

평판두께와 연단거리를 변수로 갖는 박판탄소강 볼트접합부의 종국거동에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Ultimate Behavior of Thin-walled Carbon Steel Bolted Connections with Varying Plate Thickness and End Distance

이 용 택¹⁾ · 김 태 수²⁾ · 정 하 영³⁾ · 김 승 훈⁴⁾
Lee, Yong Taeg Kim, Tae Soo Jeong, Ha Young Kim, Seung Hun

요약 : 본 연구의 목적은 박판 탄소강 일면전단 2행 2열 볼트접합부의 블록전단파단거동과 면외변형의 영향을 조사하는 것이다. 하중직각 방향 연단거리, 볼트직경, 피치, 게이지 치수를 고정하고 블록전단파단이 발생하도록 실험체를 계획한다. 접합평판의 두께, 하중방향연단거리를 주요변수로 설정한다. 단순인장 실험을 실시하고 블록전단파단 양상, 최대내력을 현행의 설계기준식에 의한 예측치와 비교한다. 또한, 판 두께와 연단거리에 따른 하중방향과 직각방향으로 발생하는 면외변형의 발생조건을 조사하고 면외변형의 발생으로 인한 내력저하정도를 고찰한다.

ABSTRACT : The purpose of this experimental study was to investigate the block shear fracture behavior and curling effect on a single shear-bolted connection in thin-walled carbon steel fabricated with four bolts. The specimens that fail by block shear were planned to have a constant dimension of the edge distance perpendicular to the loading direction, bolt diameter, pitch, and gage. The main variables of the specimens were plate thickness and end distance parallel to the loading direction. A monotonic tensile test was carried out for the bolted connections, and the ultimate behaviors, such as the fracture shape, ultimate strength, and curling, were compared with those that had been predicted using the current design specifications. The conditions of curling occurrence in terms of plate thickness and end distance were also investigated, and the strength reduction due to curling was considered.

핵심용어 : 박판 탄소강, 볼트접합부, 블록전단파단, 면외변형, 내력저하, 평판두께

KEYWORDS : Thin-walled carbon steel, Bolted connection, Block shear fracture, Curling, Strength reduction, Plate thickness

1. 서론

냉간성형강을 이용한 구조부재는 경량인 동시에 접합이나 조립이 용이하여 건축물의 내외장재의 비구조재 또는 구조재로써 널리 사용되고 있으며, 중·고층건축물의 2차 구조부재뿐만 아니라 저층건축물인 경우에는 주요구조부재로써도 그 사용범위가 확대되어가고 있다. 대한건축학회에서는 미국의 철강협회(AISI)의 냉간성형강 구조기준(1989) 및 일본 건축학회(AIJ) 경강구조설계기준(1985)을 참고하여 냉간성형강 구조설계기준 및 해설(1999)을 출판하였다. 이미 미국에서는 1950년 중반이후부터 냉간성형강을 이용한 경량구조재에 대한 연

구가 활발히 진행되어져 왔으며, 처음으로 AISI에 의해 냉간성형강의 구조부재를 위한 설계기준(1968)이 제정되었으며, 최근에는 미국, 캐나다, 멕시코 등의 북미에서 상호 인증한 냉간성형강 구조부재를 위한 설계 시방서(2007)가 출판되기에 이르렀다. 그 외의 선진국에서도 EC3 : Part1.3(1996), AIJ(2002)등의 냉간성형강의 구조설계기준이 제정되었다. 냉간성형강의 경우 대부분 박판부재이므로, 접합방법으로 접합이 용이한 볼트접합을 채용하는 경우가 많고, 이에 따른 연구도 다수 진행되고 있다. 국내에서도 최문식(1999, 2000, 2002)등 연구자들에 의해 냉간성형강 일면전단 볼트접합부의 볼트배열, 볼트구멍 형상, 외시의 설치유무 등을 변수로 해서

1) 한밭대학교 건축공학부 부교수, 공학박사(ytlee@hanbat.ac.kr)
2) 교신저자. 한밭대학교 건축공학부 전임강사, 공학박사
(Tel. 042-821-1121, Fax. 042-821-1115, E-mail : tskim@hanbat.ac.kr)
3) 한밭대학교 대학원 건축공학과, 석사과정(migaein@hanmail.net)
4) 한밭대학교 건축공학부 조교수, 공학박사(kimsh@hanbat.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2010년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

블록전단파단, 지압파단내력에 관한 실험적 연구에 초점을 맞춰 진행되어 왔다.

일본에서는 스테인레스 구조건축협회가 기획한 박판구조설계시공기준작성 위원회의 Kuwamura 등(2002)에 의해 냉간성형 스테인레스강에 대한 연구가 시작되어, 그 일환으로 볼트접합부 실험을 실시하였고, 일면전단 볼트접합부의 단순인장실험에서 면내파단뿐만 아니라 판두께 방향(하중방향과 직각)으로 면외변형이 발생하여 내력에 영향을 미친다는 연구결과와 박판의 구조적 특성과 스테인레스강 및 탄소강의 재료적 특성을 고려한 수정내력식을 제시하였다.

이러한 Kuwamura 등의 실험결과를 바탕으로 김태수 등(2007, 2008)은 냉간성형 스테인레스강(STS304)과 탄소강(SS400) 볼트 접합부의 종곡거동, 면외변형의 발생 메커니즘 및 면외변형이 접합부의 내력에 미치는 영향을 유한요소해석법과 변수해석을 통하여 조사하였고, 그 결과 2행2열, 1행2열 볼트배열에 대해 판두께와 연단거리에 따른 면외변형 발생조건과 면외변형에 대한 내력저하효과를 기존 기준식에 반영하여 수정내력식을 제안하기에 이르렀다.

이에 정하영 등(2009)은 경량건축물에서 주로 사용되는 강종인 탄소강(SS400)을 바탕으로 면외변형이 박판 탄소강의 일면전단 볼트접합부의 구조적 거동에 미치는 영향을 조사하기 위해 공칭판두께 3.2mm로 제작된 블록전단파단거동을 유도한 2행2열 볼트접합부에 대한 1차실험(주요변수 : 하중방향 연단거리)을 실시하여 얻어진 최대내력과 파단메커니즘을 현행기준식에서 예측된 최대내력과 파단형태를 비교하였다.

본 연구에서는 하중방향의 연단거리를 변수로 갖는 1차 실험을 포함하여 평판두께에 대한 영향을 파악하고자 2행2열 탄소강 박판 일면전단볼트접합부에 대한 2차실험을 수행한다. 즉, 하중방향의 연단거리와 접합평판두께를 변수로 갖는 실험체를 계획·제작하여 일면전단 2행 2열 볼트접합부의 구조거동을 파악하는데 있어서, 최대내력 양상 및 면외변형 거동을 파악하고 실험결과와 최대내력과 기존의 제안된 내력식(KSSC, AISC, AIJ, NAS, EC3)과 비교·검토하는 것을 목적으로 한다.

2. 실험계획

2.1 실험체 계획 및 제작

박판 탄소강 일면전단 볼트접합부에서 접합평판의 면외변형 발생여부를 조사하고 최대내력에 미치는 영향을 파악하기 위하여 일반적인 경량철골구조물에 주로 사용되는 일반구조용 강재(SS400)를 대상으로 실험체를 계획·제작한다.

실험체는 그림 1(a)과 같이 2행 2열 볼트배열을 갖는 평판

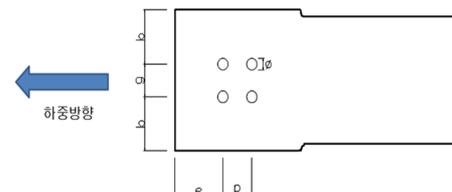
접합부를 설정하였다. 표 1과같이 하중직각방향 연단거리(b)는 60mm, 볼트직경(d)는 12mm, 볼트구멍직경(ϕ)은 13mm, 피치(p)와 게이지(g)는 볼트직경의 3배인 36mm로 고정시키고, 주요변수를 하중방향 연단거리(e)와 접합평판의 두께(t)로 해서 실험체를 계획하였으며, 동일한 변수를 갖는 실험체에 대해서 실험의 신뢰성을 높이기 위해 각 3개씩 실험체를 제작하였다.

볼트접합부의 구성은 변형측인 실험체와 실험체를 세팅하기 위한 고정체로 분리하여 제작하였다. 즉, 변형측인 실험체를 그림 1(b)-(c)와 같이 인장 시험기에 설치하기 위해 두 형상의 고정체를 기계구조용 탄소강재인 SM45C로 제작하였다. 중간연결체는 실험체와 접합되는 부분의 판두께는 20mm, 인장시험기에 물리는 하단부분은 20mm와 실험체의 평판두께를 실측하여 얻은 평균수치인 1.5, 3.0, 6.0mm에 따라서 각각 38.5, 37, 34mm로 두께를 변화시켜 제작하였다. 이와 같이 하단 고정체의 두께를 다르게 하는 이유는 재하시 조립된 접합부에서 편심이 발생하지 않도록 하기 위해서이다.

그림 1(b), 1(c)와 같이 접합에 사용한 볼트는, 실험체를 체결하는 부분에 대해서는 접합판의 파단을 유도하기 위해 F10T의 M12, 고정체를 체결하는 부분은 F10T의 M20의 고력볼트를 사용하였다. 실험체명과 변수조합은 표 1에 나타냈다. 표 1의 실험체명인 CT60E60에서 C는 탄소강, T60은 평판두께 6.0mm, E60은 하중방향 연단거리60mm를 나타낸다. 고정체부분의 고력볼트(M22)는 충분한 토크치를 확보하도록 체결하였으며, 실험체부분의 볼트(M12)는 재하직후 볼트와 실험체 구멍이 지압상태가 되도록 볼트를 체결하였다.

2.2 재료시험

접합부 실험체에 사용한 강종SS400의 기계적 성질을 파악하기 위하여 KS B 0801에 따라 인장시험편을 제작하였고 KSB 0802에 따라 인장시험을 수행하였다. 그림 2는 공칭응력도-변형도 곡선을 나타낸다. 인장시험편은 각 두께별로 3개씩 제작하여 인장시험을 실시하였으며, 그 결과를 3개의 평균값으로 산정하여 표 2에 정리하였다.



(a) 실험체 형상

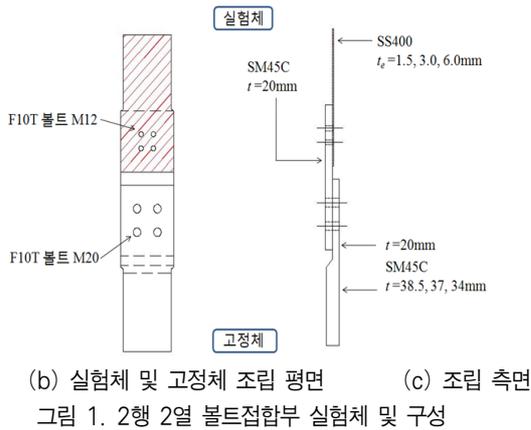


표 1. 실험체명과 변수조합

실험체명	공칭 평판 두께 t_n (mm)	실측 평판 두께 t_e (mm)	볼트 직경 d (mm)	볼트 구멍 직경 ϕ (mm)	피치 거리 g (mm)	하중직각 연단 거리 b (mm)	하중방향 연단거리 e (mm)
CT60E60-1.2,3	6.0	6.0	12	13	36	60	5.0d (60mm)
CT60E54-1.2,3							4.5d (54mm)
CT60E48-1.2,3							4.0d (48mm)
CT60E36-1.2,3							3.0d (36mm)
CT30E60-1.2,3	3.2	3.0	12	13	36	60	5.0d (60mm)
CT30E48-1.2,3							4.0d (48mm)
CT30E36-1.2,3							3.0d (36mm)
CT30E30-1.2,3							2.5d (30mm)
CT30E24-1.2,3	1.5	1.5	12	13	36	60	2.0d (24mm)
CT15E36-1.2,3							3.0d (36mm)
CT15E24-1.2,3							2.0d (24mm)
CT15E18-1.2,3							1.5d (18mm)
CT15E12-1.2,3							1.0d (12mm)

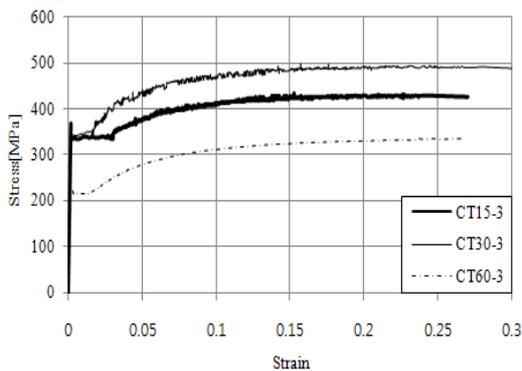


그림 2. 공칭응력도-변형도곡선

표 2. 재료시험결과

시험체명	실측 두께 t_e (mm)	탄성계수 E (GPa)	항복강도 F_y (MPa)	인장강도 F_u (MPa)	항복비 F_y/F_u YR [%]	연신율 EL [%]
CT15-1.2,3	1.5	201.30	344.10	434.70	79.10	34.67
변동계수	-	0.010	0.036	0.017	0.022	0.053
CT30-1.2,3	3.0	213.48	345.75	498.26	69.39	32.00
변동계수	-	0.056	0.041	0.003	0.041	0.088
CT60-1.2,3	6.0	192.9	222.0	334.3	66.4	49.9
변동계수	-	0.072	0.029	0.010	0.020	0.016

2.3 실험방법

본 실험은 2,000kN급의 만능시험기를 사용하여 그림 3과 같이 단순인장 실험을 실시하였다.

그림 3, 4에 나타낸 바와 같이 두 개의 고정체의 강판과 조립을 선행한 후, 만능시험기의 상하부 물림부(실험대상 평판과 고정체를 잡아주는 지그를 사용)에 실험체를 설치하고 하중방향변위에 대해 2개의 변위계(LVDT)와 하중직각방향의 면외변형을 측정하기 위하여 1개의 변위계(LVDT)를 설치하였다. 만능시험기의 자동제어를 위해 Winsoft 프로그램을 이용하였다. 본 실험에서는 재하방법으로 변위제어방법을 채택하여 0.5mm/min의 일정한 속도로 변위를 증가시키면서 실험을 수행하였다. 실험이 진행되는 동안 면외변형과 접합부의 파괴과정을 파단의 특정시점에서 관찰하였고, TDS Data Logger와 Winsoft 프로그램을 이용하여 하중 변위관계 및 최대내력(하중에서 최대값) 등을 측정하였다.



그림 3. 실험체 설치

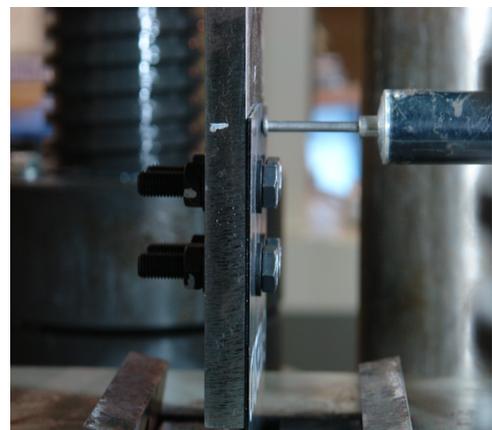


그림 4. 면외변형 측정

3. 실험 결과분석

본 연구에서 얻은 대표적인 파단양상을 정리한 결과를 그림 5와 그림 6에, 하중-변위곡선을 그림 7에, 주요변수와 최대내력관계를 각각 표 3, 표 4에 정리하였다.

실험결과, 연단거리(e)가 54mm인 실험체 CT60E54에서는 그림 5와 같이 면외변형이 발생하였다. 그림 6(a)의 하중방향 연단거리가 짧은 접합부 실험체($e=12$ mm)에서는 면외변형의 발생 없이 하중방향연단에서 멀리 떨어진 볼트 옆에 하중방향과 직각방향으로 인장파단(순단면파단, 볼트 3, 4사이)이 발생했고, 재하가 계속 진행됨에 따라 하중방향으로 전단파단(중전단파단, 볼트 1, 3사이와 볼트 2, 4사이)이 발생하는 전형적인 블록전단파단(Block shear fracture)의 형태를 나타내고 있다. 그림 6(b)과 같이 그림 6(a)의 연단거리 12mm인 실험체보다 하중방향 연단거리가 긴 실험체($e=36$ mm)에서는 하중이 증가하면서 하중방향의 연단에서 면외변형이 관측되기 시작했으며, 지속적인 면외변형의 증가와 하중방향 연단에서 멀리 떨어진 볼트 3, 4옆에 하중방향과 직각방향으로 인장파단(순단면파단)이 발생했고, 후에 하중방향으로 두 볼트사이에서 전단파단(중전단파단)이 발생하는 것으로 관찰되었다. 이는 면외변형의 발생여부에 관계없이 최종적인 파단형태는 블록전단파단(인장파단+전단파단)의 형태를 나타내고 있다.

연단거리가 동일($e=36$ mm)하고 평판의 두께가 다른 경우, 그림 6(c)의 두께가 얇은 실험체($t_e=3.0$ mm)에서는 면외변형의 발생과 함께 인장파단이 발생했고, 후에 전단파단이 발생하는 것으로 관찰되었으며 최종적으로 블록전단파단의 형태를 나타내고 있다.

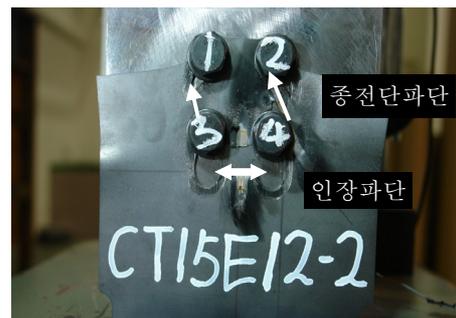
그림 6(d)의 두께가 두꺼운 실험체($t_e=6.0$ mm)에서는 면외변형의 발생 없이 인장파단의 발생 후에 전단파단이 발생하는 전형적인 블록전단파단의 형태를 나타내고 있다. 그림 7은 실험결과로부터 얻어진 모든 실험체의 하중-변위관계곡선을 나타낸다. 평판두께 1.5mm인 실험체에서는 연단거리(e)가 12, 18, 24mm인 경우, 전형적인 블록전단파단이 관찰되었고, 연단거리가 36mm인 경우는 면외변형을 동반한 내력저하를 보였다(그림 7(a)).

1차 실험체서 이미 언급한 바와 같이, 평판두께 3.0mm인 실험체 CT30E36의 경우 외관상으로 면외변형이 발생하였지만, 하중-변위 곡선상에서 면외변형이 일어나지 않은 실험체 CT30E24의 곡선과 동일한 형태를 보였다¹⁶⁾. 이것은 인장파단이 발생한 후에 내력이 급격히 저하되는 것으로 보아 면외변형이 최대내력에 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다(그림 7(b)). 평판두께 6.0mm인 실험체의 경우는 초기에 고정체인 중간연결재와 연결하는 부분에서 실험측 평판과의 벌어짐이

발생하여 내력이 일시적으로 저하하는 현상이 나타났으나, 추후 내력은 계속 증가했다. 또한, 면외변형의 발생에 의하여 접합부의 강성의 약간 감소하였지만, 평판두께 1.5, 3.0mm의 면외변형이 발생한 그래프와 같이 면외변형 발생 직후 최대내력에 도달하는 현상은 나타나지 않았기 때문에, 하중직각방향으로 인장파단에 의해서 최대내력이 결정되었다고 사료된다(그림 7(c)). 그림 8은 실험 종료 후 볼트를 제거한 평판부분의 종국 파단형태를 나타낸다.



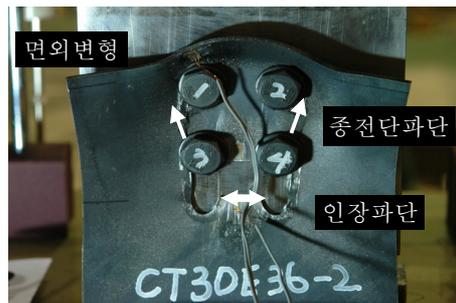
그림 5. 면외변형 발생모습 ($t_e=6.0$ mm, $e=54$ mm)



(a) 연단거리가 짧은 경우 ($t_e=1.5$ mm, $e=12$ mm)



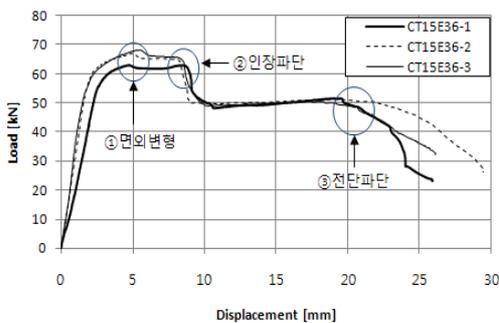
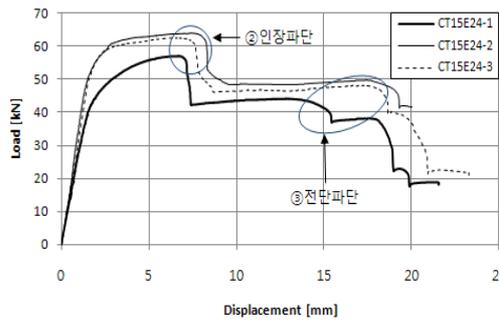
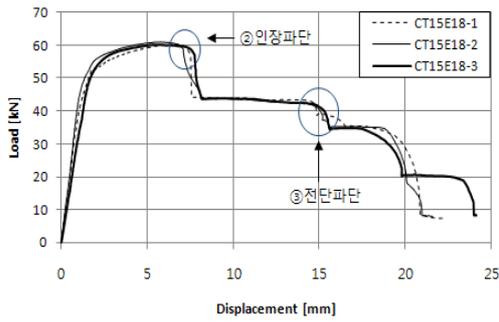
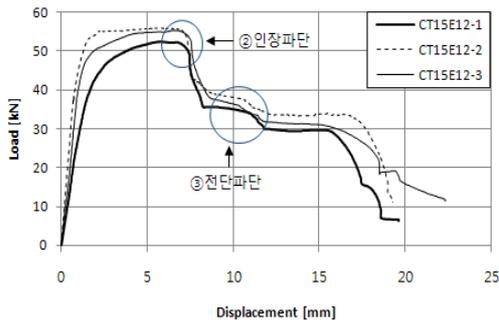
(b) 연단거리가 긴 경우 ($t_e=1.5$ mm, $e=36$ mm)



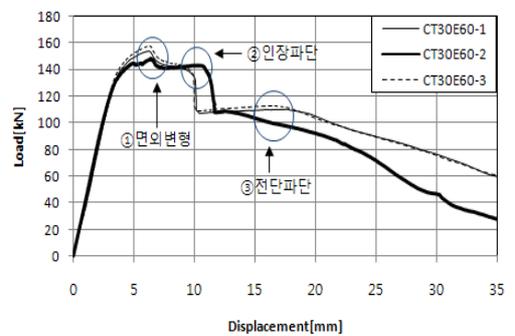
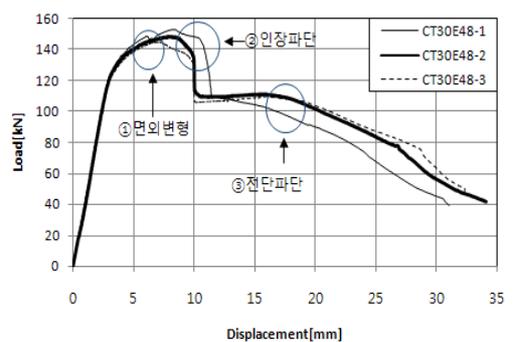
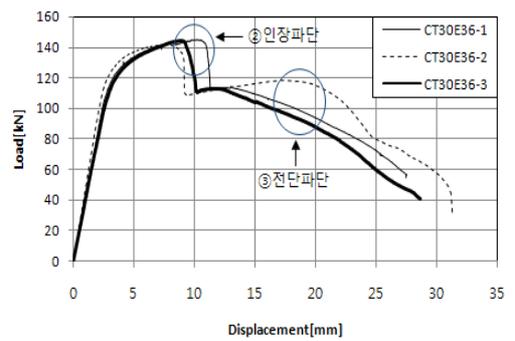
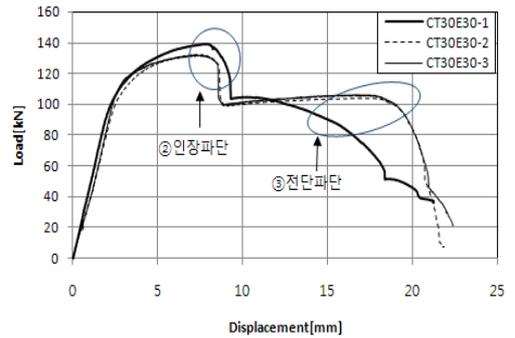
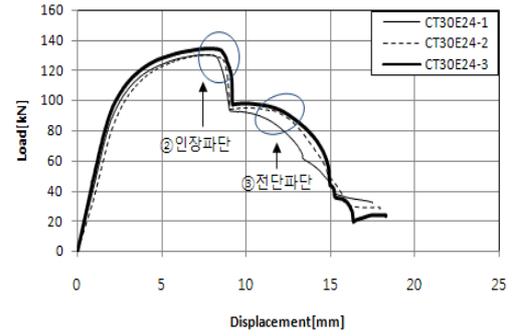
(c) 두께가 얇은 경우 ($t_e=3.0$ mm, $e=36$ mm)



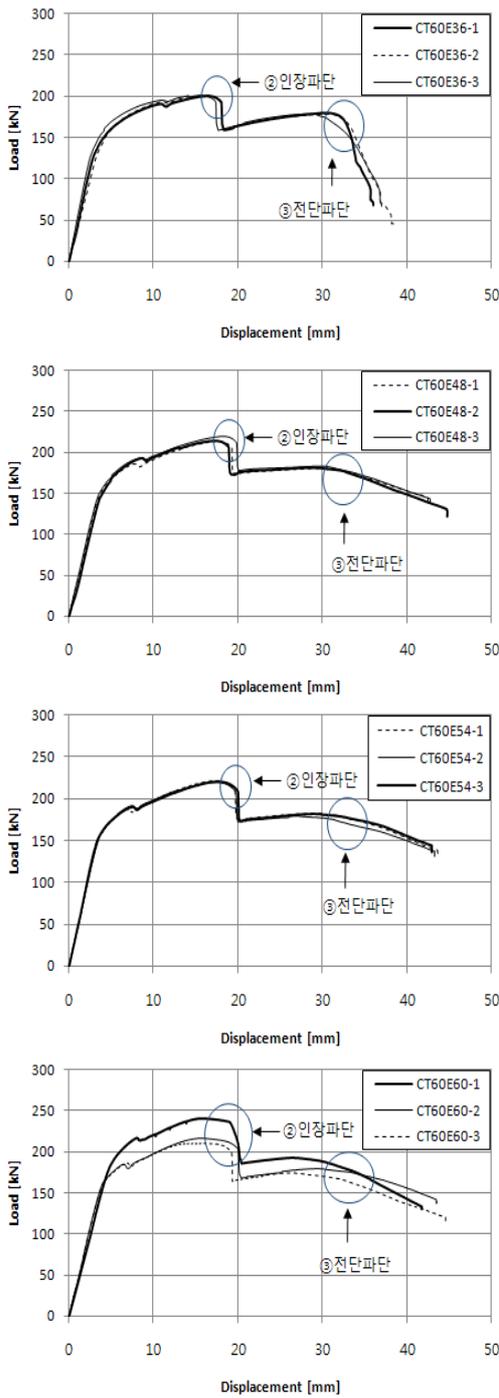
(d) 두께가 두꺼운 경우 ($t_e=6.0\text{mm}$, $e=36\text{mm}$)
그림 6. 볼트제거 전의 최종파단형태



(a) 평판두께 $t_e=1.5\text{mm}$



(b) 평판두께 $t_e=3.0\text{mm}$



(c) 평판두께 $t_e=6.0\text{mm}$
그림 7. 하중-변위곡선

일반적으로 인장재의 볼트접합부에 대해서 규정하고 있는 블록전단파단 내력 신장식으로 부터 하중방향 연단거리(e)와 접합평판의 두께(t)가 증가됨에 따라 최대내력도 증가하는 것으로 예측할 수 있지만, 본 실험결과 표 3에서 보는 바와 같이 평판두께가 3.0mm이고 연단거리가 48mm인 실험체 CT30E48의 최대내력(148.63kN)과 연단거리가 60mm인 실험체 CT30E60의 최대내력(153.57kN)을 비교해볼 때 큰

상승폭을 나타내지 않았다. 이는 연단거리가 긴 경우 면외변형이 발생해서 내력이 감소되었고, 연단거리를 증가시켜도 접합부의 내력상승은 기대할 수 없다고 사료된다.

또한 평판두께가 다르고 연단거리가 동일한 경우에 평판의 두께가 증가할수록 내력이 증가하는 것으로 예측할 수 있지만, 표 4의 값에서 보는 바와 같이 연단거리가 같고 두께가 다른 경우 두께가 두꺼운 것을 기준으로 두께에 대한 비율을 나타내는 α 와 평판두께마다 기계적 성질이 상이하므로, 재료의 항복강도(F_y)를 기준으로 보정해서 얻은 최대내력비율, γ/α 는 평판두께 6.0mm를 기준으로 연단거리가 60, 48mm일 경우에 내력이 12% 감소하였고, 연단거리가 36mm일 경우에는 8%, 16%내력이 감소한 것을 알 수 있다. 이는 면외변형의 발생으로 인하여 내력이 감소되었기 때문으로 판단된다.



(a) CT15E36



(b) CT30E36



(c) CT60E48



(d) CT60E60

그림 8. 볼트제거 후의 블록전단파단형태

상기와 같이 일면전단 볼트접합부에서 하중방향연단거리(e)와 평판두께(t)에 따라 면외변형 발생조건이 상이하므로 면외변형의 발생에 따른 내력저하를 고려할 필요가 있다.

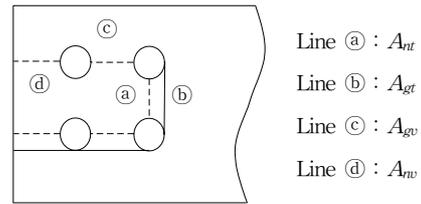


그림 9. 블록전단파단의 파단단면 산정선

4. 현행 기준식과의 비교

4.1 블록전단파단의 조합

단순인장 볼트접합부에 대한 현행기준식에서는 접합평판의 종국상태를 순단면파단, 종전단파단, 지압파단, 블록전단파단으로 분류하고 있으며, 본 연구에서는 위의 4가지 파단모드 중에서 블록전단파단에 대한 현행기준식을 토대로 예측된 최대내력과 실험결과 최대내력을 비교·분석하고자 한다.

그림 9는 블록전단파단내력 산정에 있어서 파단단면 산정선(인장파단 또는 인장항복+전단파단 또는 전단항복)을 나타내고 있다. 기준식에서 제시하는 블록전단파단형태의 조합은 첫째, 인장저항 순단면적 파단(또는 항복)후 전단저항 총단면적 파단(또는 항복)의 블록전단파단모드(Line(a)+Line(c))와 둘째, 인장저항 총단면적 파단(또는 항복)후 전단저항 순단면적 파단(또는 항복)의 블록전단파단모드(Line(b)+Line(d))이다.

표 3. 실험결과 최대내력과 면외변형의 영향(연단거리)

실험체명	면외 변형 (최종)	실측평균 평판두께 t_e (mm)	평균 최대내력 P_u (kN)	$P_u/P_u(eM)$	$P_u/P_u(eM-Cult)$
CT15E12	-	1.5	54.68	1.00	-
CT15E18	-		60.50	1.11	-
CT15E24	-		61.28	1.12	-
CT15E36	○	3.0	66.12	1.21	1.00
CT30E24	-		131.38	1.00	-
CT30E30	-		134.52	1.02	-
CT30E36	○	6.0	142.92	1.09	1.00
CT30E48	○		148.63	1.13	1.04
CT30E60	○		153.57	1.17	1.07
CT60E36	-	6.0	201.00	1.00	-
CT60E48	○		215.54	1.07	1.00
CT60E54	○		220.50	1.10	1.02
CT60E60	○		222.40	1.11	1.03

표 4. 실험결과 최대내력과 면외변형의 영향(접합평판의 두께)

실험체명	실측 평판 두께 t_e (mm)	$\alpha = \frac{t_e}{t_{e,max}}$	항복 강도 F_y (MPa)	재료항복강도비 $\frac{F_y}{F_{y(t_{e,max})}}$	최대 내력 P_u (kN)	$\beta = \frac{P_u \times 1}{F_y/F_{y(t_{e,max})}}$	$\gamma = \frac{\beta}{\beta_{t_{e,max}}}$	$\frac{\gamma}{\alpha}$
CT15E36	1.5	0.25	344.10	1.55	66.12	42.66	0.21	0.84
CT30E36	3.0	0.5	345.75	1.56	142.92	91.62	0.46	0.92
CT60E36	6.0	1.0	222.0	1.0	201.00	201.00	1.0	1.0
CT30E48	3.0	0.5	345.75	1.56	148.63	95.28	0.44	0.88
CT60E48	6.0	1.0	222.0	1.0	215.54	215.54	1.0	1.0
CT30E60	3.0	0.5	345.75	1.56	153.57	98.44	0.44	0.88
CT60E60	6.0	1.0	222.0	1.0	222.40	222.40	1.0	1.0

여기서, A_{nt} 는 인장저항 순단면적으로 점선으로 나타낸 Line(a), A_{gt} 는 인장저항 총단면적으로 실선으로 나타낸 Line(b), A_{gv} 는 전단저항 총단면적으로 실선으로 나타낸 Line(c), A_{nv} 는 전단저항 순단면적으로 점선으로 나타낸 Line(d)이다.

4.2 블록전단파단(Block shear fracture)기준식

볼트접합부의 블록전단파단 내력(P_{ut})에 대해 한국강구조학회, KSSC(2009), 미국강구조협회, AISC(2001), 일본건축학회, AIJ(1998), 미국철강협회, NAS(2007), 유럽의 EC3(1996)은 다음의 식(1)~(6)과 같이 제시하고 있다.

- AISC, KSSC; 열간압연강
인장력을 인장영역(순단면 인장파단 선행)또는 전단영역(전단면 종전단파단 선행)에서 부담하는 여부에 따라 두식으로 분리해서 사용하고 있다.

$$F_u A_{nt} \geq 0.6 F_u A_{nv} \text{ 일 때,}$$

$$P_{ut} = A_{nt} F_u + 0.6 A_{gv} F_y \tag{1}$$

$$F_u A_{nt} < 0.6 F_u A_{nv} \text{ 일 때,}$$

$$P_{ut} = A_{gt} F_y + 0.6 A_{nv} F_u \tag{2}$$

- AIJ; 열간압연강
순단면 인장파단과 전단면 종전단파단의 조합으로 구성된다.

$$P_{ut} = (A_{nt} + 0.5 A_{gv}) \cdot F_u \tag{3}$$

- NAS; 냉간성형강, 다음 중 최소값 사용
순단면 인장파단과 전단면 종전단항복 또는 순단면 종전단 파단의 조합으로 구성된다.

$$P_{ut} = F_u A_{nt} + 0.6 F_y A_{gv} \tag{4}$$

$$P_{ut} = F_u A_{nt} + 0.6 F_u A_{nv} \tag{5}$$

- EC3; 냉간성형강
순단면 인장파단과 순단면 종전단항복의 조합으로 구성된다.

$$P_{ut} = F_u A_{nt} + \frac{1}{\sqrt{3}} F_y A_{nv} \tag{6}$$

여기서, F_y 는 모재의 항복강도, F_u 는 모재의 인장강도이다.

4.3 실험과 기준식에 의한 결과 비교 분석

4.3.1 최대내력 비교

본 연구의 재료시험에 의해 얻어진 모재의 평균항복강도 (F_y)와 평균인장강도(F_u)를 이용하여 각국의 설계기준식 중에서 블록전단파단모드에 따른 최대내력을 산정하여 실험결과와 최대내력과 비교한 것이 표 4이다. 표 5는 실험결과와 최대내력을 기준으로 각국의 기준식에 의한 내력을 비교한 데이터를 나타내고 있다.

실험체 CT30E36, CT60E48, CT60E54, CT60E60는 상기의 3장에서 언급한 바와 같이 외형적으로 면외변형이 발생하였으나 최대내력에는 큰 영향을 미치지 않았다고 사료되기 때문에 면외변형이 발생하지 않은 실험체로 분류하였다. 표 4와 표 5에서 면외변형이 발생하지 않은 하중방향의 연단 거리가 비교적 짧은 실험체들의 실험결과와 각 기준식에 의한 예측결과는 모든 기준에서 최대내력 평가정도가 안정적으로 평가되고 있지만($P_{ut}/P_{ue}=0.60\sim 1.00$), AIJ에 비해 NAS, AISC, EC3의 기준들이 최대내력을 과소평가하고 있는 것을 알 수 있다. 하지만 면외변형이 발생하지 않은 평판의 두께가 6.0mm이고 연단거리가 54, 60mm인 실험체 CT60E54, CT60E60의 경우 AIJ에서 최대내력을 과대평가 하는 것으로 나타났다($P_{ut}/P_{ue}=1.03\sim 1.07$).

두께가 3mm이상인 경우, 면외변형이 발생한 하중방향 연단거리가 긴 실험체의 실험결과와 각 기준식에 의한 예측결과에서는 AISC와 AIJ에서 과대평가를 나타내고 있다($P_{ut}/P_{ue}=1.03\sim 1.16$). 반면에, NAS와 EC3의 기준에 의해 산정된 최대내력은 실험결과의 최대내력보다 적거나 거의 유사하게 평가하고 있다. 표 5로부터 면외변형이 발생한 실험체에 대해서 NAS에 의한 최대내력비는 0.85~1.00, EC3에 의한 최대내력비는 0.70~0.82로 나타났다.

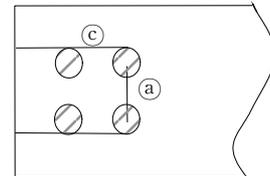
이상의 결과로부터 면외변형이 발생하지 않은 실험체에 대해서는 AIJ기준에 의한 내력평가가, 면외변형이 발생한 실험체에 대해서는 NAS에 의한 내력평가가 실험결과와 양호한 대응을 이루는 것으로 판단 할 수 있다. 표 6은 상기 AIJ기준과 NAS기준에 의해 예측된 최대내력과 실험결과를 비교한 결과이다. 평균 최대내력비(P_{ut}/P_{ue})는 두께에 따라서 0.90, 0.97, 1.01으로 예측정도가 개선된 것을 알 수 있다.

4.3.2 파단메카니즘 비교

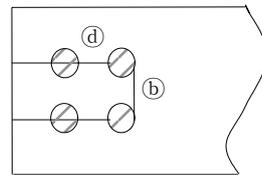
기준식 (1)~(6)에서 블록전단 파단내력에 대해 정의하고 있는 파단순서와 형태를 실제 탄소강 박판 일면전단 볼트접합부의 실험결과와 비교해 보면 다음과 같다. 그림 7(a)~(c)로부터 실험결과에서 면외변형이 발생하지 않은 실험체들의 최

대내력 시점은 볼트사이의 하중직각방향 인장파단이 발생한 직후이며, 파단형태로는 그림 10(a)(인장저항 순단면파단, A_{nt} +전단저항 전단면파단, A_{gv})과 같다.

식(1), (2)의 AISC기준에서 규정하는 두 가지 조건 ($F_u A_{nt} \geq 0.6 F_u A_{nv}$, $F_u A_{nt} < 0.6 F_u A_{nv}$)중, 본 실험체에서는 $F_u A_{nt} < 0.6 F_u A_{nv}$ 의 조건을 만족하고 있으므로 최대내력 산정시 식(2)을 사용한다. 식(2)에 의한 파단형태는 그림 10(b)에서 인장저항 총단면적의 항복(Line㉔, A_{gt})+전단저항 순단면적의 파단(Line㉑, A_{nv})의 블록전단파단이므로 실험결과와 파단형태가 상이한 것으로 나타났다. EC3의 기준식 (6)에서도 두 번째 항은 전단저항 순단면적의 항복(A_{nv})을 의미하므로 실험결과와 파단메카니즘과 다르다. 그러나 AIJ기준(식(3))과 NAS기준(식(4))에 의해 예측된 파단단면선은 실험결과와 유사한 것으로 나타났다.



(a) ㉑인장순단면파단+㉔전단총단면파단



(b) ㉔인장총단면파단+㉑전단순단면파단

그림 10. 블록전단파단모드형상

표 4. 실험결과와 각국의 설계기준 최대내력 비교

실험체명	AISC, KSSC P_{ut} [kN]	AIJ P_{ut} [kN]	NAS P_{ut} [kN]	EC3 P_{ut} [kN]	실험 평균내력 P_{ue} [kN]
CT15E12	41.79	47.32	38.13	32.69	54.68
CT15E18	48.61	53.55	44.79	37.93	58.32
CT15E24	53.62	57.73	49.80	41.74	61.28
CT15E36	59.66	61.94	56.07	46.28	66.12
CT30E24	109.99	124.07	107.03	82.89	131.38
CT30E30	120.75	133.04	116.53	90.07	134.52
CT30E36	131.51	142.00	124.00	97.26	142.92
CT30E48	153.04	159.94	138.93	111.63	148.63
CT30E60	174.56	177.88	153.87	126.00	153.57
CT60E36	174.30	190.54	161.19	126.86	201.00
CT60E48	203.19	214.61	180.37	145.32	215.67
CT60E54	217.63	226.65	189.96	154.54	220.50
CT60E60	232.07	238.68	199.55	163.77	222.49

표 5. 실험결과와 각국의 설계기준 최대내력비 비교
(각국의 설계기준 내력/실험결과 최대내력, P_{ut}/P_{ue})

실험체명	P_{ut}/P_{ue}			
	AISC, KSSC	AIJ	NAS	EC3
CT15E12	0.76	0.87	0.70	0.60
CT15E18	0.83	0.92	0.77	0.65
CT15E24	0.87	0.94	0.81	0.68
CT15E36	0.90	0.94	0.85	0.70
평균	0.84	0.92	0.78	0.66
변동계수	0.062	0.033	0.072	0.059
CT30E24	0.84	0.94	0.81	0.63
CT30E30	0.90	0.99	0.87	0.67
CT30E36	0.92	0.99	0.87	0.68
CT30E48	1.03	1.08	0.93	0.75
CT30E60	1.14	1.16	1.00	0.82
평균	0.96	1.03	0.90	0.71
변동계수	0.110	0.074	0.072	0.095
CT60E36	0.87	0.95	0.80	0.63
CT60E48	0.94	1.00	0.84	0.67
CT60E54	0.99	1.03	0.86	0.70
CT60E60	1.04	1.07	0.90	0.74
평균	0.96	1.01	0.85	0.69
변동계수	0.067	0.045	0.041	0.056

표 6. 실험결과와 AIJ&NAS기준식 최대내력비 비교

실험체명	연단거리 e [mm]	면외변형 발생여부 (내력영향)	AIJ & NAS P_{ut} [kN]	실험 평균내력 P_{ue} [kN]	P_{ut}/P_{ue}
CT15E12	12	-	47.32	54.68	0.87
CT15E18	18	-	53.55	58.32	0.92
CT15E24	24	-	57.73	61.28	0.94
CT15E36	36	○	56.07	66.12	0.85
평균	-	-	-	-	0.90
변동계수	-	-	-	-	0.040
CT30E24	24	-	124.07	131.38	0.94
CT30E30	30	-	133.04	134.52	0.99
CT30E36	36	-	124.00	142.92	0.99
CT30E48	48	○	138.93	148.63	0.93
CT30E60	60	○	153.87	153.57	1.00
평균	-	-	-	-	0.97
변동계수	-	-	-	-	0.033
CT60E36	36	-	190.54	201.00	0.95
CT60E48	48	-	214.61	215.67	1.00
CT60E54	54	-	226.65	220.50	1.03
CT60E60	60	-	238.68	222.49	1.07
평균	-	-	-	-	1.01
변동계수	-	-	-	-	0.045

5. 결론

본 연구에서는 박판 탄소강 일면전단 2행 2열 볼트접합부의 구조거동을 평가하는데 있어 접합평판의 두께(t)와 하중방향 연단거리(e)를 변수로 해서 블록전단파단(인장파단+전단파단)이 되도록 실험체를 계획하여 단순인장실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 연단거리가 비교적 큰 실험체에서는 면외변형이 관찰되었다. 접합평판의 두께가 다르고 하중방향의 연단거리가 48, 60mm로 동일한 경우에 두께가 감소함에 따라서 최대내력이 12% 저감되었고, 하중방향의 연단거리가 36mm인 경우에는 최대내력이 8, 16% 저감된 것으로 나타났다.
- (2) 하중방향 연단거리가 비교적 짧은 접합부의 경우, 인장파단과 전단파단의 조합된 전형적인 블록전단파단이 발생하였다. 면외변형의 발생은 박판 탄소강 일면전단 접합부의 최대내력을 저하시키는 원인임을 알 수 있었다. 하지만, 평판두께가 3.0mm인 실험체 CT30E36과 접합평판의 두께가 6.0mm인 실험체는 최종파단형태로는 면외변형이 발생했지만, 최대내력에는 큰 영향을 미치지 못한 것으로 사료된다. 이것은 면외변형의 발생에 의해 내력저하 후 최대내력이 결정되느냐 인장파단 등과 같은 형태에 의해 최대내력이 결정된 후 면외변형이 지속되느냐 등의 시점을 파악하는 것이 중요한 요인이라 판단된다. 면외변형이 발생한 접합부 실험체에서는 하중방향의 연단거리와 접합평판의 두께가 증가하여도 커다란 내력상승은 관찰되지 않았다.
- (3) 하중방향의 연단거리와 접합평판의 두께에 따라서 면외변형의 발생조건과 그에 따른 최대내력에 미치는 영향이 달랐다.

또한, 현행 기준의 볼트접합부 최대내력 산정식 KSSC, AISC, AIJ, NAS, EC3를 사용하여 산정된 최대내력과 실험결과 최대내력과의 비교·검토를 수행하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 면외변형이 발생하지 않은 실험체의 경우는 AIJ기준식, 면외변형이 발생한 실험체에 대해서는 NAS기준식에 의해 예측된 최대내력이 실험결과의 최대내력과 양호한 대응을 보이는 것으로 나타났다.
- (2) 블록전단파단의 파단단면 및 파단순서 측면에서 실험결과에서는 인장저항 순단면파단이 발생된 후, 전단저항

총단면 파단이 진행되는 파단형태를 보였지만, 현행 기준식 AISC(식(2))와 EC3에 의해 예측된 파단단면과는 상이하였다. AIJ나 NAS(식(4))과는 파단선 형태가 유사하다는 결론을 얻었다.

향후, 실험결과를 바탕으로 수치해석적 방법에 의한 변수해석을 통해서 연단거리나 접합평판의 두께에 따른 면외변형의 발생조건에 대해 면밀히 조사해보고 면외변형의 영향이 고려되지 않은 현행블록전단파단 기준식에 대해 고찰해볼 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 2008년 한밭대학교 교내학술연구비와 과학기술부 우수연구센터 육성사업인 한양대학교 친환경건축연구센터의 지원(R11-2005056-01003)하에 이루어진 연구결과의 일부임.

참 고 문 헌

강호순, 윤희택, 최순주, 최문식(2000) 냉간성형강 고력볼트 접합부의 볼트구멍 치수에 따른 지압강도에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 춘계학술발표대회논문집(구조계), 20권 1호, pp.125-128.

김태수, 정하영(2008) 냉간선형 스테인레스강 일면전단 2열 볼트접합부의 구조거동 및 면외변형에 관한 해석적 연구, 대한건축학회 학술발표대회논문집, 28권 1호.

김태수, 정하영, 김승훈, 이용택(2009) 하중방향 연단거리를 변수로 갖는 박판 볼트 접합부의 최대내력과 면외변형에 관한 실험적 연구 -2행 2열 볼트배열의 일면전단 접합-, 대한건축학회 논문집(구조계), 25권 4호, pp.309-312.

대한건축학회(1999) 냉간성형강 구조설계기준 및 해설.

정하영, 김태수, 김승훈, 이용택(2008) 냉간선형 탄소강 일면전단 2열 볼트접합부의 구조거동에 관한 해석적 연구, 대한건축학회 학술발표대회논문집, 28권 1호, pp.281-284.

최문식, 최순주, 강호순(2002) 냉간성형강 고력볼트 접합부의 극한내력에 관한 실험적 연구(볼트구멍 형상을 중심으로), 대한건축학회 논문집(구조계), 18권 4호, pp.83-90.

최순주, 최문식(1999) 냉간성형강의 고력볼트 접합부에서 볼트구멍 크기와 와셔의 효과에 의한 극한내력에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 11권 6호, pp.583-590.

한국강구조학회(2009), KBC2009 강구조설계, 구미서관.

Architectural Institute of Japan(1985) *Recommendations for the Design and Fabrication of Light Weight Steel Structures*, AIJ.

Architectural Institute of Japan(1998) *Recommendations for Limit State Design of Steel Structures*, AIJ.

Architectural Institute of Japan(2002) *Recommendations for the Design and Fabrication of Light Weight Steel Structures(SI Unit)*, AIJ.

American Institute of Steel Construction(AISC)(2001) *Manual of Steel Construction-Load and Resistance Factor Design, 3rd edition*, AISC.

American Iron and Steel Institute(1968) *Specification for the Design of Light Gage Cold-formed Stainless Steel Structural Members*, AISI.

American Iron and Steel Institute(1989) *Cold-Formed Steel Design Manual Part I-Specification, 1986 Edition with the 1989 Addendum*, AISI,.

American Iron and Steel Institute(2007) *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*, AISI S100-07.

Eurocode 3(1996) European Committee for Standardization, Design of steel structures, Part 1.3-general rules, supplementary rules for cold formed thin gauge members and sheeting.

Kim, T.S. Kuwamura, H.(2007) Finite element modeling of bolted connections in thin-walled stainless steel plates under static shear, *Thin-Walled Structures*, Vol. 45, pp.407-421.

Kim, T.S. Kuwamura, H. Cho, T. Shin, S.W. Kim, S.H. and Lee Y.T.(2008) Investigation on Mechanical Behaviors for Bolted Connections in Carbon Steel and in Stainless Steel Using FEM, *ISIJ International*, Vol. 48, No. 6, pp.851-860.

Kuwamura, H. and, Isozaki, A.(2002) Ultimate Behavior of Fastener Connections of Thin Stainless Steel Plates, *Journal of Structural and Construction Engineering* (Transactions of Architectural Institute of Japan), No. 556, pp.159-166.

(접수일자 : 2009. 6. 12 / 심사일 2009. 6. 17 / 게재확정일 2009. 7. 23)