

프리캐스트 I형 거더를 이용한 조립식 중공슬래브교 개발

김현기

가톨릭관동대학교 에너지플랜트공학과

Development of Prefabricated Voided-Slab Bridge Using PSC-I Girders

Hyun-Gi Kim

Department of Energy Plant Engineering, Catholic Kwandong University

요약 본 논문은 중공슬래브 교량의 장점을 극대화하여 프리캐스트로 제작된 PSC-I 거더의 단순한 조립을 통해 중공슬래브를 형성시키는 교량공법을 제안하고 이를 검증하였다. 하천이나 단지 내 교량과 같이 저형고 거더교가 요구되는 현장에 고가인 강합성 계열의 교량이 적용되어 과도한 공사비가 소요되고 있으며, 다양한 장점을 갖는 중공슬래브 교량이 콘크리트의 현장타설로 인해 중공부에 구조적 균열이 발생하여 그 적용성이 확장되지 못하고 있는 실정이다. 따라서, 본 연구를 통해 새로운 거더공법을 대안으로 제시하고 설계기준에 따른 강도와 응력검토, 제작을 위한 거푸집의 설계, 시공단계별 절차 등 현장적용을 위한 기반기술을 개발하였으며, 조립된 거더가 일체로 거동하도록 각 거더의 횡방향 연결을 위한 다양한 공법을 제시하고 적정성을 검토하였다. 또한, 실물크기의 실험체 거더 2본을 제작하고 시공과정에서의 문제점들을 도출하였으며, 하중재하 실험을 수행하여 거더의 성능과 적용성을 검토하였다. 실험결과, 하중의 편측 재하시 발생한 수직변위 계측을 통해 두 거더가 일체로 거동하는 것을 확인하였으며, 설계하중 내에서 선형탄성 휨 거동을 보이며 예상된 설계 강도를 넘어서는 우수한 성능을 나타내었다.

Abstract The bridge type of steel concrete composite rahmen or pre-flex has been applied where a lower depth girder is required due to vertical clearance restrictions caused by the crossing of rivers and roads. On the other hand, because these types are not only complicated to manufacture and construct, but also expensive, void slab bridges may be an alternative. In this study, prefabricated PSC-I shape girder was used to make a void slab and all procedures for bridge development, such as analysis, design, fabrication, and real-scale test, were included in the scope of research. The results of this study will provide sufficient background data to be applied to the field and the structural safety has been verified through experiments.

Keywords : Aesthetic Landscape, Economic, Precast Girder, PSC, Void

1. 서론

국토교통부에서 발표하는 도로교량 및 터널현황조사 [1]에 따르면 최근 10년간 매년 교량 개소수는 연평균 3.8%로 꾸준히 증가해 왔으며, 경간장 20m미만인 경우 RC슬래브교와 라멘교가 대부분을 차지하고 경간장 20~50m인 경우 PSC 거더교량 형식이 절반이상인 것

로 나타나 시장규모 또한 매년 증가하고 있다. 특히, 형하고 제약이 있는 하천횡단이나 단지내 건설되는 짧은 경간장의 교량이 최근 증가하고 있는 추세이다.

그러나, 일반화된 개방형 PSC 거더의 경우 형고가 높아 불가피하게 고가의 강합성 교량형식이 적용되어 공사비 증가를 초래하고 있으며, RC슬래브교에서 자중을 줄이고 저항력이 불필요한 부분에 중공부를 도입한 중공슬

이 연구는 가톨릭관동대학교 학술연구비(CKURF-201604210001)에 의해 지원되었음.

*Corresponding Author : Hyun-Gi Kim(Catholic Kwandong Univ.)

Tel: +82-33-649-7374 email: hyunky@cku.ac.kr

Received March 2, 2017

Revised (1st April 18, 2017, 2nd April 25, 2017)

Accepted June 9, 2017

Published June 30, 2017

래브 교량 형식은 초기건설비가 저렴하고 차륜하중 분산 효과와 미관유지등 많은 장점을 가진 형식임에도 불구하고, 폐쇄형 중공거푸집의 매설에 따른 철근배근이 복잡하고, 콘크리트 타설시 중공부 부력으로 인한 품질저하와 심각한 균열발생 등의 문제로 사실상 채택되지 못하고 있다.

또한, 중공관이나 중공부 형성을 위한 부부재가 콘크리트 내부에 배치되어 일반적인 RC구조물의 균열거동보다 복잡한 거동을 나타낼 뿐 아니라, 일반적인 철근콘크리트 부재에 대한 단면해석이론과 설계방법을 그대로 적용하여 중공부의 영향이 무시되고 있는 기술수준에 머물고 있다.

한편, 도로 및 철도교량에 널리 시공되고 있는 PSC-I 거더는 1950년대초 미국에서 처음 건설된 이후 1960년대에 국내에 도입되어 지금까지 중, 소경간장의 교량에 널리 시공되고 있는 대표적인 교량 상부구조 형식으로, 비교적 간편한 설계와 시공성 및 경제성을 장점으로 도로교를 비롯하여 철도교에 적용되고 있다[2]. 최근들어, 고강도 콘크리트 개발과 보급에 힘입어 활용범위를 넓히려는 다양한 시도가 이루어져 경간장 40m를 넘어서는 PSC-I거더가 개발되고 있으나, 형고가 높아 형하고 제약이 불가피한 단차나 하천교량에는 적용성이 떨어지므로, 대체 공법으로 강합성 라멘교 형식이 주로 적용되고 있다. 고가의 강재를 사용한 강합성 라멘교는 콘크리트계열의 교량형식보다 경제성이 떨어져 대안공법의 개발이 절실한 실정이다.

따라서, 본 연구를 통해 중공슬래브 교량의 역학적 장점을 유지하면서 경제성을 확보하기 위해 다양한 형태의 중공부가 형성되도록 중앙부를 수직분할하여 블록화 하는 개념을 적용하여, 프리캐스트 I형 거더를 제작하고, 현장에서 강선을 이용해 횡방향 긴장력을 도입하여 조립하는 중공슬래브 교량인 PCB-SLAB(Prestressed Concrete Box-Slab) 공법을 제시하였다. 이 공법은 콘크리트 양생시 중공부 주변의 후프텐션에 의한 균열발생이 불가피하던 종래의 문제점을 근본적으로 해결하고, 운반 및 거치시 폐단면으로 인해 발생하는 부정정력에 의한 균열 발생도 차단 할 수 있다. 또한, 본 연구에서 새롭게 제시한 조립식 중공슬래브 교량의 실물 거더 제작을 통해 설계단계와 시공시 발생하는 문제점을 개선 하였고, 정동적 재하실험을 수행하여 구조적 안정성과 적용성을 검토하였다.

2. 단면 설계

2.1 PCB-SLAB 개념 및 기본단면

기존의 폐합단면 중공슬래브와 달리 개단면 PSC-I거더의 조립, 25m~35m 경간의 적용을 위한 프리캐스트로 제작, 품질향상 및 공기단축, 후프텐션으로 인한 균열배제, 합리적인 형상의 중공부 형성 등 기본적인 제한사항을 설정하였다. Fig. 1과 같이 I형 개단면을 병렬조립하여 중공부를 형성시키되, 제작시 거푸집의 원활한 운용성을 고려하여 원형, 사각형, 다각형의 다양한 형상으로 구현이 가능하고 변단면을 통해 구조성능을 효과적으로 향상시킬 수 있도록 하였다.

Fig. 2의 기본단면은 경간장 30m의 국도2차로 표준폭원(B=11.4m) 횡단으로 가정하여 도로교 및 콘크리트 설계기준에 따라 단면을 설정하였다[3][4].

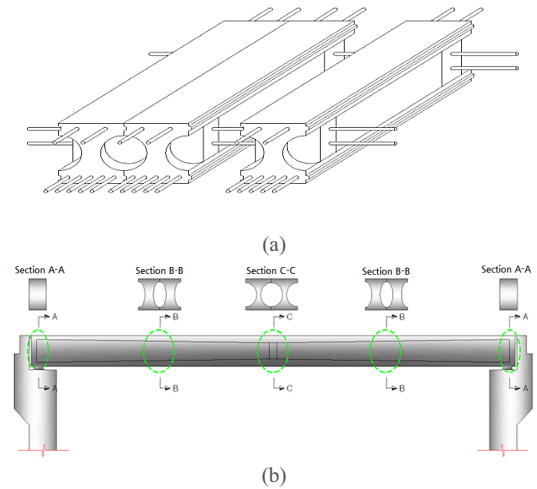


Fig. 1. Basic concept of PCB-SLAB girder section (a) Arrangement (b) Applied section

상부플랜지의 두께는 철근콘크리트 바닥판기준으로 최소 220mm, 횡방향 프리스트레싱을 도입할 경우 최소 230mm 이상 확보되어야 하므로 250mm로 최소두께를 결정하였고, 상하부 플랜지의 폭은 2.3m~2.5m, 하부플랜지의 두께는 최소 140mm 이상이 되어야 하므로 200mm, 복부의 폭은 PS강재와 정착구를 고려하여 300mm로 설정하였다.

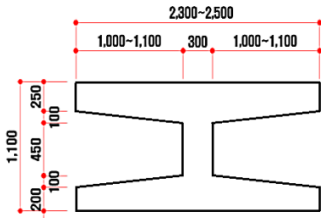


Fig. 2. Cross-sectional assumption (unit: mm)

단면형태는 Fig. 3에 나타난 등방성판구조, 이방성판 구조와 격자구조 단면으로 가정하고 교축방향 단위 길이 당 자중을 계산하여 Table 1에 나타내었다. 중공슬래브 교의 단점인 자중을 최소화 할 수 있는 (b), (c)경우를 선택하여 추가적인 검토를 수행하였다. 등방성판구조는 속이 빈 슬래브교의 최소치수 규정을 만족하는 구조이고, 이방성판구조는 일체화된 다중 박스거더로서 슬래브를 통해 하중이 분배되는 구조를 가지며, 격자구조는 각각 분리된 거더와 가로보의 격자구조로 하중이 분배되는 구조형태이다[5].

이방성 판구조(b)는 상부슬래브의 연속으로 두께를 최소화 할 수 있고, 중간가로보 없이 일정간격으로 횡방향 강선을 도입하여 연속성을 유지하고 포장균열을 억제 할 수 있으나 전단키가 필요하다.

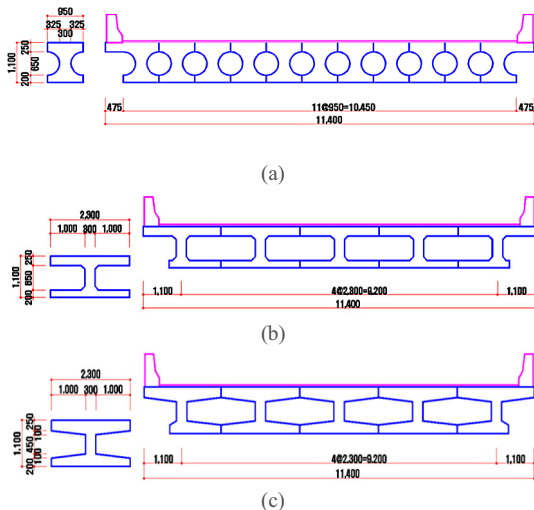


Fig. 3. Comparison of cross-section shape (unit: mm) (a) Isotropic panel (b) Orthotropic panel (c) Lattice structure

Table 1. Comparison of self-weight by model shape

Model	Area(m ²)	Self-weight(kN)	Ratio(%)
(a)	8.414	210.35	100
(b)	5.905	147.63	70.2
(c)	6.720	168.00	79.8

격자구조(c)의 경우는 각 거더가 가로보를 통해 하중이 분배되는 구조로 상부플랜지 돌출부의 두께를 증가시키고, 중간가로보 위치에 횡방향으로 강선이 집중되게 적용되어야 한다. 전단키는 불필요하나 거더간 상대처짐으로 공용중 포장균열 발생우려가 높고 자중도 크다.

따라서, 3가지 경우 모두 각 거더가 조립후 박스형태로 완성되어 충분한 강성이 확보되므로, 경제성과 시공성에 기반하여 자중이 가장 작은 이방성 판구조를 적용하여 구조해석과 실험을 수행하였다.

2.2 횡방향 거더 연결방안

사전에 제작된 거더를 각각 교대에 거치시키고 조립하는 시공법으로 건설되는 본 교량의 경우 각 거더의 횡방향 연결이 중요한 기술이다. 즉, 상재하중대해 하중분배를 원활하게 수행하고 연결부 전단력에도 저항하는 구조로 보강되어야 한다. 따라서, 횡방향 긴장재를 도입하는 방식으로 플랜지부분에 전단키(shear key)를 도입한 방법과 접착제 도포에 의한 접합방법에 대해 검토하였고, 횡방향 긴장재를 배제하고 현장타설에 의한 키 세그먼트(key segment)로 처리하는 횡방향 거더 연결방안에 대해 검토를 수행하였다.

2.2.1 키 세그먼트 공법에 의한 횡방향 연결

횡방향 강선의 도입은 인장작업용 작업대차가 필요하고 인접거더와의 연결부분에 쉬스관의 이격발생 우려가 높다. 또한, 하부플랜지 종방향 텐던과의 간섭으로 설계가 복잡해지고 접합부 마감처리가 곤란하여 시공성저하와 품질하자 발생 가능성이 높으므로, 횡방향 텐던을 배제하고 철근이음과 무수축물탈을 이용하여 키세그먼트로 처리하는 방안을 검토하였다. Fig. 4의 상하부 플랜지의 접합상세와 같이 하부플랜지를 무수축물탈을 이용해 연결하고 상부플랜지는 현장타설 콘크리트를 이용해 횡방향 연결하도록 하였다.

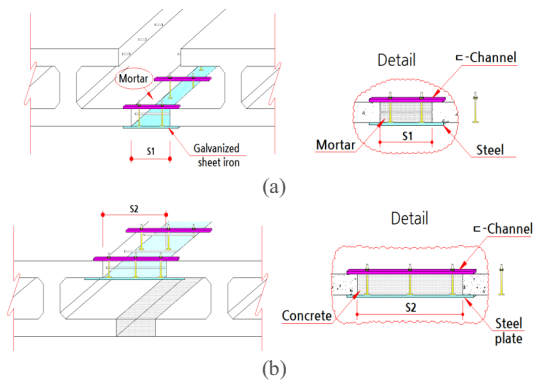


Fig. 4. Girder connection details without PS tendon (a) Lower flange (b) Upper flange

따라서, 강결 접합을 통해 슬래브 거동을 확보하고, 제작 및 시공오차는 연결부에서 처리가 가능한 장점이 있으나, 현장타설에 의한 절대공기 단축은 어려워질 수 있다.

2.2.2 횡방향 접합면 검토

횡방향 접합을 위해 Fig. 5(a)와 같이 슬래브 부분에 전단키를 도입하였다. 전단키를 설계하기 위한 전단력산정을 위해 판요소(shell)를 이용한 3차원 유한요소해석을 수행하여 전단키 설치위치에서의 최대전단력 48.8kN을 얻었고 전단키의 폭 100mm로 가정했을 때 발생응력이 0.478MPa로 허용응력 0.519MPa 이하로 최소 100mm 이상으로 적용되어야 하는 것으로 나타났다.

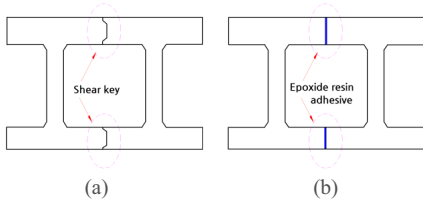


Fig. 5. Lateral girder connection with PS tendon (a) Shear-key (b) Epoxide resin adhesive

그러나, 거더간 횡방향 연결에 전단키를 두는 방법은 종방향으로 길이가 긴 거더부재의 경우 긴장재의 인장작용에 따른 수축량의 차이에 의해 정확하게 접합부를 일치시키기 어려워 현장적용성이 결여되므로, Fig. 5(b)와 같이 접착제의 의한 방법이 추가적으로 검토되었다. 본 연구에서는 다른 접착제와 달리 용제의 증발에 의해 건조, 경화되지 않고 액체상태의 물질이 고화되는 것으로

콘크리트간의 접합제로 가장 널리 이용되고 있는 에폭시 수지를 적용하였다.

2.2.3 횡방향 긴장재 도입

플랫타입의 정착구와 덕트를 이용하여 강선을 긴장하는 방식으로 국내의 프리캐스트 공법에 일반적으로 적용되는 공법이다. 본 연구는 I형 거더의 쉘탈레버부를 확장시켜 중공부를 형성시키므로 확장된 플랜지의 지지점간 거리가 길어져 철근을 통한 보강은 바닥판의 두께를 증가시키게 되므로, Fig. 6과 같이 횡방향 긴장재 도입이 검토되었다. 상부 플랜지의 접합은 방수를 고려해 상세 "A"와 같이 모따기 및 에폭시 도포 후 몰탈 처리하고 쉬스관은 상세"B"와 같이 접합부를 블록아웃 시켜 쉬스관을 연결하고 테이핑 처리하게 된다. 하부 플랜지 접합부는 상세"C"와 같이 모따기를 통해 외관부 면처리를 수행하고 블록아웃부를 두어 쉬스관 연결을 고려하도록 하였다.

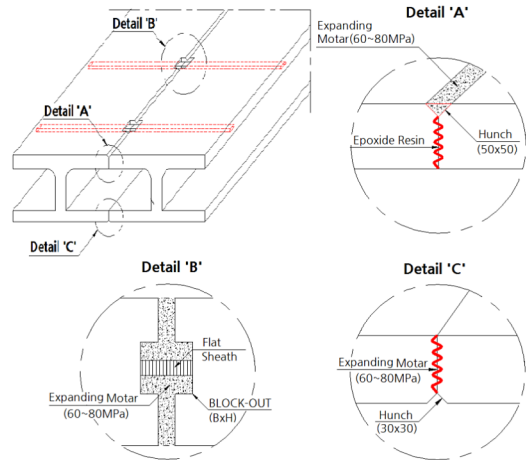


Fig. 6. Perspective and detail views of girder arrangement for lateral pre-stressing

2.3 최적형고 검토

프리캐스트 중공슬래브 교량이 종래 철근콘크리트(RC)교량의 경간장을 넘어서도록 유사거더 형식의 연장별 적용형고를 검토하여 Table 2에 나타났다. 경간장 30m까지는 합성형 라멘교에 경쟁력을 가질 수 있도록 형고를 0.9~1.2m 범위내로 한정하였다.

Table 2. Girder height according to girder type and span length

Span Length (m)	RC Rahmen	RC Slab	PPC Slab	Composit Rahmen
10	0.7	0.6	-	-
15	1.0	0.9	-	-
20	-	-	0.8	-
25	-	-	1.0	1.0
30	-	-	1.55	1.1

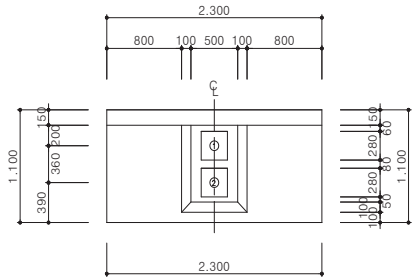


Fig. 7. End cross-section dimension (unit: mm)

Table 3. Review the optimum height of PCB-SLAB for each span length

Span Length (m)	Height (m)	Pre-stressing Wire	Stress (MPa)	Check
20	1.10	0.6"-15EA x 2	0.598	OK
25	1.10	0.6"-15EA x 3	0.663	OK
30	1.20	0.6"-15EA x 4	0.435	OK

구조검토 결과, 20m 지간의 경우는 0.9m까지 형고를 낮출 수 있으나, Fig. 7과 같이 정착판 280mm와 정착판간 최소간격 360mm를 고려하여 최소형고를 1.1m로 결정하였고, Table 3에 연장별 형고를 나타내었다. 최종 형고는 중앙부 거더 하연에 발생하는 최대응력이 긴장에 의해 압축상태를 유지하도록 하는 범위에서 결정하였다.

3. 구조해석 및 경제성검토

3.1 구조해석 개요

완성계 프리캐스트 중공슬래브 교량의 구조안전성 검토를 위해 국도2차로 표준폭원을 기준으로 외측거더 2개와 내측거더 3개의 거더폭 2.3m를 적용하였고, 구조해석에는 Fig. 8과 같이 MIDAS CIVIL 프로그램[6]을 이용한 격자해석과 구조계산을 수행하였다.

Table 4에 나타난 재료특성과 설계기준에 따라 허용

휨 압축응력은 프리스트레스 도입직후 19.2 MPa과 설계하중 작용시 18.0MPa을 적용하고, 허용 휨 인장응력은 프리스트레스 도입직후 1.414MPa과 설계하중 작용시 3.162MPa로 응력을 검토하였다.

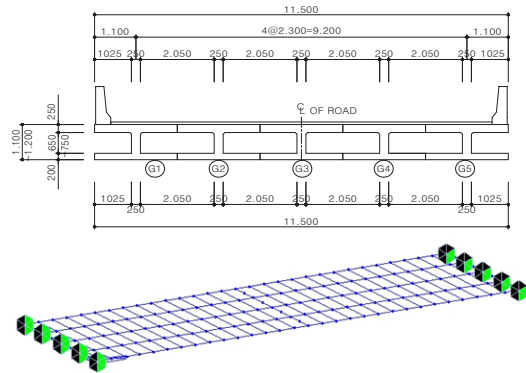


Fig. 8. Typical cross-section and lattice model for analysis (unit: mm)

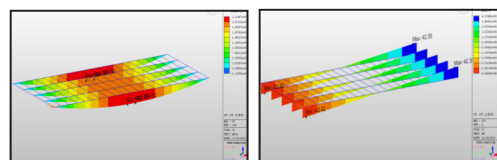
Table 4. Material property for structural analysis

Material	Property
Concrete	Design Strength(f_{ck}) : 40 MPa
	Elastic Coefficient(E_c) : 3.089×10^4 MPa
Reinforcing Bar	Yielding Strength(f_y) : 400 MPa
	Elastic Coefficient(E_s) : 2.000×10^5 MPa
PC Wire	$\phi 0.6''$ -17wire Multi-Strand Tendon
	Tensile Strength(f_{pu}) : 1,900MPa
	Yielding Strength(f_{py}) : 1,600MPa Sectional Area : 2357.9 mm ²

또한, 거더의 자중을 1차 고정하중, 포장 및 방호벽을 2차 고정하중으로 적용하고 DB-24를 3차선 재하 하여 20m, 25m, 30m 지간을 모두 검토하였다.

3.2 종방향 구조해석 결과 및 검토

구조해석 결과 단면력과 부재력을 Fig. 9와 Table 5에 나타내었다. 동일한 방법으로 20m, 25m, 30m 지간의 구조해석을 수행하였고, 1차 고정하중(DL1)에 의한 단면력이 2차고정하중(DL2), 차량하중(VL), 기타하중(EL)에 비해 가장 큰 단면력을 보였다.



(a)

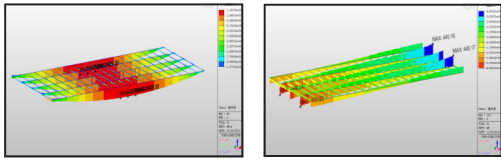


Fig. 9. Diagrams of longitudinal analysis result due to dead and live load (L=20m) (a) Moment and Shear force by dead load (b) Moment and Shear force by live load

Table 5. Member force of analysis result

L=20m	Inner Girder		Outer Girder	
	Moment (kN · m)	Shear Force(kN)	Moment (kN · m)	Shear Force(kN)
DL1	1469.292	295.335	1469.292	295.335
DL2	361.659	49.222	428.574	126.241
VL	1130.825	449.233	1183.767	236.057
EL	199.000	20.000	199.000	20.000

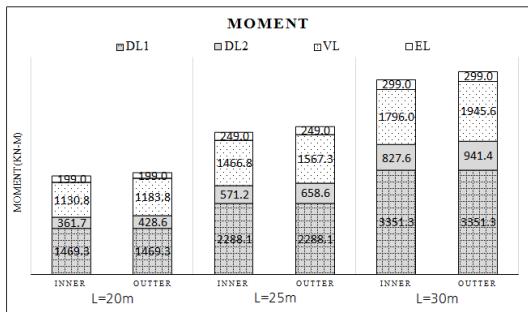


Fig. 10. Moment due to span length

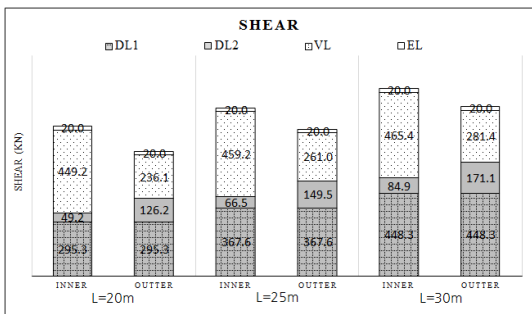


Fig. 11. Shear force due to span length

지간 20m일 때 1469.292kN · m, 25m일 때 2288.059kN · m, 30m일 때 3351.289kN · m의 모멘트가 발생하여 지간이 5m씩 증가함에 따라 모멘트 및 전단력이 약 1.5배 커졌으며, 최대 단면력의 발생위치는 비슷한 경향을 보였다.

Table 6. Results of stress check

Span Length	Stress (MPa)	Inner Girder-Mid.		Outer Girder-Mid.	
		TOP	BOTTOM	TOP	BOTTOM
L=20m	f_{ap}	1.992	6.646	1.992	6.646
	f_d	6.434	0.916	6.734	0.598
L=25m	f_{ap}	3.118	9.481	3.118	9.481
	f_d	9.354	1.163	9.833	0.663
L=30m	f_{ap}	4.468	11.437	4.455	11.503
	f_d	12.012	1.131	12.649	0.435

Table 7. Bending strength check

Span Length	Factored Moment (kN · m)		Normal bending Strength (kN · m)	Check
	Inner Girder-Mid.	Outer Girder-Mid.		
L=20m	4,898.40	5,099.22	6,189.29	O.K
L=25m	6,957.64	7,287.26	8,909.01	O.K
L=30m	9,380.75	9,850.52	12,328.98	O.K

Table 8. Deflection check of girder

Span Length	Live Load Deflection (mm)	Allowable Deflection (mm)	Check
L=20m	6.897	23.625	O.K
L=25m	13.457	29.875	O.K
L=30m	22.046	36.125	O.k

Fig. 10과 Fig.11는 지간길이에 따른 발생 모멘트와 전단력을 내외측 거더별로 정리한 그래프이며, 지간이 길어질수록 단면력은 증가하였다.

Table 6에 정리된 응력검토결과를 보면, 지간별 프리스트레스 도입직후 프리스트레스에 의한 응력과 자중에 의한 발생응력의 합이 허용응력 이내($-1.414 \text{ MPa} < f_{ap} < 19.2 \text{ MPa}$)로 나타났고, 설계하중 작용시 유효프리스트레스와 하중적용에 따른 응력도 허용응력 이내($f_d < 18.0 \text{ MPa}$)로 나타났다.

Table 7은 각 지간별로 발생한 계수모멘트와 설계단면의 공칭휨강도를 비교한 결과를 나타낸다. 내측과 외측 거더 모두 강도가 큰 것으로 나타나 충분한 안전율을 확보하였다. Table 8은 지간별 처짐 검토 내용을 나타내며 도로교설계기준의 허용처짐량 제한규정을 만족하였다.

3.3 횡방향 구조해석 결과 및 검토

횡방향 구조해석은 L=20m, $\phi 0.6''$ -5wire Multi-Strand Tendon이 적용되었고, 단면적은 693.5 mm^2 , 긴장력은 1440MPa로 Fig. 12와 같이 배치된 형태이다.

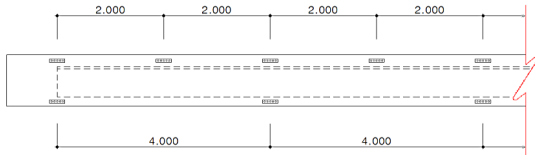


Fig. 12. Lateral tendon arrangement (unit: mm)

거더 연결부 강성을 반영하기 위해, 빔(Beam)요소를 이용한 격자해석으로 교량 중앙부에 단위하중(P)을 재하하고 처짐값(δ)을 구한 후 $P=K\delta$ 에 따라 지점 스프링으로 변환하여 횡방향 모델의 경계조건을 설정하였다. Fig. 13은 경계조건이 적용된 횡방향 해석을 위한 모델링을 나타낸다.

횡방향 구조해석을 통해 긴장력 도입에 따른 응력검토를 수행하였고, 발생 단면력으로 계수모멘트를 산정하여 Table 9와 같이 공칭휨강도와 비교한 결과 충분히 안전한 것으로 검토되었다. 또한, Fig.14~15와 같이 상하부 슬래브의 상하연 응력이 허용휨압축응력 18.0MPa과 허용휨인장응력 3.162MPa 이내로 나타났다.

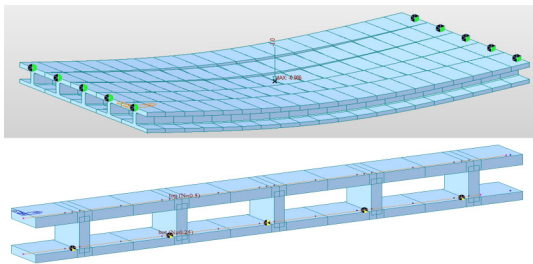


Fig. 13. Modeling and boundary condition for lateral analysis

Table 9. Lateral bending strength check

Member		Factored Moment (kN · m)	Normal bending Strength (kN · m)	Check
Upper Slab	End	71.669	89.827	O.K
	Center	39.385	61.878	O.K
Web	Support	14.783	27.542	O.K
Bottom Slab	Outer	41.734	68.930	O.K
	Inner	46.459	68.930	O.K

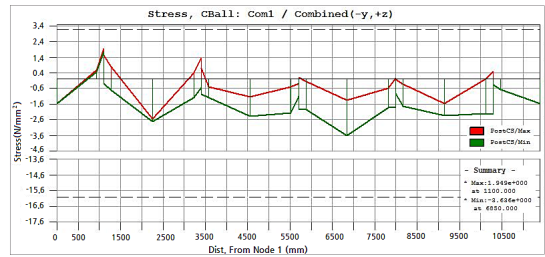


Fig. 14. Stress check of post-tensioned upper slab

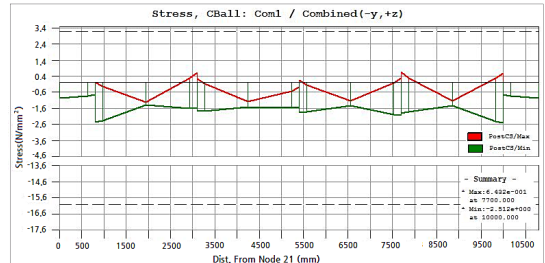


Fig. 15. Stress check of post-tensioned bottom slab

3.3 경제성 검토

교량의 경제성은 구성요소와 시공법에 따라 차이가 발생한다. 강합성 계열과 비교하여 경제성이 우수한 개량형 PSC-I거더는 형하고 제약이 있는 현장에 적용하지 못하므로, 복잡한 공종과 공기지연, 강재로 인한 비용상승 등의 단점에도 불구하고 강합성 계열의 교량이 여전히 적용되고 있다. 본 연구를 통해 개발되는 PCB-SLAB는 형고 제약이 있는 경우에도 적용성이 좋고 경제적인 것으로 판단된다. 따라서, 이를 검토하기 위해 한국도로공사에서 2013년 적용한 단가기준을 토대로 형식별 상호 비교검토를 수행하였고 Table 10의 결과를 얻었다[7].

Table 10. Comparison of girder construction cost

Span Length	Construction cost by girder Type(won per m ²)			
	PSC-I (General)	PSC-I (Modified)	PCB-SLAB	Steel&Con/c Composite
L=20m	-	535,000	586,000	601,000
L=25m	490,000	550,000	597,000	696,000
L=30m	502,000	564,000	619,000	743,000
Aver.	496,000	549,666	600,666	680,000

4. 제작 및 시공검토

4.1 거푸집 검토

PCB-SLAB교량은 폭원이 2.3m이므로 1회 타설시 하부슬래브 층진이 불완전하여, 2차 분할 타설하도록 계획하였다. Fig. 16과 같이 1차타설시 하부슬래브의 측면부에 거푸집이 설치되고, 2단계로 복부와 상부슬래브 하면에 설치되며, 3단계로 상부슬래브 측면에 설치된다. 거푸집은 양생 후 탈형을 고려하여 힌지부를 도입한 것이 특징이다.

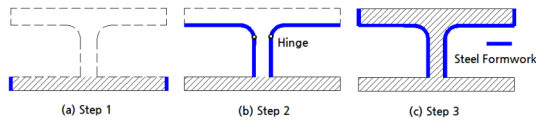


Fig. 16. Concrete placing procedure using steel formwork

콘크리트 타설순서에 따른 거푸집 제작시 고려사항으로는, 상하부 슬래브가 변폭이 가능하도록 유연성 확보, 25m지간 이상일 경우 복부의 확폭부 변단면 고려, 구조강성 확대 및 탈형을 위한 힌지도입, 복부 거푸집 지지와 정확도 확보를 위한 타이 및 매립볼트 설치 등이 필요한 것으로 나타났다.

4.2 시공순서 검토

4.2.1 단계별 제작순서

PCB-SLAB의 제작은 일반거더와 유사하나 상부 폭원이 넓어 2차분할 타설이 필요하므로 이에 따른 시공순서와 절차를 확보하기 위해 실물거더를 제작하였다. 제작대 설치 후 철근과 슈스관을 조립하고 1단계 거푸집을 조립한다. 이어서 콘크리트 타설과 양생을 한 후, 2단계 거푸집을 조립하고 2차로 콘크리트를 타설, 양생, 탈형의 단계를 거쳐, 강선 인장, 그라우팅, 단부마감으로 거더가 완성된다. Fig. 17은 상기의 순서로 제작되는 과정을 보여준다.

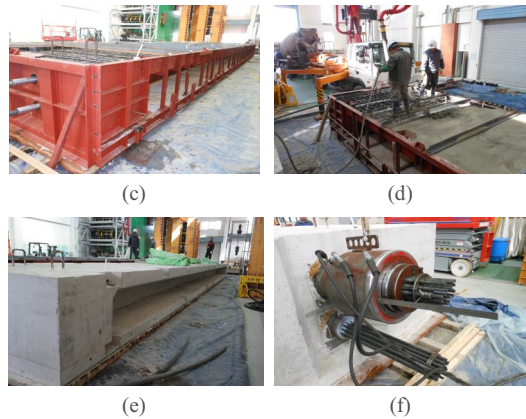


Fig. 17. Manufacturing scene of PCB-SLAB girder (a) First formwork fabrication (b) Concrete placing and curing (c) Secondary formwork fabrication (d) Secondary concrete placing (e) Formwork remove (f) Tensioning tendons

4.2.2 거더간 병렬시공 검토

현장여건을 고려하여 실제 거더 시공시 발생할 수 있는 문제점에 대한 사전 검토를 목표로 실험체 거더두 개를 각각 거치하는 단계와 횡방향으로 연결하는 작업을 수행하였다. 에폭시를 이용한 면 접합 후 횡방향 텐던을 이용하여 긴장력을 도입하였다. 횡방향 텐던의 긴장순서는 슬래브에서 발생할 수 있는 2차응력과 오차를 최소화하기 위해 거더 중앙부에서 단부쪽으로 순차적으로 긴장 작업을 수행하였다. 거더간 횡방향 연결 절차를 Fig. 18에 나타내었다.

횡방향 연결시공을 통해 철근의 연결이나 단면형상의 변동, 거푸집설계 등에서 수정될 내용은 설계단계에 간단히 반영할 수 있는 사항들이지만, 횡방향 긴장과 에폭시 접합을 통한 연결방법은 구조안전성과 시공성면에서 효과적이지 못한 것으로 나타났다. 고공현장에서 횡방향 강연선의 삽입이 어려울 뿐 아니라, 에폭시 접합 면적이 전단면의 20% 이하로 나타나 접합효과가 미미하고, 거더 접합부의 누수발생우려가 높으며, 가설시 교차면 정위치 시공이 쉽지 않은 등 다양한 문제점도 나타났다.



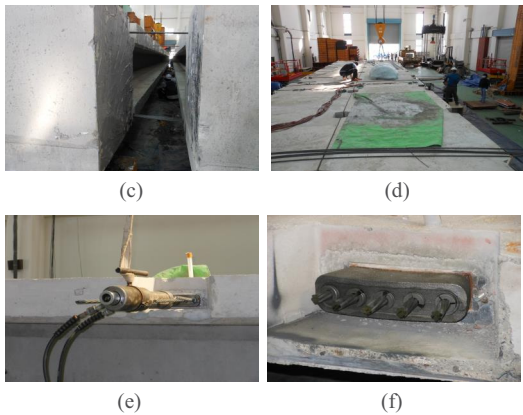


Fig. 18. Lateral connection procedure of girder (a) Girder arrangement (b) Strand insertion (c) Epoxy application (d) Tendon jacking (e) Anchoring wedge

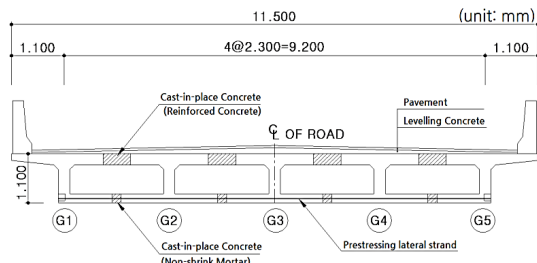


Fig. 19. Modified girder section for Lateral connection

따라서, 종방향 슬래브의 접합면은 거더 제작시 정밀 접합면 제작이 어려워, 일부 현장타설 공법을 도입하도록 개선하였다. Fig. 19와 같이 하부슬래브의 경우 5cm 정도의 유격을 두어 무수축콘크리트를 타설한 후 횡방향 거더의 긴장으로 접합시키고, 상부슬래브의 연결은 약 50cm 정도의 간격을 두어 NCHRP[8]나 철근콘크리트 시방서의 겹이음과 같은 별도의 철근 연결상에 따라 현장타설 하도록 개선하였다.

5. 실물모형 재하실험

5.1 실험체 설계 및 제작

실험대상 교량은 앞서 설계된 연장 20m, 폭 11.5m의 도로교량이며, Fig. 20과 같이 실물모형실험을 위한 거더 2본은 높이 1.1m, 폭2.3m를 적용하였다. 실험체 제작과 실험은 한국건설기술연구원 구조실험동에서 이루어졌으며, 2개의 거더를 제작하고 지점 위에 거치시킨 뒤

일체화 하는 순서로 제작하였다.

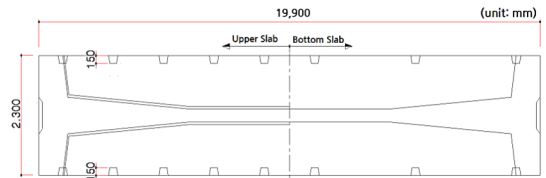


Fig. 20. Girder dimension of specimen

거더에는 종방향으로 2개의 덕트에 각각 15.2mm 직경의 PS강연선 18가닥이 배치되고, 덕트당 34,544.5kN (1383.7MPa)의 긴장력이 도입되었다. 횡방향 긴장계로는 15.2mm 직경의 5가닥이 배치되는 플랫폼태의 정착구가 2.0m 간격으로 배치되었으며, 강연선 1가닥 당 상·하부 슬래브에 각각 200kN, 150kN의 긴장력이 도입되도록 설계되었다.

Table 11. Bending moment by load case and loading force for test

Load Case	Comb.	Bending Moment(kN · m)			Loading (kN)
		Inner	Outer	Max.	
DL1	M _{d1}	1545.0	1545.0	1545.0	323.6
DL2	M _{d2}	364.7	428.6	428.6	89.8
VL	M _{live}	1130.8	1183.8	1183.8	247.9
Service Load	M _{d2} +M _{live}	1495.5	1612.3	1612.3	337.7
Factored Load	1.3M _{d2} +2.15M _{live}	2905.3	3102.2	3102.2	649.7

Table 11은 사용하중 및 계수하중에 따른 최대모멘트와 하중재하 실험을 위한 하중산정표를 나타낸다. 여기서, 재하하중은 지간 19.1m를 갖는 단순지지된 보로 가정하고 최대 휨모멘트로부터 거더당 산정된 값이다.

5.2 계측기 배치 및 하중재하

실험에 사용된 변위계와 변형률 게이지는 계측 단계별 목적에 따라 위치가 결정되었다. 시공단계의 계측을 위해 종방향 긴장력 도입단계에서는 중앙하부 슬래브의 상단에 변위계가 설치되었고, 횡방향 긴장력시에는 상부 슬래브의 끝단에 위치시켰으며, 하중재하단계에서는 Fig. 21과 같이 단면A와 C에 변위계를 설치하였다. 두 거더간 단차를 측정하기 위해 단면C에서는 하부슬래브 종방향 연결부를 중심으로 양측 100mm 이격된 위치에 설치되었다.

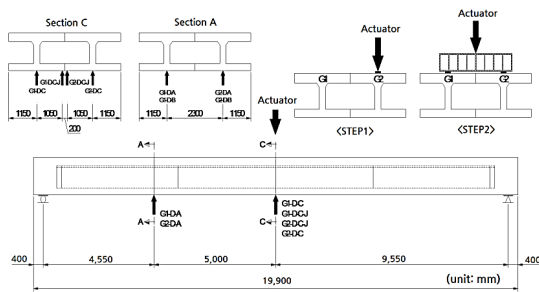


Fig. 21. Position of displacement meter and loading

하중은 경간 중앙부에서 거더의 웹 상단에 하중이 작용하도록 하고 한 개의 거더에 하중이 재하되는 <STEP1>과, 동시에 두개 거더에 균등재하 되는 <STEP2>로 구분하였다. 하중의 크기는 대상 교량에 작용하는 설계하중에 의한 모멘트를 기준으로 결정하였다.

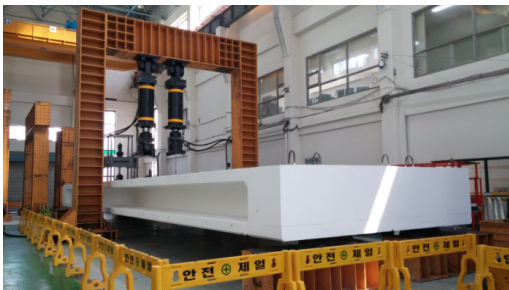


Fig. 22. Experimental view of real-scale specimen

사용하중에 대한 등가의 재하하중은 약 676kN이며, 극한하중에 대한 등가의 재하하중은 약 1300kN이다. 설계단계의 계산에 의한 실험체의 공칭휨강도에 대응하는 재하하중은 약 2320kN에 이를 것으로 예상되었다. Fig. 22는 실험장면을 나타낸다.

5.3 실험결과 및 분석

편측하중재하, <STEP1>의 실험결과 하중단계별로 최대처짐이 발생하는 거더중앙부의 네 지점에서 측측된 변위는 Fig. 23과 같이 모두 연속선상에 있는 것으로 나타나 횡방향으로 연결된 두거더가 일체화된 거동을 보였다.

실험체의 휨강도 및 극한하중에 대한 거동을 검토하기 위해 <STEP2>로 실험한 결과 Fig. 24와 같이 사용하중 680kN을 넘어, 균열하중 1,500kN 근처까지 선형적인 거동을 보이다가 이후 휨강성이 감소되는 경향을 보

였고, 실험체의 상부슬래브에서 압축파괴가 일어나는 것을 방지할 수 있는 2,800kN 까지만 재하 하여, 결과적으로 설계단계에서 예상된 휨강도에 대한 등가의 재하하중 2,320kN을 충분히 넘어서는 성능을 보였다.

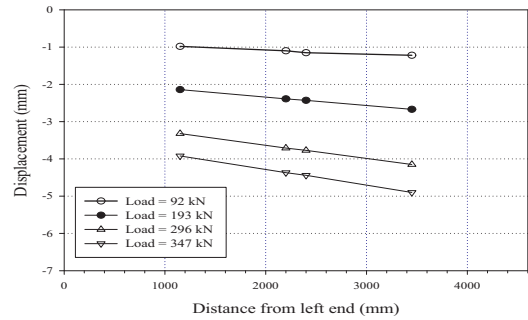


Fig. 23. Displacement distribution at mid-span by STEP1

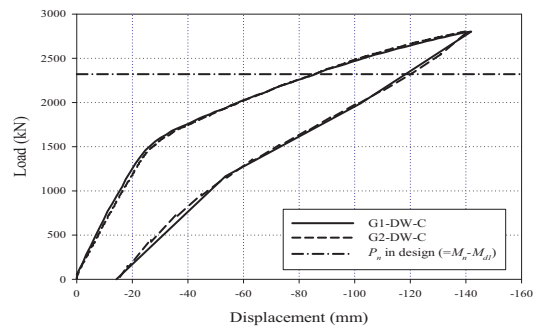


Fig. 24. Load-displacement curve by STEP2

6. 결론

본 연구는 하천횡단이나 단지내에 건설되는 교량에 있어서 일반화된 개량형 PSC거더를 대체할 수 있는 저형고의 조립식 중공슬래브교량의 개발을 목적으로 수행되었다. 따라서, 설계기준에 따른 구조해석 및 설계, 제작공법 개발, 실물모형실험을 통한 성능검증등이 이루어졌으며, 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 설계된 최적형고의 거더에 대해 구조해석을 통해 충분한 중방향 및 횡방향 강성과 긴장력 도입에 따른 응력검토가 이루어졌으며, 강합성 거더형식에 비해 경제성이 약 20% 우수한 것으로 검토 되었다.
2. 시공단계 및 제작성 검토를 통해 배근도가 수정되었고, 단면형상의 개선이 필요한 것으로 나타났다.

- 특히, 고공현장의 횡방향 긴장작업이 어렵고 에폭시를 통한 접합은 효과가 미미할 뿐 아니라 접합면에 누수발생우려도 높다. 따라서, 부분적으로 현장 타설공법을 병행한 횡방향 연결방법을 제안하였다.
3. 편재하 실험을 통해 거더가 합성된 후에도 두 거더가 일체화된 거동을 하는 것으로 나타났다. 그러나, 에폭시 접합으로 인한 효과보다는 횡방향 긴장재의 압축력 도입에 따른 영향으로 평가되어 향후 횡방향 연결방법에 따른 거동분석이 추가로 수행되어야 할 것으로 판단된다.
 4. 실험체의 휨강도 및 극한하중에 대한 실험결과 설계하중 2,320kN을 넘어 측정한계 2,800kN까지의 안전율이 1.2로 나타나는 성능을 보여, 안정성이 검증되었으므로, 현장 적용성을 충분히 확보한 것으로 평가되었다.
 5. 결과적으로 본 연구를 통해 개발된 조립식 중공슬래브 교량은 설계, 해석, 실험의 전주기 연구개발을 통해 충분히 검토되어 실제 현장에 적용할 수 있는 충분한 성능검증이 이루어졌다. 그러나, 현장 여건에 따른 다양한 변수들에 대한 검증이 추가로 이루어져야하며, 시험시공 및 계측을 통한 내하력 검증이 향후 수행되어야 할 것으로 판단된다.

References

- [1] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Statistics KOREA, *Current Status of Road Bridge and Tunnel*, 2015.
- [2] K. S. Kim, I. H. Yang, "Development of New Type PSC Beam Girder Bridges in Korea.", *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 20(3), p.26-33, 2008.
- [3] Ministry of Land, Infrastructure and Transport KOREA, *Highway bridge design code*, 2015.
- [4] Korea Concrete Institute, *Structural Concrete Design Code*, 2012.
- [5] N. Rajagopalan, *Bridge superstructure*, Alpha Science Int'l Ltd., 2006.
- [6] MIDAS IT, MIDAS/CIVIL software, MIDAS information technology Co. Ltd, <http://www.midasit.com/>, 2010.
- [7] Korea Expressway Corporation, *Standard Unit Price Book*, 2016.
- [8] C. E. French et al., *Cast-in-place concrete connections for precast deck systems*. No. NCHRP Project 10-71. 2011.

김 현 기(Hyun-Gi Kim)

[정회원]



- 2000년 2월 : 동국대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2013년 9월 : 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 (공학박사)
- 2005년 10월 ~ 2012년 11월 : ㈜ 동호 기술연구소/구조부 부장
- 2016년 3월 ~ 현재 : 가톨릭관동대학교 에너지플랜트공학과 교수

<관심분야>

구조공학, 해상풍력발전, 교량공학