

경량전철 강교량에 대한 이동하중하 동적거동 및 장대레일 축력의 해석적 평가

Analysis of the Dynamic Behavior and Continuous Welded Rail of LRT Steel Bridge

성택룡* 김철환**
Seong, Taek-Ryong Kim, Cheol-Hwan

ABSTRACT

Two-plate girder bridge and narrow steel box girder bridge are suggested for the steel wheel AGT system. For these bridge system, rail-bridge interaction analysis was carried out and dynamic behavior of these bridges was investigated. The result shows that all the estimated parameters satisfy the criteria concerned. As a result these two suggested bridge systems have enough performance to be competitive for the LRT elevated structures.

1. 서론

경량(輕量)전철은 통상 지하철과 같은 중량(重量, 中量)전철에 비해 수송규모나 축중이 상대적으로 작은 소형의 차량으로 중간규모의 수송능력을 가지며 유인 또는 무인운전이 가능한 첨단철도시스템으로서 국내에서는 주로 AGT(Automated Guideway Transit) 시스템을 말한다. 운행연장은 보통 10km~20km정도이며 대부분 독립된 전용 고가구조물 위를 주행하는 특징을 가진다. 이런 경량전철용 고가구조물은 차량의 동 특성에 의한 교량 구조물의 처짐을 일정한 범위 내로 유도하고 운행 차량의 동 특성과 구조물의 공진을 피하게 함으로써 얻을 수 있는 구조물의 안전성, 그리고 차량의 운행 안전성을 도모하도록 해야 하며, 철제차륜 시스템일 경우 장대레일을 사용할 수 있도록 함으로써 소음 진동의 문제를 저감함과 동시에 차량의 운행성과 승차감을 확보할 수 있도록 하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 경량전철용으로서 경쟁력 확보가 가능한 강교량 형식을 제안하고, 이러한 두가지 핵심적인 요구조건으로서 장대레일화에 따른 교량-장대레일 상호작용을 검토하고 차량 이동하중에 대한 교량의 동적 안전성을 해석적으로 평가하였다.

2. 대상 경량전철 강교량 및 차량시스템

본 연구에서는 AGT 시스템에서 경쟁력이 있을 것으로 평가되는 2주형판형교와 Narrow Box Girder교(이

* RIST 강구조연구소 토목구조연구실 책임연구원

** 포스코건설 기술연구소 건설기술연구팀 차장

하 협폭박스거더교)를 제안하고 검토하였다. 2주형판형교는 국내에서 최근에 많이 알려진 경제성이 우수한 강교량 형식이고, 협폭박스거더교는 기존 박스거더의 폭원을 1/2 정도로 줄이고 종방향 보강재를 없애거나 대폭 삭감하면서 판두께는 다소 증가시키는 방식으로 기존 박스거더교를 합리화한 형식으로 강재중량과 도장면적, 용접량 등을 많이 절감할 수 있는 교량 형식이다. 경간구성은 장대레일화를 감안한 2경간 연속교로서 2@40m를 기본으로 하였고, 여기에 시공성을 고려한 단순교로서 1@40m도 선정하였다. 해석에 사용된 차량은 철제차륜 AGT로서 축배치와 간격 및 축중의 크기는 아래 그림 3과 같으며 최대 운행속도는 70km/h, 설계 최고속도는 80km/h이다.

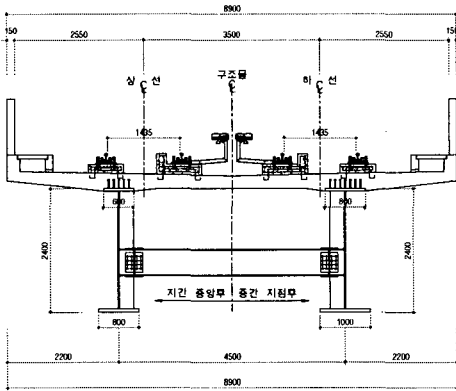


그림 1. 2주형판형교의 대표횡단면도

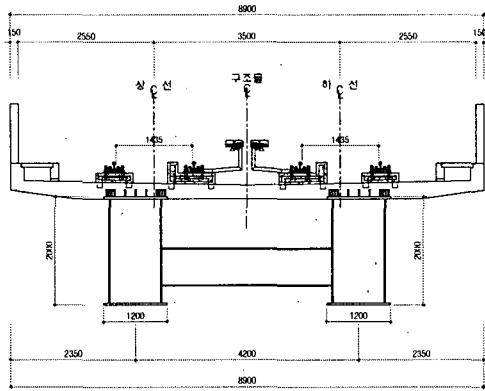


그림 2. 협폭박스거더교의 대표횡단면도

표 1. 각 교량별 주요 강재의 제원(단위:mm)

비 고	2주형판형교(형고 2,400)		협폭박스거더교(형고 2,000)		
	1@40m	2@40m	1@40m	2@40m	
지점부	상부플랜지	600×30	600×30	1,200×28	1,200×28
	하부플랜지	800×34	800×30	1,200×28	1,200×28
	복부판	22	22	12	12
중간부	상부플랜지	600×50	600×30	1,200×28	1,200×30
	하부플랜지	800×48	800×40	1,200×38	1,200×30
	복부판	22	22	12	12
중간지점부	상부플랜지	-	800×50	-	1,200×44
	하부플랜지	-	1,000×64	-	1,200×56
	복부판	-	22	-	14

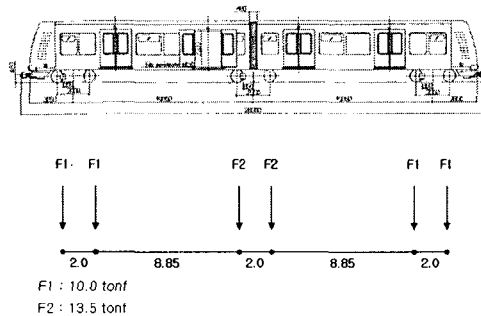


그림 3. 철제차륜 AGT 차량의 축하중 및 배치도

3. 장대레일-교량 상호작용 해석

3.1 개요

경량전철은 도심을 관통하는 경우가 흔하므로 소음과 진동을 저감할 수 있는 각종 방안의 도입이 중요하다. 이를 위해 궤도측면에서 일차적으로 접근할 수 있는 방법이 전 노선의 장대레일화가 될 수 있는데, 교량 상 레일의 장대화에 따른 레일축력의 변화는 교량과 궤도의 종방향 상호작용에 의해 결정되며 이 때 레일의 좌굴이나 파단에 대해 안전성을 확보하는 것이 필수적이다.

일반적으로 장대레일의 응력 발생 구조는 장대레일-교량간의 상호작용에 의한 것이므로 대부분 교량은 UIC 등에 의하여 배치된 지점위치와 교량 고정점간의 거리 등으로 그 발생 응력의 크기가 허용치 이내에 존재할 것으로 예상하고는 있으나, 경량전철에서는 UIC의 조건과 달리 콘크리트 도상을 사용하고 있고 사용 레일의 규격이 다르며 교량 상부구조 및 하부구조의 구조적 특성과 기초 및 지반의 특성 차이 등을 고려할 때 실제 장대레일-교량간에 대해 안전성을 검토하는 것이 타당하다고 하겠다.

3.2 장대레일 축력 검토를 위한 교각의 기본강성 산정

장대레일-교량의 상호작용 해석을 위해서는 교량 하부구조, 즉 교각의 강성을 결정하는 것이 필요하다. 물론 장대레일과 구조물간의 상호작용에 영향을 미치는 인자로는 상부구조 강성 및 도상의 상태, 도상의 종류, 하부구조의 강성, 기초의 강성, 기초저면의 흙의 상태 등이 될 수 있으나 교각의 크기나 높이를 제외한 모든 인자가 결정되어 있다면 요구되는 교각의 크기나 높이 즉 교각의 강성을 결정하여야 한다.

본 연구에서 교각의 강성은 시동 및 제동하중에 의해 발생하는 개략 변위검토를 통하여 결정하고 결정된 교각을 레일-교량 상호작용 해석을 통해 확인하는 방법으로 해석하기로 한다. 적용기준은 고속철도에 적용된 기준을 적용하도록 하였으므로, 시동 및 제동하중 작용시 수평변위를 10mm이내에 들어오도록 하며, 이때 적용하는 시동 및 제동하중은 열차하중의 25%를 적용하는 것으로 하였다. 교각 강성결정시 지지지반은 연암으로 가정하고, 교각의 높이는 현장에 따라 달라질 수 있으므로 10m, 13m, 15m, 20m로 분류하여 검토하였으며, 레일-교량 상호작용 해석시에는 13m를 기준으로 하였다. 해석결과, 각 교량형식별로 단경간의 경우 교각 직경 2.41m일 때 발생변위를 만족했으며 2경간의 경우 직경 2.68m인 경우 발생변위 10mm이내를 만족하였다 이에 따라 각 교량형식별로 교각직경은 단경간의 경우 2.45m, 연속교의 경우 2.70m로 선정하였다.

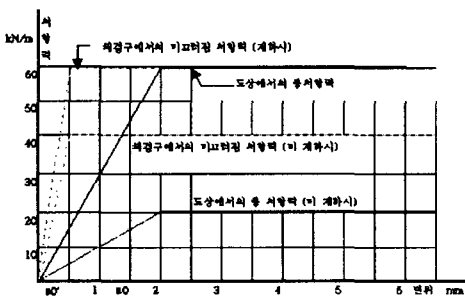


그림 4. 궤도의 종방향력-변위관계

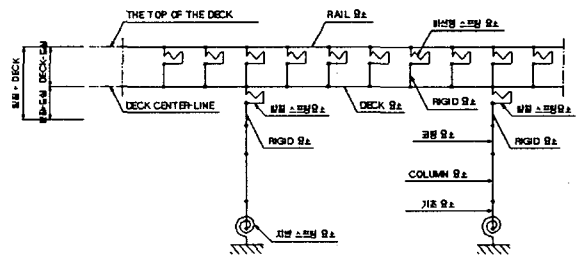


그림 5. 해석모델링 개념도

3.3 해석 조건

해석에 사용된 도상의 강성은 bi-linear 모델로서 UIC 774-3R⁽⁸⁾에서 제시하고 있는 것을 적용하는 것으로

하였다. 설정온도는 $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 로 하였으며 온도변화폭은 $-20 \sim 60^{\circ}\text{C}$ 로 하였다⁽²⁾. 시동 및 제동하중은 수직하중의 25%를 상정하였으며 열차하중의 재하길이는 상기 차량의 4량 1편성을 고려하였다. 해석 모델링은 그림 5와 같으며 토공구간은 교량구간의 좌우측 300m로 가정하고 교량의 경간은 10개 경간을 기본으로 하여 해석하였다.

3.4 해석 결과

장대레일-교량 상호작용 해석의 결과값은 UIC 774-3R에 의해 검토하는 것으로 하였다. 그림 6과 7은 단경간 2주형교의 경우에 있어서 온도조합, 시동 및 제동하중, 그리고 거더힘에 의한 인장응력의 분포도와 거더힘에 의한 상판단부변위, 상판 절대변위, 레일-상판 상대변위 등의 변위분포도를 보인 것이다. 표 7은 장대레일-교량 상호작용 해석결과 계산된 각 검토대상 지표들의 결과값들이다. 모든 값들이 기준내에 들었으므로 각 교량 형식별로 장대레일화가 가능한 것으로 판단되어 그 경쟁력을 검증하였으며 전반적으로 2주형판형교가 협폭박스교에 비해서는 다소 안전측의 결과를 보임을 알 수 있다.

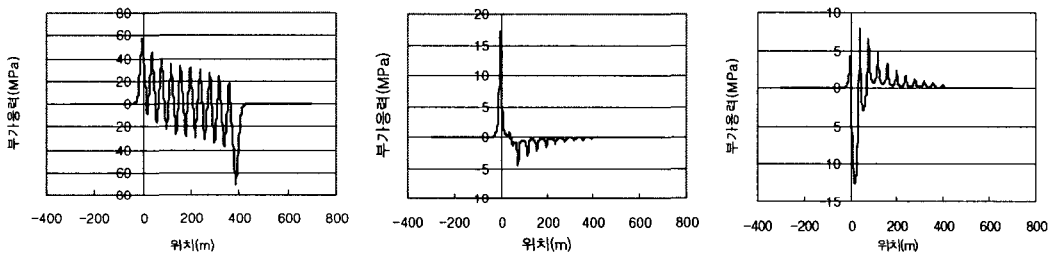


그림 6. 인장응력-단경간 2주형교(각각 온도조합, 시/제동하중, 거더힘에 의한 응력)

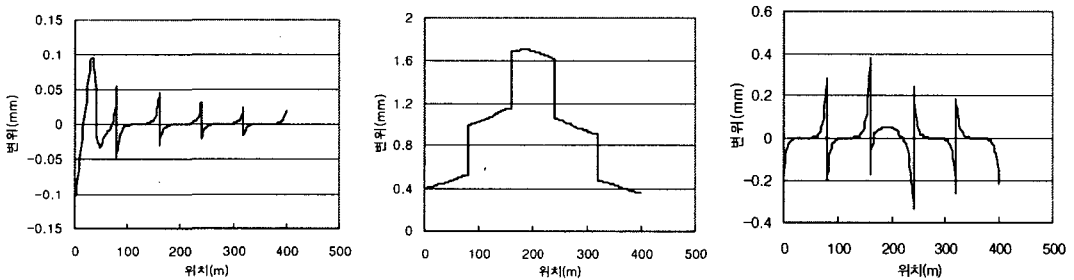


그림 7. 변위-2경간2주형교(거더힘에 의한 상판단부변위, 상판 절대변위, 레일-상판 상대변위)

표 2. 장대레일-교량 상호작용해석 결과

구 분 (UIC 기준)	1@40m		2@40m	
	2주형판형교	협폭박스거더교	2주형판형교	협폭박스거더교
부가압축응력(MPa)	63.510	63.536	74.226	74.247
부가인장응력(MPa)	78.889	80.424	76.075	76.542
회전에 의한 상판간 변위(mm)	0.540	0.620	0.140	0.180
상판의 최대절대변위(mm)	1.470	1.460	1.700	1.680
레일-상판간 최대상대변위(mm)	0.460	0.460	0.370	0.370

4. 동적거동 해석

4.1 개요

UIC 776-1R⁽⁹⁾에 따르면 교량의 고유진동수의 상한과 하한을 규정하고 이 범위를 벗어날 경우에는 종합적인 동적검토를 수행하도록 되어 있는데 본 연구의 교량은 지간 40m로서 상한과 하한이 2.653과 6.001이 된다. 그러나 아래 두 교량의 고유진동수 계산결과에 따르면 이 범위를 벗어나므로 동적검토를 수행할 필요가 있으며, 또한, 본 철재차륜 AGT 차량은 4량 1편성으로 구성되어 가진 하중의 반복횟수가 많지 않고 통과시간이 짧다는 점에서도 그 거동을 분석할 필요가 있는 것으로 판단되었다.

동적 해석은 교량과 차량의 동적 특성과 등속 주행을 고려하여 구하였으며 차량의 수치모델링은 이동집중하중으로 고려하였는 바, 이는 고속철도나 국철에 비해 차량속도가 상대적으로 느리고 차량의 질량이 교량의 그것보다 매우 작은 경우에 비교적 좋은 결과를 얻을 수 있다고 알려져 있다⁽⁵⁾.

해석은 제안된 경량전철용 강교량 형식에 대해 교량의 고유진동수를 구하여 공진이 유발될 우려가 있는 위험속도를 계산함과 동시에 이를 감안하면서 차량의 속도를 10km/h단계로 증가시키면서 교량의 단부회전각, 경간중앙부 수직처짐과 수직가속도, 상판 면틀림을 분석하였다. 더불어, 교량의 구조적 안전성을 확인하는 측면에서 동적확대계수(DMF)를 구해 설계 충격계수와 비교하였다. 해석에는 포항산업과학연구원(RIST) 강구조연구소의 프로그램인 RISTDAM⁽⁵⁾을 이용하였으며 감쇠비는 일반적인 강합성교량이 1~2%로 보고 있으나 본 연구에서는 그보다 더 안전측으로 0.5%로 계산하였다.

4.2 교량의 고유진동수 및 위험속도의 계산

본 연구에서의 부공간반복법(sub-space iteration method)에 의한 교량별 고유진동수 계산결과와 유효타격거리별 위험속도를 표에 나타내었다. 고유진동수는 상용프로그램인 MIDAS와 비교하여 검증하였으며 각 모드형상은 MIDAS로 표현하였다. 고유진동수 분석결과 합리화 2주형교의 경우가 같은 지간의 협폭박스거더교에 비해 조금 더 높게 나오는 것이 확인되었다.

표 3. 고유진동수, 모드형상 및 위험속도

교량형식	Mode	고유진동수(Hz)	Seff=2.00m	Seff=8.85m	Seff=10.85m	모드형상
2주형교 1@40m	1차	2.466	18	79	80	
	2차	2.537	-	-	-	
	3차	2.583	19	80적용	80적용	
2주형교 2@40m	1차	2.068	15	66	80적용	
	2차	2.205	16	70	80적용	
	3차	2.529	-	-	-	
	4차	3.405	25	80적용	80적용	
협폭박스교 1@40m	1차	2.234	16	71	80적용	
	2차	2.660	-	-	-	
	3차	4.122	30	80적용	80적용	
협폭박스교 2@40m	1차	1.919	14	61	75	
	2차	2.642	-	-	-	
	3차	3.126	23	80적용	80적용	

4.3 동적응답분석

모든 교량의 경우에 있어서 설계속도내의 위험속도를 포함한 각 속도대별로 공진의 경향은 보이지 않았으며 비교적 안정적인 거동을 보여주었다. 다만, 단경간 협폭박스거더교의 경우 속도 80km/h에서 다른 교량에 비해 응답이 다소 크고 응답의 감쇠가 더딘 경향을 보였다. 그림 8은 교량의 동적응답 시간이력곡선의 사례로서 단경간 2주형판형교의 단부회전각, 거더중앙부 연직처짐, 거더중앙부의 가속도 및 면틀림을 나타낸 것이다. 속도가 높은 경우 응답이 커짐을 알 수 있다.

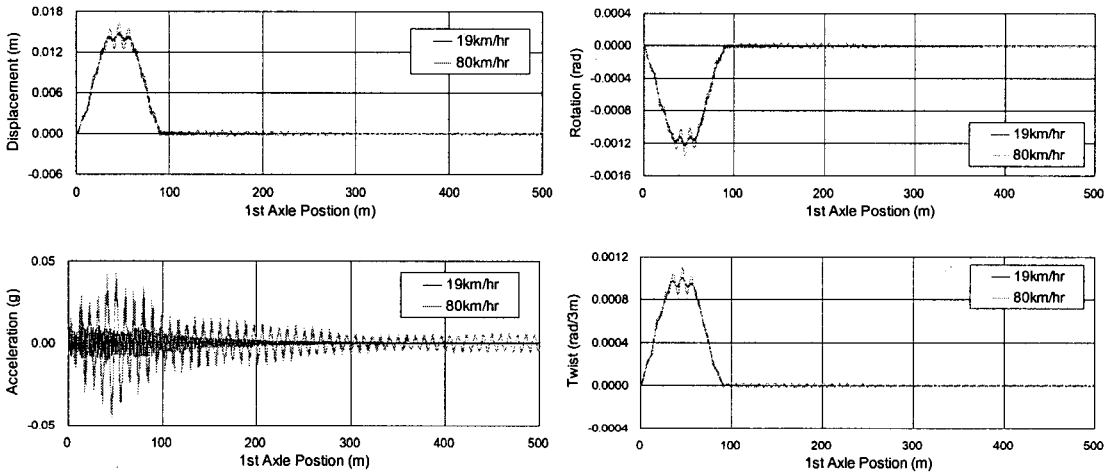


그림 8. 2주형교(1@40m)의 동적응답 시간이력곡선

각 교량별로 교량단부 회전각, 거더 중앙부 수직처짐, 거더 중앙부 가속도 및 상판의 면틀림의 각 차량속도대별 최대값을 아래 그림에 나타내었다. 교량형식별로 볼 때 2주형판형교가 협폭박스교에 비해 전반적으로 응답의 크기가 다소 컸으며 경간구성면에서는 단경간 교량이 연속교에 비해 응답이 다소 컸다.

먼저, 단부 회전각은 프랑스 SNCF의 일반철도 기준인 $6.5 \times 10^{-3}(\text{rad})^{(6)}$ 을 모두 만족하고 있음을 알 수 있다. 또, 거더 중앙부의 수직처짐은 기준인 $L/1,000$ 인 4cm보다 모두 작아 안정적인 것을 알 수 있다. 합리화 2주형교 2@40m 교량의 경우에는 속도 70km/h에서가 80km/h일 경우보다 수직처짐 응답이 다소 크다는 것을 알 수 있다. 거더 중앙부의 수직가속도 역시 매우 안정적인 값을 보여, 주행 안전성의 기준이 되는 0.5g(무도상의 경우)에 훨씬 미치지 못하였으며 특히 차량 탑승 승객의 승차감 기준이 되는 0.1g를 넘는 경우도 없었다. 차량 대차 등의 감쇠와 탄성에 의해 이 값은 실제 차량내에서는 훨씬 더 줄어들 것으로 예상된다. 면틀림은 약 1.5m간격의 궤도가 뒤틀리어 차량의 운행에 방해가 되는지 여부를 판단하기 위한 것으로 UIC Code에 의하면 교축방향 3m 간격을 기준으로 하여 0.003rad이내를 만족해야 한다. 분석결과 단경간 2주형판형교가 가장 크게 나타났으나 모두 기준값 이내에서 안정적인 경향을 보였다.

일반적으로, 이동차량하중에 의한 동적 효과는 충격계수를 이용하여 정적인 방법으로 고려된다. 이러한 계수를 충격계수, 동적증분계수, 동적확대계수(DMF) 등으로 부르며, 이는 동적응답과 정적응답의 비로 정의되는 동적 응답의 정도를 말한다. 본 연구에서는 DMF를 구하여 설계 충격계수(단경간은 0.318, 2@40m는 0.285)와 비교해 봄으로써 동적거동의 안전성을 확인하였다. 검토결과 모두 설계 충격계수보다 작아서 안전측인 것을 확인할 수 있었으며 역시 단경간 교량의 경우가 연속교보다는 약간 큰 것을 알 수 있다.

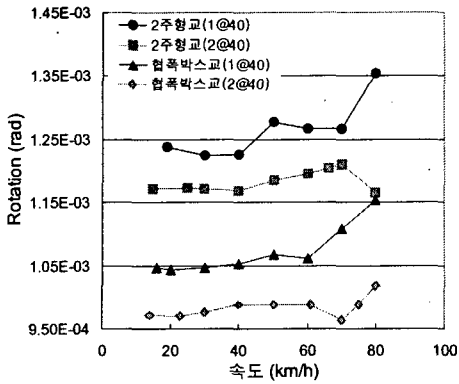


그림 9. 교량단부 회전각

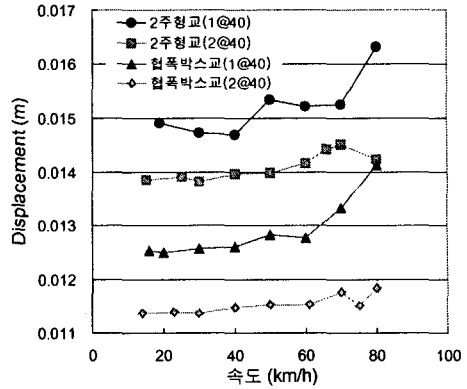


그림 10. 거더 중앙부 수직처짐

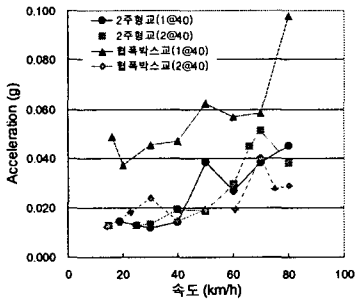


그림 11. 중앙부 가속도

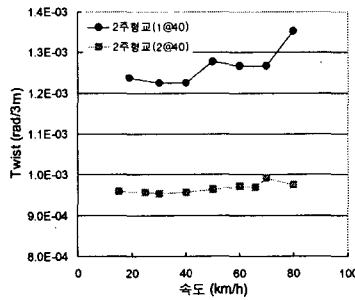


그림 12. 면틀림(2주형관형교)

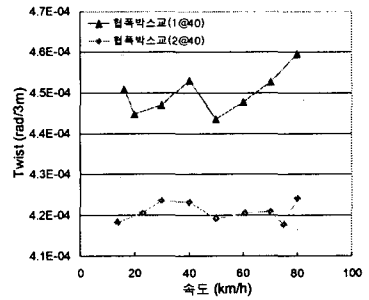


그림 13. 면틀림(협폭박스교)

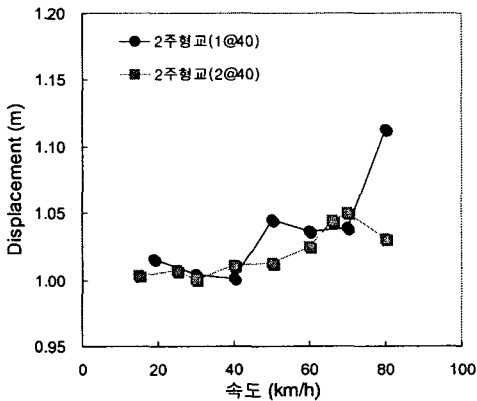


그림 14. 2주형관형교의 DMF

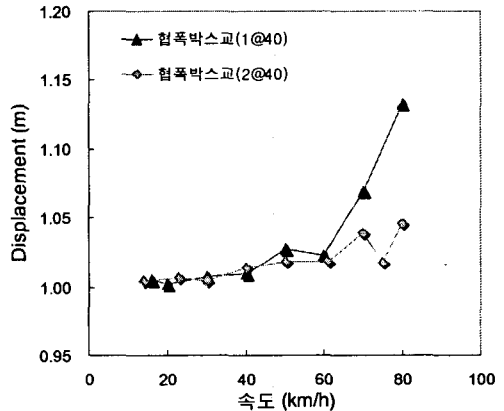


그림 15. 협폭박스거더교의 DMF

5. 결 론

지금까지 경량전철용 신형식 교량으로서 제안한 2주형관형교와 협폭박스거더교에 대해 장대레일화를 위한

장대레일-교량 상호작용해석과 교량의 구조안전성 및 주행안전성을 위한 차량 이동하중해석을 수행한 결과를 살펴보았다. 장대레일-교량 상호작용해석결과는 평가항목이 모두 기준내에 들었으므로 각 교량 형식별로 장대레일화가 가능한 것으로 판단되었으며, 차량 이동하중 해석결과 역시 평가기준 항목이 모두 안전측인 것으로 판단되었다. 이상으로부터 본 연구에서 제안한 2주형판형교와 협폭박스거더교가 궤도구조를 가진 경량전철용 고가구조물로서 충분히 만족스러운 성능을 가지고 사용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구에 대한 연구비 및 제반지원을 아끼지 않으신 포스코건설과 포스코에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 고속철도구조물기초설계표준시방서해설(안), 고속철도사업기획단, 1991
2. 건설교통부, 고속철도선로정비지침, 건설교통부, 2004
3. 부산-김해 경전철 주식회사, 부산-김해간 경량전철건설 민간투자사업 설계기준, 2004
4. 철도청, 철도설계기준(철도교편), 철도청, 1999
5. 포항산업과학연구원, 서울대에너지자원신기술연구소, 고속철도 강교량의 동적응답, 연구보고서, 포항산업과학연구원, 1998
6. 김성일외, IPC거더 동적거동 분석에 의한 철도교량 적용성에 관한 연구, 연구보고서, 한국철도기술연구원, 2004
7. SYSTRA, Bridge Design Manual(BRDM) Final Report, Korea High Speed Rail Construction Authority(KHRC), 1995
8. UIC Code 774-3R, Track-bridge Interaction. Recommendations for calculations, 2nd edition, UIC, 2001
9. UIC Code 776-1R, Loads to be considered in railway bridge design, 4th edition, UIC, 1994