



## 2. 강합성교량 검토배경

### 2.1 기존 설계교량의 검토

경부고속철도 8-2공구는 김천시를 가로지르는 노선으로서 전체 17km구간인데 약 400개소의 크고작은 지장물을 통과하게 되는 시공의 최고 난코스중의 하나로서 알려진 곳이다. 교량구간은 약 12km로서 기존설계교량의 주 건설 공법은 MSS(Movable Scaffolding System)이고 중간에 라멘교 또는 FSM(Full Staging Method)교량으로 구성되어 있었다. 이에 대하여 본 현장의 시공사인 대우건설 컨소시엄은 공법 및 공사비의 최적화를 위한 조치로서 전체 교량을 PSM(Precast Segmental method)공법 위주로 변경하면서 문제가 되는 교량, 시공성이 불량한 교량에 대하여 설계변경을 염두에 두고 대대적인 검토를 착수하게 되었다. 여기에는 세계적인 고속철도 전문 교량 설계회사인 프랑스의 SYSTRA도 참여하였다.(SYSTRA는 후에 강합성교 설계를 주도하였음) 검토결과 기존의 교량중 고속도로 및 도로를 통과하는 구간교량이 문제가 되었다. 이 구간은 도로를 경사지게 통과하게 되는데 도로를 수직으로 횡단하는 라멘교각으로 상부 PC Box 거더를 지지하도록 설계되었다.(아래 그림1 참조)

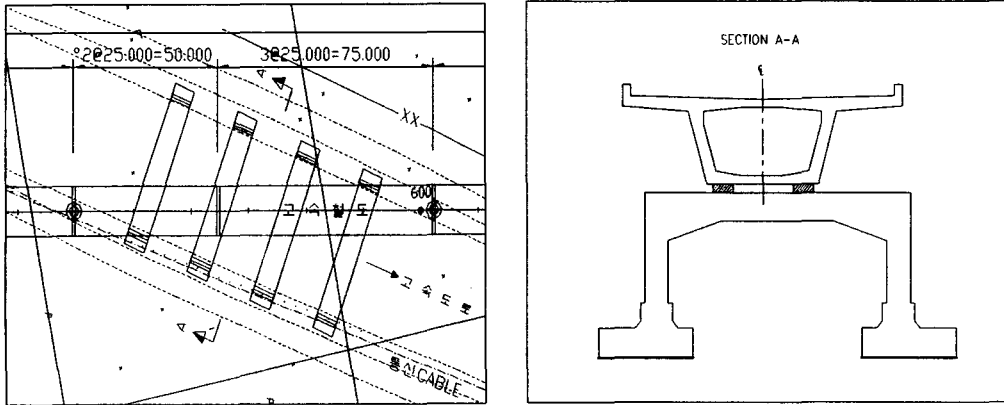


그림 1. 기존도로와 고속철도 교량 교차에 대한 당초 설계 예  
(8-2공구 모암고가 경부고속도로 제 1 교차지점)

위와 같은 형식의 교량의 문제로 지적된 첫번째는 시공성의 결여이다. 차량하중이 빈번한 도로 상부에 교통을 허용하면서 거대하고 복잡한 라멘구조물을 축조한다는 것은 결코 안전시공이 될 수가 없다. 상부구조 역시 25m 경간의 MSS공법으로 설계되어 이전/이후 경간과 동일공법으로서의 연속성이 있는 것처럼 보이나 실제 MSS장비 구조물은 이와 같은 기동식이 아닌 하부구조물에는 적용될 수 없다. 이 구간을 위한 특별한 MSS장비를 구축해야 상부구조 축조가 가능하다는 것이다. 둘째는 라멘슬라브의 구조거동문제로서 한쪽 궤도의 고속철도차량 운행시 슬라브간 휨변위 차이로 인하여 횡방향 받침간에 부등변위 발생이 우려된다는 점이다. 라멘교각 및 인접기동교각 사이 종방향 부등변위 문제 역시 장기적인 관점에서 바람직하지 않다는 지적이 있었다.

### 2.2 강합성 교량 적용검토

상기의 검토결과 기존 설계를 변경하기로 하고 일차적으로 라멘교각을 제외하는 교량하부구조를 계획하였다. 이 경우 기존 고속도로나 도로를 침범하지 않기 위해서는 도로에서는 50m 경간이

필수적이었고 경부고속도로 두 교차지점에서는 125m 경간 및 65m 경간의 교량이 필수적이었다. (본 논고에서 125m 경간 및 65m 경간 교량의 논의는 지면상 제외하기로 하며 도로와 교차되는 경간중 50m 단일경간에 대해서만 논의하고자 함) 이때 적용가능한 공법은 FSM에 의한 PC BOX 형식교량과 들어올리기식 거치의 강합성 교량으로 압축된다. FSM공법은 PC BOX상부공으로서 고속철도 시공상 익숙한 편이 있으나 이설도로등이 필요하여 공사비면에서 불리하였다. 강합성 교량은 고속철도 교량에 한번도 적용된 적이 없었고 유사한 교량에 대한 프랑스내 강합성 교량 검토결과 기존 국내교량에서는 적용되지 않았던 후판이 적용되어 있어 국내 강재생산이나 제작시 방식 적용상 어려움이 예상되었다. 그러나 제작거치가 비교적 간편하고 제작장의 이설도로가 불필요하여 전체 공사비면에서 유리한 점이 부각되었다. 또한 POSCO로부터 생산되는 강재가 80mm 까지 품질보증이 가능해짐에 따라 결국 강합성교량으로 확정하였다.

### 3. 사용 재료 및 적용 단면 계획

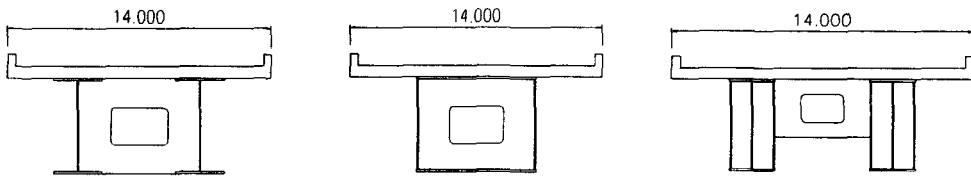
#### 3.1 사용재료

사용재료는 다음과 같다.

- 주부재 : SM520
- 부부재 : SM490
- 재료에 대한 충격치(charpy energy) :  $-20^{\circ}\text{C}$ 에서 40J 이상
- 전단 connector( $\phi 22$ ) 강도 :  $F_y = 35\text{kg/mm}^2$
- 고장력 볼트 :  $F_y = 90\text{kg/mm}^2$
- 콘크리트 강도 :  $400\text{ kg/cm}^2$

#### 3.2 적용 단면 계획

35m 또는 50m 경간에 적용가능한 단면으로는 아래와 같이 2주형 거더 또는 상자형 거더등으로 구분된다.



(a) 1 Cell Type

(b) 2 Cell Type

그림 2. 2주형 거더 단면  
(Double I beam)

그림 3. 상자형 거더 단면

상자형 거더 단면은 Torsion에 강하고 2주형에 비하여 전체 휨강성이 크므로 plate두께를 줄일 수 있는 장점이 있다. 그러나 결론부터 언급하자면 이는 고속철도 교량에서 그리 큰 효과가 없는 것으로 알려지고 있다. 그 이유는 시공성과 경제성에서 2주형 거더형보다 비효율적이기 때문이다. 우선 현장거치시 2주형거더는 독립적으로 제작 및 거치가 가능하고 이후 격벽 및 bracing연결을 할 수 있는 장점이 있다. 이는 지형여건상 매우 중요한 요소이다. 그러나 상자형 단면은 이러한 시공에 제약이 있으며 2 cell type이라 하더라도 각 cell사이 횡방향 부재연결이 필수적이어서 각 부재의 독립적 거치보다는 전체 상부공에 대한 segment로 연결을 해야하는데 이때 지지 bent가 필수적이므로 하부 도로와의 간섭문제가 발생한다. 또한 주거더의 용접 연결시 2주형거더에 비하

여 복잡하고 따라서 품질저하가 우려 될 수 있다. 역학적인 면에서 검토할 때 상자형 거더는 두께는 줄일 수 있지만 차량동적하중에 대한 불리한 거동 때문에 전체적인 강재물량이 비효율적으로 증가하게 된다. 차량통행시 궤도 바로 하부에 위치한 한 거더가 거의 모든 동적 하중을 받게 설계하는 원칙에서 단면의 최적설계가 가능한데 이는 단순 2주형 거더에서 가장 양호한 결과를 얻을 수 있다. 그러나 상자형 거더 특히 2 cell 상자형 거더는 횡방향 연결 강성이 매우 크므로 차량 동하중에 따른 다른 거더에 영향이 크게 작용하여 결과적으로 피로에 불리하게 된다. 이는 프랑스내 TGV고속철도의 plate girder형 강합성교량에서 대부분 2주형교(Double I beam)로 설계되었다는 것에서도 증명된다. 결국은 경제성에서도 2주형 단면이 상자형 단면에 비하여 유리하다고 판단되어 강합성 교량 단면은 2주형으로 확정되었다. 또한 두 궤도에 전달되는 열차하중을 지지하기 위한 주형간 거리는 6.5m가 가장 이상적인 것으로서 본 강합성 교량에 적용되었다.

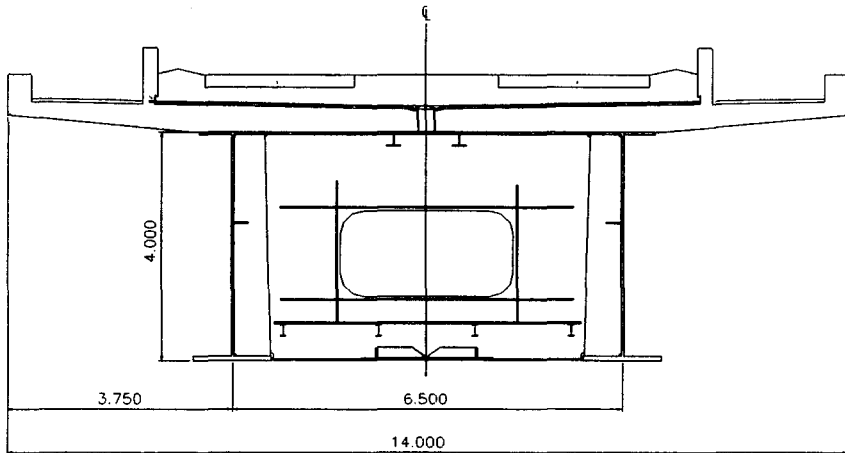


그림 4 강합성교량 TYPICAL 단면

#### 4. 구조해석 및 결과

##### 4.1 동적해석 및 결과

###### (1) 교량의 고유치 해석

교량의 고유치해석은 차량동적해석시 적용된 모드중첩법을 위한 과정으로서도 필요하지만 교량 구조물과 차량과의 공진이 유발되는 진동수를 체크하기 위한 수단으로서 필수적이다. 해석의 간편성을 위하여 2주형 합성형교를 하나의 합성 beam요소로 modelling하였다. 도상자같은 mass로 기여하도록 하고 steel 거더 및 콘크리트 슬라브만 강성을 갖도록 하였다. 교량의 단면 구성은 그림 5와 같으며 모드 해석결과는 도표 1에 나타나 있다.

	단면1	단면2
상부 플랜지	1100mm×40mm	1300mm×50mm
하부 플랜지	1300mm×80mm	1300mm×100mm
웹브	3880mm×35mm	3850mm×3500mm

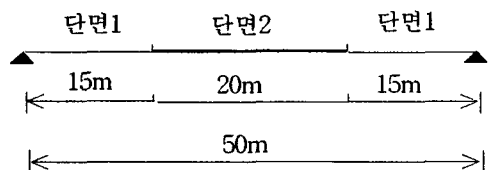


그림 5. 1@50 단면 구성

도표 1. 1@50 교량의 고유진동수 및 그에 따른 차량 속도

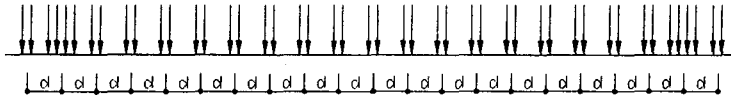
mode	진동수(hz)	mode type	모드 진동수를 갖는 차량 속도 (km/h)
1	1.96	flexion	132
2	3.79	torsion	255
3	7.58	torsion	510
4	7.86	flexion	529

상기 표에서 알 수 있듯이 모드 1 및 모드 2는 설계속도 350 km/h이하에 있으므로 상세 동적 해석을 통하여 해당 속도에서 가속도, 변위등을 검토해야 된다. 한편 교량의 고유 모드별 진동수와 일치되는 한국형 차량의 진동수는 다음과 같이 구하여진다.

$$V_i = f_i \times d \text{ (m/s)}$$

$f_i$  = 모드 진동수

$d$  = 차량 바퀴축간 거리(18.7m)



한국형 TGV 구성: d=18.7m, 객차수:18, 연장:387m, 축하중:17t

그림 6. 한국형 TGV차량 모델

(2)차량하중의 동적해석

고속철도 교량은 동적해석을 통하여 다음 사항을 확인검토해야 하는데 이는 TGV고속열차의 안전성에 대한 기준으로 제시된 것이다.

- 교량의 연직 가속도 제한치  $a(m/s^2)$  : 0.35g
- 교량의 최대처짐 제한치  $\delta(m)$  :  $L/1100$  (  $L(m)$  : SPAN 길이)
- 교량 단부에서의 회전각 제한치  $\theta H$  (rad · m) :  $8 \times 10^{-3}$  (  $H$  : 형고 )

본 설계시의 차량동적해석은 시간증가분에 대한 모드중첩법을 이용 수행하였다. 동적하중은 일정속도에 따른 주기하중으로 변환하여 적용하였다.

$$M a + C x + K x = F(t), \quad F(t) = P_o \sin \omega t, \quad \omega = 2\pi d/v$$

여기서 열차 속도  $v$ 는 100 km/h ~ 400 km/h 의 범위에 대하여 고려되었다. 하나의 궤도에 대한 열차하중은 교량중심부로부터 2.5m 편심이 발생하므로 torsion 강성과 회전질량강성(rotatory mass inertia)등에 대한 고려는 필수적이다. 이에 따른 동적해석 결과는 다음 그림과 같다.

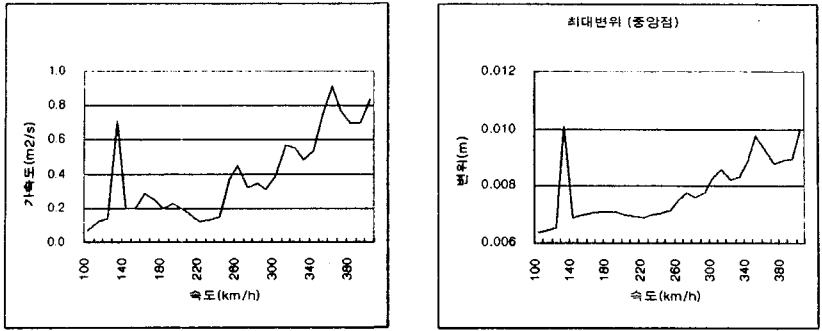


그림 7. 동적 해석 결과

상기 그림에서 나타나 있듯이 1@50의 중앙지점에서 공진은 속도 132 km/h 에서 발생하며 이때의 가속도는  $0.7\text{m/s}^2$ 로서 제한치인  $3.5\text{m/s}^2$  보다 작다. 최대가속도는  $380\text{m/s}^2$ 속도에서 나타나는  $0.9\text{m/s}^2$ 인데 역시 제한치 이내에 있음을 알 수 있다. 그리고 중앙점의 최대변위는 공진 속도부근에서 10mm를 나타내고 있다. 이는 제한치인  $45\text{mm}(L/1100 = 50,000/1100 = 45\text{mm})$ 이내에 있음을 알 수 있다. 한편 단부회전각( $\theta H$ )은 공진속도에서  $5.6 \times 10^{-3}\text{rad} \cdot \text{m}$ 으로 계산되어 제한치  $8 \times 10^{-3}\text{rad} \cdot \text{m}$ 이내에 있었다.

#### 4.2 정적해석 결과

동적해석결과로부터 기준치에 만족하는 개략단면 부재에 대하여 정적해석이 수행되었다. 이러한 정적해석은 차량하중을 비롯한 여러 하중 case를 고려하여 수행되며 이를 통하여 부재의 응력, 좌굴 그리고 피로등을 검토하여 상세구조 설계를 한다. 정적해석에 이용되는 차량하중은 다음 그림에 보여지는 바와 같이 시방서 기준의 HL(High speed railway live Load) 표준열차하중으로서 이는 UIC(Union International des Chemines de fer)하중과 동일하다.

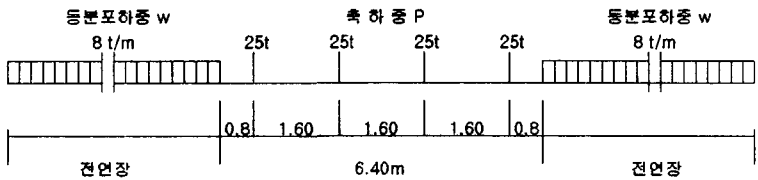


그림 8. HL 표준열차하중

이에 대한 중앙부 단면 플랜지의 응력검토결과는 다음과 같다. (limit state design)

도표 2. 정적해석에 의한 응력 검토 결과

부재구분	발생최대 응력	허용응력
상부 플랜지	1,580 kg/cm <sup>2</sup>	2,8220 kg/cm <sup>2</sup> (Fy/1.15)
하부 플랜지	1,690 kg/cm <sup>2</sup>	2,8220 kg/cm <sup>2</sup> (Fy/1.15)
web 전단	56 kg/cm <sup>2</sup>	160 kg/cm <sup>2</sup> (0.45Fy)

상기도표에서 알 수 있듯이 응력검토결과는 여유가 있음을 보여준다. 한편 HL하중에 대한 중앙부 변위는 18mm로서 동적하중에 의한 변위보다 큰 값을 보여주고 있다. 단부 회전에 따른  $\theta H$  값은  $8.4 \times 10^{-3} \text{ rad} \cdot \text{m}$ 로서 동적해석에 따른 결과보다 클뿐더러 기준치  $8.0 \times 10^{-3} \text{ rad} \cdot \text{m}$ 도 약간 초과한다. 이는 HL 하중이 UIC하중을 기본으로 한 것으로서 한국형 TGV하중보다 안전측으로 산정되었음을 시사한다.

## 5. 시공특성

상기의 해석을 통한 단면검토에서 교형높이 4.0m 및 중앙부의 플랜지의 두께 80mm 또는 100mm 는 여유가 있긴 하지만 적정한 것으로 확인되었다. 그러나 이러한 부재는 서론에서 언급한 바와 같이 국내적용상 익숙하지 못하므로 특별한 주의가 필요하다. 먼저 용접의 경우, 시방서상 용접용 최대두께는 50mm로 언급하고 있으므로 본 교량에서 적용된 80mm 용접은 엄밀히 시방서 기준을 넘게 된다. 더구나 현장에서 각 segment간 연결은 용접방법으로 이루어지게 된다. 이는 후판의 bolt연결이 어려울뿐더러 정확한 하중 전달 및 유지보수등의 간편성을 위해 용접연결이 필요하기 때문이다. 따라서 후판 용접에 대한 최상의 품질확보가 무엇보다도 중요하였다. 이를 위해 저수소계 용접봉(ASTM 기준으로 8mmg/1이하)을 사용하였다. 또한 충분한 예열등 용접의 최적조건 조성을 우선에 두고 shop에서는 SAW(Submerged Arc Welding) 현장에서는 FCAW(Flux Core Arc Welding)의 용접이 시행되었다. 또한 우수한 용접사와 장비를 보유하고 있는 대우 조선소 shop 이 이용되었는데 shop 위치는 교형 segment운반을 위해서도 신중히 검토되어야 한다. 형고가 4.0m인 거더를 shop에서 trailer를 통하여 운반한다는 것은 국내 도로 여건상 결코 쉽지 않기 때문이다. 본 교량은 대우조선에서 마산까지는 해상으로 마산에서 김천의 현장까지는 국도를 통하여 운반하였다. 운반후 작업순서는 다음과 같다.

- ① 교량 부근 야적장에서 각 segment를 용접 연결(15m+20m+15m)하여 주형제작
- ② 각각의 50m 길이 주형을 crane으로 차례로 들어올려 거치.
- ③ 교량 방향 따라 내부 격벽의 용접 연결
- ④ 하부 두 주형간 연결 Bracing 작업
- ⑤ 슬라브 concrete 작업



그림 9. 거치방법

## 6. 결론

본 글에서는 고속철도 강합성 교량의 설계배경에서 시공특성까지 간략하게 언급하였다. 본 강합성 단면이 단순한 2주형으로 설계된 것과 그 단순함속에 수반된 후판과 거대형고가 어떻게 산출되었는지 해석 및 결과를 통하여 설명되었다. 해석결과를 볼 때 100mm 플랜지 두께는 약간 과다하게 설계된 면이 있으나 장기적으로 피로등을 고려 할 때 적절하다고 판단된다. 한편 한국형 TGV하중의 동적해석 결과는 국내 고속철도 시방서에서 규정된 정적열차하중( HL표준하중)이 상당히 안전측임을 보여주었다.

지난 수년간 경부고속철도 강합성 교량 시공은 논의만 무성 하였으나 시공이 이루어지지 못했던 바, 금년초 8-2공구에서 처음으로 시공완료되었던 강합성교량은 고속철도 강합성 교량의 장

을 열었다는 점에서 큰 의의가 있었다. 현재는 본 고에서 언급된 1@50뿐 아니라 여러 다양한 경간에서 강합성교량이 적용되고 있다. 나아가서 8-2공구는 125m 아치교 및 65m truss교에 대한 시공을 현재 진행중에 있다. 이는 결과적으로 교량에 강재의 후판적용이 일반화 되는 것을 의미하므로 기존의 제작시방서의 개정을 필요로 하였고 POSCO의 후판 강재개발을 더욱 촉진하게 하는 계기가 되었다. 또한 고속철도 교량뿐 아니라 일반교량에도 50mm이상의 후판의 이용이 증가 될 것으로 보이는데 이는 단순하면서도 효율적인 단면이 가능하여 강재교량의 장점을 더욱 부각 시킬 수 있기 때문이다.

## 참고문헌

1. 한국고속철도 건설공단, Bridge Design Manual(BRDM) , 1995
2. 고속전철 사업 기획단, 고속철도 강교량 및 합성형 교량 설계 시방서 해설(안),1991
3. Systra, 1@50 - Composite bridge detailed design calculation note, 2000. 3
4. 경부고속철도 8-2공구, 고속철도 강교량 제작 특별 시방서, 2000
5. 한국건설기술 연구원, 고속전철 교량기술 개발 보고서, 1997
6. 고속전철 사업 기획단, 고속철도 강교량 제작 시방서 해설(안),1991
7. 경부고속철도 2-1공구, 강합성교 설계용역 보고서, 1999