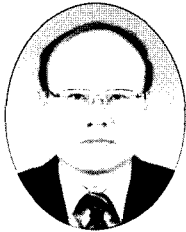


운암대교의 계획과 설계

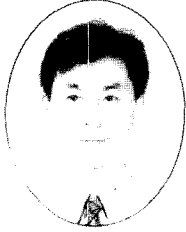
- Planning and Design of Woonam Grand Bridge -



홍현석*
Hong, Hyun Suck



김경호**
Kim, Kyeong Ho



홍규선***
Hong, Kyu Seon



최인덕***
Choi, In Deok



김재혁****
Kim, Jae Hyuk

1. 머리말

운암대교는 전라북도 임실군 운암면 운종리에서 완주군 구이면 백여리를 연결하는 순창 ~ 운암간 도로확장공사 4공구 구간 중, 옥정호수를 통과하는 연장 910m의 왕복 4차 선로의 신설 교량으로서 대안 설계 입찰을 통하여 주경간 130m의 6경간 Extradosed교와 PSC 박스거더교의 접속교로 설계되었다(그림 1).

교량통과 구간인 옥정호는 상수원 보호 구역이며 섬진강 상류에 위치해 있어 섬진강댐의 영향을 받아 연중 수위변화폭이 최고 23m에 이르는 입지조건을 갖고 있다. 또한, 인접한 지역에 기존의 국도 27호선이 통과하는 운암교(PSC 박스거더교, FCM 공법, 중앙경간장 160m)가 위치해 있다. 운암대교는 이러한 주변여건을 감안하여 환경적으로나 경관적으로 우수하면서도 내구성, 구조적 안전성이 뛰어나도록 하는데 주요점을 두었으며 장지간의 아름다운 최적의 교량이 될 수 있도록 하였다.

본고를 통하여 옥정호의 유심부 구간에

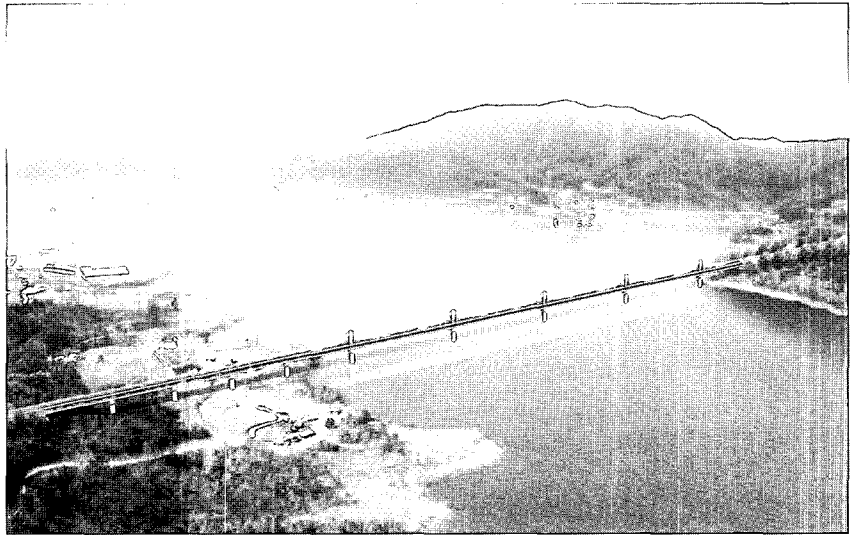


그림 1. 운암대교 전경

해당하는 운암대교의 Extradosed교를 중심으로 교량계획과 설계 사항에 대해서 간략히 소개하기로 하였다.

2. 교량개요

운암대교의 일반도는 <그림 2>와 같으며 일반적인 교량제원은 다음과 같다.

- 교량형식 :
- 6경간 연속Extradosed교(주경간교)
- PSC 박스거더교(접속교)

- 교량연장 : $L=910.0m$
- 시간분할
- 접속교 : $4@60=240m$
- 주경간교 : $75+4@130+75=670m$
- 교량폭원
- 접속교 : 21.2 ~ 23.0 m
- 주경간교 : 23.0 m
- 설계속도 : 80 km/h
- 종단경사 : -2.0 %
- 횡단경사 : -3.0 % ~ 2.0 %
- 설계활하중 : DB24, DL24
- 기초형식 : 직접기초, 우물통기초

* (주)청석엔지니어링 이사

** 정회원, (주)청석엔지니어링 이사

*** 정회원, (주)청석엔지니어링 상무

**** 정회원, (주)청석엔지니어링 부사장

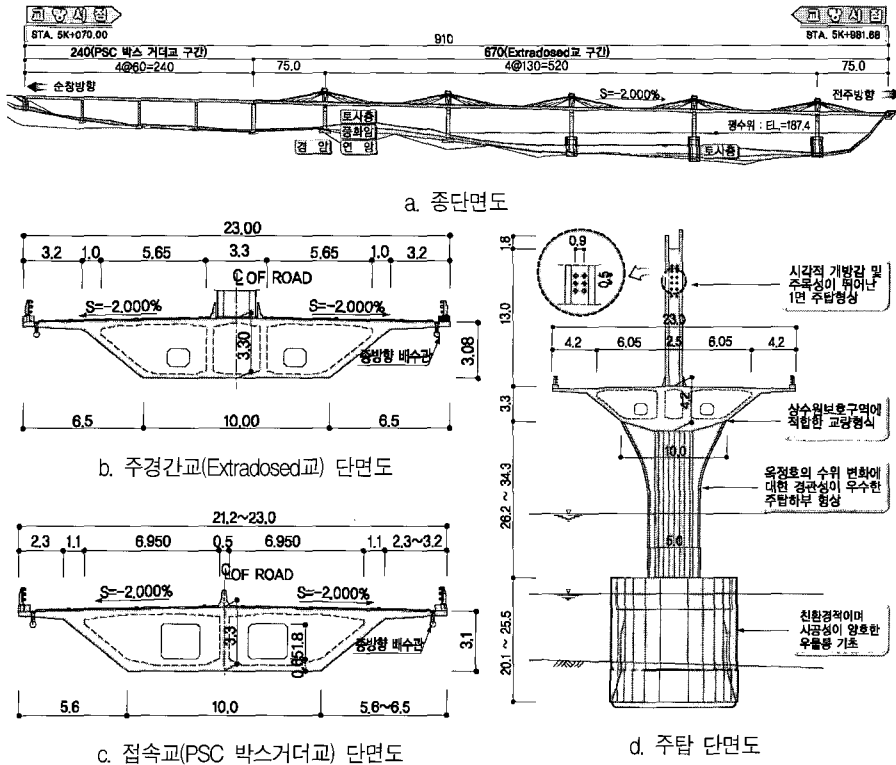


그림 2 운암대교 일반도

3. 교량계획

3.1 현지여건 분석

교량가설지역은 수려한 호수의 자연경관 속에 자리한 아름다운 전원 풍경지역으로서, 자연휴양림이 인근에 위치하여 관광 수요가 비교적 많은 지역이며 특히, 옥정호는 상수원 보호구역으로 맑고 깨끗한 수질을 자랑하고 있어 주변의 주 식수원으로 이용되고 있다. 한편, 섬진강의 상류 지역에 위치하다보니 갈수기를 기준으로 연중 수위변화(최고 23 m) 매우 심한 지역이

서 기초형식 및 가설공법 선정에 있어 수위변화에 따른 여러 제반여건을 우선적으로 고려하였다. 경관적으로는 교량형상이 수위변화에 대해 너무 민감하지 않도록 계획하였고 홍수위시의 여유고를 최대한 확보하기 위하여 교량 형고를 작게 하기 위한 노력이 필요하였다. 또한, 교량가설 지역이 내륙에 위치하여 수상 대형장비의 진입이 불가능하고 장비의 대부분은 현장에서 조립해서 사용해야 할 형편이었다.

교량가설 지역의 지반 상태는 부분적으로 단층파쇄대가 존재하고 유심부 구간에 지지층이 10 m 이상인 일부구간을 제외

하면 대체적으로 양호한 편이라 할 수 있다. 따라서 교량의 지간분할시 단층파쇄대가 존재하는 지역을 피하여 지반조건이 양호한 위치에 기초가 놓일 수 있도록 하여야 하고 유심부 구간의 기초는 가설시와 공용시의 구조적 안정성을 최대한 확보할 수 있도록 계획하였다.

3.2 교량형식 선정

운암대교의 원설계안은 120 m 지간장의 6경간 변단면 PSC 박스거더교량(FCM 공법)으로 상하행선 분리로 설계되었으며, 주두부의 형고가 7 m로 홍수위시 형하 여유고가 거의 없는 편이었다. 대안 입찰설계에서는 시공성 및 경제성을 고려하여 상하행선 일체교량으로 계획하였고 최대한 형고를 작게 하도록 하였으며 여러 차례의 비교 검토를 통해 최종적인 교량형식을 선정하였다.

기본적으로 상수원보호구역의 가설조건에서 강교보다는 콘크리트교에 중점을 두어 비교안을 결정하였고 원안대비 장경간의 교량형식을 선정하기 위하여 사장교안과 Extradosed교 안을 비교 검토하였다(그림 3).

사장교안은 교량자체만으로는 조형미가 우수한 것으로 평가될 수 있겠으나 옥정호의 잔잔한 호수와 주변 여건에 비해 주탑이 너무 높아서 주변지역을 과도하게 압도할 수 있다고 판단되었으며 이 지역이 랜드마크적인 교량을 세우기에 적합한 지역이 아니라는 점에서 경관적으로 부담스러운 안이었다. 한편, 다경간의 Extradosed교는 높지 않은 주탑과 부담스럽지 않은 경간장 등에서 사장교안보다는 주변지역과 비교적 잘 조화된다고 판단되었으며 옥정호 통과에 따른 시공성, 교량자체의 조형미, 유지관리 편의성 및 경제성 등에서 전체적으로 우수하여 최종적으로 Extradosed교 안을 선정하게 되었다.

Extradosed교의 경간장 결정에 있어서는 입찰안내서상에 주경간부를 최소한 480 m 이상 확보하도록 하는 제한규정 때

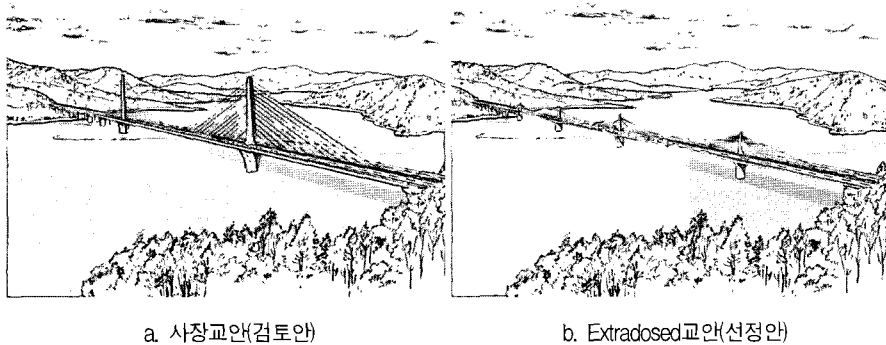


그림 3 교량형식 비교안()

교량형식	특징	선정
<p>a. 6경간 Extradosed교(1면 주탑)</p>	<ul style="list-style-type: none"> · 단층파쇄를 피하는 지간분할 · 자중감소로 F/T 운용이 양호 · 등단면 계획, 1면 케이블 배치로 개방감 우수 	◎
<p>b. 5경간 Extradosed교(2면 주탑)</p>	<ul style="list-style-type: none"> · 기초위치가 단층파쇄대에 위치 · 무리한 경간장 계획으로 인한 시공성 및 교량받침 선정 난이 · 변단면 설계로 홍수위시 다리밑 공간 여유고 부족 	
<p>c. 3경간 PSC 박스거더 사장교</p>	<ul style="list-style-type: none"> · 시공중 장력관리 및 캠버관리 난이 · 옥정호 경관에 비해 과도한 주탑이 주변에 압박감 유발 · 경제성 불리 	
<p>d. 5경간 PSC Edge Beam 사장교</p>	<ul style="list-style-type: none"> · 시공중 장력관리 및 캠버관리 난이 · 옥정호 경관에 비해 과도한 주탑이 주변에 압박감 유발 · 경제성 불리 	

그림 4. 교량형식 비교안(II)

교량단면	특징	선정
<p>a. 3-Cell 상자형</p>	<ul style="list-style-type: none"> · 콘크리트량 및 강연선 최소로 경제성 우수 · 거푸집 운용이 양호하고 정착부 시공성 우수 · 내측부부가 사재긴장력을 분담하고 정착부의 보강 용이 	◎
<p>b. 2-Cell 상자형</p>	<ul style="list-style-type: none"> · 횡방향 강연선 보강 증가 · 거푸집 운용은 양호하나 F/T 레일의 설치위치가 사재정착 불룩과 간섭 · 구조적 효율성 및 비틀림 강성이 타안에 비해 다소 불리 	
<p>c. 트러스방식의 3-Cell 상자형</p>	<ul style="list-style-type: none"> · 단면의 콘크리트량 과다로 경제성 불리 · 경사복부 설치로 F/T 및 내부 거푸집 운용이 불리 · 비틀림 강성이 우수하고 단면 처짐 최소 	

그림 5. 교량단면 비교안

문에 주경간부를 4@130m(520m)와 3@160m(480m)의 2개로 압축하여 검토하였다. 검토결과, 수위변화가 심한 옥정호의 통과조건과 단층파쇄대를 피하는 지간분할, 주변경관과의 조화, 시공성, 경

제성 및 조형미 등에서 130m 경간분할이 우수한 것으로 평가되었으며 결국에는 표준경간장 130m의 6경간 Extradosed교(1면 주탑)를 선정하였다(그림 4).

단면 형식 선정에 있어서는 3-cell과

2-cell, 내부 경사 트러스 복부판의 3-cell 상자형 등을 비교 검토하였으며 경제성, 시공성, 구조 안정성 등에서 대체로 양호하며 이동식 거푸집(F/T)운용에 있어 가장 안정적인 3-cell 형식을 선정하였다(그림 5).

접속교는 개방감과 주경간교와의 조화를 고려하여 60m의 경간장으로 계획하였고 단면 형식은 주경간교와 같은 단면 형상이 되도록 하였으며 유지관리와 경제성 등에서 우수한 강결구조를 채택하였다.

Extradosed교의 경관성과 조형미에 가장 큰 영향을 미치는 주탑형상은 주변경관과의 조화 및 다경간 Extradosed교의 특성상 간결하고 참신한 이미지를 살리기 위하여 1면 주탑형식을 선정하였다(그림 6).

기초형식은 상수원 보호구역인 옥정호 통과시의 시공성과 환경성 등을 고려하여 우물통 공법을 적용하였다. 단, 우물통 상단의 높이는 불필요한 시공이 되지 않도록 하기 위해서 평수위 1m 이상으로 계획하고 필요 시 가물막이를 추가 시공토록 하였다.

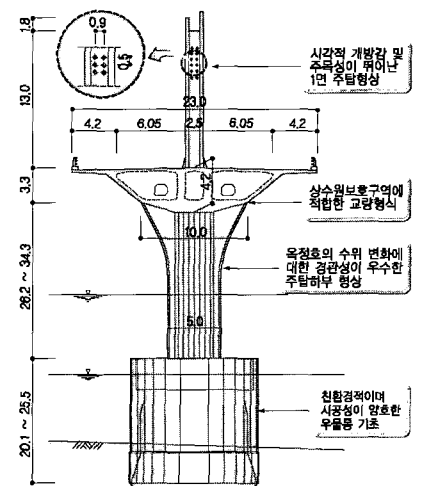


그림 6. 1면 주탑 Extradosed교

4. Extradosed교의 설계

4.1 구조계획

Extradosed교는 100 ~ 200m의 경간에 있어 매우 경쟁력 있는 교량형식으로 근래 들어 국내외적으로 많은 설계사례를 가지고 있으며 특히, 일본의 경우 시공된

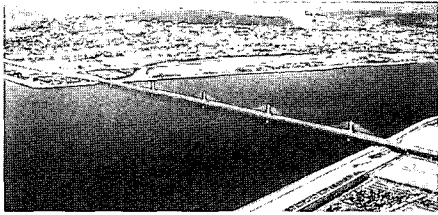


그림 7. 키소가와교

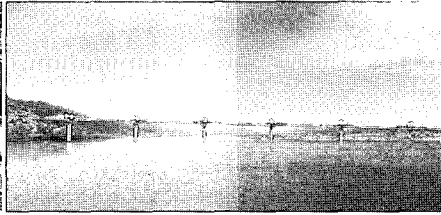


그림 8. 금가대교

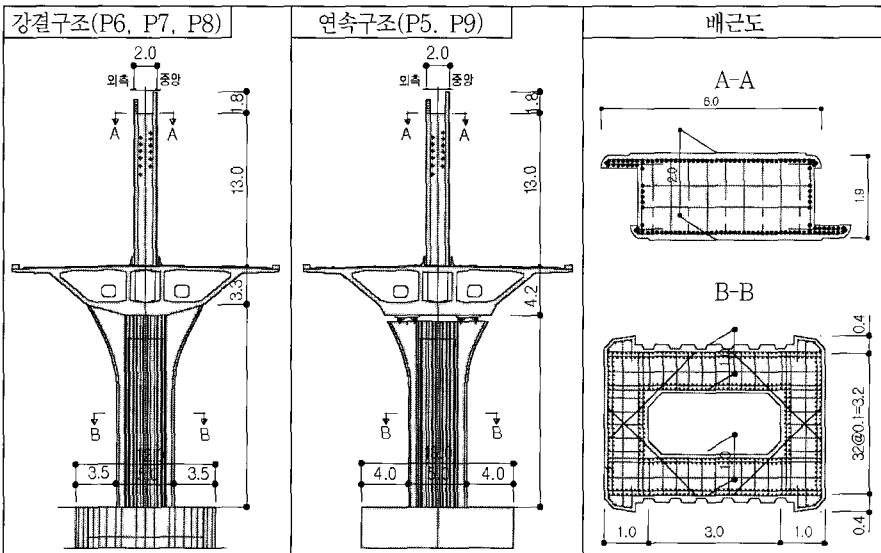
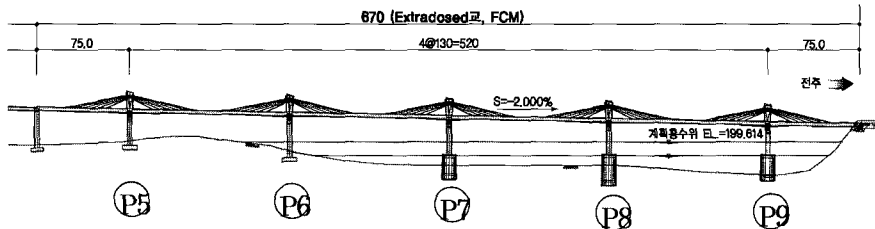


그림 9. Extradosed교의 구조계

교량이 상당히 많은 편이다. 대부분의 Extradosed교는 현장 타설 FCM 공법을 적용하고 있기 때문에(프리캐스트를 적용한 예도 있음) FCM 공법의 일반 PSC 박스거더교와 같은 공종을 가지고 있으며 동시에 외부 케이블에 의한 구조 거동에 대해서는 사장교와 유사한 특징을 갖고 있다. 한편, 다경간 Extradosed교는 일본의 키소가와교(그림 7)와 국내의 금가대교(그림 8, 시공중)에서 적용한 형식으로 연속되는 주탑으로 인해서 아름다운 외관을 형성하고 있다.

운암대교는 상수원 보호구역인 옥정호를 가로질러 가설되기 때문에 수질오염 최소화가 가능하고 경제성에서도 우수한 현장타설 FCM 공법으로 계획하였다. 본 절

에서는 FCM 공법과 관련된 구조계획 및 외부 케이블 설치와 관련된 구조계획에 대해서 설명하기로 하였다.

우선 현장타설 FCM공법과 관련해서는, 구조계의 경계조건 선정과 세그 분할, 내부강연선 배치 등의 결정이 필요하다. 일반적인 FCM 공법과 마찬가지로 가장 중요한 결정사항 중의 하나가 전체 구조계의 경계조건 문제라 할 수 있다. 운암대교는 연장이 130m의 장지간으로서 교각에 작용하는 반력이 매우 크기 때문에 교량받침수가 많아져서 교각 단면이 증가할 수밖에 없었다. 그러나 보다 날렵한 형상의 교량을 원하고 있었기 때문에 교각 단면이 너무 커지는 것에 대해서는 부정적이었다.

따라서 초기에 운암대교를 계획할 때는

최대한 교량받침을 줄일 수 있도록 모든 교각 및 주탑을 주형과 강결하는 방법을 우선적으로 검토하였다. 이러한 구조계는 가설시의 안정성, 유지관리면에서 교량받침 설치시에 비해 매우 우수하다고 할 수 있다. 그러나 기초형식을 우물통으로 선정함에 따라 직접기초에 비해 교각(주탑)의 전체 길이가 감소되었고 이는 온도응력을 과다하게 발생시키는 문제점을 유발하였다.

따라서 장지간과 온도응력이라는 두 가지의 상반된 과제를 충족시키기 위해서 최종적으로는 전체 5개 주탑중에서 중앙 3개소 주탑은 강결구조, 바깥쪽 주탑 2개소는 연속구조로 하는 복합 구조시스템을 선정하였다(그림 9). 이 시스템은 강결구조 3개소에 의해 지진력이 분산되어 결국 지진력이 온도하중에 의한 부정정력보다 작게 되어 굳이 면진받침을 사용할 필요가 없었으며 연속구조 교각에는 대용량(5,000톤)의 2개의 포트받침을 적용하는 것으로 계획하였다. 이 구조시스템은 특별한 장치없이 중앙 3개의 강결주탑에 의해 지진력을 골고루 분배하고 교각에 작용하는 온도하중의 영향도 전체시스템에서 충분히 수용할 수 있는 최적의 시스템이라 할 수 있다.

세그먼트 분할과 사재(외부 케이블)의 배치계획은 가설조건과 연계하여 결정하였다. 주두부는 이동식 거푸집(F/T)의 설치를 위하여 14m로 계획하였고 일반부의 세그먼트는 등간격으로 계획하여 되도록이면 현장에서의 작업성을 좋게 하도록 하였다. 일반부의 세그먼트는 F/T의 용량을 감안하여 3.5m 간격으로 하였고 사재 케이블은 두 개의 세그먼트 당 하나씩 설치하여 7m 간격으로 배치하였다(그림 10). 사재 케이블은 15.7mm, 37연선을 주탑을 중심으로 6단으로 배치하였고 주탑 횡방향으로는 2단을 배치하여 구조적 안정성을 확보하도록 하였다.

이동식 거푸집은 상향식 거푸집과 하향식 거푸집 방법을 검토하였으며 국내 기술경험이 많고 육안점검이 용이한 상향식 거푸집을 채택하였다. 철근을 선조립하여 인

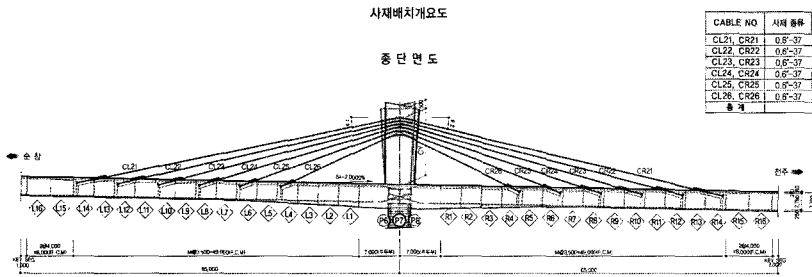


그림 10. 세그먼트 및 사재 배치 계획

개요도	특징	선정
<p>a. 상향식 거푸집</p>	<ul style="list-style-type: none"> 거푸집내에서 철근과 텐던을 조립, 설치하도록 고안된 방식 주요부재 및 구동장치 등이 상부에 위치하여 육안점검 용이 설계, 제작 및 운영 등에 국내 기술 경험이 많음 	◎
<p>b. 하향식 거푸집</p>	<ul style="list-style-type: none"> 기계화 도입에 의한 철근조립이 양호하도록 고안된 방식 장경간의 경우 선조립 철근의 설치가 어려움 광폭단면의 경우 강재단면이 커지므로 F/T의 중량 증가 	
<p>c. 변형 상향식 거푸집</p>	<ul style="list-style-type: none"> 상향식과 하향식의 장점을 도입하여 선조립된 철근망을 거치할 수 있는 방식 F/T의 중량 증가 및 조립과 설치가 까다로움 철근망 인양시 처짐 과다 	

그림 11. 이동식 거푸집 비교

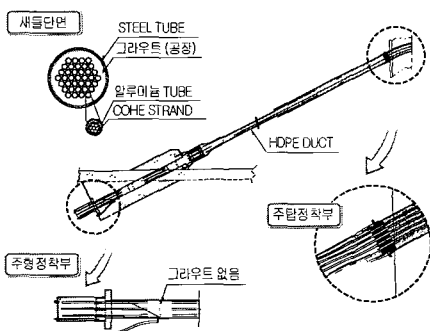


그림 12. 사재 케이블 형식

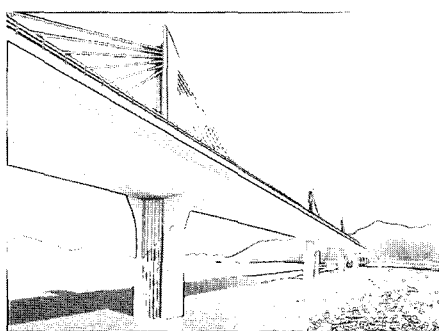


그림 13. 주형의 형고변화

양장비(변형된 F/T)로 설치하는 안을 검토한 결과, 한 세그먼트 당 가설 공기를 13일 ~ 15일에서 11일 ~ 13일로 단축시킬 수 있는 장점이 있었으나, 운암대교의 교폭이 넓어 철근망 인양시 처짐이 과다해지는 문제점으로 인하여 결국에는 채택하지 않았다(그림 11).

한편, 사재의 주탑부 정착방법과 사재 형식에 있어서는 운암대교의 가설조건이 상수원보호구역인 점을 감안하여 환경적인 요인을 우선적으로 고려하였다. 주탑 정착 방식은 Extradosed교의 전통적인 관통정착방법으로 주탑의 규모를 최소화할 수 있는 새들방식을 채택하였고 현장 그라우팅

이 없는 멀티튜브(multi tube) 형식의 사재로 설계하였다(그림 12). 이 방법은 일반적으로 사용된 모노튜브(mono tube)의 사재가 시멘트 그라우팅에 의한 마찰력으로 새들과 고정되는 구조인데 반하여, 그라우팅 없이 각각의 스트랜드의 마찰에 의해 고정되는 방법으로서, 근래에 개발되어 적용 사례는 많지 않지만 수질오염 방지 및 유지관리 측면에서 우수한 것으로 판단되었다.

다만, 멀티튜브 방법이 새들구조로서 시공실적이 충분치 않고 다경간 Extradosed교에 적용 실적이 없으므로 사재 시공시 철저한 시험과 검증을 거쳐 충분한 안전율을 확보한 후에 시공이 이루어질 수 있도록 하여야 할 것이다.

4.2 구조설계

4.2.1 종방향 설계

운암대교의 원설계는 홍수위시 지점부(형고 7m)의 형하공간이 1m 정도의 여유밖에 없었으므로 대안설계에서는 되도록이면 홍수위에 대한 여유고를 많이 확보할 수 있도록 하였다. 따라서 Extradosed교를 설계하는 경우, 지점부에서 거더의 형고가 급격하게 커지거나 전체적으로 형고가 커서 하부공간에 대한 압박감을 주는 안은 지양하였으며 이러한 점을 감안하여 최종안을 최대한 등단면을 유지하는 슬랜더한 형상의 3-cell 박스단면으로 결정하였다. 거더의 형상을 좀 더 구체적으로 살펴보면, 경간 중앙부 형고는 3.3m이고 주탑부는 4.2m로, 중앙부의 단면형태를 그대로 주탑부까지 연장하고 단면이 부족한 지점부근에서 약간의 형고 변화를 취하는 형태로 하였으며 날렵한 경관미를 살리면서도 자연스럽게 구조적 성능을 발휘하도록 하였다(그림 13).

사재는 6단 트윈(twin) 형식의 7m 간격으로 배치하였고 거더의 휨응력을 안전측의 값으로 하기 위해 최적의 강선량을 결정하였다. 또한, 사재의 하중분담률이 너무 커지지 않도록 하면서도 미관 등을 고려하여 주탑의 높이는 13m로 계획하였다.

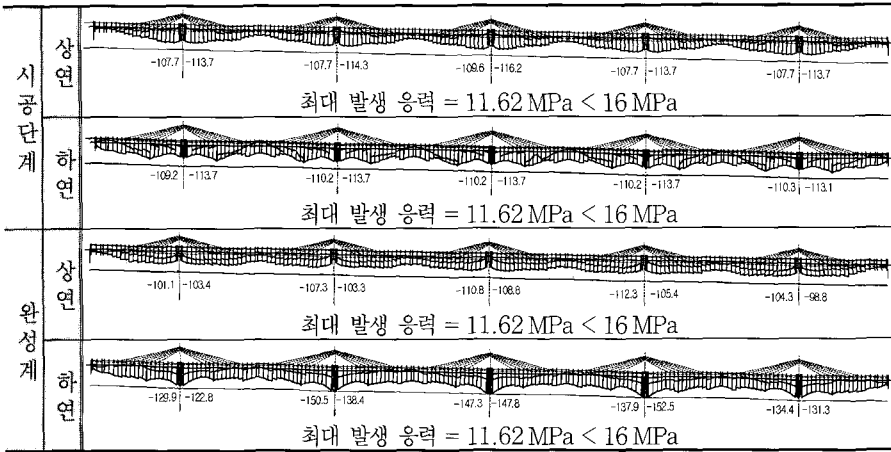


그림 14. 사용하중하의 주형 응력검토

본 설계에서는 구조물의 종방향 안전성 확보를 위하여 시공단계 및 완공후의 주형의 응력을 허용응력과 비교 검토하였고 계수하중에 대한 휨 강도와 전단강도를 검토하였다. 사용하중 작용시의 주형 상하연의 응력분포는 <그림 14>와 같으며 최대 발생응력이 허용응력 내에 있도록 하였다.

가설시의 구조해석에 대해서 좀 더 구체적으로 살펴보면, Extradosed교는 콘

크리트의 시간의존적인 거동의 변화를 고려하여야 하는 특수성 때문에 시공단계에 따른 구조해석이 매우 중요하며 구조계가 변함에 따라 전체구조계의 거동이 달라지게 된다. 따라서 본 설계에서는 콘크리트의 크리프와 건조수축의 영향이 최소화 될 수 있는 시공순서를 검토하여 최적의 시공순서를 도출하였으며 결정된 가설순서는 양쪽 측 경간에서부터 순차적으로 중앙 경

간으로 가설하는 것으로 하였다(그림 15). 이 시공순서는 총 4대의 F/T를 사용하는 것으로 계획하였고 다른 시공방법에 비해 가설시 부재력이 최소가 되는 것을 확인하였다. 참고로, 가설시 해석에서는 임시 고정점 요소를 모두 모델링하여 구조 해석을 수행하고 시공단계마다 새롭게 교체하는 것으로 하였다.

앞서 언급한바와 같이 운암대교의 중앙 주탑은 강결이지만 외측 주탑은 거더와 교량받침으로 연결되므로 시공중 캔틸레버부의 불균형력에 대하여 안전하도록 임시 고정장치와 소요 블록을 설계하여 안정성을 확보할 수 있도록 하였다(그림 16). 이때의 하중상태는 FCM 공법에서 좌우측의 불균형 모멘트가 최대가 되는 비대칭의 세그먼트 시공 조건을 고려하도록 하였다.

4.2.2 횡방향 설계

횡방향에 대해서는 유한요소해석과 판해석에 의해 운하중 분포폭을 산정하여 단면 설계를 수행하였다. 상부플랜지에 프레스

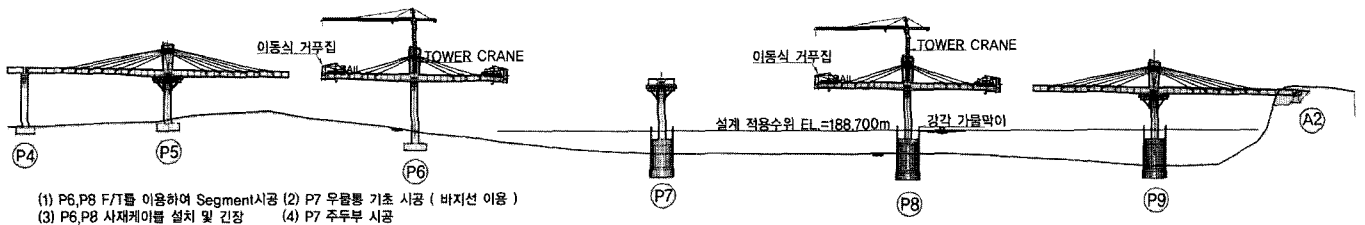


그림 15. 시공순서도

- (1) P6, P8 F/T를 이용하여 Segment시공 (2) P7 우물통 기초 시공 (비지선 이용)
- (3) P6, P8 사재케이싱 설치 및 긴장 (4) P7 주두부 시공

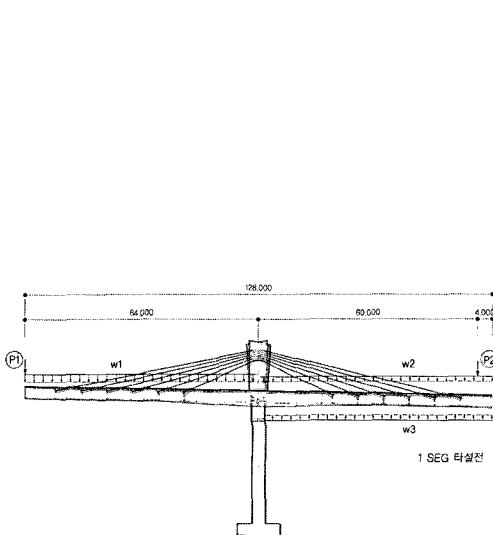


그림 16. 가설시의 안정성 검토

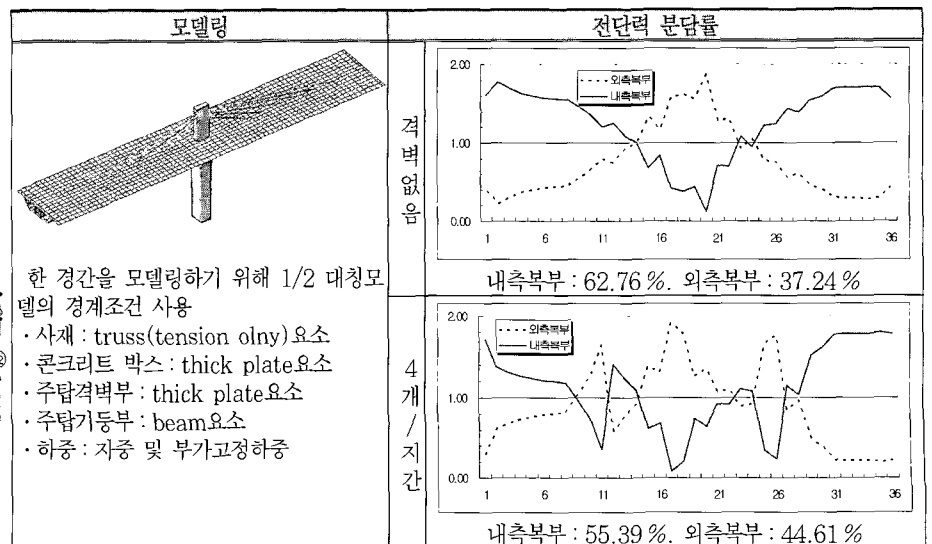


그림 17. 복부판의 전단력 분담률

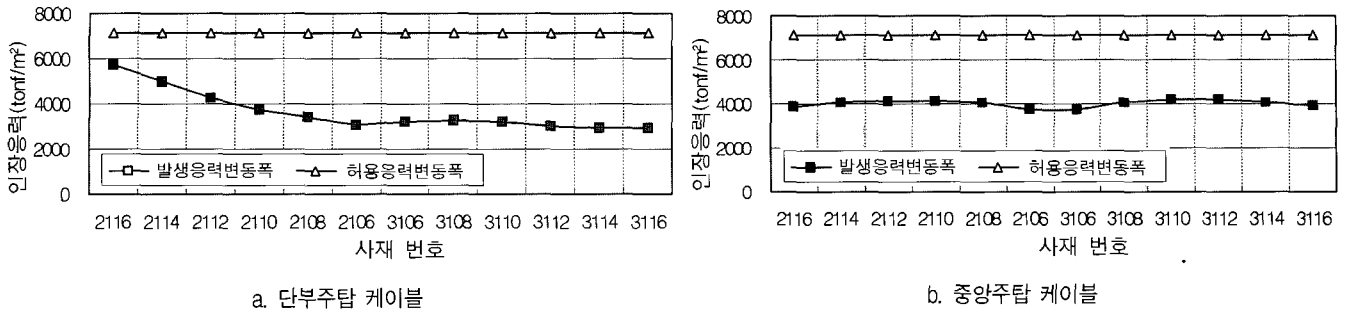


그림 18. 활하중에 의한 케이블 변동응력

트레싱을 도입하여 필요강성을 확보함과 동시에 시공 완료후의 균열로 인한 사용성 저하를 방지할 수 있도록 하였다. 철근배근에 있어서는 안정성과 사용성이 보장되는 범위안에서 주철근을, 상부플랜지는 H16@125 mm, 하부플랜지는 H19@125 mm, 복부판은 H25@125 mm으로 설계하여 기존의 과다철근 배근에 의한 경제성 및 시공성 저하 문제를 개선할 수 있게 하였다. 일반적으로 FCM에 의한 장경간 교량의 경우 지점부에 전단력이 매우 크게 작용하므로 거더 복부판에는 주철근과 동시에 사용하는 전단철근이 많이 필요하게 된다. 하지만 Extradosed교의 경우는 사재 케이블에 의한 전단력 저감효과로 인하여 일반 FCM 교에 비해 복부철근량이 상당히 저감된다. 운암대교의 경우는 1면 주탑형태이므로 단면중앙의 사재케이블이 상당부분의 전단력을 부담하게 된다. 이때 케이블에 의한 전단력이 내측 복부판에 집중하게 되므로 바깥쪽 복부판에도 골고루 하중이 분배될 수 있도록 격벽(다이아프램)을 설치하는 것이 필요하였다. 최적의 격벽 개수를 결정하기 위하여 유한요소법에 의한 복부판들의 전단력 분담률을 검토하였고 분배효과와 설치개수를 최소화할 수 있는 시간당 4개의 격벽을 설치하도록 하였다(그림 17).

4.2.3 사재 설계

사재 설계는 Extradosed교의 공용기간 중에 요구되는 안전성, 사용성 및 내구성을 유지할 수 있도록 하여야 하며 특히, 사재는 다른 부재와 달리 피로응력에 대하여 취약한 부분이므로 사재가 받는 변동응

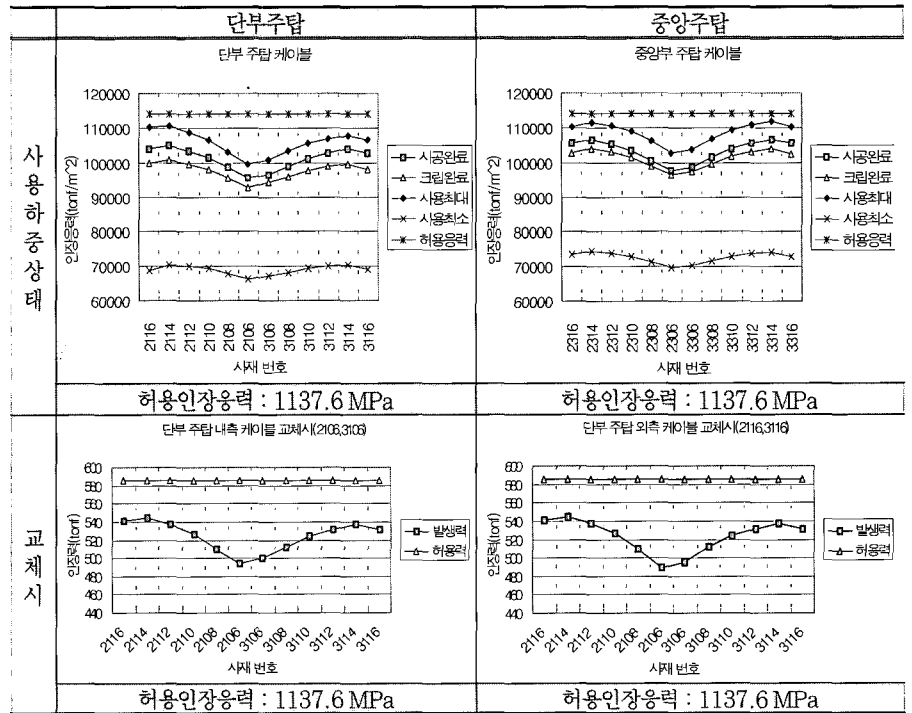


그림 19. 케이블의 응력 검토

력 레벨에 따라 사용한계상태의 한계값을 규정하도록 하여야 한다. 또한, 교량이 완성된 후에 사재 교체 등의 유지관리 문제까지 감안한다면 사전에 이러한 것을 미리 고려하여 케이블 파단시와 케이블 교체시의 응력에 대하여 충분한 안전성을 확보할 수 있어야 한다.

운암대교는 사재간의 장력 차이가 크지 않고 시공상의 편의를 위해서 15.7 mm, 37연선을 전 사재에 동일하게 사용하는 것으로 설계하였다. 또한 시공완료후의 장력조정과 같은 복잡한 과정을 거치지 않기 때문에 사장교의 사재 설계나 시공에 비해 매우 간단하다고 말할 수 있다.

운암대교와 같은 다경간 Extradosed 교의 케이블응력의 변동값은 외측 주탑의

최외측 케이블에서 최대가 되며 본 설계의 경우 변동응력은 56.8 MPa로서, 기준값 70 MPa 이하이기 때문에 케이블의 허용응력은 극한강도의 60%로 보고 설계하였다(그림 18). 한편, 운암대교에 사용된 새들 정착방식이 멀티튜브방식이므로 피로시험 등을 통하여 이 허용응력 값을 만족하는지 여부를 확실히 검증할 필요가 있다.

해석결과 모든 사재는 사용하중 상태 및 교체시에 대하여 안전도를 확보하고 있다(그림 19). 더욱이 본 설계에서 적용한 멀티튜브방식은 교체시에 사재 전체를 한번에 교체하는 것이 아니라 개개의 스트랜드만을 교체 하는 방법이 가능하므로 교체의 안전율은 더욱 크다 할 수 있겠다.

4.2.4 상세해석

1번 주탑의 Extradosed교는 설계 특성상 응력집중 부위가 많이 발생하는 구조로 되어 있으며 다양한 유한요소법에 의한 정밀해석을 통하여 안정성 검토를 수행하였다. 여기서는, 사재 정착부, 주탑 새들부, 주두부의 격벽, 교량받침 하면 등에 관한 상세해석 내용을 간단히 소개하기로 하였다.

사재 케이블로 인한 응력 집중부는 사재 정착부와 주탑 새들부가 있다. 주형의 사재 정착부 위치에서 사재 긴장력에 의한 파열력과 활렬력에 대한 보강철근 배치를 위하여 관용법과 유한요소해석을 병행하여 검토하였으며 대체로 관용법이 안전측의 결과를 보이고 있으나 유한요소해석결과가 큰 경우도 발견되었다(그림 20). 또한, 주탑 새들부 검토에서는 사재의 압축력에 의해 발생하는 주탑의 수직 인장응력 검토와 새들 정착부의 지압응력에 대한 검토를 수행하여 필요한 철근량을 산출하였다(그림 21). 주두부 격벽, 교각의 교량받침 하면 등에 대해서는 유한요소법과 스트럿-타이 모델 해석을 병행하게 수행하여 필요한 철근량을 산정하여 보강하도록 하였다(그림 22). 이 밖에 수화열해석, 부등전조수축해석, 단면내 온도분포해석 등 콘크리트 구조물에서 발생 가능한 문제에 대한 추가 해석을 수행하여 안정성을 확인하였다.

4.3 내진 및 내풍설계

4.3.1 내진 설계

Extradosed교는 고차원의 부정정 구조입과 동시에 유연한 부재로 구성되어 있기 때문에 일반적으로 지진시의 거동이 복잡하며 주거더의 지지형식, 사재배치 형식, 탑형상에 따라 지진응답도 다양하게 나타난다. 또한, Extradosed교의 내진설계시에는 초기장력 이상의 큰 축력변동 및 압축력이 작용하는 경우가 있기 때문에 적절한 해석방법이나 모델을 설정할 필요가 있다.

본 설계에서는 다중모드해석, SSI해석 등을 통해 구조물의 안정성을 검토하였으

관용법	FEM해석	위치	관용법 (tonf)	FEM (tonf)	필요철근 (cm ²)	사용철근 (cm ²)
		T1	21.84	12.15	12.30	15.48
		T2	68.25	8.00	38.45	50.67
		T3	369.69	14.14	499.79	709.38
		T4	136.50	184.86	77.03	82.34

그림 20. 사재 정착부의 상세 해석

주탑 새들부의 수직응력 검토		새들 정착부의 검토	
최대응력 0.8 MPa < 허용응력 0.84 MPa			필요철근량 5.157 cm ² < 사용철근량 22.067 cm ²
			최대응력 5.047 MPa < 허용응력 10.0 MPa

그림 21. 새들 정착부의 상세 해석

강결형식(인장력 : 152.6 tonf) 필요철근 84.78 cm ² < 사용철근 297.6 cm ²	연속형식(인장력 : 180.64 tonf) 필요철근 100.36 cm ² < 사용철근 297.6 cm ²

그림 22. 주두부 격벽의 상세 해석

FEM 해석	스트럿-타이 모델	FEM	스트럿-타이
		단면력	1341.05 tonf
		필요 철근	745.03 cm ²
		사용 철근	743.75 cm ²
			861.39 cm ²

그림 23. 교각의 상세해석 및 스트럿-타이 모델

며 교각의 휨강성은 지진시의 균열을 고려하여 전단면 강성의 절반을 적용하였다. 또한 중공교각의 심부구속철근에 대한 효과 및 연성능력을 실험을 통해 확인하여야 하는 관계로 응답수정계수 3을 사용하지 않고 2를 사용하여 보다 안전측의 값을 적용하였다. 내진설계시 고려한 지반-교량 상호작용에 대한 개략적인 개념은 (그림 24)와 같다. 이때, SSI해석시는 다지지점

의 지진입력이 필요하므로 재래적인 방법에서와 같이 교각하단을 고정단으로 하지 않고 스프링을 사용함으로써 지반의 영향을 함께 고려할 수 있게 하였다(그림 25).

내진해석 결과, 지반조건이 상당히 양호한 관계로 지반-구조물 상호작용 효과는 적게 나타나고 있음을 알 수 있으며 내진해석 결과를 기초로 하여 주탑 및 교각의 설계를 수행하였다.

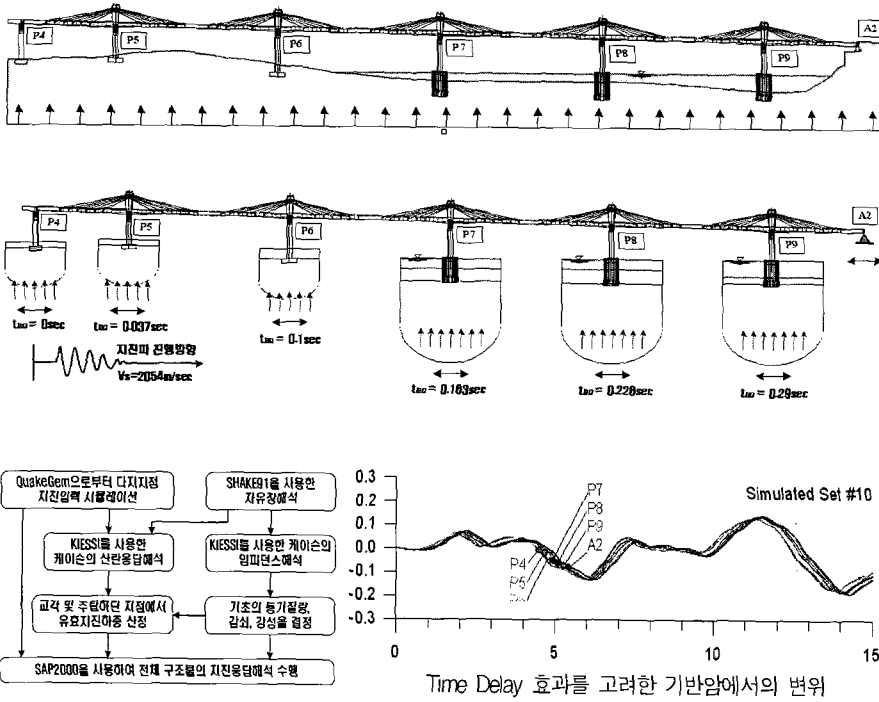


그림 24. SSI 해석절차 및 Time Delay 효과

표 3. 내진해석 결과

구분	교각 하단 모멘트 (tonf·m)						거더 G2 (tonf·m)	케이블 C4 (tonf)
	P4	P5	P6	P7	P8	P9		
고정기초해석	10179	8635	36304	39659	43681	7024	5243	39
SSI해석	10177	8643	36272	39558	43534	7003	5233	39
SSI해석 (Time Delay 고려)	10151	8715	35802	38471	42086	7393	5231	38

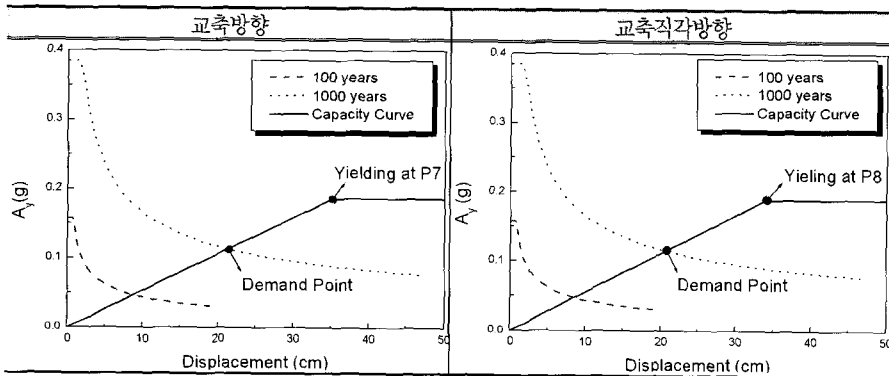


그림 25. 역량해석법에 의한 해석 결과

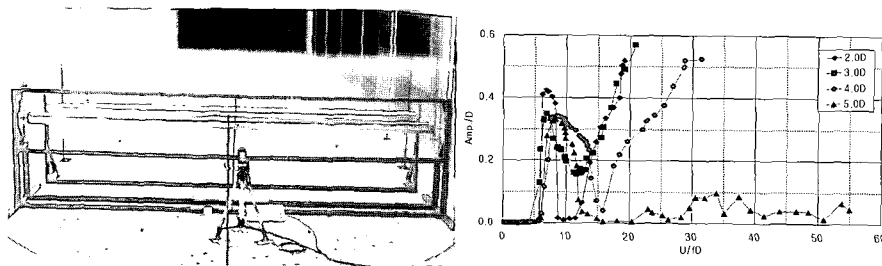


그림 26. 케이블 진동 실험과 결과

내진성능평가 방법으로는 역량스펙트럼에 의한 검토를 수행하였다. 검토결과, 기능수행수준의 지진에 대해서는 구조물이 탄성영역에서 거동하고 붕괴방지수준의 지진에 대해서는 구조물이 소요역량을 초과하므로 구조물이 안정성을 확보하고 있음을 확인하였다(그림 25).

4.3.2 내풍 설계

내풍 설계에서는 2차원 풍동실험과 CFD해석을 수행하였다. 운암대교는 비교적 자중이 큰 PSC 박스 단면을 가지고 있었기 때문에 내풍성능은 비교적 좋을 것이라 예상되었지만, 장치간의 케이블 구조이기 때문에 2차원 풍동실험을 실시하였다. 풍동실험 결과, 발산진동에 대해서는 안전한 반면 와류진동 가능성이 예측되어 난류실험을 실시하였고 베퍼딩 진폭이 설계풍속 내에서 5cm 미만으로 안전한 결과가 도출되었다.

한편, 케이블이 주탑에서 병렬로 배치되어 상호간섭에 의한 웨이크 갤로핑(wake galloping) 진동 현상이 발생하였다. 이러한 진동은 운암대교 가설지역의 난류강도(15%)하에서 케이블간격이 케이블 직경의 2~4배 사이에서 발생하는 것으로 밝혀졌으며 댐퍼나 진동억제 케이블 등에 의한 방법으로는 완벽한 진동 제어가 불가능하였다. 실험결과, 케이블 간격이 직경의 5배 이상인 경우에는 진동현상이 소진되는 결과를 보였기 때문에 주탑 폭을 좀 더 확대하고 케이블 간격을 5배로 넓힘으로써 웨이크 갤로핑 진동현상을 해결할 수 있었다(그림 26, 27).

5. 맺음말

이상으로 운암대교의 교량계획과 세부적인 설계사항에 대해서 개괄적으로 기술해 보았다. 우리는 운암대교가 옥정호의 아름다운 주변과 가장 잘 어우러지는 최고의 교량이 되기 위해 노력하였고 구조적으로도 매우 우수한 교량이 될 수 있도록 본 프로젝트를 수행하였다.

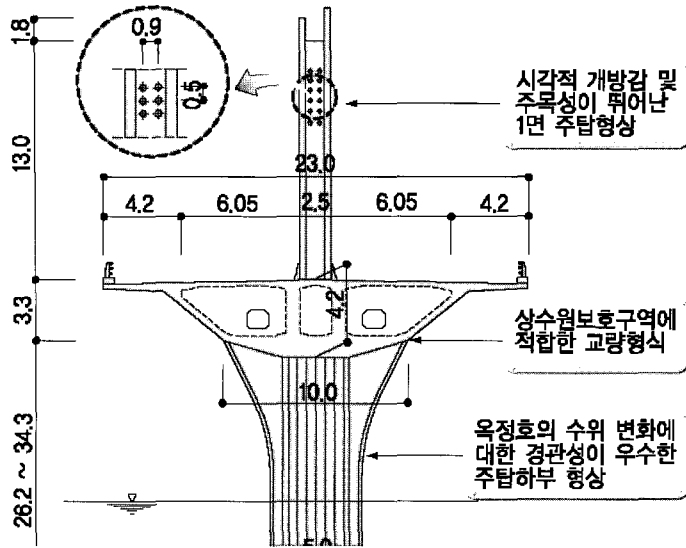


그림 27. 주탑내 케이블 간격

주지하는 바와 같이, Extradosed교는 같은 지간의 FCM 교량에 비해 단면 형고를 크게 낮출 수 있을 뿐만 아니라 케이블로 지지되는 아름다운 외관을 갖고 있으며 구조적으로도 매우 효율적인 특성을 갖고 있다. 그러나 Extradosed교는 상세설계 뿐만 아니라 구조계획 단계에서부터 많은 검토를 요구하는 복잡한 과정을 거쳐야 하며 시공측면에서도 콘크리트 캠버관리 및 사재 장력도입과 같이 각별한 주의가 요구된다. 특히, 본 운암대교와 같이 다경간 1면 Extradosed교는 활하중에 의한 영향, 케이블의 피로, 적절한 교량구조 부속물의

선택 등 설계단계에서 미처 파악되지 못한 상황들이 시공시 발생할 가능성을 부인하기 어렵다.

그럼에도 불구하고 이러한 새로운 교량에 대한 다양한 시도는 앞으로의 세계를 만들어나갈 우리 토목 기술자들의 몫이자 의무라고 본다. 이러한 시도는 설계기술 뿐만 아니라 시공기술의 축적으로 이어져 보다 많은 장대교량의 탄생에 든든한 밑거름이 될 것이라 믿기 때문이다. 또한, 근래 들어 Extradosed교의 설계가 많이 이루어지고 있는데 이 또한 개인적으로 매우 바람직한 현상이라 생각하는 하나의 이유

이기도 하다.

아무튼 대안입찰 설계로 다시 태어난 운암대교가 다경간 1면 Extradosed교로서, 국내 교량사에 기념비적인 교량으로 거듭 태어날 것을 믿어 의심치 않으며 끝까지 최선을 다해 성공적인 시공이 이루어지기를 진심으로 기대해 본다.

마지막으로, 본 설계가 있기까지 대안입찰 설계의 시공사로서 큰 방향을 잡아주시고 심혈을 기울여주신 쌍용건설 주식회사 관계자분들께 감사드리며 또한, 설계시 많은 조언을 주신 (주)청석엔지니어링의 임원진 및 직원여러분, 그 밖의 많은 협력사 여러분들의 노고에 감사드리면서 이상으로 운암대교에 대한 간단한 소고를 마칠까 한다. □

참고문헌

1. "도로교 설계기준", 건설교통부, 2000.
2. 키소가와교, 이비가와교의 상부공 설계, 교량과 기초(일본), 1999
3. "충주시 국도대체 우회도로(용두~금가) 건설공사 설계보고서", 대전지방국토관리청, 2002.
4. 사수대교의 계획과 설계, 교량과 기초(일본), 1997.
5. PC사장교, Extradosed교 설계시공 기준(안), 2000.

도서소개 - "콘크리트진단 및 유지관리"

◆ 소개

:이 책은 콘크리트구조물의 안전진단 및 유지관리에 관하여 이해하기 쉽고, 현장적용에 도움이 되도록 노력했으며, 이는 관련 분야에 종사하고 있는 실무기술자들의 참고서로 뿐만 아니라 관련자격시험 등에 필요한 필독서로도 유용할 것이다.

- 저 자 : (사)한국콘크리트학회
- 출판사 : 기문당
- 출판일 : 2004년 2월
- 정 가 : 25,000원
- 페이지 : 670쪽
- ISBN : 89-7086-490-3

콘크리트진단 및 유지관리

한국콘크리트학회

한국콘크리트학회