

# 벌크헤드 플레이트가 부착된 강바닥판교의 피로상세 개선 연구

공병승\*

\*동서대학교 건설공학부 토목공학과

## A Study on Improvement of Fatigue Details in Orthotropic Steel Deck Bridge with Bulkhead Plate

BYUNG-SEUNG KONG\*

\*Division of Civil and Architecture, Dongseo University, Busan, Korea

**KEY WORDS :** Orthotropic Steel Deck Bridge 강바닥판교, Fatigue Test 피로실험, Fatigue Crack 피로균열, Bulkhead Plate 벌크헤드 플레이트, Secondary Stress 2차응력, Out-of-Plane Deformation 면외변형

**ABSTRACT :** An orthotropic steel deck system is widely adapted form for a long-span bridge. It has many advantages, such as the big reduction of dead weight, the simplicity for erection, and the reduction of the construction period. However, an orthotropic steel deck system requires a lot of welding work, which may result in defects and deformation of connections. Therefore, the research for the general behavior and fatigue strength of the severel details in orthotropic steel deck bridge is necessary. The fatigue failure with distortion results from secondary stress by out-of-plane deformation; these kinds of cracks are very difficult to measure, and can not be precisely calculated through finite element analysis. This stress concentration phenomenon generates the fatigue failure around the lower scallop of the transverse rib. This paper presents improved details of the intersection between the longitudinal rib and the transverse rib of an orthotropic steel deck bridge by the third dimensional full size test, and the finite element method, which can minimize local stress through parametric study.

### 1. 서 론

최근 가설되는 해양교량들은 사장교나 현수교와 같이 긴 시간을 가지는 교량형식들이 주를 이루고 있다. 이러한 장대 교량들은 사하중의부담이 크므로 사하중의부담을 줄일 수 있는 강바닥판의 사용이 증가되고 있다. 강바닥판 교량은 자체 사하중이 작고, 제품의 신뢰성이 높으며, 공기를 단축시킬 수 있는 등의 많은 장점을 가지고 있다. 실제로 기 건설된 광안대교, 영종대교등과 같은 해상 교량에 강바닥판 시스템이 도입되었다. 그러나 강바닥판 교량은 많은 용접에 따른 용접결합과 용접부에서의 피로균열이 문제점으로 지적되고 있다 (남광현, 2001). 강바닥판 교량에서의 피로에 가장 취약한 부분은 종리브와 횡리브가 교차연결 되는 지점이다. 종리브-횡리브 교차연결부에서의 피로균열은 횡리브의 면외거동과 종리브의 비틀음으로인한 2차적인 응력으로부터 유발되며 이러한 응력은 정량화하기 매우 어렵고, 유한요소 해석을 통해서도 그 값을 정확히 산정할 수 없는 실정이다 (김도환, 1999). 이러한 이유로 강바닥판교의 설계시 정확한 계산을 기초로한 설계방법이 불가능한 상태이므로 개선 피로상세의 적용과 표준작업조건

을 지키는 것이 피로균열을 방지할 수 있는 방법이다 (대한토목학회, 1996; 한국도로교통협회 2000). AASHTO LRFD의 경우 이러한 피로균열 방지를 위하여 최소 판두께와 같은 규정을 제시하고 있으며, 2차적으로 발생하는 응력에 대해서는 강성을 가지는 하중경로를 갖게 하고 있다.

미국의 Williamsburg교에서는 성능개선 계획 중 하나로 바닥판 시스템을 강바닥판으로 교체하면서 종리브 내에 벌크헤드 플레이트를 설치하는 방안이 제시되어 이에 대한 실물 시험체의 실험과 장기모니터링의 결과 벌크헤드 플레이트의 효율성이 입증되었다. 그러나 국내의 강도로교 상세부 설계 지침상에는 “종리브 현장이음 전후를 제외하고는 다이아프램을 설치하지 않는다.” 라고 규정되어 있다 (한국 강구조학회, 1998). 이는 횡리브 내부에 다이아프램을 정확히 일치시키기 어렵고 일치시켰다 하더라도 확인할 방법이 없으며, 종리브와 의 부착으로 인한 용접에 의한 균열 때문이다. 이러한 국내의 지침 때문에 아직 국내의 강바닥판교량 시공시 벌크헤드 플레이트가 적용된 사례는 없는 실정이다. 본 논문에서는 이러한 상황을 고려하여 벌크헤드 플레이트가 부착된 3차원 실물 모형체를 제작하여 정적, 피로실험을 수행하였고, 개선상세에 대한 유한요소 해석을 통하여 벌크헤드 플레이트의 효율성을 입증하고, 강바닥판교의 종리브 횡리브 교차연결부의 최적의 상세를 제시하고자 한다.

제1저자 공병승 연락처: 부산광역시 사상구 주례2동 산69-1  
051-320-1821 bskong@dongseo.ac.kr

## 2. 시험체 제작

### 2.1 시험체 형상

본 연구에서 고려된 시험체의 형상은 Fig. 1과 같다.

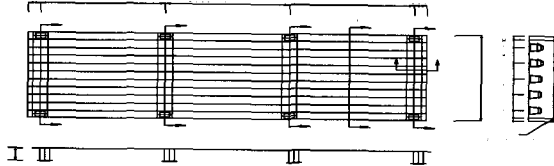
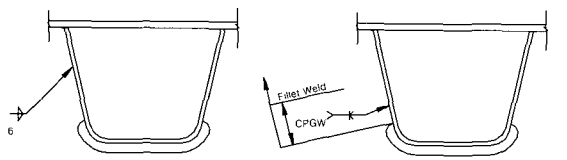


Fig. 1 Third dimension model shape

시험체의 횡리브 간격은 2.5m이고, 3차원 거동을 알아보기 위하여 3경간 연속체로 제작하였다. 횡리브에 5개의 종리브를 설치하고 3개는 국내 표준단면형상을 사용하였고, 2개는 유럽에서 광범위하게 사용되는 "Rabbit Type"상세를 적용하였다. 또 4개의 횡리브중 2개는 직선형 벌크헤드 플레이트를 설치하였고, 2개는 곡선형 벌크헤드 플레이트를 설치하였다.

### 2.2 용접부 상세

강바닥판교에서 피로에 가장 취약한 부위는 종리브와 횡리브의 교차 부와 종리브와 강바닥판의 연결부이다. 현재 국내에서 강바닥판의 종리브와 횡리브를 용접할 때 필렛 용접을 사용하고 있다. 이는 AASHTO기준 상세라고도 하며, 부분적으로 끝돌림 용접등을 실시하여 개선 시공하고 있다. 시험체의 제작시 횡리브하부 스캘럽의 상부 곡률부가 피로균열에 가장 취약한 것으로 판단하여 이 부분의 용접을 필렛 용접이 아닌 120mm 완전 용접과 필렛 용접을 조합한 상세를 사용하였다.



(a) Existing details (b) Improvement details  
Fig. 2 Longitudinal-transverse welding detail

실제 시험체의 제작시 V형 개선의 어려움 때문에 Fig. 2~ Fig. 4와 같이 한쪽면을 먼저 개선 용접한후 반대편을 백가우징 하는 형태로 용접을 실시하였다. Fig. 5는 용접완료후 용접비드의 모습이다. 스캘럽에서의 피로균열을 줄이기 위해서는 곡률확보가 중요할 것으로 판단하여 2차에 걸친 그라인딩 작업을 실시하였으나 용접이전의 완전한 형상을 얻지는 못하였다(Fig. 6).

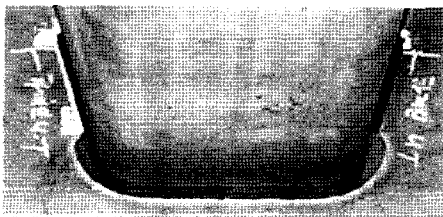


Fig. 3 Improvement shape

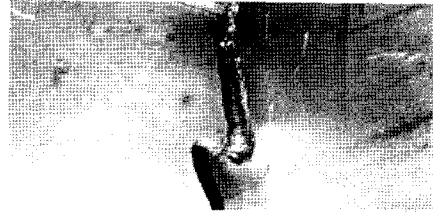


Fig. 4 Back Gouging

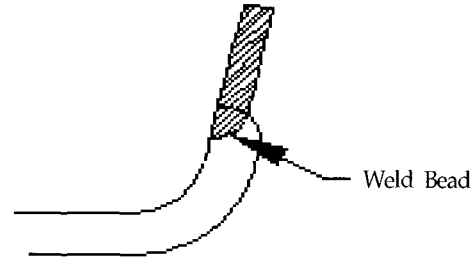


Fig. 5 Weld Bead



Fig. 6 Curve department shape after grinding

이러한 결과로 끝돌림 용접을 통해 부분적인 피로강도의 감소효과를 높이기 위해서는 용접후 정확한 스캘럽의 곡률부 확보가 필요할 것이다. 종리브, 횡리브와 바닥강판의 연결에서는 현재 용접부의 용접 중첩을 피하기 위하여 상부 스캘럽을 두고 있다. 그러나 최근 용접기술의 발달로 인하여 충분히 개선 가능한 상세로 판단되어 본 연구의 시험체제작시 상부 스캘럽을 제거하고 용접을 실시하였다. 그러나 상부 스캘럽을 제거시 응력집중 현상이 없어지는 장점이 있는 반면 바닥강판과 종리브 용접 루트부로부터 피로균열이 발생하여 데크플레이트 두께 방향으로 진전, 관통되고 용접선을 따라 빠른 속도로 진행된다. 특히 이러한 균열은 외관검사로는 발견하기 곤란하므로 매우 위험한 균열로 간주된다. 본 실험체의 제작에서 이러한 위험 요소를 감소시키기 위하여 Fig. 7과 같이 바닥강판과 종리브의 용접시 종리브 판두께의 80%이상의 용입을 확보하여 적용하였다.

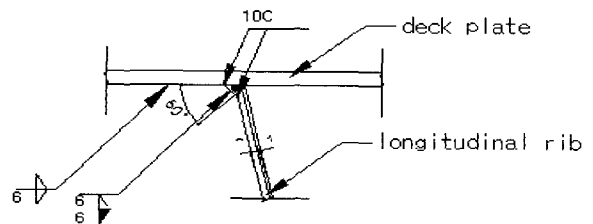


Fig. 7 Steel deck-longitudinal welding detail

2.3 벌크헤드 플레이트상세

직선형 벌크헤드 플레이트(Fig. 8)와 곡선형 벌크헤드 플레이트(Fig. 9) 모두 바닥강판으로부터 2.5cm 이격하여 부착하였으며 직선형의 경우 스키텔의 끝단까지 부착한 상세와 응력 집중의 영향을 피하기 위하여 스키텔의 끝단에서 2cm 정도 연장된 두 가지 형태이다.

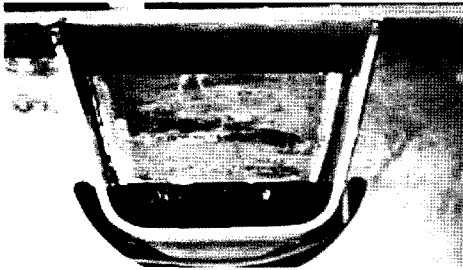


Fig. 8 Linear type bulkhead plate

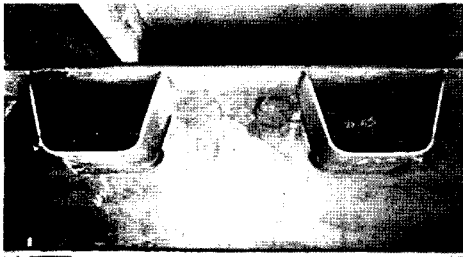


Fig. 9 Curved type bulkhead plate

곡선형 벌크헤드 플레이트는 상부 곡률 R=30cm, 하부곡률 R=20cm로 제작하였다. 두 가지 형태 모두 종리브와 용접부에 곡률을 두어 부드러운 형상으로 용접되도록 하였다. 그러나 용접시 비드 두께로 인해 곡선 처리된 부분의 효과는 없을 것으로 판단된다.

3. 정적실험 및 유한요소해석

3.1 정적실험

정적실험은 피로실험을 수행하기 전과 매 50만회 가진후 피로실험과 동일한 조건으로 정적 실험을 수행하였다. 이는 시험체의 정적거동과 거치상태, 응력분포를 알아보기 위함이다. 또한 피로실험시 피로 응력 범위를 정하기 위한 목적도 있다. Fig. 10은 시험체 거치 전경이다.



Fig. 10 Test specimen view

시험체의 지지조건은 설계시의 가정과 횡리브의 거동 방향을 고려하여 8지점의 형태로 배치하였고 하중은 가력프레임을 이용하여 총 60ton의 하중을 15ton씩 재하하였으며, 최소 하중은 10ton으로 하였다. 횡리브 스키텔부를 제외하고는 용접부로부터 1.5cm 떨어진 곳에 부착하였으며 최대하중은 70ton이다. 게이지와 변위계는 총 125개가 부착되었다. 횡리브의 스키텔 상부 곡률부의 응력집중 예상부에는 로켓을 양면으로 부착하였고, 부착위치는 용접부로부터 0.5cm 이격후 설치하였다.

3.2 정적실험에 대한 유한요소 해석

유한요소 해석에는 범용구조해석 프로그램인 LUSAS V-13.5를 사용하였다.



Fig. 11 Principal stress distribution shape of transverse rib

Fig. 11는 횡리브의 주응력 분포를 나타낸 것이다. 주응력은 스키텔을 기준으로 인장, 압축이 교번하고 있고 스키텔 상부 곡률부에서 큰 응력집중이 발생하고 있다. 또한 벌크헤드플레이트의 영향을 고려했을 경우 대각선 방향으로 응력장이 형성되는 것을 알 수 있다. 그러나 종리브를 관통시키기 위한 스키텔이 없는 복부판에서는 전형적인 보 이론을 따르고 있다.

3.3 유한요소 해석과 실측치의 비교

Fig. 12와 Fig. 13은 횡리브의 유한요소 해석의 결과와 실측치를 비교한 그래프이다. 유한요소 해석결과와 실측치 모두 인장과 압축이 교번하는 양상을 보이며 전체적인 거동이 매우 유사함을 알 수 있었다.

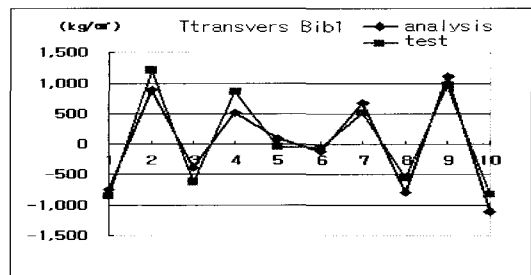


Fig. 12 Transverse Rib-1 Stress Comparison

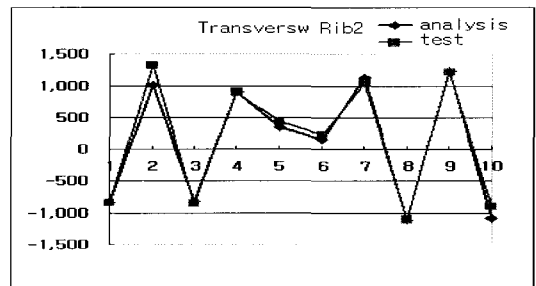


Fig. 13 Transverse rib-2 stress comparison

Table 1 Comparison with tensile stress

Division		L-Rib1	L-Rib2	L-Rib4	L-Rib5
T-Rib1	Test	1,205	859	514	955
	analysis	883	507	679	1,113
	ratio	136%	169%	76%	86%
T-Rib2	Test	1,319	887	1,042	1,219
	analysis	1,011	910	1,120	1,240
	ratio	130%	97%	93%	98%

실측치와 해석치의 비교에서 1, 2번 종리브의 실측응력 값이 크게 나왔다. 이는 시험체 제작시 많은 용접량에 따른 변형과 횡리브 스킵부의 곡률이 확보되지 않은 영향으로 판단된다. Table 1은 횡리브 1과 2에서의 실측치와 해석치의 비교 표이다.

#### 4. 피로실험

피로실험시 글로벌 게이지 6개와 처짐계 3개의 거동 변화를 매 25만회마다 측정하였다. 가진 횡수는 150만회 가진 후 1차 실험을 종료하였으며 추가로, 103만회를 가진 하여 총 가진 횡수는 253만회이다. 용접선을 따라 진행되는 균열을 제외하고는 40mm 정도의 길이에서 스택홀을 천공하였으며, 벌크헤드플레이트의 균열은 실험 종료후 시험체를 절단하여 관찰하였다. 이 균열을 근거로 각 상세별 비교 분석과 정적 실험의 응력 범위를 이용하여 개선 상세의 피로강도를 평가하였다. 총 253만회 피로 실험 결과 5개의 피로 균열이 발견되었다. 균열명은 Fig. 14와 같이 명명하였으며, 첫번째 침자는 횡리브1, 횡리브2 구분, 두번째 침자는 종리브 번호(국내 표준형 1,2,3, 유럽 표준형 4,5), 세번째 침자는 좌우를 나타낸다.

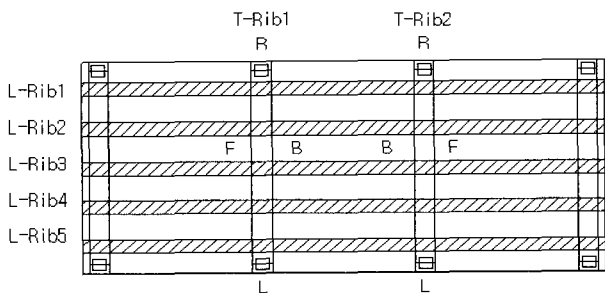


Fig. 14 Crack division symbol

피로 실험에서의 주요 균열은 모두 횡리브 응력 집중부에서 발생하였다. 주로 면외력이 많이 작용하는 횡리브 2에서 발생하였으며, 횡리브 1의 경우에는 WH1-5-L 위치에서 변형률 측정치에 의해 피로균열이 발생된 것으로 판단되었다. 가장 먼저 발생한 균열은 WH2-1-R이었고 97만회에서 발생하였다. 발생시 균열 길이는 16mm 였고, 횡리브 모재와 용접부 끝단 그라인딩을 실시한 부분에서 시작되었으며, 용접선을 따라 253만회에서 62mm까지 진전되었다. 실험 결과로부터 이

곳의 후처리 정도가 피로균열에 상당히 영향을 미치는 것으로 판단된다. 두번째 균열은 WH2-5-L이고 102만회에서 발생하였다. 이 균열은 유럽형 상세의 상부 곡률부 끝단에서 발생하였으며, 횡리브 모재를 따라 용접선과 평행하게 67mm까지 진전되었다. 세번째 균열은 WH2-3-L이고 116만회에서 발생하였다. 이 균열은 여타 균열과는 다르게 용접선을 따라 진전된 것이 아니라 상향 10° 각도로 복부판을 향해 진전되었고, 150만회에서 37mm 균열이 진전된 후 21mm 스택홀을 천공하였다. Fig. 15는 용접선을 따라 진전된 균열의 형상이며, Fig. 16은 모재 쪽으로 진전되어 Stop Hole을 천공한 모습이다.

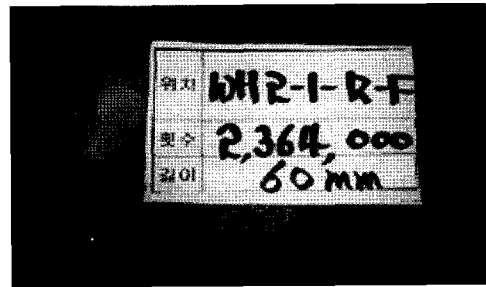


Fig. 15 WH2-1-R crack

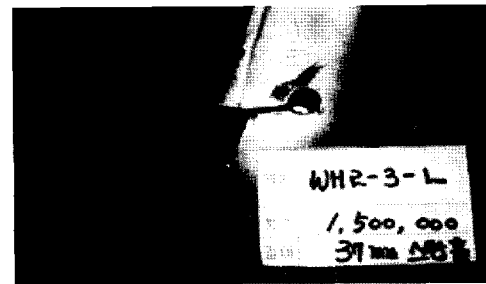


Fig. 16 WH2-3-L stop hole

피로실험 결과 면내력이 주로 작용하는 횡리브 1의 경우에는 피로균열이 발생하지 않았고, 피로강도가 C등급 이상인 것으로 보인다. 이에 비해 면외력이 많이 작용하는 횡리브 2의 경우에는 Fig. 17과 같이 C등급에 만족하는 것, C와 D등급 사이에 있는 것, D등급 이하 등 다양하게 수명이 산정되었다.

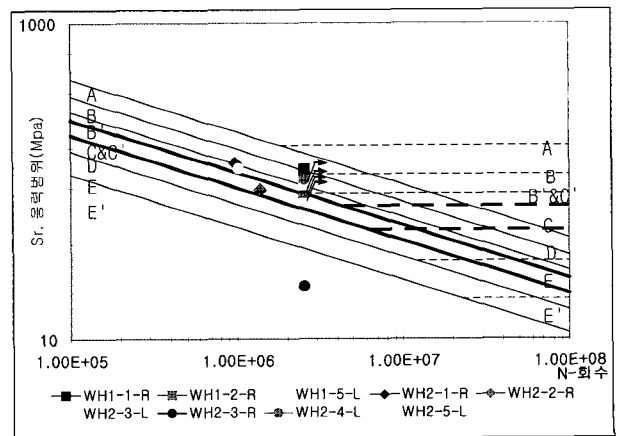


Fig. 17 S-N graph of third dimension shape

### 5. 최적상세 연구

#### 5.1 기본모델해석

3차원 실물모형체의 정적/피로 실험의 결과를 바탕으로 최적의 종리브 횡리브 교차연결부의 상세를 찾기 위하여 먼저 다음의 6가지 모델을 대상으로 유한요소 해석을 실시하고 그 응력값을 비교 하였다. 각 단면 상세별 최대 주응력값과 응력 분포 경향을 분석함으로써 최적의 형상을 찾고자 하였다.

해석결과 Table 2와 같이 전체적인 응력현상은 인장과 압축이 교번하는 양상을 보이며, 벌크헤드 플레이트가 설치된 경우에는 주응력이 상부 곡률부에서도 응력교번의 경향이 뚜렷해지는 경향을 보이고 있다.

Table 27 Stress distribution shape

Di.	Section shape	Di.	Section shape
M2 NB		M3 NB	
M2		M3	
M2-1		M3-1	

Table 3 Principal stress and ratio by model

Division	Stress(kgf/cm <sup>2</sup> )	Note
1	1066.65	
2	943.57	88.5 %
3	729.99	68.4 %
4	670.99	62.9 %
5	803.06	75.3 %
6	742.30	69.6 %

최대 주응력값과 응력 분포형상에서 알 수 있듯이 국내형 표준 단면 상세에 곡선형 벌크헤드 플레이트를 부착한 상세에서 가장 작은 응력값을 얻을 수 있었으며, 벌크헤드 플레이트의 설치시 스캘럽 주위의 응력 집중현상을 억제할 수 있는 것으로 판단되었다. Table 3은 각 모델별 최대 주응력과 M2 NB 모델과의 차이값을 비교한 것이다.

#### 5.2 횡리브 간격 변화에 따른 영향

종리브와 횡리브의 교차연결부에 발생하는 응력집중 현상을 감소시키기 위한 방법으로 횡리브의 간격 및 높이의 변화에 따른 응력 경향을 알아보기 위하여 간격(G)와 높이(H)를 변수로한 해석을 실시하였다. 해석시 면내력과 종리브의 휨모멘트에 의한 영향을 모두 파악하기 위하여 다중하중을 재하 하여 주응력의 변화 경향을 파악하였으며 기준 상세에 대해서 해석 모델별 주응력의 발생경향을 분석하였다. Fig. 18은 횡리브의 간격 변화에 따른 각 모델별 주응력변화 추이를 나타내고 있다.

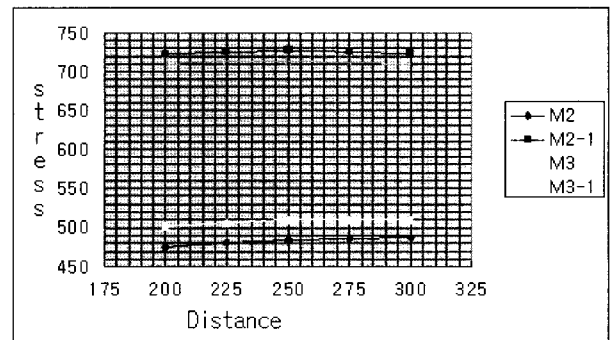


Fig. 18 Principal stress in longitudinal rib-2

횡리브2의 면내력을 유도하기 위한 하중재하에 따른 결과는 위의 그래프와 같다. 그래프에서와 같이 간격이 증가함에 따른 큰 변동은 없었다. 기존의 횡리브 간격을 G=250(cm)에서 G=300(cm)으로 늘릴 경우, 약 4%내외의 응력 증가만 발생하여 강재절약 및 용접길이 감소에 따른 비용감소 효과가 있을 것으로 판단된다.

#### 5.3 횡리브 강성 및 높이의 변화에 따른 영향

횡리브의 강성과 높이에 따른 영향을 확인하기 위하여 단면 2차 모멘트 값이 동일한 다음의 두 가지(Fig. 19, 20) 횡리브 형상을 가지는 단면형태를 비교해 보았다.

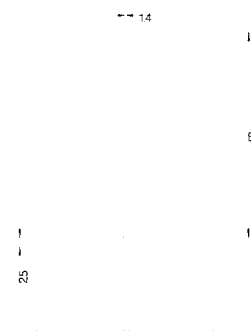


Fig. 19 Type 1



Fig. 20 Type 2

해석 결과(Fig. 21)에서 보는 바와 같이 두 모델을 기본 모델과 비교한 결과 횡리브-종리브 연결부의 주응력 발생은 휨강성에 의한 것보다는 복부판의 높이의 변화가 지배하고 있

음을 알 수 있다. 따라서 횡리브 복부판의 높이를 변수로한 해석 및 분석 결과가 최적 상세를 도출하기 위해 적용된다.

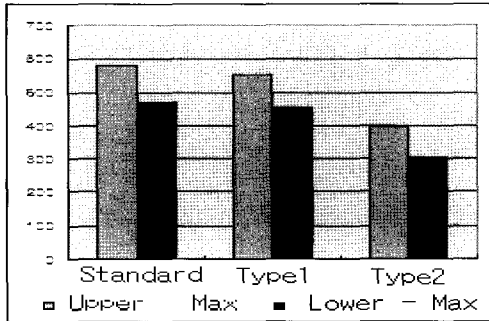


Fig. 21 Principal stress comparison by type

Type2를 기준으로 횡리브의 높이를 변화시키며 다음 해석을 수행하였다. 다음 그래프(Fig. 22)는 횡리브 높이변화에 따른 주응력 변화 이다.

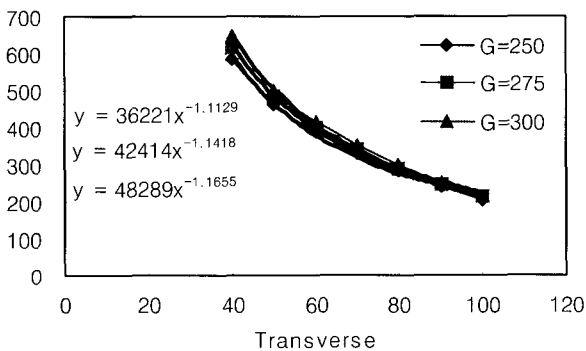


Fig. 22 Principal stress comparison in U-rib1

Table 4 Principal stress comparison in U-rib1

M2(U-rib1)	G=250	G=275	G=300
100	207.73	213.23	217.99
90	241.53	248.38	254.32
80	281.74	290.44	297.99
70	329.61	340.90	350.73
60	387.15	402.20	415.38
50	460.91	482.56	500.15
40	586.47	617.58	645.60

상기 그래프에 제시되어있는 Y=A×XB 형식의 수식관계를 이용하여 A, B 상수에 대해 다음과 같은 추세 경향을 설정하였다. 그 추세 경향은 Fig. 22와 같이 거의 직선적인 변화 양상을 보이고 있어 실무에서의 공학적인 수식에 의한 주응력 유추가 더욱 용이할 것으로 판단된다. Table 4는 모델 M2에서 횡리브 간격 변화에 따른 U-rib1의 주응력 변화 양상이다.

## 6. 결 론

피로 실험결과 일반적으로 강바닥판 교량의 스캐럽의 하부 곡률부에서 나타났던 피로균열이 전혀 발생하지 않은 것으로 보아, 벌크헤드 플레이트와 완전 용접이 피로강도를 향상시키는 것을 알 수 있었다. 이를 적용하면 C등급 이상의 피로강도를 가지는 것을 알 수 있었으며, 국내형 벌크헤드 플레이트를 사용할 경우 약 28~37%의 응력 감소를 보이며, 유럽형의 경우 17~22%로 국내형 표준단면이 유럽형보다 다소 유리한 것으로 판단되었다. 또한 벌크헤드 플레이트의 형상에 따라서도 많은 차이를 보였다. 직선형 벌크헤드 플레이트에 비해 곡선형 벌크헤드 플레이트가 더 유리한 것으로 나타났다. 이는 곡선형 벌크헤드 플레이트가 직선형에 비하여 힘의 방향을 원활하게 전달해주어 발생응력의 분포가 적절히 이루어지기 때문인 것으로 판단된다. 개선 상세의 적용시 발생응력의 감소로 인하여 횡리브의 간격을 현재 국내 기준인 200cm-250cm에서 300cm로 증가시켜 적용할시 응력증가는 약 4%내외로 강제절감과 용접길이 감소의 효과가 있을 것으로 기대된다. 또한 횡리브의 강성 및 높이에 따른 해석결과로 볼 때 횡리브 간격 G=300cm에서 높이 H=60~80cm, G=350cm 일 경우 높이 H=70~90cm가 가장 적절할 것으로 판단된다. 본 논문에서 강바닥판교량의 피로실험과 변수해석을 통하여 개선상세를 제시하였지만 아직 많은 개선점이 남아있으므로 지속적인 연구를 통하여 응력집중 현상과 피로균열을 최소화할 수 있는 상세에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- 김도환 (1999). 강상판의 종리브와 강바닥판 용접연결부의 응력분포, 한양대학교 석사학위 논문, pp 11-37.
- 남광현 (2001). 강상판의 피로설계, 과학기술, pp 31-60.
- 대한 토목학회 (1996). 도로교 표준 시방서
- 한국강구조학회 (1998). 강구조 편람 제4권 강도로교의 설계
- 한국도로교통협회 (2000). 도로교 설계 기준

2003년 12월 1일 원고 접수

2004년 2월 10일 최종 수정본 채택