



듀플렉스계 스테인리스강 2행 2열 볼트접합부의 구조거동에 관한 실험적 연구

강현식¹ · 김태수^{2*}

¹교수, 경남과학기술대학교, 건축공학과, ²교수, 한밭대학교, 건축공학과

Experimental Study on Structural Behaviors of Duplex Stainless Steel(STS329FLD) Bolted Connections with Four Bolts

Kang, Hyun Sik¹, Kim, Tae Soo^{2*}

¹Professor, Dept. of Architectural Engineering, GyeongNam National University of Science and Technology, Jinju, 52725, Korea

²Professor, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

Abstract - Recently, duplex stainless steel with higher strength, greater corrosion resistance (particularly, stress corrosion cracking) and lower cost compared with austenitic stainless steel has been developed. However, stainless steels are not included in the structural materials of Korean Building Code(KBC) and corresponding design specifications are not regulated. In this paper, experimental studies have been performed to investigate the structural behaviors of duplex stainless steel (STS329FLD) four-bolted connections for providing the basic data of domestic design specification. Main variables are shear connection type (single shear and double shear) and end distance parallel to the direction of applied force. Fracture modes were classified into typical block shear fracture, tensile fracture and curling. Curling occurrence in single shear connection led to ultimate strength drop by up to 17%. Test strengths were compared with those by current design specifications and proposed equations by previous researches. For specimens with no curling, AISC/AISI/KBC, EC3 and Clement & Teh's equations underestimated the strength. AIJ and Teh & Deierlein overestimated the strength of bolted connection. For specimens with curling, Kim & Lim's equation was also overly unconservative to predict the ultimate strength of curled connections.

Keywords - Duplex stainless steel, Bolted connection, Curling, Strength reduction, Single shear, Double shear, Design specification

1. 서론

스테인리스강(Stainless steel, STS)은 재료의 우수한 내식성과 내구성 인성 연성 등의 많은 장점을 지니고 있어 국내외에서 건축물의 내외장재의 비구조재뿐만 아니라 구조부재의 재료로써 수요가 꾸준히 증가하고 있다. 국외에서는 스테인리스강의 재료적 성질 및 구조부재의 구조적 거동에 관한 연구결과를 토대로, 미국 토목학회(ASCE)^[1], 유럽(EC3)^[2], 일본스테인리스강구조협회(SSBA)^[3], 호주/뉴질랜드 기준협회(AS/NZS)^[4] 등에서는 스테인

리스강 구조설계기준을 제정하여 스테인리스강을 건축구조용 강재로 적용할 수 있는 기틀을 마련하고 있다.

국내에서도 1990년 스테인리스강 H형강보 횡좌굴내력에 관한 연구^[5]를 시작으로 2000년대는 스테인리스강 강관의 압축력 및 조합력을 받는 부재의 구조거동에 관한 다양한 연구를 수행했다^{[6]-[8]}. 최근에는 오스테나이트계 및 페라이트계 스테인리스강에 대한 볼트접합부와 용접접합부에 대한 실험 및 해석적 연구를 통해 탄소강과 다른 스테인리스강의 기계적 성질의 특성과 스테인리스 강종의 차이에 따른 접합부의 거동을 고려한 내력평가식을 제안해 왔다^{[9]-[14]}.

최근에 오스테나이트계와 페라이트계 스테인리스강의 장점을 포함하고 있는 듀플렉스계(Duplex) 스테인리스강(STS329FLD, 크롬 19~22%, 니켈 0.5~1.5%)이 개발되어 KS에 등재되었다. 듀플렉스계 스테인리스강인 STS329FLD는 니켈의 함유량이 적어 가격경쟁력 측면에서 우수하며 오스테나이트계 스테인리스강(STS304)대비 높은 항복강도와 인장강도와 가공성과 부식성에

Note.-Discussion open until August 31, 2019. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 11, 2018; revised December 03, 2018; approved on January 02, 2019.

Copyright © 2019 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-42-821-1121 Fax. +82-42-821-1590

E-mail. tskim@hanbat.ac.kr

있어서 유사수준을 확보할 수 있다. 특히, 내응력부식균열(Stress corrosion crack, SCC)이 STS304보다 월등히 우수하다.

본 연구에서는 듀플렉스계 스테인리스강(STS329FLD)을 건축물의 구조부재에 적용하기 위한 기초연구로 단순인장을 받는 일면전단 및 이면전단 볼트접합부에 대한 구조거동을 조사하고 스테인리스강과 탄소강에 대한 현행기준식과 기존연구자에 의해 제시된 내력평가식을 토대로 실험내력과 파단형태에 따른 기준내력을 비교하여 이론식의 적용성을 검토하고자 한다.

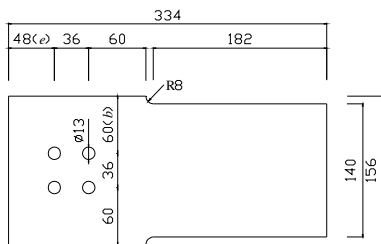
2. 볼트접합부 실험체 계획 및 재료시험

2.1 실험체 계획 및 구성

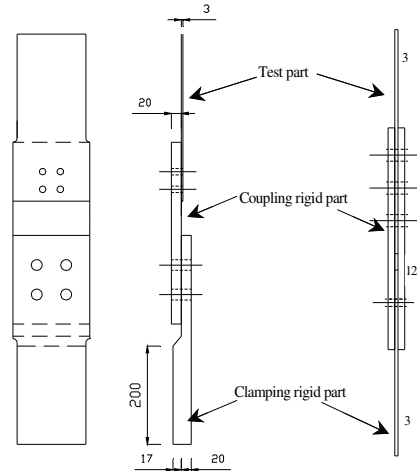
듀플렉스계 스테인리스강(STS329FLD)을 사용한 일면전단과 이면전단 볼트접합부에서 변수(전단접합방법, 하중방향 연단거리)에 따른 구조거동을 비교·조사하기 위해 다음과 같이 볼트접합부 실험체를 계획한다. 듀플렉스계 스테인리스강은 국내에서 시판 중인 최대두께인 공칭평판두께(t_n)가 3.0mm인 강판을 대상으로 2행 2열 볼트접합부를 Fig. 1.과 같이 제작하고, 볼트접합형태는 마찰접합이 아닌 지압형 접합부로 계획하였다. 실험체명 및 치수는 Table 1에 정리한다. 실험체명에서 예를 들어, ‘SD4T20E24’에서 ‘SD’는 듀플렉스계 스테인리스강(Duplex stainless steel), ‘4’는 볼트개수 4개, ‘T30’은 공칭평판두께(t_n) 3mm, ‘E24’는 하중방향 연단거리(e) 24mm를 의미한다.

일면전단 볼트접합부 실험체 구성은 파단측인 박판부와 가력시 편심이 발생하지 않도록 중간연결부와 물림고정부로 3개로 나누어 제작하였다(Fig. 1.(b)). 이면전단 볼트접합부 실험체는 양쪽면에 면외변형을 구속하는 고정부 2개와 고정부 안쪽에는 파단측인 박판부와 물림고정부로 총 4개의 판으로 구성하였다(Fig. 1.(c)).

실험체에 사용한 볼트는 가력시 볼트부분에서 전단파단이나 변형을 억제하기 위해서 고장력볼트(F10T)를 사용하였다. 일면전단 접합부에서 박판부와 중간 연결부 및 이면전단 접합부에서 박판부와 양쪽 고정부는 F10T M12를, 나머지 볼트체결부는 F10T M20의 고장력 볼트를 사용하였다.



(a) Test part



(b) Assembly of single shear (c) Assembly of double shear

Fig. 1. Geometry and assembly of bolted connection

Table 1. Specimen list

Shear type	Specimen	Nominal plate thickness t_n [mm]	End distance e [mm]	Commons
Single shear	SD4T30E24	3.00	24	Bolt diameter(d) = 12mm Bolt hole diameter($\varnothing$) = 13mm Pitch(p), Gage(g) = 36mm Edge distance perpendicular to the direction of loading (b) = 60mm
	SD4T30E30		30	
	SD4T30E36		36	
	SD4T30E48		48	
	SD4T30E60		60	
Double shear	DSD4T30E36	3.00	36	Bolt diameter(d) = 12mm Bolt hole diameter($\varnothing$) = 13mm Pitch(p), Gage(g) = 36mm Edge distance perpendicular to the direction of loading (b) = 60mm
	DSD4T30E48		48	
	DSD4T30E60		60	

2.2 재료시험

듀플렉스계 스테인리스강(STS329FLD)의 기계적 성질을 파악하기 위하여 KS B 0801에 따라 인장시험편을 제작하고 KS B 0802(금속재료 인장시험 방법)에 따라 단순인장시험을 수행한 결과, Fig. 2.와 같은 응력-변형도 곡선을 얻었고, Table 2에 인장시험 결과를 정리하였다. KS B 0802에 의하면 재료의 항복강도는 항복점이 명확한 경우에는 하항복점을 항복강도로 산정하고 그렇지 않은 경우는 초기강성에 평행하게 변형도의 0.2% 오프셋하여 곡선과 만나는 점을 항복강도로 산정하였다. 재료시험결과 평균탄성계수는 196.35GPa, 항복강도는 512.65MPa, 인장강도는 734.17MPa, 연신율은 47.87%로 나타났으며 KS D 3698의 최저기준을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

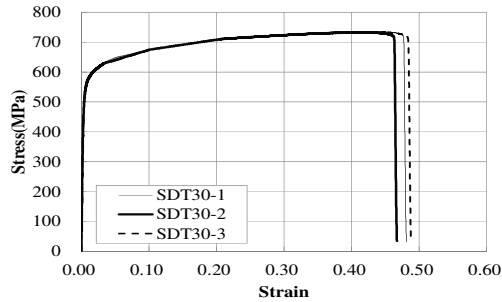


Fig. 2. Strain-stress curves (STS329FLD, $t_n = 3.0\text{mm}$)

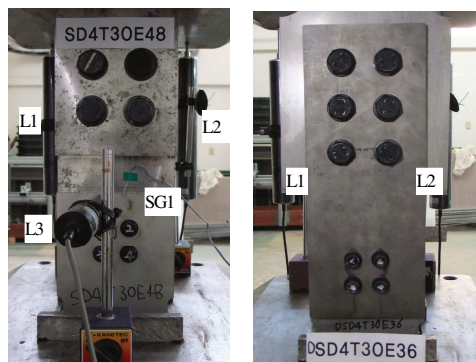
Table 2. Material test results

Coupon	Actual plate thickness t_e [mm]	Young's modulus E [GPa]	Yield stress σ_y [MPa]	Tensile strength σ_u [MPa]	Yield ratio σ_y/σ_u YR[%]	Elongation EL[%]
SDT30-1	2.81	194.85	515.38	736.05	70.02	48.10
SDT30-2	2.85	200.56	513.66	732.76	70.10	46.70
SDT30-3	2.82	193.64	508.92	733.71	69.36	47.78
Average	2.83	196.35	512.65	734.17	69.83	47.87

3. 볼트접합부 실험

3.1 실험방법

Fig. 3.에 일면전단 및 이면전단 볼트접합부 실험체 설치 상황을 나타낸다. 하중방향 변위와 일면전단 볼트접합부의 면외변형(평판두께 방향변위, 즉 하중직각방향 변위)을 측정하기 위하여 일면전단 볼트접합부에는 3개의 변위계(L1, L2, L3)를, 이면전단 볼트접합부에는 2개의 변위계(L1, L2)를 각각 Fig. 3.(a)와 Fig. 3.(b)와 같이 설치하였다. 하중 가력방법으로 변위제어방법을 채택하여 0.5mm/min의 일정한 속도로 하중방향변위를 증가시키면서 단순 인장실험을 수행하였다.



(a) Single shear (b) Double shear

Fig. 3. Set-up of specimen

일면전단 볼트접합부 중에 하중방향 연단거리(End distance)가 36mm 이상인 접합부에 면외방향의 변형과 변형도 추이를 측정하기 위해서 Fig. 3.(a)와 같이, 박판부의 하중방향 연단에 근접한 볼트중심으로부터 하중방향으로 30mm떨어진 지점에 변위계(L3)와 소성 스트레인 게이지(SG1)를 설치하였다.

3.2 실험결과 및 분석

3.2.1 파단형태 및 최대내력

실험결과로부터 일면전단 및 이면전단 볼트접합부의 실험종료 시점에서 종국파단형태와 면외변형 양상 및 하중-변위곡선을 Fig. 4.와 Fig. 5.에 나타냈다. Table 3에 접합부 실측두께(t_e), 실험최대내력(P_{uc}), 면외변형 발생여부, 실험종료시점에서 파단형태, 최대내력시점에서 파단형태와 내력비를 정리하였다. 일면전단 접합부 중에 SD4T30E24와 SD4T30E30는 하중 직각방향 연단거리(e)가 작기 때문에 면외변형(Curling)이 발생하지 않았고 Fig. 4.의 (a)와 (b)에서와 같이 면내에서 인장파단과 전단파단의 조합인 블록전단파단(Block shear fracture, BS)이 발생하였다. 하중방향 연단거리가 긴 실험체 SD4T30E36, SD4T30E48와 SD4T30E60는 Fig. 4.의 (c)~(e)에서 보는 바와 같이 두께방향으로 면외변형이 관찰되었다. 또한, Fig. 5.(a)의 하중-변위곡선에서 면외변형 발생으로 내력이 일시적으로 저하되는 현상이 나타났다. SD4T30E36와 SD4T30E48는 볼트간 인장파단 후 하중방향으로 위쪽전단면을 따라 볼트간 전단파단이 발생하였다. 그러나, SD4T30E60 접합부는 볼트간 인장파단 후에 하중방향으로 전단파단이 발생하지 않고 판이 전체적으로 면외변형이 되었다. 하중이 증가함에 따라 하중방향으로는 전체적인 면외변형이 진전되고 힘의 흐름이 하중직각방향으로 변경되어 Fig. 4.(e)와 같이 하중직각방향으로 추가적인 인장파단(N)이 발생하였다.

이면전단 볼트접합부 실험체 중에서 DSD4T30E36와 DSD4T30E48는 Fig. 4.의 (f)와 (g)에서 보는 바와 같이 볼트간 인장파단에 의해 최대내력이 결정된 후, 추가적으로 하중직각방향의 연단으로 인장파단(N)이 발생하였다. DSD4T30E60 실험체는 볼트간 인장파단 후 좌측은 추가적인 인장파단이, 우측은 하중방향으로 볼트간 전단파단이 혼합되어 관찰되었다. Fig. 5.(b)의 하중-변위 곡선에서도 볼트간 인장파단에 의해 최대내력이 결정되는 것을 알 수 있다.

실험결과로부터 하중방향 연단거리가 24mm 또는 36mm인 실험체 최대내력(P_{uc})으로 기준화한 최대내력비($P_{uc}/P_{uc,Mn}$)와 면외변형이 발생한 접합부 중에서 최소 하중방향 연단거리

($e=36\text{mm}$)를 갖는 접합부의 최대내력(P_{ucCur})으로 기준화한 내력비(P_{uc}/P_{ucCur})을 Table 3에 나타냈다. 면외변형이 발생하지 않은 일면전단 볼트접합부인 SD4T30E24와 SD4T30E30은 연단거리가 증가함에 따라 내력이 증가하였으나 면외변형이 발생한 하중방향 연단거리가 36mm이상인 접합부에서는 연단거리가 증가함에도 불구하고 내력은 크게 상승되지 않았다. 이면전단 실험체의 경우는 하중방향 연단거리가 증가함에 따라 내력도 증가하는 경향이 나타났다. 하중방향 연단거리가 36mm인 실험체(DSD4T30E36)와 48mm인 실험체(DSD4T30E48)와 비교했을 때 내력은 19% 상승하였으나 연단거리가 60mm인 실험체(DSD4T30E60)는 48mm인 실험체(DSD4T30E36)보다 내력상승 정도가 낮았다.

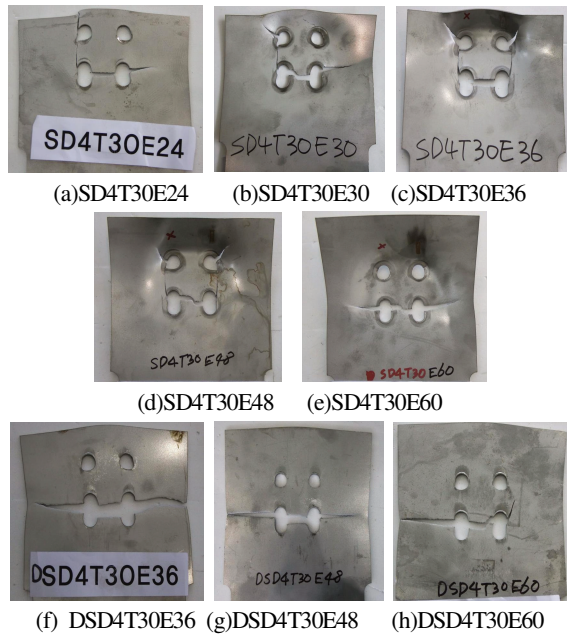


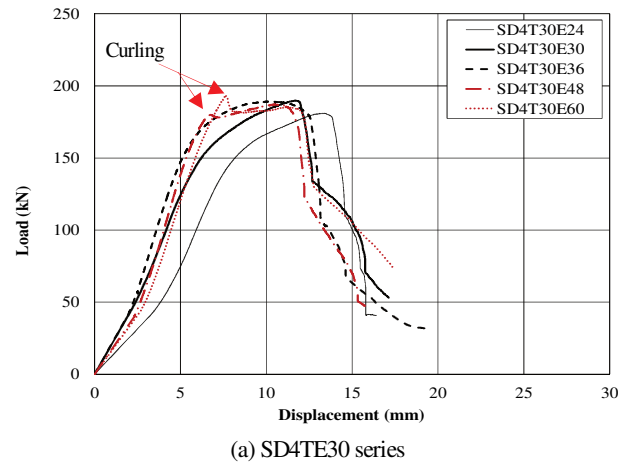
Fig. 4. Fracture shapes at test end

Table 3. Test results

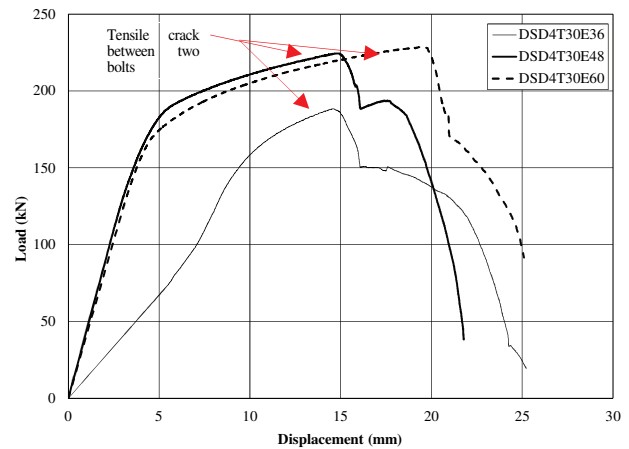
Specimen	Actual plate thickness t_e [mm]	Ultimate strength P_{uc} [kN]	Curling	Fracture mode at test end	Fracture mode at ultimate state	Strength ratio	
						P_{uc}/P_{ucMin}	P_{uc}/P_{ucCur}
SD4T30E24	2.98	181.06	-	BS	Tensile fracture between two bolts	1.00	-
SD4T30E30	2.94	189.88	-	BS		1.05	-
SD4T30E36	2.95	189.14	○	BS		1.04	1.00
SD4T30E48	2.95	187.18	○	BS		1.03	0.99
SD4T30E60	2.95	193.45	○	N	Curling	1.07	1.02
							$P_{ucSingle}/P_{ucDouble}$
DSD4T30E36	2.95	188.36	-	N	Tensile fracture between two bolts	1.00	1.00
DSD4T30E48	2.95	224.42	-	N		1.19	0.83
DSD4T30E60	2.95	228.73	-	BS		1.21	0.85

3.2.2 면외변형 영향

기존의 스테인리스강 및 탄소강 볼트접합부에 관한 연구에서도 언급한 바와 같이, 하중방향 연단거리(e) 또는 하중직각방향 연단거리(b)가 긴 일면전단 볼트접합부에서 하중직각방향(평판두께방향)으로 볼트의 지압에 의한 접합판의 면외 국부좌굴의 형태인 면외변형이 발생하여 볼트접합부의 내력저하에 영향을 주는 것으로 보고되었고 면외변형의 영향과 실제 파단메커니즘을 고려한 내력평가식을 제안하였다^{[15]-[16]}. 이러한 면외변형은 볼트몸체의 판에 대한 지압에 따른 압축응력영역에 있는 평판이 일부 또는 전체적으로 면외좌굴되어 발생하는 것으로 판단된다. Table 3에서 면외변형 발생으로 인해 하중방향 연단거리가 증가함에도 불구하고 일면전단 접합부에 있어서 내력상승이 관찰되지 않았고, Fig. 5.에서 표시한 바와 같이, 면외변형이 발생하지 않은 실험체와 비교해 볼 때, 면외변형 발생 이후 접합부의 강성과 내력이 저하되는 것을 알 수 있었다.



(a) SD4TE30 series

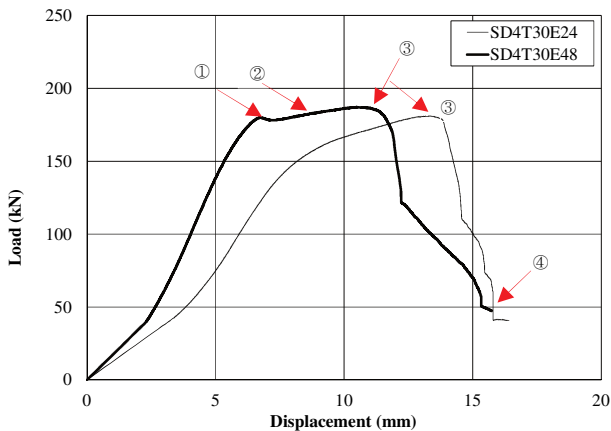


(b) DSD4T30 series

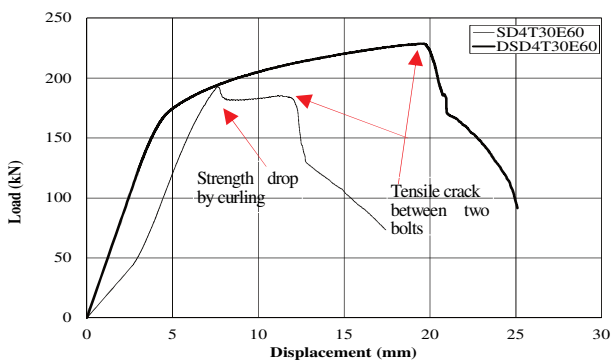
Fig. 5. Load-displacement relationship

1) 내력변화와 파단메카니즘 비교

듀플렉스계 스테인리스강 일면전단 접합부의 단순인장 실험결과로부터, 하중방향 연단거리에 따라 면외변형의 발생여부와 종국파단형태도 상이하다는 것이 판명되었다. 본 절에서는 면외변형이 발생한 접합부와 발생하지 않은 접합부 및 일면전단접합부와 이면전단 접합부의 내력변화와 파단메카니즘을 비교한 것을 Fig. 6.에 나타냈다. Fig. 6.(a)에 일면전단 접합부 SD4T30E24와 SD4T30E48을 대상으로 재하중에 큰 내력 및 상태변화를 일으킨 지점을 하중-변위 곡선상에 표시했고, 그에 해당하는 부분의 변화양상을 나타내는 단계별 사진을 Fig. 7.에 정리하였다. Fig. 6.(b)는 하중방향 연단거리(e)가 60mm인 일면전단 볼트접합부(SD4T30E60)와 이면전단 볼트접합부(DSD4T30E60)의 하중-변위 곡선을 나타낸다.



(a) SD4T30E24 and SD4T30E48

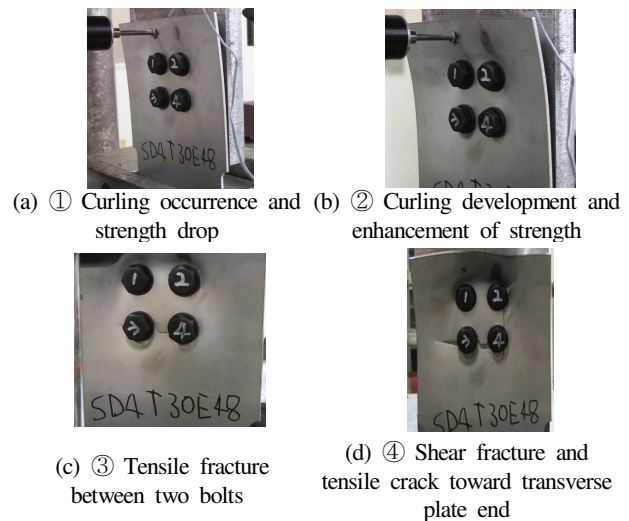


(b) SD4T30E60 and DSD4T30E60

Fig. 6. Comparison of load-displacement curves

Fig. 6.(a)에서 실험체 SD4T30E48의 ①지점에서 면외변형의 발생과 함께 일시적인 내력저하가 나타났으며(Fig. 7.(a)), ②지점에서는 다시 내력이 상승하면서 면외변형량도 증가되었다(Fig. 7.(b)). ③지점에서는 Fig. 7.(c)와 같이 3번과 4번 볼트간 인장파단

이 발생하여 접합부의 최대내력이 결정되었고 일시적인 내력저하가 관찰되었다. ④지점에서는 하중방향 전단파단과 좌측의 하중직각방향 연단으로 인장파단이 동시에 발생하였다(Fig. 7.(d)). 실험체 SD4T30E24의 경우는 Fig. 4.(a)와 Fig. 6.(a)와 같이 ③지점에서 볼트간 인장파단이 발생하여 최대내력이 결정된 후 ④지점에서는 좌측의 하중방향 전단파단과 우측의 하중직각방향 연단으로 인장파단이 동시에 발생하였다. Fig. 6.(b)에서는 일면전단 실험체인 SD4T30E60에서 면외변형이 발생하여 일시적인 내력저하로 최대내력이 결정되었고 강재변위가 증가함에 따라 약간의 내력상승은 나타났지만 최대내력을 초과하지 못했고 볼트간 인장파단(Fig. 4.(e))에 의해 재차 내력저하가 발생하였다. 반면에 이면전단 실험체인 DSD4T30E60는 항복이후 변형도 경화에 따른 지속적인 강도증가와 함께 볼트간 인장파단에 의해 최대내력이 결정되었다(Fig. 4.(h)).

**Fig. 7.** Curling development and fracture mechanism according to displacement for SD4T30E48

이와 같이 일면전단 접합부내에서도 하중방향 연단거리에 따라 접합부의 파단메카니즘이 상이했고 동일 연단거리에 대해서도 전단접합 방법에 따라 최대내력과 파단형상이 다르게 나타났다.

2) 면외변형 및 변형도

하중방향 연단거리가 36mm이상의 긴 실험체를 대상으로 Fig. 3.(a)에서 측정된 일면전단 볼트접합부의 하중진전에 따른 면외변형량과 변형도 변화를 조사하였다. 변위계(Fig. 3.(a), L3)로부터 측정된 면외변형(Curling : 세로축)과 하중방향 변위(Displacement, 가로축)와의 관계를 Fig. 8.에 정리하였다. 초기에는 면외변형이

거의 발생되지 않았으며, 면외변형이 발생개시 직후 면외변형량은 급격히 상승하는 것을 알 수 있고, 하중방향 연단거리가 커질수록 작은 강제변위(Enforced displacement)에서 면외변형 크기도 증가하는 것으로 나타났다.

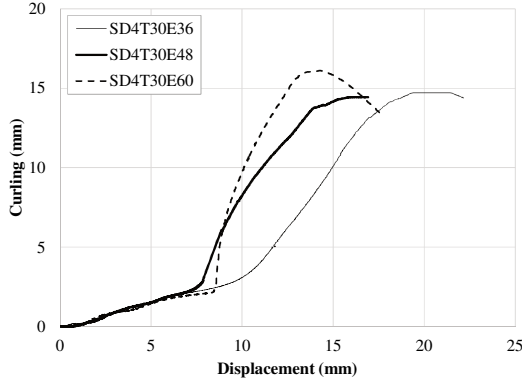


Fig. 8. Displacement-curling deformation curves

하중방향 변위와 소성 스트레인게이지(Fig. 3.(a), SG1)로부터 면외변형의 증가에 따른 변형도값을 얻었고, 강제변위 변형도 관계를 Fig. 9.에 정리하였다. 면외변형의 발생으로 변형도가 급격한 변화 양상을 보였다. 예를 들어, 실험체 SD4T30E36의 경우는 하중방향 강제변위가 증가할수록 볼트에 의한 지압작용에 의해 평판의 SG1에서 압축변형도(-값)가 증가하는 경향을 보였고 면외변형 발생이후 압축변형도가 감소하였다. 그러나, 실험체 SD4T30E48와 SD4T30E60의 경우는 초기에 압축변형도가 증가하다가 면외변형의 발생·진전됨에 따라 압축 변형도 값이 저하되어 종국에는 Fig. 9.에서 보여지는 바와 같이 인장변형도(+값)로 전이되었다. 즉, 면외변형 발생으로 접합부 평판이 스트레인 게이지가 부착된 위치에서 국부좌굴되어 압축변형도에서 인장변형도로 바뀐 것으로 판단된다.

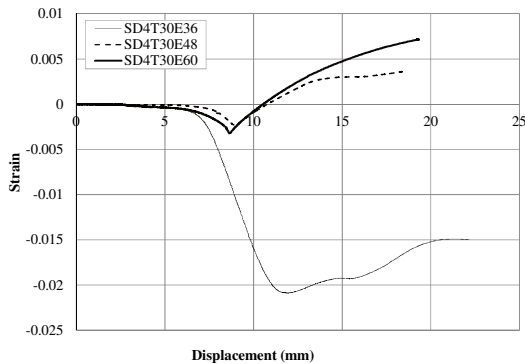


Fig. 9. Displacement-strain deformation curves

4. 기준식 및 기존제안식에 의한 내력비교

볼트접합부의 최대내력(P_{ut})에 대한 내력 평가식은 한국건축구조기준 KBC(2016)^[17], 미국강구조학회 AISC (2016)^[18], 일본건축학회 AIJ(2010)^[19], 미국철강협회 AISI(2016)^[20], EC3(2006)^[21] 등에서 순단면파단, 종전단파단, 지압파단 및 블록전단파단의 파단형태별로 규정되어 있다. Table 3의 실험결과에서 실험종료시점에서 파단형태가 블록전단파단(BS)와 순단면파단(N)형태가 나타났다. 순단면파단(Net section fracture, N)형태의 내력평가식은 $A_n \sigma_u$ (여기서, A_n 은 하중직각방향으로 구멍결손단면을 공제한 순단면적)으로 나타낼 수 있고 블록전단파단(Block shear fracture, BS)에 대해서는 각 기준 및 기존 연구자에 의해 제안된 내력평가식을 다음에 정리하였다.

4.1 설계 기준식

4.1.1 KBC(2016)^[17], AISC(2016)^[18], AISI(2016)^[20]

상기 세 기준에서는 다음과 같이 얻어진 내력 중 최솟값은 블록전단파단내력으로 산정한다. 각 식에서 인장파단과 전단파단의 위험단면선은 Fig. 10.에 나타낸다.

$$P_{ut} = U_{bs} A_{nt} \sigma_u + 0.6 A_{gv} \sigma_y \quad (1)$$

$$P_{ut} = U_{bs} A_{gt} \sigma_u + 0.6 A_{nv} \sigma_u \quad (2)$$

여기서, U_{bs} 는 인장응력이 균일한 경우 1.0으로 한다,

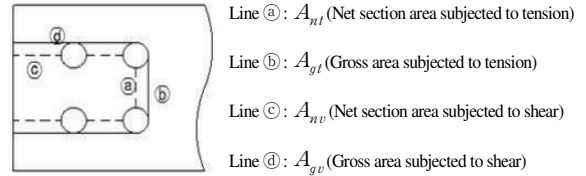


Fig. 10. Critical section for block shear fracture

4.1.2 AIJ(2010)^[19]

$$P_{ut} = A_{nt} \sigma_u + 0.5 A_{gv} \sigma_u \quad (3)$$

4.1.3 EC3(2006)^[21]

유럽기준에서는 전단파단내력에 대해 미세스 이론을 적용한 전단응력계수를 적용한다.

$$P_{ut} = A_{nt} \sigma_u + A_{nv} \sigma_y / \sqrt{3} \quad (4)$$

4.1.4 Clements and Teh^[22], Teh and Deierlein^[23]

Clements 와 Teh (2013)에 의해 면내 전단지연에 의한 순단면 파단과 실제 전단파단형태를 고려한 블록전단파단식(식 (5))을 다음과 같이 제안하였다.

$$P_{ut} = A_{nt}\sigma_u(0.9 + 0.1\frac{d}{g}) + 0.6A_{av}\sigma_y \quad (5)$$

$$A_{av} = 2(L_{gv} - (\frac{n-1}{2} + \frac{1}{4})\phi)t \quad (6)$$

여기서, A_{av} 는 식 (6)에서 정의한 전단위험단면적을 나타낸다. L_{gv} 는 Line ⑥의 길이이고 하중방향 연단거리(e)와 동일하다. n 은 하중방향 볼트 개수이고 본 연구에서는 2값이다.

Teh와 Deierlein(2017)는 추가적인 실험과 기존 볼트접합부 연구데이터를 토대로 블록전단파단에서 전단파단위험단면이 전단 저항 총단면적과 전단저항 순단면적의 평균값(식 (7))이 블록전단 내력 예측정확도가 개선된다는 연구결과를 제시했다.

$$P_{ut} = A_{nt}\sigma_u + 0.6\frac{A_{gv} + A_{nv}}{2}\sigma_u \quad (7)$$

4.1.5 Kang and Kim^[14]

오스테나이트계 스테인리스강(STS201, 평균항복강도 399.15MPa, 인장강도 894.54MPa, 탄성계수 153.82GPa, 항복비 43.38%, 연신율 41.23%)의 2행 2열 일면전단 볼트접합부에 대한

기존 실험연구에서 하중방향 연단거리가 48mm이상인 볼트접합부에서 면외변형을 동반되었고, 최대내력은 볼트간 인장파단과 면외변형에 의해 결정되었다. 연구결과 다음과 같은 내력평가식을 제안하였다.

$$P_{ut} = A_{nt}\sigma_u + Cdt\sigma_u(C=0.75) \quad (8)$$

4.2 최대내력 비교

4.1절에서 제시된 현행 설계기준식과 기존연구자에 의해 제시된 내력식을 바탕으로 순단면파단(N)내력과 블록전단파단(BS)내력을 Table 4에 정리하였다.

Fig. 10.에서 보는 바와 같이 인장파단과 전단파단(또는 전단항복)으로 정의되는 블록전단파단 위험단면은 다양한 조합으로 구성되며 상기식의 공통사항은 인장파단에 대해 순단면 인장파단내력($A_{nt}\sigma_u$, Line ①)을 포함하고 있다. 전단에 대한 위험단면은 식에 따라 총단면 전단항복($A_{gv}\sigma_y$, Line ④), 순단면 전단파단($A_{nv}\sigma_u$, Line ③), 총단면 전단파단($A_{gv}\sigma_u$, Line ⑤), 순단면 전단항복($A_{nv}\sigma_y$, Line ②) 등으로 정의하고 있다.

Table 4에 실험결과와 최대내력(P_{uc})에 대한 순단면에 대한 기준내력과 블록전단에 대한 KBC/AISC/AISI, AIJ, EC3, Clements and Teh, Teh and Deierlein, Kang and Kim 내력식에 의한 최대내력(P_{ut})에 대한 내력비(P_{ut}/P_{uc})를 일면전단 볼트접합부(SD4T30

Table 4. Design strength and comparison with test results

Specimen	Test ultimate strength P_{uc} (KN)	Curling	Net section design strength $A_{nt}\sigma_u$ P_{ut} (kN)	Block shear design strength, P_{ut} (kN)							Strength ratio (P_{ut}/P_{uc})					
				KBC AISC AISI	AIJ	EC3	Clements and Teh	Teh and Deierlein	Kang and Kim	Net section fracture (N)	Block shear fracture (BS)					
											KBC, AISC, AISI Eq.(1)	AIJ	EC3	Clements and Teh	Teh and Deierlein	Kang and Kim
SD4T30E24	181.06	-	284.42	160.31	181.59	121.76	139.09	182.25	-	1.57	0.89	1.00	0.67	0.77	1.01	-
SD4T30E30	189.88	-	280.60	169.01	192.10	130.57	148.07	195.34	-	1.48	0.89	1.01	0.69	0.78	1.03	-
SD4T30E36	189.14	○	281.55	180.48	205.75	141.49	159.46	211.60	127.78	1.49	0.95	1.09	0.75	0.84	1.12	0.68
SD4T30E48	187.18	○	281.55	202.26	231.74	162.45	181.24	242.79	127.78	1.50	1.08	1.24	0.87	0.97	1.30	0.68
SD4T30E60	193.45	○	281.55	224.03	257.73	183.40	203.02	273.97	127.78	1.46	1.16	1.33	0.95	1.05	1.42	0.66
Average										1.50	0.99	1.13	0.78	0.88	1.17	0.67
DSD4T30E36	188.36	-	281.55	180.48	205.75	141.49	159.46	211.60	-	1.49	0.96	1.09	0.75	0.85	1.12	-
DSD4T30E48	224.42	-	281.55	202.26	231.74	162.45	181.24	242.79	-	1.25	0.90	1.03	0.72	0.81	1.08	-
DSD4T30E60	228.73	-	281.55	224.03	257.73	183.40	203.02	273.97	-	1.23	0.98	1.13	0.80	0.89	1.20	-
Average										1.33	0.95	1.08	0.76	0.85	1.13	

시리즈)와 이면전단 볼트접합부(DSD4T30시리즈)로 구분하여 나타냈다. Table 3으로부터 실험종료시점에서 순단면파단(N)된 접합부 SD4T30E60, DSD4T30E36과 DSD4T30E48의 최대내력비(P_{ut}/P_{ue})는 각각 1.46, 1.49, 1.25로 순단면 파단 기준식에 의한 내력은 실험내력을 과대평가하는 것으로 나타났고, 면외변형이 발생하지 않은 이면전단 볼트접합부(DSD4T30E36과 DSD4T30E48)의 실험내력은 블록전단파단 기준식에 의한 예측내력에 근접한다는 것을 알 수 있다.

KBC/AISC/AISI와 AIJ 기준식은 면외변형이 발생하지 않은 접합부에서는 약간 과소평가하거나 양호한 내력에측값을 제공하고 있으나 면외변형이 발생한 접합부에 대해서는 과대평가하는 경향을 보였다. EC3와 Clements and Teh의 내력식은 면외변형이 발생하지 않은 실험체에 대해 최대내력비가 0.67~0.89의 범위로 과소평가하였다. 가장 최근에 제안된 Teh and Deierlein의 식 (7)에 의해서는 면외변형이 발생하지 않은 일면전단 볼트접합부(SD4T30E24와 SD4T30E36)의 내력비(P_{ut}/P_{ue})는 1.01, 1.03으로 양호한 대응을 보였으나 이면전단 볼트접합부에 대해서는 내력비(P_{ut}/P_{ue})가 1.08~1.20의 범위로 다소 과대평가하는 경향이 나타났다. 면외변형이 발생한 일면전단 볼트접합부에 대해서는 내력비가 1.12~1.42로 크게 과대평가하였다.

일면전단 볼트접합부의 면외변형의 영향을 고려해서 제안한 Kang and Kim에 의한 식 (8)에 의한 예측내력과 실험내력의 평균 내력비(P_{ut}/P_{ue})는 0.67로 과도하게 저평가되는 것을 알 수 있다.

4.3 내력식 고찰

듀플렉스계 스테인리스강 일면전단 볼트접합부 중에 면외변형이 발생하지 않은 SD4T30E24와 SD4T30E30은 AIJ 식 (3)과 Teh and Deierlein의 제안식 (7)에 의해 블록전단파단내력을 적용하는 것이 적절할 것으로 판단되나 면외변형이 발생하지 않은 이면전단 볼트접합부에 대해서는 블록전단파단내력을 다소 과대평가하는 경향을 보여주고 있다. 추후, 유한요소해석 방법에 의한 변수해석을 통해 면외변형이 발생하지 않은 듀플렉스계 스테인리스강 볼트접합부에 대한 블록전단 내력평가식을 고찰할 필요가 있다.

면외변형이 발생한 일면전단 볼트접합부(SD4T30E36, SD4T30E48과 SD4T30E60)에 대해서도 오스테나이트계 스테인리스강(STS201)의 면외변형을 동반한 일면전단 볼트접합부의 연구결과 제시된 Kang and Kim에 의한 식 (8)에 의해 과소평가되고 있는데 이는 본 연구에서 사용된 듀플렉스계 스테인리스강의 재료적 성질과 면외변형에 따른 구조거동이 상이했기 때문으로 이러한 차이를 고려하여 내력평가식을 재검토할 필요가 있다.

5. 결론

본 연구는 고가인 니켈의 함유량을 1.5% 이하로 줄이고 내식성과 강도를 향상시킨 듀플렉스계 스테인리스강(STS329FLD)으로 제작된 2행 2열 일면전단 및 이면전단 볼트접합부(공칭평판두께 3.0mm, 볼트직경 12mm, 피치와 게이지 36mm, 하중직각방향 연단거리 60mm고정, 하중방향 연단거리 24mm~ 60mm)의 단순인장 실험을 수행하였고 현행기준식과 기존연구자에 의해 제시된 내력평가식의 의한 내력과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 일면전단 볼트접합부에서는 하중방향 연단거리가 24mm에서 30mm인 실험체에서는 볼트간 인장파단과 하중방향 전단파단의 조합인 블록전단파단이 발생하였고, 하중방향 연단거리가 36mm~60mm인 실험체에서는 면외변형(하중직각방향 국부좌굴)이 발생하여 최대내력이 저하되었고 면외변형 발생 또는 볼트간 인장파단에 의해 최대내력이 결정되었다. 또한 면외변형 발생으로 하중방향 연단거리가 증가함에도 불구하고 최대내력에는 큰 차이가 없었다.

(2) 하중방향 연단거리가 36mm, 48mm, 60mm로 구성된 이면전단 볼트접합부에서는 면외변형을 양면의 고정체에 의해 구속이 되었기 때문에 실험종료시점에서 면내 블록전단파단과 순단면파단이 발생하였고 하중방향 연단거리가 증가함에 따라 최대내력도 상승하였다.

(3) 면외변형이 발생한 일면전단 볼트접합부(하중방향 연단거리가 48mm와 60mm)와 이면전단 볼트접합부의 내력을 비교한 결과 면외변형에 의해 평균 16%의 내력저하가 발생하는 것으로 나타났다.

(4) KBC/AISC/AISI, AIJ, EC3, Clements and Teh, Teh and Deierlein과 Kang and Kim의 내력식에 의한 예측내력과 실험내력을 비교한 결과, 면외변형의 영향이 없는 접합부에 대해서 KBC/AISC/AISI 기준식에 의한 내력비가 0.89~0.98범위로 안전측으로 평가하는 것으로 나타났고 면외변형으로 내력저하가 관찰된 접합부에 대해서는 과대평가하였다. AIJ와 Teh and Deierlein의 식에 의해서는 내력비가 1.00~1.20의 범위로 다소 과대평가하는 경향을 나타냈고 면외변형이 동반한 접합부에 대해서는 24%~42% 과대평가하였다. EC3와 Clements and Teh식에 의해서는 면외변형의 영향이 없는 접합부에 대해서 11%~33% 범위로 과소평가하였다. 면외변형의 영향을 고려해서 제시한 Kang and Kim의 식은 본 연구에서 사용한 듀플렉스계 스테인리스강의 재료적 성질과 접합부의 파단메커니즘 차이로 평균 33% 과소평가하였다.

감사의 글

이 연구는 2018년도 경남과학기술대학교 대학회계연구비 지원에 의한 결과의 일부임.

참고문헌(References)

- [1] American Society of Civil Engineers (2002) *Specification for the Design of Cold-Formed Stainless Steel Structural Members* (SEI/ASCE-8-02), USA.
- [2] European Committee for Standardization (2006) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.4: General Rules - Supplementary Rules for Stainless Steel* (EN 1993-1-4: 2006), Belgium.
- [3] 薄板構造設計基準作成委員会編(2005) 軽量ステンレス構造デザインマニュアル, ステンレス構造建築協会, 日本.
Stainless Steel Building Association of Japan (2005) *Design Manual of Light-Weight Stainless Steel Structures*, SSBA, Japan (in Japanese).
- [4] Standards Australia/Standards New Zealand (2001) *Cold-Formed Stainless Steel Structures* (AS/NZS 4673: 2001), Australia/New Zealand.
- [5] 이명재(1990) Stainless Steel H형 단면보의 횡좌굴내력에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 대한건축학회, 제6권, 제6호, pp.271-276.
Lee, M.J. (1990) Lateral Buckling Strength of Stainless Steel H-Section Beams, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, AIK, Vol.6, No.6, pp.271-276 (in Korean).
- [6] 장호주, 양영성(2003) 스테인리스 강관 기둥의 내력에 관한 연구, 대한건축학회논문집 - 구조계, 대한건축학회, 제19권, 제6호, pp.93-102.
Jang, H.-J., and Yang, Y.-S. (2003) A Study on the Strength of Stainless Steel Pipe Columns, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.19, No.6, pp.93-102 (in Korean).
- [7] 장호주, 유재희, 양영성(2003) 스테인리스강관과 일반구조용 강관 단주내력 비교에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제15권, 제5호, pp.561-570.
Jang, H.J., Yu, J.H., and Yang, Y.S. (2003) A Comparison Study on Strength of Stainless Steel Tube and Steel Tube Stub-Columns, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.15, No.5, pp.561-570 (in Korean).
- [8] 장호주, 양영성(2004) 중심압축하중을 받는 스테인리스 강관 기둥의 좌굴내력에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제17권, 제2호, pp.207-216.
Jang, H.J., and Yang, Y.S. (2004) A Study on the Buckling Strength of Centrally Compressed Stainless Steel Tubular Columns, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.17, No.2, pp.207-216 (in Korean).
- [9] 김태수, 김민성, 정하영, 김승훈, 이용택(2010) 탄소강 일면전단과 이면전단 볼트접합부의 종국거동의 비교연구, 대한건축학회논문집 - 구조계, 대한건축학회, 제26권, 제4호, pp.31-38.
Kim, T.-S., Kim, M.-S., Jeong, H.-Y., Kim, S.-H., and Lee, Y.-T. (2010) Comparative Study on Ultimate Behavior of Single Shear and Double Shear Bolted Connections with Thin-Walled Carbon Steel, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.26, No.4, pp.31-38 (in Korean).
- [10] 김지훈, 김태수, 강현식(2013) 페라이트계 스테인리스강 2행 2열 일면전단 볼트접합부의 최대내력평가, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제6호, pp.659-669.
Kim, J.H., Kim, T.S., and Kang, H.S. (2013) Ultimate Strength Estimation of Ferritic Stainless Steel Single Shear Bolted Connections Fastened with Four Bolts, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.6, pp.659-669.
- [11] 김태수, 최윤철(2014) STS201 스테인리스강 이면전단 볼트 접합부의 내력평가, 건설환경연구소 논문집, 청운대학교 건설환경연구소, 제9권, 제2호, pp.137-148.
Kim, T.-S., and Choi, Y.-C. (2014) Strength Estimation of Double Shear Bolted Connections Fabricated with STS201 Austenitic Stainless Steel, *Journal of the Construction and Environment Research Institute*, Construction and Environment Research Institute of Chungwoon University, Vol.9, No.2, pp.137-148 (in Korean).
- [12] 김태수(2016) 페라이트계 스테인리스강 용접접합부의 모재 블록전단파단에 관한 실험적 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제28권, 제5호, pp.303-312.
Kim, T.S. (2016) An Experimental Study on Block Shear Fracture of Base Metal in Ferritic Stainless Steel Welded Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.5, pp.303-312.
- [13] 황보경, 이후창, 김태수(2017) 오스테나이트계 스테인리스강 (STS304) 필릿 용접접합부의 모재 블록전단강도에 관한 실험적 연구, 대한건축학회논문집 - 구조계, 대한건축학회, 제33권, 제1호, pp.41-48.
Hwang, B.-K., Lee, H.-C., and Kim, T.S. (2017) An Experimental Study on Block Shear Strength of Austenitic Stainless Steel (STS304) Fillet-Welded Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.1, pp.41-48 (in Korean).

- nal of the Architectural Institute of Korea - Structure & Consturction*, AIK, Vol.33, No.1, pp.41-48 (in Korean).
- [14] 강현식, 김태수(2017) 고강도 오스테나이트계 스테인리스강 (STS201) 일면전단 볼트접합부의 최대내력평가, 대한건축학회 논문집 - 구조계, 대한건축학회, 제33권, 제4호, pp.13-20.
Kang, H.-S., and Kim, T.-S. (2017) Ultimate Strength Estimation of Single Shear Bolted Connections with High Strength Austenitic Stainless Steel (STS201), *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.33, No.4, pp.13-20 (in Korean).
- [15] Kim, T., Kim, M., and Cho, T. (2018) Parametric Study on Ultimate Strength of Four-Bolted Connections with Cold-Formed Carbon Steel, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.18, No.1, pp.265-280.
- [16] Kim, T., and Lim, J. (2013) Ultimate Strength of Single Shear Two-Bolted Connections with Austenitic Stainless Steel, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.13, No.1, pp.117-128.
- [17] 대한건축학회(2016) 건축구조기준(KBC2016), 대한건축학회. Architectural Institute of Korea (2016) *Korea Building Code (KBC2016)*, AIK, Korea (in Korean).
- [18] American Institute of Steel Construction (2016) *Specification for Structural Steel Building* (ANSI/AISC 360-16), USA.
- [19] 日本建築学会(2010) 鋼構造限界状態設計指針・同解説, 日本建築学会, 日本.
Architectural Institute of Japan (2010) *Recommendation for Limit State Design of Steel Structures*, AIJ, Japan (in Japanese).
- [20] American Iron and Steel Institute (2016) *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members* (AISI S100-16), USA.
- [21] European Committee for Standardization (2006) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.8: Design of Joints* (EN 1993-1-8: 2006), Belgium.
- [22] Clements, D.D.A., and Teh, L.H. (2013) Active Shear Planes of Bolted Connections Failing in Block Shear, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.139, No.3, pp.320-327.
- [23] Teh, L.H., and Deierlein, G.G. (2017) Effective Shear Plane Model for Tear out and Block Shear Failure of Bolted Connections, *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction, Vol.54, No.3, pp.181-194.

요 약: 최근에 오스테나이트계 스테인리스강에 비해 높은 재료강도, 우수한 내식성(특히, 내응력부식균열)과 가격경쟁력을 지닌 듀플렉스계 스테인리스강이 개발되었다. 그러나, 스테인리스강은 한국건축구조기준에 구조용 재료로 지정되어 있지 않아서 이에 대한 구조설계기준도 마련되어 있지 않은 실정이다. 이 연구에서는 국내 구조설계기준 작성에 필요한 기초자료를 제공하고자 듀플렉스계 스테인리스강 2행 2열 볼트접합부의 구조거동을 조사하기 위해 실험연구를 수행하였다. 주요변수는 전단접합 방법(일면전단과 이면전단)과 하중방향 연단거리로 한다. 실험종료시점에서 파단형태는 블록전단파단, 순단면파단과 면외변형으로 분류되었다. 일면전단 볼트접합부에서 면외변형 발생으로 최대 17%까지 내력저하가 발생되었다. 실험내력과 현행설계기준과 기존연구자에 의해 제안된 내력식에 의한 예측내력과 비교되었다. 면외변형의 영향이 없는 접합부에 대해서 AISC/AISI/KBC, EC3와 Clement & Teh 내력식은 접합부의 내력을 과소평가했지만 AIJ와 Teh & Deierlein 내력식은 과대평가했다. 면외변형에 의해 내력저하를 갖는 접합부에 대해서 Kim & Lim 내력식은 또한 과도하게 과대평가하는 경향을 보였다.

핵심용어: 듀플렉스계 스테인리스강, 볼트접합부, 면외변형, 강도감소, 일면전단, 이면전단, 설계기준