

휨 보강된 모듈단면 합성 프로파일보의 휨 내력에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Flexural Strength of Modular Composite profiled Beams

안 형 준¹⁾ · 류 수 현²⁾

Ahn, Hyung Joon · Ryu, Soo Hyun

요약 : 본 논문은 본 연구자가 기존에 발표한 모듈단면 프로파일보를 개선하여 새로운 모듈을 제안하였으며 이를 바탕으로 휨보강을 실시하여 적절한 휨보강 방법을 제시하고자 하였다. 개선된 모듈은 기존의 모듈보다 향상된 내력 및 초기강성을 나타냈다. 휨보강은 T형 단면 강재와 철근을 이용하여 실시하였으며 실험결과 철근을 이용하여 휨보강을 실시하는 것이 우수한 것으로 나타났다. 휨내력은 재료 실험결과를 바탕으로 이론값과 비교하면 저조한 결과를 나타냈으나 재료의 설계기준강도를 이용하면 90%정도의 내력을 나타내 향후 T형보를 이용한 압축축 보강이 이루어진다면 모듈단면 프로파일보의 적용가능성은 충분하다고 판단된다.

ABSTRACT : This paper presents a study that attempted to improve the site applicability of profile sheets and check the effects of bending reinforcement in composite profiled beams, and consequently, to suggest an improved modular-type CB2 and two types of bending reinforcement methods. As a result of the reinforcing and reforming modular profiled beam experiment conducted, CB2 showed an adequate deformation capacity as well as a sufficient plastic plateau at the maximum load and thereafter. For all the specimens, an insignificant modular slip occurred while linear relations were kept constant, at up to approximately 50% of the maximum load and at constant linear relations. The experimental values were very low. Probably, due to the small-scale experiment, the area of the concrete for the concrete filling and covering might have been insufficient, which might have led to the failure to improve the strength. Comparing the results with the standard design stress, all the specimens—except for T16 and B16—indicated more than 0.9. Based on the standard design stress, the reinforced modular profiled beam was considered to have positive applicability.

핵심용어 : 합성프로파일보, 휨 내력, 휨 보강, 프리캐브

KEYWORDS : Modular composite profiled beams, Flexural Strength, Bending reinforcement, Prefabrication

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

철근 이외의 각종 보강재의 사용은 RC보의 내력과 연성을 증가시키기 위해 꾸준히 연구되어져 왔다. 이중 박판강재의 활용은 슬래브에서 데크플레이트로 먼저 사용되기 시작하였으며 이러한 개념을 보에 확대하여 적용하는 연구들은 1990년대 호주에서 시작되었다. 기존의 방법들은 이미 시공된 RC보

에 측면강판을 볼트 또는 접착재로 접합하거나 FRP, CFRP 등을 이용하여 보강하는 방법들이 개발되어 있으며 최근 국내에는 강재의 영구거푸집의 역할과 휨재의 개념을 도입한 TSC보(김상모 등, 2003 ; 김상섭 등, 2004)가 개발되어 활발한 연구가 이루어지고 있다. 그러나 본 연구는 기존의 TSC보와 강재를 이용한 영구거푸집 개념은 유사하지만 다음과 같은 세 가지 차이점을 두고 연구를 진행하고자 한다. 본 연구가 기존의 연구와 차별화되는 개념으로 첫째, 기존의 목재거푸집을 대체할 박판강재거푸집 개념을 도입하여 박판강재가 목재거푸

1) 정희원, 건국대학교 건축공학부 교수(ahnhyung@konkuk.ac.kr)

2) 교신저자. 정희원, 삼육대학교 건축학과 교수

(Tel. 02-3399-1850, Fax. 02-3399-1857, Email : ryu129@hanmail.net)

본 논문에 대한 토의를 2007년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

집이 하던 단순한 거푸집의 기능 이외에 휨 및 전단 저항성능 향상에 기여할 뿐만 아니라 처짐 및 내진 성능 향상시킬 수 있게 하였다. 둘째, 기존 SC보는 필요크기를 주문하면 공장에서 제작하여 현장에 시공하는 방법을 적용하였지만 프로파일 보는 모듈단면의 개념을 도입하여 단순화된 모듈을 조립하면 원하는 크기의 부재를 자유롭게 성형할 수 있게 하였다. 셋째, 필요한 부위에 필요한 양만큼의 보강을 실시하여 휨내력을 확보하는 개념을 도입하였다. 이러한 개념에 의해 본 연구자는 단일단면프로파일보와 모듈단면프로파일보에 대한 연구를 진행하여 발표한바있으며 본 논문은 먼저 기존에 발표된 모듈단면 프로파일보를 개선한 모듈을 개발하여 적용 가능성을 확인하였으며 개선된 모듈을 바탕으로 필요한 휨내력을 얻기 위해 인장축을 보강한 보강모듈단면 프로파일보를 제작하여 휨거동에 대한 소성이론과 실험결과를 비교 검토하였으며 모듈간 슬립 등 각 부분의 거동 특성을 측정하고 분석하여 보강된 합성프로파일보의 적용가능성을 확인하고자 한다.

2. 보강 모듈단면 프로파일보의 이론해석

보강 모듈단면 프로파일보(이하 MPB-R)의 해석은 Oehlers (1993, 1994)가 제안한 식을 참고하여 산정하였다.

2.1 개개의 모듈에 슬립이 발생하지 않을 경우

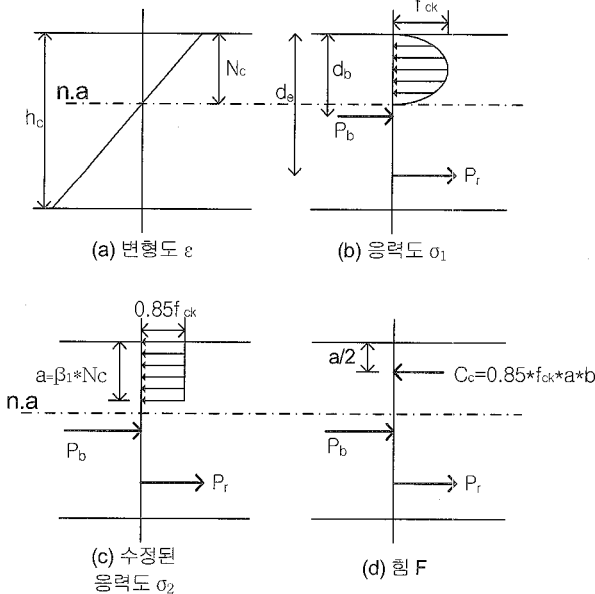


그림 1. 보강된 콘크리트 요소의 거동

그림 1은 콘크리트 요소의 거동을 나타내며 보강된 콘크리트 요소가 휨을 받아 압축력을 발휘한다면 콘크리트 요소와 부착력이 각각 압축과 인장축 요소가 되어 모멘트를 발생시킬

것이며 이때 힘의 평형을 생각하면 콘크리트의 압축력과 보강에 의한 인장력을 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_c = 0.85f_{ck}\beta_1N_c b = P_r + P_b \tag{1}$$

여기서 C_c 는 콘크리트의 압축력이며 P_b 는 프로파일과 콘크리트의 부착력이고 P_r 은 보강재의 인장력이다. 중립축 N_c 에 대해 정리하면

$$N_c = \frac{P_r + P_b}{0.85f_{ck}\beta_1 b} \tag{2}$$

그림 2는 강제 요소의 거동을 나타내며 N_b 는 중립축을 나타낸다. 콘크리트와 강재의 종합적인 힘의 평형을 생각하면, 콘크리트의 인장축에 작용한 부착응력은 강제 요소에서는 압축축에 작용하여야만 힘의 평형이 성립한다. 따라서 힘의 평형을 식으로 나타내면

$$P_c + P_b = P_t \tag{3}$$

여기서 P_c = 압축축 강재의 압축력
 P_t = 인장축 강재의 인장력

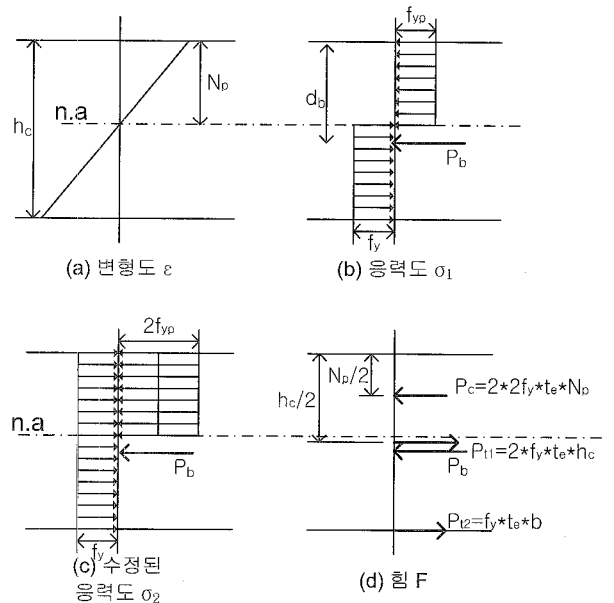


그림 2. 강제 요소의 거동

그림 1(c)는 그림 1(b)를 변형하여 강재의 압축축에 각각 압축응력 f_y 와 인장응력 f_y 를 더하여 변형한 것이며 힘의 평형에는 변함이 없다. 식 (3)을 그림 2(c)와 같이 변형된 응력분포에 적용하면 다음 식과 같다. 여기서 t_e 는 유효두께이다.

$$f_y t_e (2h_c + b) = 2 \times 2 f_y t_e N_p + P_b \quad (4)$$

식 (4)를 프로파일 중립축 N_p 에 관해 정리하면,

$$N_p = \frac{f_y t_e (2h_c + b) - P_b}{4 f_y t_e} \quad (5)$$

MPB-R의 모멘트 용량은 M_p 이며 그림 1(d)와 그림 2(d)와 같이 단면의 상단부에 대한 휨 모멘트를 취하면 구할 수 있다. 부착력은 반대방향으로 작용하고 두 단면의 동일 위치에 있기 때문에 모멘트에 대한 기여는 0이다.

$$M_p = f_y t_e (h_c^2 + b h_c - 2 N_p^2) + P_r \times d_e - \frac{0.85 f_{ck} a^2 b}{2} \quad (6)$$

2.1.1 완전부착일 경우(Full Shear Connection)

완전부착일 경우 슬립변형은 0이며 따라서 $N_c = N_p$ 이다. 그러므로 완전부착을 얻기 위해 요구되는 부착력 $(P_b)_{fsc}$ 는 식 (2)와 식 (5)를 등치시켜 구하면 다음과 같다.

$$(P_b)_{fsc} = \frac{f_y t_e (2h_c + b) \times 0.85 f_{ck} \beta_1 b - 4 t_e f_y P_r}{4 f_y t_e + 0.85 f_{ck} \beta_1 b} \quad (7)$$

식 (7)의 $(P_b)_{fsc}$ 를 식 (2)와 식 (5)에 대입하여 N_c , N_p 를 구하고, 식(6)에 대입하면 완전부착일 경우의 휨모멘트(M_p)를 구할 수 있다.

2.1.2 부분부착일 경우(Partial Shear Connection)

전단연결의 정도에 따라 $(P_b)_{fsc}$ 를 변형하여 N_c 와 N_p 의 값을 각각 구하고 식 (7)에 대입하여 구한다. 예를 들면 전단 연결도가 50%일 경우 $(P_b)_{50\%} = 0.5 \times (P_b)_{fsc}$ 이다.

2.1.3. 부착력 없을 경우(No Shear Connection)

$P_b=0$ 인 경우이며 식 (2)에서 $N_c=0$ 이 되고 식 (5)에서 $N_p = \frac{f_y t_e (2h_c + b)}{4 f_y t_e}$ 이 된다. 이때 콘크리트는 휨내력에 대한 기여는 없고 강재의 좌굴방지 역할만 하게 되며 강재에 의해서만 내력을 발휘하게 된다.

2.2 모듈간에 슬립이 발생하는 경우

2.2.1. 부분 부착일 경우(Partial Shear Connection)

MPB-R의 모듈간에 슬립이 발생하면 그림 2.11(i)와 같은 형태가 된다. 이 경우 휨모멘트(M_p)의 값은 슬립되지 않은 양만큼의 인장력에 의한 전체단면에 대한 휨 모멘트와 콘크리트의 모멘트, 그리고 슬립된 양 만큼의 개개 강판의 모멘트의 합에 의해서 구한다.

$$(M_p)_{psc} = P'_{(3)}(h_c - h_3) + P'_{(2)}(h_c - 1.5h_m) - P'_{(1)}(h_c - 2.5h_m) + P_r(a) \times d_e - C_c \frac{a}{2} + \Sigma M_m \quad (8)$$

여기서 $P'(a)$: 해당 모듈의 슬립되지 않은 인장력

h_c : 실험체 전체 높이

h_m : 개개 모듈의 높이

M_m : 슬립된 양 만큼의 개개모듈의 휨 내력

C_c : 완전부착 시 압축측 콘크리트 압축력

$P_r(a)$: 보강재의 항복시 인장력

d_e : 인장측 보강재 중심에서 압축연단에 이르는 거리

h_3 : 3번 모듈 도심

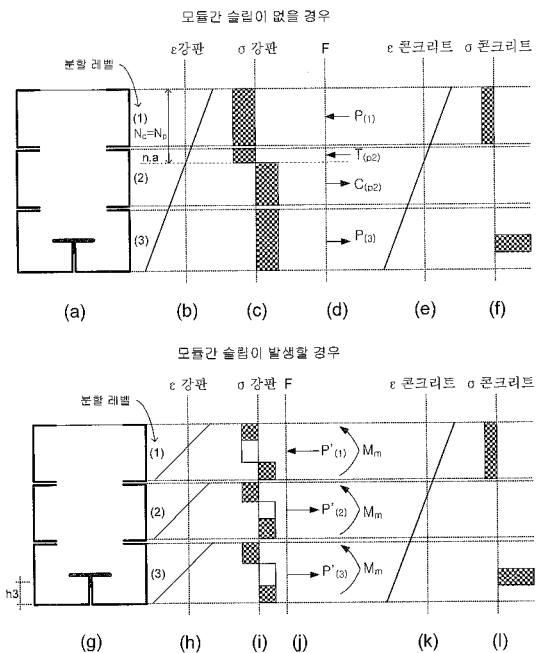


그림 3. 모듈간 슬립에 의한 응력 및 변형분포

예를 들어 슬립율이 30%라고 하면 개개강판 인장내력의 70%는 전단면에 대한 휨에 기여하게 되어 $p'(a)$ 가 되며 슬립된 30%는 개개강판의 M_m 에 기여하게 된다.

2.2.2. 모듈간 부착력 없을 경우(No Shear Connection)

MPB-R보의 콘크리트와 강재가 부착력이 없을 경우의 $(M_p)_{nsc}$ 의 값은 개개 모듈의 휨내력 및 내부 보강재와 콘크리트의 휨내력의 합이다.

3. 실험계획

3.1 실험체

본 실험은 인장보강은 철근과 강판을 이용하여 두가지 경우로 보강성능을 평가하였다. 10mm철근 4개로 보강한 B10단면, 13mm철근 4개로 보강한 B13단면, 16mm철근 4개로 보강한 B16단면을 제작하였으며, B10과 유사한 단면적을 가지는 강판으로 보강된 T10단면, B13과 유사한 단면적을 가지는 T13단면, B16과 유사한 단면적을 가지는 T16단면을 제작하였으며 아무런 보강을 실시하지 않은 CB2 단면 등 총 7개의 실험체를 제작하여 실험을 실시하였다. 실험체의 결합은 직경 8mm 길이 25mm의 일반볼트를 200mm간격으로 배치하여 모듈간의 결합에 사용하였다. 개선된 CB2 실험체는 기존의 CB실험체와 비교를 통해 성능의 개선여부를 파악하였으며 보강 실험체들을 보강재의 양에 따라 강성 및 내력의 향상이 나타났는지 이론해석 결과와 실험을 통해 비교 분석하였다.

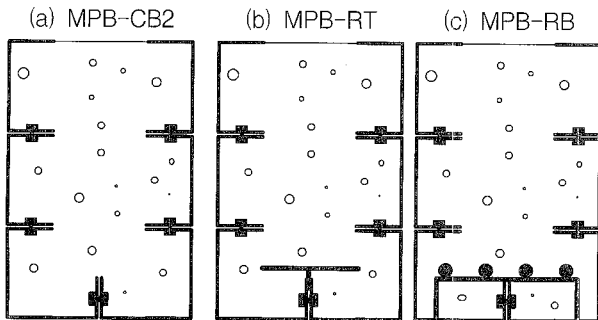


그림 4. 실험체 단면 형상

그림 4에 실험체의 단면형상을 그림으로 나타내었으며 모든 실험체의 폭은 200mm 높이는 300mm이다. 그림 5에는 각 모듈의 크기를 나타내었으며 표 1에 강판보강과 철근보강단면에 대한 단면적과 상세내용을 표기하였다.

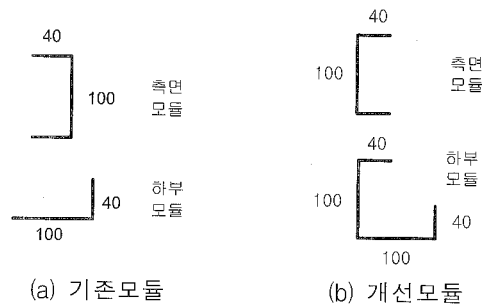


그림 5. 모듈 비교

표 1. 보강 모듈 상세

실험체명	보강형태 B×H×t ₁ ×t ₂ (mm)	보강 단면적	비고
MPB-CB2	-	-	
MPB-RT10	65×25×3.2×3.2	288mm ²	
MPB-RT13	65×25×6.0×5.0	515mm ²	
MPB-RT16	65×32×9.0×6.0	777mm ²	
MPB-RB10	4-D10	284mm ²	
MPB-RB13	4-D13	508mm ²	
MPB-RB16	4-D16	796mm ²	

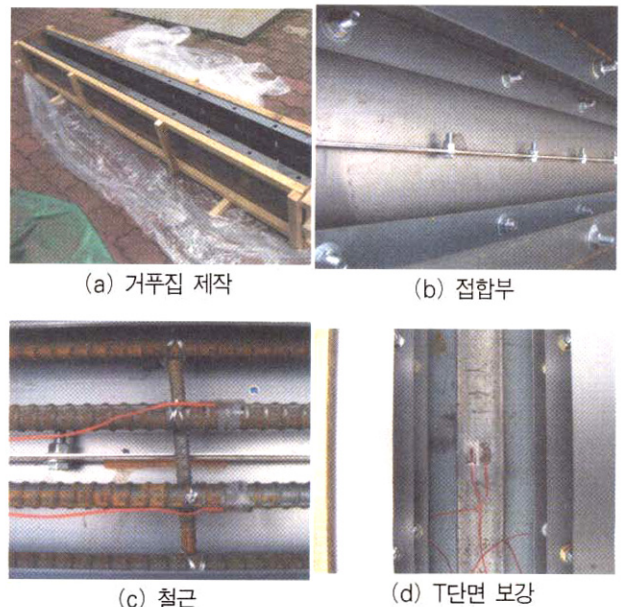


그림 6. 실험체 제작 사진

3.2 소재 실험

3.2.1 콘크리트 압축강도 실험

본 실험체에 사용된 콘크리트는 설계기준강도가 24MPa이며 현장타설 후 양생하였다. KS F 2403에 따라 제작한 공시체는 실험과 동일한 조건에서 양생하였으며, 콘크리트 압축

강도 시험결과는 평균 26.0MPa를 얻었다.

표 2. 콘크리트의 배합비

설계 강도 (MPa)	W/C (%)	슬럼프 (mm)	단위 골재량 (N/m ³)			
			W	C	S	G
24	50.4	145	1,735	3,459	8,261	9,241

W : 물 C : 시멘트 S : 잔골재량 G : 굵은골재량

3.2.2 강재의 인장강도 실험

본 실험에 사용된 시험편은 KS D 3503의 압연강판인 SS400으로 두께는 1.6mm이며 2개의 시험편을 제작하였다.

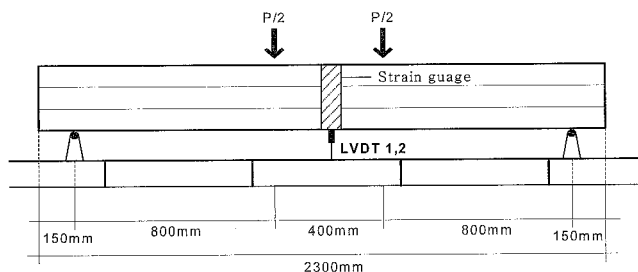
표 3. 강재의 인장강도 시험결과

시험편	f_y	f_u	E	ϵ_y	σ_y/σ_{max}	연신율 (%)
1.6mm	372.40	423	204100	1830	0.88	27
4.5×25	323.40	495.88	177234	1834	0.65	21
6×35	351.82	503.05	186740	1884	0.70	22
6×65	357.00	512.30	199047	1717	0.70	22
9×65	326.34	484.60	159881	1546	0.67	23
D10	541.94	691.52	187807	2914	0.59	20
D13	405.72	594.94	173342	2374	0.68	22
D16	496.86	616.07	217354	2614	0.81	17

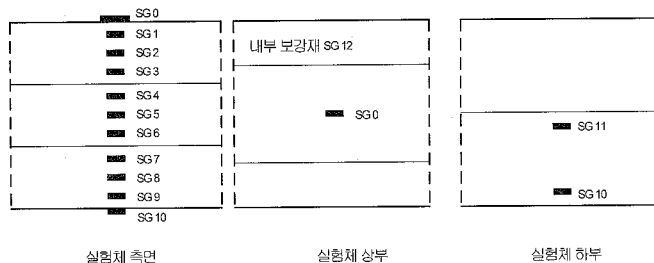
f_y : 항복강도(MPa), f_u : 인장강도(MPa), ϵ_y : 항복변형도($\times 10^{-6}$), E:탄성계수(MPa) σ_y/σ_{max} : 항복비

3.3 가력 및 측정 방법

실험체의 가력은 그림 7과 같이 490kN의 만능시험기를 사용하여 2점 가력하였다. 변위측정은 보 중앙 좌우측에 두 개의 변위계를 설치하였다. 강재의 변형도는 측면 모듈 각각의 상, 중, 하와 보 상부와 하부에 부착하였다. 보 중앙 상부에 콘크리트 게이지를 부착하여 압축측 콘크리트의 거동을 파악하였다.



(a) LVDT 측정 위치



(b) 스트레인 게이지 위치

그림 7. 측정 위치 및 스트레인 게이지 부착위치

4. 실험결과 및 분석

4.1 하중-변위 및 하중-변형도 곡선

4.1.1 하중-중앙부 변위

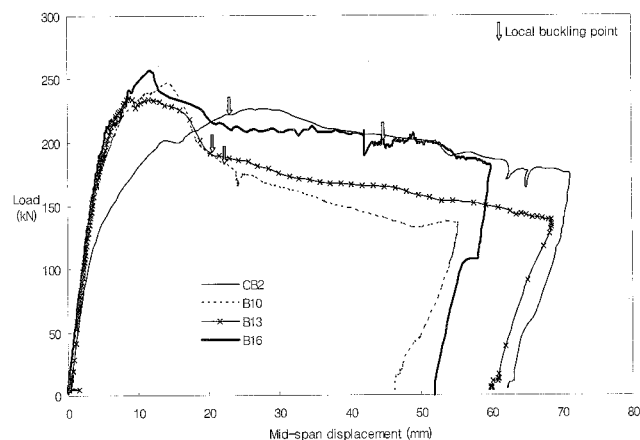


그림 8. 하중-중앙부 변위 (철근보강과 CB2)

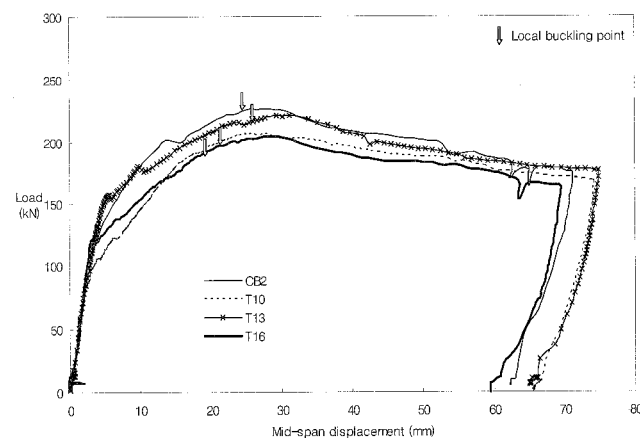


그림 9. 하중-중앙부 변위 (T단면 보강과 CB2)

그림 8, 9는 각 실험체의 하중-변위 곡선을 비교하여 나타

났다. 대부분의 실험체는 충분한 변형능력을 나타냈으며 T단면 계열 보강 실험체들은 강재의 보강에도 불구하고 무보강 실험체보다 작은 최대내력을 보이고 있는 것으로 나타났으며 철근으로 보강한 B계열 실험체들은 무보강 실험체 보다 큰 최대내력을 나타내고 있다.

B계열에서 B10실험체와 B13실험체가 최대하중 이후 소성 고원 현상을 나타내지 못하고 하중이 급격하게 감소하는 경향을 나타내고 있다. T형 단면의 내력 저하 이유는 T형 보강으로 인해 보강재 하부에 콘크리트의 충전이 제대로 이루어지지 않은 것이 가장 큰 원인으로 판단된다.

4.1.2 하중-상부 콘크리트 변형도

그림 10, 11은 상부콘크리트의 하중-변형도 곡선이다. CB2실험체는 하중의 증가에 따라서 콘크리트의 변형도가 증가해 6000에 이르고 있으며 콘크리트가 내력증가에 충분히 기여한 것으로 판단된다.

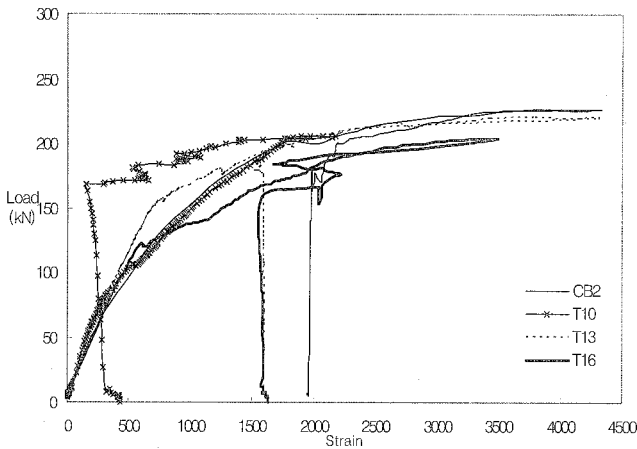


그림 10. 콘크리트 변형도 (T단면 보강과 CB2)

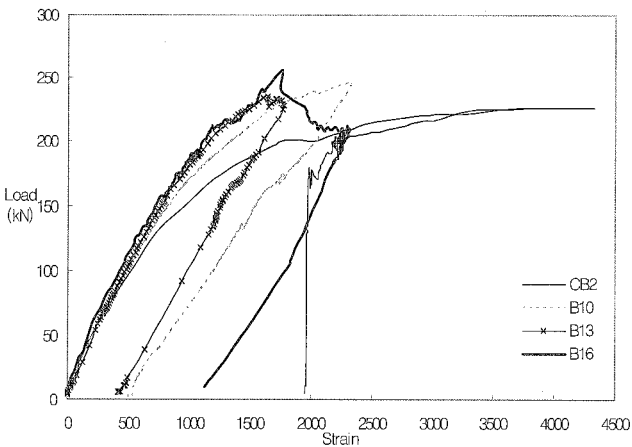


그림 11. 콘크리트 변형도 (철근보강과 CB2)

T계열 실험체들은 최대 하중 시에 변형도가 급격히 증가하여 압괴되는 양상을 나타내고 있으나 B계열 실험체들은 변형도의 급격한 증가양상이 나타나고 있지 않으며 재료실험시 측정된 최대 변형도를 넘지 않고 있다. 이는 T계열에서 최대하중시 처짐이 크기 때문인 것으로 판단된다.

4.1.3 하중-말면 강재 변형도

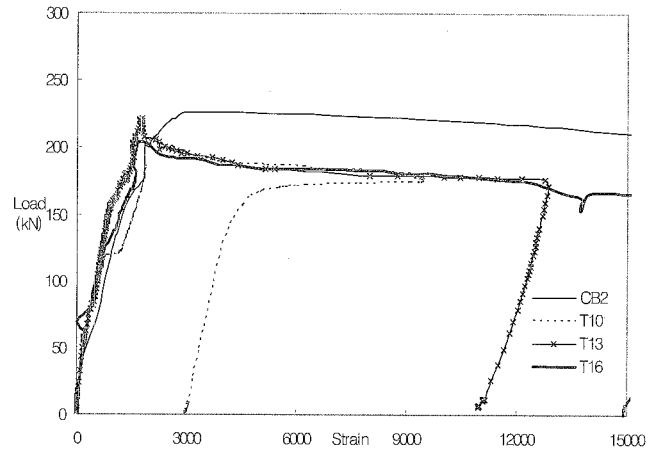


그림 12. 말면 강재 변형도 (T단면 보강과 CB2)

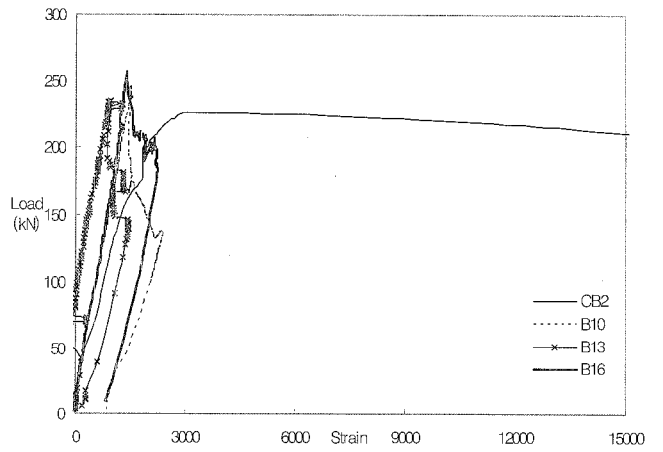


그림 13. 말면 강재 변형도 (철근보강과 CB2)

그림 12, 13은 말면강재의 하중 변형도 곡선이다. CB2를 포함한 T계열은 하중 증가에 따라 변형이 증가하여 충분한 변형능력을 나타내고 있는 것을 확인 할 수 있으며 하부모듈이 휨 거동에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이에 반해 B계열 실험체는 실험종료 시 까지 항복 변형도를 넘지 않는 변형 양상을 보이고 있는 것으로 나타나 T계열과는 대조되는 양상을 나타냈다.

4.1.4 하중-보강재 변형도

그림 14, 15는 콘크리트 내부 인장축 보강재의 하중-변형

도 곡선이다. T계열은 T단면의 상부에 스트레인 게이지를 부착하여 변형도를 측정하였으며 T10실험체 게이지는 초기에 탈락하였다. T계열에서는 초기에는 보강 T단면이 콘크리트와 일체가 되어 거동하여 인장되는 양상을 나타내다가 콘크리트와 분리되면서 압축을 받는 양상이 나타났다. T16실험체는 최대하중 이후 보강재가 콘크리트와 완전히 분리되어 압축 항복하는 현상이 나타났다.

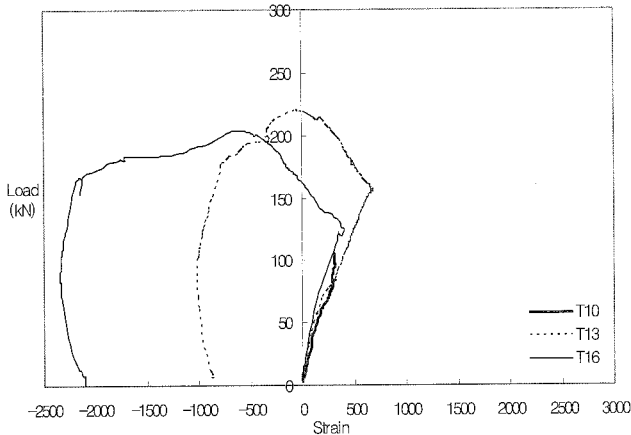


그림 14. T 단면 보강

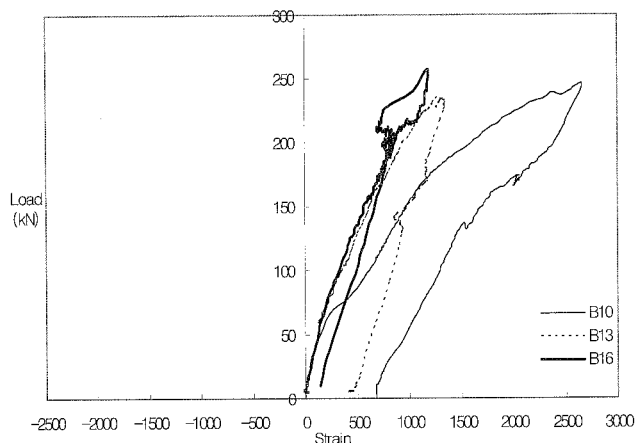


그림 15. T 철근 보강

T10실험체도 압축항복하지는 않았으나 변형도 1000이상을 나타내며 콘크리트와 완전히 분리된 양상을 나타냈다. B계열은 B10실험체가 가장 큰 변형능력을 보여 항복에 이르렀으며 B13과 B16은 항복변형도의 절반정도의 변형도를 나타냈다. 결과적으로 보강재가 항복한 B10실험체가 이론값에 가장 근접되는 최대내력을 나타냈다.

4.2 분석 및 고찰

4.2.1 휨내력 분석

1) CB2와 기발표 프로파일보 비교

그림16에 기발표 단면의 형상을 나타냈으며 표 4는 개선된 CB2와 기발표된 단일단면 프로파일보(PB 류수현 등, 2005) 요철 단일단면 프로파일보(PPB 류수현 등, 2005) 모듈단면 프로파일보 MPB-CB 류수현 등, 2006; MPB-LB 안형준 등, 2006)실험체의 이론 및 실험 최대하중과 초기강성 단면적비가 비교되어 있다. CB2의 하중비가 기존의 CB 0.76, LB 0.8보다 개선된 0.84이며 단일 단면인 요철 단면의 0.88에 근접함을 알 수 있다. 초기강성은 기존 실험체와 유사한 양상을 나타내고 있다.

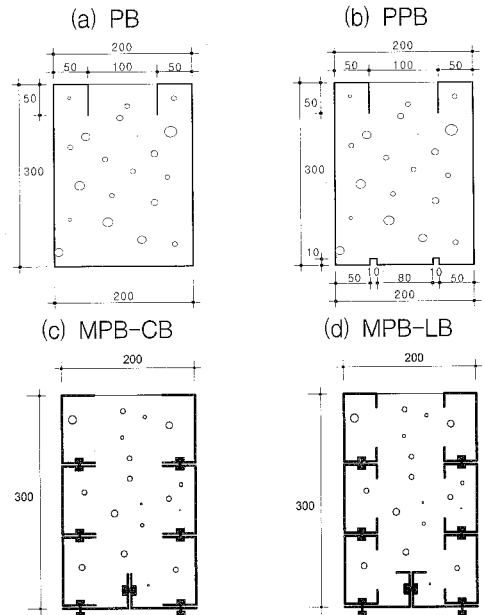


그림 16. 기발표 단면 형상

표 4. 실험결과 및 이론 해석결과 비교분석

실험체명	이론(kN) P_{max}	실험(kN) P_{max}	$\frac{P_{max}}{P_{max}}$	초기강성 $\frac{P_y}{\delta_y}$	단면적비 $\frac{A}{A_{CB2}}$
MPB-CB2	271.23	226.48	0.84	20.02	1
MPB-CB	281.03	213.31	0.76	21.79	1.06
MPB-LB	327.80	263.29	0.80	36.09	1.28
PB	193.70	181.50	0.94	20.37	0.78
PPB	210.15	185.87	0.88	24.54	0.81

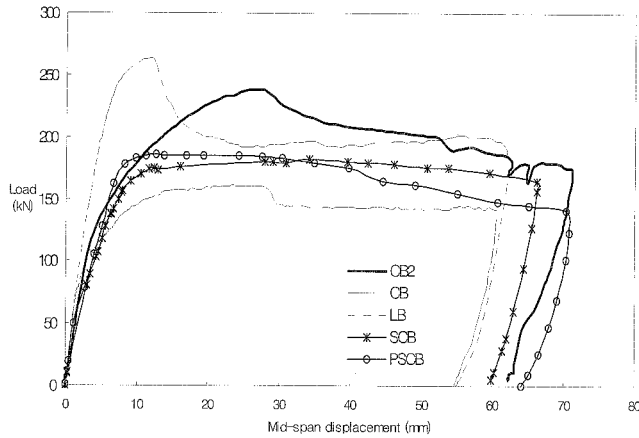


그림 17. CB2와 기존 PB보 중앙 하중-변위 비교

그림 17을 보면 개선된 CB2실험체가 충분한 변형능력을 보이고 있으며 최대하중 이후 충분한 소성고원이 나타나고 있다. 따라서 강성이 크지만 최대하중 이후 급격한 하중 저하 양상을 보이는 LB실험체와 충분한 내력을 발휘하지 못하는 CB실험체 보다는 CB2 실험체가 보다 우수한 단면이라고 판단되며 이외의 다른 실험체 보다 우수한 휨 거동능력을 발휘하는 것으로 판단된다.

2) MPB-RT 분석

표 5에는 이론과 실험의 최대 하중이 비교되어 있다. 이론 최대 하중은 모듈상호간이 완전 결합되고, 강재가 콘크리트와 완전하게 합성되었다는 가정 하에 산정한 것이다. CB2 실험체는 P_{me}/P_{mt} 값이 0.84로 2장에서 전개한 이론식으로 분석하면 최대내력이 슬립이 발생하지 않고 완전 부착되었을 경우 271.233kN, 슬립이 발생하지 않고 50% 부착되었을 경우 239.6kN, 슬립을 20%일 경우 223.50kN로 실험값 226.48kN은 모듈간의 슬립이 발생하고 부착력이 저하됐을 때의 이론값과 유사함을 확인할 수 있고, 그림 18(a)의 측면 강재 변형도 변화양상을 통해 슬립이 발생한 것을 확인할 수 있으며 2.2.1의 이론이 적용됨을 확인할 수 있다. 여기서 슬립율은 슬립을 통해 개개강판의 휨으로 분배되는 프로파일 내력의 비율이다.

T계열 실험체는 완전부착과 슬립이 없을 경우의 이론값과 실험값의 비가 T10은 0.66 T13은 0.66 T16은 0.57로 실험값이 매우 저조하게 나타났다. 원인은 보강재와 콘크리트의 부착 탈락현상과 T형 보강재 하부의 콘크리트 충전 불량이 주요 원인으로 판단되며 T형단면은 휨에 대한 보강성능이 우수하지 않은 것으로 판단된다.

표 5. MPB-RT 실험결과 및 이론 해석결과 비교분석

실험 체명	이론(kN) P_{mt}	실험(kN) P_{me}	$\frac{P_{me}}{P_{mt}}$	이론(kN) P_{mt2}	$\frac{P_{me}}{P_{mt2}}$
MPB-CB2	271.23	226.48	0.84	181.00	1.25
MPB-RT10	311.73	206.05	0.66	211.15	0.98
MPB-RT13	336.45	222.25	0.66	232.68	0.96
MPB-RT16	356.75	204.11	0.57	258.13	0.79

실험체의 이론내력을 소재시험결과대신 설계기준강도로 대체하여 계산하여 P_{mt2} 를 산정하여 실험값과 비교하였으며 표 4에 나타내었다. 여기서 소재의 설계기준강도는 강판은 SS400강재이며 $f_y = 235\text{MPa}$ 이고 철근은 SD400이며 $f_y = 400\text{MPa}$ 이다. 실험값과 비교결과 실험/이론값 비가 CB2는 1.25, T10는 0.98, T13는 0.96, T16은 0.79로 나타나 T16을 제외하면 이론값에 실험값이 근접함을 알 수 있다.

3) MPB-RB 분석

표 6은 최대 휨모멘트의 이론값과 실험값을 비교한 것이다. 최대 휨모멘트의 이론값은 모듈 상호간이 완전 결합되고 강재가 콘크리트와 완전 합성되었다는 가정 하에 산정한 것이다. B10실험체는 P_{me}/P_{mt} 값이 0.75로 보강한 실험체 중에 가장 우수한 것으로 나타났다. 2장에서 전개한 이론식으로 분석하면 최대내력이 슬립이 발생하지 않고 완전 부착시 327.26kN, 슬립이 발생하지 않고 50% 부착시 308.5kN, 슬립을 35%일 때 242.85kN로 실험값 246.16kN은 모듈간의 슬립이 발생하고 부착력이 저하됐을 때의 이론값과 유사함을 확인할 수 있고, 그림 18(d)의 측면 강재 변형도 변화양상을 통해 슬립의 발생한 것을 알 수 있으며 2.2.1의 이론이 적용됨을 확인할 수 있다. 그림 18(d)의 측면 변형 분포도를 참고하면 실재 강재의 변형양상이 모듈간 완전결합을 가정한 2.1.2보다는 슬립을 가정한 2.2.1에 근접함을 확인할 수 있다.

B10실험체 외에 B13, B16실험체는 각각 0.68, 0.75 저조한 실험/이론값 비를 나타내었으며 축소실험의 영향으로 콘크리트의 충전 및 피복 콘크리트의 충분한 면적확보가 부족하여 내력이 향상되지 못한 것으로 판단된다. 압축측에 슬래브가 보강되어 압축내력이 향상되고 압축측 강재의 횡좌굴현상이 억제되는 T형보의 개념을 도입하면 보다 우수한 MPB의 개발이 가능할 것으로 판단된다.

표 6. MPB-RB 실험결과 및 이론 해석결과 비교분석

실험 체명	이론(kN) P_{mt}	실험(kN) P_{me}	$\frac{P_{me}}{P_{mt}}$	이론(kN) P_{mt2}	$\frac{P_{me}}{P_{mt2}}$
MPB-CB2	271.23	226.48	0.84	181.00	1.25
MPB-RB10	327.26	246.16	0.75	230.80	1.07
MPB-RB13	345.48	236.13	0.68	266.83	0.90
MPB-RB16	404.63	256.51	0.63	304.55	0.84

실험체의 이론내력을 소재시험결과대신 설계기준강도로 대체하여 계산하여 P_{mt2} 를 산정하여 실험값과 비교하여 보았다. 여기서 소재의 설계기준강도는 강판은 SS400강재이며 $f_y=235\text{MPa}$ 이고 철근은 SD400이며 $f_y=400\text{MPa}$ 이다. 실험값과 비교결과 실험/이론값 비가 B10는 1.07, B13는 0.90, B16은 0.84이다. B10은 보강실험체로는 유일하게 1 이상의 값을 나타냈다.

4.2.2 초기 강성 및 내력비와 연성의 관계

표 7에 각 실험체별 초기강성을 산정하였다. 초기강성은 항복하중에 대한 항복 하중의 비로 정의 하였으며 항복변위는 최대내력과 최대내력의 60%인 강성을 연결하여 만나는 점을 항복 변위로 산정하였고, 이때의 내력을 항복내력으로 정의하였다.(김성배 등, 2004) T계열 실험체는 CB2와 유사한 강성을 나타냈으며 보강단면이 강성증가에 전혀 영향을 주지 못한 것으로 나타났다. 이에 반해 B계열 실험체들은 T계열과 CB2에 비해 큰 강성을 나타내 보강재의 보강효과가 강성에 영향을 미친 것으로 판단된다. 특히 T10의 초기 강성이 18.9로 최소로 나타났으며 이는 인장축 보강 T단면위치에 콘크리트가 밀실하게 충전 되지 못하여 발생된 것으로 판단된다. 변위-연성비는 항복변위와 최대내력의 80%에 해당하는 강도에서 평가한 최대변위의 비로 정의되며 연성능력을 나타내며 내력 비는 최대하중과 항복하중의 비이다. 내력비는 1.20~1.46에 분포하며 변위-연성비는 3.40~10.0 4에 분포하며 T계열 실험체의 변위-연성비가 B계열 실험체보다 크게 나타났다.

표 7. MSC-R 초기강성 및 연성

실험 체명	P_y (kN)	δ_y (mm)	초기강성 $\frac{P_y}{\delta_y}$	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	내력비 $\frac{P_{max}}{P_y}$	δ_u	변위 연성비 $\frac{\delta_u}{\delta_y}$
CB2	170.80	8.53	20.02	226.48	25.63	1.33	62.52	7.33
RT10	162.40	12.44	13.05	206.05	26.19	1.27	74.10	5.96
RT13	163.37	7.40	22.08	222.25	32.00	1.36	74.31	10.04
RT16	140.08	7.41	18.90	204.11	28.72	1.46	64.65	8.72
RB10	190.86	5.66	33.72	246.16	14.6	1.29	19.23	3.40
RB13	191.18	5.17	36.98	236.13	8.59	1.24	22.92	4.43
RB16	213.82	6.31	33.89	256.51	11.81	1.20	32.81	5.20

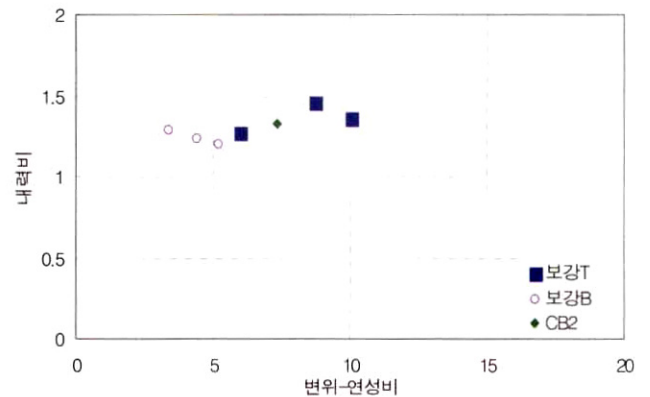
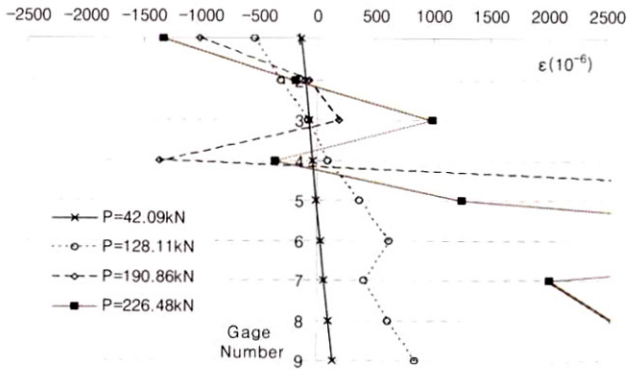


그림 18. 각실험체의 내력비와 변위-연성비

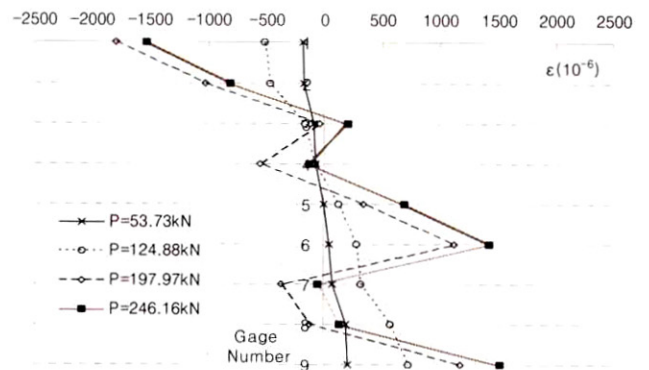
그림 18은 각 실험체의 내력비와 변위-연성비의 관계이다. 회귀분석 결과 변위-연성비와 내력비에 관한 상관계수는 0.73으로 내력비가 높을수록 연성이 비례적으로 증가하며 기존 MPB의 0.93보다는 낮은 상관관계를 보이고 있다.

4.2.3 실험체별 스트레인 게이지 위치에 따른 변형도 (Strain) 분석

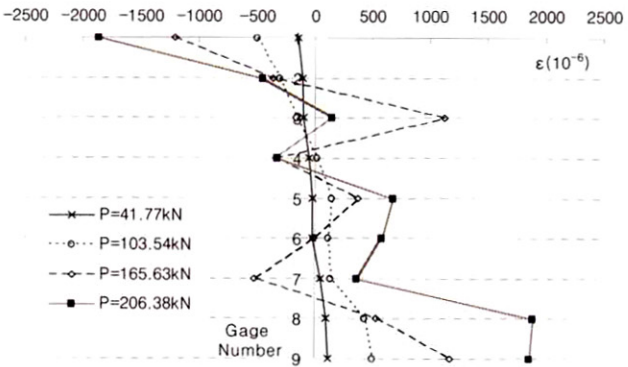
그림 19에는 측면모듈의 하중 변형도 분포를 나타내고 있다. 세로축의 번호 1-9는 스트레인 게이지의 위치를 나타내며 그림 7을 참조하면 되고 가로축은 변형도를 나타낸다. 하중은 4단계로 나누어 각 하중 단계별 게이지의 위치에 따른 변형도 분포를 나타내었다. 하중 1단계는 최대하중 20%이며 2단계는 최대하중의 50% 정도 3단계는 최대하중의 80%정도 4단계는 최대하중의 변형도 분포를 나타낸다. 편의상 각 실험단계의 변형도 분포를 쉽게 파악할 수 있도록 하기 위하여 다양한 선을 이용하여 각 하중 단계별로 변형도 값을 연결하였다. 1, 2, 3번은 상부 모듈 4, 5, 6번은 중앙부 모듈 7, 8, 9번은 하부모듈을 각각 나타낸다.



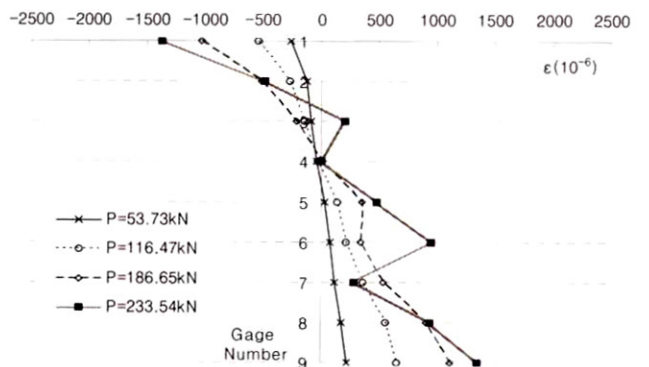
(a) CB2



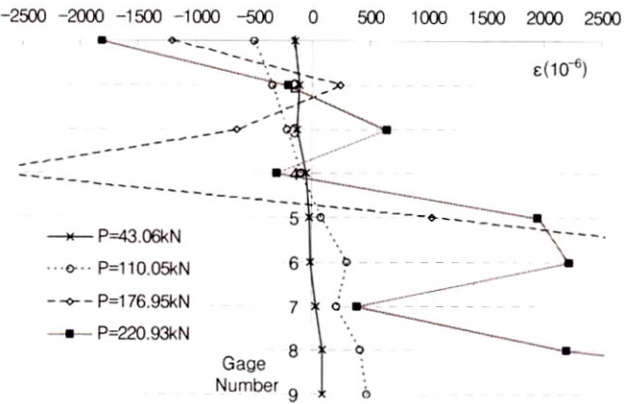
(e) B10



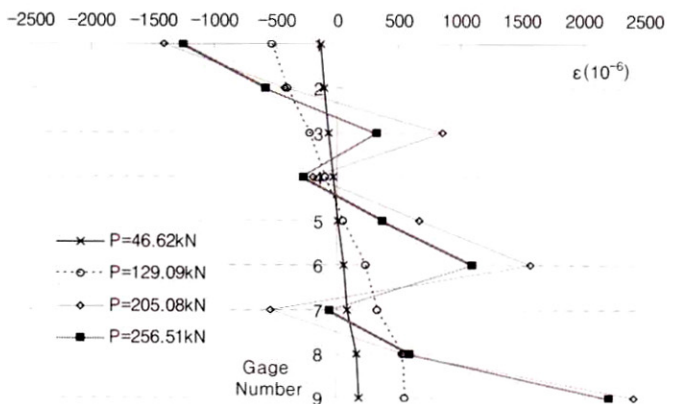
(b) T10



(f) B13

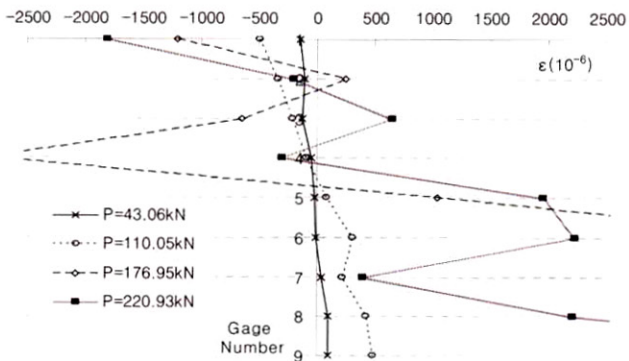


(c) T13



(g) B16

그림 19. 각 실험체별 측면모듈의 변형도 분포



(d) T16

모든 실험체에서 1, 2단계 최대하중의 50%정도까지는 미소한 모듈간의 슬립현상이 발생하였고 일정한 선형관계를 유지하고 있다. 하중이 증가 할수록 모듈간에 슬립현상이 발생하였으며 최대하중 이후에는 모듈간 분리현상이 심화되었다. 모든 실험체에서 측면판이 완전 소성거동하는 양상을 보이지 않았으며 이는 실험 휨내력이 완전 소성거동을 가정한 이론값에 이를 수 없음을 나타낸다. CB2는 완전소성인 이론값에 가장 근접한 실험체로 최대하중에서 인장측 강재의 변형도과 항복변형도를 훨씬 초과한 양상을 보여 측면강재가 내력상승에

기여하고 있음을 알 수 있다. T계열의 압축축 변형도는 최상 부단 최대내력에서 항복변형도에 이르고 있으며 T16은 항복 하지 않았다. 인장축은 하부모듈 중앙과 하부가 최대내력에서 항복에 이른 것으로 나타났다. B계열의 압축축 변형도는 B10만 항복변형도에 나타났으며 인장축에서는 B16실험체 하부모듈 하부에서만 항복에 이르렀다. 특히 B계열 인장축의 변형도가 T계열에 비해 작은 양상을 나타냈는데 이는 내부 철근의 내력 분담으로 인한 영향으로 판단된다.

5. 결론

개선 및 보강된 모듈단면프로파일보(MPB)의 휨거동에 관한 실험 및 이론해석 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 개선된 C-Type 프로파일보(CB2)는 실험값/이론값 하중비가 기존의 C-Type볼트연결실험체(CB) 0.76, Lip-Type볼트연결실험체(LB) 0.8보다 개선된 0.84이며 단일단면인 요철단면실험체(PPB)의 0.88에 근접한 양상을 나타냈으며 충분한 변형능력과 함께 최대하중 이후 충분한 소성고원이 나타나고 있다. 따라서 강성이 크지만 최대하중 이후 급격한 하중 저하 양상을 보이는 LB실험체 보다는 안정적인 단면이라고 판단되며 이외의 다른 실험체 보다 우수한 휨 거동능력을 발휘하는 것으로 판단된다.
- (2) T형단면으로 보강된 T계열 실험체는 CB2와 유사한 강성을 나타냈으며 보강단면이 강성증가에 전혀 영향을 주지 못한 것으로 나타났다. 이에 반해 철근으로 보강된 B계열 실험체들은 T계열과 CB2에 비해 큰 강성을 나타내 보강재의 보강효과가 강성에 영향을 미친 것으로 판단된다.
- (3) 모든 실험체에서 최대하중의 50%정도까지는 미소한 모듈간의 슬립현상이 발생하였고 일정한 선형관계를 유지하고 있다. 이후 하중이 증가 할수록 모듈간에 슬립 현상이 증가하였으며 최대하중 이후에는 모듈간 분리현상이 심화되었다. 모든 실험체에서 측면 프로파일이 완전 소성 거동하는 양상을 보이지 않았다.
- (4) 완전부착과 슬립이 없을 경우의 실험값/이론값 하중비가 T단면으로 보강된 T10은 0.66 T13은 0.66 T16

은 0.57로 철근으로 보강된 B10은 0.75, B13은 0.68 B16은 0.63으로 실험값이 매우 저조하게 나타났으며 축소실험의 영향으로 콘크리트의 충전 및 피복 콘크리트의 충분한 면적확보가 부족하여 내력이 향상되지 못한 것으로 판단된다. 실험결과를 설계 기준강도와 비교하면 T16과 B16을 제외한 모든 실험체는 0.9이상이었으며 설계기준강도를 기준으로 한다면 보강 MPB보의 적용가능성은 충분하다고 판단된다.

참고 문헌

- 김상모, 김규석(2003) T형 합성보의 내력 평가에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제15권, 제4호, pp. 467-474.
- 김상섭, 김상모, 김성배, 서동기, 김규석(2004) 단순지지 T형 합성보의 휨거동에 관한 실험적 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제16권, 제2호, pp.225-233.
- 김성배, 김도훈, 서동기, 김상모, 이창남, 김상섭(2004) 포스트텐션으로 보강한 합성보의 내력평가에 관한 연구, 대한건축학회 논문집 구조계, 대한건축학회, 제20권, 제1호 pp.59-66.
- 류수현, 안형준(2005) 요철단면 SC보의 휨 내력에 관한 연구, 한국구조물진단학회지, 한국구조물진단학회, 제10권, 제1호, pp.197-204.
- 류수현, 안형준(2005) 장방형 SC보의 휨 내력에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 논문집 구조계, 대한건축학회, 제21권, 제9호 pp.55-61.
- 류수현, 정의관, 안형준(2006) C-Type 모듈단면 SC보의 휨내력에 관한 연구, 대한건축학회 논문집 구조계, 대한건축학회, 제22권, 제3호 pp.37-44.
- 안형준, 신일균, 류수현(2006) Lip-Type 모듈형 SC보의 휨내력에 관한 실험적 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제18권, 제2호 pp.281-270.
- Oehlers, D. J. (1993) Composite Profile Beams, *Journal of Structure Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 4, pp.1085-1100.
- Oehlers, D. J. (1994) Flexural Strength of Profile Beams, *Journal of Structure Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 2, pp378-393.
- (접수일자 : 2007. 1. 15 / 심사일 2007. 2. 12 /
심사완료일 2007. 5. 15)