

HR Plate의 경량전철 강박스거더교 적용모델

Steel Box Girder Bridge Models of Light Rail Transit with HR Plate

이성행[†] · 임채선* · 황낙연** · 정경섭***

Seong-Haeng Lee · Chae-Sun Yim · Nak-Yuen Hwang · Kyoung-Sup Jung

Abstract To increase the demand of HR Plate with thickness up to 22mm, it is necessary that HR Plate is applicable to full member in steel bridge including main girder. In this study, availabilities of the narrow steel box girder of light railway transit with HR Plate width as a main member are discussed. Computational analysis is performed in 15 bridge models of light railway transit with beam element and plate element. As an analysis results, three models in light railway transit are presented. In conclusion, it is validated that HR Plate can be applying to narrow steel box girder in the light railway transit.

Keywords : Light railway transit, Narrow steel box, HR Plate, Computational analysis, Steel box girder

요 지 22mm까지의 두께를 갖는 HR Plate의 사용량을 증대시키기 위해서는 HR Plate가 강교량의 주부재를 포함한 모든 부재에 적용되는 것이 요망되어진다. 본 연구에서는 HR Plate의 적용가능 폭을 갖는 경량전철 협폭 박스거더의 가능성을 검토하였다. 빔요소와 플레이트 요소를 적용한 15개 경량전철 교량 모델들에 대해 풀모델링과 서부모델링을 적용하여 전산 구조해석을 수행하였다. 해석결과 HR Plates의 협폭박스거더는 경량전철에 적용될 수 있다는 것을 확인하였다.

주요어 : 경전철, 협폭박스, 열연코일판, 전산해석, 강박스거더

1. 서론

HR Plate용 열연 코일(Coil)을 레벨링(Leveling)하고 절단하여 판재로 만들어지는 HR Plate는 후판 박물재를 대체할 수 있는 제품으로 일반 후판보다 가격이 저렴하고 생산성 및 공급이 원활한 장점을 갖는다. 제철소의 입장에서는 후판 박물재를 대체할 수 있는 HR Plate를 공급함으로써 후판 박물재의 생산 부하를 해소할 수 있으며 후판 공급난으로 인한 강구조물 제작사의 공정 차질을 미연에 방지할 수 있다.

한국강구조학회를 중심으로 HR Plate에 대한 재료시험 및 부재의 시험제작 등이 수행되어 2차 연구결과로 발표된 HR Plate의 교량 적용 가이드(한국강구조학회, 2006)에서는 두

께 22mm까지 부부재는 물론 주부재까지 용접 작업성과 제작성에서 일반 강재와 큰 차이가 없음이 확인되었다.

개발된 두께 22mm까지의 HR Plate의 수요를 보다 증대시키기 위해서는 2차부재 및 종리브 정도에 사용되는 HR Plate의 현 사용수준을 주부재를 포함한 강교량 부재 전체에 적용가능함을 부각시켜 최종적으로 HR Plate의 수요 창출을 증대시키는 것이 필요하다. 이를 위하여 생산제한 치수를 갖는 HR Plate를 실제 교량에 적용시킬 수 있는 새로운 형태의 교량모델 개발이 필요하다. 생산두께와 폭의 제한성으로 발생하는 문제점을 가능한 줄일 수 있는 새로운 형태의 교량이 개발되어, HR Plate가 주부재에 사용될 수 있다는 것이 검증된다면 HR Plate 수요 증대는 조기에 창출될 수 있을 것이다.

HR Plate의 폭과 두께의 제한성을 고려하면 현재 설계하중에 따른 강교량의 적용은 많은 제약이 따른다. 특별한 형식 및 지점부 처리를 통해서만 1등급 교량에 적용이 가능할 것으로 예상된다. 이에 반해, 경량전철의 고정하중 및 활하중은 일반 도로교와 철도교에 비해 작아서 간단한 바닥판과

[†] 책임저자 : 정회원 부산대학교 산업토목학과 부교수
E-mail : lsh77@pusan.ac.kr
TEL : (055)350-5314 FAX : (055)350-5319

* 비회원, 충북대학교 구조시스템공학과 석사과정

** 정회원, (주) 대우건설 상무이사

*** 정회원, 충북대학교 구조시스템공학과 교수

낮은 거더 높이로 설계가 가능하다. 경량전철은 차량이 가볍고 소음·진동이 적은 시스템으로 곡선반경이 작아 도심지에 건설 시 선형계획이 용이하여 접근성이 좋고 친환경적인 구조물의 설계가 가능하다. 특히, 신도시와 부도심, 공항, 고속철도역사 등 주요 교통거점을 연결하는 필수 기반시설로 도입하되 위와 같은 많은 이점을 살리면 보다 경제적인 교량건설이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 부부재 적용에 그치고 있는 HR Plate의 현 사용수준을 주부재를 포함한 강교량 부재 전체에 적용하기 위한 첫 걸음으로 하중과 거더높이가 상대적으로 작은 경량전철에 적용 가능한 최적의 박스거더 교량형식을 연구하였다. 경량전철 박스거더 교량의 모형으로 폭 1.8m에 거더높이 1.85m인 A 경량전철 연구모델(이안호 등, 2001), 1.8m에 거더높이 2.5m, 1.8m인 B 경량전철 모델(부산·김해 경전철 주식회사, 2005), 폭 1.8m에 거더높이 2.3m, 1.8m인 C 경량전철 모델(고려개발주식회사, 2006)을 대상으로, 경간 길이에서 콘크리트 교량에 비해 경쟁력이 있고 경간 중앙부의 부모멘트로 인한 응력집중의 분산을 고려한 교량으로 2@45=90m, 2@50=100m, 3@50=150m, 50+60+50=160m, 4@45=180m를 선정하되, 이번 연구는 직교에 한정하였으나, 박스거더의 특성 상 곡선교에서도 무리 없이 적용될 것으로 판단된다.

빔(Beam)요소를 이용하여 각 교량 등에 대한 모델링과 해석을 수행하되 단면의 응력이 허용응력을 초과하는 모델에 대해서는 Plate 요소와 Solid 요소를 이용하여 상세 해석을 실시하되 전체 모델링 후 취약부분만을 다시 해석하는 서브모델링 기법을 이용하여 검토함으로써 이들 교량들의 주거더를 HR Plate로 대체 가능함을 확인 제시함으로써 HR Plate의 수요 증대에 기여하고자 한다.

2. HR Plate의 교량 적용

HR Plate는 그 생산 공정라인의 특성 상 두께와 폭이 제한된다. 현재 국내 생산 가능한 최대 두께는 22mm까지이며, 최대폭은 12mm 이하의 경우는 1,930mm, 12mm를 초과하여 22mm까지는 1,830mm이다.

현재 국내에서 설계되고 있는 일반적인 박스거더교의 거더높이와 폭이 대부분 2,000mm를 넘고 있는 점을 고려할 때 HR Plate를 강교량의 플랜지에 적용하기 위해서는 판재와 판재를 교축방향으로 용접 연결하거나 볼트로 연결하는 등의 추가 작업이 필요하게 되어 그 경제성을 잃게 된다.

이와 같은 제약에도 불구하고 HR Plate를 강교량 주부재에 적용하기 위해서는 현실적으로 강교량의 이점을 살릴 수 있도록 경간 50m 이상의 교량에 적용되는 구조시스템과 이에

적합한 부재단면이 요구된다. 이때 중간지점부에 발생하는 부모멘트에 대하여 저항할 수 있는 새로운 지지시스템의 고안 적용은 여러 대응 방안들 중 하나가 될 것으로 생각한다. 이러한 지점처리 방안으로 중간지점부에 2층구조를 갖도록 하는 방식, 교각 코핑부의 홈에 강거더를 끼워 넣어 설치 완료하는 방식, 특수보강기구를 이용하는 방식이 제시될 수 있다.

3. 경량전철 교량모델 전신해석

3.1 교량 모델 및 적용 교량형식

검토 대상 교량들은 선행 연구보고(이안호 등, 2001)에 제시한 단면 및 하중 제원을 이용한 A 경량전철 모델과 시공예정인 B, C 경량전철 설계에 적용된 경량전철 제원을 참고하였다. 강박스 교량으로 교량 형태는 2@45=90m, 2@50=100m, 3@50=150m, 50+60+50=160m, 4@45=180m를 선정하여 각각 전신해석을 수행하였다.

경량전철 교량의 상부구조는 도입되는 경량전철의 종류와 형태에 따라 제원이 정해지고 고정하중과 활하중도 각각 검토대상의 상부구조와 고정하중 및 활하중에 대하여 검토하였다. 거더높이는 현재 B 경량전철과 C 경량전철에서 채택된 교량의 거더높이를 감안하여 복부판을 +자 필릿 용접된 높이 2.3m와 2.5m에 대하여 검토하였다. 또한, 3가지 모델 모두 HR Plate의 폭과 교량 시공 시 제작 camber를 고려하여 1.85m의 거더높이에 대해서도 검토하였다.

3.2 전신해석 절차

전신구조해석에 사용한 상용프로그램은 MIDAS Civil 2006을 사용하였으며 여러 경간 형식과 단면 및 하중에 대하여 구조검토하기 위하여 합성 전/후로 상부슬래브의 강성이 고려되는 2절점 빔(Beam)요소를 이용하여 해석을 수행하되 각각의 단면과 하중을 검토, 분석하여 적용 될 수 있는 최대 경간형식을 검토하였다. 분석결과 어느 정도 허용계수를 초과하는 구간에 대하여 4절점 판(Plate) 요소와 8절점 입체(Solid) 요소를 이용하여 상세 해석을 실시하되 전체 모델링 후 취약부분만을 다시 해석하는 서브모델링 기법을 이용하였다. 중간 지점부에서 최대 응력이 발생하므로 교각위의 지점부를 부분모델링 기법을 이용하여 응력집중부위를 선택하였다.

서브모델링은 전체모델링을 해석 완료시킨 후에, 상세 해석하고자 하는 부분을 따로 분리시켜 내부를 보다 구체적이고 세분화된 모델로 변경하되, 분리된 부위에서는 변형 일치의 경계조건으로 처리하고 하중은 전체모델링에서 해석하고자 하였던 하중을 그대로 적용한다. 본 연구에서는 전체모델링에서 서브모델을 분리시키면서 새로이 발생하는 경계노드

에는 전체모델 해석에서 발생하는 해당 노드의 6개 자유도 변위값을 지정하여 서브모델링 자체의 평형조건을 만족시키되 구조해석 시 계산된 변위 값을 경계치로 적용시켰다.

서브모델링으로 부재 형상들이 새로 모델링되는 부분에 다양한 보강재를 적용시키되 세분화된 요소를 갖는 모델링을 전산해석 함으로써 해당 구조상세의 변형의 크기 및 응력집중 여부 검토 등을 분석하여 보다 적절한 구조상세를 얻고자 하였다.

3.3 단면 및 하중제원

A 연구모델과 B 경량전철 및 C 경량전철의 단면제원에서는 상부구조와 활하중에 따라 정해지는 단면폭과 거더높이가 큰 변수가 되는데 도입되는 경량전철의 종류와 형태에 따라 다양한 단면폭과 거더높이 및 하중이 적용된다.

B 경량전철과 C 경량전철은 다음 Fig. 2와 같이 설계된 단면을 이용하였으며, A 모델은 기존 연구자료(이안호 등, 2001)에 의거한 단면과 하중을 선택하였다. Fig. 2에 나타난 각각의 표준단면을 갖는 경량전철 교량에 HR Plate 적용성을 알아보기 위해 다음과 같이 거더폭과 일부 거더높이를 수정하였다. 모든 모델 상·하플랜지의 폭은 현재 가공되고 있는 HR Plate 22mm의 폭을 고려하여 1.8m로 하였으며 복부판의 높이는 A 모델에는 HR Plate의 폭의 제한성과 제작 Camber를 고려하여 1.85m로 하였고, B와 C 경량전철은 현재 각각 적용된 거더높이 2.5m와 2.3m를 그대로 고려한 것과 HR Plate의 폭과 같은 거더높이 1.85m로 고려한 것에 대하여 각각 전산해석을 수행하였다.

예를 들어 B 경량전철 교량거더의 상부플랜지와 하부플랜지에는 각각 종방향 리브를 3개와 2개를 배치하였으며 플랜지의 두께는 모두 22mm, 복부판은 16mm로 적용하였다.

각 모델에서는 열차의 중심이 박스거더의 중심에 올 수 있도록 가능한 열차의 간격을 고려하여 거더의 간격이 결정되고 있으며 빔요소를 이용한 해석 시 거더 요소에 생략되는 세부 보강재 등 2차부재의 자중을 고려하여 자중에 하중증가계수 1.2를 적용하였다. 상부 슬래브의 두께는 슬래브 면적의 평균치를 적용하였으며 각 상부 슬래브의 하중은 거더 중심과 슬래브 중심의 거리의 차를 고려하여 수직하중 및 비틀림모멘트를 외부하중으로 해석에 사용하였다. Table 1에 각 모델에 적용되는 구조해석에 적용된 재료상수를, Table 2에는 고정하중을 정리하였다. B 모형에서 설계에 사용한 도상하중은 곡선교의 구배와 안전율을 고려하여 거더당 27.7 kN/m의 하중을 적용하였다. 콘크리트 도상의 넓이를 3m로 가정한다면 평균 두께는 약 0.40m로 과대 적용으로 판단되므로 본 연구에서는 다음과 같이 하중을 분리 적용하였다. 우선 거더당 콘크

리트 두께 0.22m 넓이 3m의 해당하는 하중 15.18 kN/m를 적용하였다. 궤도하중은 레일 및 부대시설과 전기/신호통신을 고려하여 6.28 kN/m 적용하였고 방호벽과 방음벽을 고려하여 10.0 kN/m를 적용하였다.

열차하중은 Fig. 3과 같이 각각 도입되는 열차의 형식별로 적용하였는데, A 모델(이안호 등, 2001)은 하중이 제일 작은 AGT 고무차륜 형식, B 모델(부산-김해 경전철 주식회사, 2005)은 AGT 철제차륜 형식, C 모델(고려개발주식회사, 2006)은 LIM 형식이다. 복선교량에 대하여 상시 만차중량의 하중을 재하 하였으며 충격계수는 철도교 설계기준에서 제시한 식에 따라 0.31로 계산되는데 새로운 구조시스템의 적용에 따른 예기치 못한 충격 등 여유를 두어 0.5로 할중 적용 검토하였다. 또한, 이러한 조건에서 활하중을 교량에 재하하고 영향선 분석을 통해 경간 중앙부근과 교각 지점부에서 휨과 전단에 대하여 가장 불리한 조건을 선정하였다.

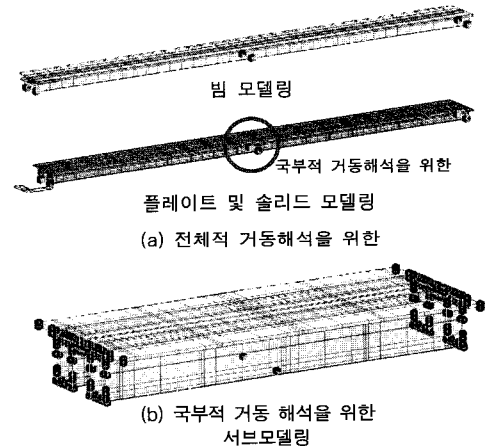


Fig. 1. Modeling procedures

Table 1. Material constant of structural analysis

분류	제상수	해석 요소	단위중량 (N/mm ³)	탄성계수 (MPa)	포와송비
Steel Box Girder	2	절점 빔	7.85E-5	2.10E5	0.30
	4	절점 판			
Concrete Slab	8	절점 입체	2.50E-5	2.50E4	0.16

Table 2. Girder height and applied load of models

구분	상부 단면폭 (m)	거더 중심 간격(m)	형 고(m)		슬래브 하중 (거더당)	
			설계안	HR 고려	수직하중 (kN/m)	비틀림모멘트 (kN·m/m)
A 모델	7.720	3.960	-	1.85	24.9	1.2
B 모델	8.900	3.600	2.5	1.85	27.7	13
C 모델	10.350	4.900	2.3	1.85	32.1	4.4

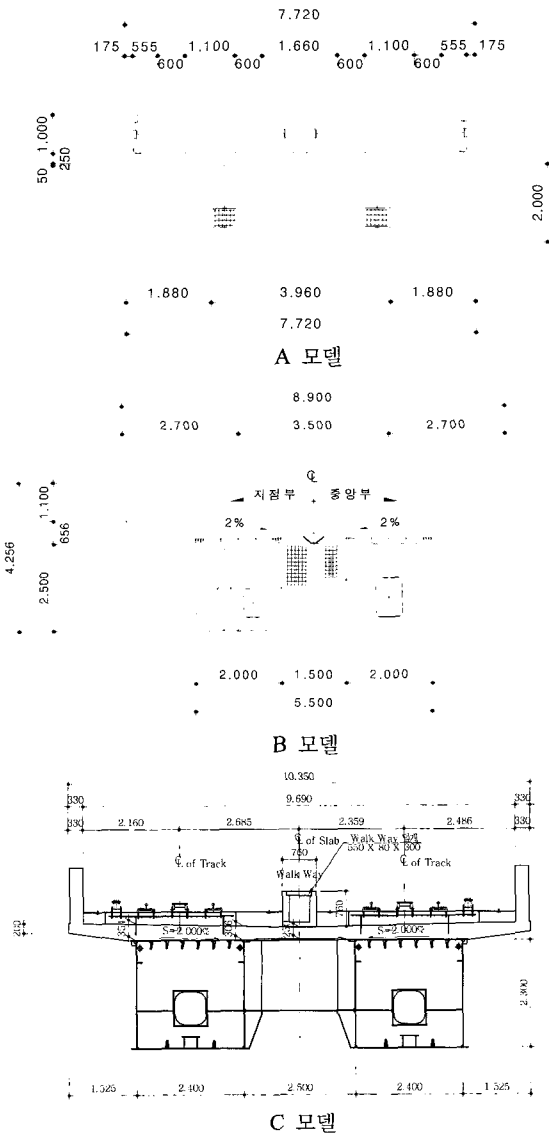


Fig. 2. Design standard section of models

3.4 경량전철 해석 결과(빔해석)

3.4.1 A 모델 해석결과

A 모델의 경량전철의 제원을 적용하여 전산해석을 수행한 결과는 Fig. 4와 Fig. 5와 같다. 경간별 구성 형식에 따른 각 교량에서 경간중앙과 지점부에서 발생하는 최대 정/부 휨모멘트는 각각 16,272 kN·m와 25,860 kN·m이다. Fig. 4, 6, 9의 가로축에서 ‘정’은 각 교량형식별 지간 중앙 부근에서 발생하는 최대 정모멘트를 나타내며, ‘부’는 중간지점부에서 각 형식별 발생하는 최대 부모멘트를 나타낸다. Fig. 5, 7, 8, 10 및 11의 가로축에는 교량의 경간구성과 상하 플랜지에 따른 적용된 형고를 나타내었으며 인장과 압축의 표기는 발생 응력의 종류를 나타낸다. 결과의 범례들은 각 해석 단계에서 발

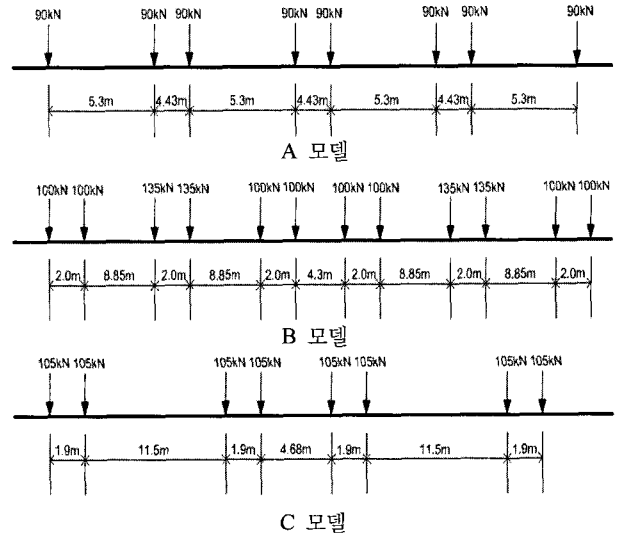


Fig. 3. Train load of models

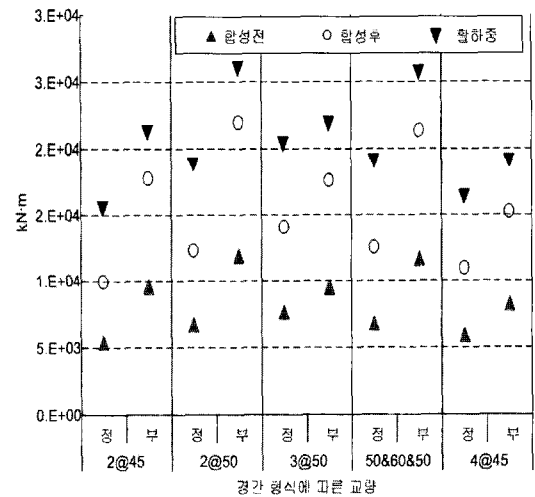


Fig. 4. Maximum positive /negative moment of A model

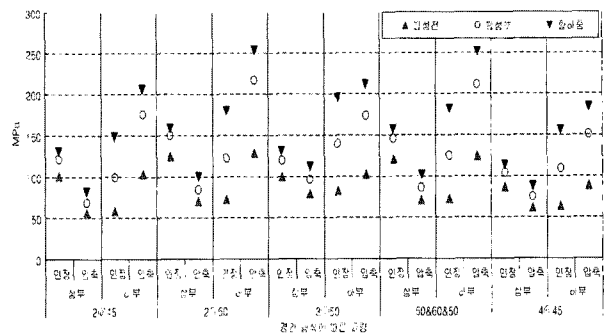


Fig. 5. Maximum stress of flange in A model

생하는 모멘트 및 응력값을 나타내며, 각 단계별 응력은 전 단계까지를 포함하는 누적된 값이다. 즉, 최종적으로 ‘▼’는

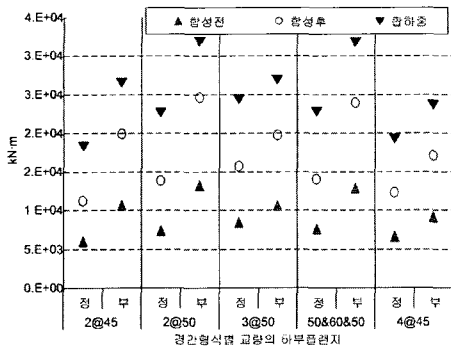


Fig. 6. Maximum positive /negative moment of B model

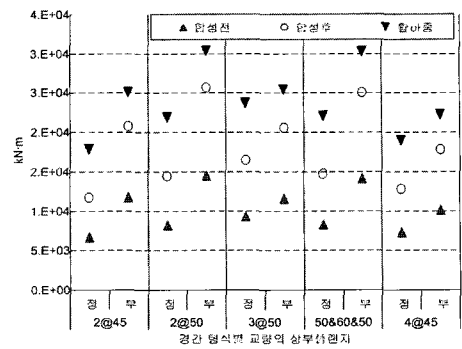


Fig. 9. Maximum positive /negative moment of C model

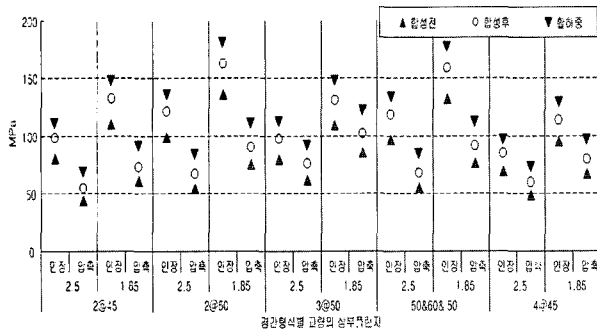


Fig. 7. Maximum stress of upper flange in B model

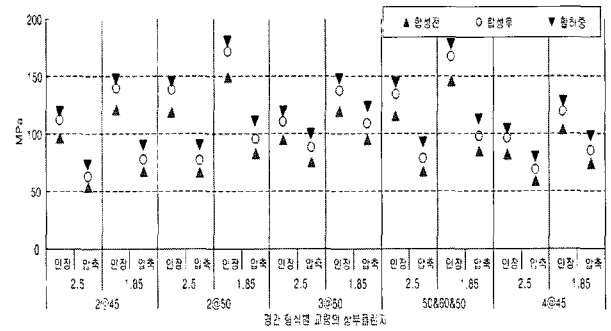


Fig. 10. Maximum stress of upper flange in C model

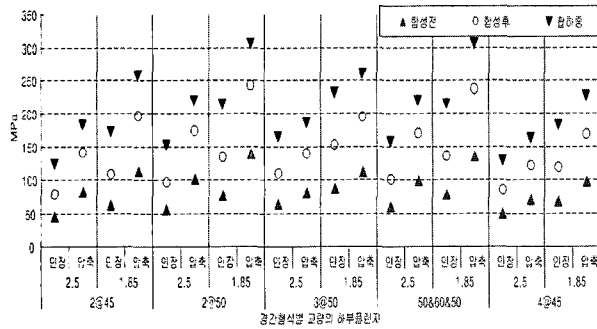


Fig. 8. Maximum stress of bottom flange in B model

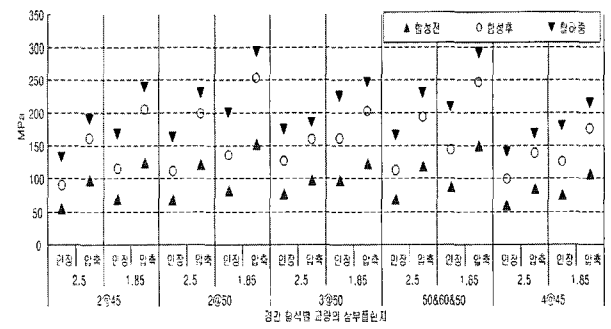


Fig. 11. Maximum stress of bottom flange in C model

합성전과 합성후 단계의 고정하중으로 인한 응력값과 활하중으로 인한 응력값의 차를 나타낸다.

경간 형식에 따른 각 교량의 상·하플랜지에서 발생된 응력값을 보면 상부 플랜지에서는 지점부에서 최대 인장응력 156.8 MPa와 경간 중앙부에서 압축응력 111.4 MPa로 사용된 강종 SM490의 허용응력 190 MPa를 고려하면 모두 만족되는 응력이다. 하부 플랜지에 발생된 인장력은 최대 195.4 MPa 정도로서 경간이 짧은 구간에서는 허용응력을 만족시키고 있으며, 허용응력을 상회하는 경간에 대해서는 리브의 보강 및 U-리브 교체 보강으로 발생응력을 허용응력 이내로 만족시킬 수 있었다.

3.4.2 B 경량전철 해석 결과

해석결과는 Fig. 6~Fig. 8과 같으며, 최대 정, 부모멘트는 각각 24,326 kN·m와 31,793 kN·m이다. 거더의 높이가 2.5m 인 경우 경간중앙부에서는 상하플랜지 모두 그리고 중간지점부의 상부플랜지에서 발생하는 응력은 허용응력을 만족하였으나, 중간지점부의 하부플랜지에서 발생하는 최대 인장응력과 압축응력은 각각 163.29 MPa와 217.81 MPa이다.

하부플랜지의 압축응력은 거더높이가 2.5m인 3교량에서 허용응력 내에 들어오며 허용응력을 상회하는 경간 구성 형식은 거더높이가 작은 A 모델에 비해 비교적 쉬운 보강 및 지점부 처리로 극복된다. 3.5.1절에서 상세해석을 수행하여

허용응력 이내로 만족됨을 확인하였다.

거더높이가 1.85m인 경우에는 대부분 하부플랜지에서 발생하는 인장응력이 허용응력을 넘어 경간이 작은 경간형식을 제외하고는 구조적 보강이 필요한 것으로 나타났다. 거더의 높이 2.5m에 상하플랜지 폭 1.8m로 구성될 경우 대부분의 경간 구성 형식들은 허용응력을 만족한다.

3.4.3 C 경량전철 모델 해석 결과

Fig. 9~Fig. 11의 해석결과에 따르면 최대 정모멘트와 부 모멘트는 각각 23,677 kN·m와 30,397 kN·m이다. C 경량전철의 경우 발생하는 응력은 B 경량전철과 같은 양상을 보였지만 다소 B 경량전철에 비해 발생하는 응력의 크기가 작다. 경량전철 활하중은 B 모델이 크지만 해석에 사용한 단면은 C 경량전철에 사용한 단면 제원이 크므로 C 모델쪽이 비교적 작은 값을 나타내고 있다.

그러나 최종적으로는 발생 응력에 큰 차이는 없어서 B 모델에서와 같이 거더의 높이를 HR Plate의 생산 제한 폭 1.85m로 그대로 적용할 경우 대부분 중간지점부 하부플랜지에서의 압축응력 집중이 문제가 됨을 알 수 있다.

3.4.4 각 모델의 처짐 해석 결과

각 모델별 활하중에 의한 처짐을 Table 3에 정리하였다. 계산된 최대 처짐은 B 모델에서 발생하였고, 거더높이 1.85m일 때 구간 별 처짐량은 경간 45m에서 3.8cm, 경간 50m 이상의 경우는 5.8cm로 산정되었다. 철도교설계기준(2004) 3.3.1절의 기준에 따르면 활하중에 의한 허용처짐량이 45m일 때 5.6cm (45/800)와 50m일 때 7.1cm (50/700)로 거더높이 1.85m로 하여도 허용처짐값을 만족하였다. 또한 계산된 처짐량은 충격 계수가 고려되고 복선재하로 계산된 것을 감안한다면 실제 설계에서는 물론 가설완료 시의 처짐량은 더 작아질 것으로 판단된다.

Table 3. Deflection of models at live load (mm)

거더 높이(m)	2@45	2@50	3@50	50+60+50	4@45
A 모델 1.85	2.9	4.3	4.2	4.3	2.9
B 모델	2.5	2.1	3.1	3.0	2.0
	1.85	3.8	5.8	5.6	3.7
C 모델	2.3	2.0	2.9	3.0	1.9
	1.85	3.1	4.5	4.4	2.9

3.5 경량전철 해석결과 (상세해석)

3.5.1 경간 형식 1 (50+60+50=160m, 거더높이 2.5m)

앞의 3가지 모델에 대하여 빔요소를 이용한 해석 결과(Fig. 4

~11 참조)를 보면 B 모델에서 발생하는 응력이 타 모델보다 다소 크다. 경간 형식 별 최대 응력을 보면 3@50=150m의 경간 중앙 하부플랜지에서 큰 응력이 발생하였지만 지점부에서는 50+60+50= 160m에서 큰 응력이 발생하였다. 따라서 추후 응력집중이 큰 부위들에 대하여는 공통적으로 대응할 수 있는 대상으로 상세해석의 전체 모델을 응력이 가장 크게 발생하는 B 모델 단면과 하중제원을 갖는 경간 형식 50+60+50 =160m를 선택하여 수행하였다. 지점의 국부적 거동차이를 확인하기 위하여 거더 한쪽은 지점을 그대로 두어 변위제어를 하였으며 다른 한쪽은 반력은 수상판에 골고루 분포시켜 작용시켰다.

지점부에 발생하는 보다 실제적인 응력 분포를 알아보기 위해 각 하중별 반력을 받침판의 넓이로 나누어 지점에 발생하는 각 하중별 반력이 분산되도록 하였다. 또한 받침판과 소울플레이트 두께의 영향을 고려하기 위해 받침판 넓이에 해당하는 Plate 요소 두께를 실제 상황에 맞추어 추가로 부여하였다. 이러한 보강재 형상은 지점부 수직보강재를 짝수로 배치하면 강재 손실율은 그리 크지 않으며, 제작에 있어서도 자동 커팅으로 문제되지 않는다.

지점부에 보강재를 추가하고 하부플랜지 종리브를 추가하는 간단한 보강을 하여 Table 4와 같이 전 구간 허용응력을 만족하는 해석결과를 얻었다

Table 4. Stress of bottom flange and diaphragm in each stage

구 분	하부플랜지 Sxx (MPa)		다이아프램 Szz(MPa)
	경간중앙부	지점부	
합성전 고정하중	72.62	-71.56	-25.14
합성후 고정하중	44.80	-53.64	-28.29
활하중	62.21	-38.87	-24.95
합 계	179.61	-163.97	-78.38

3.5.2 경간 형식 2 (46+50+46=142m, 거더높이 1.85m)

빔요소를 이용한 3.4절의 해석에서 B와 C 모델 각각의 단면 제원과 하중을 이용하여 거더높이를 1.85m로 해석한 교량은 대부분 허용응력을 만족하지 못 하였다. 거더높이가 1.85m 이하로 복부판에 용접이 필요 없이 교량 설계가 가능하다면 HR Plate의 활용은 더욱 극대화 될 것이다.

경간 구성 형식면에서 강교량으로서 경쟁력 있는 교량을 제안하기 위하여 교량의 경간 형식을 46+50+46=142m로 선택하고, 거더높이는 1.85m이며 하중 제원은 B간 경량전철의 단면과 하중제원을 사용한 교량에 대해 HR Plate 적용성을 검토하였다. 이 검토를 위하여 지점부 처리 방식 중에 특수보강 구조 방식이 도입되었는데, 지점부(교각이나 교대) 하부플랜지에 필요로 되는 만큼의 압축력을 도입할 수 있는 보강부재

를 부착시키고 교대나 교각에 대하여 필요 압축력을 도입하는 방식이다.

해석결과 각 하중에 대한 교각의 거동은 미소하여 상부교량 거동에 영향이 적은 것으로 판단된다. 각 단계별 하중에 대한 주요 부분의 응력은 Table 5와 같고 각 단계에서 도입되는 축력은 2395 kN, 1648 kN, 1262 kN이다. 각각 발생하는 응력은 허용응력을 만족한다. 경간 중앙부 하부플랜지의 응력이 다소 크게 나왔다. 상·하플랜지의 응력은 지간 조정으로 응력을 완화시킬 수 있을 것이다. 이 모델에서는 거더높이가 낮아 거더높이가 높은 교량에 비해 지점부 다이아프램에도 다소 큰 응력이 발생하였다. 이러한 응력집중은 보강재를 적절히 보강함으로써 지점부로부터 반력에 의한 응력집중을 다이아프램을 통하여 분배시킬 수 있었다.

Table 5. Stress in each stage (MPa)

구분	상부플랜지 (Sxx)		하부플랜지 (Sxx)		다이아프램 (Szz)
	경간중앙부	지점부	경간중앙부	지점부	
합성전 고정하중	-68.4	92.8	68.1	-60.0	-65.6
합성후 고정하중	-16.3	15.8	49.0	-43.5	-41.4
활하중	-13.9	11.7	66.0	-61.8	-33.3
합 계	-98.6	120.3	183.1	-165.3	-140.3

4. 고찰

4.1 각 교량모델의 최대모멘트비 평가

A 모델, B 모델, C 모델의 최대 모멘트를 Table 6에 정리하고 A 모델에 대한 B 모델, C 모델의 비를 무차원으로 나타내었다. 평가 결과 A 모델에 비해 B 모델, C 모델의 모멘트비는 정모멘트에 대해서는 각각 1.49, 1.46, 부모멘트에 대해서는 1.23, 1.18로 산정된다. 각 모델에 대해 최대 모멘트가 같은 지간에서 발생한 것으로 보면 본 연구에서 적용된 3개의 모델의 작용하중은 B, C 모델은 거의 같으나 B모델이 약간 크고, A 모델은 가장 작은 것으로 평가된다.

Table 6. Maximum moment ratio to A model in each model

구분		A모델	B모델	C모델	비고
		최대 모멘트	정	16,270	
	부	25,860	31,790	30,400	
모멘트비	정	1	1.49	1.46	A모델에 대한 비
	부	1	1.23	1.18	

4.2 각 교량 모델의 적용성 평가(빔 해석)

각 모델별 최대응력을 허용응력에 대한 응력비로 계산하여 정리하면 Table 7과 같고 이것을 도표화 하면 Fig. 12와 같다.

B 모델 해석시(폭 2.5m) 50+60+50m 경간에서 지점부 하부플랜지의 최대응력이 Fig. 8에서 218.7 MPa로 산정되며, 같은 모형을 지점부에 수직보강재와 하부플랜지에 종리브를 추가하는 간단한 보강을 한 후 상세 해석(전체모델링과 부분모델링)으로 구조해석을 수행한 결과인 3. 5. 1절의 Table 4에서 163.9 MPa로 계산되어 허용응력(190 MPa)과의 비율로 볼 때, 1.151에서 0.862로 응력집중부가 많이 완화됨을 볼 수 있다. 여기서 응력비의 감소가 0.289정도 이루어 졌다. 이는 구조계산상의 지점부 응력집중은 간단한 보강과 전체모델링, 부분모델링에 의해서 대략 허용응력의 1/4~1/3정도가 감소됨을 나타낸다. 또한 이 이상의 응력비가 작용하였을 때는 집중된 응력을 특수보강구조 등의 지점부 처리를 하여야 허용응력 이하로 될 수 있는 것으로 판단된다.

Table 7에 대한 응력 완화 조건을 고려하면 Fig. 12에서 발생한 응력비가 1.0을 넘는 경우라도 개략적으로 1.25 정도까지는 간단한 보강으로 적용이 가능한 것으로 판단되며, 응력

Table 7. Maximum stress ratio to allowable stress in each model

구분	2@45	4@45	2@50	3@50	50+60+50
A모델 (거더높이 1.85m)	1.089	0.969	1.333	1.118	1.328
B모델 (거더높이 2.5m)	0.959	0.853	1.153	0.974	1.151
B모델 (거더높이 1.85m)	1.344	1.194	1.614	1.363	1.609
C모델 (거더높이 2.3m)	0.999	0.883	1.213	0.974	1.207
C모델 (거더높이 1.85m)	1.274	1.126	1.547	1.289	1.539

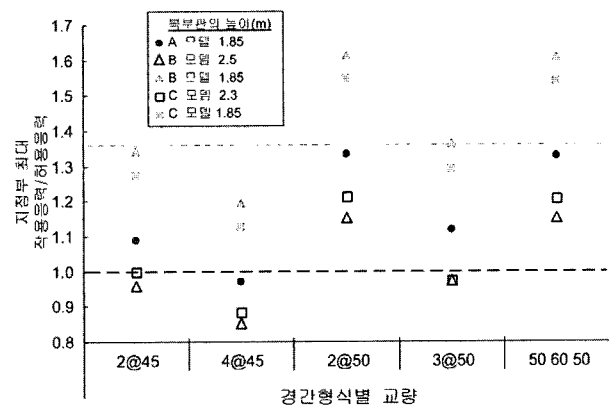


Fig. 12. Stress ratio of support in each span type

비1.25~1.36에서는 지점부에 좀 더 강화된 보강으로 지점부 응력집중을 완화하면 적용이 가능할 것으로 판단된다.

Table 7과 Fig. 12에서 각 모델의 적용 가능성을 분석하면 다음과 같다. A 모델에 대해서는 폭 1.8m에 거더높이 1.85m인 HR Plate 폭만으로 설계가 가능함이 확인된다. B와 C 경량전철의 거더높이 2.3m와 2.5m의 모델은 대부분 허용응력 이하로 계산되고, 2@50과 50+60+50으로 구성되는 교량에서 응력이 허용응력을 초과하나 최대응력이 1.213이므로 간단한 보강으로 적용이 가능한 것으로 판단된다. B와 C 경량전철의 거더높이 1.85m 모델은 특수보강구조 등의 지점부 처리가 필요한 2@50과 50+60+50 제외하고는 리브보강이나 수직보강재 보강 등의 좀 더 강화된 보강으로 허용응력 이하로 설계될 수 있는 것으로 판단된다.

4.3 상세해석

4.3.1 경간 형식 1 (50+60+50=160m, 거더높이 2.5m)

Table 4의 결과를 보면 풍하중과 같은 기타 하중을 고려하더라도 허용응력을 만족할 것으로 판단된다. U-리브와 같은 강성이 큰 보강재를 이용하는 방법을 적용함으로써 발생 응력을 감소시킬 수 있을 것이다.

검토 대상 교량 중 경간 형식이 가장 큰 50+60+50=160m 교량에서도 허용응력을 만족하므로 B 및 C 경량전철에서 거더높이가 각각 2.5m, 2.3m이고 상·하플랜지 폭이 1.8m인 강상자형 교량의 적용은 무리가 없을 것으로 판단된다.

4.3.2 경간 형식 2 (46+50+46=142m, 거더높이 1.85m)

교량의 경간 형식을 46+50+46=142m, 거더높이는 1.85m로 선택하고, 하중 제원은 B 경량전철의 단면과 하중제원을 사용한 교량에 대하여 상세해석을 수행하였다. 지점부(교각이나 교대) 하부플랜지에 필요로 되는 만큼의 압축력을 도입하는 특수보강구조 형식을 도입하여 상세해석을 수행하였다. 해석결과 각 단계별 하중에 대한 주요 부분의 응력은 Table 5와 같이 허용응력을 만족함을 확인하였다. 거더높이가 1.85m일 때도 지점부에 특수보강구조 형식을 도입하면 적용이 가능함을 확인 하였다.

4.4 HR Plate 박스거더의 경제성 평가

HR Plate의 경제성 평가를 위하여 50+60+50m지간의 160m 교량에 대하여 1.8m×2.5m HR Plate박스와 2.5m×2.5m 일반 후판박스의 제작비용을 개략적으로 계산하면 다음과 같다.

2006년 4월 현재가격을 적용하였으며, 1.8m×2.5m HR Plate 박스에 소요되는 총 강재중량은 3960 kN, 2.5m×2.5m 일반 후판박스에 소요되는 총 강재중량은 4700 kN으로 산정된다.

거더높이 2.5m의 단면은 가로보강재 위치에서 상하로 복부판을 필릿용접 연결하여 거더높이를 높일 경우 문제없이 가능할 것으로 판단된다. 이 경우 복부판 연결부에서는 초음파탐상 검사 정도로 가능할 것임으로 제작단가의 상승은 생각보다 크지 않을 것으로 생각된다.

1) 후판과 HR Plate의 단가 차액

$$3960\text{kN} \times 148,800\text{원/kN} = 58,925\text{천원}$$

2) 일반 강박스거더 대비 강재 톤당 감소량에 의해 금액

$$740\text{kN} \times 679,300\text{원/kN} = 50,268\text{천원}$$

3) 추가된 대상 교량 160m의 복부판 용접비용

$$160 \times (4000+100+1000+4000) \times 5.2 = 8,320\text{천원}$$

4) 총비용 감소량

$$58,925 + 50,268 - 8,320 = 100,873\text{천원}$$

이정도의 비용감소는 HR Plate의 수요 창출을 위해 매력적인 요소가 될 것으로 확신한다.

5. 결론

본 연구에서는 경량전철을 대상으로 5개 모델(A모델 1종, B모델 2종, C모델 2종)과 5개 교량형식의 25개 교량모형에 대하여 작용하중, 지간 형태, 거더높이(용접 사용여부)를 주 변수로 하여 HR Plate 박스거더 모델의 경량전철 가능성을 검토하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 연구에서 적용된 3개의 모델의 작용하중을 평가하면 A 모델에 대한 B 모델, C 모델의 모멘트비가 정모멘트에 대해서는 각각 1.49, 1.46, 부모멘트에 대해서는 1.23, 1.18로 산정된다. 적용된 3개의 모델의 작용하중은 B, C 모델은 거의 같으나 B모델이 약간 크고, A 모델은 가장 작은 것으로 평가된다.
- (2) A 모델에 대해서는 2@45=90m, 4@45=180m, 3@50=150m 교량에 대하여 폭 1.8m에 거더높이 1.85m인 HR Plate 폭만으로 설계가 가능함이 확인되었다. A 모델의 상기 교량 들은 지간이 비교적 짧지만 경량전철 특성상 복잡한 도심지를 지나가야 하고 콘크리트 교량에 비해 거더높이가 낮기 때문에 충분히 경쟁력이 있다.
- (3) B와 C 경량전철 거더높이 2.5m와 2.3m의 모델은 대부분 허용응력 이하로 계산되고, 2@50과 50+60+50으로 구성되는 교량에서 응력이 허용응력을 초과(최대 1.213)하나 응력이 크게 발생하는 50+60+50=160m 교량의 상세해석 결과 간단한 보강으로 허용응력을 만족하므로, B 및 C 경량전철에서 거더높이가 각각 2.5m, 2.3m이고 상·하플랜지 폭이 1.8m인 강상자형 교량의 적용은 무리가 없을 것

으로 판단된다.

- (4) B 모델의 거더높이 1.85m의 46+50+46 교량에 대한 상세 해석 결과 거더높이 1.85m도 지점부에 특수보강구조 형식을 도입하면 적용이 가능함을 확인하였다.
- (5) 길이 50+60+50=160m이고 폭 8.9m인 B형 모형의 경량전철에서 HR Plate박스(1.8m×2.5m)와 일반 후판박스(2.5m×2.5m)의 제작비용을 비교할 때, HR Plate를 적용한 협폭박스거더가 개략 1억의 비용감소 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다.
- (6) 각 모델별 활하중에 의한 계산된 최대 처짐량은 거더높이를 1.85m로 하여도 허용 처짐 값을 만족하였다.
- (7) HR Plate를 주부재로 사용 할 수 있는 교량모형을 제시하여 HR Plate만으로 교량부재 전부를 제작할 수 있음을 확인하였으므로, 그 사용량을 획기적으로 증가시킬 수 있을 것으로 기대된다.
- (8) 경전철에 가능한 HR Plate적용 교량 단면 모형과 지간형식을 제시하였으므로, 경전철 교량설계 시 HR Plate 적용으로 타 재료 적용 교량에 대한 강 교량 건설의 경제성을 부각시킬 수 있어 향후 HR Plate 수요를 창출할 수 있는 다양한 설계가 기대된다.

감사의 글

본 연구는 POSCO의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 1. 한국강구조학회(2004) HR Plate 이용 강교량 제작 가이드, pp.1-20.
- 2. 한국강구조학회(2006) HR Plate의 교량 적용 가이드, pp.1-27.
- 3. 한국도로교통협회(2005) 도로교설계기준, pp.5-60.
- 4. 한국토목학회(2004) 철도설계기준, pp.15-114.
- 5. 이안호, 이병승, 이덕영(2001) 경량전철 토목 구조물 특성에 관한 연구, 2001년도 춘계학술대회 논문집, 한국철도학회, pp.387-392.
- 6. 부산-김해 경전철주식회사(2005) 부산-김해 경량전철 토목공사 설계도.
- 7. 고려개발주식회사(2006) 용인경량전철 건설사업 토목공사 8-10구간 설계도.
- 8. 마이더스아이티(2006) Analysis for Civil Structures.

(2007년 8월 9일 논문접수, 2007년 9월 20일 심사완료)