

강관 아치보강 PSC 박스 거더교의 설계

Design of PSC Box Girder Bridge Reinforced with Tubular Arch



친종원*
Jong-Won Chun



송국환**
Kuk-Hwan Song



안광수***
Kwang-Su Ahn



양기재****
Ki-Jae Yang

1. 머리말

기흥1교는 화성·동탄 신도시 건설에 따른 광역교통 개선과 경부고속도로, 국도1호선의 교통 분산을 위해 추진된 영덕~오산간 광역도로 건설사업(지방도311호선)에 위치한 주요 교량으로 가설조건 및 지역특성에 따라 각기 다른 교량형식이 적용되었다(그림 1). 이중 기흥IC 통과구간(MBR 3)은 동탄 신도시의 관문적 상징성 및 하부통과차량의 주행시거 확보 등을 위해 주경간장 80m의 아치보강 PSC박스거더교로 계획하였으며, 이는 PSC 박스거더와 강관 아치가 복합 적용된 신개념의 교량형식이다.

2. 교량개요

기흥1교는 기흥저수지와 화성IC사이에 위치하는 총연장 1.394km의 왕복6차로 교량으로 구성되어 있다(표 1).

교량 시점부의 MBR1은 삼성전자등 주요 산업시설이 위치하고, 가스관 등 지장물을 통과하므로 주경간장 109m의 상·하행 분리형 PSC 박스 거더교(FCM)로 계획하였으며, 오산천 및 용인시 시가화 예정구간의 MBR2, 기흥IC 및 화성·동탄 신도시 진입도로 횡단구간의 MBR3는 일체형 PSC박스거더교(FSM)를 적용하였다(그림 2).

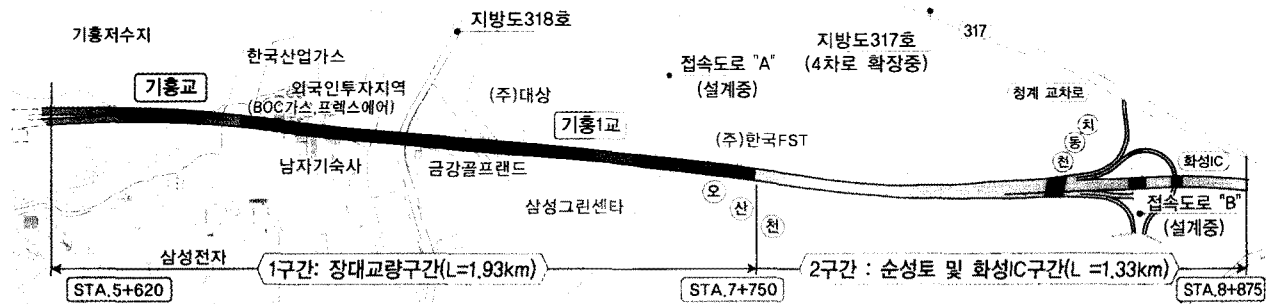


그림 1. 영덕~오산간 광역도로 건설사업 3공구 개요도

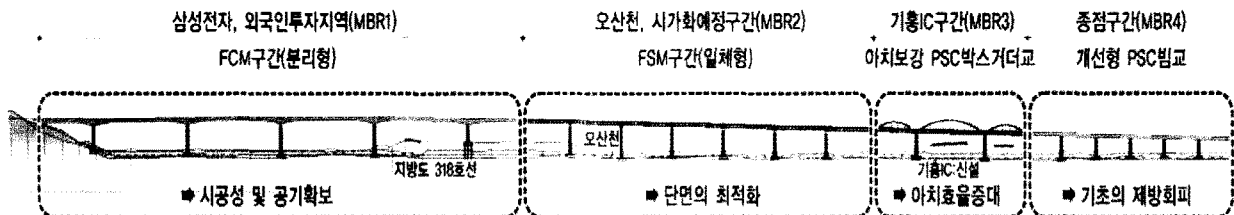


그림 2. 기흥1교 종단면도

* 정희원, 삼성물산(주)건설부문 국내토목영업팀 과장
jaychun@samsung.com
** 정희원, 삼성물산(주)건설부문 국내토목영업팀 차장
*** 정희원, (주)동호ENG 구조부 전무
**** (주)진우ENG 구조부 차장

표 1. 기흥1교 교량개요

구분	MBR 1	MBR 2	MBR 3	MBR 4
주요 현황	삼성전자, 외국인 투자지역	오산천, 도시계획 예정지	기흥IC 신도시 진입로	(주)FST 등 첨단공장인접
교량 형식	PSC 박스거더교 (FCM)	PSC 박스거더교 (FSM)	아치보강 PSC 박스거더교	DR PSC 거더교 (crane가설)
경간 구성	64+4@109+64 = 564m	55+5@60+55 = 410m	50 + 80 + 80 = 180m	2 @ (3 @ 40) = 240m
폭원	29.3m (분리형)	29.3 ~ 29.8 (일체형)	29.8m (일체형)	29.8 ~ 29.3 (분리형)
중단 선형 평면 선형	S = (+)0.7469 ~ (-)1.9646% R = 5,300 ~ 11,700m			

MBR 3의 기흥IC구간은 교량 조망이 우수한 신도시 진입의 관문적 위치로 <그림 3>과 같이 3경간의 아치보강 PSC박스거더교를 적용하여 3.5m의 등형고와 주경간장 80m의 상·하행 일체단면 및 스트럿 설치로 상부 차중경감, 교각규모의 최소화 등 구조적 효율성 및 경관성이 우수한 교량형식이다(그림 4).

3. 교량형식 선정

3.1 주요현황 및 착안사항

기흥IC구간(MBR 3)의 교량형식 선정을 위한 주요 착안사항은 다음과 같다

- 화성·동탄신도시 진·출입의 관문적 상징성 확보
- 기흥IC 진입도로 오산천교와의 저축배제
- 평활한 수평적 개방경관과의 조화

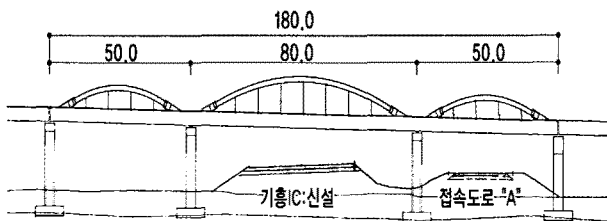


그림 3. 기흥IC구간 중단면도

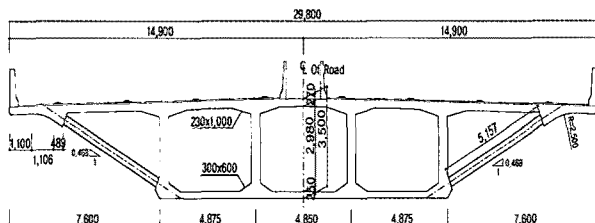


그림 4. 표준횡단면도

- 낮은 형하고(7.5m), 기흥IC요금소의 시야확보
- 기흥1교의 경관적 통일성 및 시공성 확보 (동일재료 적용, 측면형상 일치, 등형고 확보)

3.2 교량형식 검토

위의 착안사항을 바탕으로 80m 이상의 경간장 확보가 가능한 1차 교량형식으로 아치교 2개안과 케이블교 2개안을 비교 검토한 결과, 낮은 형하고로 기흥IC 시야확보에 불리한 상로아치교와 대규모 수직 주탑으로 수평적 주변경관에 부적합한 사장교 형식을 배제하고, 아치보강형식의 하로 아치교와 낮은 주탑의 엑스트라도즈교를 2차 비교안으로 선정하여 상세 검토를 수행하였다(그림 5).

검토결과, 엑스트라도즈교에 비해 수평적 주변경관과의 조화가 우수하고, 시공성, 경제성이 우수한 아치보강 PSC박스거더교를 최종 교량형식으로 선정하였다(그림 6).

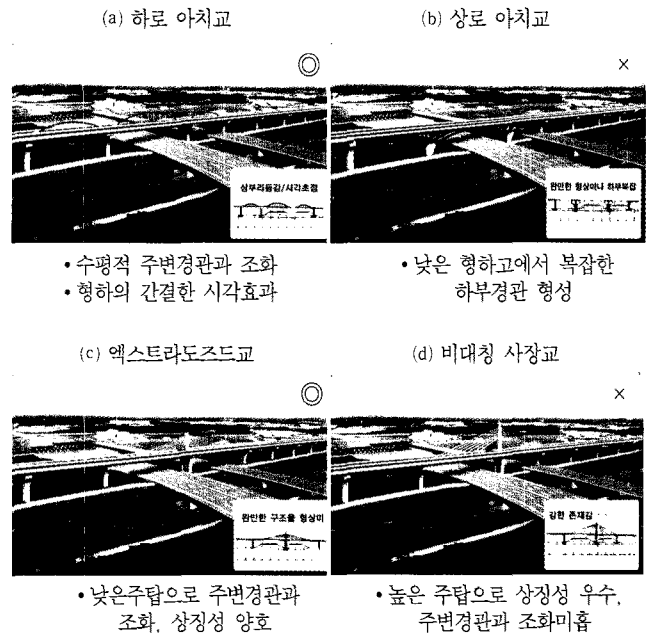


그림 5. 1차 교량형식 비교안

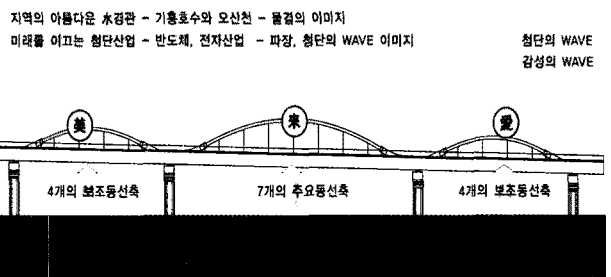


그림 6. 아치보강 PSC박스거더교 경관컨셉

특히 강관아치는 화성·동탄 신도시의 3환상(ring) 아치형태의 도시배치와 지역하천의 물결, 첨단산업의 파장이미지를 형상화하여 지역적 상징성 및 경관적 조화성을 추구하였다(그림 7).

4. 세부구조계획

아치보강 거더교는 아치리브의 하중분담으로 시간중양부 정모멘트가 현저히 감소되며, 아치리브의 축력이 지점부에 수평력과 수직력으로 분리 전달되므로 부모멘트 감소와 주형에 압축력 도입효과를 기대할 수 있다. 따라서 지점부 압축응력 도입에 따른 응력 제어와 형교 축소를 유도할 수 있었다.

4.1 아치리브 구조계획

4.1.1 아치리브 단면

아치리브는 직경(Φ) 1.3 m, 두께(t) 32 mm의 강관아치를 적용하였으며 일반 강박스 아치에 비해 다음과 같은 장점이 있다.

- (1) 좌굴저항이 커 압축력에 강하고, 별도의 보강재가 불필요하여 시공성 및 경관성 우수하다.
- (2) 각형에 비해 유체의 대한 저항이 작기 때문에 풍압 등에 유리하다.
- (3) 부식 및 도장면적이 작아 유지관리에 용이하다.

4.1.2 아치 라이즈비(f/L) 검토

아치보강 거더교는 아치의 라이즈비에 따라 구조적 성상이 크게 변화할 뿐만 아니라 경관적 요소에도 영향이 있으므로 구조적, 경관적 검토를 통해 최적의 라이즈비를 결정하였다.

〈그림 8〉은 아치 라이즈비에 따른 주형, 아치리브, 행어케이블의 안전율 변화를 나타내고 있으며, 주형응력은 라이즈비 1/9 이상에서 1.0 이상의 안전을 확보가 가능하고 1/5 이상에서는

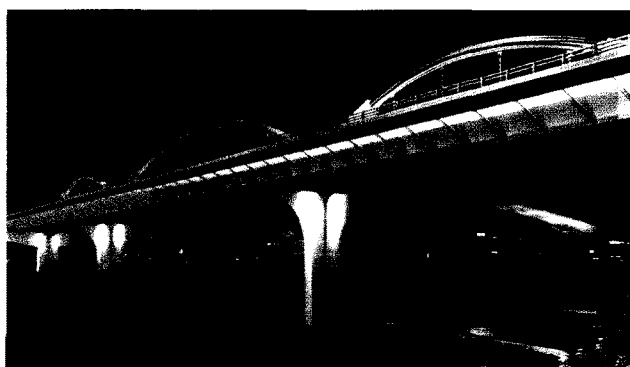


그림 7. 아치보강 PSC박스거더교 조감도

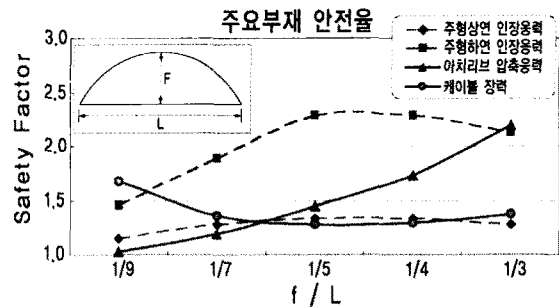


그림 8. 라이즈비에 따른 부재안전율

안전율이 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 또한 행어 케이블은 라이즈비가 증가함에 따라 안전율은 다소 감소하나 1/7 이상에서는 1.3정도의 균등한 값을 유지한다. 따라서 아치보강 PSC박스거더교의 각 부재별 적정 안전율을 확보하기 위해서는 1/7 ~ 1/5의 라이즈비를 적용하는 것으로 분석되었다(그림 9).

기흥1교 중앙아치부의 형하고와 아치교의 합은 16.8m로 경관적인 측면에서 아치 경간장과 5S의 비례미를 확보하고 있으며 이를 라이즈비로 환산하면 약 1/7에 해당되므로 아름답고 안정감 있는 적정 아치교를 확보하고 있는 것으로 판단된다.

4.1.3 아치리브 하중분담을 검토

아치리브의 하중 분담률(그림 10)은 교량에 작용하는 수직 하중에 대한 행어케이블 장력의 합으로 결정되며, 이는 교량 완성후 외부하중에 대한 아치리브의 하중분담률을 나타내는 값으로 교량에 작용하는 전체하중에 대한 분담률(주형의 응력감소율)과는 차이가 있다. 실제로 아치리브가 설치되어 하중을 분담하는 시점과 행어케이블 장력 도입량 등에 따라 아치리브의 하중분담률은 변하게 되며 효율적 구조시스템 결정을 위한 주요변수가 된다. 기흥1교는 Φ1.3 m, 32t의 강관 아치와 형교 3.5 m의 주형을 적용하였으며, 이 때 아치리브의 하중분담률은 23.7%로 엑스트라도즈드교 수준의 하중분담(10 ~ 30%)이 가능한 것으로 판단된다. 그러나 기흥1교의 아치리브는 주형가설을 완료하고 동바리 해체후 시공되므로 실제로는 전체하중의 약 10% 정도를 분담한다고 볼 수 있다(그림 11).

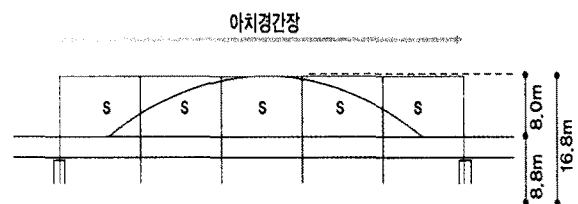
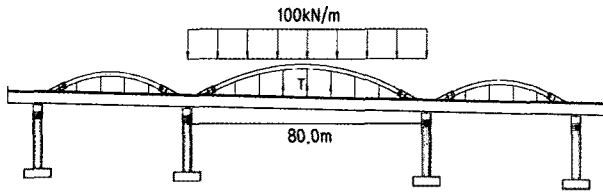


그림 9. 라이즈비에 따른 비례미 검토



- 작용 수직하중 : 100 kN/m × 80 m = 8,000 kN
- 중앙경간 행어케이블 장력의 합 : 1,893 kN
- 하중분담률 = 1,893/8,000 × 100 = 23.7%

그림 10. 아치리브의 하중분담률

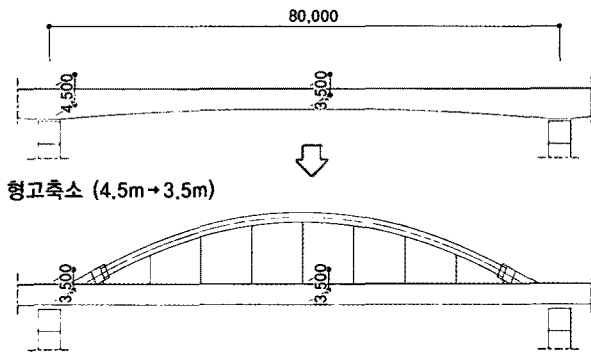


그림 11. 아치보강에 따른 형고축소

〈표. 2〉는 기흥1교 아치보강 PSC박스거더교 주요부재의 하중별 응력도를 나타낸 것으로 주형은 1차 고정하중에 상응하는 강연선의 배치로 가설중 아치 설치 없이 자립이 가능하며, 2차 고정하중 이후의 부가하중은 아치리브의 하중분담(23.7%)으로 그 영향이 감소된다. 그러나 강교에 적용되는 일반 아치보강 거더교와 달리 PSC박스거더의 크립, 건조수축에 의한 아치리브, 행어케이블의 응력이 전체응력의 45% 이상을 차지하고 있어 아치리브의 효율증대를 위해 아치리브 강성, 라이즈비 등을 통해 하중분담율과 주형응력을 적정히 조정할 필요가 있다. 〈표 3〉, 〈그림 12〉와 같이 강관의 직경 증가에 따른 아치리브의 하중 분담률은 25% 내외이나, 강관의 강성 증가에 따른 응력의 여유로 케이블 도입장력을 증가시킬 수 있어 주형응력은 최대 54%까지 감소된다. 그러나 강재 및 케이블 중량 증가가 예상되고, 기흥1

표 3. 강관 크기에 따른 하중분담률

아치리브	하중분담률	주형응력(MPa)		적정 케이블크기
		지간부	지점부	
미설치	-	-10.646 (O.K)	-16.789 (N.G)	-
Φ1.3 m, 32 t (I = 0.02 m ⁴)	23.7%	-7.555 (감 29%)	-13.525 (감 19%)	Φ5 mm, 151 ea
Φ2.0 m, 32 t (I = 0.10 m ⁴)	26.5%	-5.969 (감 44%)	-11.824 (감 30%)	Φ5 mm, 187 ea
Φ2.5 m, 32 t (I = 0.19 m ⁴)	27.5%	-4.888 (감 54%)	-10.533 (감 37%)	Φ5 mm, 253 ea

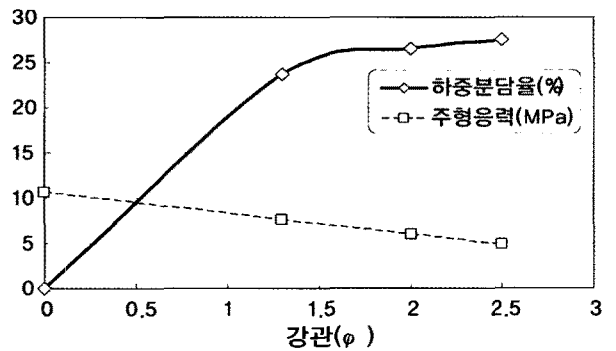


그림 12. 강관크기에 따른 하중분담률

교 가설공정상 가설시 주형의 자립과 측단면 형상통일을 위해 Φ1.3 m, 32 t의 강관이 가장 효율적인 것으로 판단되었다. 〈표. 4〉는 라이즈비에 따른 하중 분담률 변화를 나타내고 있으며, 라이즈비 증가에 따라 아치리브의 하중 분담률 증가폭은 크지 않으나 주형응력이 41%까지 감소되어 효과가 큰 것으로 검토되었다. 라이즈비는 각 부재의 적정 안전율, 아치의 비례미를 위해 1/7을 적용하였다.

4.2 횡단면 세부계획

4.2.1 횡단면 검토

기흥1교의 MBR2, 3은 FSM으로 가설되는 6차로 일체형 교량으로 개성있는 경관연출 및 상·하부중량감소를 위해 단면 효율성

표 2. 하중별 부재응력

구분	1차 고정하중	2차 고정하중	PS	케이블 긴장	CRSH	Temp.	활하중	합계
아치리브	-	-17.344 (12.62%)	-	-10.983 (7.98%)	-62.716 (45.56%)	-26.182 (19.02%)	-20.416 (14.83%)	-137.671 (100%)
주형 (지간부 하연)	14.457 (-505.6%)	1.354 (-47.4%)	-14.176 (495.7%)	-0.059 (2.1%)	-3.516 (123.0%)	-0.665 (23.3%)	-0.254 (8.9%)	-2.859 (100%)
케이블	-	52.561 (8.43%)	-	49.594 (7.96%)	297.152 (47.67%)	124.840 (20.03%)	99.201 (15.91%)	623.348 (100%)

표 4. 아치 라이즈비에 따른 하중분담율

라이즈비	하중분담율	주형용력(MPa)		적정 케이블크기
		지간부	지점부	
미설치	-	-10.646 (O.K)	-16.789 (N.G)	-
1/7	23.7%	-7.555 (감 29%)	-13.525 (감 19%)	Φ5mm, 151 ea
1/6	26.4%	-6.874 (감 35%)	-12.685 (감 24%)	Φ5mm, 163 ea
1/4	26.8%	-6.227 (감 41%)	-11.818 (감 30%)	Φ5mm, 199 ea

이 우수한 스트럿부착 PSC박스 단면을 적용하였다(그림 13).

4.2.2 스트럿 구조계획

기흥1교에 적용된 스트럿은 FRP 피복 RC구조로 일반 RC스트럿, 강관 스트럿에 비해 FRP 피복에 의한 콘크리트 보호효과로 내구성이 우수하고, FRP피복의 도장으로 강관과 같은 다양한 색채 연출이 가능한 장점이 있다(그림 14). 스트럿 접합부는 가장자리 보형식을 적용하였으며, 가장자리 보의 균열 및 응력제어를 위해 0.6" - 7EA의 종방향 강연선을 배치하였다.

스트럿 연결방식은 일체타설 단면에 적용사례가 많고 스트럿 주철근을 연장하여 바닥판에 매입하므로 시공성 및 유지관리에 유리한 주철근 매입 방식을 적용하였다(그림 15).

4.3 행어케이블 구조계획

4.3.1 케이블 형식검토

아치리브의 행어케이블은 활하중에 의한 피로강도 확보에 유

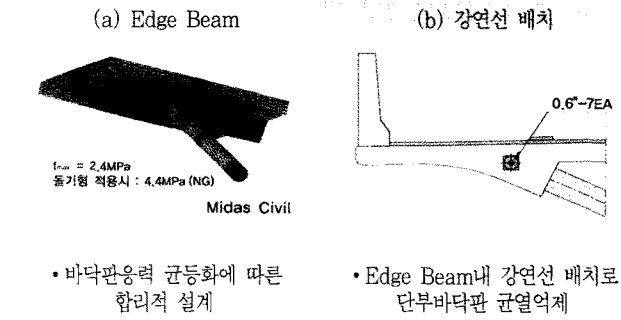


그림 15. 스트럿 접합부 형상

리한 PWS(parallel wire strand)방식을 주로 적용한다. 기흥1교의 아치보강 PSC박스거더교는 아연도금, 충전재, 고밀도 PE Tube의 3중 방식구조의 Φ5mm - 151 EA의 PWS 케이블을 적용하였다.

4.3.2 정착방식 검토

행어 케이블과 강관아치의 연결은 부재외측의 핀연결방식을 적용하여 정착작업과 유지관리가 용이하도록 계획하였으며, 주형과의 연결은 정착구 방식을 적용하여 박스내부에서의 긴장작업이 가능하도록 계획하였다(그림 16).

4.4 가설순서 검토

기흥1교의 MBR 2, 3는 형하고가 낮고 비교적 하부공간에 제약이 없어 시공성이 양호한 FSM 가설공법을 적용하였다. 일반적인 FSM가설은 한방향으로 경간별 가설되며 가설이력에 따라 주형의 최종 단면력이 결정된다(표 5).

그러나 기흥1교 MBR 3의 경우 중앙경간장이 80m로 경간별로 순차적 가설할 경우 85m 이상의 대규모 동바리시스템이 필요하여 동바리 전용성 및 구조적 안전성이 불리할 것으로 판단되어 측경간 가설후 중앙경간을 후가설하는 것으로 설계하였다.

(그림 17)와 같이 중앙경간을 후가설로 계획하여 타설간격 60m로 동바리 전용이 가능하며, 순차적 가설에 비해 시공중

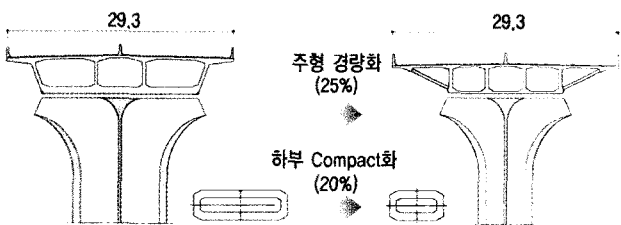


그림 13. 횡단면 결정

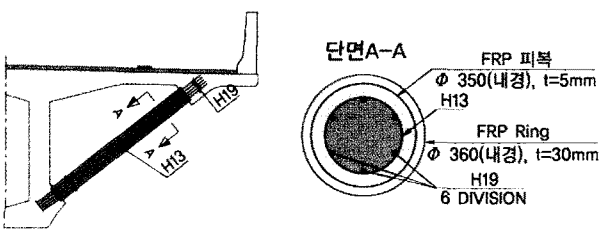


그림 14. FRP 피복 RC스트럿

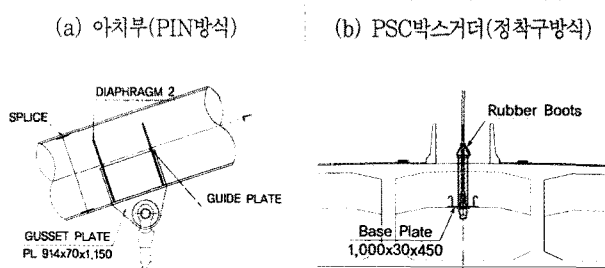


그림 16. 케이블 정착방식

표 5. FSM가설순서에 따른 모멘트 변화

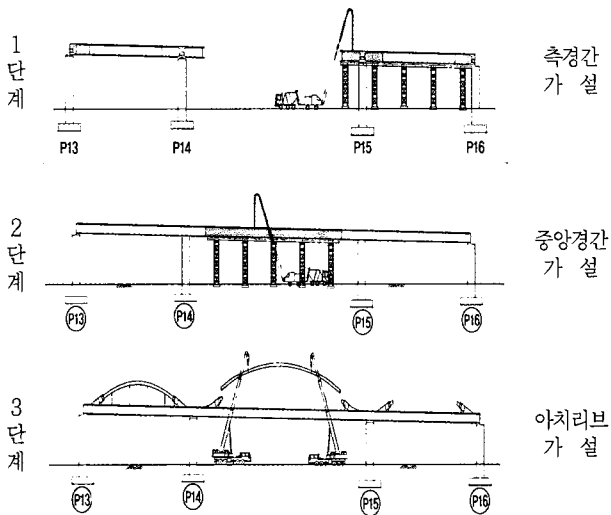
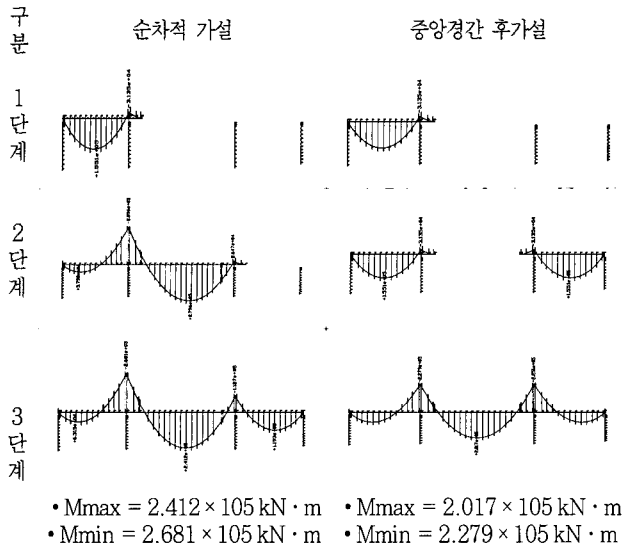


그림 17. 아치보강 PSC박스거더교 가설순서

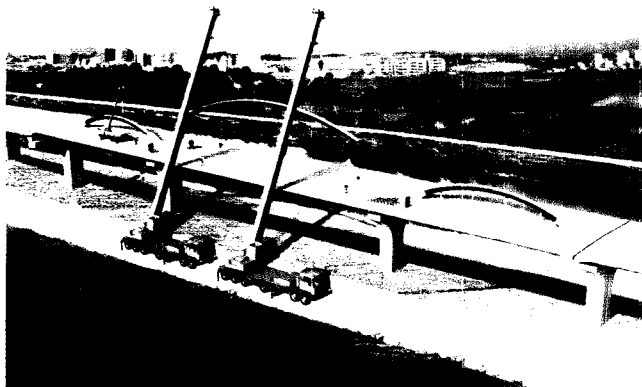


그림 18. 아치보강 PSC박스거더교 가설조감도

및 완공후 주형모멘트가 15% 이상 경감되어 아치리브 설치 전 주형의 자립이 가능하게 되었다(그림 18).

5. 구조설계

5.1 종방향 해석

PSC박스거더교의 가설단계 해석은 RM-2004를 이용하여 해석하였으며 시공단계별 및 완공후 사용하중조합에 따른 응력검토와 계수하중조합에 대한 극한강도 검토를 수행하여 주형의 안전성을 확보하였다(그림 19, 20).

5.2 횡방향 해석

바닥판의 균열방지과 인장응력 제어를 위해 횡방향 강연선(0.6"-4 EA)을 1.0 m 간격으로 배치하였으며 보다 엄밀한 해석을 위해 2D frame 모델과 3D shell 모델을 적용하여 바닥판의 응력과 휨강도를 검토하였다(그림 21). 또한 스트럿의 강도검토 및 스트럿 교체 및 파단시에 대한 상세검토를 수행하였으며, 스트럿 연결부의 피로검토를 수행하여 피로응력이 허용치 이내로 제어 가능하도록 철근의 직경을 결정하였다(그림 22).

5.3 아치리브 검토

5.3.1 면내 및 면외좌굴 안정성 검토

아치리브는 축력지배구조로 외력에 대한 구조적 안전성 및 사용

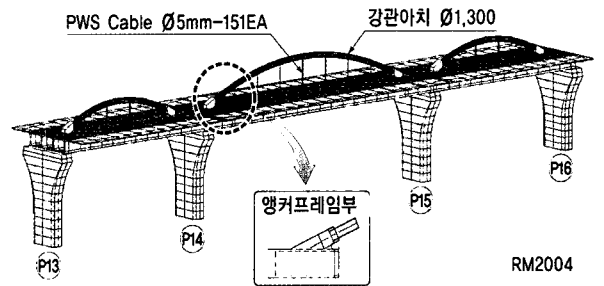


그림 19. 해석모델

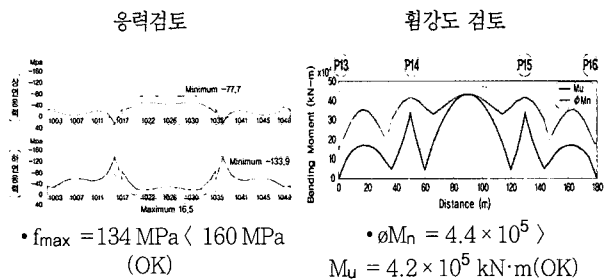


그림 20. 주형의 응력 및 휨강도 검토

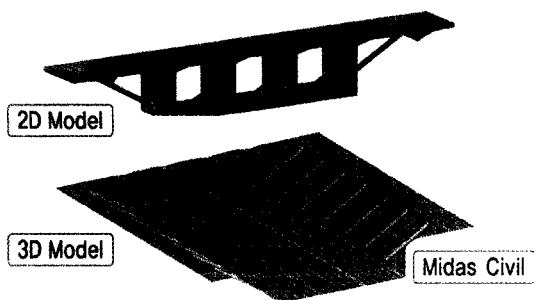


그림 21. 횡방향 해석모델

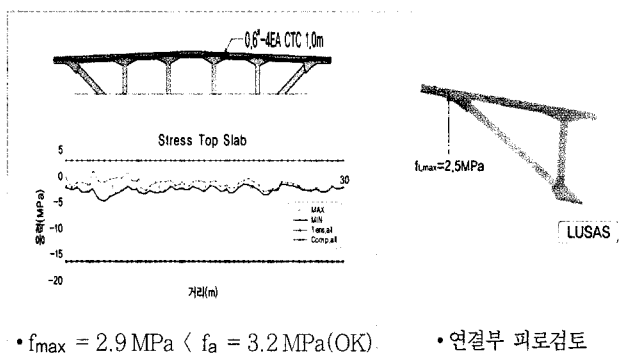


그림 22. PSC바닥판 및 스트럿 검토

성 확보와 더불어 좌굴에 대해 안전한 구조가 되도록 설계해야 하며 도로교설계기준(2005년)에 제시된 검토식에 따라 면내, 면외좌굴을 검토하고 좌굴해석을 통해 그 타당성을 검증하였다(표 6).

(1) 면외좌굴 검토결과

$$- H/A_g = 31.993 \text{ MPa} < 0.85 \cdot f_{ca} = 118.310 \text{ MPa}$$

(2) 면내좌굴 검토 : 아치에 등분포하중이 만재된 경우 발생하는 수평력과 한계수평력을 비교 검토

$$H_{cr} = [4\pi^2 \cdot 1 - 8 \left(\frac{f}{L}\right)^2] \cdot \frac{EI_y}{L^2} = 47,796.15 \text{ kN}$$

$$H_{cr} = 47,796.15 \text{ kN} \geq 1.7 \times H = 6,933.09 \text{ kN}$$

표 6. 탄성좌굴해석 결과

구분	좌굴모드 형상	좌굴계수
제 1 모드	면외 좌굴	2.15(2.0)
제 2 모드	면외 좌굴	4.53(2.0)
제 3 모드	면내 좌굴	4.78(1.7)

()은 소요 좌굴안전율을 나타냄

(3) 좌굴해석에 의한 검토

아치에 작용할 수 있는 최대하중인 케이블 최대 긴장력과 아치 및 케이블의 자중이 작용하는 경우를 고려하여 탄성 좌굴해석을 수행하였으며 임계좌굴하중계수가 좌굴안전율을 상회하여 면내 및 면외 좌굴에 대해 충분한 안전성을 확보하였다.

5.3.2 아치리브 응력검토

아치리브는 축방향력과 휨모멘트를 동시에 받는 부재로 전체 좌굴 및 국부좌굴의 영향을 고려하여 아래식에 따라 응력검토를 수행하였다(표 7, 8).

(1) 전체좌굴 검토식

$$\frac{f_c}{f_{crz}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bcr}(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}})} + \frac{f_{bcz}}{f_{bc0}(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}})} \leq 1$$

(2) 국부좌굴 검토식

$$f_c + \frac{f_{bcy}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}})} + \frac{f_{bcz}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}})} \leq f_{ca}$$

5.4 행어케이블 검토

설계기준의 하중조합에 따라 허용응력 활용계수를 고려한 상시, 교체 및 파단시 케이블의 장력 검토와 피로검토를 수행하여 안전성을 확인하였다(그림 23, 24).

5.5 응력집중부 상세해석

5.5.1 아치리브 앵커프레임

축력 및 모멘트가 최대 발생하는 하중조합으로 아치리브의 기초, 앵커프레임, 아치연결부의 주응력, 지압응력을 3차원 FEM모델로 검토하였다(그림 25, 26).

표 7. 아치리브 응력검토

부재	검토 결과		
	안전(≤1.0)	응력(≤f _{cal})	판정
중앙 단부	0.910	154.5	O.K
아치 크라운부	0.756	126.6	O.K

표 8. 앵커프레임 작용하중

구분	P	Vy	Vz	Mx	My	Mz
축력최대	-13.82	192	0	85	0	0
모멘트최대	-13.54	186	0	95	0	0

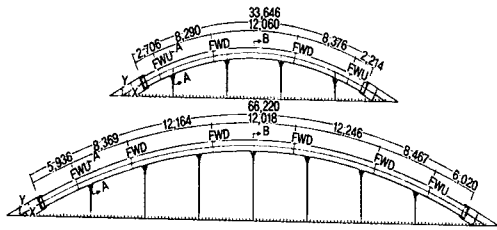
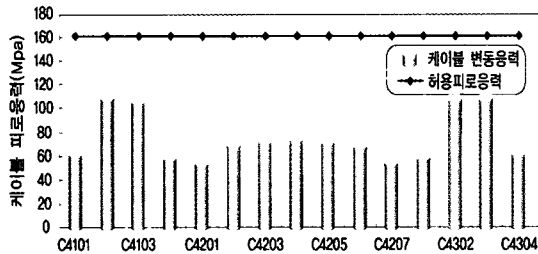
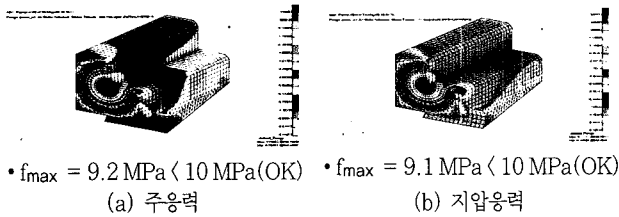


그림 23. 케이블 배치현황



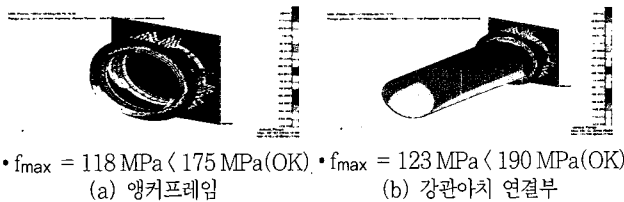
- 공용중 최대장력 : $T = 1,908 < 2,227 \text{ kN(OK)}$
- 변동응력 피로검토 : $\Delta f = 108 < 161 \text{ MPa(OK)}$

그림 24. 케이블 장력검토



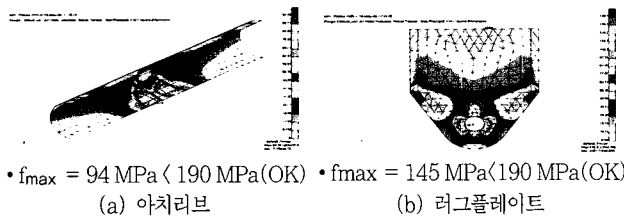
- $f_{max} = 9.2 \text{ MPa} < 10 \text{ MPa(OK)}$ (a) 주응력
- $f_{max} = 9.1 \text{ MPa} < 10 \text{ MPa(OK)}$ (b) 지압응력

그림 25. 콘크리트 기초부 주응력 및 지압응력



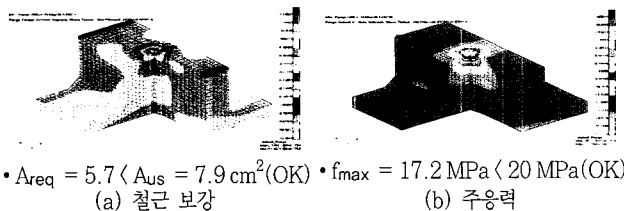
- $f_{max} = 118 \text{ MPa} < 175 \text{ MPa(OK)}$ (a) 앵커프레임
- $f_{max} = 123 \text{ MPa} < 190 \text{ MPa(OK)}$ (b) 강관아치 연결부

그림 26. 앵커프레임 및 강관아치 연결부 주응력



- $f_{max} = 94 \text{ MPa} < 190 \text{ MPa(OK)}$ (a) 아치리브
- $f_{max} = 145 \text{ MPa} < 190 \text{ MPa(OK)}$ (b) 리그플레이트

그림 27. 아치리브 및 리그플레이트 주응력



- $A_{req} = 5.7 < A_{us} = 7.9 \text{ cm}^2 \text{(OK)}$ (a) 철근 보강
- $f_{max} = 17.2 \text{ MPa} < 20 \text{ MPa(OK)}$ (b) 주응력

그림 28. PSC박스 케이블 정착부

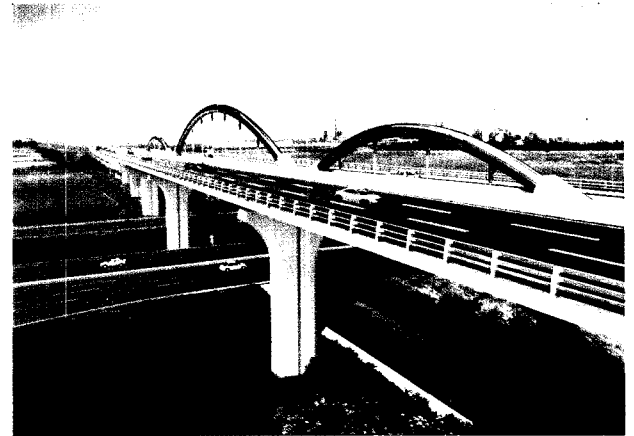


그림 29. 아치보강 PSC박스거더교 조감도

5.5.2 행어케이블 정착부

행어케이블이 정착되는 강관아치부와 핀정착구의 리그플레이트, PSC박스의 케이블 정착부에 대해 주응력을 검토하고 콘크리트 인장부에 대한 소요 철근량을 결정하였다(그림 27, 28).

6. 맺음말

기흥1교의 아치보강 PSC박스거더교는 신개념의 복합교량으로 아치리브의 하중분담과 FSM 시공 순서의 개선을 통해 3.5 m의 등형고와 주경간장 80 m확보가 가능한 효율적인 교량형식이다(그림 29). 이는 장경간 PSC박스거더교 적용을 위해 케이블의 대면심을 이용한 엑스트라도드교 외에도 아치보강 형식 적용의 발판을 마련한 것으로 교량형식의 다양화에 큰 기여를 할 것으로 판단된다. 본 설계사례를 바탕으로 추후 장경간화가 가능한 아치보강 PSC박스거더교의 설계 및 시공방법에 대한 논의가 계속되기를 기대한다. □

참고문헌

1. 영덕~오산간 광역도로 건설 사업(지방도 311 호선)3공구 실시설계보고서, 한국토지공사, 2006. 09, pp. 81 ~ 293.
2. 영덕~오산간 광역도로 건설 사업(지방도 311 호선) 3공구 구조계산서(II), 한국토지공사, 2006. 09, pp. 431 ~ 658.
3. 강·콘크리트 복합 구조 이론과 설계(I), 일본토목학회, pp. 226 ~ 229.