

벌크헤드 플레이트로 보강된 강바닥판교의 종리브-횡리브 교차연결부의 최적상세 연구

A Study for The Optimal Detail on Intersectin of Longitudinal- Transversal Rib in Orthotropic Steel Deck Bridge, Bulkhead Plate Reinforced.

공병승*
Kong, Byung Seung

윤성운**
Yun, Seong Wun

ABSTRACT

Orthotropic steel deck bridge has much advantages such as the light deadweight, so the construction of orthotropic steel deck is profitable for the long-span bridges. Although the system has a lot of merits, it happens some damages by the traffic density and the fatigue cracks of welding. The cross-connection of longitudinal rib and transversal rib is one of the weakest at the fatigue. The secondary stresses which are from the out-plane deformation of transversal rib and the torsion of longitudinal rib make the topical stress concentration phenomenon. The Bulkhead Plate for prevention of this stress concentration phenomenon was applied by changing the orthotropic steel deck of Williamsburg bridge in USA. But, it is principle that a Bulkhead Plate is not established in the domestic design standard. Therefore, it is estimated that the study for installation of Bulkhead Plate is needed. This study with considering these circumstances proves efficiency of Bulkhead Plate and will be presented optimal design details through finite element analysis according to change the geometrical of Bulkhead Plate and the cross-connection area of longitudinal and transversal rib.

1. 서론

최근 장대교량의 건설증가 추세로 인하여 사하중의 부담이 작은 강바닥판교의 사용이 증가되고 있다. 강바닥판교는 자체 중량이 작고, 거의 전과정이 공장제작 되므로, 제품에 신뢰성이 높으며, 가설 후 콘크리트 공사가 없기 때문에 공기를 단축시킬 수 있는 등 많은 장점을 지니고 있다. 그러나 강바닥판은 비교적 얇은 강판을 용접한 결합구조이므로 이로 인한 용접결함과 용접연결부의 피로균열이 문제시되고 있다. 특히 강바

* 정희원 · 동서대학교 토목공학과 조교수

** 동서대학교 토목공학과 석사과정

다판교에서 피로에 가장 취약한 것으로 알려져 있는 종리브와 횡리브의 교차연결부에서는 횡리브의 면외거동과 종리브의 비틀림에 의한 2차응력의 영향으로 국부적인 응력집중현상이 일어나며, 국부적인 응력집중현상은 피로균열을 유발하는 주요한 원인이 되고 있다. 이러한 발생 응력을 정량화하는 것은 매우 어렵다. 실제 건설되어 있는 많은 교량에서 이 부분에 피로균열이 관찰되고 있다. 이러한 이유로 강바닥판교의 설계시 정확한 계산을 기초로 한 설계방법이 불가능한 상태이므로 개선상세의 적용과 표준작업조건을 지키는 것이 피로균열을 방지할 수 있는 최선의 방법이라고 할 수 있다. AASHTO LRFD는 2차적으로 발생하는 힘에 대하여 견고한 하중경로를 갖게 하고, 최소 판두께와 같은 요구조건을 제시함으로써 Distortion 유발 피로균열이 일어나지 않도록 하고 있다. 그러나 국내의 강도로교 상세부 설계지침(1997) 상에는 “종리브 현상이음 전후를 제외하고는 벌크헤드 플레이트를 설치하지 않는다” 라고 규정되어 있다. 그러나 선행 연구되어진 삼차원입체모형실험에서 벌크헤드 플레이트의 설치시에는, 복부판에서 부담하는 전단응력을 분담해 주고 횡리브의 면외방향의 변형에 대한 강성을 증가시켜 주는 역할을 하는 것으로 분석 되었다. 또한 종리브의 상대 처짐으로 인한 비틀림응력을 적절히 분배하여 Distortion에 의한 피로균열을 제어하고, 스켈럽 하부 곡률부의 응력을 감소시키는 역할을 하므로 벌크헤드 플레이트의 설치가 고려되어야 한다. 현재 도로교 표준시방서에서 제안하고 있는 사항은 강바닥판교의 종리브 상세 또한 개략적인 형상에 대한 분류로만 그치고 있어 종리브의 형상에 따른 설계시나 시공상의 구조적인 이점 등을 알 수 있는 자료가 부족한 것이 사실이다. 본 연구에서는 이러한 상황을 고려하여 강바닥판교의 종리브-횡리브 교차연결부의 기존상세와 유한요소 해석을 통하여 도출된 개선상세를 비교하여 설계에 적용 가능한 강바닥판 시스템을 제시하고자 한다.

2. 3차원 실물모형체의 피로실험

본 연구에 앞서 국내 강바닥판 교량의 종리브-횡리브 연결 상세 규정과 유럽에서 널리 쓰이고 있는 상세에 대한 3차원 실물 시험체의 피로실험이 수행되어졌다. 시험체는 횡리브의 간격은 2.5m를 취하였고 3차원 거동을 알아보기 위하여 3경간 연속체로 제작하여 국내상세 3개, 유럽상세 2개를 적용하였고, 직선형 벌크헤드 2개, 곡선형 벌크헤드 2개를 설치하여 피로실험을 실시하였다. 실험체 형상과 실험결과는 다음과 같다.

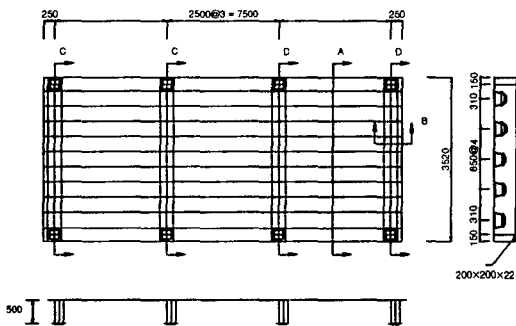


그림 1. 3차원 시험체 형상

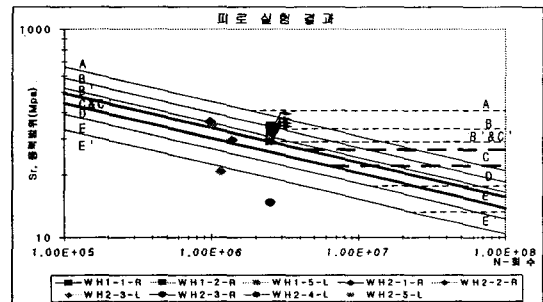


그림 2. 피로실험결과 S-N 선도

시험체의 제작시 기준에 사용하던 한쪽 필렛용접을 개선하여 완전 용입용접을 실시하였고 종리브 내부에 벌크헤드 플레이트를 설치하였다. 피로실험은 총 253만회를 실시하였으며, 주요균열은 모두 면외력이 작용하는 두 번째 횡리브의 응력 집중부에서 발생하였다. 면외력이 주로 작용하는 횡리브의 경우 C등급, C와 D등급 사이, D등급 이하 등 다양하게 분포하였다. 이러한 결과로 분석해볼 때 위의 실험에서 적용한 벌크헤드 플레이트와 완전 용입용접이 피로강도 향상에 기여한다는 것과 일반적으로 흔히 나타나는 횡리브내의 하부 스켈럽 곡률부에서 피로 균열이 전혀 발생하지 않은 것으로 보아 종리브 내부의 벌크헤드 플레이트의 효율

성이 어느 정도 입증되었다. 또한 종리브와 횡리브 교차연결부에서 피로 균열은 하부 스켈럼의 상부 곡률부와 종리브 접합부에서의 곡률처리가 상당히 중요한 것으로 판단되었다.

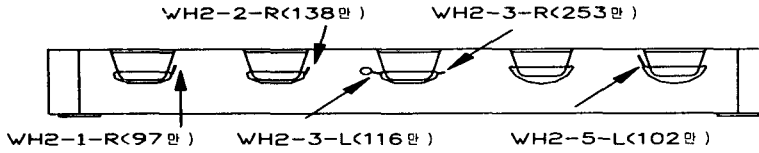


그림 3 균열 분포도

3. 종리브-횡리브 교차연결부의 수치해석 연구

3.1 벌크헤드 플레이트의 보강의 효율성

3차원 실물모형체 피로실험을 통하여 종리브 내부의 벌크헤드 플레이트가 피로균열을 감소시킬 수 있는 것으로 판단되어 변수 연구에 앞서 벌크헤드 플레이트가 설치되지 않는 국내 표준 상세와 벌크헤드 플레이트가 설치된 국내 표준상세 및 유럽에서 광범위하게 사용되고 있는 “Rabbit Type” 상세를 유한요소해석을 통하여 비교하여 벌크헤드 플레이트의 효율성을 입증하고자 한다. 유한요소 해석시 지점조건은 양단 힌지지점을 사용하였으며, 하중은 중앙에 20cm×50cm 크기의 등분포하중으로 15tonf의 하중을 재하하였다. 모델별 최대 주응력의 결과는 다음과 같다.

구 분
1. 국내 표준 상세
2. 유럽 표준 상세
3. 국내(직선벌크헤드)
4. 국내(곡선벌크헤드)
5. 유럽(직선벌크헤드)
6. 유럽(곡선벌크헤드)

표 1 모델명

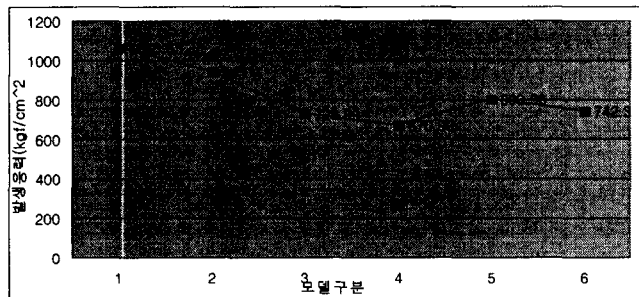


그림 4 모델별 최대주응력 변화

벌크헤드 플레이트를 설치함으로써 최대 주응력값은 약 25%~37%까지 감소하며, 직선형 벌크헤드 플레이트보다는 곡선형 벌크헤드 플레이트가 더 유리한 것을 알 수 있다. 곡선형 벌크헤드 플레이트가 부착된 국내형 표준단면의 형상(모델4)이 가장 작은 응력값을 나타내는 것을 알 수 있다.

3.2 최적상세의 선정

앞서 연구된 3차원 실물모형체의 피로실험의 결과와 기존모델을 바탕으로 7가지 모델을 선정하여 각 기본하중하의 최대주응력과 응력 분포형상을 분석하여 최적의 형상을 찾고자 한다. 그러나 앞서 언급한바와 같이 Distortion 유발 피로균열은 면외변형에 의한 이차적인 응력에 의해 유발되며 이와 같은 균열은 현재의 해석방법으로 정확한 산정이 불가능하므로 벌크헤드 플레이트의 적용으로 인한 Distortion 억제와 최대 주응력을 줄이는 상세를 찾는 것을 변수해석의 목표로 설정하였다. 유한요소해석 모델은 3차원 시험체와 동일하며, 하중은 15tonf(20×50cm)를 횡리브 중앙과 최외측(캔틸레버부 적용시)에 적용하였다.

표 2 모델 상세별 분류 번호

M1		횡리브와 종리브 일체형	M3-NB		벌크헤드 플레이트가 없는 일반적인 유럽 상세
M2-NB		벌크헤드 플레이트가 없는 일반적인 국내 상세	M3		직선형 벌크헤드 플레이트 부착(국내)
M2		곡선형 벌크헤드 플레이트 부착(국내)	M3-1		직선형 벌크헤드 플레이트 부착(유럽)
M2-1		곡선형 벌크헤드 플레이트 부착(유럽)			

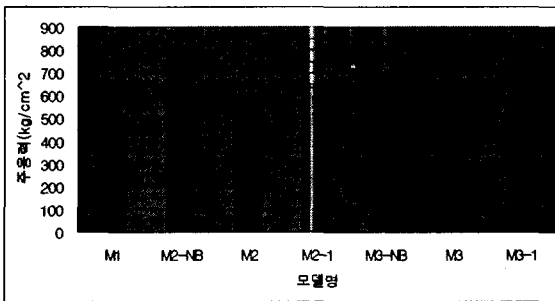


그림 5 모델별 주응력의 크기

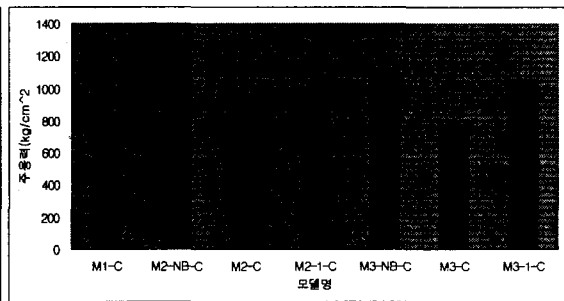


그림 6 모델별 주응력의 크기(Cantilever)

국내형은 벌크헤드 플레이트를 사용할 경우 약 28~37%의 응력 감소를 보여, 유럽형의 17~22%에 비하여 성능이 월등히 향상됨을 알 수 있다. 곡선형 벌크헤드 플레이트에 비해 직선형 벌크헤드 플레이트는 큰 응력감소를 보이지 못하고 있다. 이는 곡선형 벌크헤드 플레이트는 힘의 방향을 원활하게 전달하여 응력의 분포가 적절히 이루어지고, 횡리브 단면 전체를 통한 일체적인 구조체로서 횡리브의 전단응력과 면내응력을 강화시켜주어, 직선형 벌크헤드 플레이트보다 기하학적으로 뒤틀림이나 국부변형에 유리하기 때문인 것으로 판단된다.

3.3 세부 변수 해석

종리브와 횡리브의 교차연결부에 발생하는 응력집중 현상을 감소시키기 위한 방법으로 횡리브의 간격 및 높이의 변화에 따른 응력 경향을 알아보기 위하여 간격(G)과 높이(H)를 변수로 해석을 실시하였다. 다음의 결과에서 알수 있듯이 횡리브의 간격을 G=250cm를 300cm로 늘릴 경우 4%내외의 응력 증가로 효과가 미미한 것으로 판단된다.

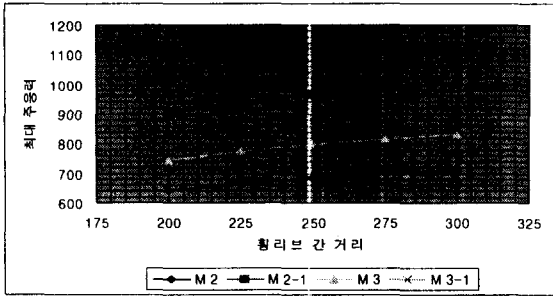


그림 7 횡리브1측 주응력변화

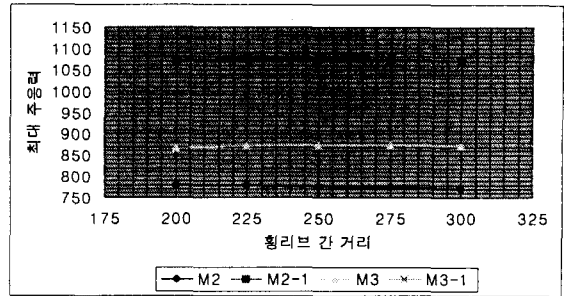


그림 8. 횡리브2측 주응력 변화

아래의 그림은 단면2차 모멘트 값이 동일한 횡리브 높이에 따른 응력변화를 나타낸 것이다. 해석 결과에서 보는 바와 같이 두 모델을 기본 모델과 비교한 결과 횡리브-종리브 연결부의 주응력 발생은 휨강성에 의한 것보다는 복부판의 높이의 변화가 지배하고 있음을 알 수 있다. 따라서 횡리브 복부판의 높이를 변수로 한 해석 및 분석 결과가 최적 상세를 도출하기 위해 적용된다.

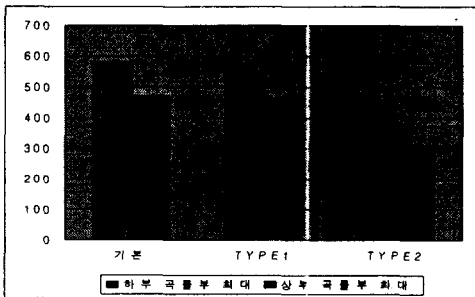


그림 9 TYPE 별 주응력 비교

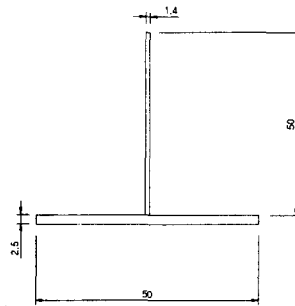


그림 10 TYPE 1

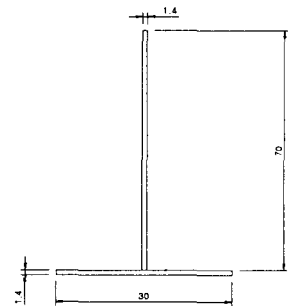


그림 11 TYPE 2

벌크헤드 플레이트의 상하 곡률을 곡률 R=50으로 고정하고 면적이 전체 응력에 미치는 영향을 알아보기 위하여 벌크헤드 플레이트의 면적 A=0~522cm²까지 변화시키며 그 응력값을 관찰하였다. 결과에서 보듯이 벌크헤드 플레이트의 크기가 커질수록 그 응력값이 감소함을 알 수 있었다. 벌크헤드 플레이트의 크기가 커지면서 횡리브의 면외변형에 대한 강성이 커지고 또한 종리브와 용접부의 길이가 길어지므로 그에 따른 전단응력의 감소효과가 전체적인 응력값을 경감시키는데 큰 역할을 하는 것으로 판단된다.

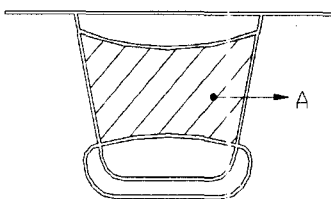


그림 12 벌크헤드 크기 변수 A

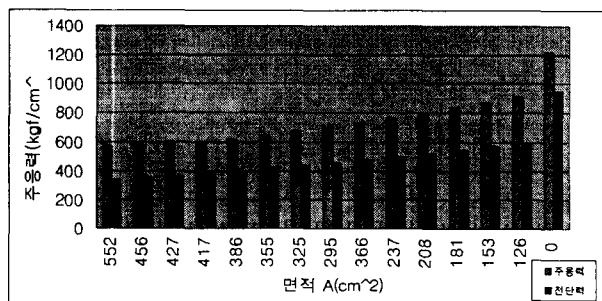


그림 13 면적변화에 따른 응력 변화

벌크헤드 플레이트의 면적 417cm²을 기준으로 상·하부의 곡률을 변화 시키며 그 응력 값을 관찰하였다.

해석결과 상·하부곡률 R=38cm에서 가장 작은 응력값을 보였다. 이는 동일한 면적을 가지는 직선 벌크헤드 플레이트 적용시에 비하여 약 8.3%의 응력 감소 효과가 있으며, 상·하부 곡률 R=60cm 와 비교하여 약 3%의 응력 경감 효과가 있는 것으로 판단되었다.

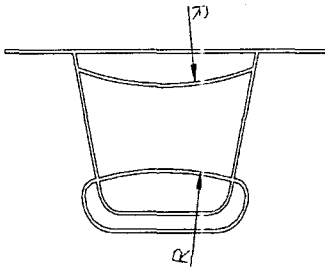


그림 14 상·하부 곡률변수 R

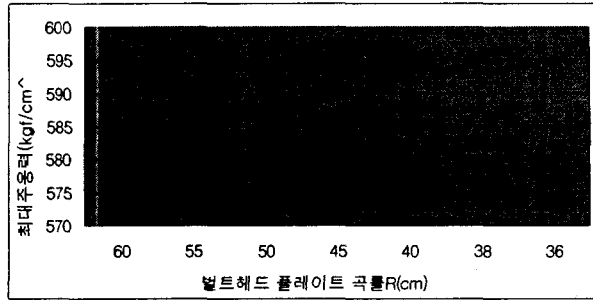


그림 15 변수 R에 따른 최대주응력 변화

벌크헤드 플레이트의 면적 $A=417\text{cm}^2$ 이고 상·하부 곡률 R=38cm인 상세를 대상으로 벌크헤드 플레이트 부착 위치를 변수로 한 해석을 실시하였다. 해석결과 아래의 그래프에서와 같이 벌크헤드 플레이트와 바닥강판의 이격거리 42mm에서 가장 유리한 것으로 판단되었다.

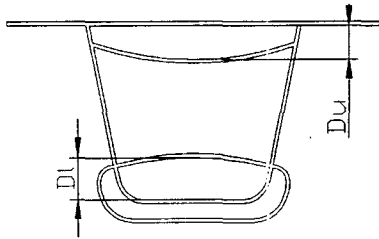


그림 16 위치 변화 변수 Du

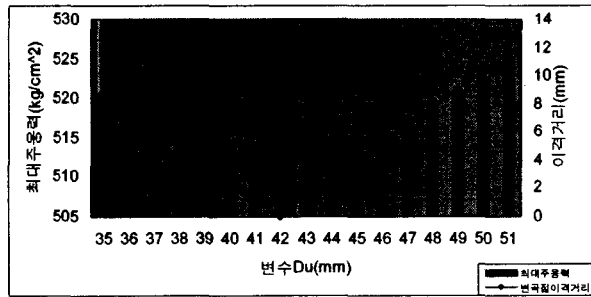


그림 17 변수 Du에 따른 최대 주응력 변화

하부 스킵의 상, 하부 곡률을 변화시키며 해석을 수행하였다. 상부곡률 r1=1.5cm~4.0cm 까지, 하부곡률 r2=4.0cm~8.0cm 까지의 범위를 고려하였다.

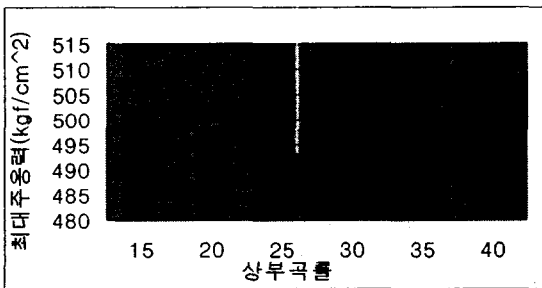


그림 18 변수 r1에 따른 응력 변화

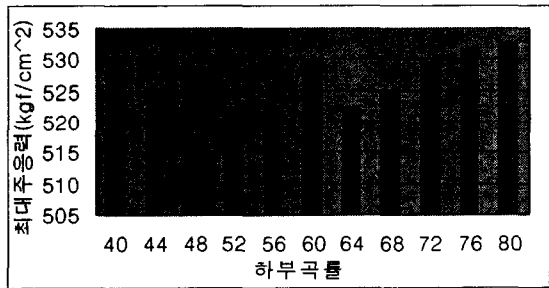




그림 19 변수 r2에 따른 응력 변화

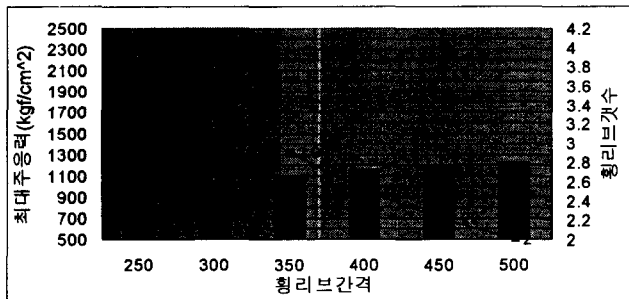
지금까지의 결과를 종합한 개선상세는 다음 표와 같으며 이러한 개선 상세의 적용시 발생응력 감소로 인하여 횡리브의 간격을 현행 기준인 200cm~250cm 보다 더욱 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

표 3 현행 기준상세와 개선상세의 비교

	현행표준	추천안
종리브 상세		
벌크헤드 플레이트 곡률(R)	없음	R=3.8cm
벌크헤드 플레이트 면적(A)	없음	A=410-450cm ²
벌크헤드 플레이트 위치(Du)	없음	바닥판으로부터 4.0-4.5cm
스캘립 상부곡률(r1)	2.0cm	2.0-2.5cm
스캘립 하부곡률(r2)	6.8cm	4.8cm

횡리브 간격에 따른 응력 변화 추이를 관찰하기 위하여 강바닥판 지간10m를 기준으로 횡리브의 간격을 변화시켜 해석을 실시하였다. 해석결과 횡리브의 간격을 500cm 이상으로 증가시키더라도 그 발생응력이 현행기준 이하인 것을 알 수 있다. 이러한 횡리브 간격의 증가로 인하여 강재량이 약 10% 절감되었고, 용접길이는 약 48% 감소되었다.

그림 20 횡리브간격에 따른 응력 변화



횡리브의 간격을 증가시킬 경우 하중의 재하 위치에 따라 상당히 다른 응력 값을 보일 수 있으므로 횡리브와 하중작용점의 상대적인 위치에 따른 응력경향을 파악하기 위하여 개선상세를 적용한 횡리브 간격 G=300cm, 400cm, 500cm의 모델을 대상으로 모델 중앙에서부터 종방향으로 이동시키며 해석을 수행하였다. 하중작용점은 50cm 간격으로 250cm 까지 증가시키며 수행하였다.

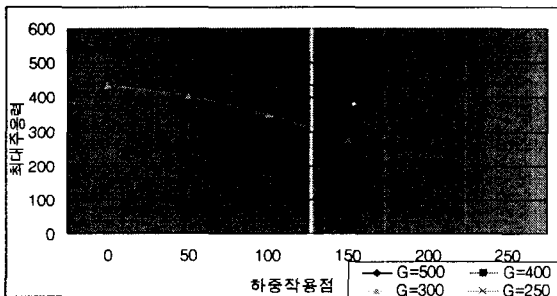


그림 20 U-Rib1 응력변화

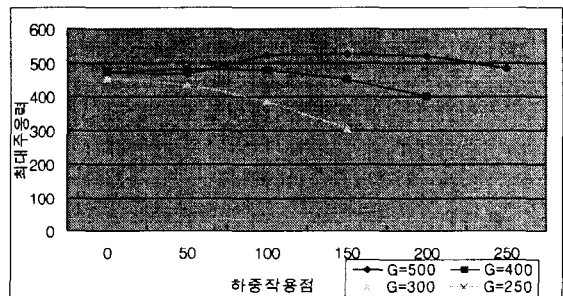


그림 21 U-Rib2 응력변화

간격 (cm)	높이 (cm)	강재량 (m ³)	용접길이 (m)	강재량 비율	용접길이 비율
G=250	50	73.64	59.36		
G=300	70	74.81	51.67	101.6%	87.0%
G=350	70	72.53	45.35	98.5%	76.4%
G=400	70	70.43	39.03	95.6%	65.8%
G=450	70	68.89	35.13	93.6%	59.2%
G=500	70	67.68	32.12	91.9%	54.1%

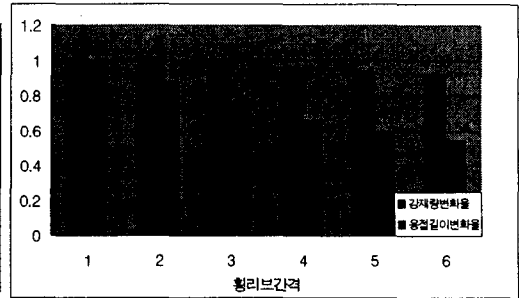


표 5 횡리브간격변화에 따른 강재량 및 용접길이 그림 32 모델별 강재량 및 용접길이 비율

4. 결론 및 추후연구 과제

강바닥판교의 종리브-횡리브 연결상세에서 벌크 헤드 플레이트의 적용이 효과적이며, 곡선형 벌크헤드 플레이트를 설치한 국내형 표준단면형상의 경우 약 28~37%의 응력 감소를 보였다. 이는 곡선형 벌크헤드 플레이트가 힘의 방향을 원활하게 전달해 주어 발생응력의 분포가 적절히 이루어지기 때문인 것으로 판단된다. 벌크헤드 플레이트의 곡률부는 스킵의 곡률부와 일치시키는 것이 유리하고, 횡리브 복부판의 높이는 높을수록 발생응력이 적다. 개선상세는 횡리브 간격 G=300cm에서 높이 H=60~80cm, G=350cm 일 경우 높이 H=70~90cm가 가장 적절할 것으로 판단된다. 벌크헤드 플레이트의 면적은 A=410cm²~450cm²가 적당할 것으로 판단된다. 벌크헤드 플레이트의 상·하부 곡률은 R=38cm가 가장 유리한 것을 알 수 있었다. 벌크헤드 플레이트의 위치는 바닥판으로부터 4.5cm 이격 후 설치하는 것이 적당할 것으로 판단되었다. 이러한 개선상세의 적용시 발생하는 주응력의 값이 약 50%이상 감소하며 이러한 결과는 횡리브의 간격을 기존의 200~250cm에서 500cm로 증가시키더라도 발생응력은 55.7%로 감소되는 것을 알 수 있었다. 그러나 500cm 이상의 경우 예상치 못한 응력 변화 추이가 발생하여 특별한 고려가 필요할 것으로 판단된다. 횡리브 간격의 증가로 인하여 사용되는 강재량은 약 10% 절감되었고, 용접 길이는 약 48% 감소되었다. 횡리브 간격의 증가로 인한 강재량과 용접길이의 감소는 강바닥판교의 제작시 획기적인 원가 감소 요인으로 작용할 것으로 판단된다. 향후 실제 교량 또는 더 많은 실험 시험체의 적용 및 실험을 통해 제시된 최적 상세에 대한 검증이 이루어지는 것이 바람직하며, 강바닥판교의 종리브-횡리브 교차연결부에서의 발생응력을 정량화 할 수 있는 방안 에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 아울러 실무자들이 쉽게 설계 및 시공시 적용할 수 있도록 단순해석을 통한 상세부의 실제 발생응력을 산정할 수 있는 연구가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. 공병승(2003), "U-Rib 상세 변화에 따른 강바닥판 교량의 피로해석 및 최적설계방안 연구(I,II)" 대한건설 환경학회지
2. 임원옥(1998), "강바닥판의 율하중에 의한 거동연구," 국민대학교 석사학위 논문.
3. 전상호(2000), "실물 모형 강상판 접합부상세의 피로강도에 관한 실험적 연구," 명지대학교 석사학위 논문.
4. 김도환(1999), "강상판의 종리브와 강바닥판 용접연결부의 응력분포" 한양대학교 석사학위 논문. p11~37
5. 한국 강구조학회(1998), "강구조 편람 제4권 강도로교의 설계"