

2행 1열 듀플렉스계 스테인리스강(STS329FLD) 볼트접합부의 최대내력 조사

안성호¹, 김근영², 황보경³, 김태수^{4,*}

An Investigation on the Ultimate Strength of Duplex Stainless Steel (STS329FLD) Bolted Connections with Two Bolts

Sung-Ho An¹, Geun-Young Kim², Bo-Kyung Hwang³, Tae-So Kim^{4,*}

Abstract : Recently, the use of duplex stainless steel which with a two-phase microstructure (equal mixture of ferrite and austenite) has been increased in a variety of industrial fields due to higher strength leading to weight saving, greater corrosion resistance (particularly, stress corrosion cracking) and lower price. However, currently, stainless steels are not included in the structural materials of Korean Building Code and corresponding design standards are not specified. In this paper, experimental studies have been performed to investigate the structural behaviors of duplex stainless steel (STS329FLD) bolted connection with two bolts for providing the design data. Main variables are shear connection type (single shear and double shear) and end distance parallel to the direction of applied force. Fracture modes at the final step of test 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 20%. Test strengths were compared with those by current design specifications such as AISC/AISI/KBC, EC3 and AIJ and proposed equations by existing studies. For specimens with no curling, Clement & Teh's equation considering the active shear plane provided a higher strength estimation accuracy and for specimens with curling, Kim & Lim's equation considering strength reduction by curling 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. 서 론

스테인리스강은 탄소강에 비해 우수한 내구성, 내식성 및 내화성 등의 재료적 특성과 유지보수의 용이성 및 심미성 등을 고려하여 별도의 마감이 필요없거나 외기에 노출되는 건축물과 토목시설물의 2차구조재뿐만 아니라 주요 구조부재로써 국내외에서 꾸준히 적용되고 있다. 미국토목학회(ASCE, 2002a)에서 냉간성형 스테인리스강을 대상으로 구조 설계 기준을 출판하였다. 2013년에는 미국강구조학회의 열간압연 탄소강 구조설계기준(AISC, 2010a)을 토대로 열간압연 스테인리스강의 재료적 특성과 구조적 거동을 고려하여 "AISC Steel Design Guide-Structural Stainless Steel"을 발행하였다(AISC, 2013a). 그 외에도 유럽 (냉간성형강과 열간압연강

포함, EN, 2006a), 일본 (냉간압연강, SSBA, 2006b), 호주/뉴질랜드 (냉간압연강, AS/NZS, 2001) 등에서 스테인리스강의 설계 기준이 제정되었지만, 국내에서는 스테인리스강이 한국건축구조기준(KBC, 2016)에 주요 구조용 강재로 지정되어 있지 않은 실정이다.

국내에서는 냉간성형 오스테나이트계 스테인리스강 (STS304 : Kim et al., 2007; 2010b; 2013b, STS201 : Cha et al., 2017a)과 페라이트계 스테인리스강 (STS430) (Kim et al., 2010c; Lim et al., 2013c; Kim et al., 2013d))으로 제작된 볼트 접합부의 구조적 거동이 실험과 해석적 연구에 의해 박판의 기하학적 특성과 스테인리스강의 재료적 특성에 의해 발생하는 면외변형(Curling, 하중직각방향과 판두께방향의 변형)의 영향이 조사되었다. 그 결과, 연단거리(하중방향과 하중 직각방향)가 비교적 긴 볼트접합부에서 면외변형의 발생에 따른 접합부의 내력저하가 관찰되었다. 또한, 연단거리에 따른 면외변형 발생조건, 면외변형을 고려한 수정된 내력평가식이 제안되었다. 고가인 니켈(Ni)을 8% 이상 함유된 오스테나이트계 스테인리스강(STS304)을 대체하기 위해 니켈의 함유량을 0.5~1.5%로 줄이고 크롬(Cr)함유량을 약간 늘린 (STS304에 비해 1% 상승) 듀플렉스계(오스테나이트계-페라

¹정회원, 한밭대학교 건축공학과 석사과정

²학생회원, 한밭대학교 건축공학과 학사과정

³정회원, 한밭대학교 건축공학과 박사과정

⁴정회원, 한밭대학교 건축공학과 교수

*Corresponding author : tskim@hanbat.ac.kr

Dongseodaero 125, Department of Architectural Engineering, HanBat National University, DaeJeon, 34158, Korea)

•본 논문에 대한 토의를 2018년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

이트계) 스테인리스강(STS329FLD)이 개발되었다(KS, 2015). 상온에서 오스테나이트상과 페라이트상의 혼합조직으로 강도가 우수하고 결정립이 미세화되며 응력부식 균열, 틈새부식 및 공식에 대해 저항성이 우수하다. 내식성 측면에서도 STS304와 유사수준이며 니켈 함유량을 줄여서 가격 경쟁력을 확보할 수 있다.

본 연구에서는 국내에서 생산되는 스테인리스강의 구조설계기준을 위한 기초자료를 제공하고자 냉간성형 듀플렉스계 스테인리스강(STS329FLD)의 공칭평판두께 3.0mm로 제작된 2행1열 볼트접합부의 하중방향 연단거리를 변수로 하여 실험체를 제작하여 단순인장실험을 실시한다. 하중방향 연단거리에 따른 파단형태, 최대내력, 면외변형 발생과 그 영향을 조사하고, 면외변형에 따른 내력저하강도를 평가한다. 또한, 접합부의 실험내력과 현행 설계기준식에 의한 내력을 비교하여 국내외 설계식의 적용성을 조사하는 것을 연구목적으로 한다.

2. 실험계획 및 결과

2.1 실험체 계획

오스테나이트계와 페라이트계의 조직이 동시에 포함되고 고가인 니켈함유량을 줄여 가격경쟁력 측면에서 우수한 듀플렉스계 스테인레스강(STS329FLD)을 사용한 볼트접합부의 파단형태, 블록전단내력 및 면외변형의 영향을 조사하기 위해 Fig.1과 같은 형태의 2행 1열 볼트배열의 접합부를 계획하고 제작하였다. 공칭두께 3.0mm인 평판을 사용하였고 Fig.2와 같이 전단접합방법에 따라 일면전단과 이면전단 볼트접합부를 제작하였다.

실험체는 볼트의 전단파단이 아닌 평판의 블록전단파단을 유도하기 위하여 하중직각방향의 연단거리($b=60\text{mm}$)를 충분히 길게 제작하였다. 피치($p=36\text{mm}$), 게이지($g=36\text{mm}$), 볼트구멍직경($\phi=13\text{mm}$)과 볼트직경($d=12\text{mm}$)은 모든 접합부에 동일하게 하였다. 주요변수는 전단접합방법(일면전단과 이면전단)과 하중방향 연단거리(e)로 하였다. 일면전단접합부에 대해서는 하중방향 연단거리를 $2.0d$, $2.5d$, $3.0d$, $4.0d$, $5.0d$ 로 총 5개($e=24\text{mm}\sim 60\text{mm}$)로 이면전단접합부에 대해서는 기존의 연구결과를 토대로 하중방향 연단거리가 36mm, 48mm와 60mm인 실험체 3개만 제작하였다. 실험체 일람을 Table 1에 정리한다.

볼트접합부 실험체의 구성은 일면전단 볼트접합부에 대해서는 Fig.2(a)와 같이 고정체인 고정측(Rigid part)과 Coupling part)과 실험측(Test part)으로 분리하여 제작하였다. 이면전단 볼트접합부에 대해서도 1개의 고정체(Rigid

part), 2개의 중간연결재(Coupling part)와 1개의 실험측(Test part)으로 구분하였다. Table 1의 실험체명 ‘SD2T30E24’에서 ‘SD’는 듀플렉스계 스테인리스강(STS329FLD), ‘2’는 볼트개수, ‘T30’는 공칭평판두께($t_n=3.0\text{mm}$), ‘E24’는 하중방향 연단거리(e) 24mm를 나타낸다. 이면전단 볼트접합부의 경우에는 ‘SD’대신에 ‘DSD’를 사용하였다.

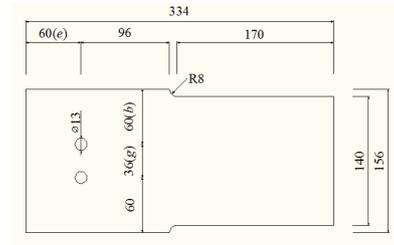
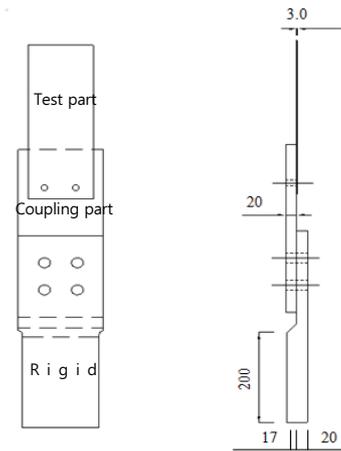


Fig. 1. Geometry of specimen (unit : mm)



(a) Single shear

(b) Double shear

Fig. 2. Configuration of specimen

Table 1. Specimen list

Specimens	Nominal plate thickness t_n [mm]	End distance e [mm]	Commons
SD2T30E24	3.0	24	Bolt diameter(d) =12mm Hole diameter (ϕ)=13mm Pitch(p), Gage(g) =36mm Edge distance (b) =60mm
SD2T30E30		30	
SD2T30E36		36	
SD2T30E48		48	
SD2T30E60		60	
DSD2T30E36		36	
DSD2T30E48		48	
DSD2T30E60		60	

2.2 실험방법

실험체는 Fig.3과 같이 실험측(Test part)을 중간연결재(Coupling part)와 고정체(Rigid part)에 볼트체결을 실시한 후, 만능시험기의 상하 물림부에 고정시켜 단순 인장실험을 수행하였다. 일면전단 볼트접합부에 대해서는 하중방향 변위(Displacement)와 면외변형(평판두께 방향변위, Curling)을 측정하기 위하여 3개의 변위계(LVDT)를 Fig.3(a)과 같이, 이면전단 볼트접합부의 경우는 2개의 변위계를 Fig.3(c)와 같이 설치한다. 본 실험에서는 변위제어방법을 채택하여 분당 0.5mm의 일정한 속도로 하중방향 변위(stroke)를 증가시키면서 실험을 수행하였다. 일면전단 볼트접합부에서 발생하는 면외변형과 변형도 변화를 측정하기 위해서 Figs.3(a)와 3(b)와 같이, 실험측의 하중방향 연단에 근접한 볼트중심으로부터 하중방향으로 30mm떨어진 지점에 변위계(L1)와 스트레인게이지(SG1)를 설치하여, 초기의 면외변형값과 하중방향 변형도값을 측정하였다.

3. 실험결과

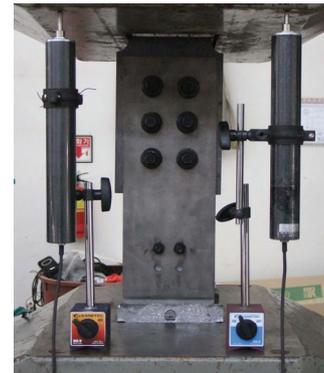
3.1 재료시험

볼트접합부에 사용된 강종인 듀플렉스계 스테인리스강(STS329FLD)의 기계적 성질을 파악하기 위해 KS B 0802(금속재료 인장시험 방법)에 따라 인장시험을 수행한 결과 Fig. 4와 같은 응력도-변형도 곡선을 얻을 수 있었고, 그 결과를 Table 2에 정리하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 스테인리스강은 항복점이 명확하지 않고 탄성구간을 지나 소성구간에서는 재료의 비선형을 나타내는 것을 알 수 있다. KS B 0802에 의하면 재료의 항복점이 명확한 경우에는 저항복점을 항복강도로 산정하고 그렇지 않은 경우는 변형도의 0.2%오프셋 방법으로 채용하고 있

다. 그러나 0.2% 오프셋 항복강도점의 접선구배가 초기 강성의 구배에 비해 저하되므로, 일본의 JIS Z 2241에 따라, 본 연구의 스테인리스강의 항복강도는 0.1% 오프셋 방법으로 산정하였다. 재료시험 결과값이 KS B 3698의 냉간압연 스테인리스 강판 및 강대에서 규정하는 STS329FLD의 최저항복강도, 최저인장강도와 연신율인 450MPa, 620MPa와 30%를 초과하는 것으로 나타났다.



(a) Transducers(LVDTs) (b) Strain gauge for SD2T30 series



(c) Transducers for DSD2T30 series

Fig. 3. Test set-up for specimens

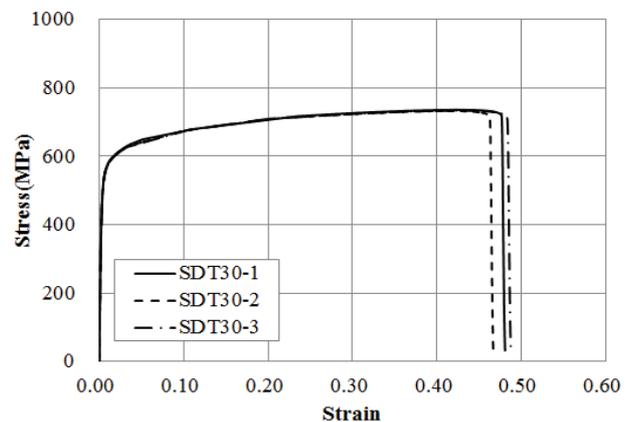


Fig. 4 Stress-strain curves for STS329FLD material

Table 2. Material properties of STS329FLD

Coupons	Actual 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		196.35	512.65	734.17	69.83	47.87
COV		0.019	0.007	0.002	0.006	0.015

3.2 파단형태 및 최대내력

단순인장 실험결과로부터 얻어진 각 실험체의 종국파단형상, 면외변형 형상, 실측두께(t_e), 실험최대내력(P_{ue}), 실험종료시점에서의 파단형태와 최대내력시점에서의 파단형태를 Fig. 5와 Table 3에 정리하였다. 일면전단 볼트 접합부 SD2T30E24, SD2T30E30, SD2T30E36의 경우에는 면외변형(curling)의 발생없이 전형적인 블록전단파단(BS, 하중방향 순단면파단과 하중직각방향의 전단파단의 조합)이 발생하였고, 하중방향 연단거리가 증가함에 따라 최대내력도 증가하는 경향을 보였다. 하중방향 연단거리가 긴 SD2T30E48와 SD2T30E60 실험체는 면외변형이 발생과 진전으로 접합부 강성과 내력이 저하되었고, 볼트간 인장파단과 함께 최대내력을 결정하였다. 하중방향연단거리가 가장 큰 SD2T30E60의 최대내력(132.30kN)은 초기에 과도한 면외변형의 발생으로 SD2T30E48의 최대내력(138.65kN)보다 낮게 나타났다.

이면전단 볼트접합부에 대해서도 하중방향 연단거리가 증가함에 따라 최대내력이 증가하였다. DSD2T30E36 실험체는 실험종료시점에서 전형적인 블록전단파단이 발생하였고, DSD2T30E48과 DSD2T30E60 실험체는 볼트간 인장파단에 의해 최대내력이 결정된 후 하중직각방향으로 응력집중으로 연단부분에 돌출현상이 관찰되었지만 하중직각방향의 연단쪽으로 추가적인 인장파단이 발생되었다.

하중방향 연단거리가 48mm, 60mm인 실험체는 볼트간 인장파단후 최대내력이 결정되고 추가적으로 하중직각방향 연단으로 인장파단이 발생하여 실험종료시험에서의 파단형태는 인장파단(N)으로 정리하였다.

Table 4는 실측두께별 최대내력을 보정하기 위한 수정 최대내력(P_{ueM})을 기준으로 하중방향 연단거리와 전단접합방법에 따른 최대내력비를 정리하였다. 면외변형이 관찰되지 않은 일면전단 및 이면전단 볼트접합부에서는 하중방향 연단거리가 증가함에 따라 내력이 증가하는 것으로 나타났다. 전단접합방법과 면외변형의 영향으로 하중

방향 연단거리가 48mm와 60mm인 접합부에 대해서 1면 전단 볼트접합부의 내력이 각각 7%, 20% 낮게 나타났다.

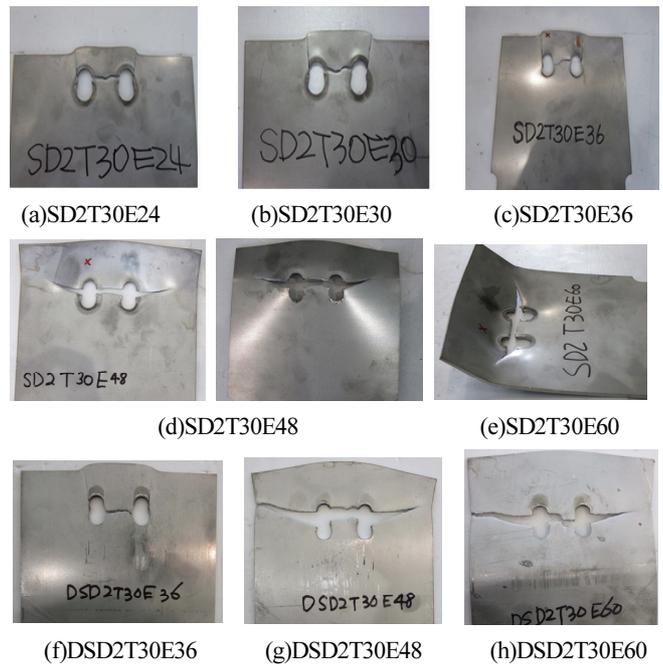


Fig. 5. Fracture shapes

Table 3. Test results

Specimens	Actual plate thickness t_e [mm]	Ultimate strength P_{ue} [kN]	Curling	Fracture mode at test end	Fracture mode at ultimate state
SD2T30E24	3.02	108.35	-	BS	Tensile fracture between two bolts
SD2T30E30	2.99	120.58	-	BS	
SD2T30E36	2.98	128.69	-	BS	
SD2T30E48	3.00	138.65	O	N	Curling + Tensile fracture between two bolts
SD2T30E60	3.00	132.30	O	N	
DSD2T30E36	2.95	134.06	-	BS	Tensile fracture between two bolts
DSD2T30E48	2.94	146.76	-	N	
DSD2T30E60	2.95	162.09	-	N	

Table 4. Strength comparison according to variables

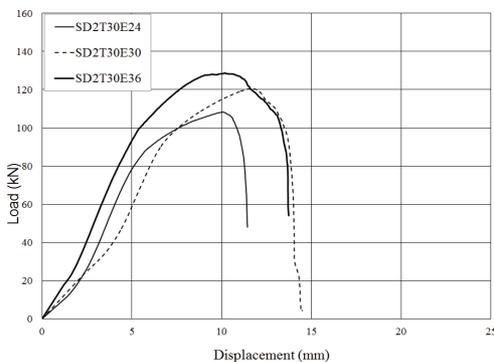
Specimens	Actual plate thickness t_e [mm]	Ultimate strength P_{ue} [kN]	Modified ultimate strength P_{ueM} [kN]	Strength ratio	
				P_{ueM}/P_{ueM_eMin}	$P_{ueM-SD}/P_{ueM-DSD}$
SD2T30E24	3.02	108.35	107.63	1.00	-
SD2T30E30	2.99	120.58	120.98	1.12	-
SD2T30E36	2.98	128.69	129.55	1.20	0.95
SD2T30E48	3.00	138.65	138.65	1.29	0.93
SD2T30E60	3.00	132.30	132.30	1.23	0.80
DSD2T30E36	2.95	134.06	136.33	1.00	-
DSD2T30E48	2.94	146.76	149.76	1.10	-
DSD2T30E60	2.95	162.09	164.84	1.21	-

3.3 단계별 파단양상 및 면외변형의 영향

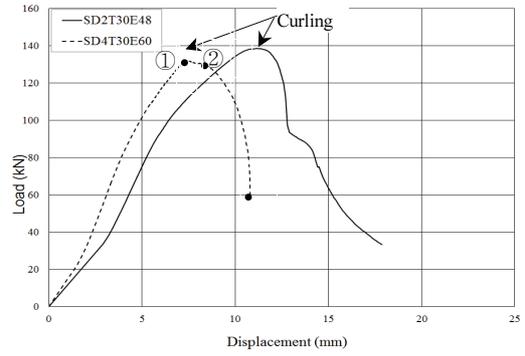
기존의 스테인리스강 및 탄소강에 관한 연구에서 언급된 바와 같이 하중방향 또는 하중직각방향 연단거리가 긴 일면전단 볼트접합부에서 하중직각방향으로 면외변형이 발생하여 내력저하를 일으킨다고 보고되어졌다. 이러한 면외변형은 볼트 후방의 압축응력 영역에 있는 평판이 좌굴되어 발생하는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 기존의 스테인리스강이 아닌 듀플렉스 스테인리스강 일면전단 볼트접합부에 대한 실험체를 제작하여 단순인장 실험을 실시하였고, 3.2절에서 언급한 바와 같이 하중방향 연단거리가 긴 접합부에서 면외변형이 관찰되었다. 실험결과로 Fig.6과 같은 하중-변위 곡선을 얻었다. 면외변형 발생으로 인해 하중방향 연단거리가 증가함에도 불구하고 접합부에 있어서 내력상승이 관찰되지 않았고, 그림 6에서 표시한 바와 같이 면외변형이 발생하지 않은 실험체와 비교해 볼 때, 면외변형 발생 이후 급격한 강성저하 및 내력저하가 발생하는 것을 알 수 있다.

3.4 면외변형 및 변형도

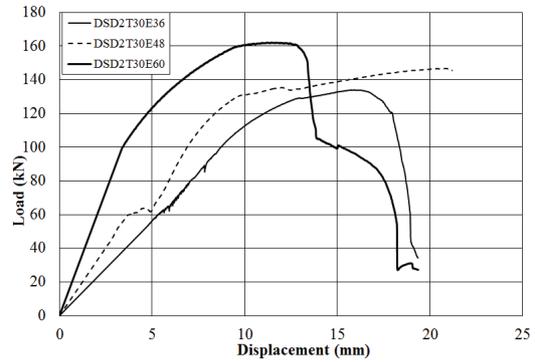
Figs.8과 9는 SD2T30E48과 SD2T30E60을 대상으로 강제변위(Displacement)에 대한 Fig. 3(b)에 설치된 변위계 L1과 스트레인게이지 SG1에서 측정된 면외변형과 변형도 관계를 나타낸다. 변위 초기에는 면외변형이 거의 발생되지 않았고, 면외변형이 발생되고 진전됨에 따라 면외변형량은 급격히 상승하면서 접합부의 강성과 내력저하에 영향을 미친 것으로 나타났다. SG1에 부착된 소성스트레인 게이지에서 측정된 변형도값은 강제변위가 증가하고 볼트몸체에 의한 지압력 작용으로 Fig. 9에서 알 수 있듯이 초기에는 압축변형도(-값)가 증가하다가 강제변위가 2.0mm 전후에서 면외변형 발생으로 좌굴되면서 압축변형도가 감소되는 현상이 관찰되었다. Figs. 5(d)와 5(e)와 같이 면외변형이 과도하게 진행되어 인장변형도 영역으로 전환되어 증가하는 경향이 나타났다.



(a) Specimens with no curling (SD2T series)



(b) Specimens with curling (SD2T series)



(c) Specimens (DSD2T series)

Fig. 6. Load-displacement curves obtained from test



(a) Curling occurrence and ultimate state in Step ①



(b) Tensile fracture between two bolts in Step ②



(c) Additional tensile fracture toward plate edge in Step ③

Fig. 7 Curling occurrence and fracture shape at the specified step of Fig. 6(b)

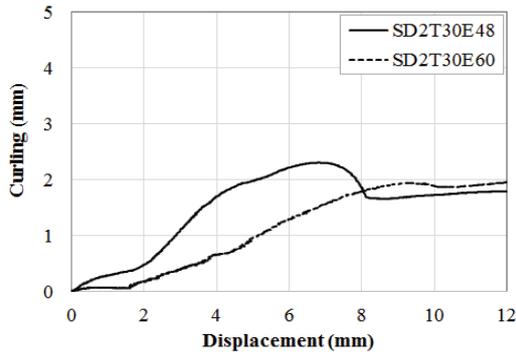


Fig. 8. Curling-displacement relationship at SG1 of Fig.3(b)

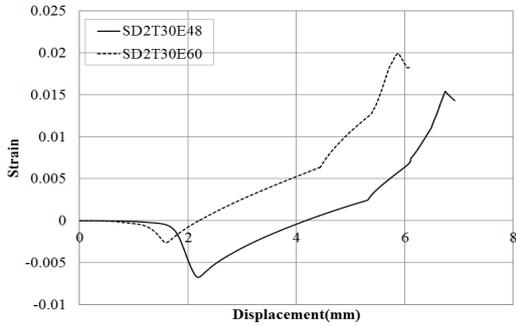


Fig. 9. Strain-displacement relationship at L1 of Fig.3(b)

4. 현행기준식 및 내력비교

볼트접합부에 대해 평판의 파단형태에 따라 한국건축구조기준 KBC(2016), 미국강구조학회 AISC(2010a), 미국철강협회 AISI(2012), 일본건축학회 AIJ(2002b), 유럽기준 EC3(2006a)에서 설계내력식이 규정되어 있다. 이 연구에서는 블록전단파단(Block shear fracture, BS)에 초점을 두어 현행기준식과 기존 연구결과에서 제시된 식을 다음에 정리하고 실험결과 최대내력과 기준식에 의한 예측내력과 비교한다. Fig. 9에 블록전단파단의 인장과 전단부분의 위험단면선을 나타낸다.

4.1 설계 기준식

4.1.1 KBC(2016), AISC(2010a) ; 열간 압연 탄소강, AISI(2012) ; 냉간성형 탄소강

하중직각방향 볼트간 인장파단($A_{nt}\sigma_u$)과 하중방향 전단파단($0.6A_{gv}\sigma_y$ 또는 $0.6A_{nv}\sigma_u$)의 조합인 블록전단파단 내력에 대해서는 다음 두식 중 최솟값을 최대내력으로 산정한다.

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

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

4.1.2 AIJ(2002b) ; 열간압연 탄소강

전단파단부분의 전단응력계수 0.6대신 실험연구결과로부터 제시된 0.5를 적용한다.

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

4.1.3 EC3(2006a) ; 열간압연 탄소강

전단파단부분의 전단응력계수로 미세스 항복기준에 따라 $1/\sqrt{3}$ 을 적용한다.

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

4.1.4 Teh et al. ; 냉간성형 탄소강

Clements 와 Teh (2013e)에 의해 면내 전단지연에 의한 순단면파단과 실제 전단파단형태를 고려한 블록전단파단식을 다음과 같이 제안하였다.

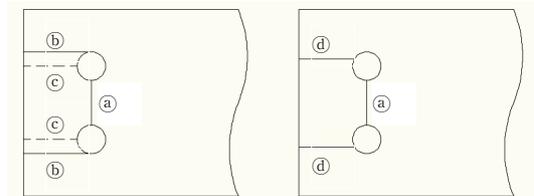
$$P_{ut} = A_{nt}\sigma_u (0.9 + 0.1 \frac{d}{g}) + 0.6A_{av}\sigma_y \quad (5)$$

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

여기서, L_{gv} 는 Line ㉑의 길이이고 하중방향 연단거리(e)와 동일하다.

Teh와 Deierlein(2017b)는 추가적인 실험과 기존 볼트접합부 연구데이터를 토대로 블록전단파단에서 전단파단위험단면이 전단저항 총단면적과 전단저항 순단면적의 중간값(Eq.(7))이 블록전단내력 예측정확도가 개선된다는 연구결과를 제시했다.

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



Line ㉑ : A_{nt} (Net area subjected to tension)

Line ㉒ : A_{gv} (Gross area subjected to shear)

Line ㉓ : A_{nv} (Net area subjected to shear)

Line ㉔ : A_{av} (Active area subjected to shear)

Fig. 9 Fracture path for block shear

4.1.5 Kim & Lim ; 오스테나이트계 스테인리스강 (STS304)

Kim & Lim (2013f)은 냉간성형 오스테나이트계 스테인리스강인 STS304로 제작된 2행 1열 일면전단 볼트접합부의 연구를 통해 면외변형 발생조건과 면외변형의 파단메

카니즘을 고려한 수정내력식을 다음과 같이 제안하였다.

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

여기서, C 는 면외변형을 동반하는 접합부의 지압계수이고 3.0이다. Eq.(8)은 최대내력시점에서 볼트간 인장과 단내력과 볼트에 의한 판의 국부좌굴의 일종인 면외변형에 의한 지압내력의 합으로 구성된다.

4.2. 내력비교

듀플렉스계 스테인레스강(STS329FLD)의 재료시험결과 얻어진 Table 2의 평균 항복강도(σ_y)와 인장강도(σ_u)를 적용하여 4.1절에서 제시된 현행의 블록전단파단에 관한 설계기준식과 기존 연구결과식을 바탕으로 각 최대내력(P_{ut})과 실험최대내력에 대한 설계최대내력비(P_{ut}/P_{ue})를 Table 5에 정리하였다.

면외변형이 발생하지 않은 실험체(SD2T30E24, SD2T30E30, SD2T30E36, DSD2T30E36, DSD2T30E48, DSD2T30E60)에 대해서는 기준식 KBC, AISC, AISI과 기준식 EC3는 각각 2%~12%, 8%~20%범위로 과소평가하고 있다. AIJ는 이면전단의 일부 접합부의 내력을 과대평가하고 있고 Clements & Teh(2013e)가 제안한 Eq.(5)이 가장 근접하게 접합부의 내력을 평가하는 것으로 나타났다.

면외변형이 발생해서 내력저하에 영향을 미친 실험체 SD2T30E48, SD2T30E60의 경우에는 대부분의 식에 의해 최대 58%까지 과대평가하는 것으로 나타났다.

Kim & Lim(2013f)의 연구에서 STS304의 평균항복강도(σ_y), 인장강도(σ_u), 연신율은 각각 253.31MPa, 694.97MPa, 61.6%이고 이 연구에서는 Table 2에서와 같이 각각 512.65MPa, 734.17MPa, 47.87%로 두 강종(STS304 STS329FLD)의 항복비(σ_y/σ_u , 각각 36%, 71%)와 연신율의 재료적 측면에서 상이하다.

듀플렉스계 스테인리스강(STS329FLD) 볼트접합부의 경우 항복이후 변형도 경화에 의한 강도상승비와 연신율이 오스테나이트계 스테인리스강(STS304)으로 제작된 볼트접합부보다 낮아 면외변형 발생이후에 좌굴후 강도상승이 저하된 것으로 판단된다. 그래서, Eq.(8)의 지압계수(C)가 오스테나이트계 스테인리스강(STS304)에서 면외변형을 동반한 동일치수의 접합부에서 제안한 지압계수(C) 3.0보다 낮을 것으로 예측되며 이런 이유로 Eq.(8)에 의해 최대내력을 과대평가한 것으로 사료된다.

6. 결론

최근에 개발된 오스테나이트계와 페라이트계의 조직을 지닌 듀플렉스계 스테인리스강 (STS329FLD)로 제작된 2행 1열 일면전단 및 이면전단 볼트접합부(공칭평판두께 3.0mm, 볼트직경 12mm, 피치와 게이지는 공통 36mm)에 대한 총8개의 실험체를 대상으로 단순인장실험을 실시하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 하중방향연단거리 ($e=24\text{mm}\sim 36\text{mm}$)인 일면전단 볼트접합부(SD2T30시리즈)와 36mm인 이면전단 볼트접합부(DSD2T30E36)의 경우 실험종료시점에 전형적인 블록전단파단(인장과파단과 전단파단의 조합)이 발생하였고, 하중방향연단거리가 증가함에 따라 내력도 상승하였다.
- 2) 하중방향연단거리가 48mm, 60mm인 일면전단 볼트접합부(SD2T30E48과 SD2T30E60)에서는 하중직각방향(평판두께방향)으로 국부좌굴의 일종인 면외변형이 발생되어 강성과 내력이 저하되었고 면외변형의 진전과 볼트간 인장과파단에 의해 최대내력이 결정되었다. 하중방향연단거리가 48mm, 60mm인 이면전단 볼트접합부에서는 양쪽판의 면외변형 구속으로 면외변형은 발생되지 않았지만 볼트간 인장과파단에 의

Table 5. Strength comparison between test results and design predictions

Specimen	Test ultimate strength P_{ue} [kN]	Design strength P_u [kN]						Strength ratio (P_{ut}/P_{ue})					
		KBC 2016 AISC 2010 AISI 2012	AIJ	EC3	Teh et al.		Kim&Lim	KBC 2016 AISC 2010 AISI 2012	AIJ	EC3	Teh et al.		Kim&Lim
					Eq.(5)	Eq.(7)					Eq.(5)	Eq.(7)	
SD2T30E24	108.35	95.58	104.21	88.09	101.44	110.53		0.88	0.96	0.81	0.94	1.02	
SD2T30E30	120.58	105.67	116.34	97.84	111.47	125.23		0.88	0.96	0.81	0.92	1.04	
SD2T30E36	128.69	116.32	129.08	108.09	122.10	140.57		0.90	1.00	0.84	0.95	1.09	
SD2T30E48	153.08	139.24	156.38	130.13	145.07	173.23	129.95	1.00	1.13	0.94	1.05	1.25	1.51
SD2T30E60	132.30	161.39	182.81	151.44	167.21	204.94	129.95	1.22	1.38	1.14	1.26	1.55	1.58
DSD2T30E36	134.06	115.15	127.78	107.00	120.87	139.15		0.86	0.95	0.80	0.90	1.04	
DSD2T30E48	146.76	136.46	153.25	127.53	142.16	169.76		0.93	1.04	0.87	0.97	1.16	
DSD2T30E60	162.09	158.70	179.76	148.91	164.43	201.53		0.98	1.11	0.92	1.01	1.24	
Average								0.96	1.07	0.89	1.00	1.17	1.55
COV								0.123	0.134	0.128	0.116	0.151	0.033

해 최대내력이 결정된 후 하중방향으로 전단파단이 진행되지 않고 하중직각방향의 양단으로 추가적인 인장파단이 발생되었다.

3) 면외변형이 관찰된 두 실험체(SD2T30E48과 SD2T30E60)에서 면외변형 발생으로 하중방향연단거리가 증가함에도 불구하고 내력상승은 없었고 동일치수의 이면전단 볼트접합부의 내력보다 최대 20%까지 내력이 저하되었다.

4) 현행기준식에 의한 블록전단파단내력과 실험내력을 비교한 결과 면외변형의 영향이 없는 접합부에 대해서 인 AISC/KBC/AISI와 EC3는 2%~20% 범위로 과소평가하였고 AIJ는 일부 이면전단 볼트접합부를 제외하고는 내력에측정도가 양호한 것으로 나타났다. 기존연구자(Teh et al.와 Kim & Lim)의해 제시된 내력식에 의한 예측내력과 실험내력을 비교한 결과, 면외변형의 영향이 없는 볼트접합부에 대해서는 Clements 와 Teh에 의한 제시된 실제전단파단선(Active shear plane)에 의한 블록전단내력이 실험결과와 양호한 대응을 보였다. 오스테나이트계 스테인리스강(STS304)으로 제작된 볼트접합부를 대상으로 Kim & Lim (2013f)에 의해 제시된 면외변형을 고려한 식에 의한 예측내력은 듀플렉스계 스테인리스강(STS329FLD)과의 재료적 성질(항복비와 연신율)의 차이를 반영하지 못해 평균 55% 과대평가하는 것으로 나타났다.

추후, 유한요소해석 모델을 통해 듀플렉스계 스테인리스강의 재료적 특성을 고려한 면외변형 발생조건과 면외변형을 고려한 내력평가식을 제안할 필요가 있다.

References

1. American Society of Civil Engineers(ASCE). (2002a), *Specification for the design of cold-formed stainless steel structural members*. SEI/ASCE-8-02, USA.
2. American Institute of Steel Construction (AISC). (2010a), *Steel Construction Manual*. AISC 325-11, Chicago, USA.
3. American Institute of Steel Construction (AISC). (2013a), *AISC Steel Design Guide 27-Structural Stainless Steel*. AISC, Chicago, USA.
4. EN 1993-1-4, Eurocode 3. (2006a), *Design of Steel Structures part 1.4: General Rules-Supplementary Rules for Stainless Steel*, European Committee for Standardization, London, UK.
5. Stainless Steel Building Association of Japan(SSBA). (2006 b), *Design manual of light-weight stainless steel structures*. Tokyo, Japan (in Japanese, with English abstract).
6. Australian Standard/New Zealand Standard(AS/NZS). (2001), *Cold-formed stainless steel structures*. AS/NZS 4673. Standards Australia, Sydney, Australia.
7. Architectural Institute of Korea(AIK). (2016), *Korea Building Code*, Seoul, Korea.
8. Kim, T.S. and Kuwamura, H. (2007), Finite element modeling of bolted connections in thin-walled stainless steel plates under static

shear, *Thin-walled Structures*, 45(4), 407-421.

9. Kim, T. S., Jeong, H. Y., Kim, M. S., and Lim, J. S. (2010b), An Experimental Study on Behavior of Single Shear Bolted Connections with Thin-walled Stainless Steel, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 26(5), 11-18 (in Korean, with English abstract).
10. Kim, T.S., & LIM, J.S. (2013b), Ultimate Strength of Single Shear Two-bolted Connections with Austenitic Stainless Steel, *International Journal of Steel Structures*, 13(1), 117-128.
11. Cha, E.Y., Hwang, B.K., Lee, H.C. and Kim, T.S. (2017a), Analysis Study on Ultimate Strength of Single-shear Bolted Connections with Austenitic Stainless Steel(STS201) with Varied End and Edge Distances, *Journal of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSM I, 21(5), 1-11 (in Korean, with English abstract).
12. Kim, M.S., Kim, T.S., Kim, S.H., and Lee, Y.T. (2010c), An Experimental Study on Ultimate Behavior of Bolted Connections with Thin-walled Ferritic Stainless Steel (STS430), *Proceedings of Annual Conference Architectural Institute of Korea*, AIK, Korean, 30(1), 141-142 (in Korean, with English abstract).
13. LIM, J. S., KIM, T. S., and KIM, S. H. (2013c), Ultimate strength of single shear bolted connections with cold-formed ferritic stainless steel, *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, 14(2), 120-136.
14. Kim, J. H., Kim, T. S., and Kang, H. S. (2013d), Ultimate Strength Estimation of Ferritic Stainless Steel Single Shear Bolted Connections Fastened with Four Bolts, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, 25(6), 659-669 (in Korean, with English abstract).
15. Korean Standard (KS). (2015). *Cold rolled stainless steel, plates, sheet and strip*, KS D 3698, Seoul, Korea.
16. American Iron and Steel Institute (AISI). (2012), *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*, AISI S100-12, Washington D.C., USA.
17. Architectural Institute of Japan(AIJ). (2002b), *Recommendation for Limit State Design of Steel Structures*, AIJ, Tokyo, Japan.
18. Clements, DDA. and Teh. L.H. (2013e), Active Shear Planes of Bolted Connections Failing in Block Shear. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 139(3), pp. 320-327.
19. Teh, L.H. and Deierlein, G.G. (2017b), Effective Shear Plane Model for Tearout and Block Shear Failure of Bolted Connections, *Engineering Journal, American Institute of Steel Construction*, 54, 181-194.
20. Kim, T.S., & LIM, J.S. (2013f), Ultimate Strength of Single Shear Two-bolted Connections with Austenitic Stainless Steel, *International Journal of Steel Structures*, 13(1), 117-128.

Received : 05/16/2018

Revised : 06/07/2018

Accepted : 07/05/2018

요 지 : 최근에 오스테나이트와 페라이트의 조직을 갖는 듀플렉스계 스테인리스강이 개발되었고 오스테나이트계 스테인리스강에 비해 고강도, 응력부식균열에 대한 고내식성과 재료비절감으로 다양한 산업분야에서 사용량이 증가되고 있다. 그러나, 현재 스테인리스강은 한국 건축구조기준에 구조용재료로 지정되어 있지 않고 구조설계기준도 마련되어 있지 않는 실정이다. 이 연구에서는 2행 1열 듀플렉스계 스테인리스강(STS329FLD) 볼트접합부에 대한 구조적 성능을 조사하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 주요변수는 전단접합형태(일면전단과 이면전단)와 하중방향 연단거리이다. 종국파단형태는 전형적인 블록전단파단, 인장파단과 면외변형이 관찰되었다. 일면전단 접합부에서 면외변형발생으로 최대 20%까지 내력저하가 발생되었다. 실험최대내력은 현행설계기준 AISC/AISI/KBC, EC3와 AIJ 및 기존연구자에 의한 제안된 식에 의한 예측내력과 비교하였다. 면외변형이 발생하지 않은 접합부에 대해서 실제 전단파단단면을 고려한 Clement & The의 식에 의한 예측내력이 실험내력에 가장 근접했고 면외변형을 동반한 접합부에 대해서는 면외변형을 고려해 제안한 Kim & Lim 식에 의해서 과대평가하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 듀플렉스계 스테인리스강, 볼트접합, 면외변형, 내력저하, 일면전단, 이면전단, 설계기준
