

강바닥판 교량의 보강상세에 관한 해석적 연구

Analytical Study on the Reinforced Details of Orthotropic Steel Deck Bridge

경 갑 수† 신 동 호* 김 교 훈** 박 경 진***
Kyung, Kab-Soo Shin, Dong-Ho Kim, Kyo-Hoon Park, Kyung-Jin
(논문접수일 : 2007년 1월 18일 ; 심사종료일 : 2007년 5월 29일)

요 지

강바닥판 피로손상을 억제할 수 있는 유효한 방법의 하나로 데크 플레이트의 판 두께를 증가시키거나 세로리브의 보강 등에 의한 강성 증가를 고려할 수 있는데, 이 강성증가는 일반적으로 윤하중에 의한 강바닥판의 국부변형 억제 등에 효과가 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 강바닥판교의 피로균열이 빈번히 발생해 가장 문제가 되는 U-rib와 가로리브 연결 상세부의 발생응력을 최소화할 수 있도록 벌크헤드플레이트나 수직리브와 같은 보강상세의 부착에 따른 변수로 정밀 구조해석을 수행하였다. 그 결과, 벌크헤드플레이트는 전체적으로 연결 상세부의 주응력을 경감시키나, 피로균열이 발생하는 용접 지단부에서는 오히려 응력집중이 커지는 경향을 나타내는 것을 알 수 있었다. 그러나 수직리브는 용접 지단부에서 응력집중을 경감시키는 효과를 나타내어 벌크헤드플레이트의 보강보다는 수직리브의 보강이 더 효율적일 것으로 판단된다.

핵심용어 : 강바닥판 교량, 보수보강, 세로리브, 가로리브, 벌크헤드플레이트, 수직리브

Abstract

The improvement of stiffness by the increase of thickness of deck plate or the reinforcement of longitudinal rib is one method among the effective methods to control fatigue damages occurring in orthotropic steel deck. It is likely that the increase of stiffness is effective to restrain local deformation caused by axial load in the steel deck. Therefore, in this study, the parameter studies for the reinforced structural details such as the bulk-head plate and vertical rib which is established to reduce the resultant stresses in the connection parts of the longitudinal rib and floor beam were performed with FE analysis. From the results, it was known that the reinforced structural detail with the bulk-head plate in the longitudinal ribs reduced overall the principal stresses at the connection parts, but the stress concentration increased in the weld toe parts which are occurring fatigue cracks. Also, it was estimated that the reinforced structural detail with the vertical rib in the longitudinal ribs because of the reduction of stress concentration in the weld toe parts is more effective details than the bulk-head plate.

Keywords : orthotropic steel decks bridge, repair · reinforcement, longitudinal rib, floor beam, bulk head plate, vertical rib

1. 서 론

강바닥판에 발생하는 피로손상의 주요 원인은 윤하중에 의해 발생하는 데크 플레이트 교축직각방향의 국부변형 및 이에 기인하는 응력집중에 의한 것이 대부분인 것으로 보고 되고 있다. 그러므로 이러한 원인에 의해 발생하는 강바닥판

피로손상에 대한 대책 수립 및 피로강도를 향상시킬 수 있는 구조상세 개발은 강바닥판 구조성능 향상에 중요한 부분의 하나가 될 것으로 판단된다.

강바닥판 피로손상을 억제할 수 있는 유효한 방법의 하나로 데크 플레이트의 판 두께를 증가시키거나 세로리브의 보강 등에 의한 강성 증가를 고려할 수 있다. 이러한 강성증가

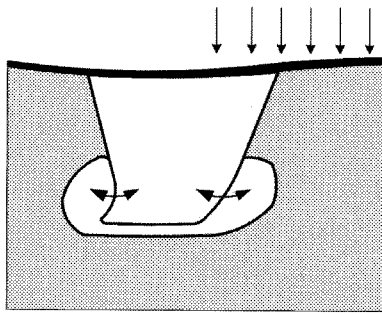
† 책임저자, 정회원 · 한국해양대학교 건설환경공학부 교수
Tel: 051-410-4464 ; Fax: 051-403-3762
E-mail: kyungks@hhu.ac.kr

* 엔비코 컨설팅 사원

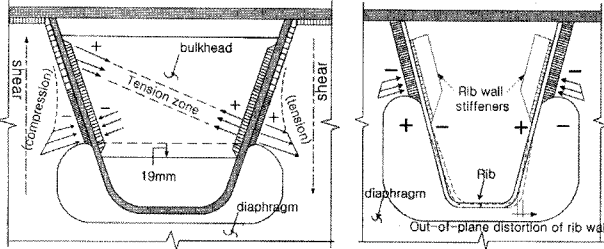
** (주) 신성엔지니어링 상무

*** (주) 동호 사원

· 이 논문에 대한 토론을 2007년 10월 31일까지 본 학회에 보내주 시면 2007년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.



(a) 하중재하 위치에 따른 면외변형 형상



(b) 가로리브의 변형 특성

(c) 세로리브의 변형 특성

그림 1 강바닥판 리브의 변형 특성

는 일반적으로 그림 1(a)에 나타낸 것과 같은 윤하중에 의한 강바닥판의 국부변형 억제 등에 효과가 있을 것으로 판단된다. 이러한 강성 증가 방법 가운데 세로리브 보강에 의한 강성증가의 대표적인 사례로 미국의 Bronx-whitestone교량에 적용된 세로리브 내부에의 수직리브 부착 및 Williamsburg교량에 적용된 세로리브 내부에의 벌크헤드플레이트 보강상세를 들 수 있다(Tsakopoulos, 등, 2005).

그림 1(b)가 내부 다이아프램형태의 벌크헤드플레이트로 가로리브의 복부판에 작용하는 전단변형과 면외·면내변형을 저감시켜 전체적으로 세로리브에 작용하는 응력을 저하시키는 것을 도모하는 구조상세이다. 그림 1(c)가 세로리브 내부의 수직리브로 세로리브 하부 스킴스상세부에서의 세로리브의 뒤틀림(distorsion, 또는 oil-canning현상이라고도 함)을 억제시키는 구조상세이다.

한편 국내에서도 연구결과를 반영하여 녹산대교 강바닥판 설계(김우중 등, 2004)의 세로리브 내부에 내부 다이아프램 형태의 직선형상의 벌크헤드플레이트가 적용된 사례가 있다. 또한 이러한 보강효과를 목적으로 벌크헤드플레이트 설치에 따른 연구(공병승 등, 2004a, 2004b, 배두병 등, 2003, 전진수 등, 2001, 2002a, 2002b)가 이루어져 기존 Williamsburg교량에서 제안된 직선형태보다 곡선형태의 벌크헤드플레이트가 피로강도측면에서 보다 효율적인 것으로 보고하고 있다. 그러나 이들 연구에서는 가로리브 바로 위에 하중이 재하되는 하중조건하에서의 벌크헤드플레이트 보강구조상세 적용에 따른 강바닥판의 가로리브의 관점에서의 피로강도 평가만이 이루어 졌다.

한편 벌크헤드플레이트 보강효과에 따른 가로리브 및 세로리브 관점에서의 피로평가의 연구(공병승 등, 2003)에서는 교축방향으로의 하중이동에 따른 대상구조 상세의 응력변화 특성을 비교하였다. 그러나 이 연구에서의 피로평가 위치는 일반적으로 피로균열이 가장 많이 보고되고 있는 세로리브 및 가로리브의 용접부 지단부가 아니라, 해석 결과에서 최대 주응력이 발생하는 위치를 대상으로 응력평가가 이루어져 피로강도의 평가가 피로균열 발생 위치와는 차이가 있는 것으로 조사되었다.

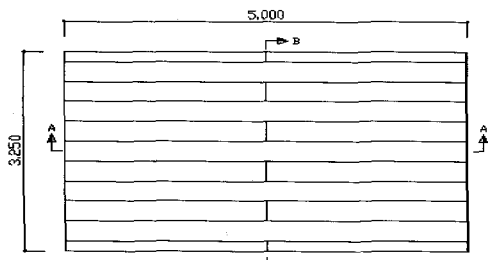
이상과 같이 기존 연구에서의 피로강도 평가는 기존 강바닥판교량에서 일반적으로 사용되는 국내 및 외국의 구조상세를 대상으로 하고 있으나, 강바닥판에서 피로균열이 빈번하게 발생되고 있는 세로리브와 가로리브의 용접연결부에서의 세로리브 및 가로리브의 용접부 측에서의 피로균열 발생 가능성에 대한 전체적인 측면에서의 검토가 충분하게 이루어지고 있지 않는 것을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 강바닥판 피로성능 향상을 목적으로 '구조상세부의 정적거동에 따른 고내구성 강바닥판 개발'(경갑수 등, 2006)에서 제안된 강바닥판 구조상세의 세로리브 내부에 수직리브 부착 및 벌크헤드플레이트 부착에 의한 세로리브 보강 방법이 강바닥판의 피로 내구성 향상에 어떤 영향을 미치는가를 조사하기 위하여 2가지 세로리브 보강상세를 적용한 강바닥판을 대상으로 일련의 구조해석을 실시하고, 세로리브와 가로리브 연결부를 포함하는 구조상세에 대한 피로강도 향상을 검토하여 향후 강바닥판 피로강도 향상을 위한 보강 구조 상세에 대한 기초 자료를 제시하고자 한다.

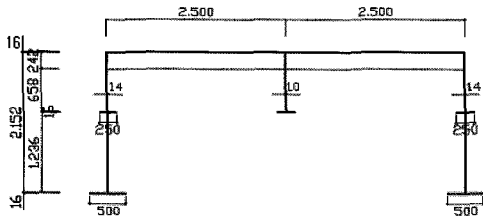
2. 구조 해석 대상 교량 및 모델링

2.1 대상 교량

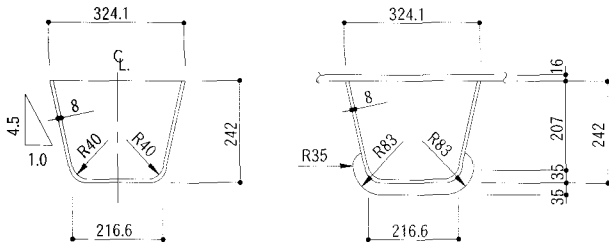
대상 교량은 현재시공 중에 있는 N대교를 대상으로 기존 연구(경갑수 등, 2006)와 같이 그림 2와 같은 5개의 세로리브와 중앙에 1개의 가로리브, 양쪽 끝단에 2개의 가로리브를 갖는 소블럭을 대상으로 하였다. 그러나 세로리브 상세는 그림 2(c)에 나타낸 것과 같이 기존 연구 결과를 반영한 최적 구조상세에 대한 보강상세의 피로강도 평가를 위하여 '구조상세부의 정적거동에 따른 고 내구성 강바닥판 개발'(경갑수 등, 2006)에서 제안된 구조상세를 적용하였다. 즉, 본 연구에서 적용한 강바닥판은 기존 대상교량의 데크 플레이트 두께를 15mm에서 16mm, 세로리브와 가로리브가 만나는 슬릿트의 곡률반경을 20mm에서 35mm, 세로리브와 가로리브와의 용접이음 길이를 62%에서 70%로 변경한 고 내구성



(a) 평면도



(b) 측면도



(c) 세로리브 상세도

그림 2 구조해석 대상의 소블럭 형상과 세로리브 상세도

강바닥판 구조상세이다.

한편 본 연구에서 적용하는 세로리브의 내부 보강상세는 앞에서 기술한 그림 2(c)의 구조상세에 본 연구에 적합하게 변형된 수직리브 및 벌크헤드플레이트를 적용하였다. 상세한 구조 상세에 대해서는 각각 3장 및 4장에서 기술하도록 한다.

2.2 구조해석 모델링

구조해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS ver 6.5(Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc.)를 사용하였고, 구조해석 모델링은 8절점 쉘 요소인 S8R요소를 메인 요소로 선택하고, 부분적으로 5절점 쉘 요소인 STR165요소를 사용하여 그림 3 및 4와 같이 모델링 하였다.

해석과 관련된 이 이외의 테이터로 탄성계수는 210GPa, 포아송 비는 0.3(도로교 설계기준, 2005)을 적용하였고, 구조모델링의 경계조건은 양단 힌지 조건이며, 전체 모델링 형상은 그림 3과 같다.

구조해석의 모델링에서는 기존 연구(경갑수 등, 2006)에서와 같이 사전의 모델 요소의 검증자료에 기초하여 곡률부의 모델링은 8절점 요소를 사용하여 구성한 경우에 요소 한 변의

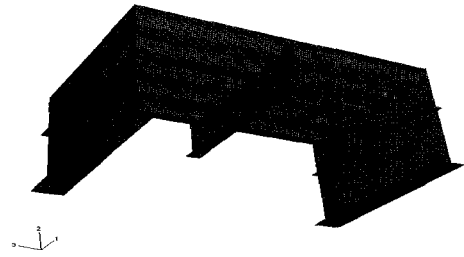


그림 3 강바닥판 모델링 형상

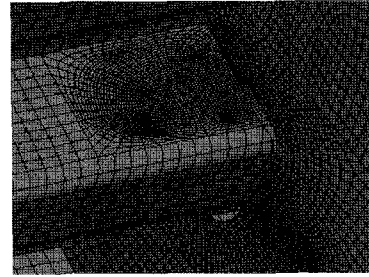


그림 4 element 분할 형상

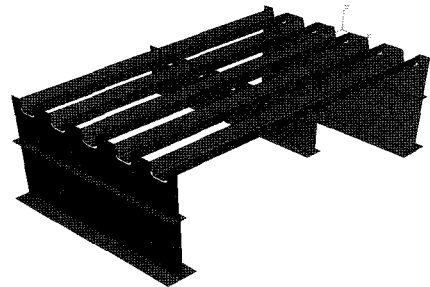


그림 5 수직리브가 부착된 강바닥판 형상

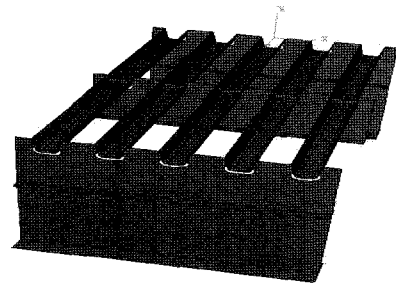


그림 6 벌크헤드플레이트가 부착된 강바닥판 형상

길이가 곡률반경의 1/10, 4절점 요소를 사용한 경우에는 1/20이하로 요소크기를 분할하면 곡률부의 응력이 안정된다는(조재병, 1995) 검증자료에 기초하여, 세로리브와 가로리브가 만나는 부분의 슬릿 곡률부분은 곡률반경의 1/10이하로 요소크기를 분할하였다. 또한, 용접부의 요소크기는 용접 치수의 크기를 6mm로 가정하고, 용접치수의 1/2크기를 묘사할 수 있도록 3mm로 요소 한 변의 길이를 분할하였다. 이것은 IIW(1993)의 지침에 의하여 용접부를 포함하는 구조해석을 실시하는 경우, 용접치수의 1/2정도로 요소크기를 분할하여야 해석 결과에 신뢰성이 있다는 보고에 기초한 것이다. 이것을 반영한 상세 구조상세 모델은 그림 4와 같다.

한편 세로리브 보강의 형태로 수직리브가 부착된 강바닥판 형상은 그림 5와 같고, 벌크헤드플레이트가 부착된 강바닥판 형상은 그림 6과 같다.

3. 수직리브 부착에 따른 데크플레이트 거동

미국에서 1939년에 건설되어 공용되던 Bronx-white-stone교량이 최근 콘크리트 바닥판의 파손으로 바닥판을 교체하면서 Bronx-whitestone교량의 사하중 경감을 목적으로 바닥판을 강바닥판으로 대체하였으며, 강바닥판 내구성능 향상을 목적으로 세로리브 내부에 그림 7과 같은 수직리브를 부착하는 구조상세를 적용하였다. 이 장에서는 '구조상세부의 정적거동에 따른 고 내구성 강바닥판 개발'(경갑수 등, 2006)에서 제안된 구조상세의 세로리브 내부에 수직리브를 부착한 강바닥판의 거동 특성을 분석하여 수직리브 부착의 보강효과를 검토하고자 한다.

3.1 세로리브 관점에서의 세로리브와 가로리브 연결부

3.1.1 대상 구조상세 및 변수 조건

대상 구조상세는 그림 2의 소블럭을 대상으로 하였으며, 세로리브 내부에 부착한 수직리브 상세는 기본적으로는 그림 7과 같은 Bronx-whitestone교량에서 적용된 형상을 적용하였다. 그러나 본 연구에서의 구조상세가 국내의 강바닥판 구조상세를 기본으로 개선된 상세이므로 Bronx-whitestone 교량의 세로리브와는 상이한 구조상세를 갖고 있는 것을 고려하여, 그림 8과 같이 세로리브 보강 형상을 국내의 구조상세에 맞추어 변경한 구조상세를 제안하고 이를 적용하였다.

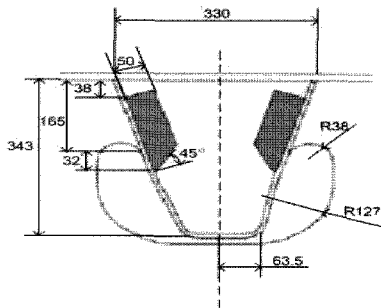


그림 7 Bronx-whitestone교량의 세로리브 형상

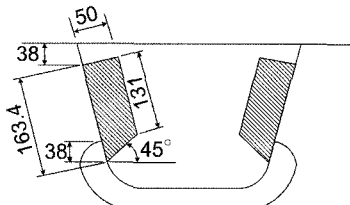


그림 8 수직리브가 부착된 제안된 세로리브 형상

3.1.2 재하조건 및 응력 관측점

수직리브 부착에 따른 강바닥판 세로리브와 가로리브 연결부의 세로리브의 거동 특성을 조사하기 위한 구조해석은 그림 9와 같은 하중 조건에서 수행하였다. 이 하중조건은 차륜 하중의 이동하중을 모사하기 위한 것이다. 여기서의 하중 재하 면적은 580mm×230mm이며, 재하하중은 0.72MPa이다 (도로교 설계기준, 2005).

응력 평가위치는 그림 9의 응력 측정점과 같으며, 세로리브와 가로리브가 만나는 점에서 세로리브 하단으로 10mm의 위치를 대상으로 하였다. 이것은 용접지단부가 일반적으로 응력집중부가 되어 피로균열 발생에 가장 취약한 부분이라는 것과 보강을 실시하지 않은 기존 연구(경갑수 등, 2006)와의 비교를 위한 것이다. 4장의 벌크헤드 플레이트 부착에 의한 보강효과 검토시의 세로리브 관점에서의 재하 조건 및 응력평가 위치도 본 절과 동일하다.

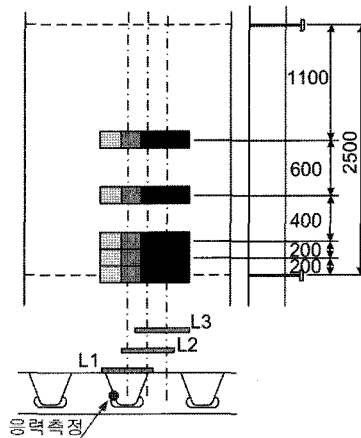


그림 9 하중 재하도 및 세로리브측의 평가위치

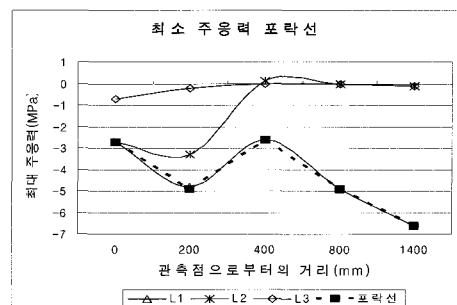
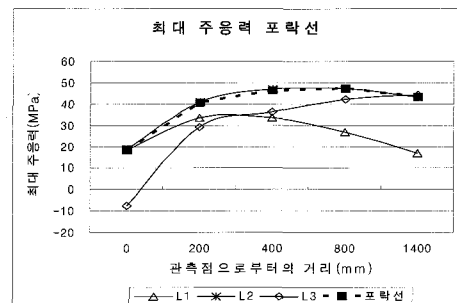


그림 10 포락선 정의

표 1 수직리브 부착에 따른 세로리브 측면 주응력 범위 비교 (MPa)

재하위치	보강상세 없는 구조상세 16t/35R/70%	수직리브 부착 16t/35R/70%	
	주응력 범위	주응력 범위	감소율
0 mm	16.7	16.6	-0.6%
200 mm	38.6	38.1	-1.3%
400 mm	44.7	43.4	-2.9%
800 mm	54.6	51.0	-6.6%
1400 mm	51.5	47.3	-8.2%
평균	-	-	-3.9%

수직 리브 부착에 따른 종리브 측 주응력 범위

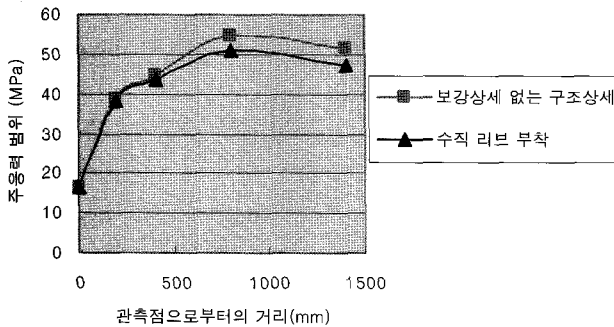


그림 11 수직리브 부착에 따른 세로리브 측 주응력 범위

3.1.3 해석 결과 및 고찰

수직리브 부착에 따른 종리브와 횡리브 연결부의 종리브 측에서의 영향을 분석하기 위하여 그림 11과 표 1에 수직리브가 부착되지 않은 상세의 주응력 범위와 부착된 상세의 주응력 범위를 비교하여 나타내었다.

그림 11 및 표 1에서의 해석 결과는 그림 10에 나타난 포락선을 사용한 주응력 범위를 사용하였다. 이것은 강바닥 판 거동에 가장 영향을 주는 재하조건인 그림9의 모든 하중 조건에 대한 해석결과를 주응력 범위(최대 주응력포락선 - 최소주응력포락선)로 나타내는 것에 의하여 소블럭을 대상으로 하는 본 해석에서 충분히 반영할 수 없는 실제교량의 연속교 거동에서 발생하는 부모멘트부의 거동 특성을 고려할 수 있고, 또한 관측점에서 같은 거리에 있는 L1, L2, L3의 최대값과 최소값을 사용함으로써 해석에서의 모든 하중 조건을 하나의 도표와 그림으로 나타낼 수 있고, 이를 쉽게 파악할 수 있기 때문이다.

표 1 및 그림 11에 세로리브측의 평가위치에 대해 각각 기존 연구에서 얻어진 수직리브가 없는 고성능 강바닥판 구조상세의 주응력 범위와 본 연구에서 얻어진 수직리브 부착 구조상세에 대한 해석결과를 주응력 범위로 정리하여 나타내었다. 표 1에 나타난 것과 같이 수직리브 부착 구조상세의

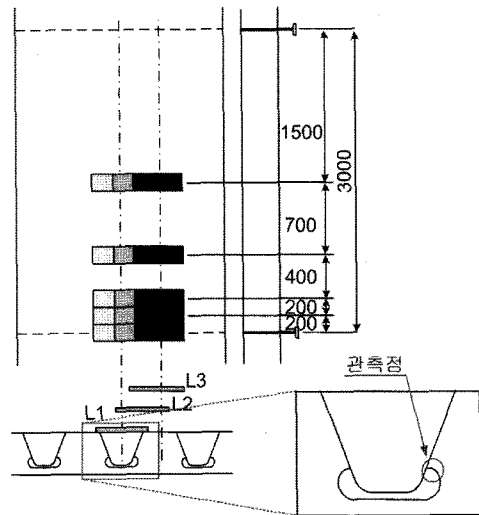


그림 12 하중 재하도 및 가로리브 측 관측점

경우가 전체적으로 수직리브가 없는 구조상세에 비하여 주응력범위가 낮은 것을 알 수 있으며, 평균적으로는 3.9%의 응력경감이 있는 것으로 나타났다. 특히 평가위치에서 거리가 멀어질수록, 즉 면외변형에 의한 영향이 크게 나타날수록 세로리브측의 평가위치에서 수직리브 부착에 따른 응력경감이 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이와 같은 경향을 나타내는 이유로는 세로리브 내부에 부착된 수직리브가 가로리브에 의해 구속되지 않은 세로리브 내부를 구속하여 기존 세로리브에서 발생하는 세로리브의 면외비틀림 거동(일부 연구에서는 이와 같은 변형을 oil canning 현상이라고도 함)을 억제하기 때문으로 판단된다.

3.2 가로리브 관점에서의 세로리브와 가로리브 연결부

3.2.1 대상 구조상세 및 변수 조건

대상 구조상세 및 변수 조건은 3.1절의 세로리브 관점에서의 세로리브와 가로리브 연결부와 동일하다.

3.2.2 재하 조건 및 응력 관측점

세로리브와 가로리브 연결부의 가로리브측의 거동 특성을 조사하기 위한 구조해석은 그림 12와 같은 하중 조건에서 수행하였다. 이때 하중 재하 면적은 580mm×230mm이며, 재하하중도 0.72MPa로 3.1절의 조건과 동일하다.

응력 평가위치의 상세 위치는 기존 연구에서의 피로균열 발생 특성을 고려하여 그림 12의 세로리브와 가로리브가 만나는 슬릿트 상단에서 위쪽으로 10mm, 세로리브에서 가로리브 쪽으로 10mm에 위치한 곳이다. 4장의 벌크 헤드 플레이트 부착에 의한 보강효과 검토시의 가로리브 관점에서의 재하조건 및 응력 평가위치도 본 절과 동일하다.

표 2 수직리브 부착에 따른 가로리브 측면 주응력 범위 비교 (MPa)

재하위치	보강상세 없는 구조상세 16t/35R/70%	수직리브 부착 16t/35R/70%	
	주응력 범위	주응력 범위	감소율
0 mm	44.1	43.1	-2.3%
200 mm	59.1	57.3	-3.0%
400 mm	58.0	55.7	-4.0%
800 mm	48.0	45.4	-5.4%
1400 mm	30.7	29.4	-4.2%
평균	-	-	-3.8%

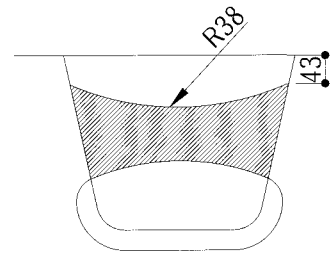


그림 14 벌크 헤드 플레이트가 부착된 제안된 세로리브 형상

4. 벌크헤드플레이트 부착에 따른 데크 플레이트 거동

미국에서 1903년에 건설되어 공용되던 Williamsburg교량의 콘크리트 바닥판이 교량의 성능개선 공사와 함께 사하중 경감을 목적으로 2001년 강바닥판으로 교체되었다. 이 교량의 강바닥판에는 일반적으로 제작과정중의 세로리브 형상변형 방지로 사용되었던 내부 다이아프램(본 연구에서는 벌크헤드플레이트로 표기)의 형태를 변형한 구조상세를 세로리브와 가로리브가 교차되는 위치의 세로리브 내부에 배치하여 강바닥판의 성능 향상을 도모하였다. 이 장에서는 기존 연구(경갑수 등, 2006)에서 제시한 고성능 강바닥판 구조상세의 세로리브 내부에 벌크헤드플레이트를 부착한 강바닥판의 거동 특성을 분석하여 벌크헤드플레이트의 보강효과 및 수직리브와의 비교 검토를 실시하고자 한다.

4.1 세로리브 관점에서의 세로리브와 가로리브 연결부

4.1.1 대상 구조 상세 및 변수 조건

해석의 대상 구조는 그림 2의 소블럭을 대상으로 하였으며, 벌크헤드플레이트는 그림 14와 같은 형상과 재원을 사용하였다. 이 구조상세는 공병승 등(2004)의 연구에 의하면 Williamsburg교량에 적용된 구조상세보다 형상적으로 안정되고 보강효과가 탁월한 것으로 보고된 구조상세이다. 이 구조상세를 Williamsburg교량에 적용된 벌크헤드플레이트 형상과 비교하면, 벌크헤드플레이트와 가로리브를 컷오프한 슬릿트를 일치시킨 것은 같으나 벌크 헤드 플레이트를 직선에서 곡선으로, 가로리브와의 용접이음을 모두 필릿용접으로 모델링 한 것이 다른 점이다.

4.1.2 해석 결과 및 고찰

표 3 및 그림 14에 세로리브와 가로리브 연결부의 세로리브 측면의 평가위치에 대해 기존 연구(경갑수 등, 2006)에서 얻어진 벌크헤드플레이트가 부착되지 않은 강바닥판 구조상세의 주응력 범위와 본 연구에서 얻어진 벌크헤드플레이트 부착 구조상세에 대한 해석결과를 주응력 범위로 정리하여 나타내었다.

수직 리브 부착에 따른 가로리브 측면 주응력 범위

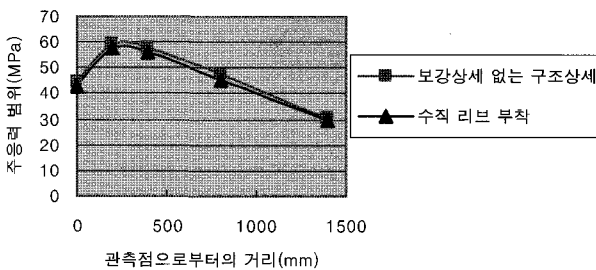


그림 13 수직리브 부착에 따른 가로리브 측면 주응력 범위

3.2.3 해석 결과 및 고찰

표 2 및 그림 13에 가로리브측의 평가위치에 대해 기존 연구(경갑수 등, 2006)에서 얻어진 수직리브가 없는 고성능 강바닥판 구조상세의 주응력 범위와 본 연구에서 얻어진 수직리브 부착 구조상세에 대한 해석결과를 주응력 범위로 정리하여 나타내었다. 표 2에 나타난 것과 같이 가로리브 측면에서의 평가위치에서 수직리브 부착 구조상세의 경우가 전체적으로 수직리브가 없는 구조상세에 비하여 주응력범위가 낮은 것을 알 수 있으며, 평균적으로는 3.8%의 응력감소가 있는 것으로 나타났다. 특히 면외변형에 의한 영향이 크게 나타나는 위치로 보고(館石, 1994)되고 있는 지간 약 1/4~1/3위치에서 수직리브 부착의 응력감소가 가장 크게 나타나는 경향을 보이고 있어 가로리브의 면외변형에도 수직리브는 효과가 있는 것을 알 수 있다.

이상의 연구결과로부터 세로리브 내부에 설치한 수직리브 보강 구조상세는 세로리브와 가로리브가 교차하는 위치에서의 세로리브의 면외비틀림 및 가로리브의 면외거동을 억제하는 효과가 있는 것을 알 수 있다. 따라서 향후 강바닥판 세로리브 내부에 수직리브 부착에 의한 보강효과를 고려하여 수직리브의 면적 등과 같은 변수로 최적 형상이 연구된다면 세로리브 보강에 의한 고성능 강바닥판의 개발이 이루어질 것으로 생각된다.

표 3 벌크헤드플레이트 부착에 따른 세로리브측의 주응력범위 비교(MPa)

재하위치	보강상세 없는 구조상세 16t/35R/70%	벌크헤드플레이트 부착 16t/35R/70%	
	주응력 범위	주응력 범위	증가율
0 mm	16.7	20.3	+21.6%
200 mm	38.6	41.5	+7.5%
400 mm	44.7	46.4	+3.8%
800 mm	54.6	56.9	+4.2%
1400 mm	51.5	53.6	+4.1%
평균	-	-	+8.24%

벌크 헤드 플레이트 부착에 따른 세로리브 측 주응력 범위

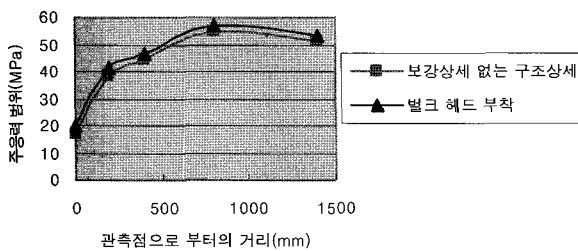


그림 15 벌크헤드플레이트 부착에 따른 세로리브 측 주응력 범위

표 3과 그림 15로부터 벌크헤드플레이트 부착에 따른 세로리브와 가로리브 연결부에서 세로리브측의 10mm 하단의 평가 위치에서의 응력저감효과는 없는 것으로 나타나 벌크헤드플레이트 부착에 의한 세로리브의 보강효과는 없는 것으로 나타났다. 오히려 벌크헤드플레이트의 응력전달 효과로 인하여 평가 위치에서는 응력 집중 현상이 발생하는 것으로 나타났다.

이러한 결과는 전진수 등(2001)의 연구에서 벌크헤드플레이트 부착시 슬릿트 세로리브측의 응력이 다소 증가한다는 것과 일치하는 것이다.

따라서 기존 연구 결과나 본 연구 결과에 기초한다면 세로리브 내부에 벌크헤드플레이트 부착은 양쪽 가로리브를 연결하여 하중 전달구조로 변화된다. 이 때문에 연결부 근처인 세로리브 평가위치에서 국부적인 응력집중이 발생하므로 강바닥판의 내구성 저하의 원인이 될 것으로 판단된다.

또한 이러한 응력집중 현상은 기존의 Tsakopoulos와 Fisher 등(2005)의 연구 결과에서와 같이 벌크헤드플레이트의 용접이음부에 반복하중이 지속적으로 작용하는 경우에는 피로균열이 발생할 가능성이 높을 것으로 판단된다.

4.2 가로리브 관점에서의 세로리브와 가로리브 연결부

4.2.1 대상 구조상세 및 변수조건

대상 구조상세 및 변수 조건은 4.1.1절의 세로리브 관점에서의 세로리브와 가로리브 연결부와 동일하다.

표 4 벌크헤드플레이트 부착에 따른 가로리브측의 주응력 범위 비교(MPa)

재하위치	보강상세 없는 구조상세 16t/35R/70%	벌크헤드플레이트 부착 16t/35R/70%	
	주응력 범위	주응력 범위	증가율
0 mm	44.1	54.1	+22.7%
200 mm	59.1	62.8	+6.3%
400 mm	58.0	65.3	+12.6%
800 mm	48.0	53.1	+10.6%
1400 mm	30.7	31.9	+3.9%
평균	-	-	+11.22%

벌크 헤드 플레이트 부착에 따른 가로리브 측 주응력 범위

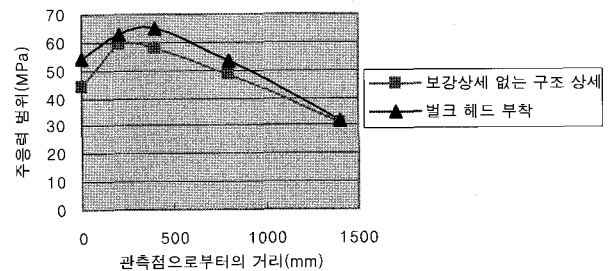


그림 16 벌크헤드플레이트 부착에 따른 가로리브 측 주응력 범위

4.2.2 해석 결과 및 고찰

표 4 및 그림 16에 세로리브와 가로리브 연결부의 가로리브측의 평가위치에 대해 각각 기존 연구(경갑수 등, 2006)에서 얻어진 벌크헤드플레이트가 부착되지 않은 강바닥판 구조상세의 주응력 범위와 본 연구에서 얻어진 벌크헤드플레이트 부착 구조상세에 대한 해석결과를 주응력 범위로 정리하여 나타내었다.

표 4 및 그림 16으로부터도 벌크헤드플레이트 부착에 따른 세로리브와 가로리브가 만나는 슬릿트 상단에서 위쪽으로 10mm, 세로리브에서 가로리브 쪽으로 10mm에 위치한 평가 위치에서의 응력저감효과는 없는 것으로 나타나 벌크헤드플레이트 부착에 따른 가로리브의 보강효과가 없는 것으로 나타났다.

이러한 결과는 전진수 등(2001)의 연구에서 세로리브에 벌크헤드플레이트 부착시 가로리브 슬릿트 주위의 응력 분포를 변화시켜서 전체적으로 최대 주인장 응력은 작아지나 슬릿트 상부에 강한 응력 집중현상이 발생하는 보고와도 일치하는 것이다.

5. 가로리브 슬릿트 주변부 주응력 변화

벌크헤드플레이트나 수직리브와 같은 보강상세의 적용으로 인하여 가로리브의 슬릿트 주변부의 응력 특성에도 변화가 발생하는 것을 구조해석 결과로부터 알 수 있었다. 따라서

표 5 슬릿트 주변부 주응력 변화(MPa)

구분	슬릿트 주변부 최대주응력
보강상세 없는 구조상세	24.8
수직리브 보강	24.7
벌크헤드 보강	19.7

이 절에서는 앞의 3, 4절에서 수행된 결과 중에 가로리브 슬릿트 주변부에서의 최대 주응력은 하중이 L3의 400mm위치에 재하될 때 발생하는 것을 알 수 있었다. 이들 구조해석 결과로부터 보강이 없는 일반적인 구조상세 및 보강상세를 적용한 구조상세에 대한 가로리브의 슬릿트 주변부에서의 최대주응력 값을 표 5에 나타내었다. 각 구조상세에서의 최대주응력은 대체적으로 슬릿트의 곡률부에서 나타나는 것을 알 수 있었다.

표 5로부터 기존 연구(전진수 등, 2001, 2002a, 2002b)와 같이 벌크헤드플레이트 보강은 슬릿트 주변부에서 응력경감이 제일 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 벌크헤드플레이트가 세로리브와 가로리브 연결상세에 대하여 하중전달형으로 연결되어 슬릿트 주변부의 전체적인 변형거동을 억제하기 때문에 세로리브와 가로리브 연결부 용접지단부의 국부적인 응력집중과는 상반되게 강성의 증가로 슬릿트 주변부의 변형을 억제하기 때문으로 판단된다.

그러나 수직리브는 세로리브와 가로리브 연결부의 용접지단부에 대하여는 응력경감효과를 발생하였으나, 슬릿트 주변부에 대해서는 응력경감효과가 거의 없음을 알 수 있다. 이것은 수직리브의 강성증가가 용접지단부에는 보강효과를 나타내나, 슬릿트 주변부의 전체적인 거동에는 하중 비전달형으로 인하여 영향을 못 미치기 때문이다.

한편, 일반적으로 강바닥판 세로리브와 가로리브와의 용접이음부가 피로에 대하여 취약한 부분이 되며, 특히 피로손상은 세로리브와 가로리브의 스캐럽 용접지단부에서 주로 발생하는 것으로 보고되고 있다. 그러므로 벌크헤드플레이트 부착에 의한 보강효과는 전체적으로 가로리브 및 가로보 슬릿트 주변부의 최대 주응력을 저감시키는데는 효과는 있으나, 그림 12에 나타난 가로리브 용접이음부의 용접 지단부 응력이 증가된다면 벌크헤드플레이트의 효율성은 피로손상 측면에서는 그 효율성이 감소될 것으로 판단된다.

이상으로부터 세로리브 내부에의 벌크헤드플레이트 부착은 가로리브 측의 피로 내구성 저하로 이어질 가능성이 높을 것으로 판단된다. 따라서 향후 세로리브 내부에 벌크헤드플레이트 부착에 의한 구조상세 변화는 전체적인 내구성 향상 측면과 국부적인 응력 상승에 의한 피로성능 저하 가능성의 2가지 측면에서의 검토가 필요할 것으로 판단된다.

6. 결 론

강바닥판 피로성능 향상을 목적으로 '구조상세부의 정적거동에 따른 고 내구성 강바닥판 개발' (경갑수 등, 2006)에서 제안된 구조상세의 세로리브 내부에 수직리브 부착 및 벌크헤드플레이트 부착의 세로리브 보강 방법이 고성능 강바닥판의 내구성 향상에 어떤 영향을 미치는가를 조사하기 위하여 2가지 세로리브 보강상세를 적용한 강바닥판을 대상으로 구조해석을 실시하고, 내구성 향상을 검토한 결과 다음과 같은 연구결과를 얻었다.

1) 세로리브 내부에 설치한 수직리브 보강 구조상세는 세로리브와 가로리브가 교차하는 위치에서의 세로리브의 면외 비틀림 및 가로리브의 면외거동을 억제하는 효과가 있는 것을 알 수 있었다. 이로부터 세로리브에의 수직리브 부착은 세로리브 및 가로리브의 피로성능을 향상시킬 수 있는 구조상세로 판단된다. 따라서 향후 강바닥판 세로리브 내부에 수직리브 부착에 의한 보강효과를 고려하여 수직리브의 면적 등과 같은 변수로 최적 형상이 연구된다면 세로리브 보강에 의한 고성능 강바닥판의 개발이 이루어질 것으로 판단된다.

2) 세로리브 내부에의 벌크헤드플레이트 부착은 벌크헤드플레이트에 의해 양쪽 가로리브가 연결되어 구조상세가 하중 전달구조로 변화되면서 각각 세로리브 및 가로리브의 평가위치에서 국부적인 응력집중이 발생한다. 그러므로 세로리브 내부에의 벌크헤드플레이트 부착은 강바닥판의 피로 내구성 저하로 이어질 가능성이 높을 것으로 판단된다. 따라서 향후 세로리브 내부에 벌크헤드플레이트 부착에 의한 구조상세 변화는 전체적인 내구성 향상 측면과 국부적인 응력 상승에 의한 피로성능 저하 가능성의 2가지 측면에서의 검토가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업 및 BK21 WIS 사업팀 연구결과로 이루어진 것으로 관계자 여러분께 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (2005) 도로교 설계기준.
- 공병승, 배두병, 김진만 (2003) 강바닥판교의 종리브 형상 개선을 위한 피로실험 및 수치해석 연구, 한국강구조학회 학

- 술발표회논문집, pp.101~118.
- 공병승, 배두병** (2004a) 강바닥판교의 종리브-횡리브 교차연결 상세변화에 따른 최적설계방안의 수치해석 연구, 한국전산구조공학회논문집, 17(3), pp.333~340.
- 공병승, 배두병** (2004b) 횡리브 형상변화를 통한 강바닥판교의 피로강도 향상 방안 연구, 대한토목학회 학술발표회논문집, pp.29~34.
- 경갑수, 신동호, 김교훈** (2006) 구조상세부의 피로거동을 고려한 고성능 강바닥판 개발에 관한 해석적 연구, 한국강구조학회논문집, 18(4), pp.417~426.
- 김우중, 이종관, 강신오, 안기업** (2004) 부산신항 진입교량(녹산대교)의 계획 및 설계, 한국강구조학회 학술발표회논문집, pp.417~426.
- 배두병, 최준호, 조용우** (2003) U리브 내부 다이어프램의 최적 상세를 위한 해석적 연구, 한국강구조학회 학술발표회논문집, pp.244~249.
- 전진수, 이기장, 최준호, 배두병** (2001) U리브를 이용한 강바닥판의 최적상세에 관한 해석적 연구, 대한토목학회 학술발표회논문집, pp.1~4.
- 전진수, 이기장, 최준호, 배두병** (2002a) 강바닥판 최적상세에 관한 해석적 연구, 한국강구조학회 학술발표회논문집, pp.87~92.
- 전진수, 배두병, 오순택, 공병승, 최준호** (2002b) 내부 다이어프램이 설치된 강바닥판교 3차원 실물 모형체의 피로강도, 대한토목학회 학술발표회논문집 pp.1~4.
- 조재병** (1995) 계산에 의한 강구조의 단계별 피로수명 추정법, 한국강구조학회논문집, 7(3), pp.231~239.
- Hibbitt, Karlsson, Sorensen Inc.** (2004) ABAQUS/Standard User's Manual. ver 6.4.
- IIW** (1993) Recommendations concerning stress determination for fatigue analysis of welded components
- Tsakopoulos, P.A., Fisher, J.W.** (2005) Fatigue Performance and Design Refinements of Steel Orthotropic Deck Panels Based on Full-Scale Laboratory Tests, *Steel Structure, Int. Jour. of Steel Structures*, 5(3), pp.211~223.
- 館石和雄** (1994) 鋼橋部材の局部変形による疲勞に関する研究, 博士學位論文, 東京工業大學, p.170.