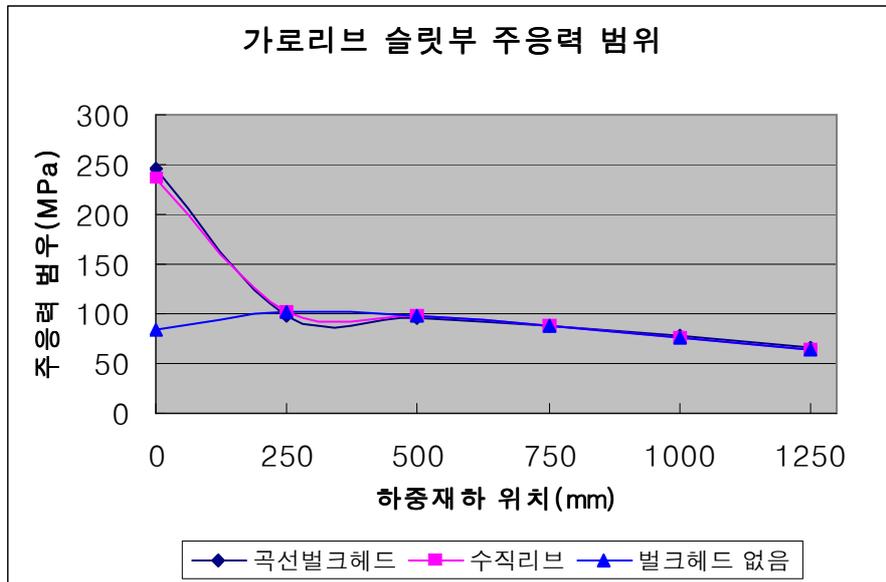


그림 5-34 오차 발생에 따른 가로리브 슬릿부 주응력 범위

세로리브측, 세로리브와 가로리브 연결부, 가로리브측 슬릿부 모두 제작오차 발생시 하중재하위치 0mm에서 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 제작 오차 발생은 피로강도 향상 보다는 피로강도 저하를 가져오므로 이에 보다 정확한 제작 및 연구가 필요할 것으로 판단된다.

제6장 결 론

최적의 강바닥판 시스템 구성을 위한 보강상세에 대해 연구를 수행하기 위하여 강바닥판 구조상세에 대해 벌크헤드 플레이트 유무 및 형상변화, 수직보강재 크기 및 부착 위치를 변수로 하여 피로 취약부인 세로리브·가로리브 연결부 및 세로리브측, 가로리브측 슬릿부 부분을 대상으로 피로강도 향상을 위한 결론을 도출하였다.

1. 강바닥판을 대상으로 보강상세 있는 경우가 세로리브측 주응력을 현저히 감소시키는 것을 알 수 있었다. 이는 보강상세가 복부판 전단력을 분담하고 가로리브의 면외방향 회전에 대한 강성을 증가시키는 역할을 하는 것뿐만 아니라, 세로리브의 비틀림응력을 적절히 분배해 주는 역할을 하여 뒤틀림에 의한 피로균열을 제어하기 때문이다. 또한 가로리브측 슬릿부 부분의 주응력을 줄여주는 역할을 하므로 보강상세 설치가 고려되어야 할 것으로 판단된다.

2. 보강상세 연결에 있어서 수동으로 작업을 하므로 가로리브와 내부 다이아프램 위치를 정확히 일치시키는 것이 힘들기 때문에 제작오차가 발생할 수 있다. 이러한 제작오차는 가로리브와 보강상세 연결부 주위에 급격한 응력 증가를 야기하므로, 이에 대해 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3. 피로균열이 빈번히 발생하고 있는 세로리브측 및 세로리브와 가로리브 연결부, 가로리브 슬릿부에 대한 구조해석 결과 강바닥판 최적보강상세로 폭 50mm의 수직리브가 세로리브와 가로리브 교차점과 연결하는 것보다는 교차점에서 하향 위치에 설치하는 것이 강바닥판 내력 작용력에 대해서 피로강도 향상에 보다 효율적인 것으로 나타났다.

참고 문헌

- (1) 김도균, 박영석(1998), "강상판의 중·횡리브 연결부 피로실험 연구" 대한토목학회 학술발표 논문집(1)
- (2) 건설교통부(2003), "도로교 설계기준" 한국도로 교통협회
- (3) 건설교통부(2006), "강도로교 상세부 설계지침" 건설교통부
- (4) 경갑수, 신동호, 김교훈(2006), "구조 상세부의 피로거동을 고려한 고성능 강바닥판 개발에 관한 해석적 연구" 한국강구조학회 논문집, 제 18호, 제4권
- (5) 공병승, 김진만(2003), "강바닥판교의 벌크헤드 플레이트에 관한 매개변수 연구" 한국전산구조공학회 2003년도 학술발표대회 논문집
- (6) 남광현(2001), "강바닥판의 피로설계", 과학기술
- (7) 박영석, 심낙훈(2002), "실물 모형 강상판 구조상세부의 피로강도에 관한 실험적 연구" 대한토목학회 논문집 : Vol.22 No.4-A
- (8) 전진수, 이기장, 최준호, 배두병(2001), "u리브를 이용한 강바닥판의 최적상세에 관한 해석적 연구" 대한토목학회 2001 학술 발표회 논문집
- (9) 신동호(2006), "강바닥판 구조상세부의 정적거동 및 보강상세에 관한 해석적 연구" 한국해양대학교 석사학위
- (10) 이현기(2005), "사장교 강바닥판의 피로강도 개선을 위한 가로리브 최적상세 연구" 국민대학교 석사학위
- (11) 이춘학(2002), "강바닥판의 용접상세에 대한 피로강도평가" 서울대학교 석사학위
- (12) 이춘학, 이종관, 윤태양(2001), "강바닥판의 바닥강판과 세로리브, 가로리브 용접부의 피로강도에 대한 실험" 대한토목학회 2001 학술발표회 논문집
- (13) 전상호, 이문규, 정태주, 박영석(2000), "실물 모형 강상판 접합상세부의 피로강도에 관한 실험적 연구" 대한토목학회 2000년도 학술발표회 논문집(I)
- (14) 최동호, 최항용, 최준혁(2000), "강바닥판 슬릿부의 피로거동에 대한 종리브 내 다이어프램의 영향" 한국강구조학회 2000년도 학술발표대회 논문집
- (15) 최준혁(1999), "강바닥판 구조상세부의 정적 및 피로거동" 한양대학교 박사학위논문
- (16) AASHTO(2004), "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications"
- (17) FEA Korea(주) LUASA 13.5-7 Reference Manual
- (18) Hisatada Suganuma(2005), "Development of orthotropic steel deck system with high fatigue resistance", doctoral dissertation

- (19) IIW(1993), "Recommendations concerning stress determination for fatigue analysis of welded components" Wiley-Interscience
- (20) William J.Bocchieri, John W.Fisher(1998), "Williamsburg Bridge Replacement Orthotropic Deck As-built Full-Scale Fatigue Test" ATLSS Report No. 98-04.
- (21) 龜井正博, 山本正雄, 鈴木智巳, 神野勝保夫, 山内崇賢. (1987). “鋼床版Uトラフの局部強度”,三菱重工技報, Vol. 24, No. 4.7月, 340-345.
- (22) 近藤明雅, 山田健太郎, 青水尙夫, 菊池洋一. (1983). 鋼床版閉断面縦リブ現場溶接継手の疲勞強度,“上木學會論文報告集, 第 340号, 12月.

감사의 글

처음으로 부산에 와서 10년이라는 시간이 흘렀습니다. 토목과를 선택한 이후 후회한적 없고 더 많은 것을 배우고자 대학원에 들어와서 시작한지 2년째, 정말 정신없이 지내다 보니 졸업할 시점이 되었습니다. 2년이라는 시간은 제게 앞만 보고 달려와 놓친 것, 잃은 것도 많은 시간이었지만 그 만큼 제 인생 전체를 볼 때 가장 큰 발전과 발돋움의 기간이었습니다. 2년 동안 저에게 관심을 가져주시고 부족한 저에게 많은 도움을 가져다 준 모든 분들의 얼굴이 저의 머릿속을 스쳐지나 갑니다.

무엇보다도 늘 잘 챙겨주시고 보잘 것 없는 저를 대학원에 받아주시고 아낌없이 가르쳐 주신 지도교수 경갑수 교수님께 진심으로 감사의 말씀을 전합니다. 또한 각 분야에게 부족한 제가 질문할 때마다 항상 자상하게 대답해주시고 가르침을 주신 김도삼 교수님, 김태곤 교수님, 이중우 교수님, 김태형 교수님, 충주에서 멋진 추억과 좋은 말씀 많이 해주신 이승용 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한 연구실에서 부족한 저에게 항상 좋은 말씀과 가르침을 주신 허상구 부장님께 고개숙여 감사 드립니다.

2년 동안 부족한 저를 이끌어주고 좋으신 선배로써 지켜봐 주시고 충고를 아끼지 않으신 순철이형, 진우형, 준호형, 지윤에게 감사드리며, 이 논문을 완성할 수 있도록 물심양면으로 도와준 영적이형, 동호형에게 감사의 뜻을 전합니다. 또한 선배로써 많은 도움을 주지 못해 미안한 후배들 혜연, 창원, 남우, 학교 선배처럼 잘 따라준 남원, 가끔은 힘들게 하지만 나에게 웃음을 주는 윤석에게 고맙다는 말을 전합니다.

타지에서 멋진 생활을 하게 만들어준 98친구들과 특히 같이 대학원을 다니면서 늘 내 곁에서 커피한잔의 여유를 느끼게 해준 지민, 언제나 웃게 해주는 동훈, 재현, 기찬, 수정, 정말 많은 시간 속에 멋진 추억을 만들어준 성실, 찬희, 창석, 명구, 일우, 성진, 동규, 병욱, 정훈에게 고마움을 전합니다.

‘부산지역 해상 교량의 내구성 향상을 위한 지역인력양성팀’을 구성하여 많은 도움과 덕담을 해주신 동서대학교 공병승 교수님, 한국해양대학교 박주용 교수님, 같이 고생한 한성관, 송창섭에게 깊은 감사를 전합니다.

마지막으로 나에게 사랑, 믿음 등의 모든 것을 사랑으로 가르쳐 주시고, 인도 해주신 부모님, 언제나 힘이 되고 기댈 수 있는 형, 큰누나, 작은누나, 부산에서 저를 항상 걱정해 주시는 할머니, 우리 가족이 된 형수님, 매형에게 진심으로 감사의 마음을 전합니다.