

# 국내최장 고속철도 정지고가(L=9.3km) 교량형식 개발 및 설계 - 35m PSM PSC Box교, 80m 3경간 Arch교, 국내최초 ED교 -

## The Planning and Design of Jeong-Ji High Speed Railway Bridge

장인호†      박경호\*      박종화\*\*      김영남\*\*\*      김선필\*\*\*\*  
In-Ho Jang    Kyung-Ho Park    Jong-Hwa Park    Young-Nam Kim    Sun-Pil Kim

### ABSTRACT

Jeong-Ji overbridge is designed to be 9.3km long, the longest for a high speed railway bridge ever constructed in Korea. This bridge is constituted of three types of structure. Standard type bridge is 35m PSC Box bridge which will be constructed by Precast Span Method. To cross the Cheonan Nonsan Expressway, 80m three-span steel arch bridge is designed to avoid rail expansion joint. Finally, Extradosed bridge is planned for high speed railway bridge for the first time in Korea based on originative and advanced design techniques. It is expected that this will contribute to the development of national technology for long-span high speed railway bridges.

### 1. 서론



그림1. 호남고속철도 정지고가 노선도

열차가 시속 350km 이상으로 주행하는 고속철도교량의 경우 온도변화 및 열차와 교량의 상호작용으로 인하여 교량에 과도한 응력과 변위 및 가속도가 발생할 수 있다. 이러한 과도한 응답은 교량의 구조 및 차량의 주행 안전성에 중요한 요인으로 작용하므로 교량설계시 충분히 검토되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 호남고속철도에 건설될 국내 최장 고속철도 교량인 정지고가의 설계에 있어 주행안전성 및 승차감 향상을 위해 수행된 최신의 설계방법에 대하여 살펴보고 해석결과를 통해 설계방법 및 절차의 합리성에 대해 살펴 보고자 한다.

또한 철도교량의 장경간화, 경량화라는 세계적인 추세에 따라 이탈리아, 중국, 일본등에서 사장교와 Extradosed교와 같은 케이블 교량이 고속철도에 운영 또는 건설될 예정임에도 불구하고 국내의 경우 현재 적용이 전무한 상황인 바 정지고가는 엄격한 주행안전성 및 승차감에 대한 사전분석 및 다양한 구조검토를 통해 국내최초로 케이블 교량인 Extradosed교를 고속철도에 적용하여 국내 고속철도기술의 선진화에 이바지 할 것으로 기대되며 이에 대한 설계내용을 소개하고자 한다.

† 정회원, 현대건설, 부장, E-mail : inho@hdec.co.kr, TEL : (02)746-3841 FAX : (02)746-3939  
\* 정회원, 현대건설, 상무, E-mail : khpark54@hdec.co.kr  
\*\* 정회원, 현대건설, 상무, E-mail : parkjh@hdec.co.kr  
\*\*\* 비회원, 현대건설, 차장, E-mail : ynkim@hdec.co.kr  
\*\*\*\* 비회원, 현대건설, 과장, E-mail : kspil@hdec.co.kr

## 2. 본론

### 2.1 일반구간

일반구간은 정지고가구간 중 8.05km의 대부분을 차지하는 구간으로 상부단면의 최적화를 통한 구조 효율성 확보, 경제적인 표준경간장 도출, 고속철도 교량의 동적안정성 확보 및 연약지반에서도 시공가능한 가설공법을 적용할 수 있는 형식을 고려하였다. 이를 위하여 고속철도에 적용된 국내외 사례를 조사한 결과 도표1과 같이 최근 가장 활발하게 건설되고 있는 중국 고속철도의 경우 경간장 32.7m, 시공법은 PSM 공법이 주로 사용되고 있고, 대만의 경우 PSM 공법 및 MSS공법이 사용되고 있음을 알 수 있다. 상부형식은 장대레일 안정성에 유리한 단순교 형태의 PSC 박스형식이 우세함을 알 수 있다.

도표1. 해외사례 검토

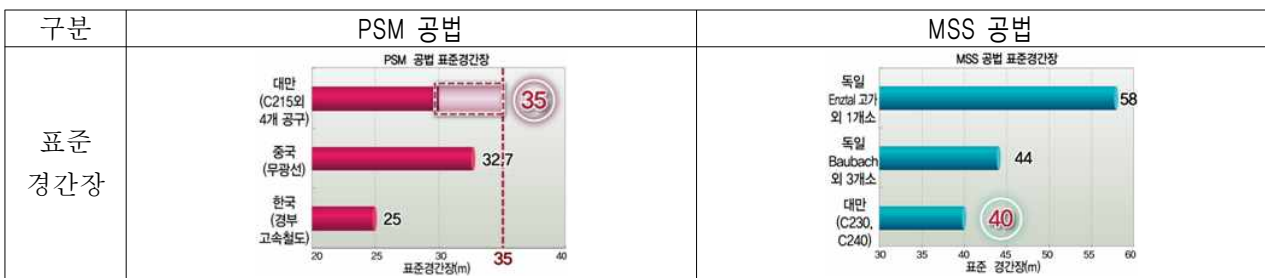
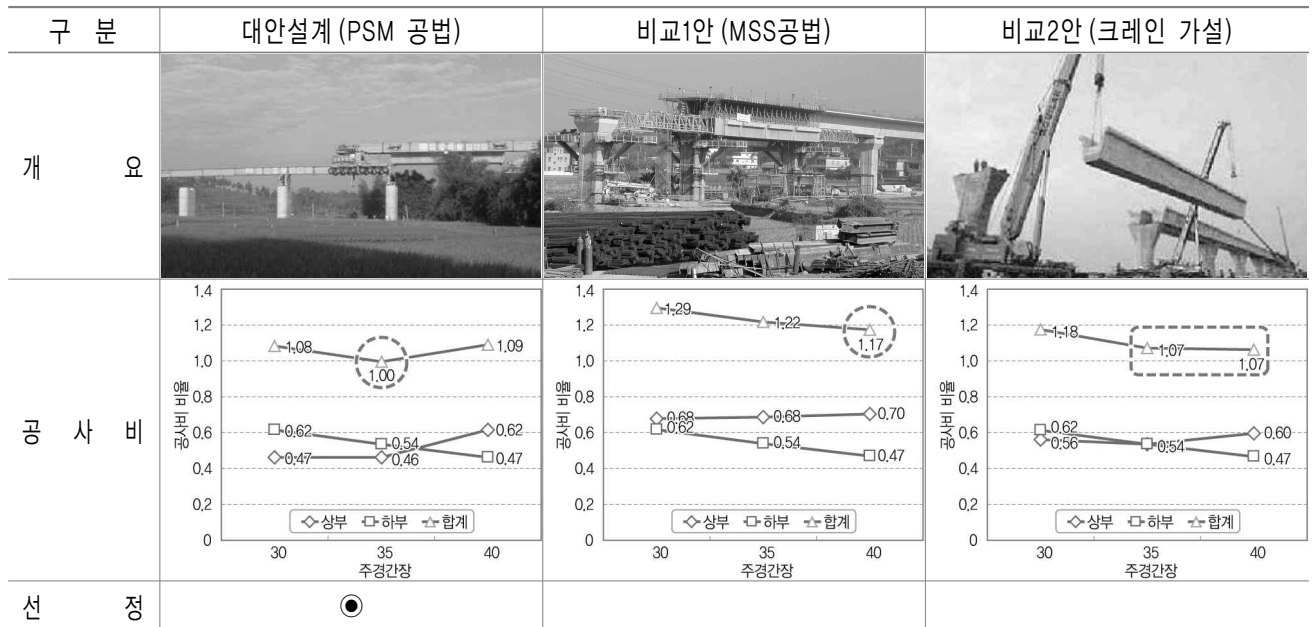


도표 2 시공방법별 공사비 분석

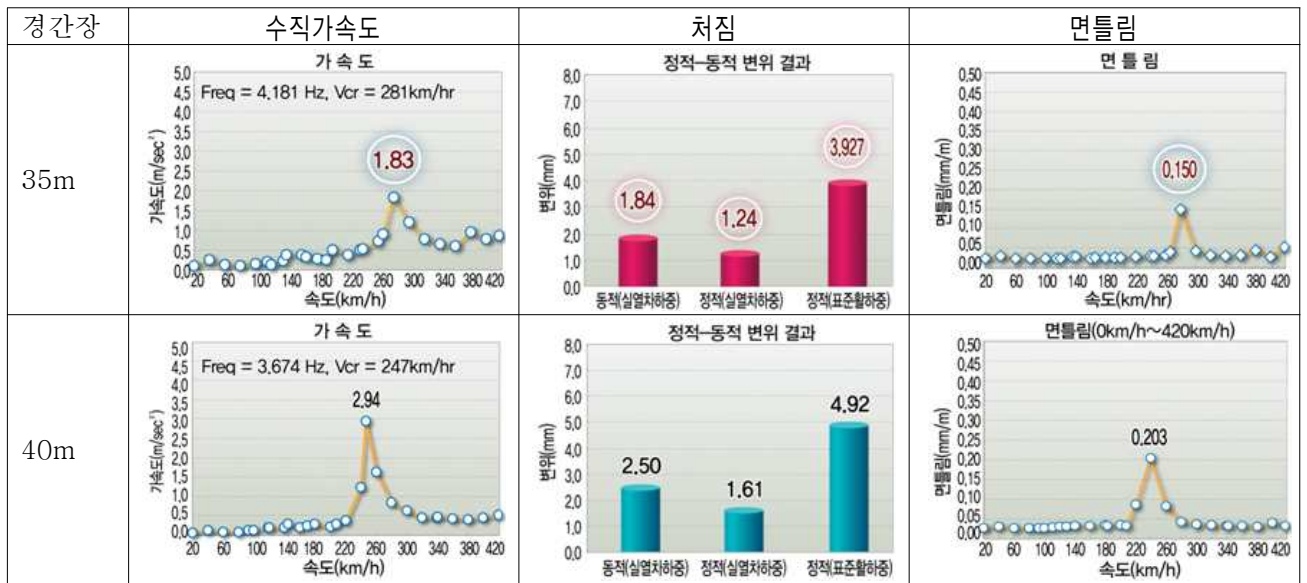


시공공법별 최적 표준 경간장 선정을 위하여 도표2와 같이 PSM공법, MSS공법, 크레인 거치공법에 대하여 각각 경간장 30m, 35m, 40m에 대한 공법특성 및 공사비를 검토하였다. 각 시공방법별 장단점을 분석한 결과 MSS 공법의 경우 경간장 40m의 경우가 가장 경제적인 것으로 나타났으며, 총 8조의 가설장비가 동원되어 공기가 약 44개월이 필요하고 경간당 가설기간이 길고 양생 조건이 PSM 공법에 비해 불리하며 공사비의 경우 PSM 공법에 비해 약 1.17배정도로 다소 고가임을 알 수 있다. 또한 최근 유럽지역에서 많이 사용되고 있는 크레인 가설을 이용한 U거터는 일반적으로 타 공법에 비해 경제적인 공법으로 알려져 있으나 본 현장과 같이 연약지반이 분포하는 경우 크레인가설을 위해 연약지반개량이

필요하여 연약지반개량이 필요없는 PSM공법에 비해 다소 경제성이 떨어지는 단점이 있다.

따라서 본 프로젝트에서는 고속철도 교량의 동적성능 확보에 적합한 교량형식으로서 경부고속철도, 대만고속철도, 이탈리아, 프랑스, 일본 등 시공사례가 풍부한 PSC 박스거더 형식을 적용하였고, 공장내부에서 기계화된 시공으로 최상의 품질확보가 가능하고 MSS공법 대비 약 6~7배 공기가 빠른 PSM 공법을 채택하였으며, 안전성, 경제성 및 장비규모 적정성을 고려하여 표준경간장을 35m 선정하였다.

도표3. 경간장별 구조성능 비교



선정된 35m 경간장에 대하여 고속철도교량의 동적성능 검토를 통한 검증을 수행해 본 결과 도표 3과 같이 표준경간장 L = 35m일 때, 수직가속도의 경우 40m 경간장대비 62%로 감소되는 등 승차감이 가장 양호하였고, 동적성능 및 경제성이 가장 유리함을 알 수 있었다. 또한 단면을 최적화하여 원안설계 대비 약 10% 절감하였으며, 상부구조 경량화로 인하여 시공 안정성이 개선되었다. 마지막으로, 강연선 직선배치를 통한 세그먼트 제작공정 단순화를 통하여 품질향상 및 시공성을 향상시켰다.

## 2.2 천안-논산간 횡단구간(3- Steel Arch 교)

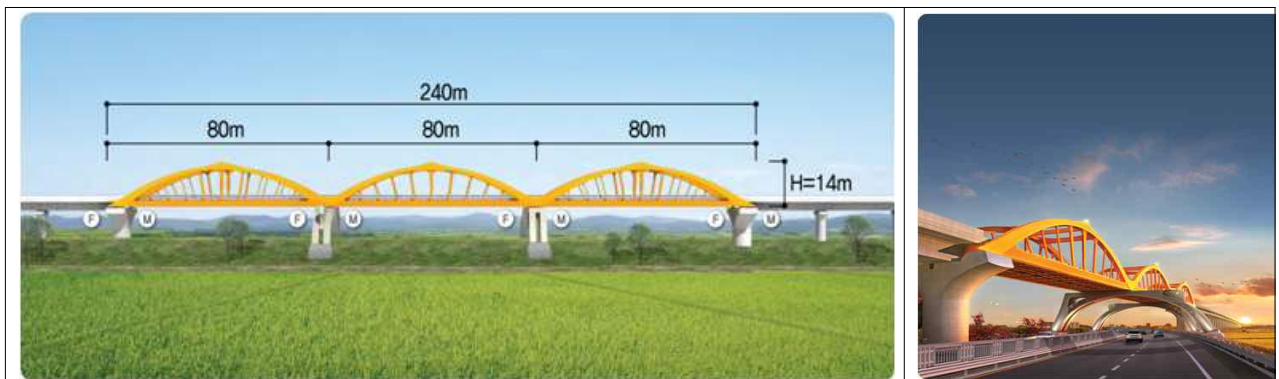


그림2 천안-논산간 횡단구간(3경간 3-아치교)

천안-논산간 횡단구간의 경우 노선이 고속국도와 168도 정도로 고각으로 교차하여 장경간의 교량이 설치되어야 하는 구간이다. 따라서 교량계획시 고속주행 열차 및 장대레일 안전성을 최우선으로 확보하

고, 고속국도 주행자에게는 경관성 및 심리적 안정감을 주며, 교량 건설시의 교통통제 및 안전사고 우려를 해소할 수 있는 교량형식을 최우선적으로 고려한 결과, 본 설계에서는 80m 3경간 아치교를 적용으로 레일신축이음(Rail Expansion Joint, REJ)를 배제하여 주행성과 유지보수성을 확보 하였다.

선정된 구조물에 대하여 REJ의 설치유무를 확인하기 위하여 레일-구조물 상호작용해석(Rail - Structure Interaction, RSI)을 수행한 결과 최대응력이 설치기준인 92MPa보다 작아 REJ의 설치가 필요 없음을 확인하였다. 또한 속도별 열차주행 및 시간이력 해석으로 공진가능성 및 임계속도 검토, 교량의 동적성능을 해석한 결과 수직가속도, 연직처짐 및 면틀림에 대하여 열차주행에 따른 동적영향이 허용기준을 만족하여 동적안전성을 확보하고 있음을 확인하였다.

도표 4 장대레일 동적안전성 평가

구 분	온도하중	하중조합	
RSI	<p>레일응력 [온도하중]</p>	<p>레일응력 [온도하중+시동하중+열차수직하중]</p>	
구 분	연직처짐	수직가속도	면틀림
수 직 이 동 량	<p>Displacement (mm)</p> <p>Vehicle Velocity (km/hr)</p>	<p>Acceleration (g)</p> <p>Vehicle Velocity (km/hr)</p>	<p>Twist (mm/m)</p> <p>Vehicle Velocity (km/hr)</p>
	• $\Delta=10.387 \leq \Delta a=33.3mm \therefore O.K$	• $a=0.303 \leq aa=0.5g \therefore O.K$	• $\gamma=0.097 \leq \gamma a=0.5mm/m \therefore O.K$

가설시 구조물 및 주행자의 안전성을 확보하고 교통장애를 최소화 할 수 있는 상부가설공법을 강구하기 위하여 그림 3에서 보는 바와 같이 다양한 시공법을 고려하였다.

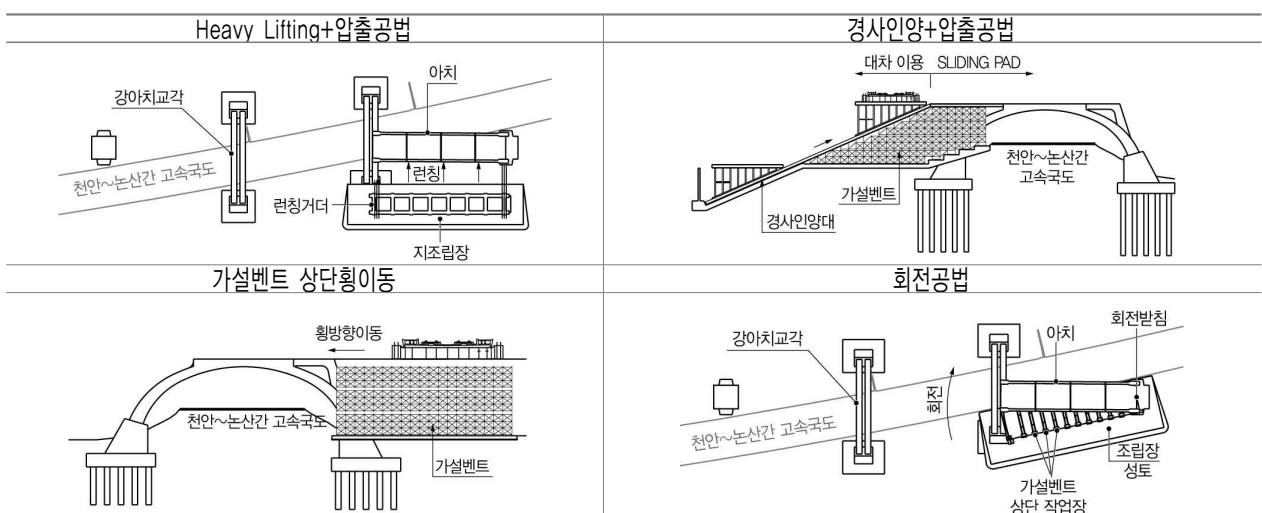


그림 3-Arch교량의 공법 비교

지상조립 및 Heavy Lifting 후 측면 압출공법의 경우 Jack Up/Down, 압출 등의 공법적용으로 가설이 복잡한 단점이 있고, 모암고가(경부고속철도)에서 적용된 회전공법의 경우 중앙부 아치는 회전공법이

아닌 별도의 다른 공법 적용이 필요하여 적용성 불리하고, 회전반침, 코핑작업대 등의 설치·해체 등 공정이 복잡한 단점이 있다. 이에 반해 경사인양 후 압출하는 공법은 낙동강교에서 성공적으로 수행한 공법으로 가설 중 교통통제 최소화가 가능하고 지상아치조립 작업으로 안전성 및 품질관리가 우수하며 공기 단축이 가능한 장점이 있다. 또한 가설벤트에서 아치조립 후 측면압출하는 시공방법도 교통통제 최소화, 공기 단축가능, 경제성 및 안전성이 우수한 장점이 있어 현장 가설여건에 따라 적절한 공법의 면밀한 재분석을 통해 선택 적용하도록 계획하였다.

### 2.3 신설지방도 68호선 횡단구간(80m ED교)

신설지방도 68호선 횡단구간의 경우 장대레일의 안정성을 확보하기 위하여 REJ를 배제할 수 있고 천안~논산 고속국도 횡단교량과 차별화되며 강경포구의 관문이미지를 구현할 수 있도록 독창성 있는 랜드마크 교량 형식이 필요하여 다양한 형식에 대한 검토가 수행되었다.

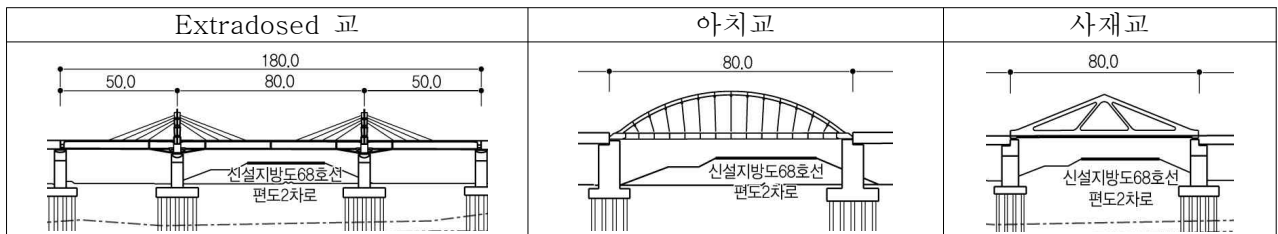


그림 4 신설지방도 68호선 횡단구간 적용가능 교량형식 분석

아치교의 경우 천안~논산 고속국도 횡단교량과 동일형식 및 유사 경간 구성으로 독창성 부족하고 강경읍 관문의 랜드마크 및 시인성 부족하며 주위 경간(30, 35m)과 조화되지 않는 경간구성이 되어 구조효율성 및 경관성이 미약한 것으로 판단되었다. 또한 사재교의 경우 삼각형의 돌출이미지로 관문교량의 상징성 불리하고 사재 좌굴 검토시 유효좌굴길이가 길어 구조적 안정성 불리하며 절점부 PC강재의 집중으로 국부응력 발생하고 연결부 반복하중에 의한 동적성능, 피로에 불리한 단점이 있다. 따라서 본 설계에서는 주탑, 케이블을 통한 수려한 경관 연출 가능하고 케이블 교량의 국내 고속철도 최초도입으로 설계 및 시공 기술력 향상 계기가 될 수 있으며 주탑 및 하부구조 강성 증가로 R.E.J 배제 가능한 엑스트라도즈드교를 적용하여 강경포구로의 진입 관문성의 형상화와 고속열차의 주행안전성을 동시에 확보하였다.

국내 최초로 도입되는 고속철도 ED교의 안전성을 평가하기 위하여 정적인 구조해석이외에 동적안전성 평가, 장대레일 안전성 평가, 피로 평가등이 추가적으로 수행되었다.

도표 5 동적응답 해석 결과

구 분	연 직 처 짐	수 직가속도	면 틀 림
수 평 이 동 과 변 위			
	<p>• <math>\Delta=11.788 \leq \Delta a=36.4\text{mm} \therefore \text{O.K}</math></p>	<p>• <math>a=0.038 \leq a a=0.5\text{g} \therefore \text{O.K}</math></p>	<p>• <math>\gamma=0.064 \leq \gamma a=0.5\text{mm/m} \therefore \text{O.K}</math></p>



도표 5에서 보는바와 같이 이동하중에 의한 시간 이력 해석 결과 충격계수는 동적해석을 통한 동적확대계수를 고려한 값보다 1.52~2.25배 정도 크므로 안전측의 값으로 판단되고, 연직처짐, 수직가속도 및 면틀림에 대하여 동적해석을 수행한 결과 열차주행에 따른 동적영향이 허용기준을 만족하여 동적안전성을 확보함을 알 수 있었다.

도표 6 RSI 해석 및 피로해석 결과

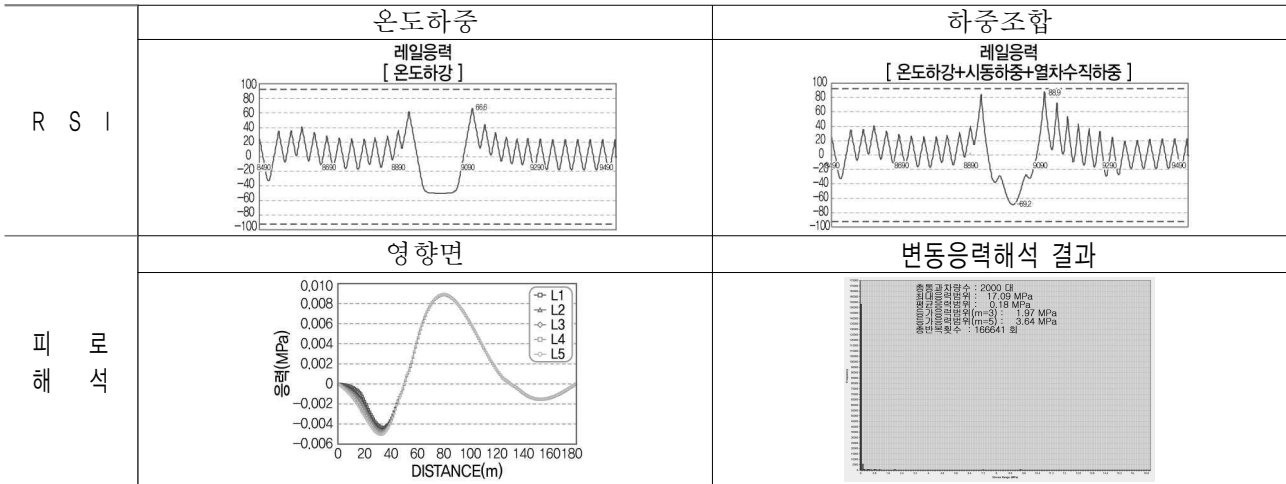


도표6에서 보는 바와 같이 RSI 해석결과 최대응력이 설치기준인 92MPa보다 작아 REJ의 설치가 필요 없음을 확인하였다. 또한 교통량 분석을 통해 예측된 공용하중에 대해 피로안전성을 평가하기 위하여 변동응력을 이용한 피로해석을 수행한 결과 설계응력범위(4.40 MPa)가 허용응력범위 (190.20 MPa) 이 내이므로 피로안전성에 대하여 충분한 안전성을 확보하고 있음을 알 수 있다.

### 3. 결론

본 논문에서는 호남고속철도에 건설될 국내최장 고속철도 정지고가(L=9.3km)의 교량형식 개발 및 설계에 대하여 설명하였다. 정지고가는 광활한 평야지역을 관통하는 일반교량구간과 천안~논산간 고속국도, 강경읍 진입도로인 신설 지방도 68호선과 교차하는 특수교량구간으로 나누어 계획되었다. 일반구간의 경우 급속시공이 가능한 PSM 공법(Precast Span Method)를 적용하였고, 해외시공사례 및 경제성을 고려하여 최적경간장인 35m PSC Box로 결정하였으며, 고속철도교량 설계기준에 따라 동적성능 및 승차감 검토 등을 통하여 동적안전성을 검증하였다. 또한 상하부 단면의 최적화 및 세부 구조검토를 통해 안전성 및 시공성을 개선하였다. 천안~논산간 고속국도 횡단구간은 350km/h의 속도로 고속주행 하는 열차 및 장대레일 안전성을 최우선으로 확보하고 승차감 및 유지관리성을 개선하기 위하여 REJ 배제가 가능한 80m 3경간 아치교로 계획하였다. 또한 신설 지방도 68호선 횡단구간은 국내최초로 케이블교량인 Extradosed교를 자체기술 개발 및 해외사례 검증을 통해 적용하여 국내 고속철도 교량기술의 선도적 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고문헌

1. 한국철도시설공단, 호남고속철도 설계지침, 2007
2. 한국철도시설공단, 고속철도설계기준 - 노반편, 건설교통부, 2004
3. 김성일, 변형균, “케이블지지 교량을 예제로 한 고속철도 및 일반철도의 설계 차이점 분석”, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집 특별세미나, 특별/일반세션, pp.649-655, 2009