

# 압출공법에 의한 복부 파형강판 복합교량의 설계 및 시공

## Design and Construction of Hybrid Bridge with Corrugated Steel Web by Incremental Launching Method

김 광 수\* 정 광 회\*\* 심 정 욱\*\*\* 한 정 구\*\*\*\*  
Kim, Kwang Soo Jung, Kwang Hoe Sim Chung Wook Han Jung Goo

### ABSTRACT

This paper presents how to design and construct the Il-sun bridge, the first PSC box girder bridge with Corrugated Steel Web(CSW) in Korea, including 3D analysis results according to construction steps. Also, the 3D analysis for the beams with CSW was performed for the purpose of verifying the role of the flange plate. As the results of this analysis, it is founded that the flange plate plays a role to resist the flexural strength in the nonlinear region. In the near future, we are plan to carry out the load test for these beams with CSW.

### 1. 서론

복부 파형강판 PSC 박스거더교는 PSC 박스거더교의 복부를 파형강판으로 대체한 복합구조 교량의 일종이다. 파형강판은 구조용 강판을 파형 형상으로 가공한 것으로 면외방향 강성의 증가를 기대할 수 있으며 전단력에 대하여도 높은 강성을 발휘하여 보강재 설계를 간소화할 수 있는 장점이 있다. 이와 같이 교량 구조물에 있어서 플레이트를 입체화한 파형강판을 복부 부재로 사용함으로써 전단좌굴 강도를 개선하고 보강재를 생략하거나 획기적으로 감소시키기 위한 시도는 프랑스에서 시작되었으며 Maupre교나 Cognac교가 대표적인 사례이다. 그러나, 실질적인 적용은 일본에서 비약적으로 이루어졌는데 1990년대 중반을 이후로 신카이교나 혼다니교 등이 준공됨으로써 활발하게 적용되어 오고 있다. 1993년에 준공된 신카이교는 프리캐스트 거더 공법, 1995년에 준공된 마츠노키교는 ILM, 그리고 1998년에 준공된 혼다니교는 FCM에 의하여 가설되었으며, 특히 혼다니교는 중앙 지간장이 97.202m로서 장지간 교량에 본격적으로 적용되는 계기가 되었다. 최근에는 사장교나 Extradosed교까지 그 적용범위를 확장시키고 있다. 본 논문에서는 현대건설에 의해 국내 최초로 시공되고 있는 파형강판 적용 교량인 일선대교의 설계 및 시공상 특성들을 분석해 보았다.

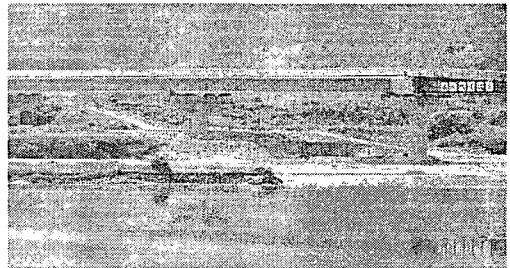


그림 1 시공중인 일선대교 전경

### 2. 복부 파형강판 PSC 박스거더교의 설계 및 시공 - 일선대교

국내 최초로 파형강판을 교량 상부에 적용한 일선대교는 '선산-도개간 국도 4차로 확장공사'에서 경북 구미시 선산읍 생곡리와 도개면의 낙동강을 횡단하여 연결하는 교량이다. 복부에 파형강판을 적용하여 자중을 경감하였으므로 일반 PSC 박스거더교에 비해서 장지간 적용이 가능하였다. 낙동강 하천의 점용기간, ILM 가설의 구조 및 경제적 특성, 그리고

\* 정회원, 현대건설(주) 기술개발원 선임연구원  
\*\* 정회원, 현대건설(주) 기술개발원 주임연구원  
\*\*\* 정회원, 현대건설(주) 기술개발원 연구원  
\*\*\*\* 현대건설(주) 선산-도개간 4차로 확장공사 현장소장

시공성 등을 고려하여 최적 경간장 60m가 선정되었다. 또한 기존에 시공된 복부 파형강판 PSC교의 형고를 지간장과의 관계를 통하여 분석하면 일반적으로 종래 PSC 박스거더교의 상한에 위치하는 것으로 분석되었다. 이는 주형의 자중이 거의 증가하지 않으면서도 형고를 증가시켜 강재의 편심량 확보가 가능하다는 사실에 기인하는 것이다. 일선대교는 형고를 3.5m로 채택하여 1/17.2의 형고비를 갖게 되고, 상행선과 하행선의 일체식 단면을 적용하여 하상 작업시간을 최소화하고, 경제성 및 시공상의 장점을 기하고 있다. 따라서 일반구간 21.2m, 확폭구간 30.91m의 교폭을 갖는 3 Cell 단면으로 구성되며 횡방향 프리스트레스를 도입하게 된다.

표 1 복부 파형강판 PSC 박스거더교 비교

교명	경간 D×O	경간수	폭 D×O	최대경간장 (m)	거설방법	연년도	위치
Cognac교	2×31.0×43.0-105.0	3경간연속	11.7	43.0	F.S.M	1996	프랑스
Moureaux교	2×40.05+2×47.25+44.1+53.52+50.4+324.45	7경간연속	10.8	53.55	I.L.M	1987	프랑스
Asterix교	2×37.4+74.8	7경간연속	13.0	37.4	F.S.M	1999	프랑스
Dole교	2×48.0+5×80.0-496.0	7경간연속	14.5	80.0	F.C.M	1994	프랑스
신카이교 (新開橋)	31.0	단순	14.8	31.0	Precast Girder방법	1993	일본
미츠노키교 (三野木橋)	28.0+4×45.5-210.0	5경간연속	9.7	45.5	I.L.M	1995	일본
혼다교 (本谷橋)	44.513+97.202+56.478+198.193	3경간연속	11.04	97.202	F.C.M	1998	일본
일선대교	50+10×80+50+700	12경간연속	21.2	80.0	I.L.M	시공중	한국

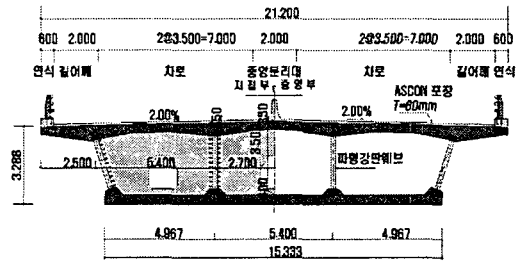


그림 2 일선대교 표준단면도

종방향 텐던은 Internal Tendon과 External Tendon을 병용하게 되는데 Internal Tendon은 시공중 하중을 분담하게 되며 부차강선으로 설계되었는데 상, 하부 콘크리트 플랜지에 배치된다. External Tendon은 2차 고정하중과 활하중을 분담하여 박스거더에서 발생하는 단면력을 고려하여 배치된다. 격벽은 External Tendon의 정착부나 편향부 (Deviator) 역할을 하게 되는데 비틀림 강성의 증가를 위하여 12m간격으로 배치되었다.

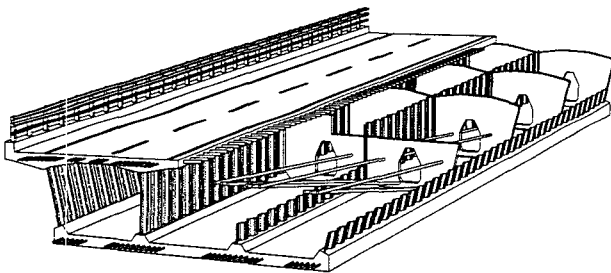


그림 3 일선대교 내·외부텐던 병용 구조

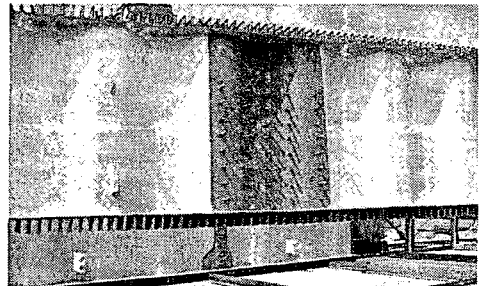


그림 4 일선대교 파형강판 형상

파형강판의 형상은 구조적으로 많은 영향을 미치게 되는데 파고는 전체 좌굴과 아코디언 효과에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 파형강판의 패널 폭은 파형강판의 접합를 고려하여 설계되어야 하며 국부좌굴에도 영향을 줄 수 있는 요소이다. 파형강판의 파장은 패널 폭과 파고 등에 의하여 결정되지만 격벽의 간격과 지간장 등에 의하여 등간격으로 배치되는 것이 유리할 것이다. 특히, 파형강판의 파고를 작게할 경우 횡방향 강성이나 아코디언 효과의 저하가 발생할 수 있으며, 전단 좌굴 성능의 감소도 야기될 수 있다. 일선대교의 파형강판은 평행 패널폭 330mm, 경사 패널폭 270mm를 채택하고 있으며 200mm의 파고와 1,200mm의 파장을 갖도록 설계되었다. 분할된 파형강판의 교축방향 이음은 필렛 용접과 일면 마찰 고정력 볼트이음이 가능한데 이는 파형강판 Web의 특성상 교축방향 강성이 극히 작고 전단력만 존재하는 구조 거동상의 특징에 따른 것이다. 일선대교는 시공이 간편하고 이음부의 미관이 우수하며 품질 신뢰성이 뛰어난 필렛 용접 이음을 채택하고 있다.

### 3. 일선대교 시공단계별 해석 및 안전성 검토

일선대교의 시공 중 안전성을 검증하기 위하여 시공단계별 해석을 실시하였다. 일선대교는 파형강판 복부를 갖는 PSC 교량 가운데 세계 최대 폭인 21.2m의 폭을 갖는 교량이며, 교량의 길이도 800m로 역시 세계 최대이다. 특히, 일선대교는

ILM공법으로 시공되기 때문에 종방향 응력분포가 각 시공단계별로 바뀌게 되며, 이러한 응력의 변화가 시공품질에도 큰 영향을 미칠 수 있으므로 교량을 3차원으로 정밀하게 모델링하여 시공단계별로 안전성을 검토하게 되었다.

일선대교에 대한 모델링은 콘크리트를 Solid요소로, 파형강판을 Shell요소, 그리고 텐던을 Bar요소를 사용하였으며, 추진코는 실제와 동일한 강성을 갖는 Shell요소를 적용하였다. 또한, 하중은 텐던에 종방향 압축력만을 시공단계에 맞추어 도입하였고, 해석프로그램은 DIANA를 사용하였다. 그림 5는 7단계(7seg까지 시공된 단계)를 모델링한 것이며 일선대교 설계시 종방향 해석에서 가장 큰 인장응력이 발생하는 것으로 나타난 단계이다. 그림 6은 7단계에 대한 해석결과로 인장영역(붉은색)과 압축영역(파란색)으로 나누어 종방향 응력을 나타낸 것이다. 2번째 교각(P2) 상부 슬래브 부분에서 인장응력이 나타나고 있는 것을 볼 수 있으며, 단면의 응력 분포를 보면 내측 복부 상단에서 가장 큰 인장응력을 나타내었다. 한편 그 인장응력의 크기는 15~17kg/cm<sup>2</sup>으로 균열이 발생할 정도는 아니지만 시공시 각별한 콘크리트 품질관리가 요구될 것으로 판단되었다. 또한, 이 밖에 다른 단계에서 상부 슬래브에 인장응력이 발생하는 단계는 없었으며, 실제 7seg 시공시에는 별다른 구조적 균열이나 문제점은 발생하지 않았다.

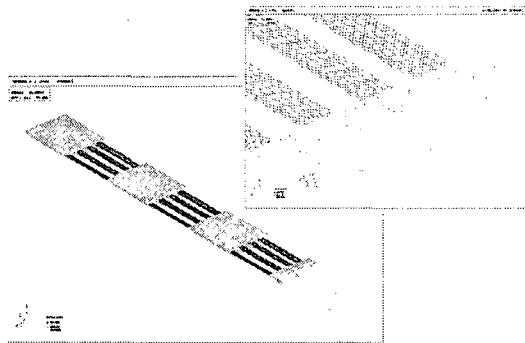


그림 5 3D-모델링(solid: 콘크리트, shell: 파형강판, 추진코)

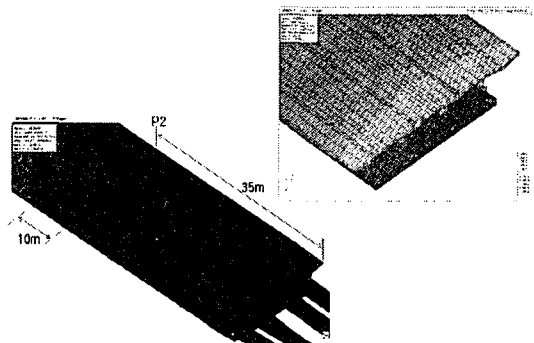


그림 6 시공단계별 해석결과(7단계)

#### 4. 파형강판 플랜지 플레이트의 영향

파형강판 Web PSC교량에 있어서 콘크리트 슬래브와 복부 파형강판의 접합부는 가장 중요한 구성요소라 할 수 있다. 기존의 시공 사례를 바탕으로 분석하면 접합방법으로는 스티드에 의한 접합, 매입 접합으로 크게 나눌 수 있다. 스티드에 의한 접합은 강형과 콘크리트 슬래브의 접합에 일반적으로 사용되고 시공실적이 가장 많아 설계방법이 확립되어 있으며, 일선대교에서도 채택한 방식이다. 이 방법의 경우 플랜지 플레이트와 스티드의 용접에 따른 경제성 측면에서의 약점이 있으나, 시공성 및 내구성 증진효과를 기대할 수 있으며 향후 바닥판을 교환하는 경우에도 상대적으로 유리한 방법으로 인식되고 있다. 매입접합은 파형강판의 상·하단에 측방향의 철근을 용접한 후 파형강판에 구멍을 만들어 여기에 교축직각방향의 철근을 관통하여 콘크리트 슬래브에 매입하는 접합방법이다. 물론 이 방법의 경우 스티드 접합에 필요한 플랜지 플레이트의 용접과 스티드의 용접을 생략할 수 있는 장점이 있으며, 혼다니교에서 채택한 방식이다.

본 연구에서는 플랜지 플레이트가 부재의 전체적인 휨 거동에 어떤 역할을 하고 있는지 알아보기 위해 그림 7과 같은 파형강판보를 제작 중이며, 재하시험 이전에 3차원 비선형해석을 실시하였다. 플랜지 플레이트가 없는 경우(case1)와 플

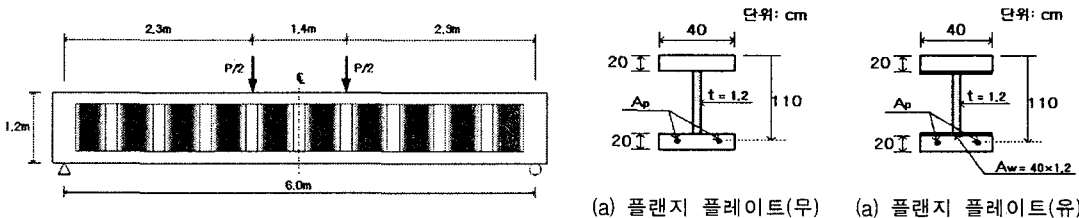


그림 7 해석대상 파형강판 보

랜지 플레이트가 있는 경우(완전합성: case2, 부분합성: case3, 비합성: case4)로 나누어 모델링하였으며, 인터페이스 요소를 사용하여 플랜지 플레이트와 콘크리트의 합성정도에 따라 완전합성(full composite), 부분합성(partial composite), 비합성(non-composite)으로 구분하였다.

그림 8은 해석결과로 얻어진 하중-처짐 곡선으로 플랜지 플레이트가 없는 경우(case1)는 선형구간인 약 80tonf이전에서 플랜지 플레이트가 있는 부분합성의 경우(case3)와 유사한 경향을 나타내었지만, 비선형구간인 약 80tonf이후에는 더 이상 휨 강성이 증가하지 못하는 것을 알 수 있었다. 이것은 플랜지 플레이트가 콘크리트의 파괴이후에도 휨에 저항하기 때문인 것으로 사료된다. 그림 9는 각 case별 교축방향 응력도를 나타낸 것으로, 완전합성에서 비합성으로 갈수록 하부 플랜지 플레이트에 응력이 증가하는 것을 알 수 있다.

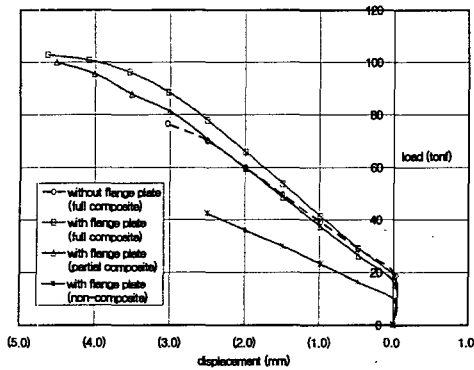


그림 8 하중-처짐 곡선

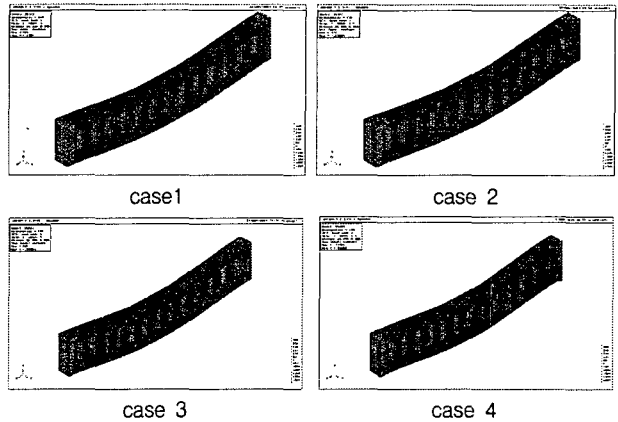


그림 9 응력도

## 5. 결론

기존에 가장 일반적인 구조형식으로 인식되던 콘크리트 구조와 강구조를 구조적 성능은 물론, 경제적 효과를 얻기 위하여 동일 단면이나 일정 구조물에 동시에 적용한 복합구조(Hybrid Structure)는 최근 들어 더욱 활발하게 적용되어 오고 있다. 파형강판은 토목구조물에 적용될 수 있는 효율적인 신 구조형식으로서 프리스트레스트 콘크리트 부재와 조합하여 매우 뛰어난 구조물을 설계할 수 있다. 본 논문에서는 국내 최초 파형강판 적용교량인 일선대교에 대한 시공단계 해석을 통하여 구조안정성을 검토하였다. 또한, 접합형식에 따른 구조성능 분석을 위하여 플랜지 플레이트와의 합성정도에 따른 수치해석을 수행하였으며, 향후 합리적인 접합부 설계모델을 개발하고자 한다.

## 참고 문헌

- 김광수, 정광희, “파형강판 복부를 갖는 프리스트레스 콘크리트 박스거더 교량의 설계와 시공단계 해석”, 전산구조공학회 제17권 제4호 2004, pp.29-34
- 김광수, 김우중, “프리스트레스트 콘크리트 교량의 발전 및 전망”, 한국콘크리트학회지 제16권 1호, 2004, pp.22-32
- 주성문, 조충영, 김명철, “파형강판 Web PSC 상형교의 계획과 설계”, 대한토목학회지 제50권 제12호, 2002. 12, pp.38-43
- 현대건설, 유신코퍼레이션, “파형강판 Web PSC 박스거더교 - 계획, 설계, 시공, 유지관리 및 기타”, 현대건설, 2001
- 현대건설 기술연구소, “합성구조 및 복합교량 Workshop”, 2003
- 土木學會, “複合構造物設計・施工指針(案)”, 1997, 199pp.
- Elgaaly, M., Seshadri, A., Rodriguez, R., and Ibrahim, S., “Bridge Girders with Corrugated Webs”, Fifth International Bridge Engineering Conference, TRR 1696, 2000
- Masataka, S. and Keiichi, A., “PC Bridges with Corrugated Steel Web - Outline of Planning and Design -”, 橋梁と基礎 Vol.36 No.8, 2002, pp.8-19
- Virlogeux, M., “New Trends in Prestressed Concrete Bridge”, Fifth International Bridge Engineering Conference, TRR 1696, 2000