

중앙일면식 케이블과 등형고를 갖는 Extradosed PSC 교량의 설계 및 시공

Design & Construction of PSC Box-Girder Bridge with Central Suspension by Extradosed Cables and Constant Girder Depth

조 의 경* 김 성 일** 박 종 화*** 이 수 열****
Cho, Eu Kyeong Kim, Sung Il Park, Jong Hwa Lee, Su Yeol

ABSTRACT

The recent development of PSC girder bridges are mostly dedicated for optimization of self-weight, simplification of girder section for easy construction and minimization of maintenance efforts. Moreover some of those bridges are required as a landmark facility which raises the image of locality and harmony with surroundings. An extradosed bridge is one of the best alternates which not only covers the longer span than PSC box girder and also performs the role of landmark facility with much cheaper cost than cable stayed bridge. Hyundai is carrying out the construction of unique style extradosed bridge which have central suspension system and uniform girder depth named Keong-An grand bridge on the Sunghnam-Janghowon Express highway. In this paper, major process of design and construction features of Keong-An bridge is presented.

1. 서론

최근 중소경간 교량에 가장 많이 사용되는 형식인 PSC 거더 교량은 인장에 취약한 RC 교량의 단점을 PS 강재에 의해 보완한 교량 형식이다. 그러나 고정하중 및 변동하중에 의한 지점부 부모멘트의 증가, 지점부 하부플랜지의 압축응력에 대한 보강 및 단면 내 PS 강재 배치에 의한 한계점 등 장대지간에 적용하기 위해 해결해야할 구조적 한계점을 갖고 있다.

Extradosed 교량은 프랑스의 Jacques Mathivat이 1988년 FIP Note에서 최초로 언급한 교량 형식으로서 부모멘트 구간에서 PS 강재로 인해 단면에 도입되는 축력과 모멘트를 증가시키기 위해 PS 강재의 편심량을 인위적으로 증가시킨 형태로 단면 내에 위치해있던 PS 강재를 일반적으로 사장교보다 낮은 높이를 갖는 주탑의 정부에 외부텐던의 형태로 부재의 유효높이 이상으로 배치한 교량으로 정의할 수 있다. 즉, 사장교와 PSC 거더교의 특성을 복합적으로 갖는 교량형식이라고 말할 수 있다.

* 정회원, 선임엔지니어, 현대건설 토목사업본부
** 정회원, 선임엔지니어, 현대건설 성남-장호원 도로건설공사 2공구
*** 정회원, 수석엔지니어, 현대건설 토목사업본부
**** 정회원, 기술입원, 현대건설 성남-장호원 도로건설공사 2공구

현대건설에서는 국도 3호선 대체도로로서 건설 중인 성남-장호원 도로건설공사 제2공구에 국내 최초로 선보이는 등형고, 중앙일면식 케이블 형식의 extradosed PSC 박스거더 교량인 경안대교(그림1)를 시공 중에 있다. 이 논문에서는 경안대교의 설계과정 및 주요 특징, 단면최적화를 위한 노력 및 향후 시공계획 등에 대하여 개략적으로 논하고자 한다.

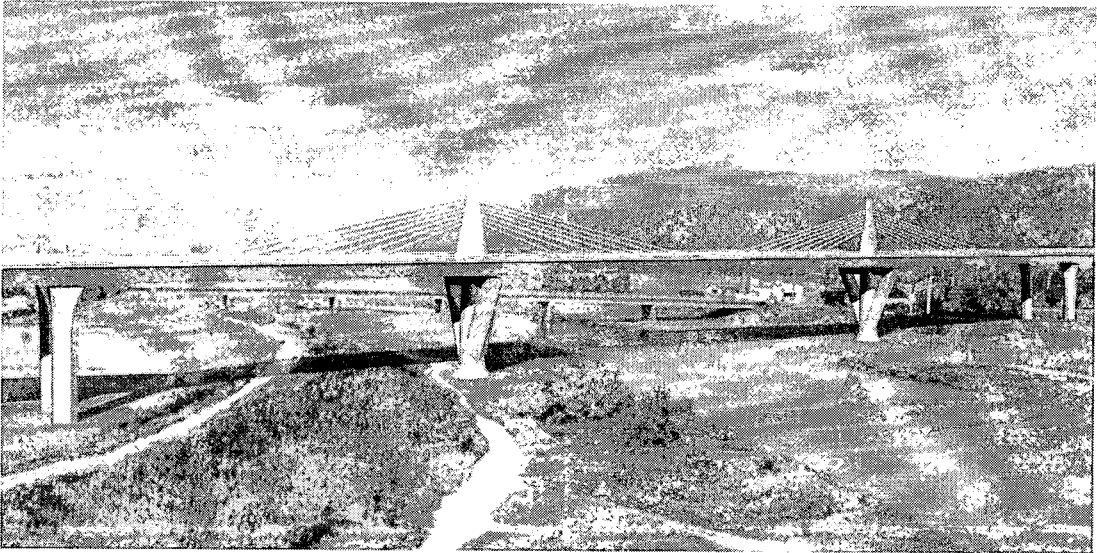


그림 1 경안대교 조감도

2. 교량계획

경안천을 횡단하는 경안대교 계획시에 최우선으로 생각했던 두 가지 설계요건은 다음과 같다.

- a. 하천통과를 강조하면서도 완만한 산세를 지닌 주변경관과 조화로운 것
- b. 접속교 및 인접터널과의 시각적 연속성을 유지하며 경쾌한 조형미를 연출할 것

대칭 및 비대칭 사장교, 아치교, 트러스교 등 여러 가지 형식의 교량이 계획단계에서 논의되었으며 최종적으로 extradosed교, PSC BOX거더교(FCM) 및 사장교의 세가지 대안이 비교 검토되었다.

그림2에 나타낸 바와 같이 extradosed 교량이 미관측면에서 가장 우수한 것으로 분석되었으며 기술적 측면에서도 다음과 같은 장점을 갖고 있어 경안천 횡단에 가장 적합한 교량형식으로 판단되었다.

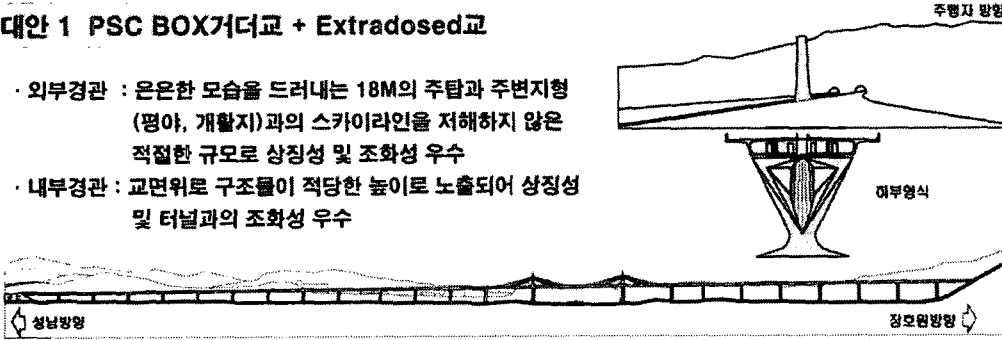
먼저, PSC 거더 교량과 비교해 보면 주어진 공간에 대하여 보다 세장한 단면을 설계할 수 있다. 이러한 단면은 풍하중의 영향을 적게 받으며 미적인 측면에서 주위경관과 더욱 조화롭다. 또한 대부분의 지점부 휨모멘트가 extradosed 케이블에 의해 처리되므로 하부슬래브에 작용되는 압축력이 감소되어 상판 콘크리트단면이 크게 절감된다.

다음은 사장교와 비교해 보면, 사장교 주탑높이(L/3 ~ L/5)에 비하여 주탑높이(L/8 ~ L/12)를 크게 낮출 수 있어 주탑시공이 간편하며 주위 경관을 압도하는 사장교에 비하여 주위경관과 조화로운 모습

을 보일 수 있다. 또한 Extradosed 교량의 케이블은 사장교 케이블에 비하여 피로, 진동 등에 덜 민감하므로 응력변동폭이 작고 유지관리에 효과적이다.

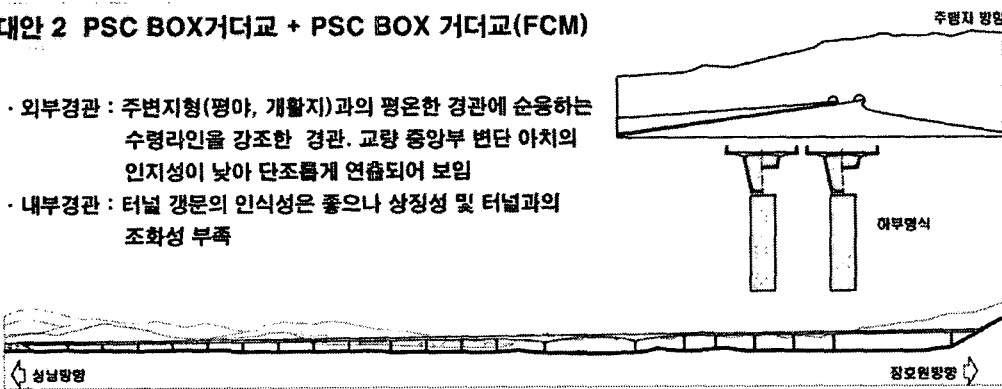
대안 1 PSC BOX거더교 + Extradosed교

- 외부경관 : 은은한 모습을 드러내는 18M의 주탑과 주변지형(평야, 개활지)과의 스카이라인을 저해하지 않은 적절한 규모로 상징성 및 조화성 우수
- 내부경관 : 교면위로 구조물이 적당한 높이로 노출되어 상징성 및 터널과의 조화성 우수



대안 2 PSC BOX거더교 + PSC BOX 거더교(FCM)

- 외부경관 : 주변지형(평야, 개활지)과의 평온한 경관에 순응하는 수평라인을 강조한 경관. 교량 중앙부 변단 아치의 인지성이 낮아 단조롭게 연출되어 보임
- 내부경관 : 터널 갭문의 인식성은 좋으나 상징성 및 터널과의 조화성 부족



대안 3 PSC BOX거더교 + 사장교

- 외부경관 : 교량 중앙의 대형구조물이 인식성은 좋으나 주변지형(평야, 개활지)에 과도하게 압도하여 완만한 경관에 융화성 및 조화성 부족
- 내부경관 : 교면위로 구조물이 높게 노출되어 상징성은 좋으나 터널과의 조화성 부족

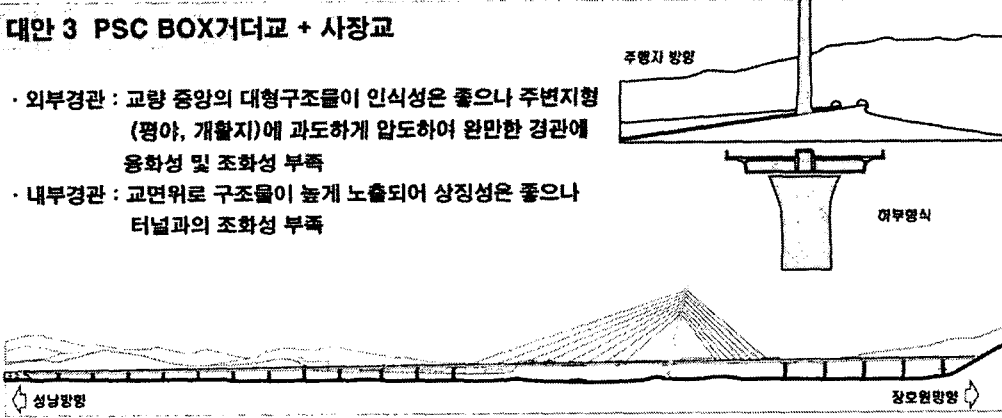


그림 2 경안대교의 경관성 분석 모식도

경안대교는 이와 같은 측면을 고려하면서 지형적 특성 및 단층파쇄대 등을 피한 지간 구성을 통하여 그림 3에 보이는 바와 같이 총연장 1359m로서 왕복6차선의 PSC 박스거더와 extradosed 교량으로 설계되었다.

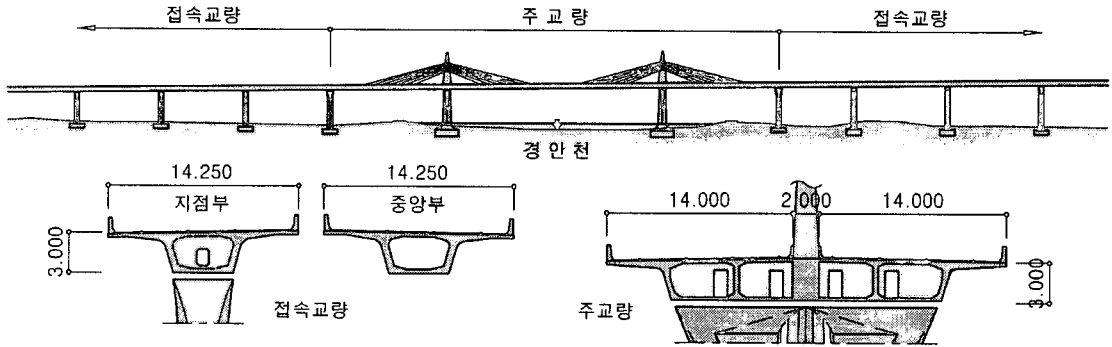


그림 3. 경안대교 지간구성 ($L=(6@50)+(3@50.5+60+3@50.5)+(70+130+70)+(45+6@56+45)=1359m$)

3. 경안대교의 설계 및 구조상세

3.1 설계단면의 최적화

경안대교 설계계획의 적정성 검토 및 단면 최적화를 위하여 단면형상, 케이블배열 및 배치범위, 주탑고, 주탑부 케이블 정착방법 등에 대하여 매개변수 연구를 수행하여 설계에 적용하였다.

또한 시공단계별 하중 및 경계조건 변화를 고려한 상세해석, 응력집중부의 3차원 유한요소해석, 케이블 교체시 안정성 해석, 풍동실험 및 CFD 해석, 단층파쇄대의 영향과 지반-구조물 상호작용을 고려한 3차원 지진응답해석 등 엄밀해석 및 실증실험을 통하여 구조적 안정성을 검토하였다^[1,2,3].

표1에는 설계단면의 최적화 결과를 요약하여 수록하였다.

표1 경안대교 단면의 최적화 설계결과 요약

항목	검토내용 및 결과	설계적용
단면형상	접속교(PSC박스거더교)와 동일한 들출장과 형고적용	접속교와 연속단면
케이블배치 범위	정착위치에 따른 단면력변화 민감도해석을 통해 배치범위 결정	$a/L=0.17$ 적용
케이블 배열	작은케이블2면과 큰케이블 1면의 구조적, 경관적 성능분석	중앙에 1면케이블 배열
주탑/형고	케이블의 연직하중 분담률과 변동응력폭을 제한치내로 유지하면서 지점부 모멘트가 최소화되는 주탑/형고비 결정	주탑고=16.25m, 형고=3.0m 적용
지점부 단면	경관성이 우수한 등단면과 구조적으로 유리한 변단면 비교검토	등단면으로 적용
상하부 연결	분리구조와 일체구조의 거동해석을 통하여 온도신축에 따른 부가응력의 제어범위와 지진저항구조의 합리성을 검토	신축응력이 제어범위를 초과하므로 분리구조 적용
주탑부 케이블정착	새들정착방식 vs 독립정착방식의 구조 및 경관성능을 비교검토하고 좌우의 긴장력편차로 인한 슬립방지구조를 계획	새들정착 (관통고정방식)적용

3.2 상부구조

경안대교는 좌우 측경간 70m와 중앙경간 130m로 구성되어 있으며 경안대교 상부구조의 주요제원은 표 2와 같다.

표 2 경안대교 extradosed 교량 상부구조의 주요제원

주요특성	<ul style="list-style-type: none"> · 지간구성 : 70+130+70 = 270 m · 폭 : 30m (왕복 6차선, 중앙분리대 2m) · 직선교량, 종방향 slope 1.06% · 횡방향 slope 2%
단면	<ul style="list-style-type: none"> · 등형고 적용 · depth = 3m ~ 3.128m · inclined external web
단면두께	<ul style="list-style-type: none"> · 상부슬래브 : 200mm · 웨브 : 300mm (중앙웨브의 경우 200mm ~ 1m로 변화) · 하부슬래브 : 180mm
격벽	<ul style="list-style-type: none"> · 위치 : Extradosed 케이블 정착부 · 두께 : 300mm (지점부 2m)
텐던	<ul style="list-style-type: none"> · 종방향 상부 캔틸레버 내부텐던 (12T15) · 종방향 중앙경간 하부슬래브 내부텐던 (12T15) · 외부텐던 (19T15) · 횡방향 상부슬래브 내부텐던(4T15) · 격벽 (2×12T15)

지점부 부모멘트의 87%를 extradosed 케이블에 의해 저항하고 13% 정도를 기존의 내부텐던에 의해 저항하는 작은 거더-큰 사재의 개념을 도입하여 일반적인 사장교와 같이 등형고 단면을 적용함으로써 접속교량인 PSC 박스거더 교량과의 연속성을 유지하였다. 또한, 그림 4와 같이 기본설계 시 1면 2열 배치($\Phi 0.6 \times 45EA \times 2$ 면)였던 extradosed 케이블을 적절한 외부텐던 추가 배치에 의하여 중앙일면식 1열 지지 시스템($\Phi 0.6 \times 91EA \times 1$ 면)으로 개선 적용하였다.

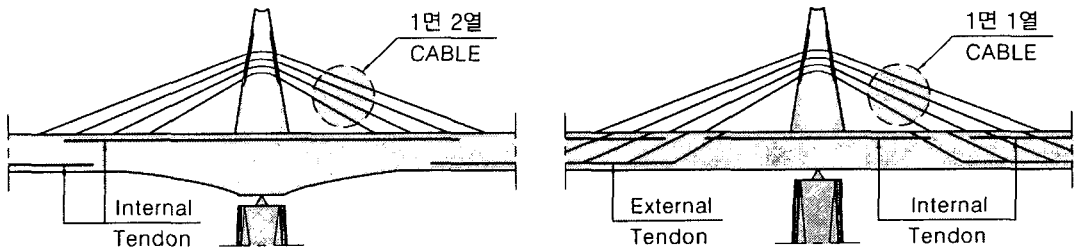


그림 4 Extradosed 케이블의 배치

그림 5는 내·외부 텐던 및 횡방향 텐던의 배치를 나타낸다. 종방향은 내외부텐던을 병용배치하여 단면력 저항을 극대화 하였고(그림5 좌상, 좌하) 횡방향으로는 extradosed 케이블의 기능을 최대한활용

하고 다이이프램의 횡분배기능이 원활하도록 횡방향강선을 도입하였다(그림5 우상). 또한 주케이블과 지간중안부 텐던배치의 profile을 연계성있게 배치하여 하중의 흐름을 원활히하도록 계획하였다(그림5 우하).

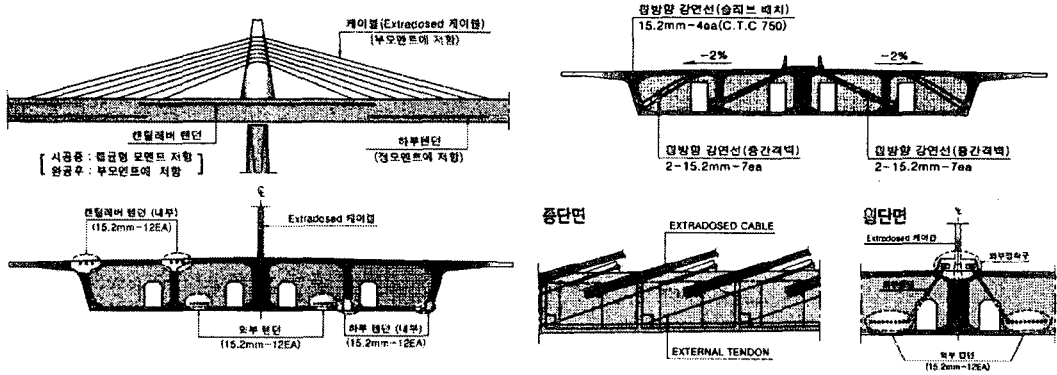


그림 5. 경안대교 텐던 배치

3.3 교각 및 주탑

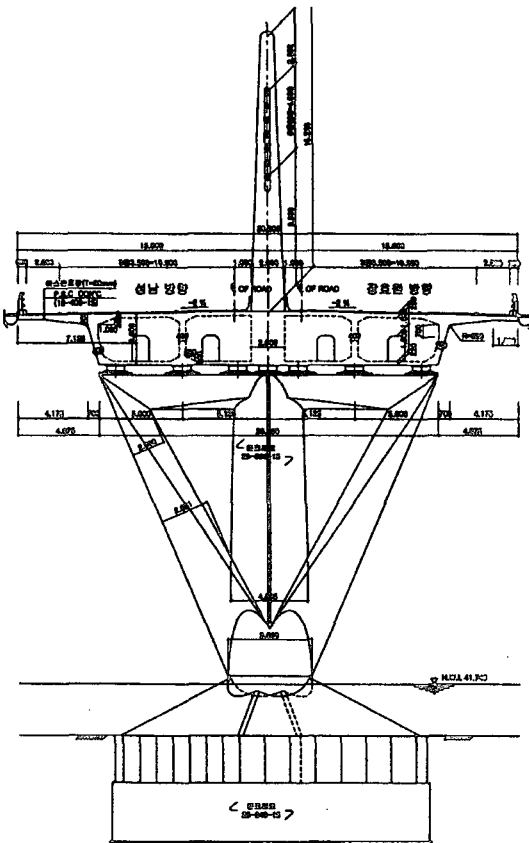


그림 6 경안대교의 교각 및 주탑

주경간 교각은 그림 6과 같이 중앙 원형기둥과 횡방향 경사기둥 및 코핑으로 이루어져 있다. 코핑은 8×19T15의 텐던에 의해 긴장된다. 상부구조와 하부구조의 연결은 온도, 텐던 긴장, 크리프 및 건조수축에 의한 영향을 검토하여 상판과 교각을 일체화시키지 않는 구조를 채택하였다.

경안천의 흐름을 감안하여 수리학적으로 유리한 방향으로 기초를 설치하도록 계획하였다. 교량의 받침은 면진장치인 LRB(Lead Rubber Bearing)를 적용하여 교량의 진동주기를 늘리고 감쇠력을 증가시켰다.

주탑은 16.25m 높이로서 폭은 상판부 2m에서 최상위부 0.55m로 변화하는 타원형 단면을 채택하였다. 그림 7과 같이 주탑고 변화에 따른 주형의 휨모멘트, 케이블 변동응력, 연직하중 분담률에 대한 case study를 통하여 최적의 주탑고를 선정하였다.

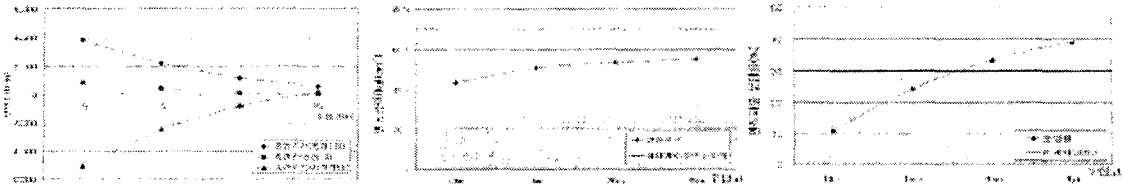


그림 7 주탑의 높이 변화에 따른 주형 휨모멘트, 케이블 변동응력, 연직하중 분담률

3.4 Extradosed 케이블

경안대교의 케이블 구성은 주탑을 중심으로 양방향 7개의 extradosed 케이블이 상판과 만나는 부분에서 5m 간격으로 배치되어 있으며, 각 케이블은 91T15 구성이다. 새들 형식은 주탑 단면을 줄일 수 있고 하중전달체계가 명확하며 경제적인 관통고정식을 적용하였으며 연직하중에 대하여 더욱 효과적인 semi-fan 형식의 케이블 배치를 적용하였다.

본 설계에서는 케이블 사용의 효율성을 증시하여 케이블의 응력변동폭을 최대허용응력인 $0.6f_{pu}$ 를 적용할 수 있는 수준으로 제어하였다. 피로검토 결과 활하중에 의한 변동응력이 최대 675.1kgf/cm^2 으로 피로 및 사재의 허용응력 산정 기준응력^[4]인 $70\text{MPa}(=713\text{kgf/cm}^2)$ 이하로 피로안정성 확보 및 사재 허용응력을 $0.6f_{pu}$ 로 결정하는 것이 타당하다고 판단되었다.

콘크리트에 매입된 내외부 이중강관으로 구성된 새들부는 응력변동폭이 작고 피로에 대한 안정성을 확보하고 있으며, 관통부 상세해석을 통해 안정성을 검토하였다.

그림 8과 같이 경안대교의 extradosed 케이블은 아연도금 및 왁스 처리된 스트랜드와 케이블을 각각 HDPE로 보호한 4중 방식 시스템이다.

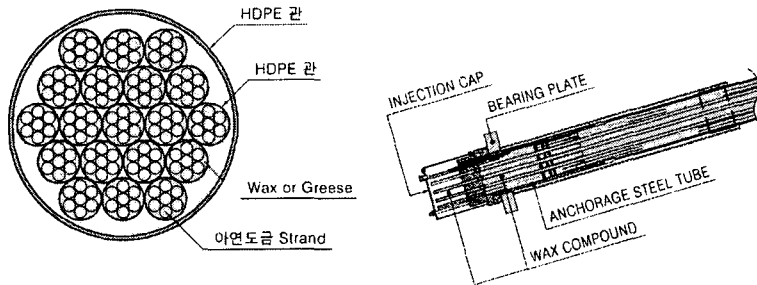


그림 8 extradosed 케이블 단면도 및 정착구 상세

4. 상부구조 시공계획

경안대교 extradosed 교량은 측경간 FSM, 중앙경간 FCM 시공을 적용하기로 계획되었다. 개략적인 시공 순서는 다음과 같다.

기초 및 교각 시공 - 측경간 FSM 시공, 주탑, 주두부 및 중앙경간 첫번째 세그먼트 시공 - 이동식거푸집, 캔틸레버텐던 및 extradosed 케이블 거치에 의한 중앙경간 FCM 시공 - 중앙경간과 측경간 텐던 긴장 - 고정하중 재하 - 측경간 동바리 해체 - Extradosed cable의 최종 긴장

현재 당 현장에서는 공기단축, 시공안정성 및 경제성을 감안하여 중앙경간도 FSM에 의하여 가설하는 설계변경을 검토중이다(그림9 참조). FSM 시공 적용에 의한 장점은 다음과 같이 예상된다.

- a. 공기단축 : FCM 시공기간의 60% 단축예상
- b. 시공 중 구조적 안정성 향상, 시공이음부 최소화
- c. 텐던 수량 감소 : 내부 종방향 텐던(12T15)량 : 6372m -> 3280m (51.5%)
내부 종방향 텐던을 위한 정착부 개수 : 292 -> 176 (60.3%)
임시긴장의 필요성 없어짐
- d. 전체 철근량 감소 5% : 종방향 배근감소 이동거푸집, 블리스터 및 임시긴장에 대한 배근 불필요
- e. 콘크리트 사용량 감소 : 바닥슬래브 및 블리스터 등
- f. 접속교량 동바리 재사용 가능

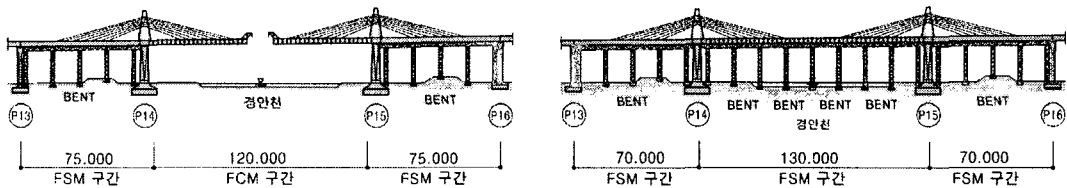


그림 9 중앙경간 FCM 공법 vs 중앙경간 FSM 공법

5. 결론

이 논문에서는 국내최초로 시공되고 있는 등형교, 중앙일면식 extradosed 교량인 경안대교의 각 구조상세별 설계과정 및 시공계획을 간략히 기술하였다.

경안대교는 extradosed 케이블의 역할을 극대화하고 격벽의 적절한 배치를 통하여 하중을 분산 지지함으로써 사장교와 같은 등형교를 적용하였으며, 주행자의 시야확보 및 경관조화를 위하여 중앙일면식 케이블 시스템을 적용하였다. 해외 설계사와의 공동연구를 통하여 세부 설계사항을 해결해나가고자 하였으며, 향후 시공과정에서도 각 부분에 대한 많은 연구가 이루어질 예정이다. 이러한 시공 및 설계 기술력 축적이 향후 국내 extradosed 교량 설계 및 시공 기법 개발 및 상세 시방서 확립에 도움이 되었으면 하는 바람이다.

참고문헌

1. 현대건설, 성남 ~ 장호원 도로건설공사 제2공구 실시설계보고서, 2001. 11.
2. 현대건설, Extradosed교의 설계와 시공, 2000.
3. 한국지진공학회 기술강습회, 2003.
4. 일본 프리스트레스콘크리트 기술협회, PC사장교, Extradosed교 설계시공규준(안).