

변단면 하로판형교의 계획 및 설계

The Plan & Design for Through Plate Girder Bridge of Variable Section

민영택* 김성렬** 고승영*** 김영상****
Min, Young Taek Kim, Sung Yeol Ko, Seung Young Kim, Young Sang

ABSTRACT

Recently, the railroad route plan is trying to minimize the damage of the local resident which is caused by railroad construction. For this reason, reducing the banking height of soil roadbed, lowering the bridge girder height of a solid intersection and a part of cross river, the through bridge type which can achieve a required span length must apply.

The representative through bridges of railroad are arch bridges, truss bridges and plate girder bridges, the through plate girder bridge of variable section can apply that the span length of these bridges is about 30~50m, namely, middle span length bridge types, and that can satisfy structural capacity and beauty of railroad at the same time.

This paper introduces plan and design process of the Su-eo cheon bridge applied by a through plate girder bridge type of the Jinju-Gwangyang double track 6th construction ordered at Korea Rail network Authority in 2005.

1. 서론

최근 철도건설 사업을 시행함에 있어 철도 노선이 농경지나 주거지역 인접구간 통과시 지역주민들의 단절감 및 고립감 완화를 위해 교량으로 계획하거나 토공노반의 성토높이를 낮추어 철도건설로 인한 지역주민의 피해가 최소화 되도록 노력하고 있다.

토공노반의 성토높이를 낮추기 위해서는 최적의 중단선형 계획과 성토높이를 결정하는 입체교차부 및 하천 통과부의 교량 계획고를 낮추어야하는바, 이를 위해 교량 형고를 줄이면서 필요 경간장 확보가 가능한 하로교 형식을 적용하고 있다.

철도교에서의 하로교는 대표적으로 아치교 및 트러스교를 들 수 있는데 이들 교량은 지간 60m이상 장경간이나 상징성이 요구되는 곳에 주로 적용되며, 지간이 30m~50m정도의 중경간 및 교량미관이 필요한 구간은 변단면 하로판형교의 적용으로 철도의 기능성 및 교량의 미를 동시에 만족 시킬 수 있다.

본 논고에서는 2005년 한국철도시설공단에서 발주된 진주~광양 복선화 제6공구 노반건설공사 터키 기본설계중 변단면 하로판형교 형식을 적용한 수어천교의 교량계획 과정과 설계에 관한 전반적인 내용은 물론 철도교의 기능 및 주행안정성 확보를 위한 특수 안정성 검토 내용을 소개하고자 한다.

* 정회원, (주)태조엔지니어링, 구조사업본부 상무 E-mail : myt1981@hanmail.net

* 비회원, (주)태조엔지니어링, 구조사업본부 부장

** 비회원, (주)태조엔지니어링, 구조사업본부 차장

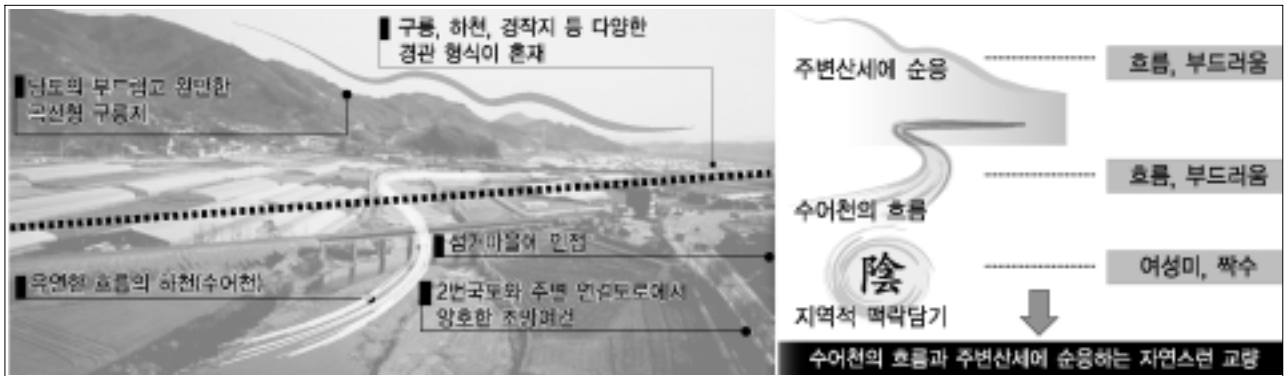
*** 비회원, (주)태조엔지니어링, 구조사업본부 과장

2. 교량계획

2.1 현황 및 가설여건

수어천교는 전라남도 광양시 진상면에 위치하며 지방2급 하천인 수어천을 사각 40°로 횡단하는 교량으로 주변현황은 남도의 부드럽고 완만한 곡선형 구릉지와 농경지가 교량 좌측으로 파노라마와 같이 펼쳐져 있으며 교량우측으로는 국도2호선 및 주거지역이 근접해 있어 교량계획시 수어천의 흐름과 주변산세에 순응하는 자연스런 교량이 요구 되었다.

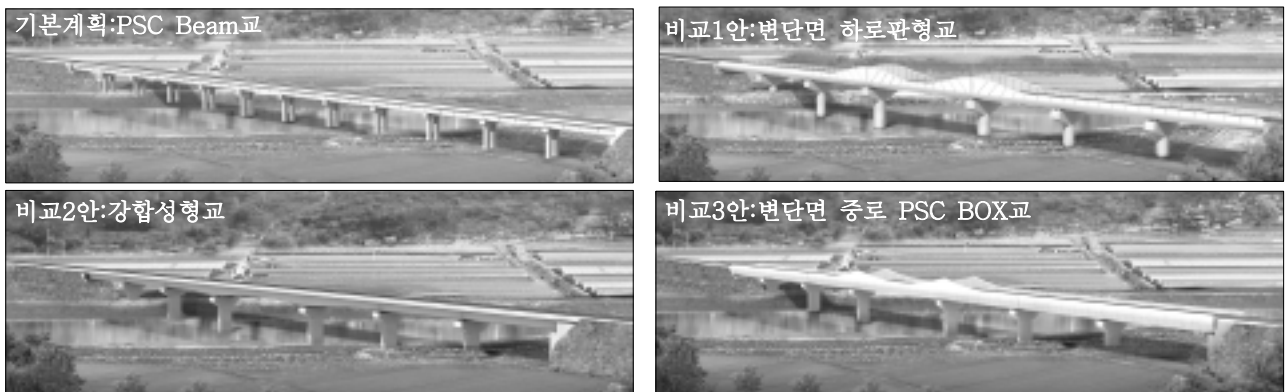
교량 가설지점의 여건은 현 운행선인 진상철교(더블 T-Beam교, 10경간)가 수어천교와 병행하여 위치하고 있어 수어천교 계획시 상부구조 경량화에 따른 기초규모 축소로 기존 진상철교와의 근접시공 영향 최소화가 필요하였다.



<그림 1> 주변현황 및 가설여건

2.2 경간구성 및 교량형식 선정

수어천교의 기본계획은 PSC Beam교(L=25.0×12=300.0m)로 설계되었으나 턴키 기본설계시 수어천 통과구간은 하천설계기준에 의해 계획홍수량 및 사각40°를 고려하여 최소 경간장인 31.1m 이상을 적용하고, 접속 경간장은 전체적인 조화를 위해 30.0m를 적용하였다. 따라서 수어천교는 수어천 하천정비 기본계획을 반영하여 총연장 L=232m(L=30.0×2+(32+48+32)+30.0×2=232.0m)로 계획하였다. 이러한 경간구성에 근거한 교량형식을 비교해 보면 <그림 2>와 같다.



<그림2> 교량형식 비교안

비교3안은 콘크리트 형식으로 유지관리 측면에서 강교에 비해 유리하나 상부구조 중량화에 따른 기초 규모 증가로 기존 진상철교와 근접시공 영향이 증가하는 단점이 있고 비교2안은 상부구조 경량화로 기초 규모 축소는 가능하나 상로교로서 다리밑 공간 폐쇄감 증가와 주변현황과 연계한 상징성이 미흡하다. 비교1안 변단면 하로판형교는 상부구조 경량화로 기초규모 축소 및 주형 형고가 낮아 개방감 확보가 유리하며 신속가설이 가능하고 복부 외측에 경사보강재를 추가 배치하여 조형미 제고와 주변 자연경관과 조화되는 교량형식으로 수어천교의 교량형식으로 선정하였다.

3. 교량설계

3.1 설계조건

본 교량의 설계시 제반기준은 입찰안내서와 입찰안내서 질의사항 및 답변내용에 근거하여 최근의 정부 제정 각종 지방서 및 설계기준을 적용하였으며 설계조건 및 교량제원을 나타내면 다음<표 1>과 같다.

<표 1> 설계조건 및 교량제원

구분	주요내용	구분	주요내용
선로등급	2급선(평면 1급선)	교량형식	• 변단면 하로판형교
선로의 부담력	LS - 22	경간구성	• $L=30.0 \times 2 + (32.0 + 48.0 + 32.0) + 30.0 \times 2 = 232.0\text{m}$
평면선형	R = 직선	교량폭원	• B=11.7m(주거터 중심간 거리)
지진하중	내진1등급(I=1.4), 지진구역 I(Z=0.11)	바닥판	• $f_{ck}=27\text{MPa}$, $f_y=400\text{MPa}(\text{SD40})$
내구년한	100년	주형	• 주부재 : SM520, 부부재:SM490

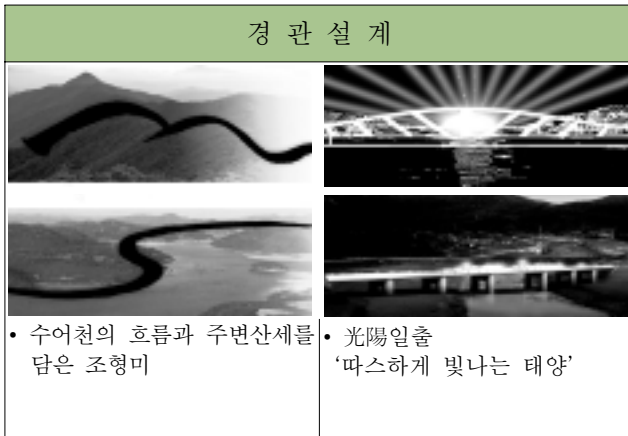


<그림 3> 수어천교 종단면도

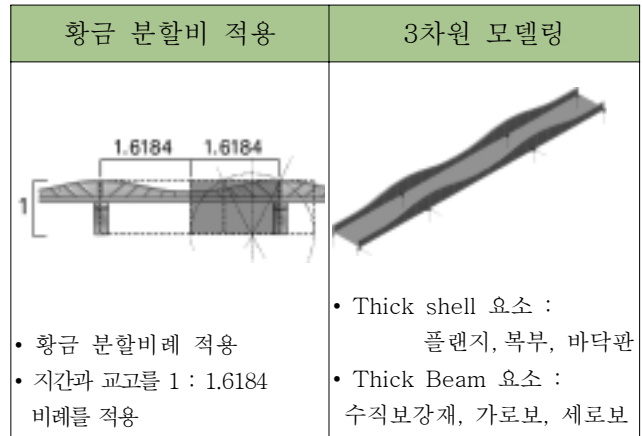
<그림 4> 수어천교 횡단면도

3.2 종방향 설계

상부구조 형식은 경관설계 및 부재의 효율적 배치를 고려하여 변단면을 적용하였으며 콘크리트 바닥판의 강성에 의한 하중 분배효과를 고려하고 복부 높이가 큰 판형교의 거동을 정확히 분석하기 위하여 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS Civil을 이용하여 3차원 FEM해석을 수행하였다. 또한, 가로보 및 세로보는 바닥판을 지지하고 바닥판에 재하되는 하중을 주형에 효과적으로 전달시키기 위해서 Thick Beam 요소를 사용하여 격자 모델링 하였다.



<그림5> 수어천교 경관설계



<그림 6> 구조해석 모델링

고정하중은 각 부재에 자중으로 재하하고 열차하중은 바닥판 슬래브에 직접 재하시켰다. 주형은 휨모멘트 및 전단력에 의해서 발생하는 주축방향 응력 및 합성응력에 대해서 검토하였으며 허용응력은 플랜지의 유효폭 및 현장용접으로 인한 허용응력 저감을 고려하여 산정하였다. 또한, 바닥판슬래브는 강재단면과 비합성 거동을 하는 것으로 계획하였다.

축력		위치	단면력	전단력		위치	단면력
		중앙지점 상부플랜지	8,184.0 (kN)			중앙지점 북부	1,429.0 (kN)
		중앙부 상부플랜지	-6,990.0 (kN)				

응력		위치	응력	변위		위치	단면력
		중앙지점 상부플랜지	179.3 (MPa)			중앙부	0.0524 (m)
		중앙부 하부플랜지	142.8 (MPa)				

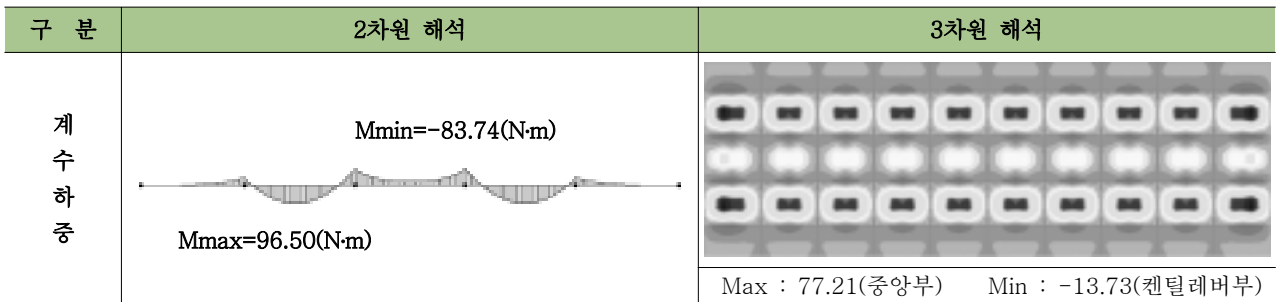
<그림7> 단면력 산출

<표2> 응력검토 결과

구 분	휨응력(MPa)		전단응력(MPa)		합성응력검토		검토결과
	최대 발생응력	허용 휨응력	최대 발생응력	허용 전단응력	계산치	허용치	
수어천교(주경간교)	179.3	195.0	31.3	120.0	0.875	1.1	O.K

3.3 횡방향 설계

횡방향 해석은 세로보를 가상 지점으로 갖는 2차원 평면 Frame으로 바닥판을 모델링하여 구조해석을 수행하였으며 해석결과에 대한 단면력은 3차원 Shell 해석을 통하여 안전성을 재검토 하였고 바닥판 최소두께 검토 및 설계하중은 철도설계기준(철도교편)에 준하여 선정하였다.





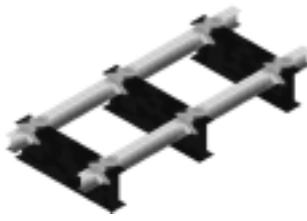
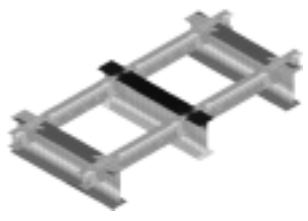
<그림 8> 횡방향 해석결과

<표 3> 단면력 검토 및 철근량 산출

구 분	Mu (kN-m)	ØMn (kN-m)	필요철근량 (mm²)	사용철근량 (mm²)	균열폭 (mm)	허용균열폭 (mm)	검토결과
켄틸레버부	48.52	111.36	666.2	1,590(H16@125)	0.260	0.295	OK
중앙부	96.50	155.88	1,364.0	2,290(H19@125)	0.201	0.288	OK
지점부	83.74	155.88	1,364.0	2,290(H19@125)	0.201	0.288	OK

3.4 응력집중부 상세해석

전체 구조물을 판요소 및 보요소를 혼합하여 유한요소해석을 수행하였으며 하로 강판형교의 응력분포 및 크기에 대한 해석결과로 <그림 9>와 같이 안정성 여부를 검토하고 아울러 응력집중 위치 및 규모를 파악하여 부재의 배치와 주형과 가로보 연결부, 가로보와 세로보 연결부를 설계하였다.

주형과 가로보 연결부 (SXX, 지점부)	주형과 가로보 연결부 (SYY, 중앙부)	가로보와 세로보 연결부 (SXX, 지점부)	가로보와 세로보 연결부 (SYY, 중앙부)
			
발생응력 = 164.5MPa < 허용응력 = 210MPa ∴O.K	발생응력 = 151.1MPa < 허용응력 = 210MPa ∴O.K	발생응력 = 114.5MPa < 허용응력 = 190MPa ∴O.K	발생응력 = 101.5MPa < 허용응력 = 190MPa ∴O.K

<그림 9> 주요연결부 응력검토

4. 특수 안정성 검토

철도교는 도로교와는 달리 특정한 축간격을 가진 실 주행열차하중에 의한 공진(Resonance)발생 가능성이 크며, 중량의 하중이 고속으로 주행함에 따라 충격계수 외에 다양한 동적성능 항목에 대한 검토가 필연적이다.

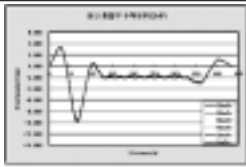
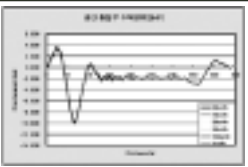
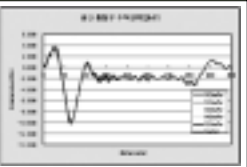
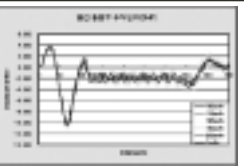
우리나라에서는 고속철도용 교량에 대해서 일부 외국기준을 도입하여 적용하고 있지만 일반철도 교량의 경우에는 아직 동적거동에 대한 기준이 마련되어 있지 않은 실정이므로 본 교량의 동적성능과 관련된 항목기준을 표 4와 같이 정리하였다.

<표 4> 동적성능 검증 기준치

구 분	적 용 기 준	비 고
충격 계수	강 교 : $L > 24m$ 일 경우 $I = \frac{180}{L-9} + 26$	철도설계기준
고유진동수	• 1차모드 상한치 : $n_0 = 94.76 \times L^{-0.748}$ • 1차모드 하한치 : $n_0 = 23.85 \times L^{-0.592}$	UIC 776-1
Deck 연직가속도	유도상 궤도 : 0.35g	UIC/CTRL
단부 꺾임각	• 교 대 부 : $\theta = 2.0 \times 10^{-3}/h$ rad • 상판-상판 연결부 : $\theta_1 + \theta_2 = 4.0 \times 10^{-3}/h$ rad	UIC/CTRL
단면 비틀림 변위	속도 : 120km/h~220km/h 일 때, 1.0mm/m based 3.0m (static)	UIC/CTRL
중앙부 수직처짐	• 하로판형교 30m 구간 : 1/1,000 • 하로판형교 32m+48m+32m 구간 : 1/1,700	UIC/CTRL

4.1 교량의 동특성에 의한 동적증가 계수(DMF) 검토




이동차량하중에 의한 동적 증폭효과를 검토하기 위하여 동적계수 증가요소인 교량과 차량의 동적특성, 차량의 주행조건, 주행면의 기하학적 특성을 고려하여 해석한 결과 철도설계기준에 의한 충격계수보다 작은값을 보이므로 설계에 반영한 충격계수의 안정성을 검증하였다.

구 분	DMF(Dynamic Magnitude Factor)			
	10km/h~50km/h	60km/h~100km/h	110km/h~150km/h	160km/h~200km/h
하로판형교 32m+48m+32m				
DMF = 1.136 < 정적하중 충격계수 I = 1.306 ∴ OK				

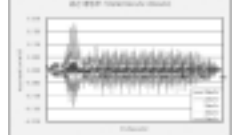
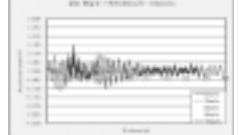
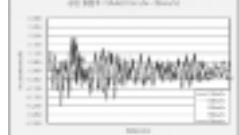
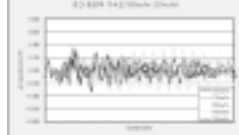
<그림 10> 교량의 동특성에 의한 동적증가 계수(DMF)

4.2 고유 진동수 및 자갈도상의 안정성 검토

실 열차하중(LS-22 하중중 7400호 디젤)을 가능한 속도별로 주행시키는 시간이력 동해석을 실시하여 열차가 주행할 때 발생하는 교량의 진동으로 인한 자갈의 흐트러짐이나 케도틀립 등의 부작용(열차 주행지장)을 제거하기 위하여 교량의 자갈도상에 대한 안정성을 검토하였다.

구 분	1st. Mode	2nd. Mode	3rd. Mode
고유치 해석	 F = 2.858 Hz	 F = 4.617 Hz	 F = 4.618 Hz
결 과	• 1차모드의 상,하한치 범위인 2.411~5.237 사이의 값인 F = 2.858 Hz로 제한치를 만족함		

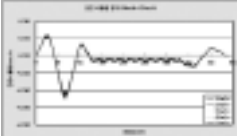
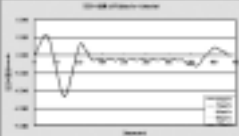
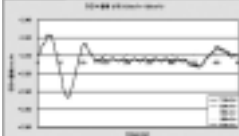
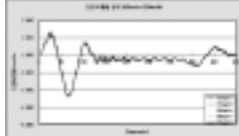
<그림 11> 고유치 해석 결과

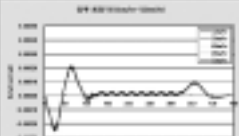
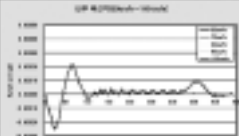
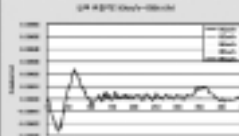
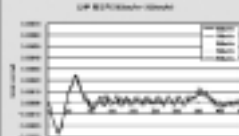
구 분	내측경간 중앙부(82m)			
	10km/h~50km/h	60km/h~100km/h	110km/h~150km/h	160km/h~200km/h
자갈 안정성 검토				
결 과	• 전 경간에 걸쳐 제한치(0.35g)이내의 값을 확보하고 있으므로, 자갈도상의 차량 주행에 따른 안정성은 충분히 확보하고 있음.			

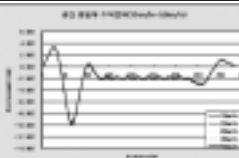
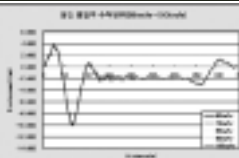
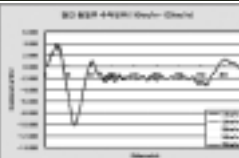
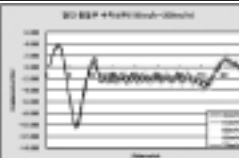
<그림 12> 속도별 Deck 연직가속도

4.3 교량의 동특성에 의한 차량운행 안정성 검토

교량의 동특성에 의한 차량운행 안정성은 교량의 각종 변위량에 의해 지배되므로 열차 주행에 영향을 줄 수 있는 변위량에 대하여 LS-22 하중에 의한 동적변동치와 정적변동치를 모두 검토한 결과, 허용치를 만족하므로 동특성에 대한 차량운행 안정성을 확보하였다.

구 분	적용속도			
	10km/h~50km/h	60km/h~100km/h	110km/h~150km/h	160km/h~200km/h
단부 단면 비틀림 변위 검토				
결 과	• 정적변위 : 0.165mm/m < 1.0mm/m ∴OK • 동적 변위 : 0.049mm/m < 0.4mm/m ∴OK			

구 분	적용속도			
	10km/h~50km/h	60km/h~100km/h	110km/h~150km/h	160km/h~200km/h
단부회전각 변위 검토				
결 과	• 정적회전각 : $1.040 \times 10^{-4} \text{rad} < 3.50 \times 10^{-3} \text{rad} \therefore \text{OK}$ • 동적회전각 : $2.645 \times 10^{-4} \text{rad} < 1.53 \times 10^{-3} \text{rad} \therefore \text{OK}$			

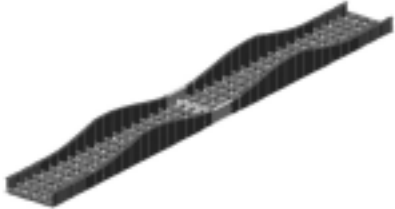
구 분	적용속도			
	10km/h~50km/h	60km/h~100km/h	110km/h~150km/h	160km/h~200km/h
경간부 수직처짐 변위 검토				
결 과	• Vd = 10.800mm f/L = 1/4,444 < 1/1,700 ∴OK			

<그림 13> 각종 변위량 검토

4.4 이동하중 동특성에 의한 피로안정성 평가

전체 교량을 Frame과 Shell 요소로 모델링 하여 기준 응력장을 구한 후 Frame 모델을 사용하여 각 절점에서 시간에 따른 동특성 확대계수를 산정하였다. 차량하중에 대한 동적응답계수로부터 동응력 이력을 추출하여 이를 Rain-Flow Method로 Cycle Counting을 하여 응력발생 횟수를 계산한 결과, 최소 2.86×10^6 Cycle로 기준치 2.0×10^6 을 초과하므로 구조물의 공용중 피로수명은 충분한 것을 검토 하였다.

<표 5> 피로안정성 평가

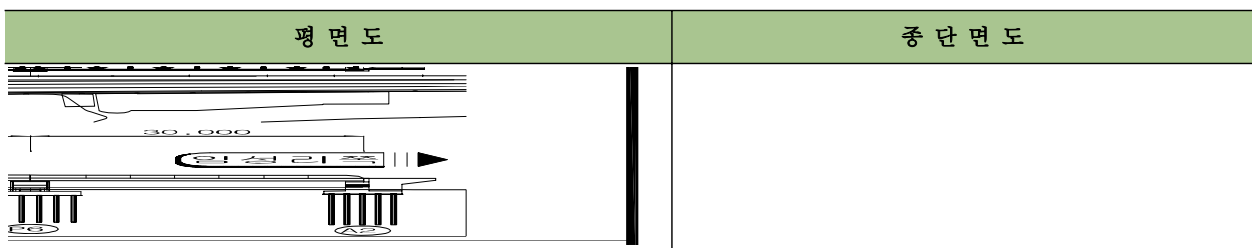
열차의 동적해석을 위한 FEM 모델링	검토위치	수명(Cycle)	피로 수명(년)
	① : 주형의 응력집중부	8.38×10^6	419 년
	② : 가로보와 주형의 연결부	4.89×10^6	244 년
	③ : 가로보와 세로보의 연결부	2.86×10^6	143 년
	④ : 가로보 하단의 응력 집중부	9.71×10^6	486 년

5. 가설공법

수어천교 기초는 지지층인 풍화암의 심도가 18.0~19.0m에 분포하여 강관말뚝 기초를 적용하였으며 기존선 근접시공으로 인하여 기존 교량의 침하 및 안정성이 우려되었다. 이에 유한요소해석 프로그램인 Plaxis 2D를 통한 수치해석을 수행하여 기초 터파기 굴착으로 인한 인접구조물의 거동분석 및 가시설 구조물의 안정성을 확인 하였다.

기초 및 하부공사는 공사중 하천오염 방지 및 하천범람을 예방하기 위하여 갈수기시 공사를 시행토록 하였으며 환경오염 저감을 위해 이중 오타방지막을 설치하였다.

상부구조 가설공법은 기존 운행선의 안전을 위하여 신속가설에 유리한 가벤트+크레인 공법을 선정하였다.



시공순서 : 공사용 가축도 설치 → 운행선 안전대책 수립 → 강관 Pile 시공 → 가시설 설치 → 하부공 시공
 → 강교 현장조립 → 단계별 강교가설

<그림 14> 시공순서도

6. 결론

본 논고는 중경간의 지간에 교량형고를 낮추기 위해 적용한 변단면 하로판형교인 수어천교의 계획 및 설계에 대한 주요사항을 요약한 것으로 자동화 장비 도입과 고성능 강제 생산등의 강교제작기술을 바탕으로 남도의 부드럽고 완만한 주변산세와 광양 일출을 담아 낼 수 있었다.

현재 2006년 11월을 목표로 실시설계를 진행중에 있으며 기본설계시 다소 미흡했던 부분에 대하여 시공사(대우건설)와 강교제작사의 도움으로 설계 성과물을 보완해 나갈 것이다.

향후 유사교량의 계획 및 설계에 미력하나마 도움이 되길 바라며 본 설계에 많은 관심과 애정을 보여주신 한국철도시설공단 관계자분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. (주)태조엔지니어링, 진주~광양 제6공구 노반건설공사 기본설계 보고서, 2005
2. (주)태조엔지니어링, 진주~광양 제6공구 노반건설공사 실시설계 보고서, 2006
3. (주)태조엔지니어링, 진주~광양 제6공구 노반건설공사 구조 등 각종계산서, 2006
4. 한국철도시설공단, 철도설계기준(철도교편), 2004
5. UIC Code 776-1, UIC/CTRL Technical Manual Vol.2