

# 강바닥판 피로손상 원인규명 및 피로성능 개선에 관한 해석적 연구

## The Analytical Study on the Cause of Fatigue Damage and the Improvement of Fatigue Performance for Orthotropic Steel Deck

경 갑 수\* · 신 동 호\*\* · 김 교 훈\*\*\*

Kyung, Kab-Soo · Shin, Dong-Ho · Kim Kyo-Hoon

### ABSTRACT

In orthotropic steel decks, it is likely to have defects due to fatigue damages because most of structural joints(the connection of longitudinal rib and transverse rib, the connection of deck plate and longitudinal rib) are connected by welds. However, orthotropic steel decks have many advantages, such as light weight and reduction of construction time, in comparison with concrete decks. Therefore, they are mostly used in long-span bridges and urban highway bridges. This study consists of the cause identification of fatigue damage and the suggestion of rational thickness on deck plate about the connection of deck plate and longitudinal rib. The results are as follows: fatigue damage cause at the connection of deck plate and longitudinal rib is local deformation in deck plate. And, rational thickness of deck plate is 16mm thickness.

*keywords: orthotropic steel decks, the connection of deck plate and longitudinal rib, local deformation, fatigue damages*

### 1.서론

강바닥판은 철근 콘크리트 바닥판에 비해 중량이 1/2~1/3정도밖에 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 등 많은 장점을 가지고 있다.

이와같이 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.

강바닥판에서 발생한 피로손상으로 잘 알려진 대표적인 사례는 영국의 Severn 교와 Wye교 등이며, 1980년대에 이르러 많은 국가에서 피로손상이 보고되었다. 국내에서는 1993년 N교에서 강바닥판 종리브의 현장용접 연결부, S교의 종리브와 격벽 연결부등에서 피로균열이 발견되는 등 여러 교량에서 균열이 발생하

\* 정회원 · 한국해양대학교 건설·환경공학부 교수 E-mail: kyungks@hhu.ac.kr

\*\* 한국해양대학교 토목·환경공학부 석사 E-mail: tlstndrua@hanmail.net

\*\*\* 신성엔지니어링 상무 E-mail: shinheart@nate.com

고 있다. 한편 현재 공용중에 있는 교량에서도 교통량의 증가와 차량 하중의 증가로 높은 변동응력이 예상되므로 피로손상의 발생가능성이 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 그 발생 원인을 파악 후 그에 대한 대책이 필수적이므로 본 연구에서는 강바닥판의 피로손상에 따른 원인 규명을 통하여 고 내구성 강바닥판 시스템을 제시하고자 한다.

## 2. 강바닥판 피로손상에 따른 원인 규명

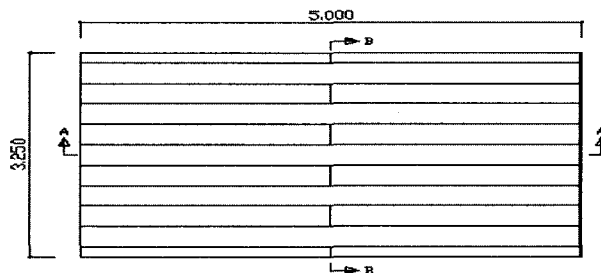
주요한 강바닥판 피로손상 개소로는 종리브와 횡리브 연결부, 종리브 맞대기 이음부, 종리브와 데크 플레이트 연결부, 데크 플레이트의 현장 이음부, 수직 보강재 연결부, Corner Plate 연결부등이 보고되고 있다. (남광현, 2001) 이러한 피로손상 가운데 본 연구에서는 종리브와 데크 플레이트 연결부만을 관심 대상으로 한다. 이것은 Corner Plate 연결부와 수직 보강재 연결부는 일반적인 상세가 아니고, 종리브 맞대기 이음부와 데크 플레이트의 이음부는 현장 용접으로 일반적인 용접 상세라기 보다는 현장 조건에 따라서 품질이 결정되는 인자로서 본 연구와 같은 해석적인 연구로는 다소 한계성을 갖고 있기 때문이다, 또한 종리브와 횡리브 연결부는 다수의 변수해석을 수행한 결과를 기술하는 것이 필요하므로 본 논문에서는 종리브와 데크 플레이트 연결부 상세의 피로손상 원인규명에 대해서만 해석대상으로 한다.

### 2.1 종리브와 데크 플레이트 연결부

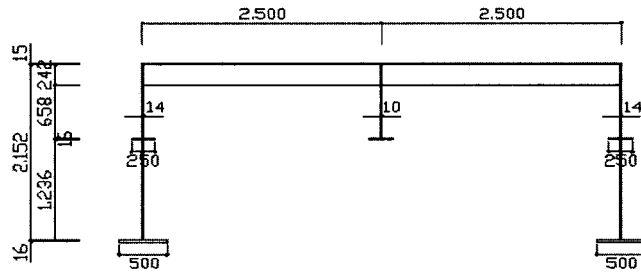
종리브와 데크 플레이트 연결부의 피로균열은 종리브 용접 루트부로부터 발생하여 데크 플레이트로 진전, 관통할 위험성이 있으며, 또 이러한 균열은 실구조물에서는 포장 등으로 인해 발견이 곤란하기 때문에 매우 위험한 균열이다. 그러므로 종리브와 데크 플레이트 연결부의 피로손상의 원인규명은 향후 강바닥판 유지관리에서 중요한 부분이므로 본 연구에서는 이들 피로 손상 원인에 대하여 구조해석방법에 의해 해석적으로 원인분석을 수행하고자 한다.

#### 2.1.1 대상 교량

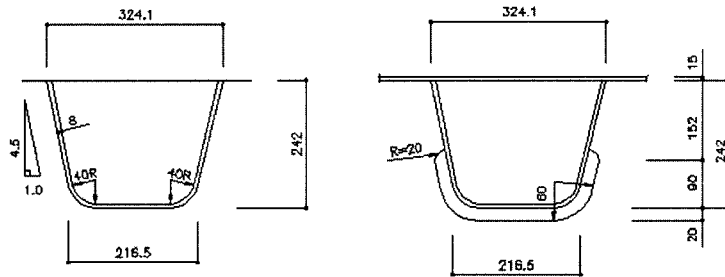
대상교량은 현재 시공중에 있는 남향대교로 하였으며, 그림 1과 같은 5개의 종리브와 가운데의 1개 횡리브, 2개의 양쪽 끝단 가로보의 소블럭을 해석대상으로 하였다. 본 남향대교는 기 시공된 강바닥판 교량과는 달리 강바닥판 두께가 15mm인 것이 특징이다.



(a)-평면도



(b)-측 면 도



(c)-종리브 상세도

그림 1. 남항대교 소블럭 형상과 종리브 상세도

### 2.1.2 유한요소해석

범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 6.5(Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc.)을 적용하여 8절점 쉘요소인 S8R요소를 메인 요소로 선택하고, 부분적으로 6절점 쉘 요소인 STR165요소를 사용하여 구조검토를 수행하였다.

#### 1) 재하조건 및 응력 관측점

종리브와 데크 플레이트 연결부의 그림 2와 같은 데크 플레이트 루트부에서 응력집중에 의한 데크 플레이트 관통 균열 원인 분석을 위하여 하중조건을 소블럭 가로보 사이의 가운데 횡리브에 대하여 그림 3과 같이 재하하였다. 하중 재하 면적은 500mm×200mm이며 재하하중은 0.72MPa이다. 이는 2등교 후륜하중인 72,000N을 대상으로 한 것으로, 도로교 설계기준에서 차륜의 접지압이 필요한 경우에 접지면적은 차륜의 중량에 비례하므로 5P/36(cm<sup>2</sup>)으로 하고 이 면적에 차륜하중이 등분포로 작용하는 것으로 하며, 이는 전륜 후륜 구분없이 702N/cm<sup>2</sup>의 접지압으로 한다'는 조항으로부터 도출하였다. 응력 관측점은 종리브와 데크 플레이트의 연결부에 관심을 가지고 그림 3 위치의 데크 플레이트를 대상으로 하였다.

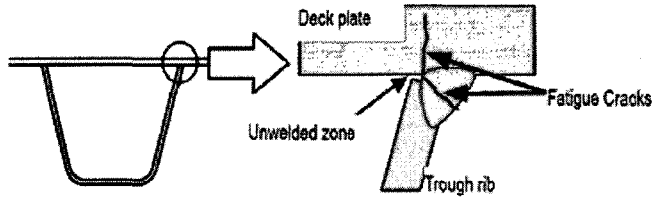


그림 2. 종리브와 데크 플레이트 관통 균열

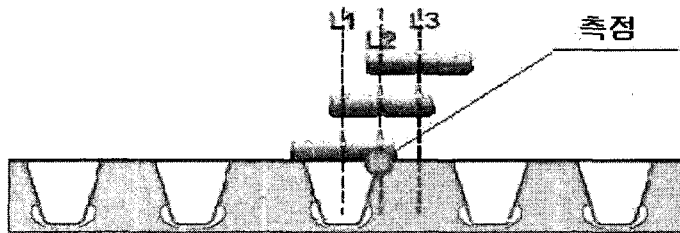


그림 3. 데크 플레이트의 하중 재하도 및 응력 관측 지점

## 2) 유한요소해석 모델링

대상구조물의 모델링 치수는 그림 1을 그대로 적용하였고, 탄성계수는  $21,000,000\text{N/cm}^2$ , 포아송 비는 0.3을 적용하였으며, 경계조건은 양단 힌지 조건, 요소 개수는 35,595개이다. 모델링 형상은 그림 4와 같다.

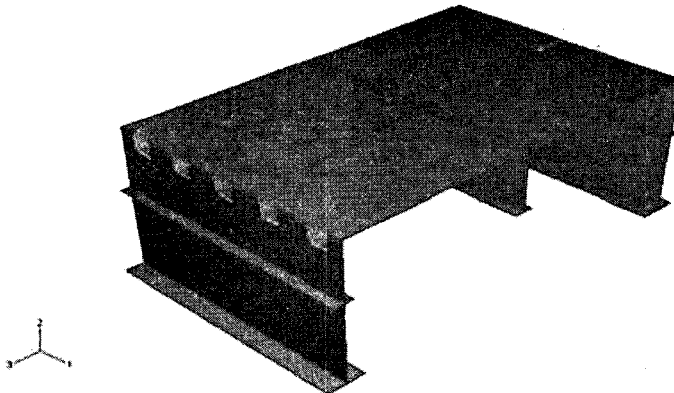


그림 4. 강바닥판 모델링 형상

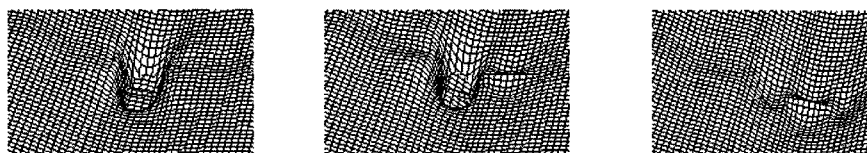
### 2.1.3 해석 결과 및 고찰

강바닥판 종리브와 데크 플레이트 연결부의 피로손상 원인 규명을 위하여 그림 3과 같이 L1, L2, L3에 하중을 재하하고, 종리브와 횡리브 데크 플레이트가 만나는 점을 관측점으로 하여 데크 플레이트 상면의 주응력을 조사하여 표 1에 나타내었다.

표 1 데크 플레이트 하중 재하별 최대 주응력 (MPa)

	L1	L2	L3
최대 주응력	92.1	78.2	9.0

표 1로부터 하중 재하별 종리브와 데크 플레이트 연결부의 최대 주응력이 달라지는 것을 알 수 있다. 따라서 이 원인을 보다 상세히 분석하고자 하중 재하에 따른 데크 플레이트 변형형상을 그림 5에 나타내었다.



(a) - L1위치 변형도      (b) - L2위치 변형도      (c) - L3위치 변형도

그림 5. 하중 재하별 데크 플레이트 변형 형상

그림 5로부터 데크 플레이트 변형이 L1, L2, L3순서로 커지는 것을 알 수 있다. 또한 이 순서는 데크 플레이트의 최대 주응력의 크기와의 같은 순서이다. 따라서 데크 플레이트의 국부적인 응력 집중의 원인은 데크 플레이트의 국부적인 변형이 원인으로 작용하는 것으로 판단된다. 따라서 종리브에서 데크 플레이트로 관통하는 균열을 제어하기 위해서는 하중 직하부에서의 데크 플레이트의 국부적인 변형을 제어하는 것이 효율적인 것으로 판단된다. 데크 플레이트의 국부적인 변형 제어에 가장 중요한 변수로는 데크 플레이트 두께이므로 다음 절에서 데크 플레이트 국부 변형 제어를 목적으로 두께를 변수로 하는 해석적인 연구결과에 기초한 합리적인 데크 플레이트 두께를 도출하고자 한다.

### 3. 데크 플레이트 두께 증가에 따른 피로성능 개선

2장에서 종리브와 데크 플레이트 연결부의 피로손상 원인을 분석해 본 결과 데크 플레이트와 종리브 연결부의 피로균열 발생원인은 데크 플레이트의 국부 변형에 의한 응력집중이다. 이에 따른 피로균열 제어를 위하여 三木 등(1995)은 대형시험체의 피로실험과 국부적인 구조해석을 통하여 데크 플레이트-종리브의 용접시 종리브 판두께의 75%이상의 용입을 확보하면 데크 플레이트의 두께를 관통하는 피로균열의 위험성을 감소시킬 수 있다는 것을 밝혀냈다. 그러나 이종관 등(1999)에 의하면 데크 플레이트-종리브의 용접시 종리브 판두께의 75%이상의 용입을 확보하더라도 시험체에서 데크 플레이트를 관통하는 균열이 보고 되었고, 또한 네델란드에서도 현재 도로교 설계기준에서 최소두께로 규정하고 있는 14mm의 두께에서 종리브와 데크플레이트 연결부에 피로균열이 보고된 사례가 있다. 따라서 본 장에서는 데크 플레이트를 관통하는 균열을 제어하는 방법으로 데크 플레이트의 국부변형에 의한 응력집중제어에 유효한 데크 플레이트 두께 증가를 변수로 데크 플레이트 상면 최대 주응력을 비교함으로써 합리적인 두께를 제안하였다.

#### 3.1 대상 교량 및 변수 조건

대상교량은 기존과 같이 그림 1의 남향대교 소블럭을 대상으로 하였으며, 데크 플레이트 두께 증가에 따

른 영향을 분석하기 위하여 두께를 12mm, 13mm, 14mm, 15mm, 16mm, 17mm, 18mm, 19mm, 20mm의 총 9개의 데크 플레이트 두께 변수로 해석적 연구를 수행하였다.

### 3.2 재하 조건 및 응력 관측점

종리브와 데크 플레이트 연결부의 그림 2와 같은 데크 플레이트 루트부에서 응력집중에 의한 데크 플레이트 관통 균열 제어를 위한 합리적인 데크 플레이트 두께 제안을 위하여 2.1절에서 데크 플레이트의 응력집중이 데크 플레이트의 국부적인 변형의 원인인 것을 고려하여 하중 재하를 가로보 사이의 가운데 횡리브에 대하여 그림 6과 같이 재하하였다. 그리고 응력 관측점은 종리브와 데크 플레이트의 연결부가 주요 대상부이므로 그림 6의 측정점을 대상으로 하였다.

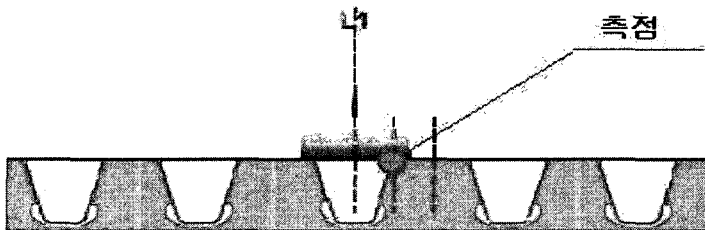


그림 6. 데크 플레이트의 하중 재하 조건 및 응력 관측 지점

### 3.3 해석 결과 및 고찰

현재 국내 설계기준에서는 데크 플레이트의 최소 두께가 14mm로 되어 있으므로 두께 14mm를 기준으로 데크 플레이트와 종리브 연결부의 피로 강도 등급을 한 단계 향상시킬 수 있는 두께를 제안하고자 한다.

피로 설계 곡선에서는 일반적으로 이음 1등급의 기본 허용 응력 범위의 차이를 공칭응력을 대상으로 약 25%로 하고 있다. 한편 피로설계에서 피로등급 데이터의 공칭응력은 대부분 축하중 상태에서의 데이터를 사용하고 있는데, 축하중 상태에서의 공칭응력은 그림 7과 같이 그 자체가 주응력이다. 또한, 실제 피로균열은 주응력에 직각 방향으로 발생하므로 주응력이 저감된다면 피로 내구성이 향상되어 주응력 25% 저감시 피로균열 발생확률도 25% 저감되는 관점에서 피로등급 평가를 주응력을 사용하여 실시하였다. 따라서 표 2에서 14mm를 기준으로 응력 저감 효과가 25%되는 데크 플레이트 두께는 16mm임을 알 수 있다. 또한 그림 8에서 나타난 것과 같이 데크 플레이트 두께가 15mm~16mm를 기점으로 응력 저감 효과가 달라지는 것을 고려하면 강바닥판의 데크 플레이트와 종리브의 연결부 피로등급을 한단계 향상시키고, 자원의 효율적 사용이란 측면에서 16mm은 적절할 것으로 판단된다.

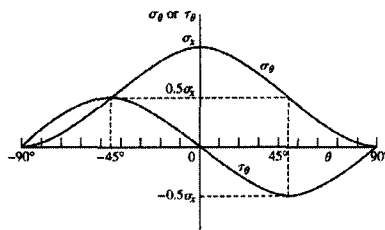


그림 7. 축하중 상태에서의 경사단면 응력

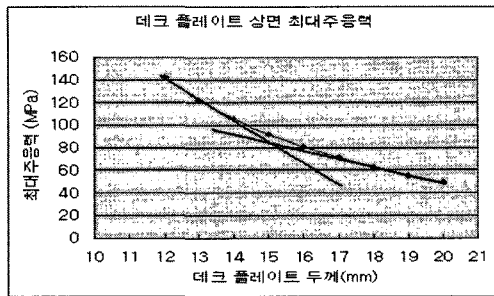


그림 8. 데크 플레이트 두께에 따른 최대 주응력

표 2 데크 플레이트 상면 최대 주응력 (MPa)

두께	데크 플레이트 상면 최대 주응력	14mm기준 비율
12mm	142.2	-
13mm	122.2	-
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%

이로부터 강바닥판의 데크 플레이트 피로성능 향상을 목표로 데크 플레이트 두께를 16mm를 제안한다. 그러나 이종관 등(1999)의 연구에서는 데크 플레이트가 19mm에서 23ton재하시 400만 Cycle에서 피로균열이 하중 직하부에서 발생하였으나 균열의 크기가 매우 작으며 진전속도가 현저히 낮아 구조적으로 안정하다고 판단하고 데크 플레이트 두께로 19mm를 제안하였었다. 그러나 충격계수를 고려한 1등급의 축하중이 대략 12ton, 일본의 피로하중이 10ton, 그리고 실제 교통하중을 고려할 때 23ton의 축하중은 비현실적으로 판단된다. 따라서 16mm와 19mm의 데이터를 선형관계로 가정하고 하중과 응력 저감효과를 관계지어 추론하면, 14mm기준에서 16mm에 대한 19mm의 응력 저감효과는 2배이고, 또한 하중을 23ton에서 12ton으로 1/2배 하면, 23ton하중하에 19mm데크 플레이트 결과는 12ton하중하에 16mm데크 플레이트와 동일할 것으로 판단된다. 따라서 16mm의 데크 플레이트 두께가 타당할 것으로 판단된다.

또한 14mm에서 16mm로 데크 플레이트의 두께가 증가될 때 그에 따른 강재가격의 증가는 후판이 12.0 ≤ T ≤ 20.0에서는 톤당 가격이 동일하기 때문에 두께 증가에 따른 가격 증가는 총 공사비를 기준으로 미약할 것으로 판단된다. 실제 100m×10m의 면적을 대상으로 서울기준으로 비교해 본 결과 15.7ton이 증가하여 공사비는 약 10,676 천원의 증가가 발생하는 것으로 나타났다.

이상 구조적으로나 경제적인 데크 플레이트 두께는 16mm가 합리적임을 알 수 있다. 향후 연구에서는 종리브-횡리브 연결부의 피로강도 내구성 향상을 위하여 중요한 인자인 슬릿트 곡률부의 변화와 보강상세(벌크 헤드 플레이트, 수직리브)부착에 의한 효과를 검증할 것이다.

#### 4. 결론

강바닥판 종리브와 데크 플레이트 연결부의 피로손상원인과 합리적인 데크 플레이트 두께는 다음과 같다.

1) 강바닥판 종리브와 데크 플레이트 연결부의 피로손상 원인은 하중직하부에서의 데크 플레이트의 국부적인 변형이 원인이 되어 응력 집중이 발생한다.

2) 강바닥판 데크 플레이트 두께가 증가할수록 데크 플레이트에는 응력 저감효과가 발생하나, 주응력 범위가 25%저감되는 데크 플레이트 두께인 16mm을 기존 실험 보고와 비교해 추론해 보면 구조적으로 안정될 것으로 판단되며, 또한 15mm~16mm에서 응력 저감효과가 둔화되고, 데크 플레이트 두께 증가에 따른 공사비의 증가가 미약하므로 데크 두께는 16mm가 적당할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 이루어진 것으로 관계자 여러분께 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

#### 참고 문헌

- 건설교통부(2000), 도로교 설계기준
- 건설교통부(1997), 강도로교 상세부 설계지침
- 건설교통부(2001), 남해대교 정밀안전진단보고서
- 남광현(2001), "강상판의 피로설계", 과학기술
- 이종관, 이춘학, 윤태양, 장승필(2001), "강바닥판의 데크 플레이트와 종리브, 횡리브 용접부의 피로강도에 대한 실험". 대한토목학회 2001 학술발표회 논문집
- 한국도로공사(2000), 서부산 낙동강교 정밀안전진단보고서
- Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc. (2004). ABAQUS/Standard User's Manual. ver 6.5
- Hisatada Suganuma(2005), "Development of orthotropic steel deck system with high fatigue resistance", doctoral dissertation.