

무한피로수명 강바닥판 시스템의 개발

배두병¹ · 오창국^{2*} · 최재윤³

¹교수, 국민대학교, 건설시스템공학부, ²교수, 국민대학교, 건설시스템공학부, ³과장, ㈜엔비코컨설턴트

Development of Fatigue Free Orthotropic Steel Deck System

Bae, Doobyong¹, Oh, Chang Kook^{2*}, Choi, Jae-Youn³

¹Professor, School of Civil & Environmental Engineering, Kookmin University, Seoul, Korea ²Professor, School of Civil & Environmental Engineering, Kookmin University, Seoul, Korea

³Manager, Structure Div., ENVICO Consultants Co. Ltd. Seoul, Korea

Abstract - This paper presents detailed research procedures and results to develop fatigue free orthotropic steel deck system. The developed system controls concentrated stresses in fatigue-vulnerable regions without changing 14mm deck thickness by installing bulkhead plates inside u-ribs at the location of transverse rib. Parametric studies on adequate number of transverse and u-ribs and boundary conditions are conducted to evaluate the suitability of finite element models. Experimental results assure the efficiencies of bulkhead plates and fatigue categories. Additional parametric studies on shapes of scallop and bulkhead plate and its initial welding locations inside u-ribs result in fatigue free deck system having nominal stresses in five fatigue-vulnerable regions less than the cut-off limits of corresponding category.

Keywords - Fatigue-free orthotropic steel deck system, Deck thickness, U-rib, Transverse rib, Scallop, Bulkhead plate, Fatigue test, Cut-off limit

1. 서 론

가로리브와 세로리브로 비교적 얇은 강판을 보강하여 교량의 바닥판으로 사용하는 직교이방성 강바닥판 교량은 콘크리트 바닥 판을 적용하는 교량에 비해 고정하중을 현저히 감소시킬 수 있다 는 장점으로, 고정하중의 영향이 큰 케이블 교량이나, 고정하중을 줄여야 하는 도개교 등에 많이 적용되고 있다. 이러한 장점에도 불 구하고 바퀴하중을 직접 지지하는 강바닥판은 세로리브와 강바닥 판용접부의 강바닥판 균열, 바닥판과 가로리브 및 세로리브 교차 용접부, 가로리브와 세로리브 용접부, 가로리브 스캘럽 단부에서 의 응력집중부 등에서의 많은 피로손상이 전 세계적으로 보고되

Copyright © 2019 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-02-910-5444 Fax. +82-02-910-4939 E-mail. ockoogi@kookmin.ac.kr 고 있다. 1997년 네덜란드의 여러 교량에서 발견된 강바닥판과 세 로리브 용접부의 강바닥판에서 발생한 피로균열은 전체 교량의 안전에 크게 영향을 줄 수 있는 피로손상이라고 볼 수 있는데, 이 피로균열은7년밖에안된도개교에서발견되어큰충격을주었으 며^[1], 유로코드에서 강바닥판 최소두께를 12mm에서 14mm로 증 가시키는 계기가 되었다. 현재 유로코드는 포장두께가 70mm이상 인경우 강바닥판 두께를 14mm이상으로, 포장두께가 40mm에서 70mm사이인 경우에는 16mm 이상의 강바닥판을 적용하도록 하 고 있다^[2]. AASHTO 또한 2012년 기준부터 강바닥판의 최소두께 를 포장의 종류 및 두께와 관계없이 5/8in.(16mm)로 규정하고 있 다^[3]. 이 논문은 기존의 수행된 강바닥판 관련 연구 결과를 고려하 여 강바닥판에 적용하는 포장의 두께 및 종류와 관계없이 바닥판 의두께를 14mm로 유지하면서 공용 중에 피로손상이 절대 발생하 지 않는 무한피로수명을 갖는 강바닥판 시스템을 개발하기 위해 수행된 연구를 요약한 것이다. 주요 내용은 피로설계트럭하중에 의해 가로리브 스캘럽 하단부, 가로리브와 세로리브 용접부, 강바 닥판과 가로리브 및 세로리브 교차용접부 등의 구조 상세에 발생 하는 응력을 각 상세에 해당하는 무한수명 피로강도 내로 제어할

Note.-Discussion open until August 31, 2019. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on December 07, 2018; revised January 11, 2019; approved on January 16, 2019.

수 있는 스캘럽 형상, 세로리브 내에 설치하는 벌크헤드 플레이트 (bulkhead plate)의 형상 및 설치방법에 대한 해석적, 실험적 연구 결과를 정리한 것이다.

2. 구조해석 모델의 구성

Fig. 1.은실제 강바닥판 교량을 참고하여 결정한 강바닥판, U리 브, 가로리브 및 주거더로 구성된 3차원 강바닥판 시스템에 대한 기본해석모델을 보여주고 있다. 해석모델은 4개의 가로리브가 3m 간격으로 배치되고 세로리브는 U리브를 5개 설치한 총 길이 9m, 폭 3.52m 이며, U리브는 8mm, 가로리브와 바닥판 가로리브 하부 플랜지는 14mm 두께의 강판을 적용하였으며, 실제 교량의 보강 거더 역할을 하도록 상대적으로 강성이 큰 주거더를 설치하였는 데상하부 플랜지로는 40mm, 웨브는 20mm 두께의 판을 적용하였 다. MIDAS CIVIL 2009 4절점 플레이트 요소를 적용하였으며^[4], 이 장에서는 해석모델의 적합성을 평가하였다.



Fig. 1. Basic model for the finite element analysis of orthotropic steel deck system

2.1 피로설계하증

도로교설계기준(한계상태설계법)⁵¹에 규정된 Fig. 2.와 같은 피 로설계트럭하중을 재하 하여 구조해석을 수행하였으며, 각각의 윤하중은 '차륜의 접지면은 각 차륜에 대해 면적이 <u>12,500</u> (mm²)인하나의 직사각형으로 간주하며 이 직사각형의 폭과 길이 의 비는 2.5:1로 정한다.'는 교량설계기준에 따라 Table 1과 같은 사각형의 분포하중으로 재하 되었다. 또한 충격계수로 15%를 적 용하였다.

	Front wheel	Mid. wheel	Rear wheel
Applied Load (P)	19.2 kN	54 kN	76.8 kN
Contact Area	103mm × 258mm	173mm × 433mm	206mm×516mm





Fig. 2. Fatigue design truck

2.2 해석모델의 검증

2.2.1 적용 윤하중의 결정

가로리브 스캘럽 하단부에 발생하는 최대주응력의 크기를 추 후 무한피로수명을 갖는 강바닥판 시스템 연구를 위한 기본모델 을 구성하는 지표로 활용하였다. 트럭 1대 전체를 재하 하는 경우 와상대적으로 하중이 큰 중륜과 후륜을 재하 하였을 때의 최대주 응력 크기를 비교하여 해석모델 및 적용 하중을 확정하였다. 전체 차량을 교축방향으로 이동시키면서 임의의 가로리브 스캘럽 하단 에 발생하는 최대주응력의 크기와 중륜 및 후륜만을 재하 했을 때 의 최대주응력의 크기를 비교한 결과가 Fig. 3.에 나타나 있다.



Fig. 3. Comparison of max. principal stresses

그림에서 보는 바와 같이 중륜만을 재하한 경우는 전체 트럭을 재하 한 경우와 거의 같은 크기의 최대주응력을 발생시키는 것으 로 나타났고, 후륜을 재하 한 경우는 1.3% 정도 작은 응력을 발생 시키는 것으로 나타났다. 이는 각 윤하중이 재하된 위치에서의 국 부적인 거동이 최대주응력의 크기를 지배한다는 것을 보여주는 것으로 이 연구에서는 피로트럭 전체를 재하하지 않고 중륜 또는 후륜을 각각 재하 한 경우에 대한 해석을 수행하고 더 큰 응력이 발 생된 경우를 무한피로수명 강바닥판 개발연구에 적용하였다.

2.2.2 가로리브의 개수

가로리브의 개수, 즉 해석모델의 교축방향 길이가 가로리브 내 최대주응력에 미치는 영향을 알아보기 위하여 3m 간격의 가로리 브 4, 7, 10개를 배치하여 길이가 각각 9m, 18m, 27m인 모델을 구 성하였다. 길이가 9m씩 증가한 이유는 일반적으로 강바닥판의 주 가로보가 4개의 가로리브 마다 배치되기 때문이다. Fig. 4.는 가로 리브 개수에 따른 최대주응력을 비교한 그래프를 보여주고 있는 데, 보는 바와 같이 그 차이가 크지 않고 4개인 경우가 가장 보수적 인 결과를 주므로 가로리브가 4개의 기본해석모델을 적용해도 문 제가 없는 것으로 보인다.



Fig. 4. Max. principal stresses with different number of cross ribs

2.2.3 U리브(세로리브)의 개수

U리브 개수에 따른 최대주응력의 변화를 살펴보기 위해 U리브 개수를 5개부터 11개 까지 2개씩 증가시킨 해석모델을 구성하여 해석결과를 비교한 결과가 Fig. 5.에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 U리브가 5개인 경우와 7개인 경우는 거의 차이가 없으 며 9개, 11개로 증가시킨 모델의 경우 주응력이 13.6%까지 감소하 는 경향을 보였다. 이는 무한피로수명을 갖는 강바닥판 시스템 연 구를 위해 U리브가 5개인 기본해석모델을 적용해도 문제가 없다 는 것을 보여준다.



Fig. 5. Max. principal stresses with different number of U-ribs

2.2.4 경계조건

케이블교량의 경우 일반적으로 강바닥판의 주 가로보 위치에 서 케이블이 설치되는데, 주거더 단부 네 곳에 힌지-롤러 조건의 경계조건을 적용하여(Fig. 6.(a)), 해석한 결과와의 차이를 평가하 기 위하여 Fig. 6.(b)와 같이 경계조건으로 케이블요소를 적용한 해 석을 수행하여 그 결과를 Fig. 6.(c)에 비교하였다. 그래프에서 보 는 바와 같이 그 차이가 거의 없어 주거더 단부 네 곳에 힌지-롤러 조건의 경계조건을 적용한 해석모델을 이용하여 무한수명 강바닥 판 시스템을 개발하는 연구를 수행하였다.

2.2.5 요약 및 소결

2장의 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 가로리브 4개를 설치하여 길이방향으로 9m, U리브 5개를 설 치하여 횡방향으로 3.52m인 유한요소해석모델을 무한피로수명 강바닥판 시스템 개발을 위한 연구에 적용한다.

 고로설계트럭하중 전체가 아닌 피로설계트럭의 중륜 또는 후륜을 적용한 해석을 수행하여 얻은 응력 중 더 큰 최대주응력을 평가에 적용한다.

3) 케이블 지지가 아닌 주거더 하단부에 힌지-롤러 조건의 경계 조건을 적용하여 해석을 수행한다.



Fig. 6. Max. principal stresses with different boundary conditions

별크헤드 플레이트의 역할 및 강바닥판의 피로강도

3.1 벌크헤드 플레이트의 효과

가로리브 위치의 U리브 안에 설치하는 벌크헤드 플레이트 (bulkhead plate)는 U리브의 뒤틀림(distortion)을 제어하여 가로리 브 스캘럽 하단부의 응력집중과 가로리브와 U리브 용접접합부의 응력을 감소시킬 수 있으나 과거에는 U리브와 벌크헤드 플레이트 사이의 용접이 어렵고 이에 따른 균열이 예상되어 널리 적용되지 는 못하였다. 그러나 용접장비 및 기술의 발달로 인해 단점을 극복 하고 장점을 활용하기 위해 벌크헤드 플레이트를 설치하려는 시 도가 있으며 Williamsburg Bridge의 강바닥판 보수 보강 시 이를 적용한 바 있다¹⁶. 이 연구에서도 무한수명 강바닥판을 개발하기 위하여 U리브 내에 벌크헤드 플레이트를 적용하고 이의 형상 및 스캘럽형상에 대한 변수연구를 통해 무한수명 강바닥판 시스템을 개발하고자 하였다. 기본해석모델의 U리브 및 스캘럽은 최근 표 준처럼 사용되고 있는 Fig. 7.(a)와 같은 단면을 갖는 상세를 적용 하였으며, Fig. 7.(b)는 벌크헤드 플레이트를 적용한 일반적인 형 상을 보여준다. 기존의 벌크헤드 플레이트는 Fig. 8.(c)의 경우와 같은 사다리꼴 형태였으나 벌크헤드 플레이트 상하부의 곡률 및

단면을 변화시키며 가로리브 스캘럽 하단부 최대주응력을 감소시 키려는 연구가 진행되었으며 Fig. 8.(f)가 벌크헤드 플레이트 유무 및 형상과 곡률변화에 따른 해석결과를 비교해서 보여주고 있다 (그림의 R₁ 및 R₂는 벌크헤드 플레이트 상하부의 곡률반경의 크기 이다.). 그림에서 보는 바와 같이 벌크헤드 플레이트가 없는 경우 에 비해 상부직선-하부곡률(R=300)의 벌크헤드 플레이트를 설치 할 경우 35% 정도의 최대주응력 감소효과가 있음을 알 수 있다 ^{[7],[8],[9],[10],[11]}.





Fig. 8. Max. principal stress with different shapes of bulkhead plate

3.2 2차원 강바닥판 정적 및 피로실험

U리브와 가로리브 1열만으로 구성된 강바닥판 시험체를 제작 하여 하중이 U리브 사이의 중앙에 위치하도록 한 정적 및 피로실 험을 수행하였다. Fig. 9.(a)는 실험 장면을 보여주고 있고 Fig. 9.(b) 는 좌측 2번째 U리브 위 바닥판에서의 해석결과인 응력 등고선을 보여주고 있다. Fig. 9.(b)에 나타난 12개 점 위치의 횡방향(교축에 수직한 방향) 응력크기를 MATLAB을 이용하여 Fig. 9.(c)에 나타 내었다. Fig. 9.(d)는 실험과 해석을 통한 횡방향 최대인장응력의 크기를 비교한 그래프이며, 해석이 약 20% 정도 큰 값을 나타냈다. (그래프의 U2-L 및 R은 두 번째 U리브 좌우측, U4-L 및 R은4번째





(a) test view

(b) stress contour







Fig. 9. Static test and the results

U리브 좌우측을 말한다.)

정적재하실험 후 같은 위치에서 반복하중을 가한 피로실험을 수행하였다. 위치에 따라 계측된 결과인 75~80MPa의 응력범위를 작용시켰을 때 4개의 위치 모두 78만회 정도의 반복횟수에서 피로 균열이 발생하였다. Fig. 10.(a)는 피로균열모습을 Fig. 10.(b)는 S-N 선도에 결과를 표시한 것이다. 이는 (가로리브 위치의 U리브 와 강바닥판 용접부가)교량설계기준에 규정된 피로상세범주 E정 도의 피로강도를 갖는다는 것을 확인해준다^{[12],[13]}.



Fig. 10. Fatigue crack and fatigue strength

U리브와강바닥판의 용접부 중 가로리브가 위치한 강바닥판에 서 가장 큰 인장응력이 발생하고 실제 이 위치에서 피로균열이 발 견되었다. 이는 U리브 사이에 바퀴하중이 재하될 때 가로리브가 고정지점 역할을 하여 바닥판 상부에 가장 큰 횡방향 인장응력이 발생하고 이로 인한 피로균열이 발생된 것으로 볼 수 있다. 이러한 피로균열의 해결방안으로는 강바닥판의 두께를 증가시키거나, 벌 크헤드 플레이트의 상부를 강바닥판 하면과 접촉시켜 바퀴하중에 대한 지지점 역할을 하게 함으로서 이 부분의 응력을 현저히 줄일 수 있을 것으로 생각되었다. Fig. 11.은 이러한 벌크헤드 플레이트

를 적용하지 않고 강바닥판의 두께를 14mm, 16mm, 18mm를 사용 한 경우와 14mm 강바닥판을 사용하고 강바닥판 하면을 벌크헤드 플레이트가 지지하도록 하여 강바닥판에서의 횡방향 인장응력의 크기를 비교한 것이다. 두께를 18mm로 증가시켰을 때, 14mm의 경우에 비해서 47%정도의 응력을 감소시킬 수 있으나 벌크헤드 플레이트 적용 시에는 피로상세 범주E의 무한수명에 대한 응력범 위(cut-off limit)보다도 작은 6.1MPa의 응력이 발생되는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과를 적용하여 이 위치에서의 무한피로수 명을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.



Fig. 11. Transversal stresses on top surface of a deck plate

3.3 3차원 강바닥판 피로실험

2차원시험체에 의한 실험으로는 가로리브의 면외 거동을 포함 한 3차원 거동에 따른 영향을 평가하기 어려우므로, 기본해석 모 델과 유사한 3차원시험체를 제작하여 피로실험을 수행하였다^[12]. 실험실 규모를 감안하여 길이 8m, 폭 3.52m, 높이 0.5m의 3차원시 험체를 제작하였는데, 0.65m간격으로 표준형 U리브 5개를, 2.5m 간격으로 0.5m 높이의 가로보를 배치하였다. U리브는 8mm 강판 으로 제작되었고 그 외의 모든 부재는 14mm 두께로 제작되었다. 또한 벌크헤드 플레이트의 효과를 평가하기 위하여 2개의 가로보 위치의 U리브 내에는 벌크헤드 플레이트를 설치하였다. Fig. 12.(a)는시험체 및 하중재하모습을 Fig. 12.(b)는 해석모델 및 벌크 헤드 플레이트 설치위치를 보여주고 있다.

피로실험은 하중범위 50~1000kN으로 설정하여 피로실험을 수 행하였으며 예상과 같이 벌크헤드 플레이트가 없는 가로리브 스 캘럽 하단응력 집중부에서 60만회 정도의 하중이 반복되었을 때 피로균열이 먼저 발생하였고, 벌크헤드 플레이트를 설치한 가로 리브 스캘럽 용력집중부에서는 150만회 정도의 하중이 반복되었 을 때 피로균열이 발생하였다. Fig. 13.(a)와(b)는 벌크헤드 플레이 트가 설치되지 않은 2번째 가로리브 (CB2)와 벌크헤드 플레이트

48 한국강구조학회 논문집 제31권 제1호(통권 제158호) 2019년 2월

가 설치된 3번째 가로리브 (CB3)의 스캘럽 하단 응력집중부에서 발생한 피로균열을 각각 보여주고 있다. Fig. 13.(c)는 S-N 선도의 그 위치에서 계측된 작용 응력범위와 균열이 일어난 반복횟수를 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 스캘럽 하단 응력집중부 는 피로상세범주 B를 적용하여 피로검토를 해야 할 것으로 생각된 다^[14](AASHTO(2012) 기준도 응력이 집중되는 작업구멍의 표면 모재부를 피로상세범주 B로 규정하고 있다).



(a) 3D test specimen



Fig. 12. Test specimen and analytical model

3.4 무한수명 피로상세의 개발

강바닥판 구조에서 피로균열이 발생할 가능성이 있는 용접부 및 응력집중부 다섯 곳을 선정하여 그 위치에서 발생하는 공칭응 력이 해당 상세의 무한수명 공칭피로강도 보다 작도록 스켈럽 형 상, 벌크헤드플레이트의 형상 및 접합부 위치 등을 조정하는 변수 해석연구가 수행되었다. 2장에서 결정된 3차원 해석모델을 기본 으로 하고 가로보 위치 ሀ리브 내에 Fig. 8.(e) Case8의 벌크헤드플 레이트를 포함한 해석모델을 구성하여 변수해석에 이용하였으며, 각 상세마다 최대주응력(인장)이 발생하는 하중재하위치가 다르 므로 중륜 또는 후륜하중을 위치를 이동해가며 재하 한 해석을 수 행하고 가장 크게 발생된 응력을 피로검토에 적용하였다.





108

10⁹

Fig. 13. Cracks and fatigue strength of the scallop

3.4.1 피로검토위치 및 공칭응력 산정방법

10⁶

10 105

강바닥판시스템에서 피로에 취약한 부분 5개의 위치를 Fig. 14. 에 나타내 표시하였으며, 이 위치에 대한 설명 및 해당하는 피로상 세범주와 무한수명 공칭피로강도를 Table 2에 정리하였다. 피로 검토를 위한 용접부 공칭응력을 용접지단에서 0.5t와 1.5t 떨어진

Table 2. Descriptions of f	atigue vulnerable regions
----------------------------	---------------------------

Location	Descriptions	Cut-off limit (MPa)
1	Intersection of three welds (deck, U-rib, transverse rib)	15.5
2	Fillet weld between U-rib wall and transverse rib wall	34.5
3	Stress concentration point in scallop	55
4	Fillet weld between U-rib wall and bulkhead plate	34.5
5	Stress concentration point in bulkhead plate	55

위치의 응력을 적용하여 외삽법(extrapolation)으로 결정하는 방 법이 교량설계기준(한계상태설계법, 케이블교량편)[15]에 규정되 어 있으나, 이와 다른 형태의 용접부 및 응력이 집중되는 모재부에 대한 공칭응력 산정법은 명확히 규정되어 있지 않다. 이 연구에서 는용접부 또는 모재 끝단에서부터 주응력에 수직방향으로 두께 t 만큼 떨어진 위치까지의 응력을 평균한 값을 공칭응력으로 사용 하였다(Fig. 15.).



Fig. 14. Fatigue problem spots in an orthotropic steel deck



Fig. 15. Estimation of nominal stresses

3.4.2 가로리브 스캘럽 형상

가로리브 스캘럽 하단 응력집중부의 피로상세범주는 B이고 최 대주응력의 크기는 하부 스캘럽 형상 및 벌크헤드 플레이트의 형

상에 영향을 받는다. 기존의 스캘럽은 R20~R68 직선 형태인데 하 부곡률을 변화시키면서 해석을 수행한 결과, 하부곡률, R=150mm 일 때 가장 작은 최대주응력이 발생되는 것으로 나타났다. Fig. 16.(c)에서 보는 바와 같이 기존의 스캘럽 상세보다 약 4%정도의 최대주응력이 감소되는 것을 알 수 있다.



Fig. 16. Comparison of max. principal stress 3.4.3 벌크헤드 플레이트

3.4.1에서 설명한 피로취약부 ②, ④ 위치는 피로상세범주 C에 해당하는곳으로 우선 벌크헤드플레이트와 U리브 용접부의 위치 를 기존의 h=194mm(Fig. 17.(a))에서 10mm씩 감소시키면서 h=154mm인 경우까지 해석을 수행하였는데 Fig. 17.(b)에서 보는 바와 같이 ②번 위치의 최대주응력은 60MPa에서 8.7MPa까지 감 소되는 것으로 나타났으며, ④위치의 최대주응력은 오히려 15% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 이 해석결과에 따라 벌크헤드 플 레이트 설치 높이를 164mm로 결정하였으며, 다음은 ④위치의 최 대주응력을 감소시키기 위하여, 유럽 상세를 참고하여 Fig. 18.에 서 보는 바와 같이 세로리브에 수직한 방향으로 10mm의 직선구간 을 두고 그 다음 곡률반경 R을 가지는 벌크헤드 플레이트 형상을 고려하였다. R=150mm일 때 48MPa의 인장응력이 발생되는 것으 로 나타났는데, R=110mm까지 감소시켰을 때 C상세 무한수명 공 칭피로강도인 34.5MPa보다 작은 25.5MPa의 인장응력이 발생하 는 것으로 나타나(Fig. 19.), R=110mm의 곡률반경을 적용하였다.



(a) Initial weld location of bulkhead plate



(b) max. principal stresses due to bulkhead plate height Fig. 17. Max. principal stresses due to bulkhead plate height



Fig. 18. Shape of bulkhead plate



Fig. 19. Max. principal stresss in 4

3.4.4 제안 상세

연구결과에 따른 무한피로수명 강바닥판의 형상을 Fig. 20.에 나타내었다. U리브의 형상은 기존의 것과 같으나, 벌크헤드 플레 이트의 상면을 강바닥판에 밀착시킴으로서 가로보위치 세로보와 강바닥판 용접부의 응력을 현저히 감소시킬 수 있었고, 스캘럽 하 부곡률 및 벌크헤드 플레이트의 U리브 용접 위치를 최적화함으로 서 각 위치에서 발생하는 인장응력을 무한수명 공칭피로강도 보 다낮게 발생되도록 하였다. Fig. 21.은 기본해석모델에 위와 같은 형상을 적용한 해석모델을 이용하여 최종적으로 해석한 결과를 응력등고선(stress contour)으로 보여주고 있으며, 검토한 피로취 약부를 숫자로 함께 나타내었다. Table 3은 5개의피로취약상세부 에서 발생하는 공칭응력과 무한수명 공칭피로강도를 비교하여 나 타낸 표이다. Table 3에서 보는 바와 같이 5개 피로취약부에서 발 생하는 공칭응력이 무한수명 피로강도 보다 작아 교량의 공용기 간 내에 강바닥판의 피로손상은 발생하지 않을 것으로 생각된다.





(c) fatigue free deck



Fig. 21. Fatigue vulnerable regions and stress contours

rubie et l'offinitation barebo runge and eat off mini	Table 3.	Nominal	stress	range	and	cut-off	limit
---	----------	---------	--------	-------	-----	---------	-------

Location	Category	Cut-off limit	stress range
1	Е	15.5 MPa	6.1 MPa
2	С	34.5 MPa	8.7 MPa
3	В	55.0 MPa	52.9 MPa
4	С	34.5 MPa	25.5 MPa
5	А	82.5 MPa	60.6 MPa

4. 결 론

본 논문은 강바닥판의 두께를 14mm로 유지하면서 공용 중에 피로손상이 발생하지 않는 강바닥판 시스템을 개발하는 연구결과 를 정리한 것으로, 강바닥판의 5개 피로취약부(가로리브 위치의 강바닥판과 U리브 용접부, 가로리브나 U리브 용접부, 가로리브 스캘럽 하단 응력집중부, U리브와 벌크헤드 플레이트 용접부, 벌 크헤드 플레이트 하단 응력집중부)에서 발생하는 공칭응력범위 를 해당하는 상세의 무한수명 공칭피로강도 내로 제어할 수 있는 강바닥판 시스템 개발을 위한 해석적 실험적 연구를 정리한 것으 로 주요 내용은 다음과 같다.

(1) 가로리브 및 U리브의 개수, 경계조건을 변수로 한 해석을수 행한 결과를 바탕으로 2개의 주거더, 4개의 가로리브 및 5개의 U 리브로 구성된 길이 9m, 폭 3.52m인 기본해석모델을 구성하였으 며, 주거더 하단 네 곳에 힌지 및 롤러 조건의 경계조건을 적용하여 해석연구를 수행하였다.

(2) 2차원 강바닥판 시험체를 제작하여 피로실험을 수행한 결 과 가로리브 위치의 강바닥판과 U리브 웨브용접부에서 큰 인장응 력이 발생되는 것을 확인하였으며, 피로상세범주는 E로 확인되었 다.

(3) U리브의 뒤틀림(distortion)을 제어할 목적의 벌크헤드 플레 이트의 형상을 변화시켜 해석한 결과를 바탕으로 최소의 최대주 응력이 발생하는 상세를 결정하였으며 벌크헤드 플레이트 상면을 강바닥판 상면에 접촉시키게 함으로서 (2)에 언급된 위치의 응력 을 무한수명 공칭피로강도 보다 낮출 수 있음을 해석을 통해 확인 하였다.

(4) 3차원강바닥판피로실험을 통해 U리브 내에 설치된 벌크헤 드 플레이트의 효과를 확인하였으며, 가로리브 스캘럽 하단 응력 집중부는 모재부임에도 불구하고 피로상세범주 B를 적용해야 하 는 것으로 나타났다.

(5) 가로리브스캘럽 형상, U리브 내에 설치하는 벌크헤드 플레 이트의 형상 및 용접위치 등을 변수로 한 해석을 수행하여 각 피로

취약부에서 발생하는 공칭인장응력이 해당하는 상세의 무한수명 공칭피로강도 보다 작도록 조정한 무한피로수명 강바닥판 시스템 을 개발하여 제시하였다.

참고문헌(References)

- Kolstein, H., and Wardenier, J. (1998) A New Type of Fatigue Failures in Steel Orthotropic Bridge Decks, *Proceedings of 5th Pacific Structural Steel Conference*, PSSCA, Korea, pp.483-488.
- [2] European Committee for Standardization (2006) Eurocode
 3: Design of Steel Structure, Part 2: Steel Bridges (EN 1993-2: 2006), Belgium.
- [3] American Association of State Highway and Transportation Officials (2012) AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, USA.
- [4] Midas IT (2009) *Midas Civil 2009*, Midas Information Technology, Co. Ltd., Korea.
- [5] 국토해양부(2012) 도로교설계기준(한계상태설계법).
 Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2012)
 Highway Bridge Design Standard (Limit State Design),
 Korea (in Korean).
- [6] Kaczinski, M.R., Stokes, F.E., Lugger, P.L., and Fisher, J.W. (1997) Williamsburg Bridge: Orthotropic Deck Fatigue Test, ATLSS Report No.97-04, ATLSS Engineering Research Center at Lehigh University, USA.
- [7] 배두병, 공병승, 오순택(2002) 강바닥판쿄의 설계 및 시공성 향상방안 연구, 최종보고서, 삼성중공업주식회사.
 Bae, D, Kong, B.S., and Oh, S.T. (2002) A Study on Improvement of the Design and the Constructibility of Orthotropic Steel Deck Bridge: The Final Report, Samsung Heavy Industries Co., Ltd., Korea (in Korean).
- [8] 배두병, 공병승, 오순택(2006) 완도대교 강바닥판의 횡리브 스캘럽 형상 및 케이블 정착부의 피로강도 개선 연구, 최종보고 서, 삼성물산 건설부문.

Bae, D., Kong, B.S., and Oh, S.T. (2006) A Study on Im-

provement of Fatigue Strength in Scallop of Cross-Rib and Cable Anchorage of New Wando Bridge: The Final Report, Samsung C&T Corporation, Korea (in Korean).

- [9] 조용우(2003) 강바닥판교의 최적시스템을 위한 해석적 연구, 석사학위논문, 국민대학교
 Cho, Y. (2003) Analytical Study on Optimal System for Orthotropic Steel Deck Bridges, Master's Thesis, Kookmin
- University, Korea (in Korean). [10] 도흥섭(2010) 초장대교량의 직교이방성 강바닥판의 최적 상 세에 관한 실험 및 해석적 연구, 석사학위논문, 국민대학교. Do, H. (2010) Analytical and Experimental Studies on Optimal Details of Orthotropic Steel Decks for Long Span Bridges, Master's Thesis, Kookmin University, Korea (in Korean).
- [11] Oh, C.-K., Hong, K.-J., and Bae, D. (2011) Analytical and Experimental Studies on Optimal Details of Orthotropic Steel Decks for Long Span Bridges, *International Journal* of Steel Structures, KSSC, Vol.11, No.2, pp.227-234.
- [12] 최재윤(2012) 무한피로수명을 가지는 최적 강바닥판 시스템 개발, 석사학위논문, 국민대학교.
 Choi, J.-Y. (2012) Development of Optimal Steel Deck System with Fatigue-Free Life, Master's Thesis, Kookmin University, Korea (in Korean).
- [13] Oh, C.-K., and Bae, D. (2013) Fatigue Test of an Advanced Orthotropic Steel Deck System Using High Performance Steel for Bridges, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.13, No.1, pp.93-101.
- [14] Oh, C.-K., and Bae, D. (2014) Proposed Revisions to Fatigue Provisions of Orhotropic Steel Deck Systems for Long Span Bridges, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.14, No.4, pp.811-819.
- [15] 국토교통부(2015) 도로교설계기준(한계상태 설계법, 케이블 교량편).

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2015) Highway Bridge Design Standard (Limit State Design): Cable-Supported Bridge, Korea (in Korean).

9. 약: 이 논문은 무한피로수명을 갖는 강바닥판 시스템을 개발하기 위한 연구 과정 및 내용을 정리한 것이다. 강바닥판의 두께를 14mm로 유지하면서 가로리브 위치의 U리브 내에 벌크헤드 플레이트를 설치하여 피로취약부의 응력을 제어하도록 하였다. 기본해석 모델을 구성하고 가로리브 및 U리브 개수, 경계조건 등을 변수로 한 해석을 통해 이 연구에 적용할 해석모델의 적합성을 검증하였다. 실험을 통해 벌크헤드 플레이트의 효과를 확인하였으며, 피로취약부의 피로상세범주를 확인하였다. 가로리브 스캘럽 형상, 벌크헤드 플레이트의 형상 및 U리브 내의 용접위치 등을 변수로 한 해석을 수행하여 피로설계하중에 대해 강바닥판 시스템의 다섯 피로취약부 에서 발생하는 공칭응력이 각 상세에 해당하는 무한수명 공칭피로강도 보다 작게 발생하는 강바닥판 시스템을 개발하여 제시하였다.
 핵심용어: 무한피로수명 강바닥판, 강바닥판의 두께, U리브, 가로리브, 스캘럽, 벌크헤드 플레이트, 피로실험, 무한수명 공칭피로강도