

Precast PSC-Segmental I형 거더의 휨거동에 관한 연구

Flexural Behavior of Precast PSC Segmental I Girder

홍성남* · 김광수** · 박선규***

Hong, Sung Nam · Kim, Kwang Soo · Park, Sun Kyu

Abstract

This study was performed by using experiment to minimize behavior difference of Monolithic and segmental Girder and to prove the design concept of the PSI (Precast PSC-Segmental I Girder). A full scale girder test was performed in four different cases, the monolithic girder, the segmental girder type-1, the segmental girder type-2 and the segmental girder type-3. The monolithic girder that was produced in one body 25 m span and the segmental girder that was jointed 5-sliced 5 m segment. The girder was built by as one body prestressing the tendons after manufacturing the segmental girder, and second prestressing after the casting of the slab concrete. The test result shows that the measured values were almost same or slightly bigger than the theoretical values which means that the PSI girder bridges concept came out to be reliable.

Keywords : PSI girder, full scale bridge, monolithic, segmental

요 지

본 연구는 일체형과 분절형 거더의 거동차이 최소화 및 PSI(Precast PSC-Segmental I Girder) 거더의 역학적 거동 특성을 실험적으로 검증하기 위하여 실물 크기의 거더를 일체형(CG) 실험체 1본, 분절형(SGT1, SGT2, SGT3) 실험체 3본을 제작하여 실험을 수행하였다. 일체형(CG) 실험체는 단 경간으로 25 m의 길이로 제작하였고, 분절형 실험체는 각 세그먼트를 5 m 길이로 제작하고 1차 긴장력을 도입하여 하나의 거더로 일체화 시킨 후, 슬래브를 타설한 다음 2차 긴장력을 도입하는 방법으로 제작하였다. 실험결과 모멘트는 실험값과 이론값의 오차가 매우 작거나 실험값이 이론값에 비해 약간 더 큰 것으로 나타나 PSI 거더의 이론이 신뢰성이 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : PSI 거더, 실물교량, 일체형, 분절형

1. 서 론

PSC교에서 세그멘탈 공법의 생성, 발전 그리고 보급은 과거 토목공학분야에서 가장 흥미있고 중요한 업적중 하나이다. 이 공법은 1950년대에 독일에서 개발된 현장타설 프리스트레스 세그멘탈 공법을 확대 적용하면서 교량의 장지간화와 분절화에 관한 많은 연구(Clifford, 1999)가 이루어지게 되었다.

북미 및 서방선진국에서는 고강도 콘크리트의 개발과 함께 PSC-I형 거더의 장지간화에 대한 관심이 증대되었고, 단면 치수를 변화시켜 단면성능을 증대시킨 Bulb-Tee 거더에 대한 연구(Jessie, 1996; Alexander 등, 1997)가 활발히 진행되고 있다. 그리고, 거더의 장지간화에 따른 교량의 상부 시공시 발생할 수 있는 문제점의 해결 방안으로 거더를 운반 가능한 길이로 프리캐스트 제작하여 현장에서 후긴장에 의하여 시공하는 방법을 제안(Abdel 등, 1992)하였고, 실 교량으로 건설되어진 예(William, 1992)도 있다.

현재 우리나라에서 공용중인 PSC I형 거더는 전국적으로 2,248개소에 해당한다(건교부, 2005). PSC I형 거더는 시공이나 유지관리 측면에서 다른 상부구조 형식에 비해 유리한 측면이 많은 구조형식이므로 매년 신설되는 교량의 개 소수는 지속적인 증가추세에 있다. 따라서, 국내에서도 PSC I형 거더의 장지간화 및 분절화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있고, 그 내용을 살펴보면 다음과 같다. 기존의 PSC I형 단면 대신에 새로운 형식의 Bulb-Tee 단면을 사용하고 접합시공기법(Spliced Method)을 이용하여 장지간화에 관한 연구(심종성, 1999) 및 다단계 긴장을 통한 기존 PSC I형 거더의 장지간화에 대한 연구(한만엽, 1999)가 있었고, 상용프로그램을 이용하여 일체형 거더에 대하여 분절화에 따른 분절 수, 분절 길이 및 분절부 응력에 대하여 검토한 논문(김현호, 2002) 및 일체형 실험체를 여러 개의 세그먼트로 제작하고 긴장력을 나누어 도입하는 분절화에 관한 연구(김광수, 2005)가 이미 수행된 바 있다.

기존의 세그먼트 교량공법들은 교량의 구조부재중 일부인

*정회원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사(E-mail: cama77@skku.edu)

**정회원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사(E-mail: whitesky@skku.edu)

***정회원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수(E-mail: skpark@skku.edu)

상판이나 경간의 일부만을 프리캐스트 부재로 사용하고 있으며(Takashi 등, 1998), 교량의 상부구조 전체를 조립화하는 공법은 특히, 중경간(20~40 m)이상의 교량에서는 운반 및 설치 등의 문제로 인하여 그 시공 예를 찾아보기가 쉽지 않은 실정이다. 또한, 일부분이 현장 제작됨으로써 프리캐스트 세그먼트 공법의 장점을 충분히 살리지 못하고 있다.

본 연구에서는 위에서 언급된 문제점들을 좀 더 개선하고 PSC I형 거더의 장기간화 및 분절화를 위하여 Bulb-Tee 형식의 거더를 프리캐스트 세그먼트로 제작하여 시공단계별 긴장을 통해 거더 전체를 조립화 할 수 있는 PSC Segmental I형(이하 PSI거더) 거더 이론 및 일체형거더와 분절형거더의 구조적 거동차이 최소화를 실험적으로 증명하기 위하여 PSC I형 거더를 25 m로 하여 총 4분을 제작하였다. 1차 긴장 이후 바닥판을 일체로 타설하였으며, 시공 단계별 요구되는 긴장력을 나누어 도입하였다. 이후, 정적 하중 재하실험을 실시하였다. 실험결과로서 실험체의 파괴형태, 균열모멘트, 항복모멘트 및 극한모멘트를 파악하여 일체형거더와 분절형거더의 구조적 거동차이를 분석하였다. 또한, 추가 긴장력을 도입한 보강된 분절형실험체를 제작하여 휨 실험을 실시함으로써 일체형 거더와 구조적 거동의 차이를 파악한 후 PSI거더에 대한 이론을 실험적으로 평가 하였다.

2. 실험

2.1 실험개요

본 실험은 일체형거더와 분절형거더의 구조적 거동차이 및 PSI거더 이론을 실험적으로 증명하기 위하여 실험 크기의 실험체를 제작하여 실험을 수행하였다. 각 실험체는 표 1에서 나타난 것처럼 분절화 및 2차 긴장량에 따라 일체형(CG)실험체, 분절형(SGT1, SGT2, SGT3)실험체로 이루어져 있다. 일체형(CG)실험체는 단순보로 제작을 하였기 때문에 바닥판 폭을 2200 mm로 하여 하나의 거푸집을 사용하여 제작하였고, 분절형(SGT1)실험체는 일체형(CG)실험체와 동일 단면과 긴장력을 가지지만 실험체를 5개의 프리캐스트 세그먼트로 분할 제작 하였다. 분절형(SGT2, SGT3)실험체는 분절형(SGT1)실험체와 동일 조건이지만 2차 긴장재의 긴장력을 각각 67%, 133% 증가시켜 제작하였다. 앞에서 설명한 일체형(CG)실험체와 분절형(SGT1)실험체는 분절이라는 실험 변수를 제외하고는 동일한 설계방법과 긴장력 그리고 단면을 가지고 있다. 따라서 동일 조건하에서 일체형거더와 분절형거더와의 구조적 거동특성이 어떻게 다른지 규명할 수 있도록 하였고, 2차 긴장재의 긴장력을 증가시킨 분절형(SGT2, SGT3)실험체는 일체형(CG)실험체와 비교 분석을 통하여 분

표 1. 실험변수

구분	실험체 길이(mm)	거더 제작방법	긴장재 수(개)		총 긴장량(kN)	상부 슬래브
			1차	2차		
CG	25,000	일체	18	6	3834	○
SGT1	5@5,000 = 25,000	Segment	18	6	3834	○
SGT2	5@5,000 = 25,000	Segment	18	10	4474	○
SGT3	5@5,000 = 25,000	Segment	18	14	5113	○

표 2. 에폭시 물성치

구분	강도(MPa)	실험 기준	비고
압축강도(3일)	77	ASTM-C-190	배합비(주제:경화제) = 100 : 24 경화시간 : 24hr
압축강도(7일)	80	ASTM-C-190	
인장강도(3일)	14	ASTM-C-190	
인장강도(7일)	18	ASTM-C-190	

표 3. 강연선 물성치

종류	지름(mm)	단면적(mm ²)	극한강도(MPa)	연신율(%)
SWPC 7B	15.2 mm	138.7	1863.2	3.5이상

절형거더가 일체형거더와 비슷한 거동을 나타내기 위한 추가 긴장력을 산정하도록 하였다.

2.2 실험재료

본 실험의 실험체 제작에 사용된 콘크리트의 설계강도는 거더의 경우 40 MPa이고, 바닥판의 경우 30 MPa로 배합된 레미콘 제품을 사용하였다. 실험체에 배근된 전단철근, 전단 키철근, 주철근 및 브라켓철근은 설계항복응력이 392 MPa인 SD40철근을 사용하였으며, D13~D26 사용하여 철근을 배근하였다. 각 세그먼트의 접합시 분절부의 저항능력을 높이고 수분침투를 방지하기 위하여 7일 인장강도가 18 MPa인 에폭시를 사용하였다. 강연선은 SWPC 7B인 직경 15.2 mm인 제품을 사용하였다. 에폭시와 강연선의 물성치를 표 2와 표 3에 각각 나타내었다.

2.3 실험체 설계 및 제작

본 실험에서 사용된 실험체의 설계는 총 지간이 25,000 mm이고 설계 차선은 4차선으로 하여 DB-18의 내하력을 가질 수 있도록 도로교설계기준에 준하여 설계하였으며, 시공 단계별 로 2차선에 걸쳐 긴장을 실시하는 것으로 하였다. 보 실험체의 분절 일체화와 자중에 의한 휨응력에 저항할 수 있도록 1차 긴장을 도입하였고, 바닥판과 실험하중에 저항하도록 2차 긴장을 도입하였다. 추가 긴장은 시공상 거더 단부에서 긴장 작업을 할 수 없기 때문에 추가 긴장용 브라켓을 거더 단부 상단 측면부에 설치하여 실시하였다. 시공단계별 긴장 및 분절부의 특성을 고려한 설계 프로그램을 개발하여 휨, 전단 및 정착부에 대하여 재료의 허용응력 범위를 만족하도록 상세 설계를 실시하였으며, 분절형거더에 대해서도 일체형거더와 동일한 방법을 적용하였다. 분절형실험체는 일체로 설계된 실험체를 5,000 mm 길이의 세그먼트로

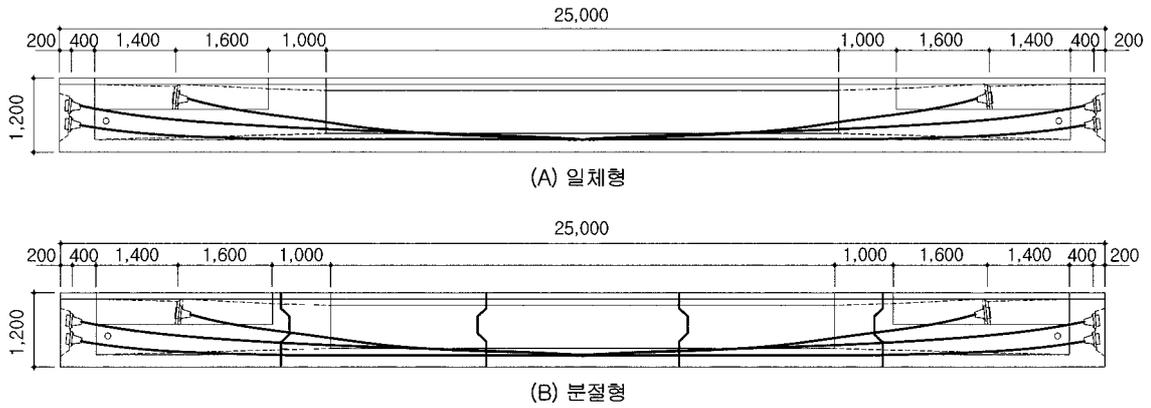


그림 1. 실험체 단면(단위 : mm)

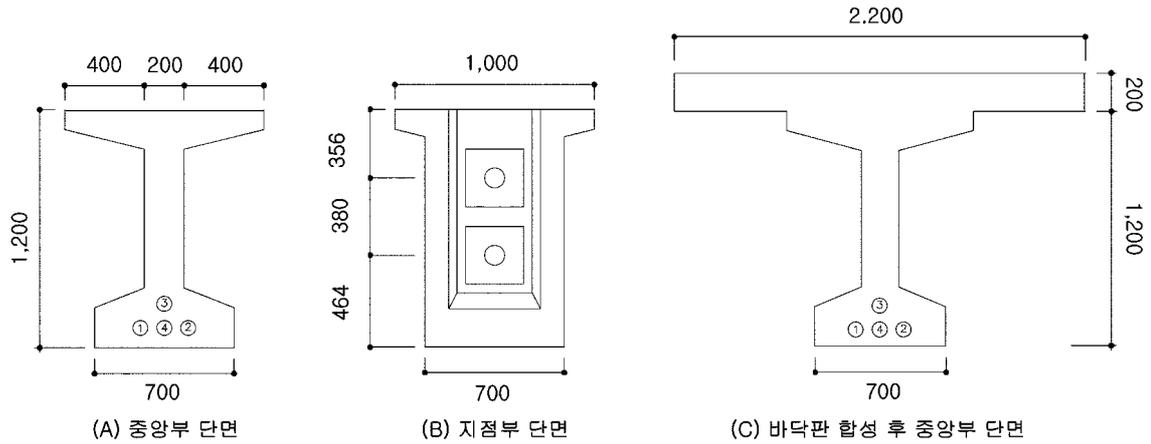


그림 2. 각 지점 단면(단위 : mm)

프리캐스트 제작하였고, 각 세그먼트의 접합은 분절부에 에폭시를 도포 후 1차 긴장을 통하여 일체화를 시켰다. 또한 분절 접합부에는 전단 저항능력을 높이기 위하여 전단키를 설치하였다. 전단키 부분은 응력의 불연속면이므로 상세 해석 및 설계를 하여 D19철근을 배근하였고 분절부에서 발생하는 전단력은 전단키가 전적으로 저항하도록 하였다.

본 실험에서 사용된 실험체 단면은 Bulb-Tee 거더 단면을 사용하였다, 이 단면은 구조적 장점으로 인하여 많은 연구 (Jessie, 1996; Alexander등, 1997)가 진행되었고, 상하부 플랜지의 정형화를 시키는 추세이다. 플랜지의 크기 및 복부 폭등의 치수는 현재 우리나라에서 개발되어 상용화 되어있는 IPC거더와 대우 Bulb-Tee 단면을(한만엽, 1999; 심중성, 1999) 참조하여 각 세그먼트를 제작 시에 발생할 수 있는 문제점 및 시공성과 현장 적용성을 고려하여 결정하였다. 실험체 단면은 25,000 mm(길이)×1,200 mm(높이)×700 mm(하부플랜지폭)의 I형 거더와 25,000 mm(길이)×200 mm(높이)×2,200 mm(폭)의 바닥판으로 구성되어 있고, 자세한 실험체 단면은 그림 1과 그림 2에 각각 나타내었다.

2.4 전단키의 형상

세그멘탈 교량에서 전단키는 필수적으로 사용되기 때문에 전단키에 대한 설계가 매우 중요하다. 도로설계 편람(건교부, 2001) 보면 사다리꼴 전단키의 권장값을 그림 3에서 나타난 값으로 권장하고 있다. 전단키의 돌출비 및 경사각(θ)에 대한 연구결과 저면과 돌출 높이의 비가 1/2인 경우가 가장 큰 전단력을 받는 것으로 밝혀졌고, 경사각이 60°일 때가

$$C(\text{피복}) \geq 2.5\text{cm}, H/1.5 \leq V \leq H, \theta = 45 \sim 60^\circ$$

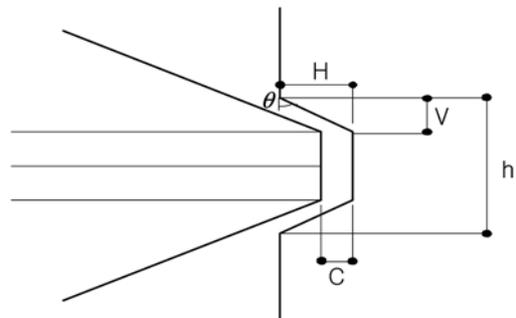


그림 3. 사다리꼴 전단키

가장 효율적인 것으로 나타났다(오병환, 1996). 따라서, 본 실험에서도 사다리꼴 전단키의 돌출비를 1/2로, 경사각은 60°로 정하였다.

2.5 긴장재의 배치

1차 긴장재는 거더 단부에 설치한 긴장홀에 2개의 쉬스관을 매입하여 각 쉬스관 마다 9개의 강연선을 사용하였다. 2차 긴장재 및 추가 긴장재를 배치하기 위하여 거더 상단 좌우 측면부에 설치한 브라켓에 쉬스관을 매입하였으며, 일체형(CG)실험체와 분절형(SGT1)실험체의 경우는 좌·우 브라켓에 매입한 각 쉬스관당 3개의 강연선이, 분절형(SGT2)실험체의 경우 각 쉬스관당 5개의 강연선이, 분절형(SGT3)실험체 경우에는 7개의 강연선을 각각 배치하였다. 긴장재의 배치는 그림 1에서 나타난 바와 같이 1차 긴장재는 거의

표 4. 긴장재 배치

긴장단계	번호	정착부(mm)		중양부(mm)	
		하연거리	상연거리	하연거리	상연거리
1차	1	844	356	100	1100
	2	464	736	100	1100
2차	3	840	360	220	980
	4	840	360	100	1100

직선에 가깝게 배치를 하고 거더의 중심축상을 통과하도록 배치하였고, 2차 긴장재는 양쪽 브라켓에서 출발하여 지간 중앙을 중심으로 엇갈리게 배치하였다. 긴장재 배치는 표 4에 나타내었다. 모든 긴장재의 배치에 앞서 $\phi 75$ mm의 외경을 가진 쉬스관을 거더 제작시 매설하였으며, 긴장력 도입 이후 쉬스관내에 모르타르를 타설하였다.

2.6 하중재하 및 측정방법

재하실험은 그림 4에서 나타낸 것과 같이 단 경간 단순지 조건하에서 수행하였다. 실험체의 중앙과 중앙에서 양쪽으로 5,000 mm씩 간격을 두고 각 지점에 1,000 kN용량의 유압실린더를 3개 사용하여 3점 재하방식에 의하여 하중재하 방식으로 하중재하를 수행하였다. 재하실험 시 슬래브 이외의 추가 사하중은 재하하중에 포함되는 것으로 보고 실험을 수행하였다. 실험체의 정확한 거동을 측정하고 해석을 수행하기 위해서는 거더 각 단면의 응력 및 변형률과 처짐 등의 데이터를 정확하게 획득하여야 한다. 따라서 본 실험에서는 실험체의 처짐과 분절부의 벌어지는 정도를 알아보기 위하여 거더 지간의 1.5L/5, 2L/5L, L/2 지점에 LVDT를 설치하였고, 분절형실험체의 경우 하중재하 시 분절부의 이격거리를 측정하고자 분절부에 LVDT를 설치하였다.

철근이 받는 응력을 측정하기 위하여 종방향 철근, 전단철근, 전단기 철근 및 바닥판 종 방향 철근 등에 철근 변형률 게이지를 부착하였으며, 콘크리트 단면의 변형의 정도를 알아보기 위하여 지간중앙부와 전단기 부분에 콘크리트 변형률 게이지를 부착하였다. 또한, 강연선에 변형률 게이지를 부착하여 강연선에 실제로 도입된 긴장력을 측정하였다.

표 5. 압축강도 시험결과

콘크리트 공시체 평균 강도		거더 (MPa)	바닥판 (MPa)
CG	입축강도	40.1	30.9
	휨강도	5.2	4.3
SGT1	입축강도	40.5	30.1
	휨강도	5.1	4.3
SGT2	입축강도	40.2	30.5
	휨강도	5.3	4.2
SGT3	입축강도	40.8	31.1
	휨강도	5.2	4.3

표 6. 긴장재의 긴장량

실험체	긴장재	도입 긴장량 P_j (kN)	계측 긴장량 P_m (kN)	P_m/P_j
CG	1차	2,875.4	2,649.7	0.92
	2차	958.4	754.5	0.79
SGT1	1차	2,875.4	2,687.4	0.93
	2차	958.4	715.89	0.75
SGT2	1차	2,875.4	2,476.4	0.86
	2차	1,598.9	1,222.83	0.76
SGT3	1차	2,875.4	2,556.6	0.89
	2차	2,237.2	1,631.2	0.73

3. 실험결과

실험체의 제작에 사용된 콘크리트의 하중재하 시 공시체의 강도 측정결과는 표 5와 같고, 강연선에 부착한 철근 게이지의 변형률 변화 데이터를 통해 긴장재에 도입된 긴장력을 다음 표 6과 같이 얻을 수 있었다. 긴장재 긴장으로 인한 손실은 1차보다 2차에서 많이 발생하였으며 1차 긴장재의 경우 유효율이 90%, 2차 긴장재의 경우 76%였다.

3.1 균열 및 파괴양상

일체형(CG)실험체는 전형적인 휨파괴를 나타내었으며, 균열 형태는 휨균열로 초기 균열은 2,488 kN·m에서 실험체

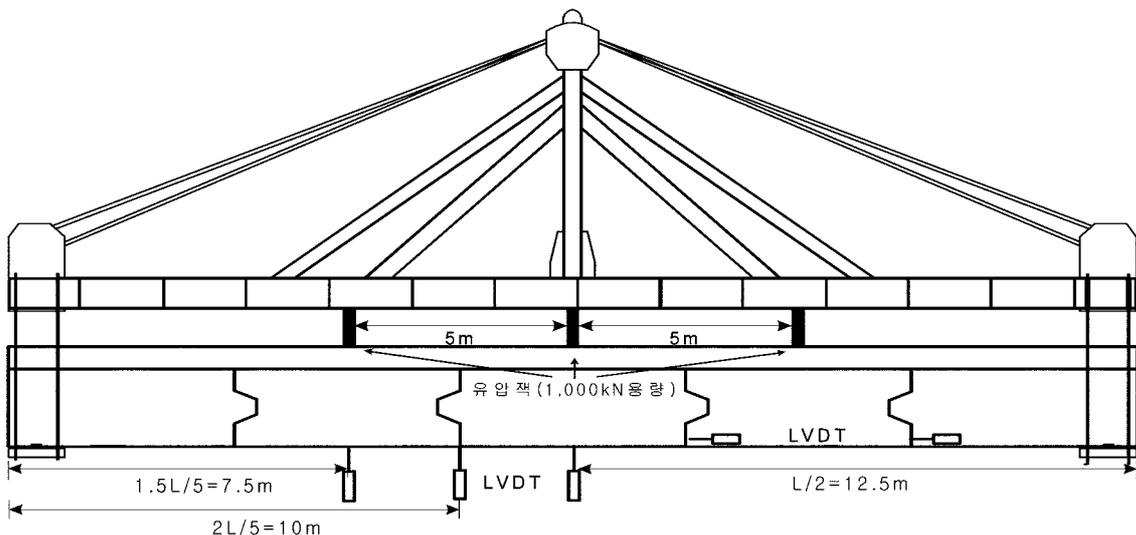


그림 4. 실험 장치도

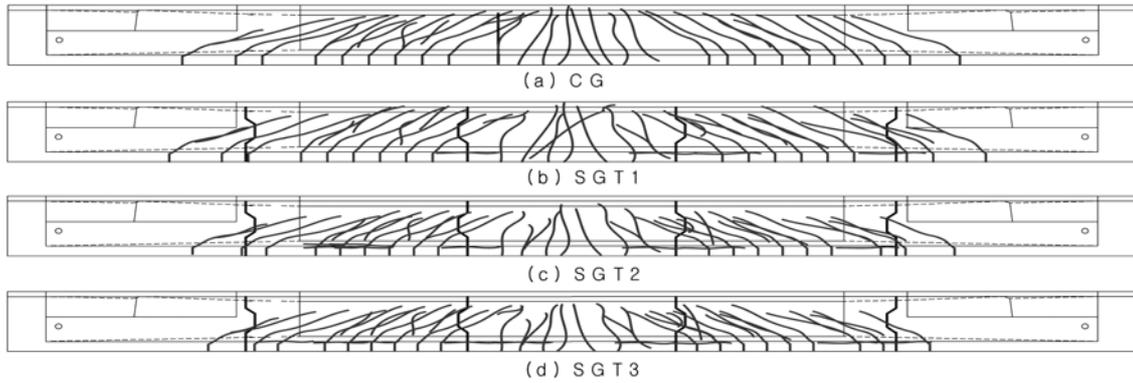


그림 5. 각 실험체의 균열도

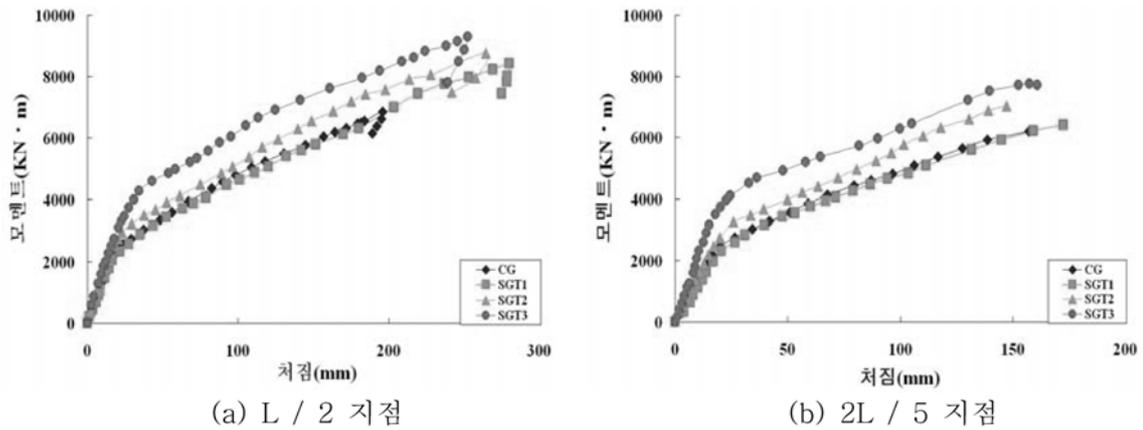


그림 6. 하중-처짐 곡선

중앙 하단부분에서 발생하였다. 하중이 점차 증가 할 수록 균열길이도 길어지고 횡균열의 수와 폭이 증가하는 일반적인 현상을 나타내었다. 하중재하는 6,847 kN·m에서 중지하였다. 분절형(SGT1)실험체의 경우 2,475 kN·m을 전후해서 분절부 이격거리가 급격히 증가하기 시작하였고, 초기 균열은 일체형(CG)실험체 보다 작은 하중인 2,337 kN·m에서 실험체 중앙 하단에서 다수가 발생하였다. 이것은 분절부라는 응력의 불연속면이 존재함으로 실험체의 전체적인 강성

이 저하되어서 나타난 것으로 판단되었다. 하중이 증가 할 수록 균열의 형태는 일체형과 비슷하였지만 횡균열의 수와 폭이 증가하였고 실험체 상부 플랜지까지 균열이 이어졌다. 8,433 kN·m에서 과도한 처짐으로 인하여 실험의 안전을 고려하여 하중재하를 중지하였다. 분절형(SGT2, SGT3)실험체는 추가 긴장력으로 인하여 균열하중이 각각 2,956 kN·m, 4,276 kN·m로 증가하였다. 초기 균열은 실험체 중앙 하단에서 다수가 발생하였고, 하중이 증가할수록 균열은 횡 균

표 7. 각 실험체별 하중 비교

실험체	하중 비교(kN·m)											
	M_{DB-18}			M_{cr}			M_y			M_{max}		
	이론(A)	실험(G)	G/A(%)	이론(A)	실험(G)	G/A(%)	이론(A)	실험(G)	G/A(%)	이론(A)	실험(G)	G/A(%)
CG	1581	1581	100	2260	2488	10.0	4867	5096	4.7	-	6847	-
SGT1	1581	1581	100	2260	2337	3.4	4867	5014	3.0	-	8433	-
SGT2	1581	1581	100	2750	2956	7.5	5930	5949	0.3	-	8758	-
SGT3	1581	1581	100	3226	4276	32.6	7062	7333	3.8	-	9272	-

표 8. 각 실험체별 처짐 비교

실험체	처짐 비교(mm)													
	M_{DB-18}				M_{cr}				M_y				M_{max}	
	이론(A)	실험(E)	실험(G)	E/A(%)	이론(A)	실험(E)	실험(G)	E/A(%)	이론(A)	실험(E)	실험(G)	E/A(%)	실험(G)	
CG	15.5	11.2	11.2	-27.7	23.6	18.3	21.5	-22.5	116.1	99.1	102.3	-14.6	196	
SGT1	15.5	11.7	11.7	-24.5	23.6	18.4	19.0	-22.0	116.1	106.1	111.1	-8.6	280.2	
SGT2	15.4	9.7	9.7	-37.0	28.4	20.7	22.9	-27.1	134.9	126.0	126.5	-6.6	264.4	
SGT3	15.2	8.0	8.0	-47.4	32.9	21.9	34.4	-33.4	153.5	132.8	141.2	-13.5	252.5	

열의 수와 균열 폭이 증가했지만, 일체형(CG)실험체 보다 균열의 수나 균열의 깊이에 대한 진전이 감소한 것으로 나타났다. 분절형 실험체에서 가장 취약한 부분으로 생각되는 전단기의 균열현상은 일체형과 거의 동일하고, 전단기로 인하여 발생한 문제는 발견 되지 않았다. 그림 5에 각 실험체의 균열도를 나타내었다.

3.1 하중-처짐 관계

일체형(CG)실험체와 분절형(SGT1, SGT2, SGT3)실험체의 하중-처짐 관계를 비교한 그래프를 그림 6에 나타내었다. 그리고, 표 7에서는 각 실험체의 하중 단계별 이론(A)값과 실험(G)값의 비교를 나타내었고, 표 8에서는 각 실험체의 하중 단계별 처짐의 이론(A)값과 실험(E)값의 비교 및 하중-처짐 관계 그래프에서 획득한 실험(G)값을 나타내었다.

우선, 각 실험체별로 균열하중을 비교해 보면 일체형(CG) 실험체와 분절형(SGT1, SGT2)실험체는 이론(A)값에 비해 실험(G)값이 3.4~10.0% 정도로 높게 측정되었고, 실험(G)값과 이론(A)값이 상당히 유사한 것을 알 수 있었다. 하지만, 분절형(SGT3)실험체는 약 4,273 kN·m 근처에서 하중-처짐 곡선에 변화가 있었고, 외관상으로는 거더의 중앙하부 플랜지에 약 4,675 kN·m에서 첫 균열이 관찰 되었다. 이론해석에 의한 균열하중은 3,226 kN·m 정도이므로 이론(A)값에 비해 실험(G)값이 약 45% 정도 높게 측정되었다. 실험(G)값과 이론(A)값이 상당한 차이가 나타났는데, 이는 높은 긴장력에 기인한 것으로 추정된다. 이러한 균열하중은 설계하중(DB-18)이 1,581 kN·m인 점을 고려하면 균열이 발생하기 전까지는 약 1.5~2.7 정도의 안전율을 확보하고 있음을 알 수 있었다. 각 실험체별 항복하중을 비교해 보면 일체형(CG)실험체와 분절형(SGT1, SGT2, SGT3)실험체는 이론(A)값에 비해 실험(G)값이 0.3~4.7% 정도로 높게 측정되었고, 실험(G)값과 이론(A)값이 거의 동일한 것으로 나타났다. 또한 각 실험체에 도입한 긴장력이 증가함에 따라 분절형(SGT2, SGT3)실험체의 균열하중은 18.8%, 71.8%, 항복하중은 약 16.7%, 43.9% 높아지는 것으로 나타났고, 초기 강성이 커지는 것을 알 수 있었다.

일체형(CG) 및 분절형(SGT1, SGT2, SGT3)실험체의 설계하중(DB-18) 및 균열하중 작용 시 처짐은 실험(E)값이 이론(A)값에 비해 각각 27.7~47.4%, 22.5~33.4%정도 작게 측정되었고, 설계하중(DB-18) 및 균열하중 작용 시 처짐값 모두

시방서의 활하중 처짐 기준 $L/800(= 31.25 \text{ mm})$ 보다 작음으로써 사용성을 충분히 확보하고 있음을 알 수 있었다. 또한, 각 실험체에 도입한 긴장력이 증가함에 따라 분절형(SGT2, SGT3)실험체의 처짐은 균열하중 작용시 19.0%, 29.3% 항복하중 작용시 3.7%, 37.6% 감소하는 것으로 나타났다.

최대 재하하중에서 발생한 최대 처짐은 일체형(CG)실험체의 경우 6,847 kN·m에서 196 mm이 발생하였고, 분절형(SGT1)실험체는 8,433 kN·m에서 280.2 mm, 분절형(SGT2) 실험체는 8,758 kN·m에서 264.4mm, 분절형(SGT3)실험체는 9,272 kN·m에서 252.5 mm가 발생하였고, 하중재하점의 슬래브는 압축파괴 징후를 보이지 않았다. 또한, 최대 재하하중에 도달할 때까지의 처짐이 280 mm까지 도달하는 것으로 보아 충분한 연성을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

3.2 하중-분절부 이격거리

그림 7은 분절형실험체의 하중에 따른 이격거리를 나타내는 그래프이다. 2L/5지점 그래프에서 분절형(SGT1)실험체는 2,475 kN·m을 기점으로 분절부가 벌어지기 시작하였고, 최대재하하중인 8,433 kN·m에서 이격거리가 8.9 mm로 측정되었다. 분절형(SGT2)실험체는 2,997 kN·m을 기점으로 분절부가 벌어지기 시작했고, 최대 재하하중인 8,758 kN·m에서 이격거리가 6.5 mm로 측정되었다. 분절형(SGT3)실험체는 3,575 kN·m을 기점으로 분절부가 벌어지기 시작했고, 최대 재하하중인 9,272 kN·m에서 이격거리가 5.3 mm로 측정되었다. 그리고 L/5지점에서는 중앙 쪽 분절부에 비하여 이격거리가 다소 적어지는 것으로 나타났고, 설계하중(DB-18)에서는 분절형실험체 모두 분절부가 벌어지지 않는 것을 알 수 있었다. 분절형(SGT1, SGT2)실험체는 분절부가 이격되는 하중 보다 균열하중이 작게 측정되어서 예상된 휨파괴(즉, 균열이 일어난 후에 분절부가 벌어짐) 현상이 나타났으나, 분절형(SGT3)실험체는 균열이 발생되기 이전에 분절부가 먼저 벌어지는 파괴 현상이 나타났다. 이것은 추가 긴장력의 크기가 분절형(SGT3)실험체가 가장 크기 때문에 나타난 현상으로 판단되었다.

3.3 하중-변형률 관계

일체형(CG) 및 분절형(SGT1, SGT2, SGT3)실험체의 L/2 지점의 인장 철근은 초기균열 발생시점과 비슷한 하중근처에서 급격한 변형률의 증가를 보이고 있으며, 하중이 증가함

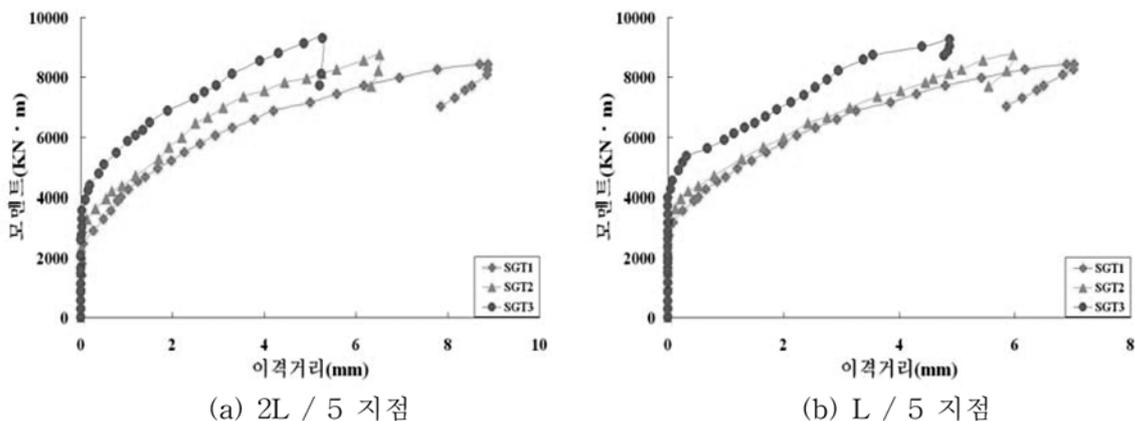


그림 7. 하중-이격거리 곡선

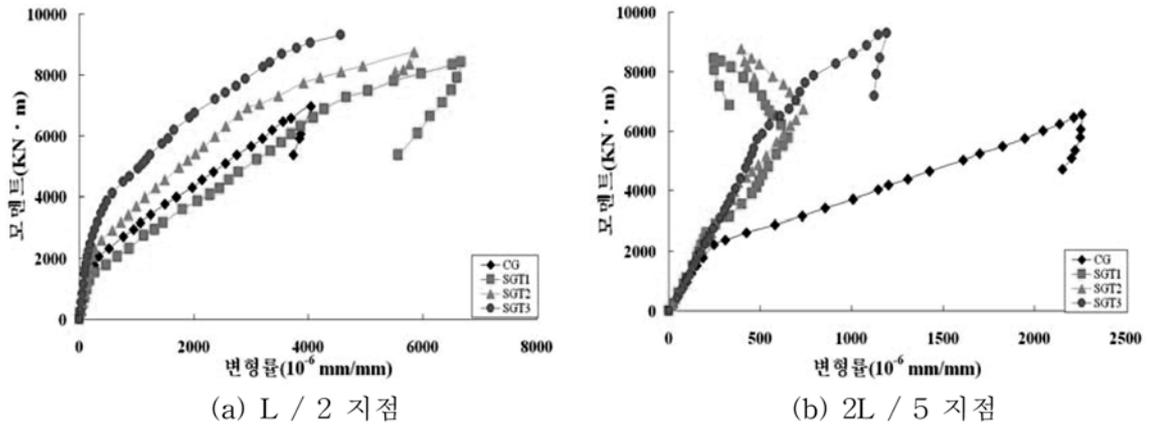


그림 8. 하중-인장철근변형률 곡선

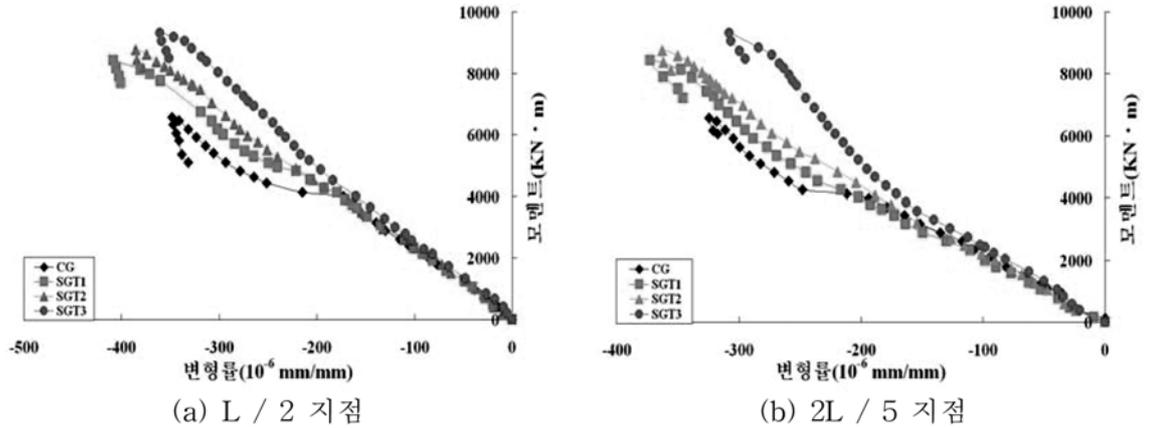


그림 9. 하중-바닥판철근변형률 곡선

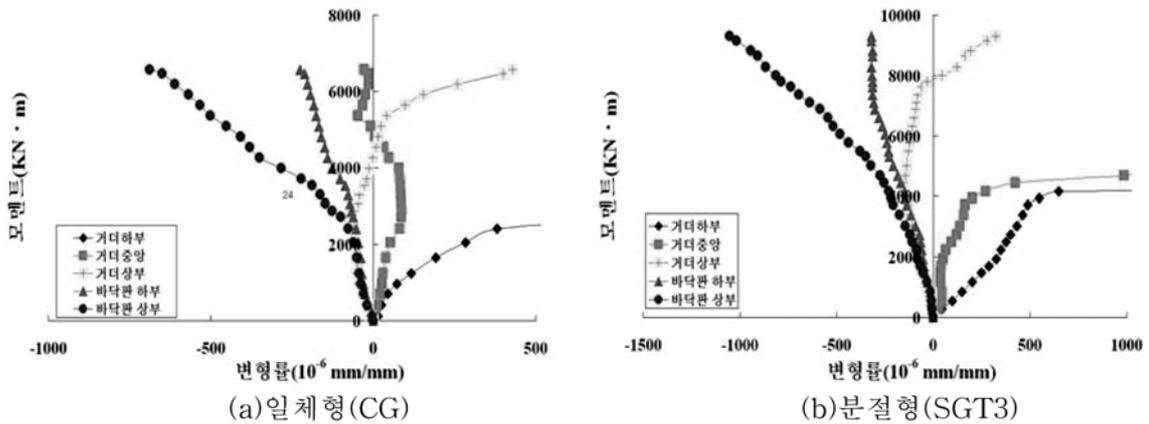


그림 10. L / 2지점 하중-콘크리트변형률 곡선

에 따라 항복 변형률에 도달하고 있음을 알 수 있었다. 1.5L/5지점에서 관측된 변형률 측정결과도 L/2지점의 측정결과와 경향은 유사하나 크기가 작은 것으로 나타났다. 2L/5 지점 분절부 끝단의 인장철근에 부착한 철근 게이지를 통하여 얻은 철근 변형률에서는 일체형(CG)실험체와 분절형(SGT3)실험체는 하중이 증가함에 따라 철근의 변형률이 같이 증가하는 현상을 보인 반면, 분절형(SGT1, SGT2)실험체에서는 하중이 증가함에 따라 변형률이 증가하다가 변형률이 오히려 감소하는 경향이 나타났다. 이는 일체형(CG)실험체는 인장철근이 연속적으로 배치되었기 때문에 일반적인 변형률 양상을 나타내지만, 분절형(SGT3)실험체는 증가된 추가 긴장력으로 인하여 인장철근이 불연속이어도 어느 정

도 분절부에서도 인장철근이 기여를 하는 것으로 판단되었다. 하지만, 분절형(SGT1, SGT2)실험체는 추가 긴장력이 그다지 크지 않은 관계로 인해 분절부가 벌어진 후에 어느 정도 변형률이 증가를 하지만 그 후에는 더 이상 인장철근이 하중을 받을 수 없기 때문인 것으로 추정된다. 바닥판 상단의 압축변형률은 최대 재하하중에 도달해도 대부분 변형률이 매우 작게 측정되었고 항복 변형률을 넘지 않았다.

L/2지점의 단면의 위치에 따라 하중에 따르는 콘크리트 변형률은 실험체 모두 초기 균열이 일어나면서 변화가 일어났다. 일체형(CG)실험체는 초기 휨균열의 발달로 2,420 kN·m의 하중에서 실험체 하부에 설치한 게이지가 균열로 인하여 끊어져서 변형률 데이터를 더 이상 측정할 수가 없었고,

4,537 kN·m에서는 균열의 발달로 유효단면이 상당부분 축소되어 중립축이 바닥판으로 이동하는 것을 알 수가 있었다. 분절형(SGT1, SGT2, SGT3)실험체는 초기에 휩균열이 일어나면서 거더의 중앙하부, 거더 중앙에 설치한 게이지가 끊어져서 변형률을 측정하지 못하였다. 압축부의 변형률은 긴장력이 큰 실험체일수록 작아지는 것을 볼 수가 있었다. 그림 8~그림 10은 각 실험체의 하중에 따른 철근 및 콘크리트의 변형률 측정 결과를 나타낸 그래프이다.

4. 결 론

본 논문에서는 일체형거더와 분절형거더의 거동 양상을 실험적으로 분석하고 추가 긴장력을 도입한 보강 분절형거더의 휨 성능 및 거동을 파악하였다. 분절부의 유무 및 긴장력에 대한 실험변수를 사용하여 휨 실험을 실시한 후 실험 결과로부터 얻은 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 일체형(CG)실험체의 경우 전 단면이 외력에 대해 효과적으로 저항하면서 지간 중앙에서 발생한 휨 균열이 진행되어 휨 파괴 거동을 하였다. 분절형(SGT1, SGT2, SGT3) 실험체는 주로 바닥판과 강연선이 외력에 저항하기 때문에 강연선의 항복과 동시에 극한 상태로 치닫는 거동을 예상하였지만 일체형(CG)실험체와 긴장량이 같은 분절형(SGT1)실험체는 일체형 실험체와 거의 같은 거동양상을 나타냈고, 분절형(SGT2, SGT3)실험체는 일체형 실험체에 비해 우수한 성능의 거동양상을 나타냈다.
2. 휨파괴 실험결과 모든 실험체가 휨파괴 되는 양상을 나타냈다. 분절형(SGT1, SGT2)실험체는 분절부가 이격되는 하중보다 균열하중이 작게 측정되어서 예상된 휨파괴(즉, 균열이 일어난 후에 분절부가 벌어짐)현상이 나타나지만, 분절형(SGT3)실험체는 균열이 발생되기 이전에 분절부가 먼저 벌어지는 파괴 현상이 나타났다. 이것은 추가 긴장력의 크기가 분절형(SGT3)실험체가 가장 크기 때문에 나타난 현상으로 판단되었다.
3. 초기 균열은 설계하중의 1.5배 이상에서 각각 관측되었다. 따라서, 설계하중에 의한 휨균열의 발생의 가능성은 매우 낮은 것으로 나타났고, 설계하중인 1,581 kN·m에서는 분절형 실험체의 분절부가 이격되지 않은 것으로 나타나 분절형 거더가 사용하중 상태에서는 일체형 거더와 동일하게 거동한다는 것을 나타냈다.
4. 일체형(CG) 및 분절형(SGT1, SGT2, SGT3)실험체의 설계하중 작용 시 처짐 값은 일체형(CG)실험체에 비해 분절형(SGT1)실험체가 4% 증가한 반면 분절형(SGT2, SGT3)실험체의 처짐은 균열하중 작용시 19.0% 항복하중 작용시 3.7% 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 설계하중 작용 시 처짐 값 모두 시방서의 활하중 처짐 기준 $L/800$ ($=31.25$ mm)을 만족하는 것으로 나타나 설계하중(DB-18)

처짐에 저항하기에 충분한 강성을 갖고 있는 것으로 판단되었다.

5. 분절형(SGT2, SGT3)실험체는 분절형(SGT1)실험체와 비슷한 거동을 보였지만 추가 긴장력의 도입으로 인하여 분절형(SGT1) 실험체에 비해 균열하중은 18.8%~71.8%, 항복하중은 16.7%~43.9%정도 향상시킬 수 있었다.
6. 최대 재하하중에서의 처짐이 280 mm까지 도달하는 것으로 보아 충분한 연성을 확보하고 있는 것으로 나타났으며, 분절형거더의 장점을 충분히 살리고 허용범위 내에서 추가로 긴장재를 투입한다면 매우 실용적이고 경제적인 교량 가설공법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

건설교통부(2003) 콘크리트구조설계기준
 건설교통부(2005) 교량현황조사
 건설교통부(2005) 도로교설계기준, 건설교통부
 김광수(2005) 전식접합부를 갖는 Multi Spliced 주형의 거동에 관한 실험적 연구, 한국콘크리트학회논문집, 한국콘크리트학회, 제17권 제2호, pp. 229-236.
 김현호(2002) IPC거더교의 분절화에 관한 연구, 석사학위논문, 아주대학교.
 심종성(1999) 국내 시방 규정에 적합한 Bulb-Tee 거더의 사용가능성에 대한 연구, 연구보고서, 한양대학교 공학기술연구소, pp. 46-47.
 오병환(1996) 세그멘탈 PC 교량의 전단기 형상에 관한 실험적 연구. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제16권, 제1-6호, pp. 725-734.
 한국건설기술연구원(2001) 도로설계편람
 한만엽(1999) 장경간 IPC 거더 개발 연구 보고서, 연구보고서, 아주대학교 토목기술 연구센터, pp. 2-3.
 Abdel Karim, Ahmad, Tadros, Maher K. (1992) Design and Construction of Spliced I-Girder Bridges, *PCI Journal*, Vol. 37, No. 4, Jul.-Aug, pp. 114-122.
 Alexander, K.B., Rita L.S. and Culmo, M.P. (1997) Design, Fabrication and Construction of the New England Bulb-Tee Girder, *PCI Journal*, Nov.-Dec. pp. 30-40.
 Clifford L. Freyermuth (1999) Ten years of Segmental Achievements and Projections for the Next Century, *PCI Journal*, Vol. 44, No. 3, May-Jun, pp. 36-51.
 Collins, M.P. (1991) *Prestressed Concrete Structures*, Prentice Hall.
 Jessie B. Fitzgerald (1996) Spliced Bulb-Tee Girders Bring Strength and Grace to Pueblo's Main Street Viaduct, *PCI Journal*, Vol. 41, No. 6, Nov-Dec, pp. 40-48.
 Takashi Yamane, Maher K. Tadros, Sameh S. Badie, and Mantu C. Baishya (1998) Full Depth Precast, Prestressed Concrete Bridge Deck System, *PCI Journal*, Vol. 43, No. 3, May-June, pp. 50-65.
 William, B. Caroland (1992) Spliced Segmental Prestressed Concrete I-Beams for Shelby Creek Bridge, *PCI Journal*, Vol. 37, No. 5, Sep-Oct, pp. 22-33.

(접수일:2005.2.25/심사일:2005.8.22/심사완료일:2006.1.26)