

평동산단 진입도로 개설공사(1공구) 대안입찰 (Unbraced Tube 아치교의 설계)

김만철*, 최명수**, 김우중***

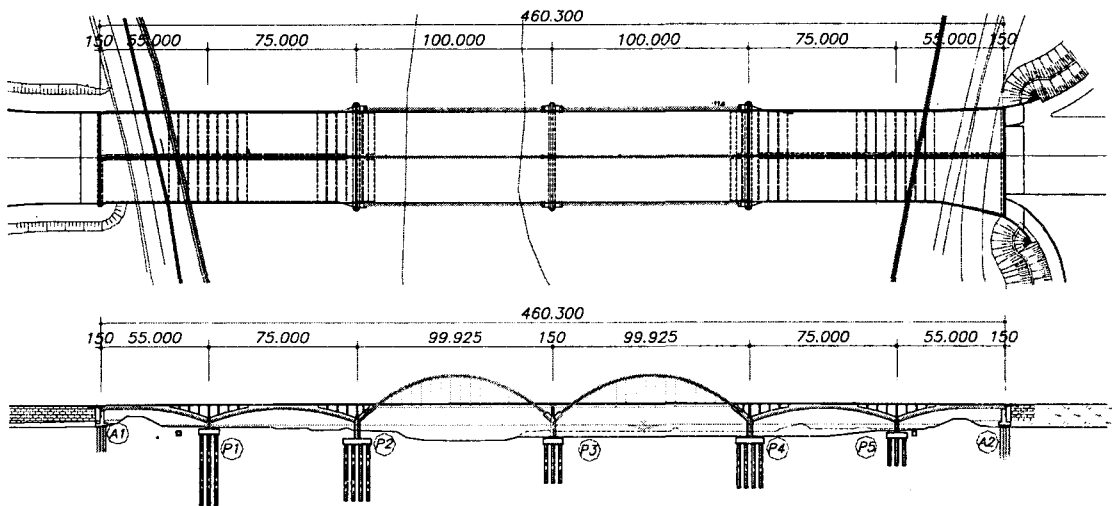
ABSTRACT

This bridge was planned to be located in Geuk-rak river at south of Kwangju city. And it is very important to emphasize the beauty of bridge appearance. So we adopted unbraced tube arch type those linear beauty is elegance and simple. Actually, foreign bridges similar to this won various prizes for excellence of design. But there is no similar precedent in domestic highway bridge. therefore we intended to certify the security of this bridge through computational analysis.

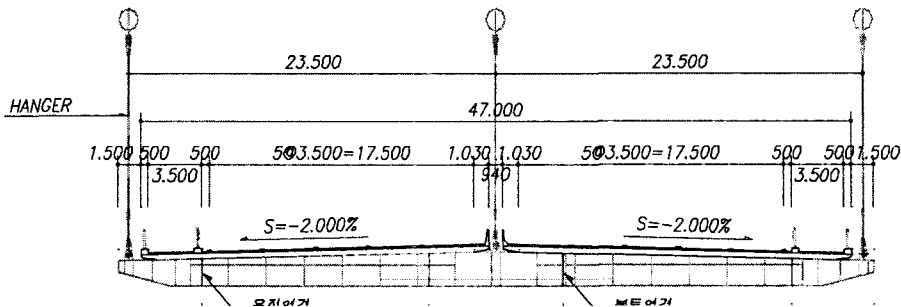
In this paper, approximate introduction of this bridge, design procedure and principal examination item is mentioned.

1. 개요

1.1 교량일반도



<중평면도>

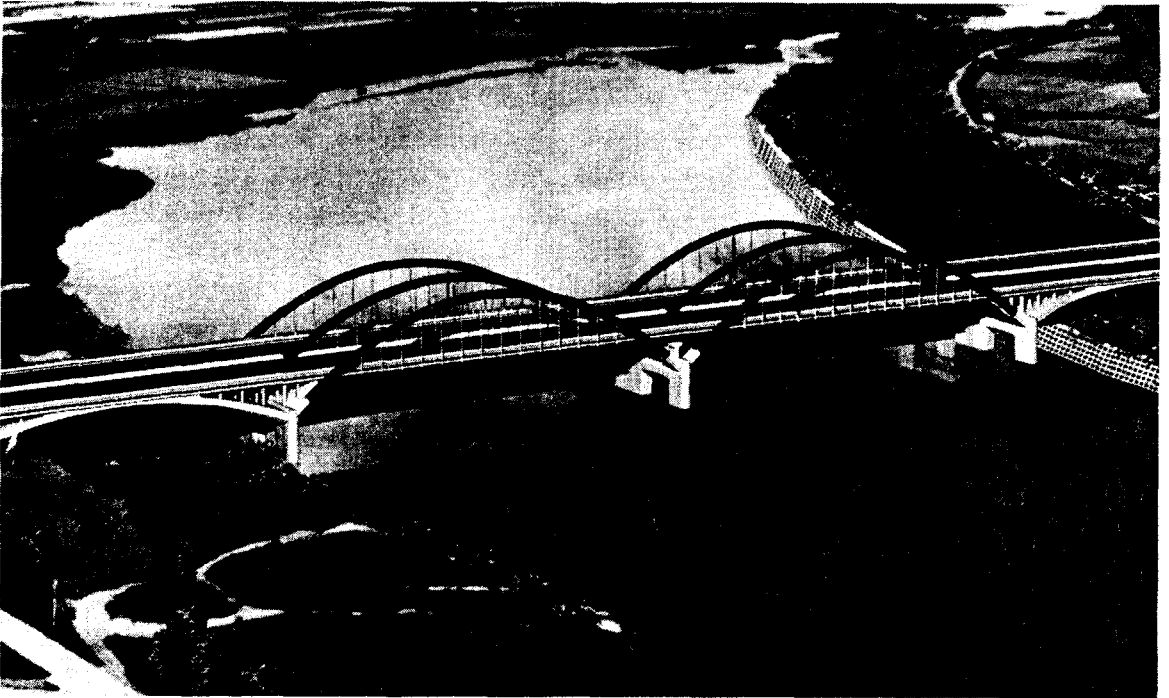


<단면도>

* (주)대우건설 토목사업본부 이사부장
** (주)대우건설 토목사업본부 과장
*** (주)DM엔지니어링 대표이사

1.2 교량전경

본 교량이 실제 가설되었을 경우, 주변현황과의 조화 등 경관상 요구조건을 만족시키는지 여부를 검토하기 위하여 아래 그림에서와 같이 3차원 시뮬레이션으로 조감도 및 주행자 시점의 이미지 등을 구현하였다.



< 조감도 >



<주행자시점>

1.3 주요설계조건

- ▷ 형식 : Unbraced tube arch
- ▷ 교량등급 : 1등급 (설계속도 80km/hr)
- ▷ 지간구성 : 55+75+100+100+75+55 = 460m
- ▷ 폭원구성 : 왕복10차로, B=47m
- ▷ 평면선형 : 직선

1.4 설계개념

Unbraced tube arch교는 횡방향으로 3개의 아치리브로 이루어져 있으며 아치리브는 보강형(세로보)과 타이되어있지 않고 직접 교각에 연결된 형태이다. 세로보는 6개로 이루어져 있으며, 크로스빔은 5m간격으로 배치되며, Cross beam 양 끝단과 중앙에 행어가 걸려있어 아치리브에 하중을 전달한다. 프리스트레스 콘크리트 바닥판은 30cm의 두께를 가지며 교축방향을 지간으로 하며 그 지간길이는 크로스빔간격인 5m이다. Tube의 제원은 외측리브가 $\phi=1.5m$, $t=30mm$ 이며, 내측리브는 $\phi=1.5m$, $t=40mm$ (일반부), 48mm(지정부)이다. 횡방향으로 3개의 아치리브 중 내측 아치리브 하중분담이 크기 때문에 시공단계에서 내측아치의 cable을 Release하여 내측아치에 작용하는 하중을 외측아치에 분배하여 내측아치와 외측아치가 비슷한 하중을 받도록 하였다.

1.5 주요 검토 내용

단면 계획시	상세 설계시
<ul style="list-style-type: none"> • 라이즈비 검토 • 주구 및 브레이싱 형식 검토 • 하중분배를 위한 케이블 장력조정 검토 • 바닥판 및 바닥틀 형식 검토 • 기초심도에 따른 아치영향 검토 	<ul style="list-style-type: none"> • Unbraced 구조의 안정성 검토 (Buckling Mode 해석, P-Δ 해석) • 하중집중부 유한요소해석을 통한 안정성 검토 (정착구, 앵커블럭) • Unbraced Tube 구조의 내풍안정성 검토

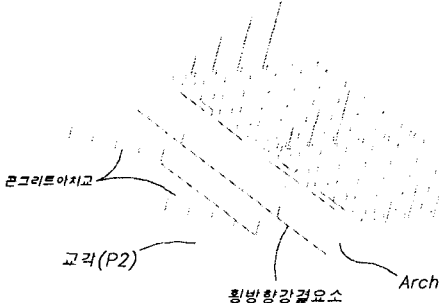
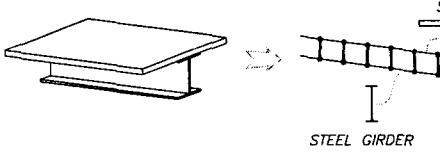
1.6 검토 항목별 적용프로그램

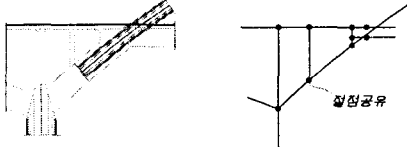
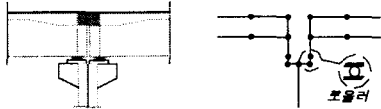
프로그램명	용도	적용분야
3DS	3차원 교량 전용해석 프로그램	시공단계별 및 전체계 구조해석
SAP2000	범용구조해석 프로그램	유한요소해석, 시간이력해석
LUSAS	범용구조해석 프로그램	유한요소해석, Buckling 해석
DIANA	범용구조해석 프로그램	교각 및 격벽 콘크리트 등의 수화열 해석

2. 전체계 해석

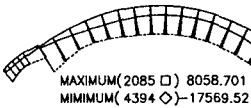
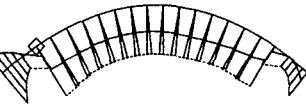

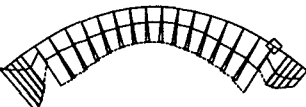
2.1 구조물 모델링

본 교량은 Unbraced Steel Tube Arch교와 콘크리트 아치교가 연속된 형태로서 콘크리트 아치교 부분은 행선별로 Frame요소로 모델링하였고, 아치리브 및 가로보, 세로보 등 여러개의 부재로 이루어진 Unbraced Steel Tube Arch교 부분은 각 부재를 Frame요소로 모델링하였다.

콘크리트 아치교와 Steel tube아치교 연결부	강거더와 콘크리트 슬래브의 합성
 <p>콘크리트 아치교 부분과 Unbraced Steel Tube Arch교는 교각(P2,P4)을 통하여 연결되는 형태로 이부분은 강결요소(Rigid Element)를 이용하여 횡방향으로 연결하였다.</p>	 <p>강거더와 콘크리트슬래브의 합성작용은 각각의 부재를 별도로 Frame요소로 이상화하고 두 요소를 Rigid요소를 이용하여 강결하여 구현하였다.</p>

Steel tube와 콘크리트 아치교 연결부	교각-3 상단 교량받침
 <p>Steel Tube와 콘크리트아치교의 연결부는 절점을 공유하여 강결로 연결하였다.</p>	 <p>교각-3와 Stringer사이에 설치된 교량받침은 Connect요소를 이용하여 연결하고 교량받침의 가동조건에 따라 자유도를 조절하였다.</p>

2.2 해석결과

	외측	내측	
상연 응력			최대 805.8kgf/cm ² < 2100kgf/cm ² O.K 최소 -1757.0kgf/cm ² < 1848.5kgf/cm ² O.K
하연 응력			최대 335.5kgf/cm ² < 2100kgf/cm ² O.K 최소 -1781.9kgf/cm ² < 1848.5kgf/cm ² O.K

3. Hanger 장력조절을 통한 단면 최적화

3.1 개요

본 교량의 보강형(세로보)는 한쪽 단부는 콘크리트 아치측에 강결되어있고 다른 한쪽은 교각-3상단에 교량받침을 통하여 지지되어 있는 형태이기 때문에 하중재하시 비대칭의 하중을 받게된다. 그러나 일반적으로 하부구조 위에 설치된 거더교와는 달리 케이블에 의해서 지지된 세로보는 케이블의 긴장력을 조절함으로써 구조물에 작용하는 고정하중을 재분배 할 수 있다.

본교량에서 사용한 행어의 정착구는 긴장력 조절이 가능한 Adjustable Fork Terminal형태로서 시공중 또는 완공후에 긴장력의 도입과 Release가 가능하므로 시공단계에서 발생한 불균형 하중을 케이블 장력 조절을 통하여 적절하게 분배하여 아치리브와 보강형 그리고 행거에 적절한 부재력이 발생하도록 조정하였다. 또한 본교량의 아치리브는 횡방향으로 3개로 이루어져 있어 내측아치리브가 상대적으로 많은 하중을 분담하게 된다. 따라서 내측아치리브가 분담하는 하중을 외측아치리브쪽으로 분배시켜

내측아치와 외측아치가 구조적으로 균형을 이루도록 하였다.

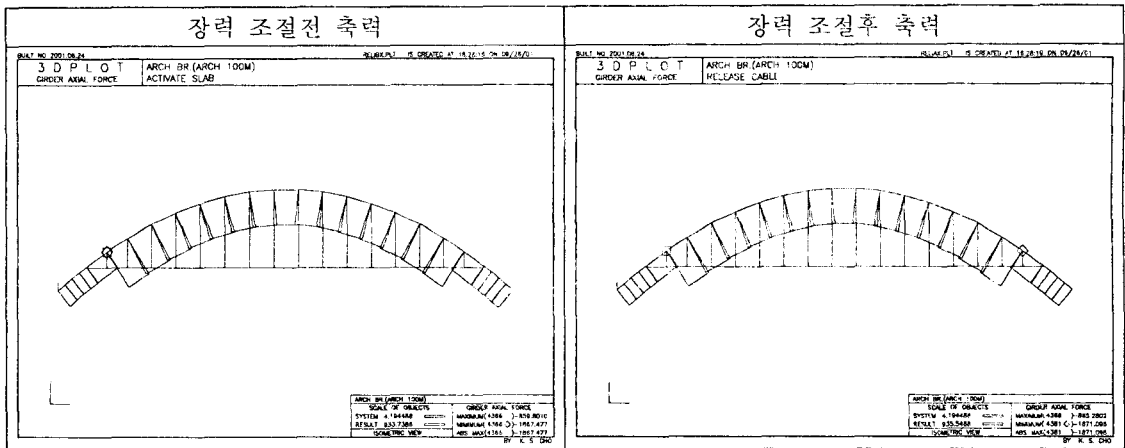
행거별 긴장/Release 기준은 완공시 아치리브와 세로보의 모멘트 분포를 최대한 균일하게 유도하는 방향으로 하였다. 따라서 아치리브에 정모멘트가 많이 발생한 부분은 부모멘트를 도입하기 위해서 Release하였고, 반대로 부모멘트가 많이 작용하는 부분은 긴장력을 추가 도입하여 정모멘트를 추가하였다.

3.2 Hanger 장력조절을 통한 하중분배

3.2.1 Hanger 별 조정전/조정후/완공시 장력

구분	Cable #	조정전	조정후	완공시	구분	Cable #	조정전	조정후	완공시
외측 거더	66	34.0	49.0	61.8	내측 거더	366	133.4	151.4	182.4
	68	42.6	42.6	54.3		368	133.7	133.7	162.4
	70	44.7	44.7	57.5		370	135.2	135.2	165.7
	72	44.7	44.7	57.6		372	134.6	134.6	165.1
	74	44.7	44.7	57.5		374	134.5	134.5	164.8
	76	44.3	44.3	56.9		376	134.1	134.1	163.9
	78	42.5	44.5	56.3		378	126.8	139.8	166.3
	80	42.5	42.5	56.8		380	107.2	127.2	151.9

3.2.2 장력 조절에 따른 아치의 축력 전산해석결과

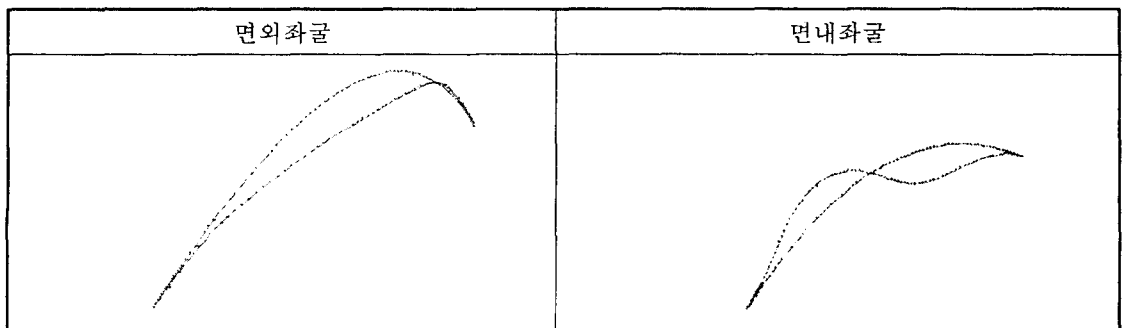


4. 아치리브의 설계

4.1 아치리브의 좌굴 검토

본 교량은 횡방향 브레이싱이 없는 아치구간을 가지고 있으므로 아치리브에 대해 면내·외 좌굴 검토를 실시하도록 한다. 이는 해석프로그램인 LUSAS를 이용하여 수행하였고 작용하중에 대한 좌굴 계수 및 해당 좌굴 모드 산정, 안정여부를 검토하였다.

4.1.1 좌굴 모드



4.1.2 시공단계 및 하중별 아치리브의 좌굴 검토

안전율 하중 경우	아치리브 단독		완성된 구조물	비고
	내부아치	외부아치		
강재거치시	7.555	13.296	-	
바닥판 가설시	-	-	9.183	
D	-	-	14.715	
D+L	-	-	13.682	
D+W	-	-	18.395	
D+L+0.5 × W	-	-	14.880	

4.2 아치리브의 응력 검토

아치리브는 축방향 압축응력과 휨모멘트에 의한 휨응력을 동시에 받는 부재로서 도로교설계기준에서 제시한 축방향허용압축응력을 산정하기 위해서 유효좌굴길이 l이 필요하나 아치리브의 경우 케이틀 및 보강형 등 전체 구조계의 제원에 따라서 좌굴의 양상이 달라지므로, 이를 고려하여 유효좌굴길이 l을 산정하여야 한다.

4.2.1 유효좌굴길이(l)

기둥에 전체좌굴이 발생하는 하중 P_{cr} 은 아래와 같이 유효좌굴길이 l에 대한 함수로 아래와 같이 표현된다.

$$P_{cr} = \pi^2 \frac{EI}{l^2}$$

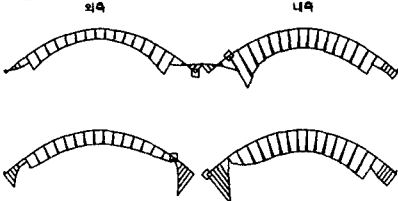



여기서 E 는 알 수 있는 값이고, P_{cr} 은 구속조건 등 구조계에 의해서 결정되는 값으로 본 과업에서는 해석프로그램 LUSAS의 좌굴모드해석을 통하여 산출하였다. 따라서 유효좌굴길이 l은 아래와 같은 식으로 구할 수 있다.

$$l = \sqrt{\frac{\pi^2 EI}{P_{cr}}}$$

4.2.2 Buckling해석에 의한 P_{cr} 및 유효좌굴장

위치	시공단계	면외				면내			
		안전율	P	P_{cr}	유효좌굴장(l)	안전율	P	P_{cr}	유효좌굴장(l)
내측	아치리브 단독	7.555	631.6	7772.5	46.093	18.671	631.7	11794.3	29.320
	사용시	14.715	2557.5	37633.6	16.414	43.253	2557.5	110619.5	9.754
외측	아치리브 단독	13.296	289.5	3849.3	51.323	32.451	289.5	9394.4	32.858
	사용시	20.735	1084.0	22475.8	21.240	26.052	1084.0	28238.5	18.949

4.2.3 좌굴을 고려한 아치리브의 응력 검토

구분	응력도		구분	발생응력		좌굴고려허용응력	판정
아치리브 가설시		외측 / 내측	내측	최대	159.9	962.3	O.K
				최소	-495.6	962.3	O.K
		외측 / 내측	외측부	최대	166.9	932.8	O.K
				최소	-322.1	932.8	O.K
활하중재하시		외측 / 내측	내측	최대	-362.6	1833.6	O.K
				최소	-1781.9	1833.6	O.K
		외측 / 내측	외측부	최대	833.6	1684.9	O.K
				최소	-1304.0	1684.9	O.K

5. 피로응력 검토

반복하중의 영향에 의한 피로영향을 설계단계에서 검토하여 반영함으로써, 피로손상 예상부위의 내구성 확보 및 유지관리의 최소화를 도모하였다.

5.1 피로검토기준

• 하중재하 기준

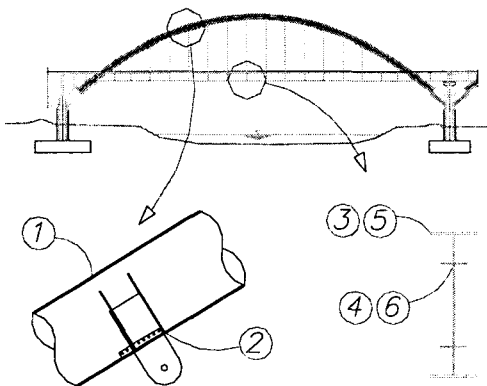
설계시에 적용된 최대응력범위의 반복횟수 및 허용응력 범위는 다음과 같다.

종방향 주부재 : 차선하중 50만회,

횡방향 가로부재 : 트럭하중 200만회

다재하 경로구조물				
응력범주	허용응력범위, $\sigma_{sr}(\text{kg}/\text{mm}^2)$			
	10만회	50만회	2백만회	2백만회 이상
A	44.2	26.0	16.8	16.8
B	34.4	20.3	12.6	11.2
B'	27.4	16.1	10.1	8.4
C	25.0	14.7	9.1	7.0
D	19.6	11.2	7.0	4.9
E	15.4	9.1	5.6	3.1

• 각부재별 피로검토



-아치리브

• 아치리브 부재 : 범주 B → ①

• 아치리브 거셋플레이트연결부 : 범주 C → ②

-가로보 (세로보)

• 플랜지와 복부판의 필렛 용접부 : 범주 B → ③(⑤)

• 스티드 용접부 : 범주 C → ③(⑤)

• 수직보강재 선단(인장부) : 범주 C → ③(⑤)

• 수평 보강재 : 범주 E → ④(⑥)

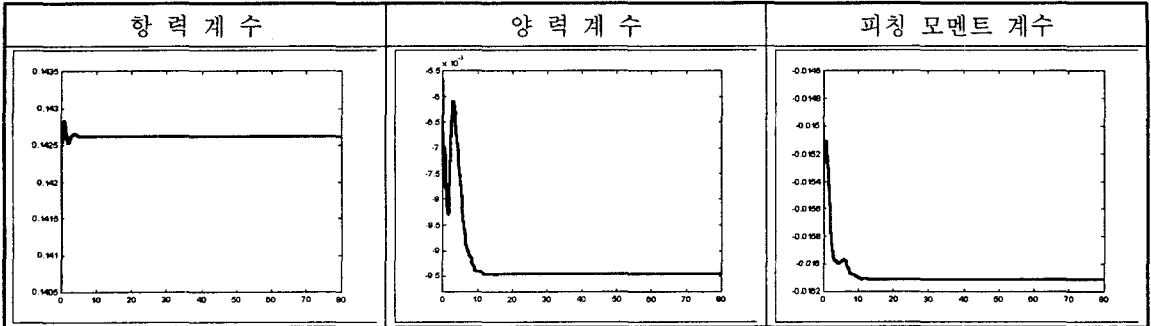
5.2 피로검토결과

검토 위치	DB24				DL24				검토 위치
	최소	최대	변동	허용	최소	최대	변동	허용	
①	-200.2	108.7	308.9	1260	-111.1	60.0	171.1	2030	O.K
②	-200.2	108.7	308.9	910	-111.1	60.0	171.1	1470	O.K
⑤	-513.7	396.0	909.7	910	-563.2	291.5	854.7	1470	O.K
⑥	-426.7	308.1	670.8	910	-200.0	438.9	638.9	2030	O.K
③	214.9	783.9	569.0	700	-	-	-	-	O.K
④	129.0	470.3	341.3	560	-	-	-	-	O.K

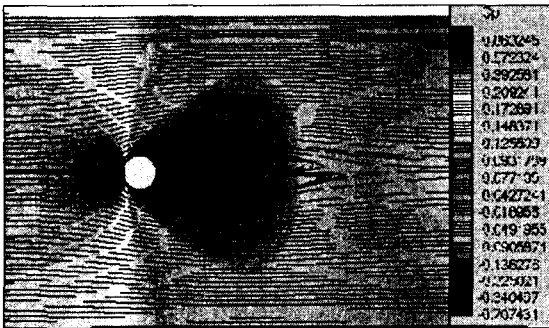
6. 내풍안정성 검토

6.1 CFD 해석

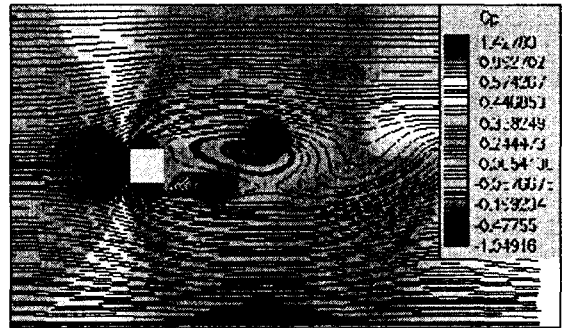
Unbraced Tube 아치교의 내풍 안정성을 검증하기 위하여 전산유동해석(Computational Fluid Dynamics)을 수행하였다. 이때 바람에 대한 유동장 해석은 Galerkin 해석기법의 발산진동현상을 억제 한 SUPG(Stream Line Pator-Galerkin) 기법 적용하였으며, 유동장해석은 시간이 지남에 따라 와류진 동현상을 발생하므로 비정상 해석 수행하였다.



<비정상 해석 결과에 의한 계수의 시간이력 곡선>



<Tube 단면의 유선분포>



<Box 단면의 유선분포>

공기력은 진동없이 안정화된 결과를 나타내고 있으며, 유동장의 변화가 적어 공기역학적 불안정 현상을 발생치 않는다. 항력계수의 평균치는 0.14로써 도로교설계기준에 제시된(1.6:사각형단면, 0.8: 원형단면)값보다 적어 도로교설계기준의 안전측 임이 확인할 수 있다. 따라서 아치리브는 Tube 단면 이 보다 안정적인 형태를 알 수 있다.

6.2 행거의 진동검토

6.2.1개요

일반적으로 원형구조물에 발생할 수 있는 진동으로는 와류진동(Vortex induced oscillation), 웨이크겔로핑(wake galloping), 풍우진동(rain-wind induced vibration)을 들 수 있다. 단독원형케이블의 경우, 우선 와류진동이 발생할 가능성이 있는데 이 진동은 발생풍속과 진폭이 한정적이므로 발생유무 보다는 진폭의 크기가 중요하다. 와류진동의 진폭은 케이블의 질량, 감쇠율에 의해 좌우되며 여기서 난류효과도 영향을 미친다. 사장교케이블과 같이 경사진 원형케이블에서는 풍우진동이 발생하는 경우는 흔치 않다. 풍우진동의 발생조건은 10m/s정도의 풍속, 적절한 강우량, 특정된 경사각과 풍향, 케이블의 고유진동수는 1Hz~3Hz, 폴리에틸렌피복케이블, 해안가와 같은 난류강도, 케이블의 감쇠율은 0.1%정도 등 상당히 제한적이다. 본교량의 케이블은 모두 연직으로 처리되기 때문에 풍우진동은 발생 하지 않을 것으로 판단된다. 그러나 병렬케이블 등과 같이 원형케이블이 서로 인접한 경우, 웨이크 겔 로핑이 발생하는 경우가 있으므로 이에 대해 검토하였다. 또한 와류진동을 일으키는 풍속과 진동발생 기 진폭에 대해서 검토하였다.

6.2.2 행거의 galloping 발생 검토

$$\text{galloping 발생 풍속 } U_{\text{crit}} = cND \cdot \sqrt{\frac{m\xi}{\rho D^2}}$$

$U_{\text{crit}} < V_d \rightarrow$ galloping 발생

$U_{\text{crit}} > V_d \rightarrow$ galloping 발생하지 않음

여기서, c : 상수 = 40

N : 케이블의 기본진동수(Hz)

$$N = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{m}}$$

여기서, L : 케이블길이(m)

m : 케이블의 단위길이당 질량

T : 케이블의 장력(tonf)

ξ : 구조감쇠계수 = 0.2%

ρ : 공기밀도 0.125 kg s²/m⁴

D : 케이블의 직경

구 분	행어①	행어②	행어③	행어④	행어⑤	행어⑥	행어⑦	행어⑧
외측행어	238.0	174.5	96.9	72.4	60.1	53.2	49.4	47.7
내측행어	405.1	305.4	167.2	123.1	101.6	89.7	83.2	80.2

<각 케이블별 U_{crit} 검토결과>

본교량의 위의 표에서와 같이 모든 케이블에 대해 wake galloping 발생가능 풍속이 설계풍속을 초과하고 있기 때문에 wake galloping은 발생하지 않는다.

7. 결론

Unbraced Tube 아치교는 횡방향 부재를 생략한 형식으로 아치리브의 좌굴 등에 대해서 불리한 구조임에도 불구하고 마관의 우수함으로 인해 최근 세계적으로 시공사례가 증가하는 추세에 있다. 국내의 경우 일부 보도교에서는 적용예가 있으나, 도로교에 적용한 실적이 없는 점을 감안하면 구조적 안전성을 충분히 확보하는 것이 필요하다고 하겠다. 본 설계사례에서는 가설단계별 및 완성계에서 발생할 수 있는 제반 사항에 대해 안전율에 여유를 두었다. 그러나 향후 국내 가설사례 및 심도있는 연구 등을 통해 보다 경제적이고 합리적인 설계가 가능하리라 판단된다.