

구조 상세부의 피로거동을 고려한 고성능 강바닥판 개발에 관한 해석적 연구

Analytical Study on the Development of High-Performance
Orthotropic Steel Deck considered the Fatigue Behaviors of Structural Details

경 갑 수¹⁾ · 신 동 호²⁾ · 김 교 훈³⁾
Kyung, Kab Soo · Shin, Dong Ho · Kim, Kyo Hoon

요 약 : 최근에 강바닥판 교량에서 여러 가지 피로손상이 보고되고 있는데, 이들 대부분의 피로 손상은 운하중의 직접 재하에 의한 강바닥판의 복잡한 구조거동에 기인한다. 따라서 본 연구에서는 강바닥판교의 세로리브와 가로리브 용접이음부와 데크 플레이트와 세로리브 용접이음부의 피로손상원인을 구조해석에 의해 분석한 후, 피로를 고려한 구조상세를 제안하기 위해 데크 플레이트 두께, 가로리브 스킵업 상세, 가로리브 이음길이를 변수로 하는 구조해석을 수행하였다. 이들 연구결과로부터 이들 구조상세에 대한 피로거동특성을 파악하고, 피로강도가 향상된 구조상세를 제안하였다.

ABSTRACT : Various fatigue damages have been reported in orthotropic steel deck structures put upon girders. These damages are caused by complex behaviors of the deck, which is directly subjected to vehicle loads. To estimate the causes of fatigue cracks at the welded connected parts of the trough rib and the floor beam, and the trough rib and the deck plate, in orthotropic steel deck structures, FE analyses were first performed in this study. Parameter studies were carried out to suggest effective structural details that consider fatigue, in which the main parameters are the thickness of the deck plate, the shape of the connection of the trough rib and the floor beam such as the slit form, and the welding length. This study suggests that the effective structural details improved the fatigue strength and discusses the fatigue characteristic behaviors for these details.

핵심용어 : 강바닥판 교량, 세로리브, 가로리브, 데크 플레이트 두께, 슬릿 곡률, 가로리브 이음길이

KEYWORDS : Orthotropic steel deck bridge, Longitudinal rib, Floor beam, Deck plate thickness, Slit radius, Connected length of floorbeam

1. 서론

강바닥판은 철근 콘크리트 바닥판에 비해 중량이 1/2~1/3 정도밖에 되지 않기 때문에 사하중의 영향이 큰 장대교량에서 아주 유리한 구조이다. 또 제작의 거의 모든 과정이 공장에서 제작되므로 품질의 신뢰성을 높일 수 있고, 현장 조립의 간편성과 교량가설 후의 콘크리트 타설 등의 공정이 없으므로 공기를 단축시킬 수 있을 뿐 아니라 상대적으로 거더 높이를 낮게 할 수 있어 미관을 향상시키는 등의 많은 장점을 가지고 있다.

이와 같이 강바닥판은 많은 장점을 갖고 있는 구조이나 비교적 얇은 강판을 사용하고 용접에 의해 조립된 구조이므로 각

부위에서의 발생응력이 복잡하고, 용접에 의한 결함이나 변형이 생길 가능성을 내포하고 있다. 또 자동차 하중을 직접 지지하고 이들을 주구조로 전달하므로 도로교의 각 부재 가운데 피로손상이 발생하기 쉬운 부분이라고 말할 수 있다.

특히, 강바닥판 구조 중에 피로가 문제가 되는 세로리브 교차부 등의 구조상세부 응력은 대상 구조상세부의 영향선 길이가 짧기 때문에 차축 통과마다 1회의 응력변동이 발생하는 특성을 가지므로 이로 인한 높은 응력빈도의 발생이 피로손상의 주요한 하나의 원인이 된다. 또 강바닥판에서는 동일 교량 내에 동일 구조상세가 많기 때문에 피로손상이 발생하는 경우 손상범위가 광범위하게 확대될 가능성이 높다. 더구나 강바닥판은 주

1) 교신저자, 정회원, 한국해양대학교 건설·환경공학부, 부교수
(Tel. 051-410-4464, Fax. 051-403-3762, Email: kyungks@hhu.ac.kr)

2) GK 시공사업단, 사원(tlstndrua@hanmail.net)

3) 정회원, 신성엔지니어링 상무(shinheart@nate.com)

본 논문에 대한 토의를 2007년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

거더의 일부로서 사용되는 경우가 많고, 여러 부재가 복잡하게 교차하므로 보수·보강이 쉽지 않은 특성을 갖고 있다.

강바닥판에서 발생한 피로손상으로 국내의 사례로는 1993년 N교의 강바닥판 세로리브의 현장용접 이음부, S교의 세로리브와 격벽 이음부 등에서의 피로균열이 보고되고 있다. 외국의 보고로 대표적인 것으로는 영국의 Severn 교와 Wye교 등이 있으며, 일본의 경우는 일본 토목학회 및 도로협회에서 피로손상에 대한 여러 가지 사례를 보고하는 등 1980년대에 이르러 많은 국가에서 피로손상이 보고되었다(남광현 역, 2001). 또한 미국에서는 기존 장대교량의 바닥판 교체로 강바닥판 연구가 활발하게 이루어져 Fisher 등에 의한 실물 모형의 대형 피로시험이 실시된 사례가 있다(Tsakopoulos, 2005).

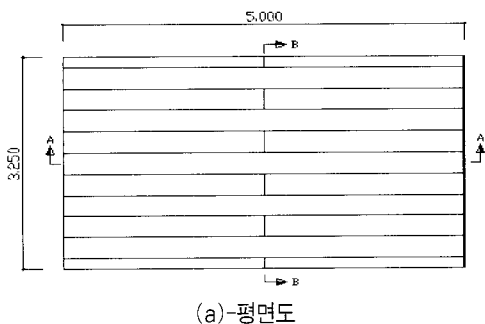
한편 현재 공용 중에 있는 교량에서도 교통량의 증가와 차량 하중의 증가로 높은 변동응력이 예상되므로 피로손상의 발생 가능성이 더욱 커질 것으로 예상된다.

이러한 강바닥판의 피로손상은 교량의 낙교까지는 아니더라도 피로균열을 방치할 경우 구조물의 강성을 저하시켜 포장의 손상뿐만 아니라, 노면 함몰 등으로 인한 평탄성의 결여 및 교량 내구성의 저하 등이 발생할 가능성이 있다. 따라서 강바닥판의 성능향상을 위해서는 피로손상의 발생 원인을 파악하고, 이에 대한 대책이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 강바닥판의 피로손상에 따른 원인 규명 및 강바닥판 구조상세의 기하학적 형상을 변수로 하는 구조해석을 실시하여 피로강도를 향상시킬 수 있는 고성능 강바닥판 시스템을 제시하고자 한다.

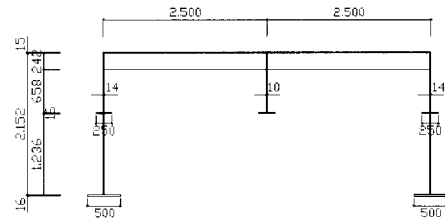
2. 구조 해석 대상 교량 및 모델링

2.1 대상 교량

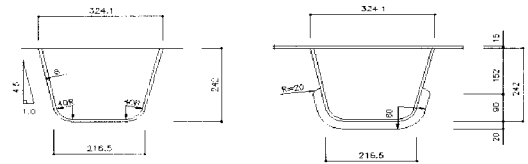
연구 대상교량은 현재 시공 중에 있는 N대교로 하였으며, 대상 구조상세는 그림 1과 같은 5개의 세로리브와 1개의 중앙 가로리브, 2개의 양쪽 끝단 가로보를 갖는 소블럭을 대상으로 하였다. 본 N대교는 기 시공된 강바닥판 교량과는 달리 강바닥판 두께가 15mm인 것이 특징이다.



(a)-평면도



(b)-측면도



(c)-세로리브 상세도

그림 1. N 대교 소블럭 형상과 세로리브 상세도

2.2 구조해석 모델링

구조해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS ver 6.5(Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc.)을 사용하였다. 구조해석 모델링은 8절점 쉘요소인 S8R요소를 메인 요소로 선택하고, 부분적으로 5절점 쉘 요소인 STR165요소를 사용하여 수행하였다. 구조해석에서의 모델링 치수는 그림 1과 같다.

해석에서 사용한 대상 구조의 강재는 SM490으로 강재의 물리상수는 도로교 설계기준에 제시된 값을 사용하여, 탄성계수는 210GPa, 포아송 비는 0.3 (도로교 설계기준, 2005)을 적용하였다. 구조모델링의 경계조건은 양단 힌지 조건이며, 모델링 형상은 그림 2와 같다.

구조해석의 모델링에서는 세로리브와 가로리브 용접이음상세가 곡률을 포함하고 있고, 또 용접에 의한 이음부를 갖게 되어 해석 결과가 요소 크기의 영향을 받을 수 있다. 이것을 고려하여 본 연구에서는 사전의 모델 요소의 검증자료에 기초하여 곡률부의 모델링은 8절점 요소를 사용하여 구성한 경우에 요소 한 변의 길이가 곡률반경의 1/10, 4절점 요소를 사용한 경우에는 1/20이하로 요소크기를 분할하면 곡률부 응력이 안정된다는(조재병, 1995) 검증자료에 기초하여, 세로리브와 가로리브가 만나는 부분의 슬릿트 곡률부분은 곡률반경의 1/10이하로 요소 크기를 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 의하면 용접부를 포함하는 구조해석을 실시하는 경우, 용접치수의 1/2정도로 요소사이즈를 분할하여야 해석 결과에 신뢰성이 있다는 보고에 기초한 것이다.

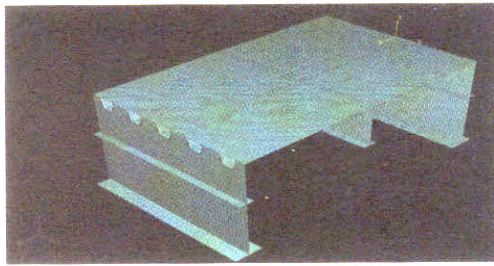


그림 2. 강바닥판 모델링 형상

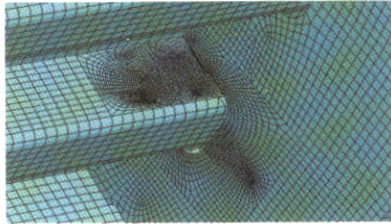


그림 3. element 분할 형상

3. 강바닥판 피로손상 특성에 따른 원인 규명

주요한 강바닥판 피로손상 개소로는 세로리브와 가로리브 용접이음부, 세로리브 맞대기 용접이음부, 세로리브와 데크 플레이트 용접이음부, 데크 플레이트의 현장 용접이음부, 수직 보강재 용접이음부, Corner Plate 용접이음부 등이 보고되고 있다(남광현 역, 2001). 그러나 본 연구에서는 세로리브와 가로리브 용접이음부, 세로리브와 데크 플레이트 용접이음부만을 관심 대상으로 하였다. 이것은 Corner Plate 용접이음부와 수직 보강재 용접이음부는 강바닥판에 일반적으로 사용되는 구조상세가 아니기 때문이다. 또 세로리브 맞대기 용접이음부와 데크 플레이트의 용접이음부는 현장 용접이므로 일반적인 용접 구조상세라기 보다는 현장 조건에 따라서 품질이 결정되는 인자로 판단되어 본 연구와 같은 해석적인 연구로는 다소 한계성을 지니고 있는 것으로 판단하였기 때문이다. 따라서 고성능 강바닥판 구조상세 제안을 위하여 본 연구에서는 세로리브와 가로리브의 용접이음부, 세로리브와 데크 플레이트의 용접이음부 구조상세의 피로균열을 대상으로 피로균열발생 원인을 정량적으로 분석하는 해석적 연구를 우선적으로 실시하였다.

3.1 세로리브와 데크 플레이트의 용접이음부

세로리브와 데크 플레이트 용접이음부의 피로균열은 용접이음부의 루트부에서 발생하여 데크 플레이트로 진전, 관통할 수 있는 균열인데, 이러한 균열은 실구조물에서는 포장 등으로 인해 발견이 곤란하기 때문에 매우 위험한 균열이다.

3.1.1 재하조건 및 해석방법

그림 4에 나타난 것과 같은 세로리브와 데크 플레이트 이음부의 용접부 루트부에서 발생하는 피로균열은 루트부의 응력집중에 의해 발생한다. 해석에서는 그림 4의 균열가운데 데크 플레이트 관통 균열의 원인 분석을 위하여 앞에서 기술한 구조해석 모델을 사용하여 구조해석을 실시하였다. 여기서 구조해석 평가위치는 3.2의 세로리브와 가로리브의 용접이음부의 피로균열 평가와의 상관성을 고려하여 가로리브와 교차하는 중앙 세로리브 위의 데크플레이트를 선정하였다.

구조해석에서의 하중은 해석 모델링 가로보 사이의 중앙 가로리브와 교차하는 중앙 세로리브 위의 데크플레이트에 그림 5에 나타난 L1, L2, L3에 재하하였다. 이때 하중 재하 면적은 500mm×200mm이며, 재하압력하중은 0.72MPa로 하였다. 이것은 도로교설계기준의 2등급 후륜하중인 72kN 및 도로교설계기준에서 차륜의 접지압이 필요한 경우 접지면적은 차륜중량에 비례하므로 5P/36(cm²)으로 하고, 이 면적에 차륜하중이 등분포로 작용하는 것으로 하며 전륜 후륜 모두를 0.7Pa의 접지압으로 한다는 조항으로부터 도출하였다. (도로교 설계 기준, 2003)

해석은 세로리브와 데크 플레이트의 용접이음부의 응력분석이 목적이므로 응력 평가 위치를 그림 5와 같이 세로리브와 가로리브 교차부의 데크플레이트를 대상으로 하였다.

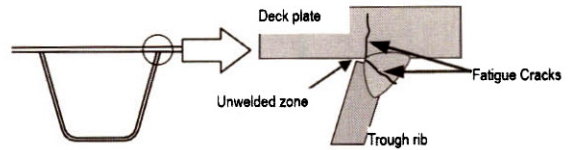


그림 4. 세로리브와 데크 플레이트 용접이음부에서의 관통 균열

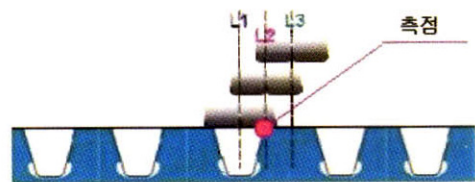


그림 5. 데크 플레이트 하중 재하도 및 응력 평가 위치

3.1.2 해석 결과 및 고찰

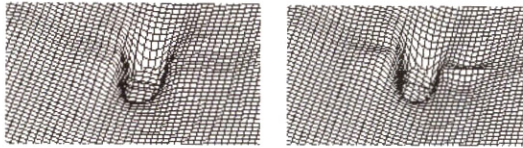
해석 결과를 세로리브와 가로리브 및 데크 플레이트가 만나는 위치에서의 데크 플레이트 상면의 주응력을 정리하여 표 1에 나타내었다.

표 1. 데크 플레이트 하중 재하별 최대 주응력 (단위 : MPa)

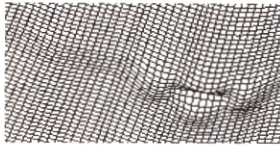
	L1	L2	L3
최대 주응력	92.1	78.2	9.0

표 1로부터 하중 재하 위치에 따라 세로리브와 데크 플레이트의 용접이음부 최대 주응력이 변화하는 것을 알 수 있다.

하중 재하 위치에 따른 데크 플레이트 변형형상을 그림 6에 나타내었다.



(a)- L1위치 변형도 (b)- L2위치 변형도



(c)- L3위치 변형도

그림 6. 하중 재하별 데크 플레이트 변형 형상

그림 6에서 데크 플레이트 변형이 재하위치 L1에서 가장 크며, L2, L3 위치에 따라 작아지는 것을 알 수 있다. 이 경향은 데크 플레이트의 최대 주응력의 크기에도 동일한 경향을 나타낸다. 그러므로 데크 플레이트의 국부적인 응력 집중 원인은 데크 플레이트의 국부적인 변형이 원인인 것으로 판단된다. 따라서 세로리브로부터 데크 플레이트로 관통하는 균열을 제어하기 위해서는 하중 직하부의 데크 플레이트의 국부적인 변형을 제어하는 것이 효율적일 것으로 판단된다. 이것을 고려하여 데크 플레이트 국부 변형 제어의 중요 변수의 하나로 4장에서는 데크 플레이트의 두께를 변수로 한 구조해석을 실시하고자 한다.

3.2 세로리브와 가로리브의 용접이음부

세로리브와 가로리브 용접이음부의 피로손상은 그 동안 많은 보고가 있었다(남광현 역, 2001). 이 이음상세에서는 세로리브가 가로리브를 관통하는 상세이므로 시공성을 고려하여 가로리브에 슬릿트를 설치한다. 그러나 용접부를 포함하는 슬릿트부의 구조상세가 국부응력에 취약한 경우에는 강바닥판의 내구성 저하로 이어져 그림 7과 같은 피로균열이 발생된다. 그림 7에 나타난 것과 같이 세로리브와 가로리브의 용접이음부에서의 피로균열은 각각 세로리브 측과 가로리브 측으로 발생할 수 있

다. 따라서 이 절에서는 각각의 균열에 대한 원인 분석을 앞에서 사용한 동일 구조모델을 사용하여 구조해석을 실시하였다.

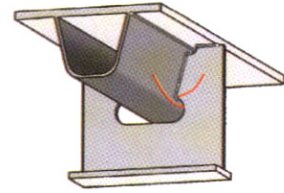


그림 7. 세로리브와 가로리브 이음부 피로균열

3.2.1 세로리브 관점에서의 세로리브와 가로리브 용접이음부

1) 재하 조건 및 해석방법

그림 8에 나타난 세로리브와 가로리브 용접이음부의 세로리브 측의 균열 원인 분석 및 슬릿트부의 세로리브 국부변형에 따른 거동특성을 조사하기 위하여 구조해석에서의 하중 조건을 그림 9와 같이 재하 하였다. 피로균열 발생 원인분석을 위한 응력 평가위치는 그림 9와 같이 중앙세로리브 왼쪽 측의 세로리브와 가로리브가 만나는 세로리브 돌림용접부 하단으로부터 10mm 아래를 대상으로 하였다. 이것은 피로균열 발생 인자로 하중 편측재하에 의한 세로리브 하단부의 비틀림 및 돌림용접부 용접지단부에서의 응력집중을 고려한 것이다.

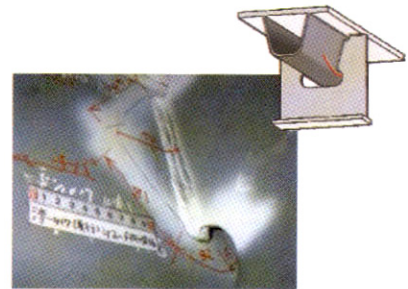


그림 8. 세로리브 측 피로균열

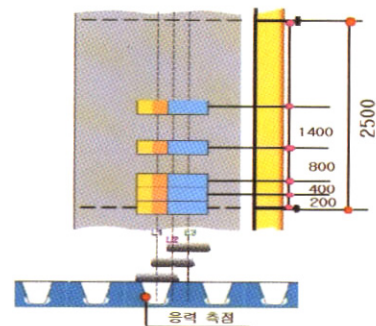


그림 9. 하중 재하도 및 세로리브 측의 응력 평가위치

2) 해석 결과 및 고찰

강바닥판 세로리브와 가로리브 이음부의 종리부측 피로손상 원인 규명을 위하여 L1-1~ L3-5까지 총 15가지의 하중 재하에 대한 해석결과를 주응력으로 정리하여 표 2에 나타내었다.

표 2. 세로리브 측의 하중 재하별 주응력 (MPa)

거리	위치	최 대 주응력	위치	최 대 주응력	위치	최 대 주응력
0mm	L1-1	20.1	L2-1	18.0	L3-1	-7.1
200mm	L1-2	33.6	L2-2	41.1	L3-2	29.6
400mm	L1-3	33.8	L2-3	46.5	L3-3	36.7
800mm	L1-4	27.7	L2-4	47.4	L3-4	43.0
1400mm	L1-5	17.9	L2-5	42.0	L3-5	43.3

표 2로부터 하중재하 위치의 L1 및 L3 선상보다 L2 선상에서의 주응력이 큰 것을 알 수 있다. 이것은 하중이 세로리브에 편재하가 되기 때문에 세로리브에 비틀거동에 의한 국부변형의 영향이 커지기 때문이다. 또한 평가위치가 L1, L2, L3의 각 선상의 재하위치에서 멀어지면 가로리브의 면외거동으로 인하여 응력이 증가하는 것을 알 수 있는데 이것은 기존 연구 결과와 일치하는 것이다(Suganuma, 2005).

3.2.2 가로리브 관점에서의 세로리브와 가로리브 용접이음부

1) 재하 조건 및 해석방법

그림 10에 나타낸 세로리브와 가로리브 용접이음부의 가로리브 측의 피로균열 원인 분석을 위하여 구조해석에서의 하중 조건을 그림 11과 같이 재하 하였다. 응력 평가위치는 그림 11과 같이 세로리브와 가로리브가 만나는 슬릿트 상단에서 위쪽으로 10mm, 세로리브에서 가로리브 쪽으로 10mm의 위치이다. 이것은 피로균열 발생 인자로 하중 재하 위치에 따른 면외 변위에 의한 가로리브의 국부변형 및 돌림용접부 용접지단부에서의 응력집중을 고려한 것이다.

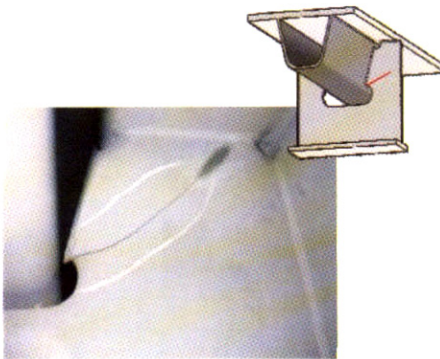


그림 10. 가로리브 측 균열

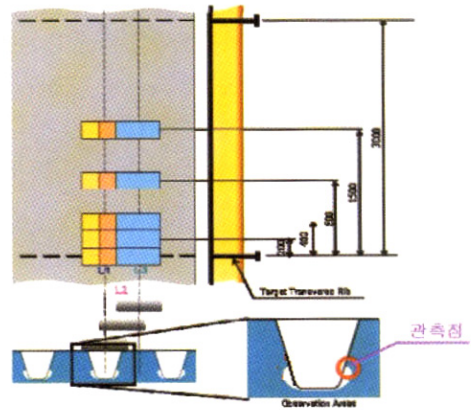


그림 11. 하중 재하도 및 가로리브 측의 응력 평가위치

2) 해석 결과 및 고찰

강바닥판 세로리브와 가로리브 이음부의 가로리브측 피로손상 원인 규명을 위하여 L1-1~ L3-5까지 총 15가지 하중 재하에 대한 구조해석결과를 주응력으로 정리하여 표 3에 나타내었다.

표 3. 가로리브 측의 하중 재하별 주응력 (MPa)

거리	위치	최 대 주응력	위치	최 대 주응력	위치	최 대 주응력
0mm	L1-1	19.5	L2-1	18.0	L3-1	-8.1
200mm	L1-2	27.2	L2-2	27.1	L3-2	14.5
400mm	L1-3	24.9	L2-3	30.2	L3-3	20.9
800mm	L1-4	20.7	L2-4	27.7	L3-4	21.9
1400mm	L1-5	14.3	L2-5	20.9	L3-5	18.3

위의 표로부터 L1, L2, L3 각 라인이 가로리브측의 평가위치에서 멀어질수록 응력이 증가하는 경향이 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 평가위치에서 거리가 멀어질수록 가로리브에 면외변형이 발생하기 때문이다. 또한 L1라인보다 L2라인이 다소 응력이 크게 발생하는데 이것은 세로리브의 면외비틀에 따른 세로리브의 구속으로 인한 가로리브측의 응력 집중에 의한 것으로 판단된다.

4. 데크 플레이트 두께 증가에 따른 강바닥판 거동

3장에서 세로리브와 데크 플레이트 이음부의 피로손상 원인을 분석해 본 결과 세로리브와 데크 플레이트 용접이음부의 피로균열 발생원인은 데크 플레이트의 국부 변형에 의한 응력집중으로 파악되었다. 이에 따른 피로균열 제어를 위하여 三木 등(1995)은 대형시험체의 피로실험과 국부적인 구조해석을 통하여 세로리브와 데크 플레이트 용접이음부의 용입량을 세로

리브 판두께의 75%이상을 확보하면 데크 플레이트 두께를 관통하는 피로균열의 위험성을 감소시킬 수 있다는 것으로 보고하였다. 한편 이종관 등(1999)에 의하면 14mm 두께의 데크 플레이트 용접이음부의 용입량을 세로리브 판두께의 75%이상을 확보하더라도 하중크기에 따라서는 시험체에서 데크 플레이트를 관통하는 균열이 발생할 수 있다고 보고하고 있다.

따라서 본 장에서는 데크 플레이트를 관통하는 균열 제어 방법으로 데크 플레이트 국부변형에 의한 응력집중 제어의 유효 방안으로 데크 플레이트 두께 증가를 변수로 하는 해석으로부터 데크 플레이트 상면의 최대 주응력을 검토하여 합리적인 데크 플레이트 두께를 제안하고자 한다.

4.1 대상 교량 및 변수 조건

대상교량은 그림 1의 N대교 소블럭을 대상으로 하였으며, 데크 플레이트 두께 증가에 따른 영향을 분석하기 위하여 12mm, 13mm, 14mm, 15mm, 16mm, 17mm, 18mm, 19mm, 20mm의 총 9개의 데크 플레이트 두께를 변수로 해석적 연구를 수행하였다.

4.2 재하 조건 및 해석방법

3.1절에서 데크 플레이트의 응력집중이 데크 플레이트의 국부적 변형의 원인이라는 것을 고려하여 응력 평가 위치에서 가장 큰 국부변형을 발생시키는 L1하중 재하를 중앙가도리브 위의 데크플레이트에 대해 그림 12와 같이 재하 하였다. 그리고 응력 평가 위치는 3.1절에서 대상으로 한 세로리브와 데크 플레이트의 용접이음부의 데크 플레이트 상면을 대상으로 하였다.

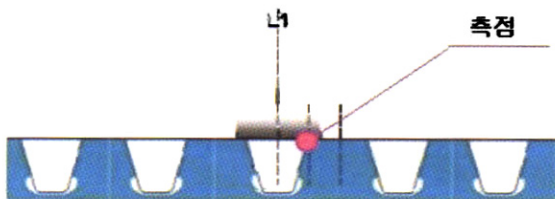


그림 12. 데크 플레이트 하중 재하 조건 및 응력 평가 위치

4.3 해석 결과 및 고찰

현재 국내 설계기준에서는 데크 플레이트의 최소 두께가 14mm로 되어 있으므로 데크 플레이트 두께 14mm을 기준으로 세로리브와 데크 플레이트 용접이음부의 피로 강도 등급을 한 단계 향상시킬 수 있는 두께를 제안하고자 한다.

피로설계곡선에서는 일반적으로 이음 1등급의 기본허용 응력

범위의 차이를 공칭응력의 약 25%로 하고 있다. 한편 피로설계에서 피로등급 데이터의 공칭응력은 대부분 축하중 상태에서의 데이터를 사용하고 있는데, 축하중 상태에서의 공칭응력은 그림 13과 같이 그 자체가 주응력이다. 한편, 실제 피로균열은 주응력에 직각 방향으로 발생하므로 주응력이 저감된다면 피로 내구성이 향상될 것이므로 본 연구에서는 두께 변화에 따른 데크 플레이트의 피로등급 평가를 주응력을 사용하여 실시하였다.

그림 14 및 표 4에 데크 플레이트 두께 변화에 따른 최대주응력의 변화 양상 및 변화율을 나타내었다. 표 4에 나타난 것과 같이 14mm을 기준으로 응력 저감 효과가 25%가 되는 데크 플레이트 두께는 16mm임을 알 수 있으며, 또 그림 14에 나타난 것과 같이 데크 플레이트 두께가 15mm~16mm을 기점으로 응력 저감 효과가 달라지는 것을 알 수 있다. 이러한 것을 고려하면 강바닥판의 데크 플레이트와 세로리브의 이음부 피로등급을 한 단계 향상시키고, 자원의 효율적 사용이란 측면에서 보면 강바닥판 두께 16mm가 적절할 것으로 판단된다.

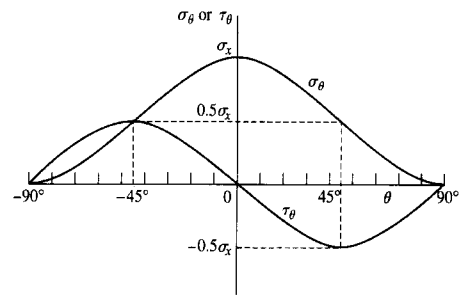


그림 13. 축하중 상태에서의 경사단면 응력

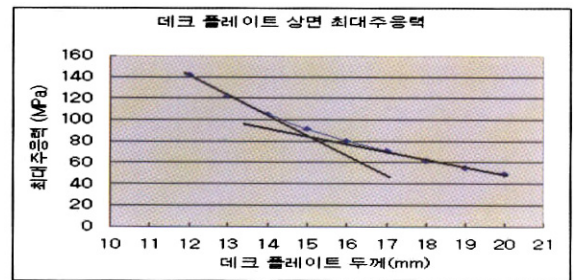


그림 14. 데크 플레이트 두께변화에 따른 최대 주응력 변화 양상

표 4. 데크 플레이트 상면 최대 주응력 및 변화율 (응력단위 : MPa)

두께	데크 플레이트 상면 최대 주응력	14mm기준 비율
12mm	142.2	35%
13mm	122.2	+16%
14mm	105.7	0%
15mm	92.1	-14%
16mm	80.6	-24%
17mm	70.9	-33%
18mm	62.6	-41%
19mm	55.6	-47%
20mm	49.5	-53%

한편 이종관 등(1999)의 연구에서는 데크 플레이트 19mm의 경우, 230kN재하시 400만 Cycle에서 피로균열이 하중 직하부에서 발생하였으나, 그 균열의 크기가 매우 작으며 진전속도가 현저히 낮아 구조적으로 안정하다고 판단하고 데크 플레이트 두께로 19mm를 제안하였었다. 그러나 이 값은 충격계수를 고려한 1등급의 축하중이 대략 120kN, 일본의 피로하중이 100kN, 그리고 실제 교통하중을 고려하면 230kN의 축하중에 기초하여 두께를 제안하는 것은 비효율적으로 판단된다. 따라서 표 4의 해석결과에서 16mm와 19mm의 데이터를 선형관계로 가정하고, 하중과 응력 저감효과를 관계지어 추론하면, 14mm기준으로부터 16mm에 대한 19mm의 응력 저감효과가 2배, 또한 하중을 230kN에서 120kN으로 1/2배 하면, 230kN 하중하에 19mm데크 플레이트 결과는 120kN 하중하에서의 16mm데크 플레이트와 유사할 것으로 판단된다. 이로부터 16mm의 데크 플레이트 두께는 타당할 것으로 판단된다.

그리고 데크 플레이트 두께가 14mm에서 16mm로 증가될 때 강재가격 증가는 후판 두께 $12.0 \leq T \leq 20.0$ 에서는 톤당 가격에 변화가 없으므로 두께 증가에 따른 가격 증가는 총 공사비를 기준으로 그다지 크지 않을 것으로 판단된다. 예를 들어 $100m \times 10m$ 의 면적을 대상으로 비교해 보면, 두께 증가에 따른 중량 증가가 157kN이 되므로, 이 경우 자재 증가비는 약 1,000만원 정도인 것을 알 수 있다. 그러므로 일반적인 강바닥판 시공비가 수십억~수백억임을 고려하고, 지반 지지력이 충분하다면 상부구조에서의 비용 증가가 전체 공사비에 미치는 영향은 그다지 크지 않을 것으로 판단된다. 또한 교량 하부구조 제원은 고정하중보다는 일반적으로 내진에 의한 단면력으로부터 결정되므로 하부구조의 제원에 강바닥판 두께 증가가 미치는 영향은 거의 없을 것으로 판단된다.

이로부터 구조적, 경제적인 측면을 고려하더라도 고성능 강바닥판의 데크 플레이트 두께로 16mm를 제안하는 것이 타당할 것으로 생각한다. 그러므로 앞으로의 고성능 강바닥판 구조 상세 제안을 위한 슬릿트 곡률, 가로리브 용접이음길이의 변수 해석에서도 데크 플레이트 두께를 16mm로 하여 해석을 실시하고자 한다.

5. 가로리브 슬릿트 곡률에 따른 강바닥판 거동

가로리브의 슬릿트 곡률변화(가로리브와 세로리브가 만나는 위치의 절단형상)에 따라 세로리브와 가로리브 용접이음부의 세로리브측과 가로리브측의 응력경향을 분석하기 위하여 앞에서 사용한 구조모델을 사용하여 구조해석을 실시하였다. 하중 조건은 3장으로부터 세로리브측의 피로손상 원인인 세로리브의 비틀거림과 가로리브의 구속력, 가로리브측의 피로손상 원

인인 가로리브의 면외거동과 세로리브의 비틀거림에 따른 세로리브의 구속 영향을 모두 고려할 수 있는 재하조건인 L1-1~L1-5, L2-1~L2-5, L3-1~L3-5의 총 15개 재하조건을 사용하였다.

5.1 세로리브 관점에서의 세로리브와 가로리브 용접이음부

5.1.1 대상 교량 및 변수 조건

대상 교량은 그림 1의 N대교 소블럭을 대상으로 하였으며, 데크 플레이트 두께는 4장의 연구 성과를 반영하여 16mm로 하였다. 슬릿트의 곡률 형상은 표 5에 나타난 것과 같이 현행 강도료교상설계지침에서 규정된 20R (강도료교 상세부 설계지침, 1997)에서 40R까지의 5가지로 하였다.

표 5 슬릿트 곡률의 기하 형상

	R1(mm)	R2(mm)	기하형상
CASE 1	20	68	
CASE 2	25	73	
CASE 3	30	78	
CASE 4	35	83	
CASE 5	40	88	

5.1.2 해석 결과 및 고찰

본 절부터는 다음과 같은 이유에 의해 15가지 재하조건하에서의 구조 해석 결과를 그림 15와 같은 주응력 범위로 정리된 포락선을 사용하여 평가하고자 한다.

- (1) 슬릿트 곡률변화에 따른 각 곡률별 슬릿트부의 응력 변화 특성을 용이하게 파악할 수 있다.
- (2) 평가위치에서 제일 가혹한 하중 상태인 L1, L2, L3에서의 응력범위(주응력 범위 = 최대 주응력포락선 - 최소주응력포락선)를 고려하는 것에 의해 실제 교량에서 발생하는 부모멘트부의 응력특성을 고려할 수 있으며, 또한 평가위치에서 같은 거리에 있는 L1, L2, L3의 최대값과 최소값을 사용하는 것에 의해 모든 가능한 하중 조건을 고려할 수 있는 응력범위로 나타낼 수 있기 때문이다.

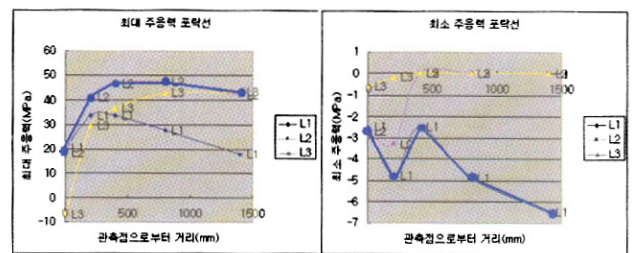


그림 15. 주응력범위 포락선의 정의

5.1.3 주응력 범위에 의한 해석 결과 및 고찰

슬릿트 곡률 변화에 따른 강바닥판 세로리브와 가로리브 용접이음부의 종리부측 평가위치에서의 최적 슬릿트 곡률을 조사하기 위하여 15가지 하중 재하 조건에 대한 해석결과를 주응력 범위로 정리하여 그림 16과 표 6에 나타내었다.

표 6. 슬릿트 곡률 변화에 따른 세로리브측의 주응력 범위 (MPa)

거리(mm)	20R	25R	30R	35R	40R	감소율(35R/20R)
0	22.8	22.3	21.9	21.6	21.9	5.3%
200	45.9	45.2	44.6	44.0	45.3	4.1%
400	49.0	48.3	47.8	47.3	48.6	3.4%
800	52.3	51.8	51.3	51.0	52.5	2.5%
1400	49.8	49.8	49.2	49.0	50.2	1.6%

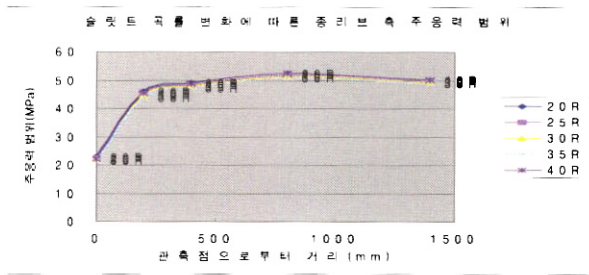


그림 16 슬릿트 곡률 변화에 따른 세로리브측의 주응력 범위

표 6에 나타난 것과 같이 슬릿트 곡률 35R에서의 주응력 범위가 모든 위치에서 가장 작은 것을 알 수 있다. 또한 슬릿트 곡률 20R에서부터 35R까지는 곡률이 증가함에 따라 거리에 관계없이 주응력 범위가 감소하나, 40R에서부터는 다시 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 슬릿트 곡률 35R까지는 곡률 증가에 따른 응력 감소 효과가 나타나나, 40R부터는 곡률 증가에 따른 응력 감소보다 가로리브 단면 감소로 인한 강성 감소가 세로리브측의 응력에 더 크게 영향을 주기 때문인 것으로 판단된다. 이로부터 35R과 40R 사이에 곡률 증가에 따른 응력 감소 효과와 단면 감소에 따른 강성 부족으로 인한 저항성 감소의 경계가 있는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 슬릿트 곡률 35R을 최적 슬릿트 형상으로 제안한다.

5.2 가로리브 관점에서의 세로리브와 가로리브용접이음부

5.2.1 대상 교량 및 변수 조건

대상 교량과 변수 조건은 5.1절의 세로리브 관점에서의 세로리브와 가로리브 용접이음부와 동일하다.

5.2.2 해석 결과 및 고찰

슬릿트 곡률 변화에 따른 강바닥판 세로리브와 가로리브 용

접이음부의 횡리부측 평가위치에서의 최적 슬릿트 곡률을 조사하기 위하여 15가지 하중 재하 조건에 대한 해석결과를 주응력 범위로 정리하여 그림 17과 표 7에 나타내었다.

표 7. 슬릿트 곡률 변화에 따른 가로리브측의 주응력 범위 (MPa)

거리 (mm)	20R	25R	30R	35R	40R	감소율 (40R/20R)	감소율 (35R/20R)
0	56.2	54.0	51.9	49.7	48.2	14.2%	11.6%
200	70.8	68.1	65.8	63.1	62.1	12.3%	10.9%
400	68.5	65.9	63.7	61.0	54.6	20.3%	11.0%
800	56.6	54.7	53.1	51.1	50.6	10.6%	9.7%
1400	39.1	38.1	37.2	36.1	36.3	7.2%	7.7%

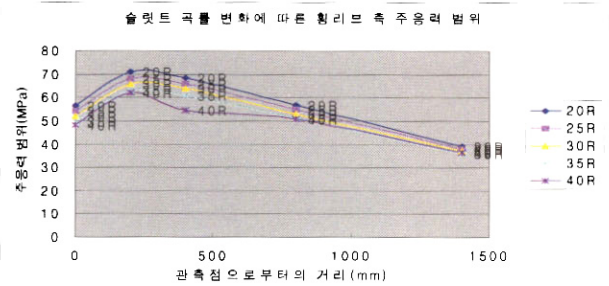


그림 17. 슬릿트 곡률 변화에 따른 가로리브측의 주응력 범위

세로리브측에서는 35R과 40R을 경계로 응력 특성이 감소에서 증가로 변화하였으나, 표 7에 나타난 가로리브측에서는 슬릿트 곡률이 20R~40R까지 증가할수록 응력이 계속 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 가로리브측에서는 단면감소에 따른 강성 감소보다 슬릿트 곡률에 민감하게 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.

가로리브 측면에서는 40R일 때 평가위치에서 400mm 떨어진 위치에서 최대 20.3%의 응력 감소를 나타내나, 평균적으로 12.9%의 응력감소가 이루어져 최적의 슬릿트 곡률 형상을 나타낸다. 그러나 40R이 선택된다면 세로리브 측면에서는 적합하지 않으므로 세로리브와 가로리브에서의 응력변화 특성을 모두 고려하여 평균적으로 10.5%의 응력 감소를 보이는 35R을 최적 슬릿트 곡률로 제시한다. 따라서 이후의 해석에서는 슬릿트 곡률을 35R로 하여 구조 해석을 수행하고자 한다.

6. 가로리브 이음길이에 따른 강바닥판 거동

현재 N대교 강바닥판의 가로리브 용접이음길이는 62%로 되어 있다. 그러나 현재 강도로교 상세부 설계지침에서의 용접이음상세는 용접이음길이를 70%로 제시하고 있다. 그러므로 세로리브 가로리브 용접이음부의 최적 이음길이를 제시하는 것도 향후 고성능강바닥판 구조상세 제시에 있어서 중요할 것으로

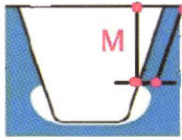
판단된다. 따라서 본 절에서는 강바닥판 가로리브의 이음길이를 변수로 하여 이음길이를 70%에서 60%, 50%로 3가지로 하여 구조해석을 수행하였다.

6.1 세로리브 관점에서의 세로리브와 가로리브 용접이음부

6.1.1 대상 교량 및 변수 조건

대상 교량으로는 그림 1의 N대교 소블럭을 대상으로 하였으며, 기존연구 성과를 반영하여 플레이트 두께는 16mm, 슬릿트 곡률은 35R로 하였다. 여기서 세로리브와 가로리브 이음부 가로리브 이음길이는 표 8의 50%~70%까지 변수로 하여 구조해석을 수행하였다.

표 8. 가로리브 용접이음길이 기하형상

	L (mm)	M (mm)	기하형상
50 %	121.9	119	
60 %	146.3	142.8	
70 %	170.7	165.5	

6.1.2 해석 결과 및 고찰

가로리브 용접이음길이에 따른 세로리브측의 주응력 범위를 정리하여 그림 18과 표 8에 나타내었다.

표 8. 가로리브 용접이음길이에 따른 세로리브측의 주응력 범위(MPa)

거리(mm)	50%	60%	70%	감소율 (70%/50%)
0	27.5	22.2	16.7	39.3%
200	55.3	47.3	38.6	30.2%
400	58.9	52.8	44.7	24.1%
800	62.9	60.1	54.6	13.2%
1400	56.0	56.2	51.5	8.0%

가로리브 이음길이가 길어질수록 하중 재하 거리에 따라 차이는 있지만 평균적으로 23.0%, 최대 39.3%의 응력 경감효과가 있는 것으로 나타났다. 이것은 이음길이가 길어질수록 가로리브의 강성이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 세로리브 관점에서 가로리브 용접이음길이에 따른 최적상세로 70%의 용접이음길이를 제안한다.

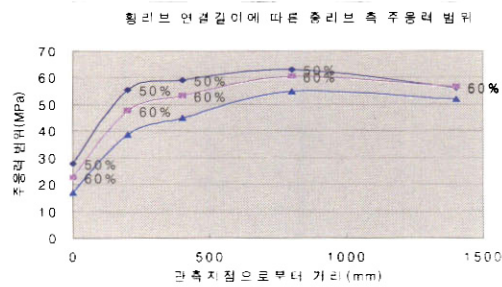


그림 18. 가로리브 이음길이에 따른 세로리브측의 주응력 범위

6.2 가로리브 관점에서의 세로리브와 가로리브 용접이음부

6.2.1 대상 교량 및 변수 조건

대상 교량과 변수 조건은 6.1절의 세로리브 관점에서의 세로리브와 가로리브 이음부에서의 조건과 동일하다.

6.2.2 해석 결과 및 고찰

가로리브 용접이음길이에 따른 가로리브측의 주응력범위를 정리하여 그림 19와 표 9에 주응력 범위를 나타내었다.

표 9. 가로리브 용접이음길이에 따른 가로리브측의 주응력 범위(MPa)

거리(mm)	50%	60%	70%	감소율 (70%/50%)
0	60.4	50.7	44.1	27.0%
200	77.1	66.3	59.1	23.4%
400	73.2	63.9	58.0	20.8%
800	59.4	52.3	48.0	19.2%
1400	37.3	33.2	30.7	17.7%

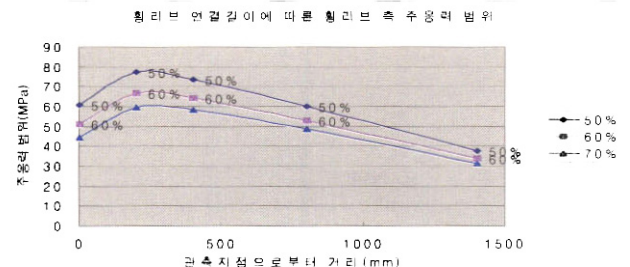


그림 19. 가로리브 용접이음길이에 따른 가로리브측의 주응력 범위

세로리브 측과 마찬가지로 가로리브 용접이음길이가 증가함에 따라 가로리브 측도 주응력이 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 연결길이가 길어질수록 표 5에 나타낸 R2 곡률에 의한 단면 감소가 적어져 강성이 증가하기 때문이다. 그러나 R1의 곡률 영향만을 고려하고 R1에 의한 R2의 곡률영향을 무시한 상태에서 연결길이에 따른 가로리브측의 주응력 범위를 산정하

면 가로리브측 연결길이 증가에 따라 단면 강성 변화가 적어져 연결길이 길어지면 가로리브의 면외거동 영향 때문에 평가위치에서의 주응력 범위가 커진다(suganuma, 2003). 한편, 최준혁(1999)에 의하면 슬릿트 곡률 주변부를 대상으로 한 연구결과, 슬릿트 곡률이 커질수록 슬릿트 곡률 주변부에서의 응력경감이 발생하는 것으로 보고하였다. 따라서 슬릿트 용접 지단부만을 고려하면 R1의 곡률만 고려하고 R2의 곡률은 무시하는 것이 효율적일 것으로 판단되나, 슬릿트 곡률 주변부에 대한 전체적인 응력은 R1과 R2의 곡률 고려 및 가로리브 연결길이를 최대화 하는 것이 슬릿트 곡률 주변부의 전체적인 내구성 향상에 유익할 것으로 판단된다. 또한, 강도로교 상세부 설계지침에서 제시하고 있는 상부 스캘럽 곡률과 하부 스캘럽 곡률의 상관관계에 의하여 하부 스캘럽을 그대로 두었기 때문에 최대 이음길이는 70%가 된다. 이상의 결과로부터 가로리브의 용접 이음길이를 70%로 제시하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

7. 결론

본 연구를 통하여 얻어진 강바닥판의 피로손상원인 및 제안된 고성능 강바닥판 구조상세는 대한 결론은 다음과 같다.

- (1) 강바닥판 세로리브와 데크 플레이트 이음부의 피로손상 원인은 하중직하부에서의 데크 플레이트의 국부적인 변형이 원인이 되어 응력 집중이 발생하는 것으로 나타났다.
- (2) 세로리브 관점에서의 세로리브와 가로리브 용접이음부의 피로 손상 원인은 세로리브의 비틀거동에 의한 영향과 가로리브의 면외거동에 의한 가로리브의 구속력으로 인하여 세로리브에 응력집중이 발생하여 피로손상을 유발하는 것으로 판단된다.
- (3) 가로리브 관점에서의 세로리브와 가로리브 이음부의 피로 손상 원인은 가로리브의 면외 거동에 의한 영향과 세로리브의 비틀거동에 의한 세로리브의 구속력으로 인하여 가로리브에 응력집중이 발생하여 피로손상을 유발하는 것으로 판단된다.
- (4) 강바닥판 데크 플레이트 두께가 증가할수록 데크 플레이트에는 응력 저감효과가 발생하나, 주응력 범위가 25% 저감되는 두께는 16mm로 나타났다. 또한 15mm ~ 16mm에서 응력 저감효과가 둔화되고, 데크 플레이트 두께 증가에 따른 공사비의 증가가 미약하므로 데크 플레이트 두께는 16mm가 적당할 것으로 판단된다.
- (5) 강바닥판 슬릿트 곡률이 가로리브 측면에서는 20R에서

40R까지 증가할수록 응력 저감이 되나 세로리브 측면에서는 35R과 40R사이에서 응력이 저감에서 증가로 변화하므로 슬릿트 곡률로는 35R이 적당할 것으로 판단된다.

- (6) 강바닥판 가로리브 이음길이는 50%, 60%, 70%로 증가할수록 세로리브 가로리브 용접이음부에서 세로리브측과 가로리브측 모두 응력이 저감되므로 가로리브 이음길이는 70%가 적절한 것으로 제안한다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 이루어진 것으로 관계자 여러분께 깊은 감사의 말씀을 드리며, 연구 활동에 꾸준한 관심과 격려를 해주신 한국강구조학회 '해양구조물 위원회'에 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

참고 문헌

- 건설교통부(2005), 도로교 설계기준
 건설교통부(1997), 강도로교 상세부 설계지침
 건설교통부(2001), N대교 정밀안전진단보고서
 남광현 역(2001), "강상판의 피로설계", 과학기술
 이종관, 이춘학, 윤태양, 장승필(2001), "강바닥판의 데크 플레이트와 세로리브, 가로리브 용접부의 피로강도에 대한 실험", 대한토목학회 2001 학술발표회 논문집
 조재병(1995), "계산에 의한 강구조의 단계별 피로수명 추정법", 한국강구조학회논문집, 제7권, pp. 234~235
 한국도로공사(2000), S강교 정밀안전진단보고서
 Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc. (2004). ABAQUS/Standard User's Manual. ver 6.4
 Hisatada Suganuma(2005), Development of orthotropic steel deck system with high fatigue resistance, doctoral dissertation, Japan
 IIW(1993), Recommendations concerning stress determination for fatigue analysis of welded components
 P.aul A. Tsakopoulos and John W. Fisher(2005), Fatigue Performance and Design Refinements of Steel Orthotropic Deck Panels Based on Full-Scale Laboratory Tests, *Steel Structure*, Vol. 5, pp. 211-223

(접수일자 : 2006. 3. 14 / 심사일 2006. 4. 4 /
 심사완료일 2006. 7. 19)