

보강상세 적용에 따른 강바닥판 피로강도 향상에 관한 해석적 연구

Analytical Study on the Improvement of Fatigue Strength for the Orthotropic Steel Decks with Reinforced Structural Details

경갑수* · 박경진** · 김교훈*** · 박혜연****

Kyung Kab Soo · Park Kyung Jin · Kin Kyo Hoon · Park Hye Yeon

ABSTRACT

In order to reduce the resultant stress of the connection detail of longitudinal rib and floor beam, in this study, the parameter studies for the reinforcement details as the bulk head plate and the vertical rib were performed with FE analysis. As the result, it was shown that the reinforcement detail with the bulk head plate in longitudinal rib reduced generally the principal stress at the connection detail, but the stress concentration of the weld toe parts occurring fatigue crack increased. However, it was known that the reinforcement detail with the vertical rib in the rib is more effective than the bulk head plate because of the reduction of stress concentration in the weld toe parts.

Keywords : Longitudinal rib, Bulk head plate, Vertical rib, Reinforcement details.

1. 서론

강바닥판 교량의 가벼운 중량과 품질의 신뢰성, 공기단축 등의 장점으로 그 사용량이 증가하고 있으나, 비교적 얇은 강판을 복잡한 형상으로 용접하여 조립함에 따라 용접 결함, 잔류응력, 면내 및 면외 변형의 발생 등이 열화현상의 원인으로 지적되고 있으며, 이로 인한 피로균열 손상사례가 증가하고 있는 것으로 보고되고 있다(최준혁, 1999). 이러한 열화현상 가운데 피로균열의 억제 방안 및 피로강도향상을 위한 가장 기본적인 확실한 대책으로는 대상 구조상세의 강판 두께를 증가시키는 방안이 있으나, 이는 전체적인 강재증량으로 이어져 추가적인 검토가 필요하게 된다. 이 때문에 강바닥판의 피로강도 향상방안으로는 일반적으로 피로에 취약한 구조 상세를 개선하는 것이 주로 검토되고 있다. 예를 들어, 강바닥판의 피로손상사례가 가장 많은 세로리브 및 가로리브의 교차부의 기하학적 형상의 개선을 포함하여 강바닥판의 세로리브의 변형 억제 및 하중분배 등의 효과를 목적으로 세로리브 내부에 벌크헤드 플레이트나 보강리브를 설치하는 것 등을 고려할 수 있다.

이러한 것을 고려하여 본 연구에서는 본 연구의 선행연구(경갑수, 신동호 2006)에서 제시된 고내구성 강바닥판 구조상세를 대상으로 세로리브의 보강효과에 의한 피로강도 향상 효과를 검토하기 위하여 세로리브 내부에 벌크헤드 플레이트 및 보강리브의 설치에 따른 피로거동을 보강상세의 다양한 기하학적 형상을 매개변수로 하는 구조해석에 기초한 평가로부터 보강효과가 우수한 강바닥판 보강상세를 제시하고자 한다.

* 정회원 · 한국해양대학교 토목공학과 교수 Email: kyun한@hhu.ac.kr

** 동호엔지니어링 사원(연구 당시 한국해양대학교 토목공학과 석사과정) Email: pkj315@naver.com

*** 신성엔지니어링 상무 Email: yeye2002@hanmail.net

**** 한국해양대학교 토목공학과 석사과정 Email: sweetbox0808@naver.com

2. 강바닥판 세로리브 내부 보강상세 매개변수 해석

2.1 대상 교량

대상 교량은 그림 1과 같이 전체 4경간(4@95=380m)으로 구성된 N교를 대상으로 선정하였으며, 교폭은 25.6m, 가로보의 간격은 전 경간에 걸쳐서 5m, 주형내부의 가로리브는 2.5m로 구분되어 있다. 교량 총 연장 중 대상위치는 3개의 세로리브와 3개의 가로리브를 갖는 소블럭을 대상으로 하였으며, 세로리브 상세는 '구조상세부의 정적거동에 따른 고내구성 강바닥판 개발(경갑수, 2006)'에서 제안된 구조상세를 적용하였다.

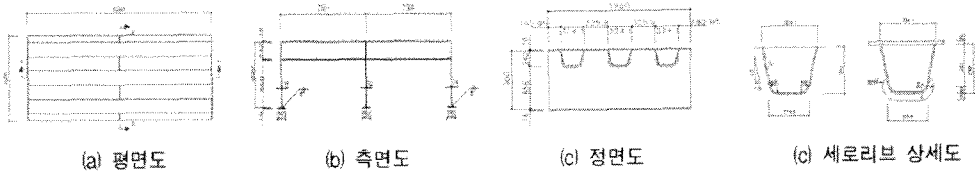


그림 1. 구조해석 대상의 소블럭 형상과 세로리브 상세도

2.2 구조해석 모델링

모델링은 실무구조물을 가장 근사적으로 묘사할 수 있는 3차원 모델을 사용하였으며, 범용 유한요소해석 프로그램인 LUSAS 13-7을 적용하였다. 해석에서는 Element를 QSI4 및 TS3 요소를 사용하여 모델링하였으며, 탄성계수는 210GPa, 포아송비는 0.3 (도로교설계기준, 2005)을 적용하여 구조해석을 수행하였다. 해석에서 하중재하 면적은 도로교 표준시방서(2005)의 DB-24 트럭하중에 의한 차륜 접촉면적(접지면 580mm×230mm)을 사용하여 그림 2와 설계축하중 96kN을 18가지 재하조건으로 하여 구조해석을 수행하였다. 해석결과와 응력 평가는 그림 3에 나타낸 것과 같이 피로 균열이 많이 발생하고 있는 세로리브·가로리브 교차부 및 세로리브측, 가로리브측의 슬릿부에 대해 실시하였다. 또한 피로평가에서는 그림 2의 하중재하에서 나타낸 가장 가혹한 하중 재하조건에서의 응력범위 및 실제 교량에서 발생할 수 있는 모든 가능한 하중 조건하의 응력을 고려하기 위하여 주

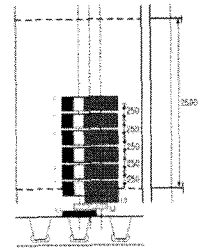


그림 2. 하중재하도

응력범위(최대주응력 포락선 - 최소주응력 포락선)에 대한 포락선을 사용하였다(Suganuma, 2005).

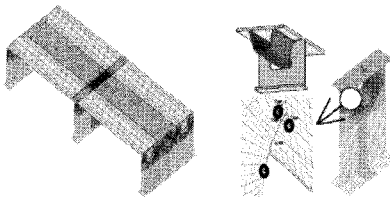


그림 3. 전체모델링 및 관측대상 위치

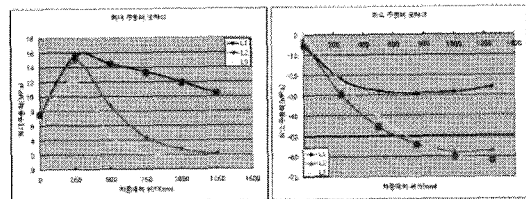


그림 4. 주응력 포락선 정의

3. 매개변수에 따른 구조해석결과 및 분석

3.1 벌크헤드 형상에 따른 대상 구조상세의 거동분석

그림 5와 같이 세로리브의 무보강 상세 및 직선, 곡선 벌크헤드의 3가지 경우에 따른 구조해석 결과를 표 1 및 그림 6에 나타내었다. 이로부터 보강상세의 세로리브측 및 세로리브와 가로리브 연결부의 주응력범위는

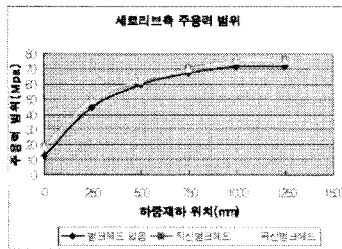
하중이 직접 재하 되는 0mm재하위치에서 무보강상세의 1.45~1.31배의 응력 증가를 보이고 있으나, 가로리브측 슬릿부에서는 무보강상세보다 최대 약 8% 정도 감소하는 경향을 알 수 있다. 또한 직선형 보보다는 곡선형 벌크헤드 플레이트가 미소한 차이이나 작은 응력 값을 보이고 있는데, 이것은 곡선형 벌크헤드 플레이트가 지단부에서 힘의 방향을 원활하게 전달하여 응력 분포가 원활하게 이루어지기 때문으로 판단된다. 이상의 결과로부터 무보강상세 및 보강상세의 주응력 범위값의 변화 경향이 평가위치에 따라 다른 결과를 나타내나, 피로균열은 주응력이 가장 큰 값에 의존하므로 발새응력 범위가 큰 가로리브 측에서의 응력감소가 있는 벌크헤드 플레이트에 의한 세로리브 보강은 강바닥판의 피로강도를 향상시킬 것으로 판단된다.



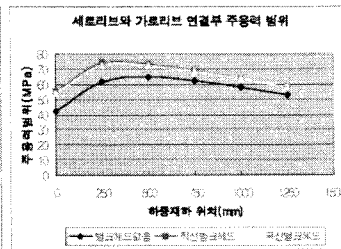
(a) 곡선 (b) 직선 (c) 무 보강
그림 5. 세로리브 보강상세

표 1. 주응력 범위(MPa)

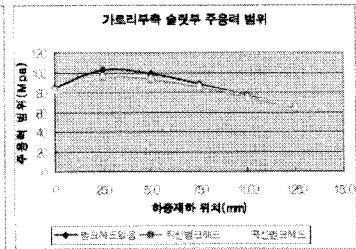
(a) 세로리브측				(b) 세로리브와 가로리브 연결부				(c) 가로리브측 슬릿부			
거리 (mm)	무 보강	직선 벌크헤드	곡선 벌크헤드	거리 (mm)	무 보강	직선 벌크헤드	곡선 벌크헤드	거리 (mm)	무 보강	직선 벌크헤드	곡선 벌크헤드
0	12.9 (1.00)	18.7 (1.45)	18.1 (1.40)	0	42.5 (1.00)	55.6 (1.31)	53.9 (1.27)	0	84.1 (1.00)	82.9 (0.98)	82.9 (0.99)
250	45.0 (1.00)	49.4 (1.10)	49.1 (1.10)	250	61.6(1.00)	74.3 (1.21)	72.5 (1.18)	250	103.0 (1.00)	95.6 (0.93)	97.4 (0.95)
500	59.9 (1.00)	62.0 (1.04)	62.2 (1.04)	500	65.0 (1.00)	73.4 (1.13)	72.2 (1.11)	500	98.7 (1.00)	93.4 (0.95)	94.8 (0.96)
750	67.2 (1.00)	70.3 (1.05)	70.2 (1.05)	750	62.4 (1.00)	69.3 (1.11)	68.5 (1.10)	750	88.2 (1.00)	85.2 (0.97)	86.3 (0.98)
1000	71.7 (1.00)	75.9 (1.06)	75.6 (1.05)	1000	57.8 (1.00)	63.8 (1.10)	63.4 (1.10)	1000	76.5 (1.00)	75.2 (0.98)	75.9 (0.99)
1250	71.7 (1.00)	76.1 (1.06)	75.7 (1.06)	1250	53.1 (1.00)	57.9 (1.09)	57.7 (1.09)	1250	64.5 (1.00)	63.4 (0.98)	64.8 (1.00)



(a) 세로리브측



(b) 세로리브와 가로리브 연결부



(c) 가로리브측 슬릿부

그림 6. 주응력 범위(MPa)

3.2 곡선벌크헤드 부착에 따른 대상 구조상세의 거동분석

3.1절을 참조로 곡선벌크플레이트 부착위치에 따른 그림 7과 같은 3가지 부착위치를 변수로 한 구조해석 결과를 표 2 및 그림 8에 나타내었다. 해석 결과는 주응력변화는 세로리브 측에서 가장 큰 변화를 보이고 있는데, 벌크헤드 플레이트를 슬릿부 아래쪽에 연결한 부착위치 1, 3의 경우가 슬릿부 에 연결한 부착위치2 보다 작은 주응력 범위를 나타내고 있다. 또한 부착 위치 1, 3 의 경우는 거의 같은 값을 보이고 있으나, 부착위치 1번 상세가 강성 증가로 인한 다소 작은 주응력 범위를 나타내고 있다. 세리리브와 가로리브 연결부에서는 부착위치 1을 기준으로 부착위치 2번 상세는 주응력 범위가 증가하나 부착위치 3번 상세는 주응력 범위가 작지만 감소하는 것으로 나타났다. 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. 이로부터 벌크플레이트 설치에 의한 구조상세는 위치 1에 설치하는 것이 가장 효율적인 것으로 판단된다.



(a) 위치1 (b) 위치2 (c) 위치3
그림 7 부착위치 형상

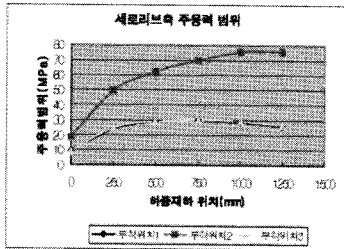
표 2 주응력 범위(MPa)

(a) 세로리브측

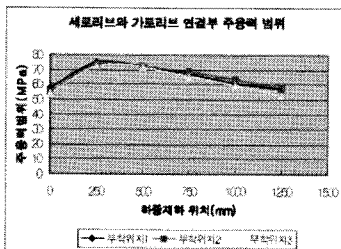
(b) 세로리브와 가로리브 연결부

(c) 가로리브측 슬릿부

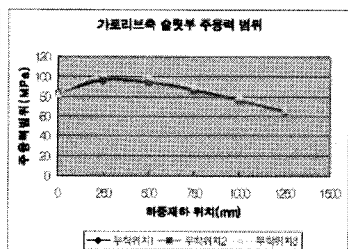
거리 (mm)	부착위치1	부착위치2	부착위치3	거리 (mm)	부착위치1	부착위치2	부착위치3	거리 (mm)	부착위치1	부착위치2	부착위치3
0	9.6 (1.00)	18.4 (1.91)	8.9 (0.93)	0	57.3 (1.00)	54.6 (0.95)	53.8 (0.94)	0	8.3 (1.00)	8.3 (1.00)	8.3 (1.00)
250	24.4 (1.00)	49.3 (2.02)	24.8 (1.02)	250	75.0 (1.00)	73.3 (0.98)	72.2 (0.96)	250	9.6 (1.00)	9.7 (1.00)	10.2 (1.07)
500	29.0 (1.00)	62.1 (2.14)	29.5 (1.02)	500	72.5 (1.00)	72.6 (1.00)	71.7 (0.99)	500	9.4 (1.00)	9.4 (1.00)	10.0 (1.06)
750	29.7 (1.00)	70.1 (2.36)	30.1 (1.01)	750	67.2 (1.00)	68.8 (1.02)	65.5 (0.97)	750	8.6 (1.00)	8.6 (1.00)	9.0 (1.05)
1000	28.7 (1.00)	75.4 (2.63)	29.1 (1.01)	1000	60.7 (1.00)	63.5 (1.05)	59.5 (0.98)	1000	7.6 (1.00)	7.6 (0.99)	7.9 (1.04)
1250	26.2 (1.00)	75.6 (2.88)	26.6 (1.02)	1250	57.2 (1.00)	57.7 (1.01)	52.4 (0.92)	1250	6.5 (1.00)	6.5 (0.99)	6.7 (1.04)



(a) 세로리브측



(b) 세로리브와 가로리브 연결부



(c) 가로리브측 슬릿부

그림 8 주응력 범위(MPa)

3.3 수직리브 크기에 따른 대상 구조상세의 거동분석

세로리브 내에 수직리브 부착위치에 따른 주응력 범위를 검토하고자 그림 9와 같은 3가지 변수에 대한 구조해석 결과를 표 3 및 그림 10에 나타내었다. 해석결과, 보강세로리브 폭이 클수록 세로리브측에서 하중이 직접 재하되는 0mm에서 가장 큰 응력 감소가 나타나 크기는 40%, 작게는 20%까지 응력이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 수직리브의 적절한 강성이 하중재하시 면내 및 면외의 변형에 대한 저항능력에 의해 응력 감소에 효과적이라고 판단된다. 그러나 세로리브·가로리브 연결부 및 가로리브측 슬릿부 부분에서는 크기 변화에 따른 주응력 범위가 거의 같거나 미소한 차이를 보이고 있어 크기 변화에 따른 영향을 다소 적게 받는다고 판단된다. 이로부터 수직리브 폭 크기 50mm가 가장 적합한 상세로 판단할 수 있다.



(a) 30mm (b) 50mm (c) 70mm

그림 9 수직리브 폭 크기 변화

3.4 수직리브 부착위치에 따른 대상 구조상세의 거동분석

3.3절에서 도출한 수직리브 폭 크기 50mm에 대해 그림 11과 같은 3가지 부착위치를 변수로 한 구조해석 결과를 표 4 및 그림 10에 나타내었다. 해석 결과 세로리브측에서 부착위치 1, 3번 상세보다 부착위치 2번 상세의 응력이 2~2.5배 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 앞서 기술한 벌크헤드 상세의 결과와 마찬가지로 가로리브 스키텔과 일치하는 것보다는 아랫방향으로 설치하는 것이 가로리브의 뒤틀림에 의한 변형을 구속하므로 낮은 주응력 범위를 나타내는 것으로 판단된다. 세로리브와 가로리브 연결부 및 가로리브측 슬릿부 주응력 범위는 3가지 부착위치에 대해 모두 거의 같은 값을 나타내고 있다.

3.5 강바닥판 최적 보강상세를 위한 대상 구조상세의 비교·분석

앞 절에서 얻어진 결과에 기초하여 그림 13에 나타난 무보강상세, 폭선벌크헤드 및 수직리브의 보강상세에 대한 결과를 표 5 및 그림 14에서 나타내었다. 발생응력범위가 큰 가로리브측에서는 보강상세가 무보



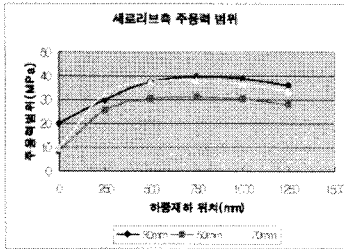
(a) 무 보강 (b) 폭선벌크 (c) 수직리브

그림 13 수직리브 보강상세 형상

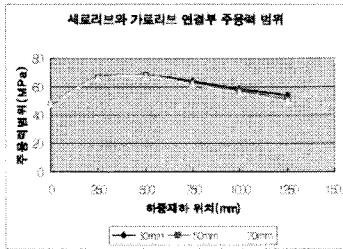
보강상세에 비하여 3%정도 감소하며, 세로리브측에서 보강상세 있는 경우가 40~50% 응력 감소를 보이고 있으나, 말새응력범위가 다른 평가위치에 비하여 작은 경향을 나타내는 세로리브와 가로리브 연결부에서는 약간 증가하는 경향을 보이고 있다. 이상의 결과로부터 전체적인 구조해석 결과, 보강상세 있는 경우가 더 효율적이며, 또 밀폐형인 벌크헤드플레이트 보강상세가 개방형인 수직리브보다 많은 응력 증가를 보이고 있어 보강상세로는 수직리브상세가 효율적일 것으로 판단된다.

표 3 주응력 범위(MPa)

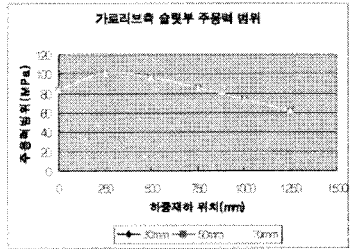
거리 (mm)	(a) 세로리브측			(b) 세로리브와 가로리브 연결부			(c) 가로리브측 슬릿부				
	30mm	50mm	70mm	거리 (mm)	30mm	50mm	70mm	거리 (mm)	30mm	50mm	70mm
0	19.9 (1.00)	8.4 (0.42)	9.7 (0.49)	0	46.8 (1.00)	47.7 (1.02)	48.0 (1.03)	0	83.6 (1.00)	83.5 (1.00)	83.5 (1.00)
250	30.1 (1.00)	25.6 (0.85)	32.6 (1.08)	250	66.0 (1.00)	66.4 (1.01)	66.2 (1.00)	250	101.4 (1.00)	101.1 (1.00)	101.1 (1.00)
500	37.7 (1.00)	30.4 (0.81)	37.8 (1.00)	500	68.2 (1.00)	67.6 (0.99)	67.0 (0.98)	500	96.7 (1.00)	96.5 (1.00)	96.4 (1.00)
750	39.5 (1.00)	31.4 (0.79)	38.2 (0.97)	750	64.1 (1.00)	62.7 (0.98)	61.8 (0.96)	750	86.0 (1.00)	85.8 (1.00)	85.7 (1.00)
1000	38.8 (1.00)	30.5 (0.79)	36.9 (0.95)	1000	58.4 (1.00)	57.0 (0.98)	56.0 (0.96)	1000	74.1 (1.00)	73.9 (1.00)	73.8 (1.00)
1250	36.0 (1.00)	28.1 (0.78)	33.8 (0.94)	1250	53.9 (1.00)	51.2 (0.95)	50.0 (0.93)	1250	62.1 (1.00)	61.9 (1.00)	61.8 (1.00)



(a) 세로리브측



(b) 세로리브와 가로리브 연결부

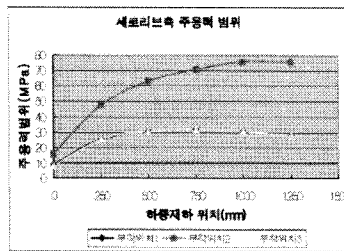


(c) 가로리브측 슬릿부

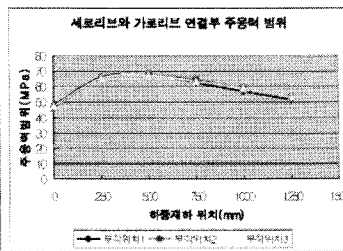
그림 10 주응력 범위(MPa)

표 4 주응력 범위(MPa)

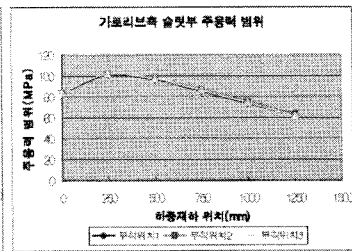
거리 (mm)	(a) 세로리브측			(b) 세로리브와 가로리브 연결부			(c) 가로리브측 슬릿부				
	부착위치1	부착위치2	부착위치3	거리 (mm)	부착위치1	부착위치2	부착위치3	거리 (mm)	부착위치1	부착위치2	부착위치3
0	8.4 (1.00)	15.3 (1.83)	8.1 (0.96)	0	47.7 (1.00)	46.0 (0.96)	46.9 (0.98)	0	83.5 (1.00)	83.8 (1.00)	83.9 (1.00)
250	25.6 (1.00)	47.6 (1.82)	25.5 (1.00)	250	66.4 (1.00)	65.6 (0.99)	65.8 (0.99)	250	101.1 (1.00)	101.4 (1.00)	102.2 (1.01)
500	30.4 (1.00)	63.0 (1.86)	30.4 (1.00)	500	67.6 (1.00)	68.0 (1.01)	67.6 (1.00)	500	96.5 (1.00)	97.2 (1.01)	97.4 (1.01)
750	31.4 (1.00)	70.5 (2.07)	31.4 (1.00)	750	62.7 (1.00)	64.2 (1.02)	63.3 (1.01)	750	85.8 (1.00)	86.9 (1.01)	86.4 (1.01)
1000	30.5 (1.00)	75.9 (2.25)	30.6 (1.00)	1000	57.0 (1.00)	58.8 (1.03)	58.7 (1.03)	1000	73.9 (1.00)	75.3 (1.02)	74.3 (1.01)
1250	28.1 (1.00)	75.7 (2.49)	28.2 (1.00)	1250	51.2 (1.00)	52.5 (1.03)	53.2 (1.04)	1250	61.9 (1.00)	63.6 (1.03)	62.1 (1.00)



(a) 세로리브측



(b) 세로리브와 가로리브 연결부



(c) 가로리브측 슬릿부

그림 12 주응력 범위(MPa)

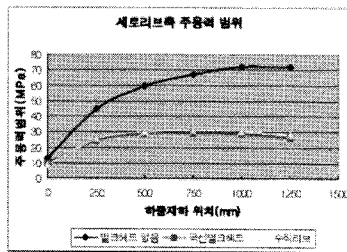
표 5 주응력 범위(MPa)

(a) 세로리브측

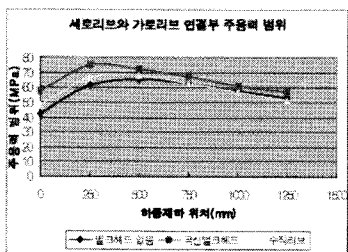
(b) 세로리브와 가로리브 연결부

(c) 가로리브측 슬릿부

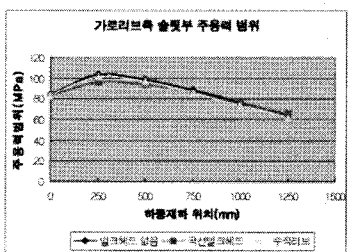
거리 (mm)	무 보강	곡선 벌크헤드	수직리브	거리 (mm)	무 보강	곡선 벌크헤드	수직리브	거리 (mm)	무 보강	곡선 벌크헤드	수직리브
0	12.9 (1.00)	9.6 (0.74)	8.4 (0.65)	0	42.5 (1.00)	57.3 (1.35)	47.7 (1.12)	0	84.1 (1.00)	83.0 (0.99)	83.5 (0.99)
250	45.0 (1.00)	24.4 (0.54)	25.6 (0.57)	250	61.6 (1.00)	75.0 (1.22)	66.4 (1.08)	250	103.0 (1.00)	95.8 (0.93)	101.1 (0.98)
500	59.9 (1.00)	29.0 (0.48)	30.4 (0.51)	500	65.0 (1.00)	72.5 (1.12)	67.6 (1.04)	500	98.7 (1.00)	94.0 (0.95)	96.5 (0.98)
750	67.2 (1.00)	29.7 (0.44)	31.4 (0.47)	750	62.4 (1.00)	67.2 (1.08)	62.7 (1.00)	750	88.2 (1.00)	86.0 (0.98)	85.8 (0.97)
1000	71.7 (1.00)	28.7 (0.40)	30.5 (0.43)	1000	57.8 (1.00)	60.7 (1.05)	57.0 (0.99)	1000	76.5 (1.00)	76.1 (0.99)	73.9 (0.97)
1250	71.7 (1.00)	26.2 (0.37)	28.1 (0.39)	1250	53.1 (1.00)	57.2 (1.08)	51.2 (0.96)	1250	64.5 (1.00)	65.1 (1.01)	61.9 (0.96)



(a) 세로리브측



(b) 세로리브와 가로리브 연결부



(c) 가로리브측 슬릿부

그림 14 주응력 범위(MPa)

5. 결 론

강바닥판의 피로강도 향상을 목적으로 세로리브에 보강구조상세를 강바닥판을 대상으로 매개변수 해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

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 비틀림력을 적절히 분배해 주는 역할을 하여 뒤틀림에 의한 피로균열을 제어하기 때문으로 판단된다.
2. 강바닥판 최적보강상세로 폭 50mm의 수직리브가 강바닥판 내력 작용력에 대해서 피로강도 향상에 보다 효율적인 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업(2004년~2007년)의 연구결과로 이루어진 것으로 이 연구를 가능하게 도와주신 관계자 여러분께 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

참고 문헌

- 건설교통부(2005), 도로교 설계기준
 건설교통부(2006), 강도로교 상세부 설계지침
 경갑수 등(2006), 구조상세부의 피로거동을 고려한 고성능 강바닥판 개발에 관한 해석적 연구, 한국강구조학회 논문집 제18권 제4호, pp.417~426
 신동호(2006), 강바닥판 구조상세부의 정적거동 및 보강상세에 관한 해석적 연구, 한국해양대학교 석사논문
 최준혁(1999), 강바닥판 구조상세부의 정적 및 피로거동, 한양대학교 박사학위논문
 Hisatada Suganuma(2005), Development of orthotropic steel deck system with high fatigue resistance, doctoral dissertation