

박판 냉간성형형강 골조의 접합부 거동에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Behavior of Connections of Thin-Walled Cold-Formed Steel Section Frames

권 영 봉¹⁾ · 조 종 수²⁾ · 송 준 업³⁾ · 김 갑 득⁴⁾

Kwon, Young Bong · Cho, Jong Su · Song, Jun Yeup · Kim, Gap Deuk

요 약 : 신형상 폐단면 냉간성형형강 스티드와 래프터로 구성된 포탈프레임의 접합부의 모멘트-회전각 관계, 회전강성, 항복모멘트 및 극한모멘트 등을 파악하기 위하여 접합부실험을 수행하였다. 실험의 주요 변수는 연강 접합철물의 두께 및 형상과 접합부 시험체의 비틀림에 관한 구속조건이며, 실험결과와 검증의 위해서 비선형해석 결과와 비교하였다. 반강접 접합부의 휨강성을 실험에 의한 모멘트-회전각 곡선으로부터 구한 할선강도로 제안하여 구조해석을 통하여 타당성을 검토하였다.

ABSTRACT : A series of connection tests of portal frames which were composed of cold-formed steel studs and rafters was carried out to study the moment-rotation relation, the rotational rigidity, and the yield and the ultimate moment of the connections. The main factors of the tests were the thickness, the shape of the connecting members which were made of mild steel, and the torsional restraints of the test specimens. The test results were compared with those obtained through the non-linear analysis, for verification. The secant stiffness estimated from the experimental moment-rotation curve was proposed for the rotational rigidity of semi-rigid connections, and its validity was verified in the structural frame analysis.

핵심용어 : 냉간성형형강, 포탈프레임, 접합부, 모멘트-회전각(M- θ) 관계, 접합철물, 반강접, 비틀림구속

KEYWORDS : Cold-Formed Steel Sections, Portal Frames, Connections, Moment-Rotation Relation, Connecting Members, Semi-Rigid, Torsional Restraint

1. 서론

박판냉간성형형강(Thin-Walled Cold-Formed Steel Sections)을 경량형강 구조물에 적용시키기 위해서는 열간압연형강 구조물의 접합부 형태를 그대로 적용할 수는 없으므로, 고유한 단면형상에 따라 적용될 수 있는 다양한 접합부의 구조적인 거동의 안전성이 검증(Mills 등, 2002)되어야 한다. 일반적으로 냉간성형형강 골조를 구성하는 접합부는 박판부재의 사용으로 인한 국부좌굴 및 지압파괴 문제(Hancock, 1998; Yu, 1991)와 스크류, 볼트 및 용접의 전단강도 검토가 필수적으로 요구되며, 특히 C-형강과 같은 일축대칭단면이 휨부재로 사용될 경우 발생될 수 있는 휨/비틀 변형에 대한 세심한 검토가 반드시 이루어져야 할 것이다. 박판냉간성형형강

트러스의 현재와 수직재의 접합부는 직접 또는 연결판을 이용하여 연결되고 구조해석시 흔히 활절(AISI, 1996)로 간주되고 있다. 그러나 구조부재 보다 두꺼운 접합철물을 사용하여 연결하는 골조의 접합부는 회전강성의 크기에 따라 강접 또는 반강접접합부(Mills 등, 2002)로도 분류될 수 있으며, 이를 합리적으로 해석 및 설계에 고려하기 위해서는 접합부의 비선형 거동을 파악하고 회전강성을 결정하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 트러스 부재로 사용하기 위하여 개발된 신형상 폐단면 냉간성형형강인 PRY단면(송인섭 등, 2002)을 사용하여 스티드와 래프터로 구성된 포탈프레임에 적용될 수 있는 접합철물로 구성된 접합부의 거동을 실험과 수치해석을 통하여 살펴보았다. 냉간성형형강 골조 접합부의 모멘트-회전각 관계, 회전강성, 항복 및 극한모멘트를 예측하고 접합철물의

1) 정회원, 영남대학교 토목공학과 교수, 공학박사
(Tel. 053-810-2418 Fax. 053-814-2410, E-mail: ybkwon@yu.ac.kr)

2) 영남대학교 토목공학과 석사(js1202@yumail.ac.kr)

3) 영남대학교 토목공학과 강사, 공학박사(hickey1@daum.net)

4) RIST강구조연구소 경량구조연구팀, 책임연구원(gdkim@rist.re.kr)

본 논문에 대한 토의를 2003년 12월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

형상, 두께 및 비틀림 구속 등의 다양한 변수에 따른 접합부의 거동을 살펴보기 위하여 일련의 접합부 실험을 수행하였으며, 실험의 타당성을 검증하기 위하여 PRY단면의 좌굴해석과 접합부의 수치해석을 수행하여 실험결과와 비교하였다. 또한 접합부의 반강접성을 고려한 골조의 비선형구조해석을 수행하여 반강접접합부의 적용 가능성 및 타당성을 검토하였다.

2. 단면의 형상 및 특성

2.1 단면형상

포탈프레임 접합부의 실험에 사용된 PRY단면은 현재까지 광범위하게 사용되어온 기존의 C-형강의 구조적인 단점을 보완하고 단면성능을 증가시키기 위하여 고강도인 SGC58강종($F_y=5700\text{kgf/cm}^2$)의 사용과 특수접합방식인 클린칭(Clinching; 겹쳐 접어서 접합(박명균 등, 2002)하는 특수한 방법)을 이용한 폐단면 구성으로 기존 부재보다 가벼운 특성이 있다. 실험단면인 150PRY08단면의 형상은 그림 1과 같으며, 제원은 표 1과 같다. 표 1의 유효단면계수는 순수휨 작용시 AISI(1996)의 규정에 따라 국부좌굴을 고려하여 계산한 값이다.

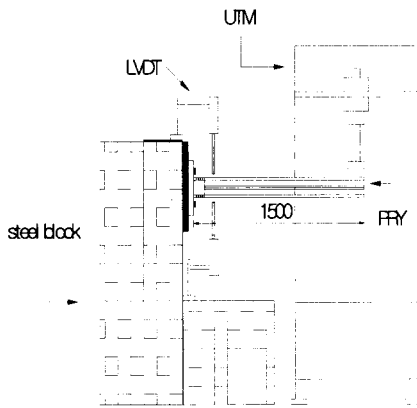


그림 1. 150PRY08 단면의 형상

표 1. 150PRY08 단면의 제원

구 분	부부 높이 (mm)	단면 두께 (mm)	단면적 (cm^2)	유효 단면계수 (cm^3)	단면2차모멘트(cm^4)	
					I_x (강축)	I_y (약축)
150PRY08	150	0.8	3.28	9.39	83.24	7.71

2.2 좌굴거동

그림 2는 150PRY08 단면에 대하여 좌굴전용해석프로그램

인 Bfinst(CASE, 1994)를 이용하여 순수휨하중에 대한 탄성좌굴해석 결과를 나타낸 것으로, 150PRY08 단면은 항복응력(5700kgf/cm^2)보다 훨씬 낮은 응력인 3200kgf/cm^2 근처에서 40mm의 좌굴장(Half-wavelength)으로 국부좌굴이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 좌굴장이 그 보다 길어지면 보통 뒤틀림좌굴이 발생하지만, PRY단면의 경우 플랜지와 복부의 클린칭 연결의 뒤틀림 구속효과로 인하여 기존의 C-형강에 비하여 뒤틀림좌굴강도가 상당히 크므로 실제 구조물에서 뒤틀림좌굴은 발생하지 않는다. 부재의 길이가 상당히 긴 경우(약 9m 이상) 국부좌굴응력보다 휨-비틀림좌굴응력이 더 작으므로 국부좌굴 없이 약간의 비틀을 동반한 휨-비틀림좌굴이 발생하고, 부재의 길이가 그 사이(1.0m~9.0m)인 경우에는 국부좌굴과 휨-비틀림좌굴의 혼합된 형태의 변형이 발생 가능한 것을 알 수 있다.

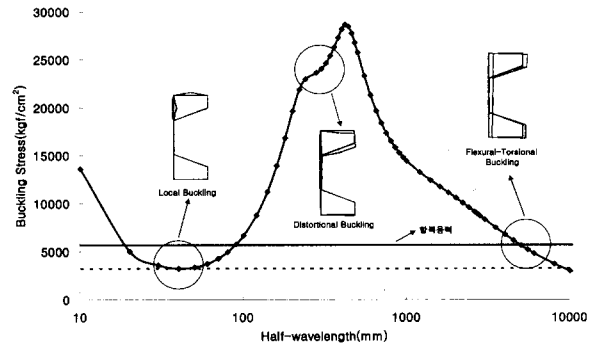


그림 2. 150PRY08 단면의 탄성좌굴응력

표 2는 150PRY08 단면의 국부좌굴, 항복 및 소성 모멘트를 이론적으로 계산하여 정리한 것이다.

표 2. 150PRY08 단면강도

구 분	M_{cr} (tonf·m)	M_y (tonf·m)	M_p (tonf·m)
150PRY08	0.36	0.54	0.82

2.3 접합철물의 형상

박판 냉간성형강을 이용한 골구조의 접합부 구성은 구조 시스템에 따라 다양한 형태를 가질 수 있는데, 본 연구에서는 스테드와 래프터로 구성된 포탈프레임에 적용하기 위한 접합철물(Connecting member)를 이용한 접합부를 구성하였다. 연강(mild steel)으로 제작한 접합철물의 형상은 PRY단면의 형상을 감안하여 제작하였으며, 구조재와 접합철물의 연결은 스크류파스너(Self-drilling screw fasteners)를 사용하였다. 그림 3에 포탈프레임 접합부의 위치를 표시하였다.

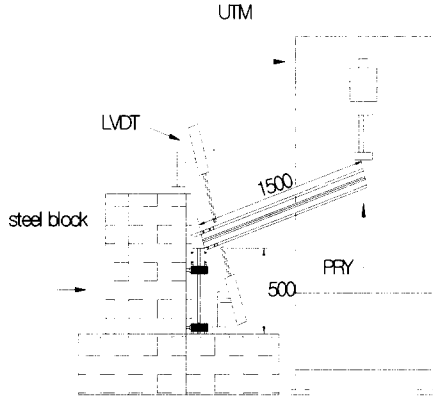
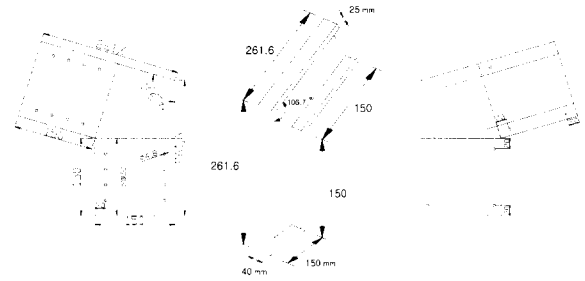
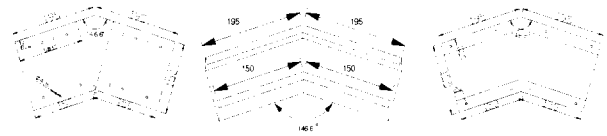


그림 3. 접합부 구성위치(단위:mm)

그림 4는 Column-Base용 접합철물 형상을 나타낸 것으로 II형 및 L형의 형태로 제작하였으며, 철근콘크리트 기초와의 연결은 콘크리트가 파괴되지 않고, 앵커의 전단이나 인발파괴가 발생하지 않도록 충분한 강도의 앵커볼트를 사용하였다.

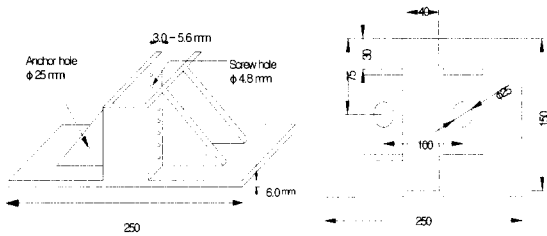


(a) Rafter-Column

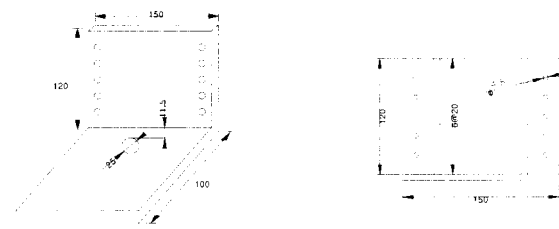


(b) Rafter-Rafter

그림 5. Rafter/Column 접합부 접합철물 형상



(a) II형



(b) L형

그림 4. Column-Base 접합철물 형상

그림 5는 래프터와 기둥 및 래프터와 래프터 접합부의 접합철물 형상을 나타낸 것으로, 연강으로 제작된 접합철물에 PRY단면을 삽입하고 미리 천공해 놓은 구멍을 통하여 스크류로 결합할 수 있는 형태이다. 시험체는 그림 5의 기본형태 이외에 강성을 증가시킬 목적으로 보강판(Stiffener) 및 보강립(Stiffening lip)이 부착된 접합부를 추가로 제작하였다.

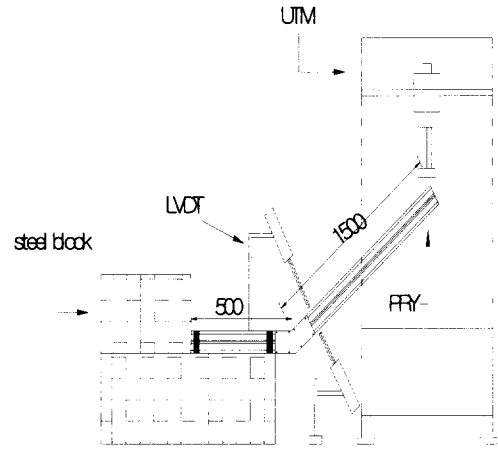
3. 접합부 실험

3.1 시험체의 구성

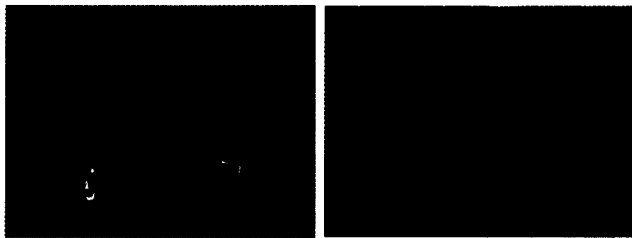
포탈프레임을 구성하는 접합부의 거동을 살펴보기 위하여 접합부의 강성을 결정하는 중요한 몇 가지 변수를 고려하여 시험체를 제작하였다. 주각부(Column-Base) 접합철물의 형상은 II형과 Double L형, 또 각각의 형상에 대하여 3.0mm, 4.3mm, 5.6mm 두께의 총 6종류이며, Rafter-Column 접합부의 접합철물은 그림 5 (a)의 기본 형상에서 립의 유무와 보강판의 부착 유무를 변수로 하여 두께 2.3mm에 대해 총 4종류의 시험체를 제작하였다. Rafter-Rafter 접합부 접합철물은 Rafter-Column과 유사하게 두께 2.3mm에 대해서는 4가지 형태 모두를, 두께 1.6mm와 3.0mm에 대해서는 립의 유무만을 고려하여 시험체를 제작하였다. 접합철물은 열연강판을 절곡압착(Brake-pressing)하여 필릿용접으로 접합하여 제작하였고, 접합철물과 구조재의 연결은 AISI(1996)시방서의 스크류 전단강도식을 사용하여 부재나 접합철물의 파괴 이전에 스크류의 지압 및 틸팅(Bearing/Tilting)파괴가 발생하지 않도록 충분한 개수의 스크류를 사용하여 연결하였다. 각각의 접합부 실험에 사용될 시험체 종류와 명칭은 표 3에 정리하였고, 접합철물 형상은 그림 7과 7에 각각 나타내었다.

표 3. 시험체 명칭

위치 구분	형상	두께	시험명
Column-Base	Double L형	3.0mm	CB-L-3.0T
		4.3mm	CB-L-4.3T
		5.6mm	CB-L-5.6T
	II형	3.0mm	CB-II-3.0T
		4.3mm	CB-II-4.3T
		5.6mm	CB-II-5.6T
Rafter-Column	Type 1	2.3mm	RC-1-2.3T
	Type 2		RC-2-2.3T
	Type 3		RC-3-2.3T
	Type 4		RC-4-2.3T
Rafter-Rafter	Type 1	2.3mm	RR-1-2.3T
	Type 2	2.3mm	RR-2-2.3T
	Type 3	1.6mm	RR-3-1.6T
		2.3mm	RR-3-2.3T
		3.2mm	RR-3-3.2T
	Type 4	1.6mm	RR-4-1.6T
		2.3mm	RR-4-2.3T
			3.2mm



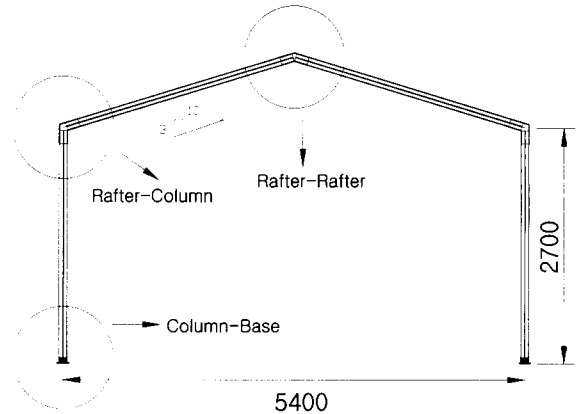
(a) Column-Base



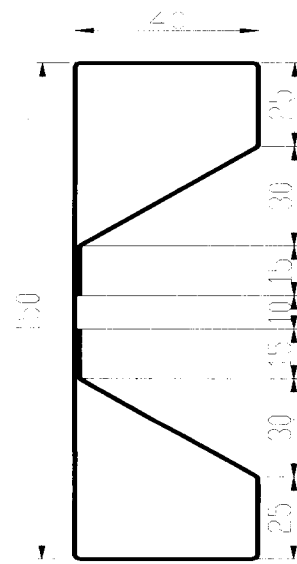
(a) II형 철물

(b) Double L형 철물

그림 6. II형과 Double L형 접합철물(Column-Base 접합부)



(b) Rafter-Column



(c) Rafter-Rafter

그림 8. 접합부 실험 개요(단위:mm)

Type 1		Type 2	
보강립	보강판	보강립	보강판
○	○	×	○
[Image]		[Image]	
Type 3		Type 4	
보강립	보강판	보강립	보강판
○	×	×	×
[Image]		[Image]	

그림 7. 접합철물 형상(Rafter-Rafter 접합부)

3.2 실험방법

각각의 접합부에 대하여 접합철물의 형상 및 두께 외에 비틀림 구속이 접합부에 미치는 영향을 파악하기 위한 하중 가력방법을 추가적인 변수로 실험을 실시하였다. 하중가력 방법은 인장과 압축의 2가지 방법으로, 인장가력시에는 보조장치를 이용하여 PRY부재와 가력장치를 일체시켜 가력부분의 비틀림을 구속하는 효과를 고려하였으며, 압축가력은 재하판만을 사용하여 비틀림의 영향을 그대로 반영한 실험으로 수행하였다. 비틀림 구속 이외의 조건은 인장 및 압축실험 모두 동일한 조건하에 수행되었다. 하중은 25tonf U.T.M(Shimadzu AUTOGRAPH AG-250kNG)를 이용하여 5mm/mim의 변위제어 방식으로 가하였으며, 변위는 U.T.M의 변위와 LVDT를 이용하여 측정하였다. 측정장비는 MT16, 데이터 수집은 SAS97 프로그램을 이용하였으며, 접합부 실험의 전체적인 개요는 그림 8과 같다.

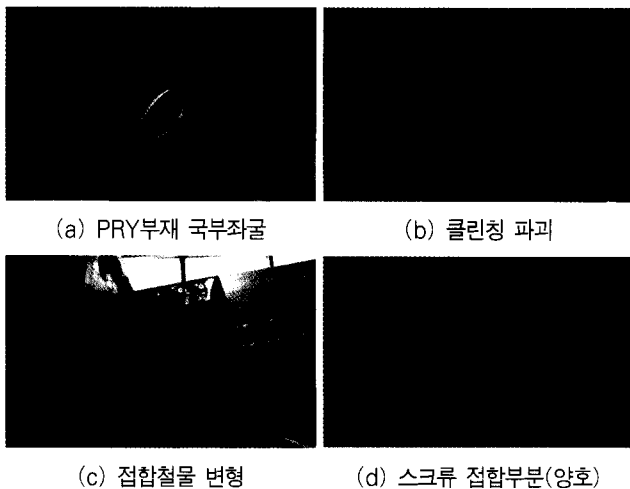


그림 9. Column-Base 접합부 파괴형상

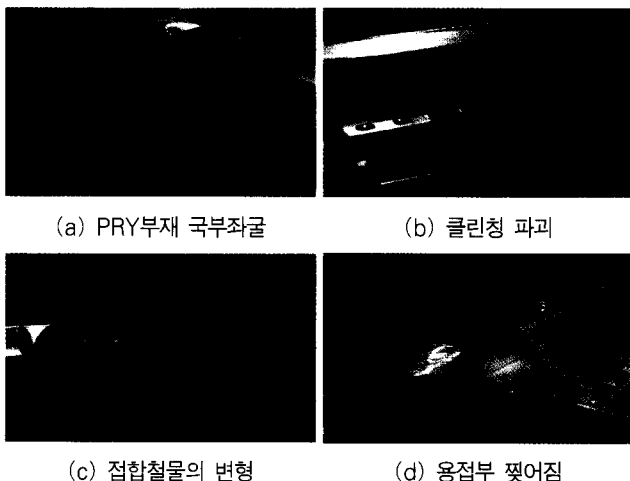


그림 10. Rafter-Rafter/Column-Rafter 접합부 파괴형상

3.3 실험결과

접합부 실험을 실시한 결과 접합부의 최종적인 파괴는 거의 공통적으로 접합철물 단부의 PRY단면의 국부좌굴(그림 9(a)) 이후의 클린칭 파괴(그림 9(b))에 의하여 발생되었다. 접합철물의 두께가 얇은 시험체의 경우는 PRY부재의 국부좌굴 발생 이전에 접합철물이 심한 변형을 보였으며, 그로 인해 접합철물의 용접부위가 찢어지는 경우(그림 10(d))도 발생하였다. 또한 접합철물의 형상 및 두께에 따라 극한하중 및 접합부 강성은 상당한 차이를 보였으며, 비틀림 구속의 여부에 따라서도 항복모멘트 및 극한모멘트의 크기는 심하게 달라졌다. AISI(1996)의 스크류 강도 계산식에 의하여 충분한 스크류를 사용하였기 때문에 스크류의 전단파괴 및 PRY부재의 찢어짐은 발생하지 않았다(그림 9(d)). 그림 9은 Column-Base 접합부, 그림 10는 Rafter-Rafter 및 Column-Rafter 접합부의 파괴양상을 나타낸 것이다.

3.3.1 Column-Base 접합부

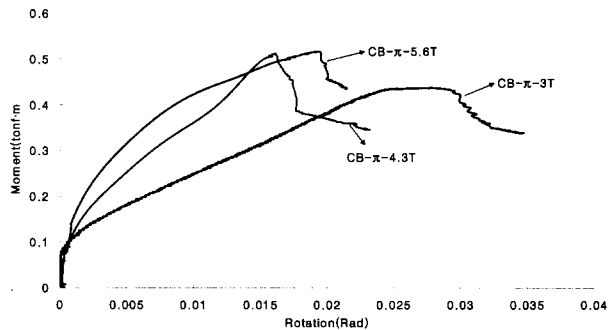


그림 11. II형 시험체의 두께별 비교

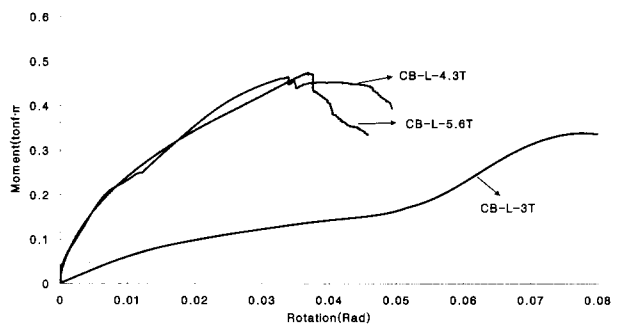


그림 12. Double-L형 시험체의 두께별 비교

그림 11과 12은 II형과 Double-L형 접합철물을 이용한 접합부 각각의 시험체에 대한 두께별 모멘트-회전각 관계로 비교한 것이다. 여기서, 회전각은 LVDT로 측정된 PRY단면의 상·하 수직변위를 이용하여 계산한 값이다. 접합철물의 두

께가 4.3mm와 5.6mm의 경우 초기 휨강성 및 극한모멘트는 크게 차이를 보이지 않았지만, 3mm의 경우 PRY단면의 국부 좌굴모멘트보다 낮은 모멘트에서 접합철물이 심한 변형을 보였으며 휨강성과 극한모멘트 역시 두꺼운 경우에 비해 상대적으로 낮게 나타났다. 그림 12에 나타난 CB-L-3T 시험체의 경우 접합부파괴는 다른 시험체와는 다른 파괴양상을 보였는데, 이는 접합철물의 강성이 상대적으로 너무 작아서 PRY단면의 변형은 거의 없는 상태에서 접합철물의 심한 변형으로 인해 파괴된 결과로 판단된다.

그림 13는 접합철물 두께 5.6mm에 대하여 II형과 Double-L형의 실험결과를 비교한 것으로 극한모멘트는 0.5tonf·m로 비슷하게 나타났지만 Double-L형 접합철물의 심한 변형으로 인하여 휨강성 및 항복모멘트(단면의 좌굴모멘트와 접합철물의 항복모멘트 중에서 작은 값)는 크게 차이를 보이고 있다. 또한 접합부의 성능은 비틀림 구속여부에 따라 상당히 다른 결과를 볼 수 있었는데, 그림 14는 CB-II-5.6T 시험체의 압축과 인장실험결과를 비교한 것으로 비틀림을 구속하지 못한 압축실험의 결과가 인장실험의 결과에 비하여 항복 및 극한모멘트와 휨강성 모두 상당히 낮게 나타난 것을 알 수 있다. 이는 단면의 비틀림이 단면 강성의 감소 뿐 만이 아니라, PRY부재의 국부좌굴 이후 극한모멘트를 결정짓는 클린칭의 파괴에 결정적인 요인으로 작용한 것으로 판단된다.

표 4에 접합부에 대한 항복 및 극한모멘트와 초기휨강성을 정리하였다. 초기휨강성 K_0 값은 실험에 의한 모멘트-회전각 곡선 상에서 접선의 기울기를 구하기가 어렵기 때문에, 일반적으로 등분포하중이 작용하는 단순보의 중앙부 허용처짐인 1/300 만큼의 처짐이 발생할 때 지점부에서 유발되는 회전각 0.01rad의 절반 값인 0.005rad의 회전각 발생점으로 회전강도로 결정하였다. 한편 모멘트-회전각 곡선을 참고하여 0.1ton·m의 모멘트가 작용할 때를 기준으로 한 K_1 값을 비교하여 보았다.

표 4. Column-Base 접합부

시편명	M_y (tonf·m)	M_u (tonf·m)	M_u/M_y	K_0	K_1	
				(tonf·m/rad)		
CB-L-3T	접합철물 파괴			6.41	4.79	
CB-L-4.3T	0.24	0.46	1.92	32.78	42.00	
CB-L-5.6T	0.21	0.47	2.24	32.27	44.11	
CB-II-3T	0.13	0.44	3.38	36.15	170.29	
CB-II-4.3T	0.16	0.51	3.19	50.93	144.41	
CB-II-5.6T	압축	0.14	0.42	3.00	41.52	60.21
	인장	0.31	0.52	1.68	63.42	166.70

3.3.2 Rafter-Column 접합부

Rafter-Column 접합부의 실험은 접합철물 두께 2.3mm에 대한 Type별 거동에 초점을 맞추어 실험을 실시하였다. 그림 15의 압축실험 결과를 보면 초기휨강성은 접합철물의 형상에 따라 미소한 차이를 보이고 있으나, 극한모멘트는 상당한 차이를 보이고 있다. 이것은 앞서 실시한 Column-Base 접합부의 결과에서도 나타났듯이 극한모멘트를 결정짓는 클린칭 파괴에 큰 영향을 주는 단면의 비틀림에 대하여 각 형상별 저항성능이 많이 다르다는 것을 나타내고 있다. 립과 보강판이 모두 있는 Type1의 접합철물이 0.4tonf·m로 가장 높게 나타났으며 립과 보강이 모두 없는 Type4와의 차이는 0.15tonf·m로 나타났다. 또한 립만 있는 Type3보다는 보강판이 부착된 Type2 접합부가 저항성능을 크게 나타냈다. 비틀림을 구속한 그림 16의 접합부 Type별 인장실험 결과를 보면 압축실험 결과와 거의 비슷한 양상을 보이고 있는데 초기휨강성은 4가지 Type 모두 큰 차이를 보이지 않았다. 다만 RC-1-2.3T 시험체의 경우 초기휨강성이 아주 낮게 나타난 것은 Column부재와 Rafter부재가 하나의 접합철물에 의해 끼워지는 형식이기 때문에 쉽게 발생하는 제작상의 오차로 인한 영향으로 판단된다. Type별 극한모멘트를 비교해 보면 압축실험 결과와 마찬가지로 Type1이 가장 높게, Type4가 가장 낮게 나타났다. Type2와 Type3의 극한모멘트는 거의 차

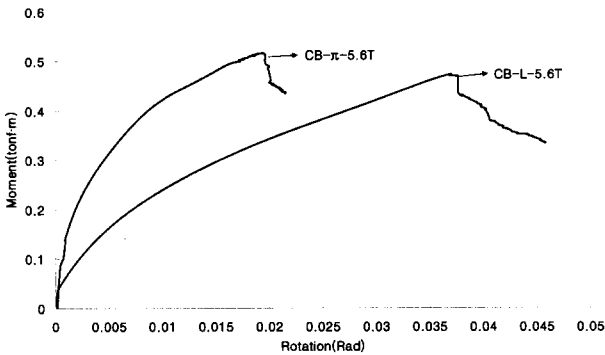


그림 13. II-L형 비교(5.6T)

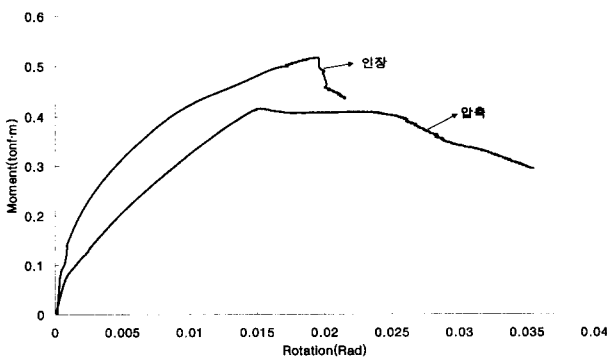


그림 14. 단면 비틀림의 영향(CB-II-5.6T)

이가 없는데 이것은 비틀림의 영향이 작을 경우 접합철물의 형태와 상관없이 거의 같은 거동을 보이고 있다는 것을 알 수 있다. 항복모멘트, 극한모멘트 및 초기휨강성을 표 5에 정리하였다. 모멘트 값은 물론 초기휨강성이 Column-Base접합부에 비하여 상당히 작은 것을 알 수 있다.

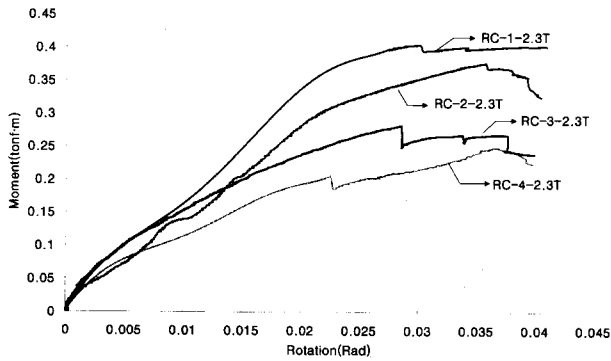


그림 15. Rafter-Column Type별 결과 비교(압축)

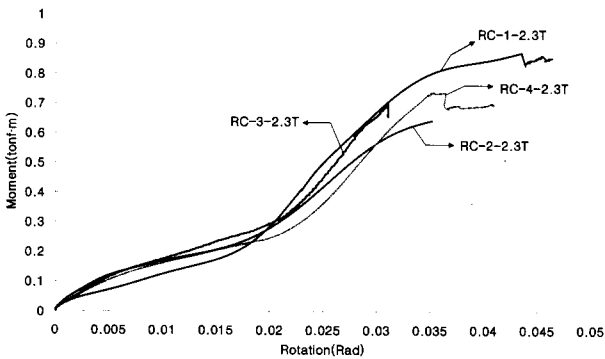


그림 16. Rafter-Column Type별 결과 비교(인장)

표 5. Rafter-Column 접합부

시편명		M_y (tonf·m)	M_u (tonf·m)	M_u/M_y	K_0 (tonf·m/rad)
RC-1-2.3T	압축	0.24	0.40	1.67	19.38
	인장	0.05	0.87	17.40	14.79
RC-2-2.3T	압축	0.21	0.38	1.81	13.98
	인장	0.09	0.65	7.22	23.66
RC-3-2.3T	압축	0.15	0.28	1.87	20.00
	인장	0.07	0.70	10.00	22.74
RC-4-2.3T	압축	0.10	0.25	2.50	15.22
	인장	0.08	0.74	9.25	21.26

3.3.3 Rafter-Rafter 접합부

접합부의 형상이 Rafter-Column과 비슷하여 두께 2.3mm의 경우는 4가지 Type 모듈을, 두께 1.6mm와

3.0mm의 접합철물은 립(lip)유무 만을 고려한 Type3과 Type4에 한하여 압축실험만을 수행하였다. 실험결과를 그림 17~19와 표 6에 정리하였다. 그림 17은 접합철물 두께 2.3mm 시험체에 대하여 접합철물 Type별로 비교한 결과를 정리한 것이다. 그림 17~19과 표 6에서 알 수 있듯이 Rafter-Rafter 접합부의 실험결과는 대체적으로 Rafter-Column 접합부의 실험결과와 비슷하게 립과 보강판이 부착된 접합철물을 사용한 접합부 시험체의 초기휨강성이 크게 나타났다.

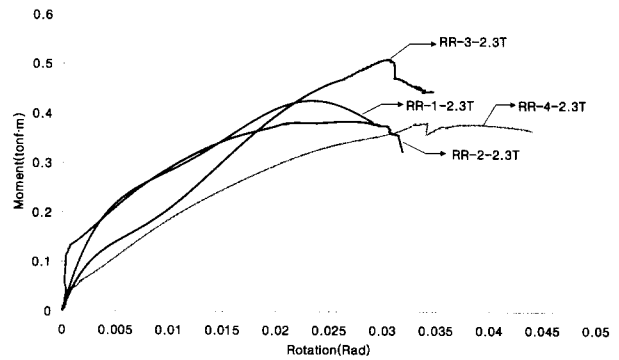


그림 17. Rafter-Rafter Type별 결과 비교(2.3T)

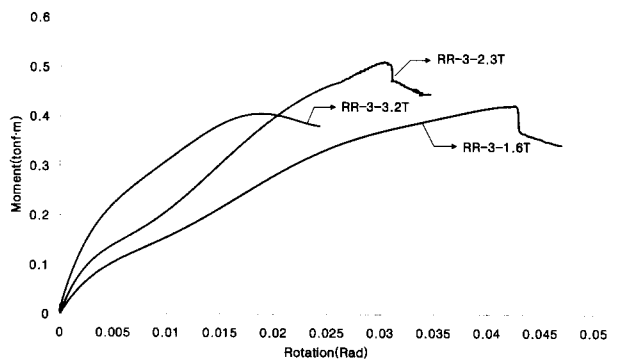


그림 18. Rafter-Rafter Type3의 두께별 비교

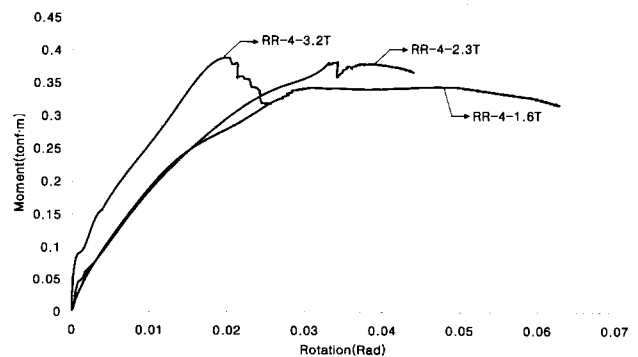


그림 19. Rafter-Rafter Type4의 두께별 비교

그림 18와 그림 19 및 표 6에서 보듯이 접합철물 두께의 증가에 따라서 초기휨강성 및 항복모멘트는 큰 차이를 보이지만, 극한모멘트는 비슷한 값을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다. 이는 접합부의 항복이후의 최종적인 파괴양상이 PRY단면의 클린칭부의 파단에 기인하기 때문인 것으로 판단된다.

표 6. Rafter-Rafter 접합부

시 편 명	M_y (tonf · m)	M_u (tonf · m)	M_u/M_y	K_0 (tonf · m/rad)
RR-1-2.3T	0.17	0.43	2.53	59.16
RR-2-2.3T	0.12	0.38	3.17	283.93
RR-3-1.6T	0.20	0.42	2.10	23.28
RR-3-2.3T	0.08	0.51	6.38	39.03
RR-3-3.2T	0.15	0.41	2.73	71.94
RR-4-1.6T	0.14	0.34	2.43	25.37
RR-4-2.3T	0.04	0.38	9.50	23.19
RR-4-3.2T	0.10	0.39	3.90	60.32

4. 결과고찰

4.1 접합부 수치해석

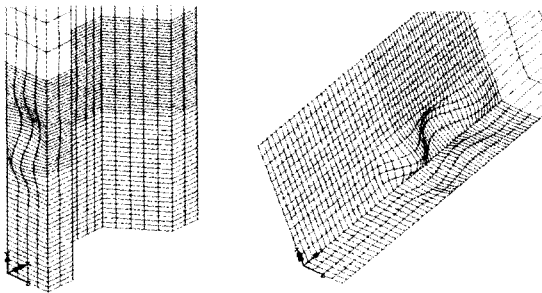
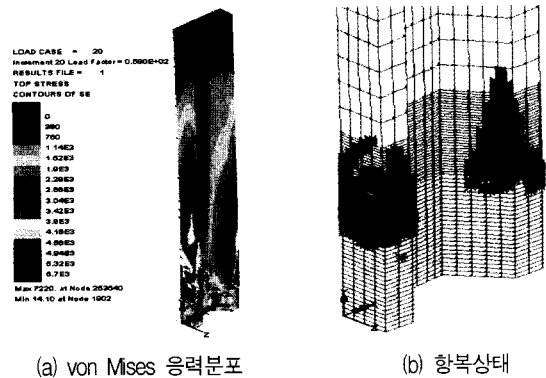


그림 20. 접합부 국부좌굴모드

접합부 실험결과와 타당성을 검증하기 위해 범용 유한요소 해석프로그램인 Lusas(ver. 13.4)(Lusas Element Reference Manual, 2002)를 통한 수치해석을 실시하였다. 해석방법은 1차적으로 탄성좌굴해석을 실시하여 실험결과와 유사한 좌굴형상을 찾은 후 2차 해석으로 그 좌굴형상을 초기 변형으로 적용하여 접합부 극한하중을 구하는 방법으로 진행하였다. 2차 해석시 PRY부재와 접합철물의 재료적인 성질은 탄성-완전소성으로 가정하였으며, 기하학적 비선형을 고려한 비탄성해석을 수행하였다. 모델링은 PRY단면과 접합철물은 4절점 'Shell(QTS4)'요소를, 두 부재간 연결재인 스크류는 'Joint' 요소를 사용하였으며, II형 접합철물과 지반과 접촉하는 지점의 경계조건은 고정단으로 가정하였으며, 전단연결재

인 스크류의 강성은 다른 부재에 비하여 상대적으로 크게하여 스크류의 변형 및 파괴는 발생하지 않도록 하였고, PRY단면의 클린칭 파괴는 고려하지 않았다. 1차 해석 결과 여러 가지 좌굴모드 중 실제 실험거동과 유사한 그림 20과 같은 낮은 차수의 좌굴모드를 찾을 수 있었으며, 접합철물 끝단 스크류 접합부분을 중심으로 국부좌굴이 발생하는 것을 알 수 있었다.

그림 21는 그림 20의 좌굴형상을 초기변형으로 주어 2차 비선형 해석을 실시한 결과 중 극한하중시 von Mises 응력분포 및 항복상태를 나타낸 것이다.



(a) von Mises 응력분포

(b) 항복상태

그림 21. von-Mises 응력분포 및 항복상태

표 7에서 CB-II-5.6T 시험체에 대한 실험결과와 수치해석 결과를 비교하여 보았다. 좌굴모멘트, 극한모멘트 및 최종적인 파괴 원인을 살펴보면 실험결과와 Bfinst 및 Lusas를 이용한 수치해석 결과와는 약간의 차이를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 PRY부재의 클린칭접합, 스크류접합 및 앵커볼트접합 등과 같은 특수한 구조적인 요소들을 정확히 고려하지 못하고 단순화 시킨 결과이며, 특히 극한모멘트의 차이는 실험과는 달리 수치해석 시 PRY부재의 국부좌굴발생 이후 변형량의 증가 등의 복합적인 요인으로 발생하는 클린칭 파괴를 고려하지 못한 것이 주요 원인으로 판단된다.

표 7. 실험결과 및 수치해석 결과 비교(CB-II-5.6T)

구 분	접합부 실험	수치해석	
		Lusas	Bfinst
M_{cr} (tonf · m)	0.31	0.37	0.36(0.31)
M_u (tonf · m)	0.52	0.55	0.54
파괴형상			
최종 파괴원인	국부좌굴이후 클린칭 파괴	국부좌굴이후 부재항복	

* $M_{cr} = f_{cr}$ (국부좌굴응력) × S_f (단면계수), () 속의 값은 유효단면 적용

** M_u (극한모멘트) = f_y (항복응력) × S_e (유효단면계수)

4.2 포탈프레임 구조해석

접합부 실험결과로 구한 휨강성을 가진 반강접접합부를 고려한 해석과 일반적인 힌지 또는 고정단 경계조건을 가진 골조의 구조해석을 수행하여 그 결과를 비교하여 보았다. 접합부의 휨강성은 응력의 수준에 따라 점진적으로 변하는 값대신 앞에서 구한 초기휨강도 또는 적절한 응력간격으로 구한 다중할선강도로 대체하여 적용하였다. 해석은 접합부 경계조건에 따라 총 5가지의 모델에 대하여 기둥 상부에 단계적인 횡하중을 가하는 방법으로 재료 및 기하 비선형해석을 실시하였다. 해석대상은 그림 3과 같이 PRY단면의 성능을 고려하여 스패 길이 5400mm, 기둥길이 2700mm의 포탈프레임을 적용하였으며, 모델의 세부내용은 표 8과 같다.

표 8. 접합부 경계조건에 따른 해석모델

구분	Column-Base	Rafter-Column	Rafter-Rafter
Model 1	rigid	rigid	rigid
Model 2	hinge	rigid	rigid
Model 3	rigid	hinge	rigid
Model 4	semi-rigid	rigid	rigid
Model 5	semi-rigid	semi-rigid	semi-rigid

그림 22은 기둥 상부의 횡방향 하중-변위 관계를 나타낸 것으로, 결과에서 보듯이 모든 접합부에 대하여 반강접으로 해석한 Model 5의 거동은 일반적으로 가정되는 Model 1과의 거동과는 하중의 초기단계부터 차이를 보이고 있으며, 극한하중에 도달 시 하중의 크기는 비슷하지만 변위의 차이는 더 크게 나타났다. Column-Base 접합부만을 반강접으로 간주하여 해석한 Model 4의 거동은 낮은 하중에서는 Model 1과 유사하지만 하중이 증가되면서 역시 많은 차이를 나타냈다.

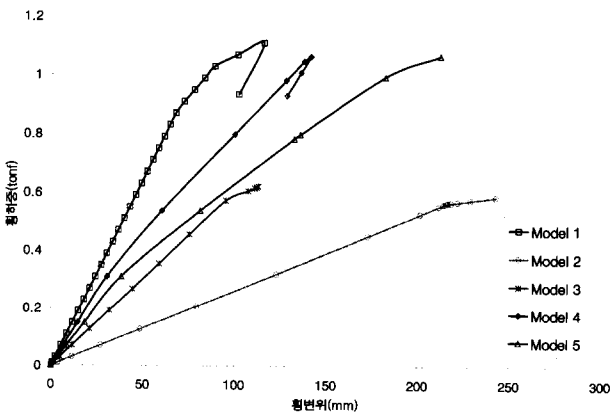


그림 22. 횡하중-횡변위 관계

표 9에 횡하중 크기가 0.2tonf 및 0.6tonf 작용 시 각 접합부의 모멘트 크기를 비교하여 정리하였다. 접합부별 모멘트 분포를 살펴보면 각 Model에 따라 큰 차이를 나타내었는데, 기둥 하부 또는 상부의 접합부가 활절로 간주된 Model 2와 Model 3의 경우 모멘트의 집중 현상으로 인하여 기둥의 고정단에서 낮은 하중하에서 상당히 큰 모멘트가 발생하여 구조부재로서의 내력을 상실하였다. Model 1과 Model 4 및 Model 5의 모멘트 분포를 살펴보면 반강접으로 해석한 Model 4 및 Model 5의 경우 접합부의 강성에 따라 반강접 접합부와 고정단 사이에 상당한 모멘트의 분배가 일어남을 알 수 있다. 따라서 냉간성형형강 접합부의 특성을 고려하여 강접이나 활절로 제작하는 대신에 반강접 접합부로 제작하여 반강접 거동을 설계에 고려하는 것이 경제성 제고에 상당한 도움이 될 것으로 판단된다.

표 9. 접합부별 모멘트 분포

구분	0.2tonf 작용 시			0.6tonf 작용 시		
	C-B (tonf·m)	R-C (tonf·m)	R-R (tonf·m)	C-B (tonf·m)	R-C (tonf·m)	R-R (tonf·m)
Model 1	0.18	0.11	0.04	0.53	0.34	0.11
Model 2	0	0.28	0.05	0	0.79	0.21
Model 3	0.28	0	0.07	0.79	0	0.23
Model 4	0.16	0.13	0.04	0.43	0.41	0.13
Model 5	0.19	0.10	0.04	0.50	0.32	0.15

5. 결 론

이상과 같이 냉간성형형강을 이용한 포탈프레임 접합부의 거동에 대한 실험과 수치해석을 수행하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 논문에서 제안된 접합부는 실험결과 반강접 거동을 보였으며, 강접 보다는 시공성이 좋고, 활절 보다는 단면력의 분배 측면에서 유리하므로 접합부 설계 시 이를 고려하는 것이 경제성 등의 여러 측면에서 유리하다고 판단된다.
- (2) 냉간성형형강 포탈프레임의 접합부 강성은 접합철물의 두께 및 형상은 물론 비틀림에 대한 구속여부에 따라서 크게 영향을 받는다. 따라서 실제 구조물의 접합부 성능검토 시 부착패널에 의한 비틀림에 대한 적절한 구속여부가 고려되는 것이 합리적인 강도 산정에 필요하다고 판단된다.
- (3) PRY단면 포탈프레임 접합부는 하중의 증가에 따라서

PRY부재의 국부좌굴 이후 클린칭 파괴로 인하여 접합부 성능을 상실하였다. 따라서, 클린칭 접합방식으로 제작된 냉간성형단면의 접합부 파괴강도를 향상시키기 위해서는 클린칭 강도가 확보되어야 한다.

- (4) 본 연구에서 시도된 형태의 접합철물은 구조적으로 별다른 문제가 없고 제작이 용이하다고 판단되므로 유사한 형태의 냉간성형형강 골조에 적용이 가능하다고 판단된다.
- (5) 본 연구의 결과만으로 최적의 접합부 형태를 결정하기는 어렵다고 보지만, 냉간성형강 골조의 모델링 및 해석방법 그리고 시공성 등을 고려하여 적절한 형태의 접합부를 선택하는 데는 도움이 되리라고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 영남대학교의 2002년도 연구년제 연구비 지원 및 건설교통부 2001년 산학연공동연구개발사업(과제번호 D-02)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

박명균, 김한식, 정현석, 권영봉(2002) 신형상 냉간성형 단면의 구조적 거동(1)-압축거동, 강구조학회논문집, 제14

권 2호, pp. 349-356.

송인섭, 김갑득, 권영봉(2002) 신형상 냉간성형 단면의 구조적 거동(2)-휨거동, 강구조학회논문집, 제14권 2호, pp. 357-364.

American Iron and Steel Institute (1996) Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, Washington DC, USA.

Center for Advanced Strustural Engineering (1994) Bfinst User's Manual, Department of Civil Engineering, University of Sydney.

FEA Ltd. (2002) Lusas Element Reference Manual(ver. 13.4).

Hancock, G. J. (1998) Design of Cold-Formed Steel Structures (2nd Edition), Australian Institute of Steel Construction.

Mills J. and LaBoube R. (2002) Self-drilling Screw Joints for Cold-Formed Channel Portal Frames, 16th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Design and Construction, Proceedings, St. Louis, Mo, USA, pp. 825-838.

Yu, W. W (1991) Cold-Formed Steel Design (2nd Edition), John Wiley & Sons.

(접수일자 : 2003. 3. 3 / 심사일 2003. 3. 17 / 심사완료일 2003. 6. 5)