

강바닥판교의 설계 및 시공성 향상방안 : 강바닥판교 3차원 실물 모형체의 피로강도

Improvement of the Design and Construction Technique of Orthotropic Steel Deck Bridges : Fatigue Strength of Three Dimensional Full-scaled Model

오 순 택¹⁾

Oh, Soon Taek

요 약 : 본 연구는 현재의 강도로교가 대규모화, 장기간화 되어가는 경향에 비추어 사용이 증대될 것으로 기대되는 강바닥판교에서 기존에 발생하는 문제를 최소화하여 최적의 강바닥판 시스템을 개발하기 위한 연구의 일부분으로 수행되었다. 이를 위하여 국내외의 여러 가지 종리브 횡리브 연결 상세 중, 유한 요소 해석 결과를 분석하여 국내의 강도로교 상세부 설계지침 상에서 제시하고 있는 폐단면 종리브 표준 형태와 유럽에서 널리 사용되고 있는 토끼형(rabbit type) 상세를 대상으로 개선 상세가 적용된 3차원 실물 모형체를 제작하여 정적 및 일정 진폭 피로 실험을 수행하였다. 강바닥판 시스템에서 흔히 나타나는 스칼럽 하부 곡률부에서의 균열이 전혀 발생하지 않은 것으로 보아 내부 다이아프램의 효과가 충분히 검증되었다. 또한 국내형 상세와 유럽형 상세의 경우 피로강도 측면에서는 큰 차이를 보이지 않았으나 용접 끝단의 마무리가 피로강도에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 스칼럽의 형상, 내부 다이아프램 설치 및 완전 용입 용접 등의 효과는 피로강도를 부분적으로 향상시켰지만, 피로강도를 더욱 향상시키기 위해서는 용접의 품질 관리 방안이 강구되어야 할 것으로 판단된다. 실험에서 얻어진 결과는 실제 강바닥 설계를 위한 최적의 상세에 적용시키고자 하였다.

ABSTRACT : This study was conducted to improve the design and construction technique of orthotropic steel-deck bridges. After conducting an F.E.M. analysis of the various rib types of the connection details, static and fatigue tests were conducted, using a three-dimensional, full-scaled, orthotropic, steel-deck-plate model with internal diaphragms, to check the fatigue strength depending on the types of details. The model structure was made of two types of longitudinal ribs: the domestic standard and the European rabbit types. The fatigue strength of the steel-deck system was found to have improved through the installation of an internal diaphragm, as no cracks were found on the bottom round part of the scallop with a diaphragm. There were no differences between the domestic and the European types of details in terms of fatigue strength. Therefore, it was concluded that the fatigue strength may be partially influenced by the shape of the scallop and by the installation of an internal diaphragm, but it can be improved more significantly according to the quality of the welding that will be done.

핵심용어 : 종리브, 횡리브, 내부 다이아프램, 면내 거동, 피로 실험

KEYWORDS : longitudinal rib, transversal rib, internal diaphragm, in-plane behavior, fatigue test

1. 서론

강바닥판 교량은 종리브와 횡리브로 강재 바닥강판을 보강하여 바닥판으로 사용하고 그 위에 포장(surfacing)을 한 교량으로서 철근 콘크리트 바닥판을 사용하는 경우와 비교해 중량이 1/2~1/3 정도 밖에 되지 않으며, 주거터와 함께 일

체로 거동하게 되므로 일반교량과 비교할 때, 같은 기간과 교폭, 같은 하중하에서 재료를 상당히 절감할 수 있다고 알려져 있다(교량공학, 구미서관, 조효남 저). 또한, 제작의 거의 전 과정을 공장제작하게 되므로 품질의 신뢰성을 높일 수 있고, 현장 조립의 간편성과 교량가설 후의 콘크리트 타설 등의 공정이 없으므로 그 만큼 공기를 단축시킬 수 있을 뿐 아니

¹⁾ 교신저자, 정회원, 서울산업대학교 구조공학과 교수, 공학박사
(Tel: 02-970-6576, Fax: 02-975-6002, E-mail: alicia@snut.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2006년 8월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

라 상대적으로 형고를 낮출 수 있어 미관을 향상시키는 등 많은 장점을 가지고 있다. 그 동안에는 강바닥판교가 주로 용접구조임에 비추어 용접기술의 미숙 및 기술력의 부족으로 국내에서의 시공실적은 아주 미미한 편이나, 최근 용접 기술의 발달과 가설 공법 등 기술력의 향상과 더불어 현대의 강도로교가 대규모화, 장지간화 되어가는 경향에 따라 강바닥판교량은 충분한 경쟁력을 확보할 수 있으며 그 사용이 증대될 것으로 기대된다.

강바닥판은 비교적 얇은 강판을 사용하고, 중·횡리브 및 가로보 등과 용접을 이용하여 조립된 구조이기 때문에 각 부재의 응력 상태가 매우 복잡하고 용접 결합과 변형이 발생할 가능성이 존재한다. 특히, 종리브와 횡리브 용접부에서는 큰 응력집중과 피로균열이 발생되며 이는 기하학적으로 불안정한 형상이 주요 원인이다. 이러한 배경을 바탕으로 국내외의 여러 가지 종리브·횡리브 연결 상세 중, 유한 요소 해석 결과를 분석하여 국내의 강도로교 상세부 설계 지침(1997)상에서 제시하고 있는 폐단면 종리브 표준 형태와 유럽에서 광범위하게 쓰이고 있는 토끼형(Rabbit Type)상세를 대상으로 개선 상세가 적용된 3차원 실물 모형체를 제작하여 정적 및 일정 진폭 피로 실험을 수행하였고, 이 결과를 토대로 실제 강바닥판 설계를 위한 최적의 상세에 대한 결론을 적용시키고자 한다.

2. 기본 개념

하중을 받는 강바닥판교의 바닥판 응력은 교량구조 중에서 바닥판의 여러 가지 거동이 조합된 결과로 발생한다. 이들 거동의 결과로 생기는 응력은 서로 상관관계에 있으며, 명확한 이해와 설계상의 편의를 위하여 세 가지 기본 구조 시스템으로 구분한다. 이러한 전체적인 거동(global behavior)과 더불어 피로 취약부인 종리브·횡리브 연결부에서는 더욱 복잡한 거동 양상을 보이게 된다. 종리브·횡리브 연결부의 횡리브 측에서는 횡리브 내 면내 전단과 휨에 의한 변형, 그리고 종리브의 비틀림에 의한 횡리브의 면내 변형과 횡리브의 면외 방향 회전으로 인한 면외 응력이 발생된다. 이러한 세 가지 면내 거동에 의하여 종리브 하단에 압축, 인장이 반복되어 교번되는 응력상태를 보이게 된다. 횡리브의 면내 거동은 위에서 설명한 것과 같이 전단과 휨모멘트에 의한 거동이 복합적으로 작용되어 나타나지만, 휨에 의한 인장, 압축 거동 보다는 종리브의 비틀림에 의한 거동이 지배적인 것을 알 수가 있다. 횡리브의 면내 거동에 의한 응력비는 하중조건, 구조물의 형상 특히 횡리브의 강성에 의하여 달라지게 된다.

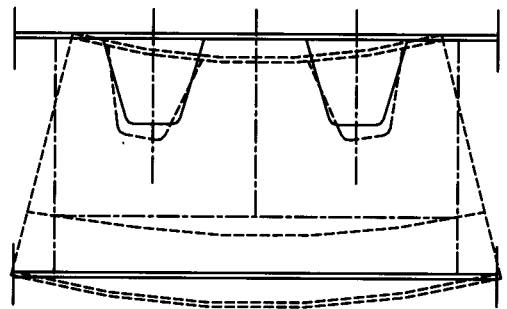


그림 1. 휨에 의한 변형

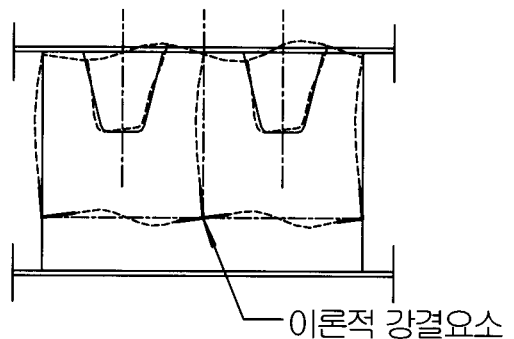


그림 2. 디스토션에 의한 변형

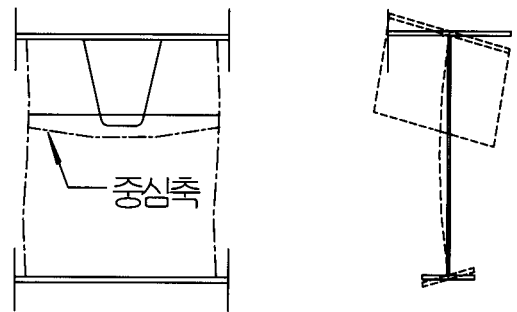
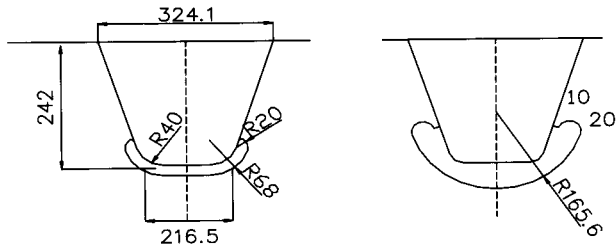


그림 3. 횡리브의 면외회전

기 건설된 강바닥판의 피로손상 사례를 종합해 보면, 피로 손상 부위 중 종리브·횡리브 연결부의 상하부 스캐럽부가 큰 응력집중의 결과로 피로에 매우 취약한 부분이다. 상부 스캐럽의 경우, 최근에 종리브, 횡리브, 바닥강판 연결부 상부 스캐럽이 제거된 부분 개선 상세의 적용으로 인해 피로균열의 위험성이 많이 감소한 반면, 하부 스캐럽의 피로균열은 강바닥판교 전체의 피로 수명을 좌우할 정도로 가장 중요한 피로 균열 취약부라 할 수 있다. 따라서, 이 부분의 응력 절감 및 연결 상세 개선을 통해 피로강도를 높이는 것이 강바닥판교 전체의 피로 성능을 향상시키는 주요한 방법이 될 수 있을 것이다.

3. 시험체의 제작 및 형상

3.1 종리브·횡리브 연결부 상세



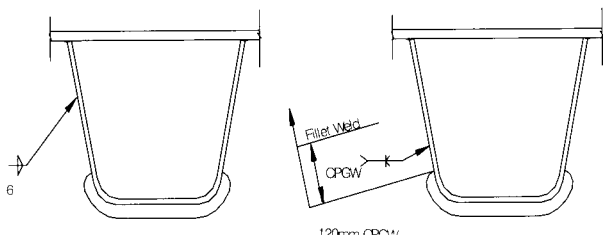
(a) 국내 상세 (b) 유럽 상세

그림 4. 종리브·횡리브 연결 상세

그림 4는 선행 연구 결과(U리브를 이용한 강바닥판의 최적 상세에 관한 해석적 연구, 진진수·배두병, 2000, 대한토목학회)를 바탕으로 제작 시 실제 적용된 종리브·횡리브 하부 스캐럽 상세이다. 그림 4(a)는 국내에서 쓰이는 가장 대표적인 단면이며, 강도로교 상세부 설계지침(1997)의 표준단면 형상을 따르고 있다. 그림(b)은 유럽 지역에서 광범위하게 쓰이는 상세로 "Rabbit Type"이라고 불리우기도 한다. 두 단면 모두 응력집중 현상을 막기 위해 스캐럽 상하부의 곡률이 변하는 형상이며, 현재 사용되는 가장 대표적인 표준 단면이다.

3.2 종리브·횡리브 연결부 용접 상세

본 연구에서는 하부 스캐럽 상부 횡리브측 용접부가 피로균열에 가장 취약한 곳이라 판단하고 이 부분의 피로강도를 향상시키는 데 중점을 두었으며, 이 부분의 용접을 기존의 필렛 용접이 아닌 그림 5와 같은 120mm 완전 용입 용접과 필렛 용접의 조합을 사용하였다.



(a) 기존 상세 (b) 개선 상세

그림 5. 종리브·횡리브 용접부 상세

실제 시험체를 용접할 때는 V형 개선의 어려움 때문에 그림 6과 그림 7에서와 같이 한 쪽면 개선 후 반대편을 백가우

징(back gouging)하는 방법을 통해 V형 완전 용입 용접의 효과를 주었다. 그러나 용접비드로 인해 상부의 곡률이 확보되지 못하는 현상을 보였으며, 이는 곧 큰 응력 집중의 결과로 이어질 것이다. 이에 따라 2차에 걸친 그라인딩 작업을 통해 곡률 확보에 주력하였으나, 용접 이전의 완전한 형상을 얻지는 못하였다. 이러한 결과를 비추어 볼 때, 끝돌림 용접을 통해 부분적인 피로강도 향상을 높이는 방법은 정확한 곡률 확보가 뒤따라야 가능할 것으로 사료된다.

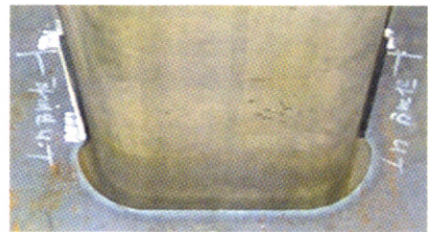


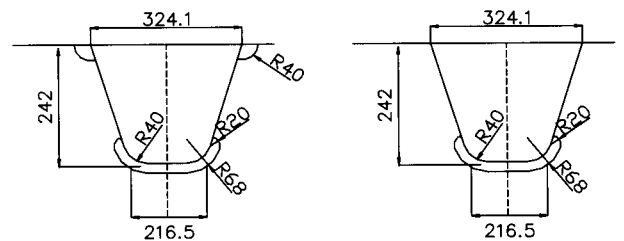
그림 6. 종리브·횡리브 용접부 개선 형상 - 한 쪽면 개선 형상



그림 7. 종리브·횡리브 용접부 개선 형상 - 반대편 백가우징 상태

3.3 종리브·횡리브 바닥강판 연결부

기존의 강바닥판에서는 그림 8과 같이 종리브·횡리브 바닥강판 연결부에 용접선이 중첩되는 것을 피하기 위해 상부 스캐럽을 두고 있다. 교차 용접이 내재 잔류 응력과 용접 변형 등으로 인해 바람직한 상세는 아니지만, 최근의 용접 기술 발달과 더불어 이는 충분히 개선 가능한 상세로 판단된다.



(a) 기존 상세 (b) 개선 상세

그림 8. 상부 스캐럽 기존 상세와 개선 상세

이 부분에 상부 스캘럽을 제거하였을 경우 단면 변화로 인한 응력 집중 현상이 없어지는 장점이 있지만, 바닥강판과 종리브 용접 루트부로부터 피로균열이 발생하여 바닥강판으로 진전, 관통하는 위험성이 있는 것으로 밝혀졌으며, 더욱이 이러한 균열은 실구조물인 경우 포장 등으로 인해 발견이 극히 곤란하기 때문에 매우 위험한 균열로 간주된다. 시험체 제작 시 이 균열의 위험성을 감소시키기 위해 그림 9와 같이 바닥강판 종리브 용접 시 종리브 관두께의 80% 이상의 용입을 확보하여 적용하였다.

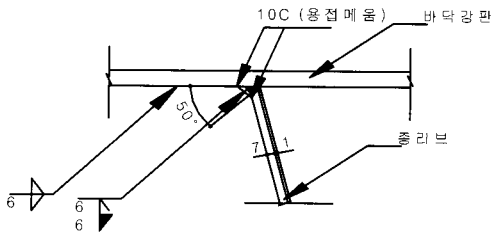


그림 9. 바닥강판 종리브 용접 상세

3.4 내부 다이아프램

시험체에 설치된 내부 다이아프램은 직선형과 곡선형으로 나뉜다(그림 10, 그림 11). 직선형은 상부 바닥강판에서 2.5cm 떨어진 곳에서 스캘럽 끝단까지 설치된 것과 스캘럽 끝단에서의 응력 집중을 피하기 위해 스캘럽 끝단에서 2cm 정도 연장된 두 가지 경우로 부착되었다. 곡선형은 곡률을 주어 처리한 형상이다. 두 내부 다이아프램 모두 종리브와 용접되는 부분에 곡률을 주어 부드러운 형상으로 용접되게 하였으나, 용접 시 비드 두께로 인해 곡선 처리된 부분의 효과는 없을 것으로 판단된다.



그림 10. 직선형 내부 다이아프램



그림 11. 곡선형 내부 다이아프램

3.5 시험체의 형상

그림 12는 정적 및 일정 진폭 피로 실험 수행을 위해 제작된 3차원 실물 시험체의 형상이다. 앞에서 언급한 모든 개선 사항이 반영된 시험체이며, 하나의 횡리브 단면에 설치된 5개의 종리브 중 3개는 국내 상세, 2개는 유럽 상세를 적용하였다. 또한, 4개의 횡리브 중 각각 2개씩 직선형과 곡선형 내부 다이아프램을 설치하였다. 직선형 내부 다이아프램이 설치된 횡리브 2의 국내 상세에는 높이가 2cm 연장된 내부 다이아프램이 설치되었다.

횡리브의 간격은 실교량에서 적용되고 있는 간격과 유사하게 2.5m를 취하였고, 3차원 거동을 알아보기 위해 3경간 연속체로 제작하였다. 기존의 국내 강바닥판 피로 실험이 주르 횡리브 하나만을 잘라낸 국부 모델을 대상으로 실시되는데 이러한 경우에는 횡리브의 면내력만을 파악할 수 있으므로, 실제 강바닥판의 거동을 정확히 모사한다고 볼 수 없다. 횡리브의 면외 거동은 종리브 횡리브의 강성 차이와 경계 조건에 따라 달라질 수 있지만, 이를 통해 강바닥판의 거동을 정확히 모사하기 위해서는 3차원 실물 모형체의 제작이 필요한 것으로 판단된다.

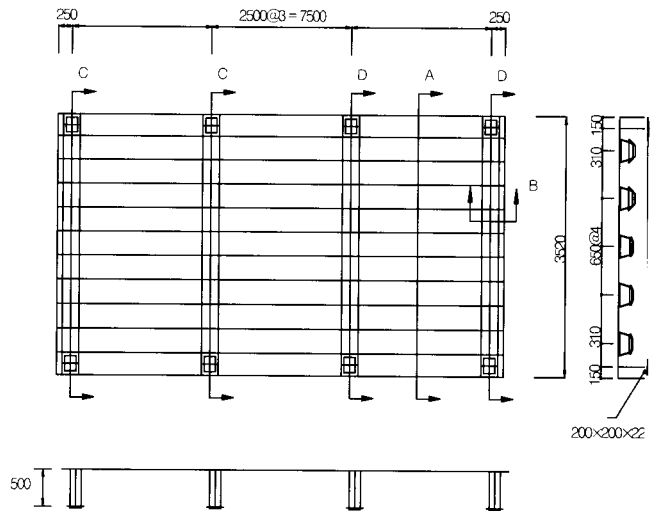


그림 12.(a) 시험체의 형상

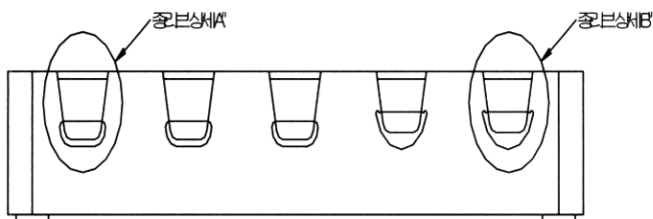


그림 12.(b) 단면 형상(단면 C-C)

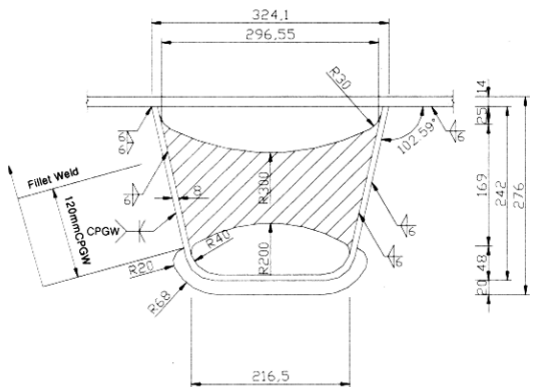


그림 12.(c) 종리브 상세 A"

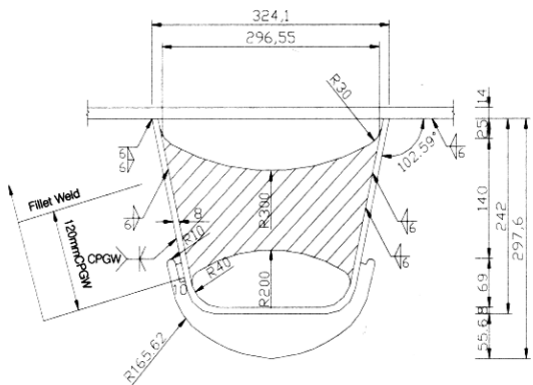


그림 12.(d) 종리브 상세 B"

지점 조건은 설계 시 가정과 횡리브의 거동 방향을 고려하여 8지점 형태로 배치하였고, 가력 프레임을 이용 응력범위 60ton의 하중을 재하판을 통해 각각 15 ton씩 20×50cm 등분포 하중으로 재하하였으며 최소 하중은 10톤, 최대 하중은 70톤이다.

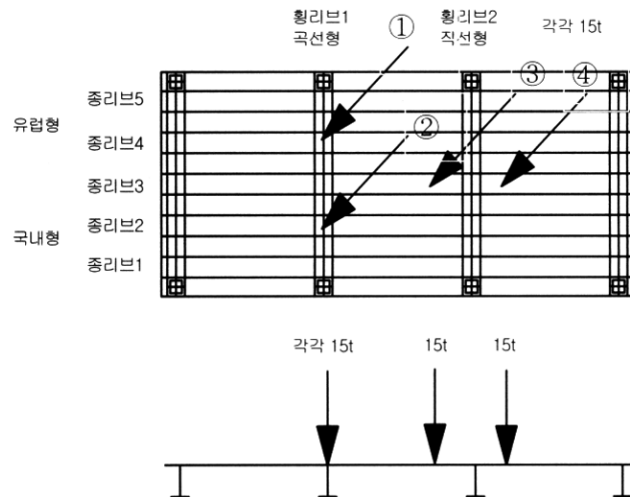


그림 13. 시험체의 정적실험

횡리브 상에 가장 큰 면내 응력과 면외 응력이 발생하도록 하중을 재하하였다. 하중 ①과 ②는 횡리브 1의 2, 4번 종리브 중앙에 재하판이 위치한 경우이며, 재하판 중심간 거리는 1.3m이다. 하중 ③과 ④는 간단한 격자 해석을 통해 횡리브 2에 가장 큰 면외방향 회전 변위가 발생하는 상황을 찾아낸 경우이며, 시험체의 가력 조건을 고려해 횡리브 2 중앙 종리브에서 중방향으로 0.65m 떨어진 곳에 재하한 경우이다.

게이지와 변위계는 총 125개가 부착되었으며, 횡리브 스캐럽 상부 응력 집중부는 로켓을 양면(Back-to-back)으로 부착하였다. 횡리브 스캐럽 상부를 제외한 모든 게이지는 용접단에서 1.5cm 떨어진 곳에 부착하였으며, 횡리브 스캐럽 상부는 응력 집중의 영향을 보기 위하여 용접단과 곡률부를 고려해 0.5cm 떨어진 곳에 부착하였다.

4. 정적 실험

4.1 정적 실험 개요

시험체의 정적 거동과 함께 거치 상태 및 응력 분포 경향을 알아보고 피로 응력 범위를 결정하기 위하여 피로 실험과 동일한 조건으로 정적 실험을 실시하였다. 정적 실험은 크게 피로 시작 전과 매 50만회 가진 후의 시험으로 나뉘어지며, 피로 시작 전 실험은 세 가지 하중 경우에 대해서, 매 50만회 정적실험은 하중 ③으로만 실시되었고 모든 계측은 3회 평균 값을 사용하였다.

4.2 실험 조건 및 게이지 부착

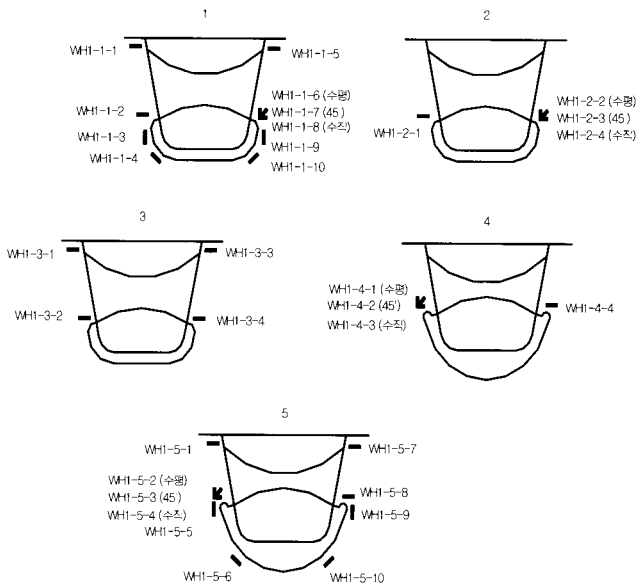


그림 14(a). 횡리브 주요 게이지

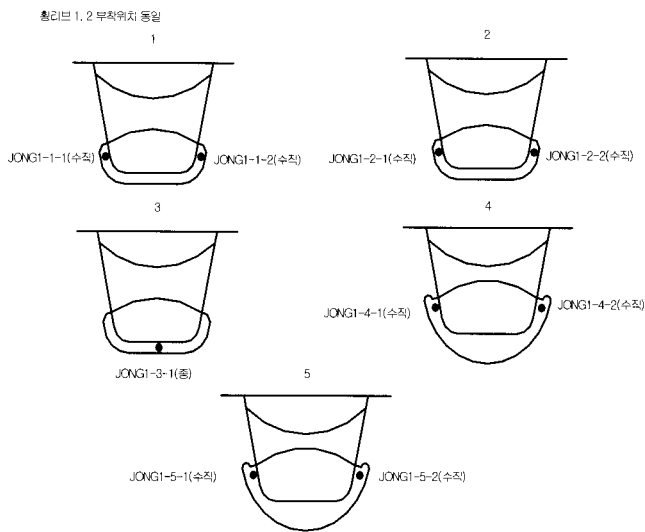


그림 14(b). 종리브 주요 게이지



그림 14(c). 바닥강판 주요 게이지

횡리브1 곡선형 횡리브2 직선형

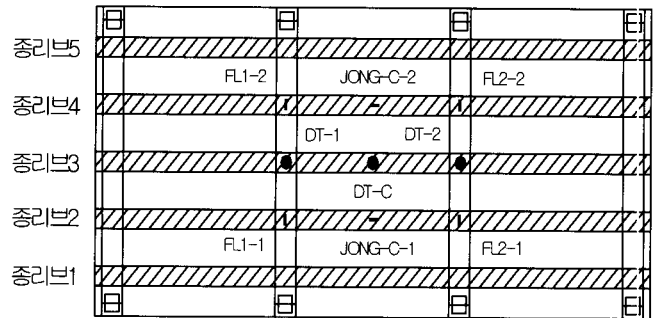


그림 15. 글로벌 게이지 및 처짐계

4.3 정적실험과 유한요소해석 결과와의 비교

시험체의 구조해석은 범용 구조해석 프로그램인 LUSAS를 사용하였으며 모든 요소는 Shell 요소(QTS4)를 사용하였고, 탄성계수는 $E = 2.1 \times 10^6 (kg/cm^2)$, 강제 포아송비는 0.3을 적용하였다. 지점조건은 횡리브 양쪽 끝단에 힌지-롤러 지점을 적용하였으며, 하중은 정적 실험의 하중을 면하중으로 재하하였다. 좌표축은 횡리브 방향을 X축, 수직 방향을 Y축, 전체 모델의 종방향을 Z축으로 정의하였다. 해석 결과는 크게 세 가지로 구분하여 횡리브, 종리브, 바닥강판에 대한 항목으로 구분하여 분석하였다.

4.3.1 횡리브 응력분포

그림 16과 그림 17은 횡리브 응력 집중부의 해석치와 실측치를 비교한 것이다. 횡리브상에 인장 응력이 발생하는 부위에는 45° 로켓을 부착하였기에 인장부에서는 최대주응력을 압축부에서는 X축 방향응력을 비교하였다. 일축 게이지를 붙인 압축부의 응력값의 절대치는 최소주응력보다는 작지만, 이 부분의 응력 성분중 X방향 응력이 지배적 영향을 미치기 때문에 동일한 그래프 상에서 비교하였다. 그림에서 보듯, 실측치에서도 인장, 압축이 교번되는 양상이 나타났으나, 1, 2번 횡리브 측의 실측치가 다소 크게 나왔으며, 종리브와 횡리브 연결부에 불명확한 응력 집중 현상이 나타날 수 있다. 또한 시험체 제작 시 많은 용접량에 따른 변형의 결과와 횡리브의 곡률 확보 미비에 대한 영향도 포함된 것으로 판단된다.

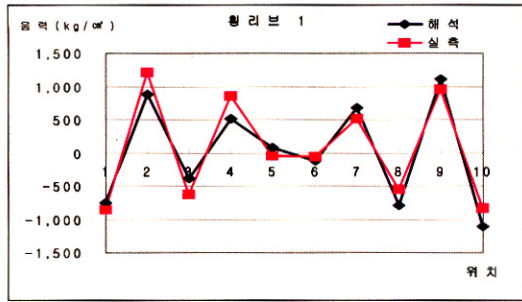


그림 16. 횡리브1 응력 집중부 실측, 해석응력 비교

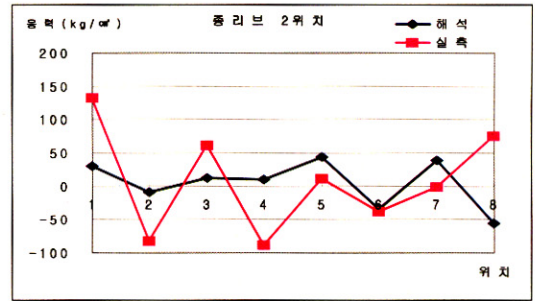


그림 19. 종리브와 횡리브 용접부 종리브2측 실측, 해석 응력 비교

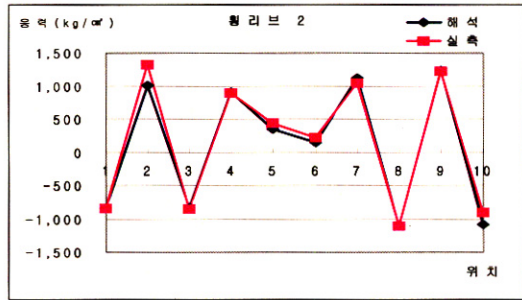


그림 17. 횡리브2 응력 집중부 실측, 해석응력 비교

4.3.3 바닥강판 응력분포

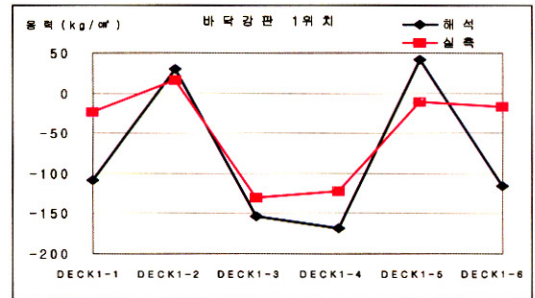


그림 20. 바닥강판1 실측, 해석 응력 비교

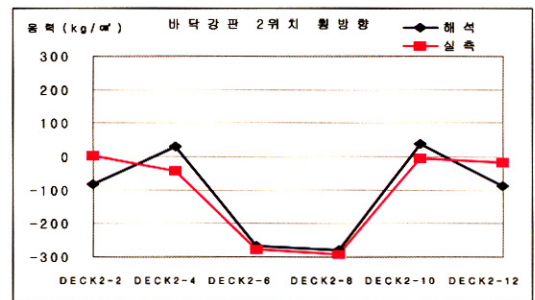


그림 21. 바닥강판2 실측, 해석 응력 비교

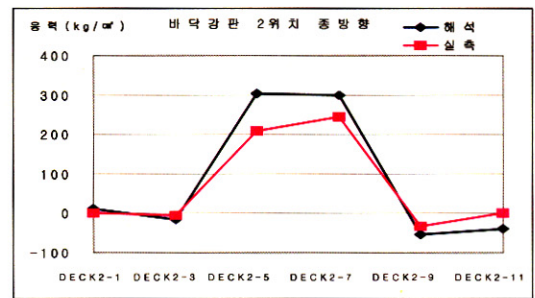


그림 22. 바닥강판3 실측, 해석 응력 비교

4.3.2 종리브 응력분포

그림 18과 그림 19는 종리브 횡리브 연결부 종리브측의 실측, 해석 응력을 비교한 것이다. 이 부분도 응력 집중의 결과가 부분적으로 나타나는 곳이라 실측치가 해석치와 상당한 차이가 있음을 볼 수 있다. 종리브 1의 경우는 그 분포가 상당히 유사함을 알 수 있지만, 종리브 2의 경우에는 응력의 분포 형상 자체가 상당히 다른 것을 알 수 있다.

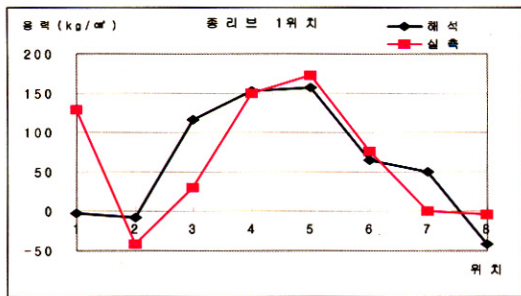


그림 18. 종리브와 횡리브 용접부 종리브1측 실측, 해석 응력 비교

바닥강판에는 주로 횡리브 종리브와의 연결부에 게이지를 부착하였다. 횡리브 1에는 면내력을 주로 관찰하기 위해 X축

방향으로 일축 게이지를, 횡리브 2에는 면내, 면외력을 보기 위해 X축, Y축 방향 이축 게이지를 부착하였다. 그림 20, 21, 22에서 보듯 응력 분포는 전반적으로 잘 일치하는 편이고, 이 부분의 응력은 중앙 종리브 부분을 제외하고는 전체적으로 상당히 작은 값을 나타내고 있다.

5. 일정 진폭 피로 실험

5.1 피로 실험 개요

피로 시험에 가해진 하중은 정적 실험의 하중과 같으며, 글로벌 게이지 6개와 처짐계 3개의 거동 변화를 매 25만회마다 측정하였다. 일반 시편 실험과는 다르게 위치별로 발생 응력이 다르기 때문에 가장 큰 응력이 발생하는 횡리브를 기준으로 평가하였다. 가진 횟수는 150만회 가진 후 1차 실험을 종료하였으며, 추가로 103만회를 가진하여 총 가진 횟수는 253만회이다.

균열탐상은 육안관측과 침투탐상을 병행하였으며, 매 두 시간마다(58,800회) 관찰하였다. 용접선을 따라 진전되는 균열을 제외하고는 40mm 정도의 길이에서 스탑홀(stophole)을 천공하였으며, 내부 다이아프램의 균열은 피로 실험 종료 후 시험체를 절단하여 관측하였다.

5.2 피로 균열 유형

전체 253만회 피로실험의 결과, 총 5개의 피로균열이 발생하였다. 순서별로 첫 번째 침자는 횡리브1, 횡리브 2 구분, 두 번째 침자는 종리브 번호(국내형 1,2,3, 유럽형 4,5), 세 번째 침자는 좌우를 나타낸다.

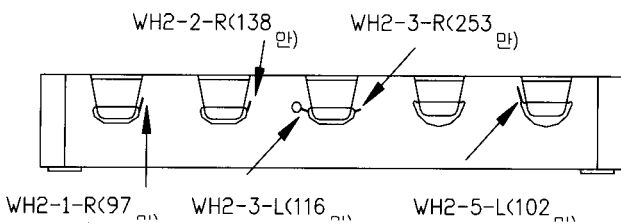


그림 23. 균열 분포도

본 실험에서 피로 실험의 주요 균열은 모두 횡리브 응력 집중부에서 발생하였다. 주로 면외력이 많이 작용하는 횡리브 2에서 발생하였으며, 횡리브 1에서의 균열은 변형을 측정치로는 피로균열이 발생된 것으로 판단되나, 액체 침투로는 균열을 확인할 수 없었다.

가장 먼저 발생한 균열은 WH2-1-R이었고 97만회에서 발

생하였다. 발생시 균열 길이는 16mm였고, 횡리브 모재와 용접부 끝단 그라인딩을 실시한 부분에서 시작되었으며, 용접선을 따라 253만회에서 62mm까지 진전되었다. 이 부분은 앞서 언급했듯이, 종리브·횡리브 완전 용입 용접으로 인해 곡률이 파괴된 곳이며, 그라인딩을 통해 곡률 확보에 주력한 곳이다. 대부분의 피로균열은 이 곡률부 용접부 끝단에서 발생하였으며, 이 곳의 후처리 정도가 피로균열에 상당히 영향을 미치는 것으로 판단된다.

두 번째 균열은 WH2-5-L이고 102만회에서 발생하였다. 이 균열은 유럽형 상세의 상부 곡률부 끝단에서 발생하였으며, 횡리브 모재를 따라 용접선과 평행하게 67mm까지 진전되었다. 본 균열이 발생한 위치가 용접부는 아니지만, 응력 집중의 정도가 가장 큰 곳이었으며, 용접부 뿐 아니라 이 부근에서도 피로균열이 발생할 수 있음을 나타낸다고 할 수 있다. 세 번째 균열은 WH2-3-L이고 116만회에서 발생하였다. 이 균열은 여타 균열과는 다르게 용접선을 따라 진전된 것이 아니라 상향 10° 각도로 북부판을 향해 진전되었고, 150만회에서 37mm 균열이 진전된 후 21mm 스탑홀을 천공하였으며, 스탑홀 천공 후 253만회까지 균열은 진전되지 않았다.

이와 유사한 WH2-3-R 균열은 253만회에서 14mm의 크기로 관찰되었으며, 이 균열의 방향 또한 상향 10°의 각도였다. 그 외 138만회에서 WH2-2-R 균열이 발생하였으며, 이 균열의 양상은 WH2-1-R과 동일하다. 이 균열은 253만회에서 34mm까지 진전되었다.

전체적으로 균열 발생 양상을 보았을 때 대부분의 균열은 응력 집중의 정도가 크고, 결함의 가능성이 존재하는 횡리브 종리브 용접부 끝단에서 발생되었으며, 주응력 방향에 직각인 용접선 방향으로 진전되었다. 또한 대부분의 균열이 두께를 관통한 상태에서 발견되었으며, WH2-2-R과 WH2-5-L은 발견 초기에 전면과 후면의 균열 길이가 달랐으나, 10mm 정도 진전된 후 부터는 균열길이가 전후면 동일하게 되었다.

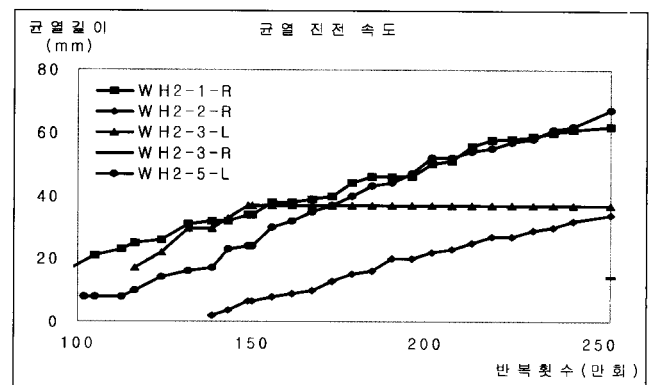


그림 24. 균열 진전 속도

표 1. 발생 피로 균열

균열	횟수	발견시 길이	최종길이
WH2-1-R	970,000	16 mm	62 mm
WH2-5-L	1,021,000	8 mm	67 mm
WH2-3-L	1,165,100	17 mm	37 mm
WH2-2-R	1,386,000	2 mm	34 mm
WH2-3-R	2,530,000	14 mm	14 mm

그림 24는 균열 진전 속도를 나타낸 것이다. 다섯 개의 균열 중 횡리브 용접선을 따라 발생한 WH2-1-R과 WH2-2-R의 균열 진전 속도는 비슷한 경향을 보이고 있다. 이에 반해 횡리브 모재 쪽으로 진전된 WH2-3-L과 WH2-5-L의 경우는 용접선 균열에 비해 그 진전 속도가 상당히 빠른 것을 알 수 있었고, 이러한 균열은 WH2-3-L의 경우에서 보듯 스탱홀을 천공하여 균열 진전 속도를 억제할 필요가 있다. 또 하나의 피로균열 발생 특징은 면외 응력이 주로 작용하는 횡리브 2에서 집중적인 피로균열이 발생한 점이다. 현재 국내외 대부분의 강바닥판 피로 실험이 면내력만이 발생하는 2차원 시험체를 대상으로 수행되고 있는 바, 대부분의 균열이 면외력이 많이 발생하는 위치에서 발견된 것은 주목할 만하다 할 수 있다.

피로 등급 산정시 용접 방법뿐 아니라, 어떤 방향으로 하중이 작용하느냐가 큰 고려 조건이 된다면, 현재의 설계 기준상 종리브 횡리브 응력 집중부 피로 등급이 여러 고려 사항 없이 단순히 D등급으로 설정된 점은 개선의 여지가 있을 것으로 판단된다. 이런 면내력과 면외력 비는 구조물의 형식과 횡리브, 종리브의 강성비, 경계조건 등에 많은 영향을 받으므로 실구조물의 면내력, 면외력에 대한 자료를 구축하고, 여러 개의 모형 시험체를 제작하여 면내력, 면외력 변수 실험을 통해, 이 곳의 피로강도에 면외력이 미치는 영향을 분석할 필요가 있을 것으로 판단된다.

그 외 피로균열이 발생할 것이라고 예상했던 종리브·횡리브 연결부 종리브측과 바닥강판 종리브 횡리브 연결부, 종리브 바닥강판 부분 용입 용접부등에서는 피로균열이 발생하지 않았다. 또한 피로균열이 발생한 횡리브 인근의 내부 다이아프램에서도 피로균열은 발생하지 않았다. 이는 주로 응력 범위를 높이고 반복 횟수를 줄인 피로 실험 방법상에 기인한 것으로 보이며, 좀 더 다양한 피로균열을 관찰하기 위해서는 응력 범위를 피로 한계 수준으로 낮추고 반복횟수를 늘리는 방법으로 피로 실험이 진행되어야 할 것으로 판단된다.

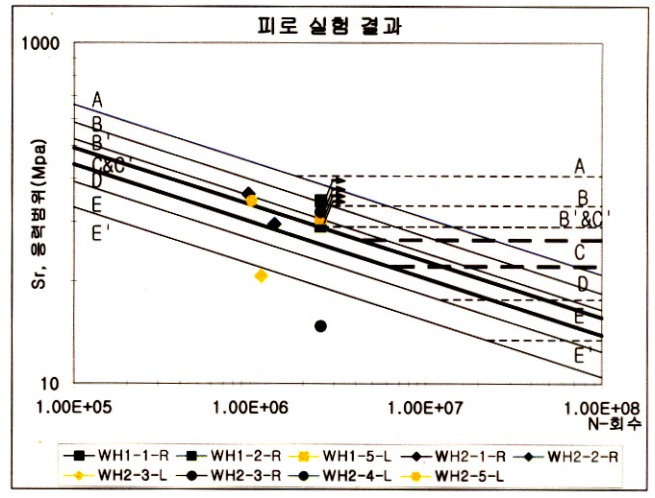


그림 25. 피로 실험 결과

피로 실험 결과를 그림 25에 정리하였다. WH2-3-R과 WH2-3-L의 균열이 여타 균열에 비해 작은 응력 범위에서 발생된 것은, 그 부위가 횡리브의 면외거동의 영향이 가장 크게 나타나는 위치에 있음을 감안할 때, 해석상으로는 명확히 나타나지 않는 변형유발 피로가 발생된 것으로 추정되고, 이는 곡률이 큰 곡선형 벌크헤드 플레이트의 적용 등으로 어느 정도 해결할 수 있을 것으로 사료된다.

6. 결론

본 실험에서는 개선 상세가 적용된 3차원 실물 모형체를 제작하여 정적 및 일정 진폭 피로 실험을 수행하였다. 이러한 실험을 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 강바닥판 시스템에서 흔히 나타나는 스캘럽 하부 곡률 부에서 균열이 전혀 발생하지 않은 것으로 보아 내부 다이아프램의 효과가 충분히 검증되었고, 스캘럽의 형상, 내부 다이아프램 설치, 완전 용입 용접 등의 효과는 피로강도를 부분적으로 향상시켰지만, C등급 이상의 강도를 갖기 위해서는 끝돌림 용접부의 품질확보와 함께 그라인딩 작업을 통한 곡률 확보 등 품질 관리 방안이 강구되어야 한다.
- (2) 실험결과 국내형 상세와 유럽형 상세의 경우 피로강도 측면에서는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 해석 결과로 보았을 때는 국내형 상세가 더 유리한 것으로 나타났지만, 국내형 상세의 경우 곡률 확보와 용접 끝단 품질관리가 잘 된 곳은 유럽형 상세보다 피로강도가 좋았으며, 그렇지 못한 곳은 피로강도가 더 낮게 나타났다. 이는 용접 끝단의 마무리가 피로강도에

큰 영향을 미침을 나타낸다.

- (3) 횡리브 응력 집중부의 곡률 확보 작업이 작업성과 비용의 증가 등으로 불가능한 경우와 끝돌림 용접을 하지 않는 경우에 대해 연구의 필요성이 제기된다. 외국의 경우 횡리브 끝단을 6mm 정도 띄우고 용접하는 경우가 있는데, 이 경우에는 곡률이 파괴되지 않는 장점과 함께 비용접 부위가 초기 균열($a_i = 6\text{mm}$)로 작용하는 단점도 있으므로 충분한 검토가 필요하다.
- (4) 피로 균열이 대부분 면외력이 많이 작용하는 횡리브 2에서 발생한 것을 비추어 볼 때, 2차원 피로 실험에 대한 고찰과 면내력, 면외력이 피로 강도에 미치는 영향에 대한 심층적인 분석이 필요하다. 변형 유발 피로 (Distortion-induced fatigue) 현상을 구조 해석 상 또는 계측을 통해서 명확하게 분석해내기는 힘들지만, 접합부에 큰 응력을 발생시킬 수 있기 때문에, 현재의 설계기준 상에서 제시하고 있는 부재 이외의 경우에도 연결부 상세 규정의 확립이 필요하다고 할 수 있다.
- (5) 유한요소해석 결과와 기존 연구 자료에서 보듯, 종리브·횡리브 연결부 응력 집중부의 응력구배는 상당히 큰 편이다. 본 실험에서는 일반적으로 널리 사용되는 방법을 적용했지만, 게이지 부착 위치에 따라 측정값이 큰 차이를 나타낼 수 있기 때문에, 이 부분의 응력을 공칭응력화 할 수 있는 방법을 강구할 필요성이 제기된다.

참 고 문 헌

전진수, 배두병(2001), U리브를 이용한 강바닥판의 최적상세에 관한 해석적 연구, 대한토목학회 2001년 학술발표회 논문집
 최용민, 배두병(2000), 박스거더교 강바닥판의 국부응력발생 모형화, 대한토목학회 2000년 학술발표회 논문집(1), pp. 635~638.
 이재혁, 이종관, 윤태양(1999), 강바닥판의 데크플레이트_종리브_횡리브 용접교차부에 대한 피로강도실험, RIST 연구논문 제 13권 제4호(1999).
 최동호, 최항용, 최준혁(2000), 강바닥판 종리브와 횡리브 교차부의 피로 거동에 대한 종리브내 다이어그램의 영향, 한국강구조학회 논문집, 제12권 제 3호, pp. 239~250
 심낙훈, 신영진, 신동구, 박영석(2000), 종리브의 비틀림에 의한 강상판 용접연결부의 피로거동에 관한 실험적 연구, 대한토목학회 2000년 학술발표회 논문집(1) pp. 349~352

최준혁, 경갑수, 최동호, 장동일(1999), 휨응력을 받는 바닥강판의 피로균열진전해석, 한국강구조학회 논문집, 제11권 4호 1999년 8월 pp. 409~416
 조효남, 정지승, 민대홍(1999), 자동화설계를 위한 강상판교의 해석모델, 한국강구조학회 논문집, 제11권 제 4호 1999년 8월 pp. 363~372
 경갑수, 요시무라, 권재봉, 박석성(1998), 영종대교에서의 강상판 용접시공시험, 한국강구조학회논문집, 제10권 4호 1998년 12월 pp. 133~141
 한국강구조학회(1998), 강구조 편람 제 4권 강도로교의 설계
 건설교통부, 대한 토목학회(1997), 강도로교 상세부 설계지침
 Mark R.Kaczinski, Frank E.Stokes, Peter Lugger, John W.Fisher(1997), Williamsburg Bridge Orthotropic Deck Fatigue Test, ATLSS Report No. 97-04.
 William J.Bocchieri, John W.Fisher(1998), Williamsburg Bridge Replacement Orthotropic Deck As-Built Fatigue Test, ATLSS Report No. 98-04.
 Paul A.Tsakopoulos, John W.Fisher(1999), Williamsburg Bridge Replacement Orthotropic Deck As-built Full-Scale Fatigue Test, ATLSS Report No. 99-02.
 Robert J.Connor, John W.Fisher(2001), Results of Field Measurements on the Williamsburg Bridge Orthotropic Deck, ATLSS Report No.01-01.
 European Coal & Steel Community(1995), Measurements And Interpretation of Dynamic Loads On Bridges-Phase 4 - Fatigue Strength Of Steel Bridges.
 European Coal & Steel Community(1999), Measurements And Interpretation of Dynamic Loads On Bridges-Eurocode 3 Part 2 - Steel Bridges - Design of Orthotropic Steel Decks.
 Ali Touran(1991), Performance of orthotropic bridge decks, Journal of performance of Constructed Facilities, Vol. 5, No. 2, 1991
 M.S. Troitsky, D.Sc.(1987), Orthotropic Bridges Theory And Design(2nd Ed.), The James F.Lincoln Arc Welding Foundation, Cleveland Ohio.
 AISC(1963), Design Manual For Orthotropic Steel Plate Deck Bridges.
 AASHTO(1998), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications
 (접수일자 : 2005. 11. 15 / 심사일 2005. 11. 29 / 심사완료일 2005. 12. 22)