

편심 브라켓 설치 온도프리스트레싱 강재보의 하중저항 성능

Load-carrying Capacity of Thermal Prestressed Steel Beam with Eccentric Bracket

김 상 호¹⁾ · 정 치 영²⁾ · 최 규 태³⁾ · 안 진 희^{4)†}
Kim, Sang Hyo · Jung, Chi Young · Choi, Kyu Tae · Ahn, Jin Hee

요약 : 본 연구는 편심 브라켓이 설치된 온도프리스트레싱 강재보의 하중저항 성능에 관한 실험적 연구이다. 본 연구에서 제안한 강재보는 편심 브라켓을 이용하여 온도프리스트레싱 강판을 편심 설치하여, 기존 온도프리스트레싱 강재보 보다 도입되는 프리스트레스 및 단면강성을 증대 할 수 있다. 제안하고자 하는 공법의 검증을 위하여 편심 브라켓이 설치된 강재보, 온도프리스트레싱 강재보 등에 대한 정적하중 재하시험을 실시하여 강재보의 하중저항 성능을 비교 평가하였다. 또한 재료비선형성을 고려한 강재보의 구조해석을 실시하고 소성이론에 근거한 극한하중평가를 통하여 실험결과의 타당성 및 실설계에 대한 적용성을 검토하였다. 본 연구결과를 통하여 편심 브라켓이 설치된 온도프리스트레싱 강재보가 기존 온도프리스트레싱 강재보 보다 증가된 보강강판의 편심효과로 강성, 항복하중 및 극한하중이 모두 증가됨을 확인하였다.

ABSTRACT : This study evaluates the load-carrying capacity of a thermal prestressed steel beam with an eccentric bracket. The steel beam that is proposed in this study has an eccentrically installed cover plate through application of the eccentric bracket. The eccentric bracket helps the steel beam achieve greater sectional stiffness and more efficiently induces prestress. A material non-linear characteristic applied finite element analysis was also conducted to check the validity of the experiments. The results of this study showed that the structural stiffness, yield load, and ultimate strength of the TPSM-applied steel beam with the eccentric bracket increased due to the eccentricity of the cover plate.

핵심용어 : 강재 브라켓, 온도프리스트레싱, 하중저항 성능, 하중재하 실험

KEYWORDS : steel bracket, thermal prestressing, load-carrying capacity, loading test

1. 서론

강구조물 작용응력 및 내하성능 개선을 위하여 강선이나 강판을 이용한 프리스트레싱 방법들이 다양하게 제시되고 있다. 이러한 강구조물에 대한 프리스트레싱 방법은 강구조물의 항복강도 증가, 높은 하중수준에서 탄성거동을 하게하는 내하성능 개선, 프리스트레싱 도입에 따른 슐럼 그리고 사용하중 상태에서의 처짐 감소 등을 장점을 가지고 있다(Shiming 등, 2005; Wojciech 등, 2006; 박용걸 등, 2000; 경용수 등, 2005, 임성순 등, 2006, 김상호 등, 2006). 강선을 이용한 강구조물의 프리스트레싱 방법은 경량의 강선을 이용하여 고정하중의

증가 없이 주부재인 강구조물에 프리스트레싱의 도입이 가능하며, 추후 필요 시 긴장재의 교체가 용이하다는 장점이 있다(Saadatmanesh 등, 1989; 박용걸 등, 2000; Shiming 등, 2005; Wojciech 등, 2006). 강판을 이용하여 강구조물에 프리스트레싱을 도입하는 방법은 크게 두가지로 나뉘어진다. 첫째는 강구조물에 휨하중을 재하하여 탄성 휨변형을 유도한 상태에서 주거더의 상하부 플랜지에 부착한 후, 도입된 휨하중 제거 시 발생하는 변형에너지를 프리스트레싱으로 활용하는 프리플렉션 방법이 있다. 둘째는 강선을 이용한 프리스트레싱 방법과 동일한 개념으로 강판을 활용한 것으로, 강판에 온도변형을 도입하여 강판의 양단을 주거더에 고정된 후

1) 연세대학교 토목·환경공학과, 교수(sanghyo@yonsei.ac.kr)

2) 연세대학교 토목·환경공학과, 박사과정(cyjung@yonsei.ac.kr)

3) (주)유호산업개발 기술연구소, 선임연구원(penger@yonsei.ac.kr)

4) 교신저자, 연세대학교 토목·환경공학과, 연구교수

(Tel: 02-2123-2804, Fax: 02-313-2804, E-mail: palanorange@yonsei.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2011년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

강판에 도입된 온도변형이 복원되면서 발생하는 온도수축력을 프리스트레싱력으로 활용하는 것이다. 강판을 이용할 경우, 프리스트레싱 도입 효과와 함께 강판에 의한 추가적인 단면강성 증가를 기대할 수 있어, 하중저항 성능과 함께 처짐에 대한 사용성을 개선할 수 있는 장점이 있다(김상호 등, 2006; 안진희 등, 2007). 하지만 이러한 프리스트레싱 방법 등은 단면강성 증대효과가 작아 장기간화한 대형구조물에 적용 시 사용성에 따른 처짐이 과도하게 발생하므로 프리스트레싱에 의한 효과적인 내하성능 개선을 기대하기 어려울 수 있다. 또한 강구조물의 특성상 장기간화 시 부재간의 연결부가 필수적으로 존재하게 되므로 진술한 강판을 이용한 두 가지 프리스트레싱 도입 공법의 경우 시간 및 적용 범위에 제한을 받을 수 있다. 강구조물의 프리스트레싱 시 나타날 수 있는 이러한 단점들을 개선하기 위해서는 프리스트레싱과 함께 단면강성을 증가시킬 수 있는 방법과 함께 기존 프리스트레싱 방법과 비교하여 경제적인 장점이 있어야 효율적인 프리스트레싱 방법으로 장기간 강구조물에 적용 할 수 있을 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 그림 1에 나타낸 바와 같이 강제 브라켓(Bracket)이 설치된 강제보에 다단계 온도프리스트레싱 공법을 적용하였다. 본 연구에서 제시한 방법은 프리스트레싱에 의하여 강제보에 대한 응력도입과 함께 브라켓에 의하여 편심 설치된 프리스트레싱 강판에 의하여 단면강성이 편심이 없이 설치된 경우보다 증가하고, 강제보간 연결부에 설치되는 스플라이스(Splice)의 간섭 없이 설치가 가능하며, 프리스트레싱이 도입된 강제보를 지간에 관계없이 적용가능하다는 장점이 있다.

본 연구에서는 그림 1과 같이 제안된 강제 브라켓 구조를 가진 온도프리스트레싱 강제보의 하중저항 성능과 거동을 평가하기 위하여 미보강 강제보와 기존 온도프리스트레싱 보강보 그리고 브라켓 온도프리스트레싱 보강보를 대상으로 정적하중저항 성능을 평가하였다.

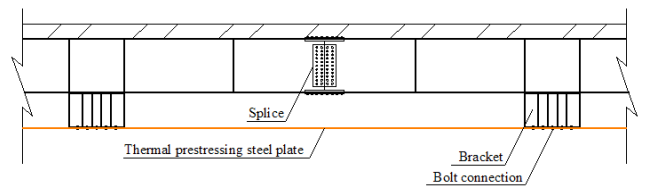


그림 1. 강제 브라켓 구조를 가진 온도프리스트레싱 강제보

2. 하중저항 성능 평가 실험

2.1 프리스트레싱 도입 실험체

본 연구에서는 강제 브라켓 구조를 가진 온도프리스트레싱 도입 강제보에 하중저항 성능을 평가하고 미보강 강제보와 기존 온도프리스트레싱 강제보의 내하성능과 비교하였다. 이를

표 1. 실험체 분류

<p>F10TM24 Fillet welding</p>	<p>(a) TSM-EB</p>
<p>Fillet welding</p>	<p>(b) TSM-UB</p>
	<p>(c) N-TSM</p>

위하여 표 1에 나타난 것과 같이 길이 6,400mm, 지간장 6,000mm 강재보를 대상으로 강제 브라켓 구조를 가진 온도프리스트레싱 강재보와, 온도프리스트레싱이 도입된 강재보, 온도프리스트레싱이 도입되지 않은 강재보 등 3가지 종류의 총 4개 실험체를 제작하였다. 실험에 사용된 강재보는 SS400 강종의 높이 250mm, 플랜지 폭 250mm, 복부 두께 9mm, 플랜지두께 14mm의 H형강이 사용되었으며, 프리스트레싱 강판으로는 SM570 강종의 폭 290mm 두께 14mm 강판이 사용되었다.

강제 브라켓 구조를 가진 온도프리스트레싱 강재보의 경우 강재보와 동일한 높이의 강제 브라켓을 하중재하 위치를 중심으로 각각 1,000mm 간격으로 4개를 설치하였으며, 강재보와 브라켓은 볼트채결 후 양 끝단을 용접으로 일체화하였다. 또한 하중재하 시 강재보나 프리스트레싱 강판보다 강제브라켓에서 파괴가 먼저 발생하는 것을 방지하기 위하여 구조해석을 통하여 브라켓의 길이와 용접량을 계산하였으며, 브라켓과 강재보에 수직보강재를 부착하여 하중재하시 브라켓과 강재부 연결부에서 발생하는 지압응력을 최소화 하였다. 각각의 강재보에 대한 온도프리스트레싱의 도입은 브라켓 구간별로 30℃-50℃-30℃의 다단계 온도분포를 도입하여 강판의 온도수축에 의하여 발생하는 프리스트레싱력을 다단계로 조절하였으며, 프리스트레싱 단계에 적합하게 고장력 볼트를 설계하였다. 프리스트레싱 강판과 강제 브라켓, 강재보의 연결은 강판이 목표가열온도에 도달하여 프리스트레싱에 필요한 강판의 변형이 도입된 후, 가열을 중지하고 F10T, M24의 고장력 볼트를 체결하였으며, 프리스트레싱 강판이 완전히 냉각되어 프리스트레싱이 도입된 이후 프리스트레싱 강판과 브라켓 및 강재보를 용접하여 하중재하 시 발생하는 작용력에 저항하도록 하였다.

실험체의 제작은 그림 2에 나타난 것과 같이 H형강을 시험체 제원에 맞게 제작한 후 하중재하 위치와 지점부 그리고 브라켓 설치위치에 수직보강재를 설치하였다. 이후 강재보에 브라켓을 설치한 후, 각각의 실험체 별로 온도프리스트레싱이 도입되었다. 표 2는 본 연구에서 평가된 실험체의 특성을 요약한 것으로, 각 실험체별 특징, 프리스트레싱 강판의 제원, 시험체별 중립축 및 단면 2차 모멘트 등을 정리하였다. 단면적 측면에서 강제 브라켓 설치 강재보(TPSM-EB)와 온도프리스트레싱 강재보(TPSM-UB)는 비보강 강재보(N-TPSM)의 252%(브라켓 설치부), 152%(브라켓 비설치부)와 152%이며, 단면강성 측면에서 강제 브라켓 설치 강재보와 온도프리스트레싱 강재보가 비보강 강재보보다 698%(브라켓 설치부), 525%(브라켓 비설치부)와 151%이상이다. 따라서 각각의 실험체별 강재량은 강제 브라켓 설치 강재보(TPSM-EB) 0.178tonf/m, 온도프리스트레싱 강재보(TPSM-UB) 0.107

tonf/m, 비보강 강재보(N-TPSM) 0.071tonf/m으로 강재량의 비는 2.52(브라켓 설치): 1.52(온도프리스트레싱): 1.00(비보강)이다. 그림 3은 실험체별 강재량과 단면 2차 모멘트 값을 비교한 그래프이다.



그림 2. 강제 브라켓 강재보의 온도프리스트레싱 도입 모습

표 2. 편심 강재보 실험체 및 강재보 실험체

실험체명	TPSM-EB(I/II)	TPSM-UB	N-TPSM
특징	브라켓 설치 및 온도프리스트레싱	온도프리스트레싱	비보강 실험체
프리스트레싱 강판	SM570, 폭 290mm, 두께 14mm	SM570, 폭 290mm, 두께 14mm	-
중립축 (하면기준)	260.7mm	213.1mm	95.6mm
단면적 및 단면 2차 모멘트	22,636.0mm ² 7.38x108mm ⁴	13,638.0mm ² 1.60x108mm ⁴	8,998.0mm ² 1.05x108mm ⁴
제작수량	2 (I, II)	1	1

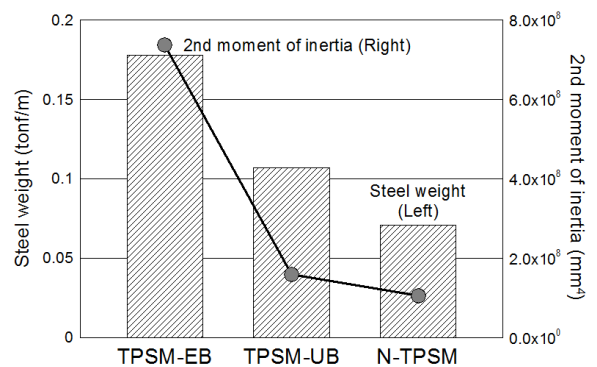


그림 3. 실험체별 강재량 및 단면 2차 모멘트 비교

본 연구에 사용된 H형강은 허용응력 140MPa, 공칭항복강도가 240MPa인 SS400 강종이며, 프리스트레싱 도입용 강판은 온도프리스트레싱 도입으로 인장응력이 도입되게 되므로 허용응력이 240MPa, 공칭항복강도가 460MPa인 SM570 강종을 사용하였다. 사용된 강재의 재료특성을 확인하기 위하

여 사용된 강재에 대하여 인장강도 실험을 실시하였으며 이를 표 3에 나타내었다. 표 3에서 본 연구에 사용된 강재의 재료특성은 도로교설계기준에서 제시되고 있는 강재의 재료 기준을 만족하고 있음을 확인 할 수 있다.

표 3. 강재의 재료특성

강종	인장시험		
	항복강도(MPa)	인장강도(MPa)	연신율(%)
SS400	268	488	24
SM570	490	694	32

2.2 실험방법

강재 브라켓 구조를 가진 온도프리스트레싱 도입 강재보에 하중저항 성능을 평가를 위하여 각각의 실험체에 3점 휨 하중이 재하 되도록 하였다. 하중재하는 5,000kN 용량의 UTM을 이용하였다. 본 연구에 사용한 실험체의 경우, 강재보의 높이가 낮아 강재보의 항복이 상부플랜지에서 시작되고 이에 따라 상부에 국부좌굴이 발생 할 수 있으며, 이에 따른 실험체의 진도 등이 발생 할 수 있으므로, 실험체에는 0.05 mm/min 속도의 변위가 도입되도록 변위제어방식으로 실험을 실시하였다.

하중재하에 따른 실험체별 하중-처짐 및 변형률 관계를 평가하고 거동특성을 비교하기 위하여 그림 4와 같이 변형률 게이지(Strain gauge) 및 변위계(LVDT)를 설치하였으며, DATA logger(TDS-602)를 이용하여 이를 측정하였다. 그림 5는 편심 브라켓이 설치된 강재보의 하중재하 모습이다.

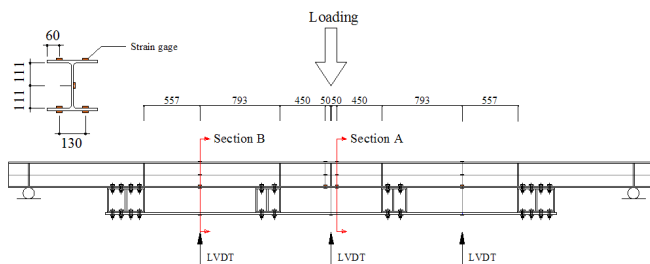


그림 4. 변형률계와 변위계의 설치위치

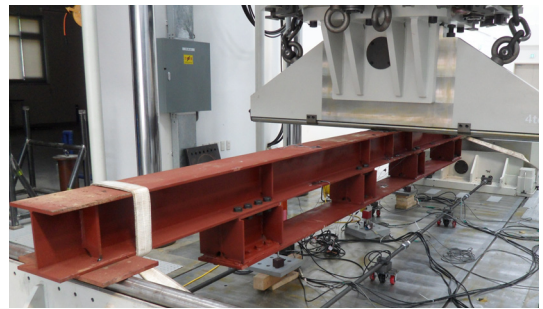


그림 5. 편심 브라켓 설치 강재보의 하중재하 모습

3. 하중-저항성능 평가 결과 분석

3.1 온도 프리스트레싱 도입 결과

프리스트레싱 보강 실험의 경우 다단계 온도프리스트레싱이 도입되므로 실험체의 상부 플랜지 상면과 하부플랜지 상면에 스트레인 게이지를 부착하여 30°C-50°C-30°C의 다단계 온도 분포에 따라 도입되는 온도프리스트레싱 효과를 확인하였다. 기 수행된 연구결과에서와 같이 온도프리스트레싱은 프리스트레싱 강판의 가열과 냉각단계를 거쳐 최종 목표 프리스트레싱력이 도입되었다(안진희, 2007). 편심 브라켓이 설치된 강재보 실험체(TPSM-EB) 두 본(I/II)의 경우 각각 상부 플랜지 상부에는 17.37/17.85MPa의 응력이 하부플랜지 상부에는 -26.60/-27.90MPa의 응력이 도입되었으며, 최종 솟음은 2.78/2.84mm가 도입되었다. 온도프리스트레싱 강재보 실험체(TPSM-UB)의 경우 상부플랜지 상부에는 9.91MPa의 응력이 하부플랜지 상부에는 -59.20MPa의 응력이 도입 되었으며 3.78mm의 솟음이 도입되었다. 표 4는 온도프리스트레싱에 의하여 H형강 시험체에 도입된 최종응력 및 변위를 요약한 것이다.

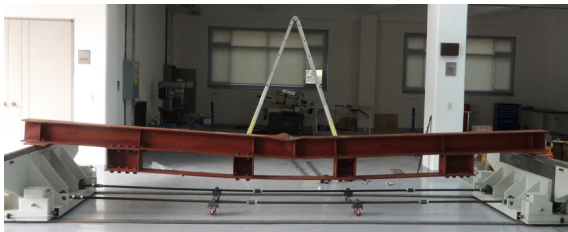
표 4. H형강 시험체에 도입된 온도프리스트레싱 최종응력 및 변위

계측위치	실험체		
	TPSM-EB(I/II)	TPSM-UB	N-TPSM
상부플랜지(MPa)	17.85/17.67	9.91	-
하부플랜지(MPa)	-27.90/-26.60	-59.20	
상향변위(mm)	2.84/2.78	3.78	

3.2 하중재하에 따른 강재보의 파괴 및 변형형상

하중재하에 따른 강재보의 파괴 및 변형은 그림 6과 같이 상부플랜지와 복부판의 국부좌굴에 의하여 최종 파괴형상이 결정 되었다. 본 연구에서 제작된 실험체의 경우 비보강 실험체

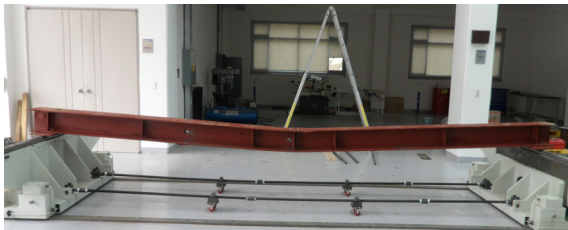
(N-TPSM)를 제외하고 온도프리스트레싱 도입 실험체들은 중립축이 H형강의 하부플랜지 쪽에 위치하므로 재하하중이 증가함에 따라 상부플랜지에 작용하는 응력이 하부플랜지보다 크게 증가하게 되므로 최종파괴 모드는 상부플랜지의 국부좌굴에 의하여 결정되었다. 특히 편심 브라켓이 설치된 강재보의 경우 온도프리스트레싱 도입 보(TPSM-UB)나 비 보강 실험체(N-TPSM)보다 중립축의 위치가 낮으므로 상부플랜지의 좌굴변형이 크게 발생하였으며, 조밀 단면인 비보강 실험체에서 좌굴변형이 최소화 되었다. 편심 브라켓 설치 강재보의 경우 그림 6(d)에 나타난 바와 같이 H형강 하부에 부착된 브라켓이 최종파괴단계에서 길이방향의 변형이 나타났다. 이는 보강부재로 사용된 온도프리스트레싱 강관의 인장변형에 저항하기 위하여 발생한 것으로 보강재인 강관의 단면이 크고 작용인장력이 크므로 외측 브라켓의 길이방향 변형이 발생한 것으로 판단된다.



(a) TPSM-EB



(b) TPSM-UB



(c) N-TPSM



(d) TPSM-EB 실험체의 외측 브라켓부의 형상

그림 6. 실험체별 최종 변형모습

3.3 실험 결과 및 분석

3.3.1 하중재하 실험 결과

편심 강재보와 온도프리스트레싱 보강 강재보의 하중저항 성능을 평가하기 위하여 하중재하 실험 결과 나타난 실험체별 하중-처짐관계 곡선과 하중-변형률 관계곡선을 그림 7과 그림 8에 나타내었다. 또한 그림 7과 그림 8의 결과를 정리하여 실험체별 항복하중, 강성, 극한하중을 비교하여 표 5에 나타내었다. 시험체별 항복하중은 실험체의 H형강의 전단면이 항복하는 것을 기준으로 하기 위하여 하부플랜지의 응력이 공칭항복 응력과 동일한 변형률을 가지는 하중을 항복하중으로 정의하였으며, 강성은 탄성영역 내에서의 하중-변위관계로 정의하였다(그림 9).

그림 7과 8에 나타난 것과 같이 모든 실험체는 탄성영역 내에서의 선형거동 이후 부재 항복에 따라 처짐 및 변형률의 급격한 변화가 발생하였으며, 대칭단면인 H형강 하부에 프리스트레싱 부재를 설치함에 따라 상부 플랜지의 압축 좌굴로 인하여 상부플랜지의 변형률 변화가 먼저 일어나고 있음을 알 수 있다(N-TPSM 실험체 제외). 편심 브라켓을 설치한 강재보는 비보강 강재보 실험체와 비교하여 항복하중은 158~161%, 강성은 233~301%, 극한하중은 93~97% 증가하는 것으로 나타났으며, 온도프리스트레싱 보강 강재보는 비보강 강재보 실험체와 비교하여 항복하중은 104%, 강성은 52%, 극한하중은 35% 증가하는 것으로 나타났다. 또한 온도프리스트레싱 강재보와 비교하여 편심 브라켓 설치 강재보는 항복하중이 26~28%, 강성이 119~164%, 극한하중이 43~46% 증가하는 것으로 평가되었다. 이는 H형강의 보강에 사용된 온도프리스트레싱 강관에 의한 프리스트레싱 도입 효과와 강관의 단면보강효과 그리고 편심 브라켓 설치보의 경우 H형강과 온도프리스트레싱 강관 간의 편심으로 인한 단면 강성 증가에 따른 것이다.

그림 8의 하중-변형률 관계의 하중증가에 따른 변형률 변화 관계에서 온도프리스트레싱이 도입된 강재보의 중립축이 거더 하면에 있으므로 하부플랜지의 변형률 변화가 적고 상부플랜지의 변형률 변화가 크게 발생하고 있음을 확인 할 수 있다. 본 실험체의 경우 보강된 H형강의 높이가 매우 낮아 온도프리스트레싱 도입으로 인한 축력이 모멘트 도입 효과가 작아 프리스트레싱에 의한 압축력 도입효과가 크고 모멘트 도입효과가 작아 상부플랜지의 좌굴이 먼저 발생하게 되나 H형강의 높이가 높은 경우 본 실험결과 보다 도입 모멘트 효과가 크게 되므로 최종 하중저항 성능 단계에서 발생하는 상부플랜지의 좌굴현상은 감소하게 될 것이다.

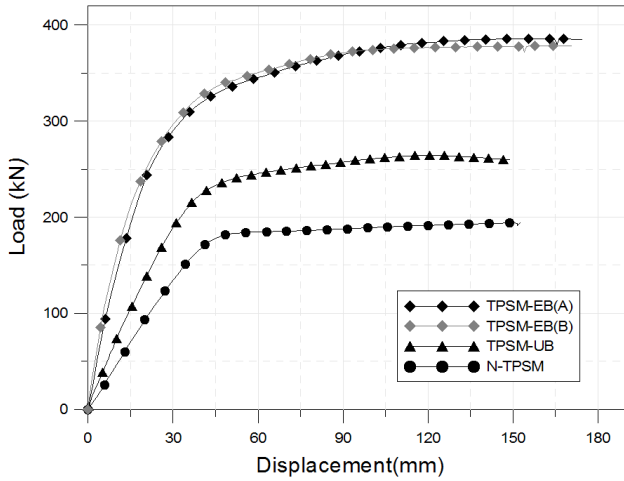
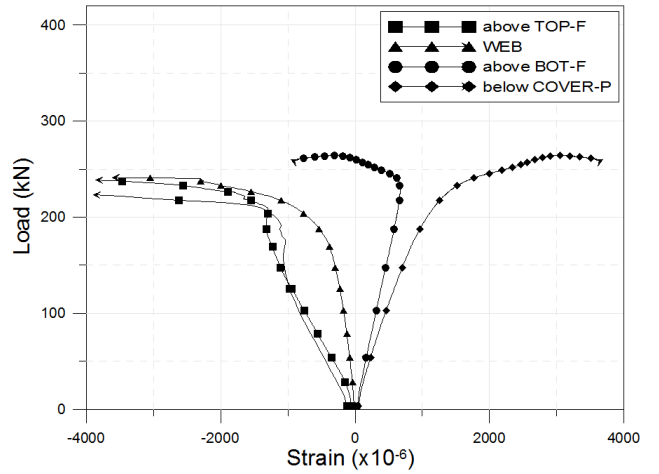
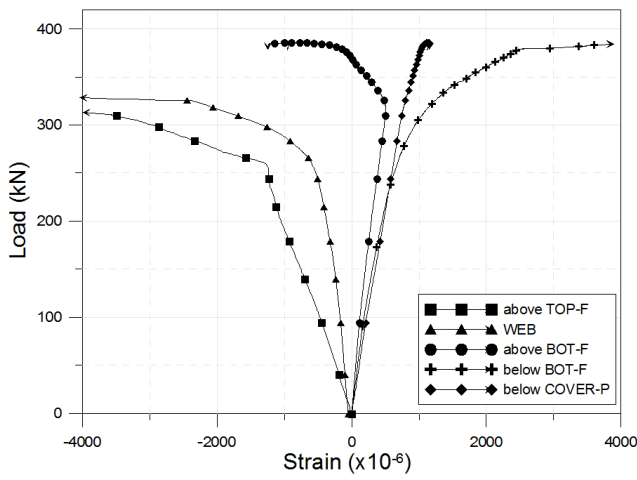


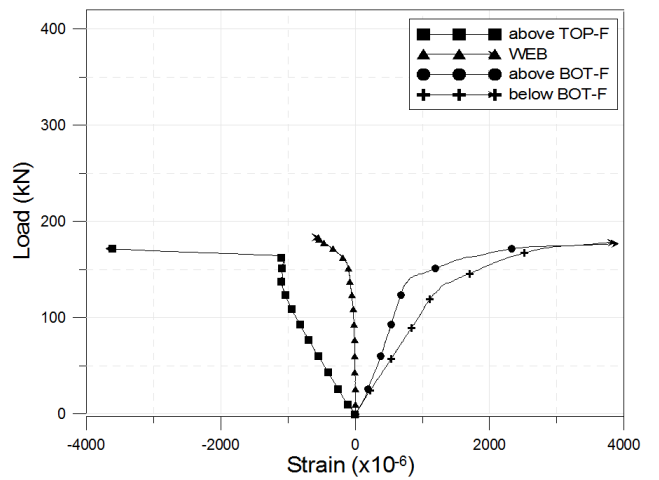
그림 7. 하중-처짐 관계곡선



(c) TPSM-UB 실험체의 하중-변형률 관계곡선

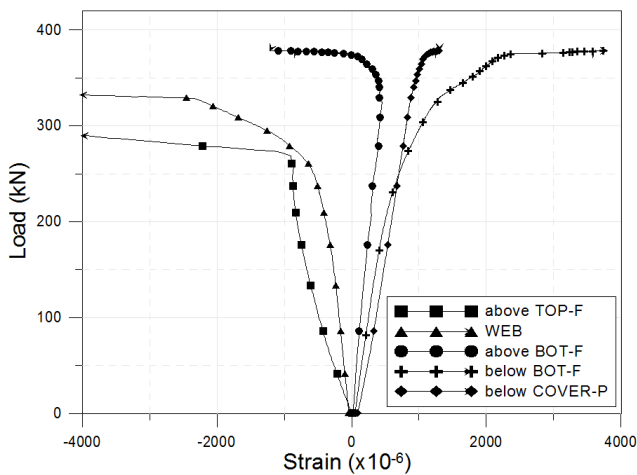


(a) TPSM-EB(A) 실험체의 하중-변형률 관계곡선



(d) N-TPSM 실험체의 하중-변형률 관계곡선

그림 8. 하중-변형률 관계곡선



(b) TPSM-EB(B) 실험체의 하중-변형률 관계곡선

표 5. H형강 시험체의 항복강도 및 강성

	TPSM-EB(I)	TPSM-EB(II)	TPSM-UB	N-TPSM
항복하중(kN)	318.7	314.3	248.9	121.9
항복비	2.61	2.58	2.04	1.00
강성(kN/mm)	15.3	18.5	7.0	4.6
강성비	3.33	4.01	1.52	1.00
극한하중(kN)	386.0	378.7	264.5	195.9
극한 하중비	1.97	1.93	1.35	1.00

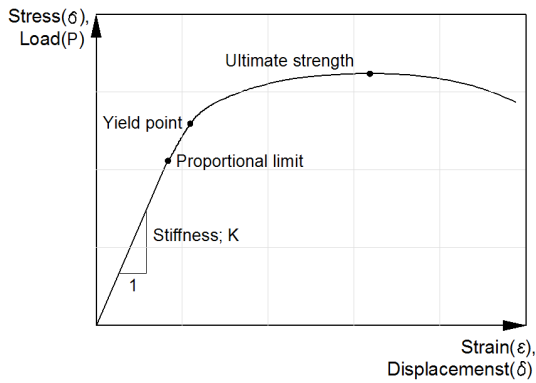
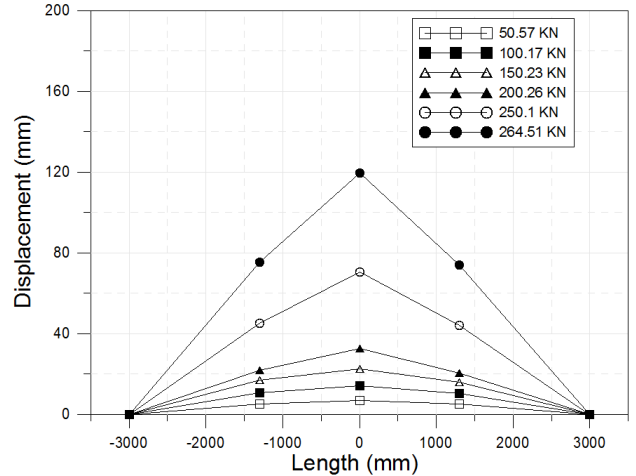
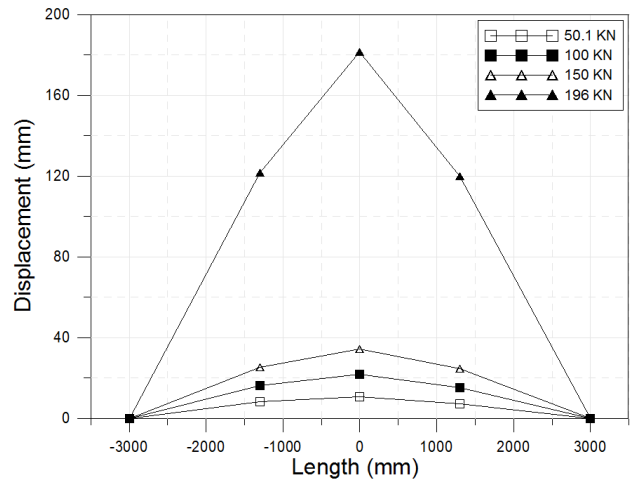


그림 9. 하중-처짐 관계곡선

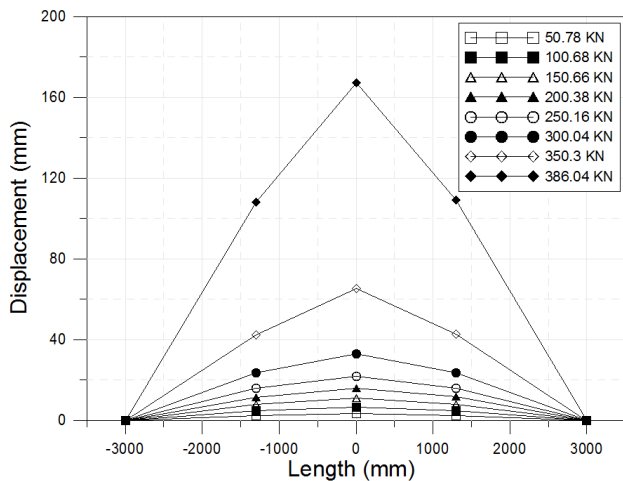
그림 10은 각각의 실험체별 하중-처짐분포 관계를 재하하중의 수준에 따라 나타낸 것으로 처짐분포 역시 하중-처짐관계에서와 동일하게 동일하중에서 편심 브라켓 설치강재보와 온도프리스트레싱 강재보의 처짐이 적게 나타나고 있음을 알 수 있다.



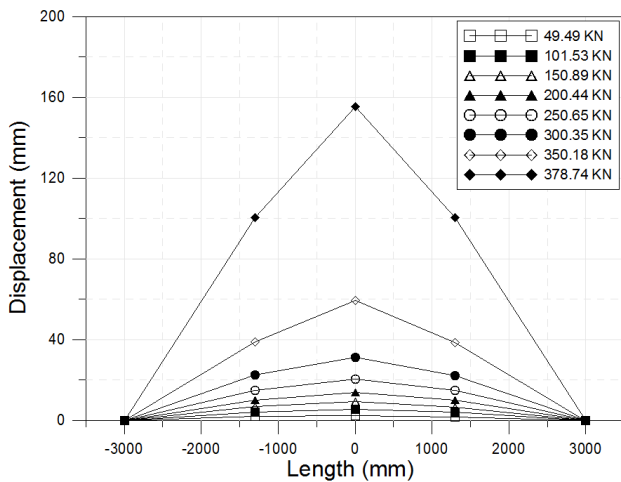
(c) TSPM-UB 실험체의 하중-처짐 분포 관계곡선



(d) N-TSPM 실험체의 하중-처짐 분포 관계곡선



(a) TSPM-EB(A) 실험체의 하중-처짐 분포 관계곡선



(b) TSPM-EB(B) 실험체의 하중-처짐 분포 관계곡선

3.3.2 구조해석 결과와 비교

본 연구에서 수행한 편심 브라켓이 설치된 강재보의 하중저항 성능 실험결과를 구조해석과 비교·분석하기 위하여 그림 11과 같이 각각의 실험체를 범용 유한요소해석 프로그램인 LUSAS 14.1을 이용하여 모형화하고 온도프리스트레싱 도입 해석을 위한 탄성해석과 하중저항성능을 평가하기 위한 재료비선형해석으로 구분하여 구조해석을 실시하였다. 대상 실험체에 대한 구조해석시 각각의 실험체는 H형강의 복부와 수직보강재, 그리고 브라켓의 복부는 4절점 쉘요소를 적용하였고, H형강의 상·하부플랜지와 브라켓의 상·하부플랜지와 수직보강재, 온도프리스트레싱 강판은 8절점 솔리드요소를 사용하여 모형화하였다. 탄성해석의 경우, 강재의 재료특성은 하중에 따라 선형적으로 거동한다고 가정하였다. 재료비선형해석의 경우, 강재의 인장실험을 통하여 얻어진 결과에 기초하여 강재의 항복하중 및 항복 후 재료의 탄성계수변화를 고려할 수 있도록, 항복점(f_y)를 기준으로 Bi-linear하게 거동하도록 재료특성을

정의하였다. 그림 12는 재료비선형해석 시 적용된 재료의 응력-변형률 관계를 나타낸 것이다.

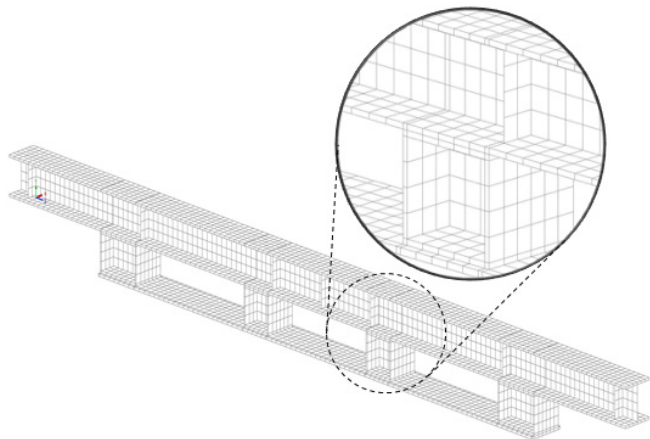


그림 11. 편심 브라켓 설치 강재보의 유한요소 해석 모형

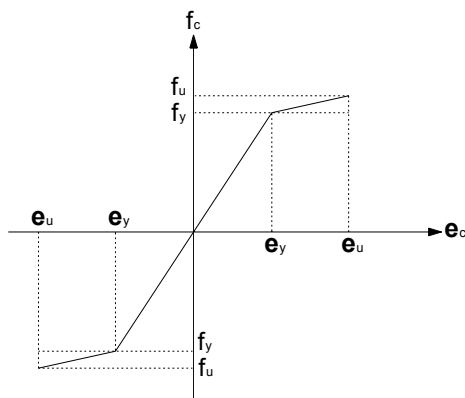


그림 12. 구조해석에 사용된 강재의 응력-변형률 관계

구조해석 결과와 실험결과를 비교하여 그림 13의 하중-처짐 관계와 표 6과 표 7에 온도프리스트레싱 도입에 따른 각각의 실험체별 도입 프리스트레싱효과 및 항복하중, 강성비를 나타내었다. 표 6에 온도프리스트레싱에 의하여 각각의 실험체에 도입된 프리스트레싱 효과를 요약하여 나타낸 것으로 모든 시험체에 도입된 처짐량과 응력이 구조해석과 매우 근사한 결과를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 그림 13의 하중-처짐 관계 및 표 7에 나타나있는 하중제하에 따른 실험체별 항복하중과 강성비 관계에서 해석결과와 실험결과와 해석 결과와 매우 유사하게 나타나고 있음을 확인할 수 있으며, 항복하중 이후 극한거동 이후에서는 실험결과가 해석결과보다 크게 나타나고 있으며 강성 또한 모든 실험체에서 해석결과보다 실험결과가 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

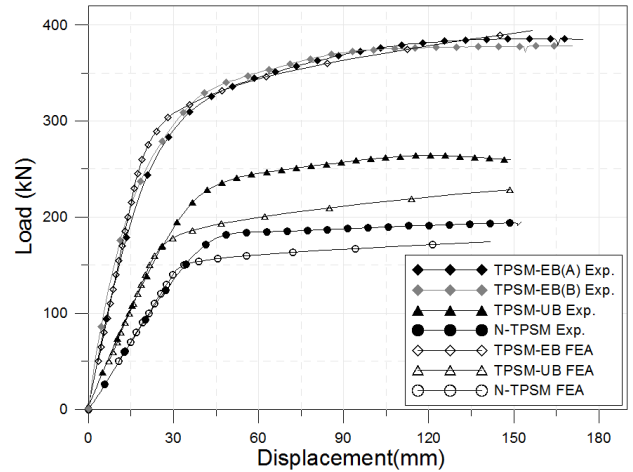


그림 13. 해석 및 실험에 따른 실험체별 하중-처짐 관계곡선

표 6. 실험 및 구조해석에 따른 프리스트레싱 효과 비교

	TPSM-EB(I)	TPSM-EB(II)	TPSM-UB
실험 처짐량(mm)	2.84	2.78	3.78
해석 처짐량(mm)	2.87	2.87	3.16
처짐비(실험/해석)	0.99	0.97	1.20
실험 상부플랜지 응력(MPa)	17.85	17.67	9.91
해석 상부플랜지 응력(MPa)	18.59	18.59	9.31
응력비(실험/해석)	0.96	0.95	1.06
실험 상부플랜지 응력(MPa)	-27.9	-26.6	-59.2
해석 상부플랜지 응력(MPa)	-29.1	-29.1	-51.2
응력비(실험/해석)	0.96	0.92	1.16

표 7. 실험 및 구조해석에 따른 항복강도 및 강성 비교

	TPSM-EB(I)	TPSM-EB(II)	TPSM-UB	N-TPSM
실험 항복하중(kN)	318.7	314.3	248.9	121.9
해석 항복하중(kN)	321.8	321.8	211.5	135.0
항복비(실험/해석)	0.99	0.98	1.18	0.90
실험 강성비(kN/mm)	15.3	18.5	7.0	4.6
해석 강성비(kN/mm)	14.8	14.8	6.9	4.5
강성비(실험/해석)	1.03	1.25	1.01	1.02

3.3.3 편심 브라켓이 설치된 강재보의 극한강도 평가

본 연구에서 실시한 편심 브라켓이 설치된 강재보 실험체와 온도프리스트레싱 실험체 등에 대한 이론적 극한강도를 그림 14와 식(1)~(7)에 따라 평가하였으며 그 결과를 표 8에 나타

내었다. 표 8에 나타난 것과 같이 온도프리스트레싱 실험체 (TPSM-UB)와 비보강 실험체(N-TPSM)의 실험 극한하중이 이론 극한하중보다 크게 나타났으나 편심 브라켓이 설치된 실험체의 실험 극한 하중은 이론 극한하중의 65% 수준으로 평가되었다. 또한 편심 브라켓 설치 강재보가 단면 2차모멘트 측면에서 비보강 강재보보다 698%(브라켓 설치부), 525% (브라켓 비설치부)로 크게 설계되었으나 실험결과에서는 비보강 강재보 실험체와 비교하여 항복하중은 158~161%, 강성은 233~301%, 극한하중은 93~97% 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 하중재하에 따라 강합성 보의 처짐이 발생함에 따라 프리스트레싱 강판과의 편심거리가 감소되고 H형 강 단면에서의 좌굴이 발생됨에 따라 편심 브라켓의 횡방향 변형이 발생함에 따라 실험결과가 설계 강성 및 이론 극한하중보다 작게 나타나는 것으로 판단된다. 이는 최종하중상태에서도 편심 브라켓이 강제거동을 할 수 있도록 설계하고 강판과 H형강 거더의 편심거리가 유지되도록 한다면 설계 강성과 이론 극한하중 결과가 유사하게 나타날 것으로 판단된다.

표 8. 실험 및 이론 극한하중 비교

	TPSM-EB(I)	TPSM-EB(II)	TPSM-UB	N-TPSM
실험 극한하중(kN)	386.0	378.7	264.5	195.9
이론 극한하중(kN)	592.0	592.0	213.0	167.4
극한하중비 (실험/이론)	0.65	0.64	1.24	1.17

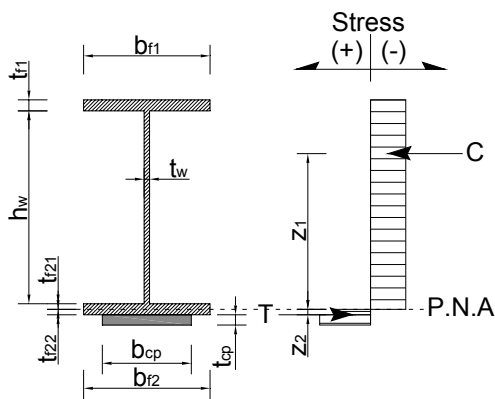


그림 14. 강재보 실험체의 소성 중립축

$$C = A_{f1}f_y + A_wf_y + A_{f21}f_y \quad (1)$$

$$T = A_{f22}f_y + A_{cp}f_{cp} \quad (2)$$

$$z_1 = \frac{P_{f1}y_{f1} + P_wy_w + P_{f21}y_{21}}{C} \quad (3)$$

$$= \frac{A_{f1}f_yy_{f1} + A_wf_yy_w + A_{f21}f_yy_{f1}}{C} \quad (4)$$

$$z_2 = \frac{P_{f22}y_{f22} + P_{cp}y_{cp}}{T} \quad (5)$$

$$= \frac{A_{f22}f_yy_{f22} + A_{cp}f_{cp}y_{cp}}{T} \quad (6)$$

$$M_u = C(z_1 + z_2) = T(z_1 + z_2) \quad (7)$$

여기서 소성중립축을 기준으로 C 는 압축부의 강도이고, T 는 인장부의 강도이다. A_{f1} 은 압축부에 위치한 플랜지의 면적이고, A_{f2} 와 A_{cp} 는 인장부에 위치한 플랜지와 커버플레이트의 면적이다. f_y 는 강재보의 항복하중이고, f_{cp} 는 커버플레이트의 항복하중이다. P_{f1} 와 P_w , 그리고 P_{f21} 는 압축부에 위치한 상부플랜지와 복부, 그리고 하부플랜지 압축부의 압축강도이며, P_{f22} 와 P_{cp} 는 인장부에 위치한 하부플랜지 인장부와 커버플레이트의 인장강도이다. y_{f1} , y_w , y_{f21} , y_{f22} , 그리고 y_{cp} 는 변화된 소성중립축에서 P_{f1} , P_w , P_{f21} , P_{f22} , 그리고 P_{cp} 의 거리를 나타낸 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 강재 브라켓 구조를 가진 온도프리스트레싱 강재보의 하중저항 성능과 거동을 평가하기 위하여, 미보강 강재보와 기존 온도프리스트레싱 보강보 그리고 브라켓 온도프리스트레싱 보강보를 대상으로 하중재하시험을 실시하였다. 재하시험을 통하여 각 시험체별 항복하중 및 강성과 극한하중에 대한 평가를 통하여, 하중저항성능을 평가하였다. 또한 실험결과를 시험체의 재료비선형해석결과와 비교하여, 실험결과와 타당성 및 실 구조물에 대한 적용성 평가를 실시하였으며, 소성이론에 근거한 시험체의 극한하중 이론값을 도출하여 이를 실험결과와 비교하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 실시한 강재 브라켓 구조를 가진 온도프리스트레싱 강재보의 경우, 동일한 주거더를 갖는 일반 무보강 강재보와 동일한 강판으로 보강된 온도프리스트레싱 도입 강재보와 비교하여, 구조물의 항복하중 및 강성과 극한하중이 모두 크게 증가함을 확인 할 수 있었다. 따라서 실구조물 적용 시 구조물의 장시간화 및 경제적 단면

- 구성이 가능할 것으로 판단되며, 브라켓을 이용하여 강판의 편심량을 확보하기 때문에 분절제작된 강제보의 접합부에 대한 간섭문제를 해결할 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 소성이론에 근거한 실험체 별 극한하중의 평가결과, 무보강 강제보와 기존 온도프리스트레싱 보강보의 경우 실험결과가 이론결과보다 약 20%정도 크게 나타났으나, 브라켓 구조를 가진 온도프리스트레싱 강제보의 경우, 실험결과가 이론결과의 65% 수준으로 나타났다. 이는 하중재하시험 시 가력되는 하중이 증가함에 따라 실험체에 적용된 브라켓이 횡방향 변형이 발생되고, 강판과 주거더 간의 편심거리가 감소되어 실험체의 강성과 이론 강성간의 차이가 나타나기 때문인 것으로 사료된다. 이는 실구조물 설계 시 브라켓이 강제거동을 할 수 있도록 설계하고 강판과 주거더의 편심거리가 유지되도록 한다면 실험결과와 이론결과가 유사한 값을 나타낼 것으로 판단된다.
- (3) 정적하중재하 실험과 유한요소해석 프로그램의 재료비선형해석 결과를 비교한 결과, 실험결과의 항복하중과 강성이 비교적 크게 나타났으나, 두 결과가 매우 유사함을 확인 할 수 있었다. 이를 통하여 정적하중재하 실험에 대한 신뢰도를 확보할 수 있었다. 추후 실구조물에 대한 설계 반영 시, 편심 브라켓이 설치된 강제보의 거동특성은 구조해석을 통하여 평가할 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 본 연구는 실구조물 적용에 앞서 실험실 규모의 연구로서, 해당 구조물의 적용성 평가를 위한 연구였다. 그러나 향후 실물 크기의 실험을 통하여, 구조물의 좌굴특성 및 브라켓 부분의 거동, 그리고 극한상태에서의 거동특성과 구조해석과의 비교 등에 대한 연구가 행해져야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 교육과학기술부 BK21사업의 일환인 연세대학교 사회환경시스템공학부 미래사회기반시설 산학연구공동사업단과 유호산업개발의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

건설교통부(2005) 도로교 설계기준, 한국도로교통협회.
 경용수, 안병국, 방진환, 김문영(2005) H형강과 고강도 강판으로

복합단면을 구성하는 프리스트레스트 플레이트거더의 개발, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제17권, 제5호, pp.637-648.

김상호, 안진희, 김준환, 김형주(2006) 커버플레이트의 온도변형을 이용한 강구조물의 다단계 프리스트레싱, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제18권, 제6호, pp. 783-792.

김상호, 김준환, 안진희(2006) 다단계 온도프리스트레싱을 이용한 강거더교의 보강에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제18권, 제6호, pp.717-726.

박용걸, 박영훈, 이승용(2000) 외부 후 긴장 공법을 이용한 강합성보의 보강에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제12권, 제5호, pp.594-558.

안진희, 김준환, 정치영, 김상호(2007) H형강 교량의 성능개선을 위한 다단계 온도프리스트레싱 효과 분석, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제19권, 제5호, pp.527-537.

임성순, 정찬혁(2006) 프리스트레스트된 압연강재보(H-BEAM)의 휨 거동에 대한 실험적 연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제18권, 제2호, pp.239-250.

Dall'Asta, A. and Leoni, G. (2002) Failure mechanisms of externally prestressed composite beams with partial shear connection, *Steel Compos Struct*, Vol. 2, No. 5, pp.315-330.

Lorenc, W. and Kubica, E. (2004) Nonlinear modeling of composite beams prestressed with external tendons, *Archives Civil Mech Eng*, Vol. 4, pp.83-93.

Saadatmanesh, H., Albrecht, P., and Ayyub, B.M. (1989) Experimental Study Prestressed Composite Beams, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 9, pp.2348-2363.

Sakano, M., Namiki, H., Yajima, S., Koide, Y., Furuta, H., and Frangopol, D.M. (2006) Monitoring of Steel Railway Floor Beams Prestressed by Steel Plates, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 11, No. 6, pp. 681-687.

Shiming, C. and Ping, G. (2005) Load carrying capacity of composite beams prestressed with external tendons under positive moment, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 61, pp.515-530.

Wojciech, L. and Ernest, K. (2006) Behavior of composite beams prestressed with external tendon: Experimental study, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 62, pp.1353-1366.

(접수일자 : 2010. 8. 14/ 심사일 2010. 8. 23/
 게재확정일 2010. 11. 25)