

오스테나이트계 스테인리스강 이면전단 볼트접합부의 최대내력에 관한 실험적 연구

이종기¹ · 김준수² · 김태수^{3*}

¹대표, 다진건축, ²박사과정, 한양대학교 대학원 스마트시티공학과, ³교수, 한양대학교 건축학부

An Experimental Study on Ultimate Strength of Double Shear Bolted Connection with Austenitic Stainless Steel

Lee, Jong Gi¹, Kim, Jun Su², Kim, Tae Soo^{3*}

¹Construction Technology Team, Dajin Architecture Co., Ltd., Daejeon, 33020, Korea

²Graduate student (Ph.D course), Department of Smart City Engineering, Hanyang University ERICA, Ansan, 15588, Korea

³Professor, School of Architecture & Architectural Engineering, Hanyang University ERICA, Ansan, 15588, Korea
(Former professor, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University)

Abstract - This study aims to investigate structural behaviors such as fracture type and ultimate strength of the double-shear bolted connection made of austenitic stainless steel STS304, which is the most widely used in building structures as basic research for establishing stainless steel structural design standards in Korea. The main variables are bolt arrangement and end distance, and a total of 10 test specimens were planned. In case of two bolted (2×1) connection, the shear-out fracture occurred in the specimen with the smallest end distance. In the specimen of four bolted (2×2) connection, the tensile fracture of the net-section occurred in the specimen with the largest end distance and the other showed the block shear fracture. The strengths of the design specification (KDS, AISC, AISI, EC3 and AIJ) and the block shear fracture equations proposed by the existing researcher were compared with the test ultimate strengths. The current design formula is found to need improvement in evaluating the ultimate strength of the austenitic stainless steel double-shear bolted connection, especially the block shear fracture strength according to bolt array.

Keywords - Austenitic stainless steel, Double shear, Bolted connection, Bolt array, Block shear, Design rule

1. 서론

스테인리스강(stainless steel)은 탄소강(carbon steel)에 비해 우수한 내식성·내화성·인성·연성 등 많은 장점을 지니고 있어 국내외 건축물 또는 시설물 내·외장재의 비구조재 뿐만 아니라 구조부재의 재료로서 그 수요가 꾸준히 증가하고 있다. 국외에서는 스테인리스강의 재료적 성질 및 구조부재의 구조적 거동에 관한 연구결과를 토대로, 구조용

재료로 지정되어 미국(미국토목학회; ASCE)^[1], 유럽(유로코드; EC3)^[2], 호주/뉴질랜드(AS/NZS 4673)^[3] 등은 스테인리스강 구조설계기준을 제정, 스테인리스강을 건축구조용 강재로 적용할 수 있는 기틀을 마련하고 있다. 국내에서는 국가건설기준센터 강구조설계기준(KDS 14 31 05) 3.6.3^[4]에 스테인리스강이 구조용 재료로 지정되어 있으나 관련 구조설계기준은 마련되어 있지 않은 실정이다. 한국강구조학회(KSSC)는 미국토목학회 냉간성형 스테인리스강 설계기준(ASCE-8-02)^[1]을 참고로 국내 생산 스테인리스강의 재료적 특성을 반영한 스테인리스강 구조설계지침을 출간하였다^[5]. 이를 토대로 작성된 냉간성형 스테인리스강 구조기준(안)^[6]이 현재 국가건설기준센터에서 심의 중이다. 국내에서도 1990년 스테인리스강 H형강보 횡좌굴내력에 관한 연구^[7]를 시작으로 2000년대에는 스테인리스강 강관의 압축력 및 조합력을 받는 부재의 구조거동에 관한 다양한

Note.-Discussion open until December 31, 2022. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 11, 2022; revised on May 09, 2022; approved on May 10, 2022.

Copyright © 2022 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-31-400-5131 Fax. +82-31-400-5959

E-mail. tskim0709@hanyang.ac.kr

연구가 이루어졌다^{[8],[9]}. 스테인리스강을 건축구조용 강재로 적용하기 위한 소재특성, 볼트접합부·용접접합부에 관한 연구가 수행되어왔다. 오스테나이트계 및 페라이트계 스테인리스강에 대한 볼트접합부·용접접합부에 대한 실험 및 해석적 연구를 통해 탄소강과 다른 스테인리스강의 기계적 성질의 특성과 스테인리스 강종의 차이에 따른 접합부의 거동을 고려한 내력평가식을 제안해 왔다^{[10]-[13]}.

고강도 오스테나이트계 스테인리스강(STS201)의 2행 1열과 2행 2열 이면전단 볼트접합부에 관한 실험연구를 통해 현행기준식 설계내력과 실험내력을 비교하였고^[14], 저니켈 고강도 듀플렉스계 스테인리스강(STS329FLD)으로 제작한 일면전단과 이면전단 볼트접합부에 관한 실험결과로 동일치수의 접합부에 대해 면외변형이 발생한 일면전단 접합부와 면외변형이 구속된 이면전단 볼트접합부의 최대내력을 비교하였다. 그 결과, 면외변형에 의해 7% - 20%의 내력이 저하된다는 것을 제시하였다. 하중방향 연단거리가 증가함에 따라 면외변형에 의한 내력저하는 커지는 경향을 보였다^[15].

스테인리스강 중에서 가장 많이 사용되고 있는 오스테나이트계 스테인리스강(STS304)을 대상으로 기존 일면전단 볼트접합부 연구에서는 볼트직경 12 mm를 기준으로 하여 피치, 게이지 및 연단거리를 계획하여 연구를 진행하였으나, 이 연구에서는 볼트직경을 16 mm로 한 이면전단 2행 1열과 2행 2열 볼트접합부를 제작하여 단순인장 실험을 실시하였다. 면외변형이 구속되어 면내파단이 발생하는 오스테나이트계 스테인리스강(STS304) 이면전단 볼트접합부에서 볼트배열과 하중직각방향 연단거리를 변수로 하여 파단형태와 최대내력을 조사하여 현행기준식(한국설계기준

KDS^[17], 미국강구조학회 AISC^[18], 일본건축학회 AIJ^[19], 미국철강협회 AISI^[20], 유럽기준 EC3^{[2],[21],[22]})과 기존연구자(Teh and Clements^[23], Teh and Deierlein^[24])에 의해 제시된 내력식의 적용성을 검토하는 것을 연구목적으로 한다.

2. 실험계획 및 재료시험

2.1 실험체 계획 및 실험방법

오스테나이트계 스테인리스강(STS304)을 사용한 2행 1열과 2행 2열 이면전단 볼트접합부에서 변수(볼트배열, 하중방향 연단거리)에 따른 파단메커니즘과 최대내력을 조사하기 위해 단순인장 이면전단 볼트접합부 실험체를 계획한다. 냉간성형 오스테나이트계 스테인리스강 강판 공칭평판두께 3.0 mm로 Fig. 1(a) 및 Fig. 1(b)와 같은 볼트배열과 형상으로 레이저 절단가공에 의해 볼트 실험체를 제작하였다. 실험체명과 치수를 Table 1에 정리하였다. 주요 변수는 하중방향 연단거리(e)를 볼트직경(d)을 기준으로 $2d, 2.5d, 3d, 4d, 5d$ 로 설정하였다. 실험체명에서 예를 들어, ‘SA2D16E32’ 또는 ‘SA4D16E32’에서 ‘SA’는 오스테나이트계 스테인리스강(Austenitic stainless steel), ‘2’ 또는 ‘4’는 볼트개수로 2개(2행 1열), 4개(2행 2열), ‘D16’은 볼트직경(d) 16 mm, ‘E32’는 하중방향 연단거리(e) 32 mm를 의미한다. 실험체의 공통사항으로는 하중직각방향 연단거리(b)는 Fig. 1에 표시한 바와 같이 60 mm로, 하중직각방향 볼트간 중심거리인 게이지(gage, g)와 하중방향 볼트간 중심거리인 피치(pitch, p)는 볼트직경의 3배인 48 mm, 볼트구멍직경(ϕ)는 볼트직경에 1 mm를 추가한 17 mm로 하였다.

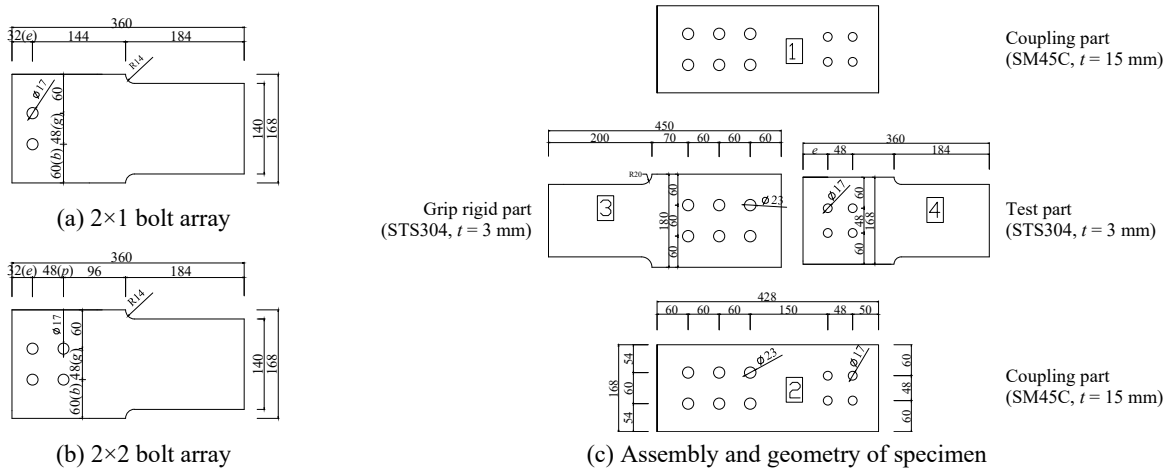


Fig. 1. Configuration of specimen

Table 1. Test specimen

Bolt array	Specimen	Measured thickness t_e (mm)	End distance e (mm)	Commons
2×1	SA2D16E32	2.81	32	Bolt diameter(d) = 16 mm Hole diameter(ϕ) = 17 mm Pitch(p) and gage(g) = 48 mm Edge distance(b) = 60 mm Nominal plate thickness(t_n) = 3.0 mm
	SA2D16E40	2.85	40	
	SA2D16E48	2.85	48	
	SA2D16E64	2.83	64	
	SA2D16E80	2.81	80	
2×2	SA4D16E32	2.86	32	Bolt diameter(d) = 16 mm Hole diameter(ϕ) = 17 mm Pitch(p) and gage(g) = 48 mm Edge distance(b) = 60 mm Nominal plate thickness(t_n) = 3.0 mm
	SA4D16E40	2.82	40	
	SA4D16E48	2.84	48	
	SA4D16E64	2.85	64	
	SA4D16E80	2.82	80	

오스테나이트계 스테인리스강 이면전단 볼트접합부의 단순인장 실험을 위한 실험체 구성 및 치수는 Fig. 1(c)에 나타내었다. 실험체는 이면전단 볼트접합부에서 내부평판의 파단과 면외변형을 구속하기 위해 양쪽면에 연결고정부(coupling part, 평판번호 1·2) 2개, 좌측은 만능시험기(UTM)에 고정시키기 위한 물림고정부(grip rigid part, 평판번호 3)와 우측에 볼트접합부 파단측(test part, 평판번호 4)을 포함해서 총 4개의 판으로 구성하였다. 연결고정부는 기계구조용 탄소강인 SM45C를 변형억제를 위해 열처리하였고 물림고정부는 파단측과 동일한 강종인 STS304로 제작하였다. 볼트는 연결고정부(평판번호 1·2)와 파단측(평판번호 4)을 체결하기 위해 고장력볼트 F13T M12(2행 1열 볼트접합부에서는 2개, 2행 2열 볼트접합부에서는 4개)를, 연결고정부와 물림고정부는 F10T M22의 고장력볼트 6개로 체결하였다. 이 연구에서 볼트접합부의 힘 전달방식

이 마찰형 접합이 아니라 초기장력을 도입하지 않은 지압형 볼트접합이므로 손조임으로 고장력볼트를 체결하였다. 고장력볼트를 사용한 이유는 볼트의 전단파단이 아닌 볼트 접합 평판(test part)의 파단을 유도하기 위해서이다.

2.2 재료인장시험 및 결과

볼트접합부의 파단측(test part)인 오스테나이트계 스테인리스강인 STS304의 기계적 성질을 조사하기 위해 KS B 0801에 따라 인장시험편 3개를 제작하고 KS B 0802에 따라 재료 인장시험을 실시하였다. 재료 인장시험결과로부터 Fig. 2와 같은 응력-변형도 곡선을 얻었고, Table 2에 인장시험결과를 정리하였다. 재료 인장시험결과에서 항복강도(F_y)는 0.2% 오프셋을 이용하여 산정하였다. 재료시험 결과 평균 탄성계수(E)는 191.49 GPa, 0.2% 오프셋 항복강도($F_{y0.2}$)는 295.11 MPa, 인장강도(F_u)는 769.49 MPa, 시험종료 후 파단 연신율(EL)은 69.83%로 나타났다. 이는 냉간성형 스테인리스강의 KS D 3698^[25]에서 오스테나이트계 스테인리스강 STS304의 최저기준인 항복강도 205 MPa, 인장강도 520 MPa, 연신율 40%를 초과하는 것으로 나타났다.

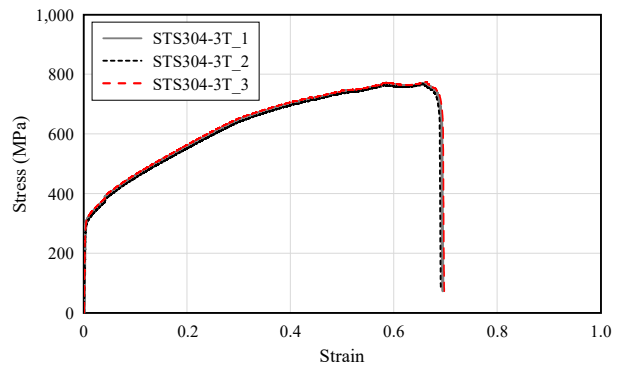


Fig. 2. Stress-strain curves

Table 2. Material test results

Coupon	Actual plate thickness t_e (mm)	Young's modulus E (GPa)	Yield stress $F_{u0.2}$ (MPa)	Tensile strength F_u (MPa)	Yield ratio $F_{u0.2}/F_u$ YR (%)	Elongation EL (%)
STS304_3T_1	2.85	203.8	292.73	768.37	70.02	48.10
STS304_3T_2	2.87	181.4	290.40	767.18	70.10	46.70
STS304_3T_3	2.84	189.3	302.21	772.93	69.36	47.78
Average		191.49	295.11	769.49	69.83	47.87
COV		0.215	0.018	0.004	0.021	0.017

3. 접합부 실험

3.1 실험방법

Fig. 1(c)의 구성으로 조립된 이면전단 볼트접합부 실험체 설치 상황을 Fig. 3에 나타냈다. 이면전단 볼트접합부를 실험체 중간연결재(coupling part)를 상단고정부(grip rigid part)와 하단 실험측(test part)과 고장력볼트 체결을 실시한 후, 만능시험기의 상하 물림부에 고정시켜 단순인장실험을 수행하였다. 볼트 접합부의 파단에 의해 내력이 저하될 때까지 실험을 수행하였다. 가력은 만능시험기의 Winsoft 프로그램으로 변위제어를 적용하여 하중방향변위를 점차 증가시키면서 인장실험을 수행하였다. 데이터 로거에 저장된 하중-축방향 변위 데이터로부터 실험체 전체의 하중-변위관계 곡선을 정리하였다.

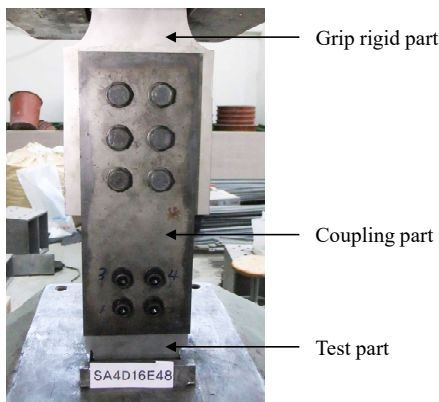


Fig. 3. Set-up of specimen SA4D16E48

3.2 실험결과 및 분석

3.2.1 파단형태

오스테나이트계 스테인리스강(STS304) 이면전단 볼트 접합부의 인장실험 결과 얻는 실험종료시점에서 종국파단 형태와 하중-변위곡선을 Figs. 4-6에 나타냈다. Table 3에 실험평판두께(t_e), 실험최대내력(P_{ue}), 보정최대내력(P_{uem}), 하중방향 연단거리에 따른 최대내력비($P_{uem}/P_{uem-eMin}$), 실험 종료시점에서 파단형태, 최대내력시점에서 파단형태를 정리하였다. 보정최대내력(P_{uem})은 동일 두께에 대한 내력을 비교하기 위해 공칭평판두께(t_n) 3 mm를 기준으로 해당 실험체의 실험두께(t_e)에 대한 비(t_n/t_e)를 실험최대내력(P_{ue})에 곱하여 산정하였다. 2행 1열 시리즈의 실험체인 Fig. 4(b) - Fig. 4(d)와 2행 2열 시리즈 실험체인 Fig. 4(e) - Fig. 4(f)에

서와 같이 면내에서 하중직각방향 볼트 간 인장파단과 하중방향 전단파단의 조합인 블록전단파단(block shear fracture, BS)이 발생하였고 동시에 하중방향의 연단에서 평판의 돌출(protrusion) 현상이 관찰되었다.

2행 1열 실험체인 SA2D16E32는 Fig. 4(a)와 같이 볼트 간 인장파단 없이 하중방향으로 볼트몸체와 접촉하는 볼트 구멍 양 끝단선을 따라 종전단파단(shear-out fracture, S)이 발생하였다.

2행 2열 실험체인 SA4D16E40, SA4D16E64는 Fig. 4(g) 및 Fig. 4(i)와 같이 변형된 구멍의 중심선에서 볼트 간 인장 파단 후 하중방향으로 위험전단선을 따라 한쪽은 전단파

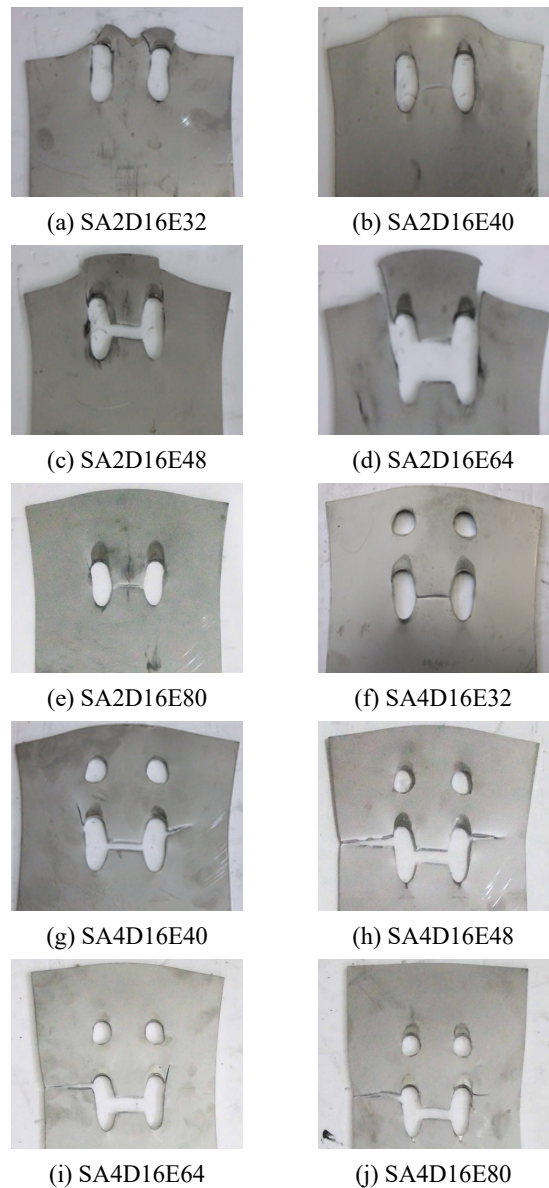


Fig. 4. Fracture shape at test end

단이 발생하였으나 다른 한쪽은 변형된 구멍의 하중방향으로 치우친 선을 따라 인장파단이 발생하는 것으로 나타났다. 그래서 실험결과에서 두 실험체는 블록전단파단으로 분류하였다.

실험체 SA4D16E48, SA4D16E80는 Fig. 4(h)와 Fig. 4(j)에서 보는 바와 같이 볼트 간 인장파단 후 하중직각방향의 양쪽 연단으로 변형된 볼트구멍의 하중방향으로 치우친 선을 따라 추가적인 인장파단이 발생하였고 실험종료시점에서는 순단면 인장파단(net section tensile fracture, N)으로 분류하였다. 실험체 SA4D16E48은 블록전단파단으로 분류된 2행 2열 다른 실험체와 유사하게 하중방향의 연단부분에 돌출현상이 관찰되었지만 실험체 SA4D16E80은 하중방향 연단부분에 미소한 돌출현상은 있었지만 하중방향 연단에서 멀리 떨어진 볼트 행에서 하중직각방향으로 네킹(necking) 현상이 관찰되어 순단면 인장파단으로 판단할 수 있다.

Fig. 5(a)의 하중-변위 곡선에서 2행 1열 접합부의 종전단파단된 실험체 SA2D16E32를 제외하고는 볼트 간 인장파단과 전단파단이 거의 동시에 발생하여 급격하게 내력이 저하되었다. 실험체 SA2D16E32는 1차적으로 종전단파단이 진행되어 최대내력이 결정되고 추가적인 전단파단으로 2차적인 내력저하가 발생된 것으로 판단된다. 2행 2열 볼트 접합부에서는 Fig. 5(b)의 하중-변위 곡선에서 SA4D16E32를 제외하고는 볼트 간 인장파단에의해 최대내력이 결정되고 하중방향 전단파단 또는 하중직각방향 인장파단에 의해 2차적인 내력저하가 관찰되었다.

3.2.2 최대내력

이 연구에서 볼트접합부의 하중직각방향 연단거리(b)는 60 mm로 동일하고 볼트배열과 하중방향 연단거리(e)가 변화한다. Table 3에 실험두께, 실험최대내력(P_{ue})과 보정최

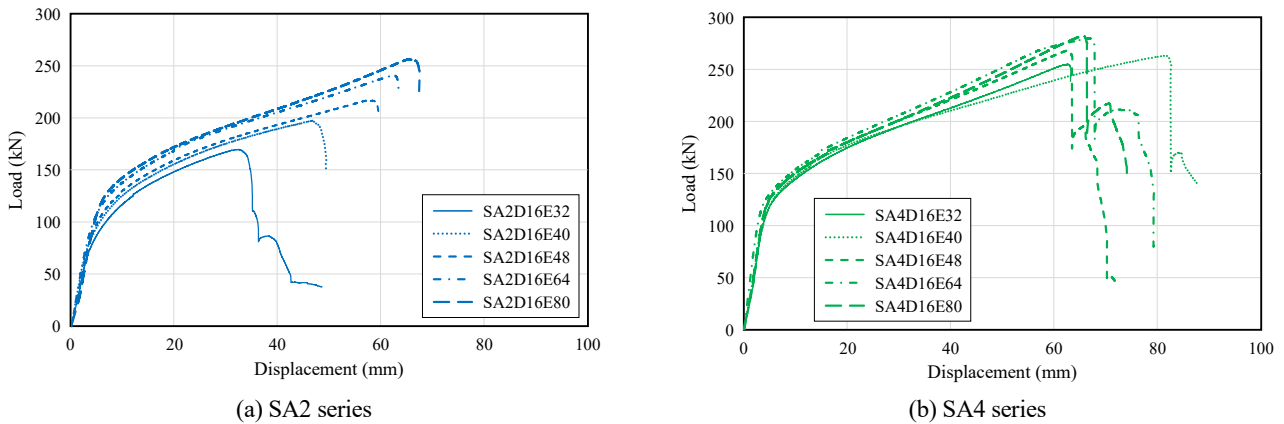


Fig. 5. Load-displacement relationship

Table 3. Test results

Specimen	Measured thickness t_e (mm)	Ultimate strength P_{ue} (kN)	Modified strength P_{uem} (kN)	Ultimate strength $P_{uem}/P_{uem-eMin}$	Fracture mode at test end	Fracture shape at ultimate state
SA2D16E32	2.81	169.74	181.22	1.00	S	Shear-out
SA2D16E40	2.85	197.37	207.76	1.15	BS	Tensile fracture between two bolts
SA2D16E48	2.85	217.17	228.60	1.26	BS	
SA2D16E64	2.83	240.88	255.35	1.41	BS	
SA2D16E80	2.81	256.56	273.91	1.51	BS	
SA4D16E32	2.86	255.58	268.09	1.00	BS	
SA4D16E40	2.82	264.01	280.86	1.05	BS	
SA4D16E48	2.84	269.11	284.27	1.06	N	
SA4D16E64	2.85	280.67	295.44	1.10	BS	
SA4D16E80	2.82	283.04	301.11	1.12	N	

대내력(P_{uem}), 보정최대내력비($P_{uem}/P_{uem-eMin}$), 실험종료시점에서 파단형태와 최대내력시점에서의 파단형상을 정리하였다. 하중방향 연단거리(e)에 따른 내력변화를 비교하기 위해 공칭평판두께(t_n) 3.0 mm를 기준으로 각 실험체의 최대내력을 보정한 값이 P_{uem} 이다. 또한, $P_{uem}/P_{uem-eMin}$ 는 각 볼트 배열의 실험체 중 하중방향 연단거리(e)가 가장 작은 32 mm 실험체의 최대내력으로 무차원한 값이다. 내력비교 결과, 하중방향연단거리가 증가함에 따라 실험최대내력도 증가하는 경향을 보였다.

2행 1열 볼트접합부에서는 실험종료시점에서 종전단파단(S)될 실험체 SA2D16E32를 제외한 모든 실험체는 블록전단파단이 발생하였고 동일한 하중직각방향 연단거리($b = 60$ mm)와 하중방향 볼트간 중심간 거리($p = 48$ mm) 조건 하에 하중방향 연단거리(e)가 증가비율에 따라 최대내력도 증가하였다.

2행 2열 볼트접합부에서 실험종료시점에서 순단면인장파단(N)으로 관찰된 실험체 SA4D16E48과 SA4D16E80는 하중직각방향 볼트중심간 거리($g = 48$ mm)와 하중직각방향 연단거리($b = 60$ mm)가 동일하고 순단면인장파단내력은 하중방향 연단거리와 상관없이 동일해야 하기 때문에 외형적인 파단형태 기준으로 순단면파단이었다면 실험 최대내력은 큰 차이가 없는 것이 타당하다. 그러나, 두 실험체의 내력차이는 16.84 kN으로 실험체 SA4D16E48가 실험체 SA4D16E80보다 낮은 것으로 나타났다. 그래서, 두 실험체는 실험종료시점에서 파단형태는 순단면 인장파단형태이지만, 최대내력시점에서 파단형태는 상이하고 두 실험체에서 서로 다른 치수인 하중방향 연단거리의 영향으로 실험최대내력에 차이가 발생한 것으로 판단된다.

실험결과와 파단형태와 변수에 따른 파단내력을 현행 설계식으로 파단형태별 내력을 산정하여 비교하여 볼트접합부의 최대내력시점에서 파단형태를 확인할 필요가 있다.

4. 설계예측내력과 실험최대내력 비교

지압형 볼트접합부의 볼트파단이 아닌 접합판 파단의 최대내력(P_{ut})에 대해 한국구조기준 KDS(2019)^[17], 미국강구조학회 AISC(2016)^[18], 미국철강협회 AISI NAS(2016)^[20], 일본건축학회 AIJ(2010)^[19], 유럽 EC3(1996, 2005)^{[21],[22]} 등에서 순단면파단, 종단면파단, 지압파단 및 블록전단파단의 파단형태별로 규정하고 있다. 그 외 탄소강 볼트접합부

의 블록전단파단내력에 대해 Teh and Deierlein(2017)^[23]는 새로운 내력식을 제안했다. Table 3의 실험결과에서 실험 종료시점에서의 파단형태가 종전단파단(S), 순단면파단(N)과 블록전단파단(BS)으로 나타났다. 강도저감계수 등을 고려하지 않은 기준식에 의한 예측 최대내력(이하 설계내력으로 통칭함)과 실험최대내력을 비교하여 오스테나이트계 스테인리스강 이면전단 볼트접합부의 내력산정을 위한 설계식의 타당성을 검증한다.

4.1 설계 기준식

4.1.1 KDS(2019)^[17], AISC(2016)^[18]: 열간압연 탄소강

(1) 종전단파단(shear-out fracture, S)

하중방향 직각방향의 연단거리(e)에 비해 하중방향 연단거리(b)가 짧은 경우 하중방향으로 발생하는 종전단파단에 대해 식 (1)과 같이 지압파단 내력보다 작아야 한다는 조건을 만족하도록 규정하고 있다. 볼트지압에 의해 볼트 구멍의 변형이 설계에 고려되지 않을 경우는 다음과 같다.

$$P_{ut} = 1.5L_c t F_u \leq 3.0dt F_u \quad (1)$$

여기서, L_c : 하중방향 순간격, 구멍의 끝과 피접합재의 끝 또는 인접구멍의 끝까지의 거리, 2행 1열의 경우는 $Min(e - \phi/2)$ 이고 2행 2열의 경우는 $Min(e - \phi/2, p - \phi)$ 이다.

(2) 순단면파단(net-section fracture, N)

볼트접합부에서 하중직각방향으로 볼트구멍을 제외한 순단면(A_n)에서 인장파괴가 발생하는 파단형태로 순단면파단 내력식은 다음과 같다.

$$P_{ut} = A_n \cdot F_u \quad (2)$$

여기서, A_n 은 볼트구멍의 단면결손을 제외한 인장저항 순단면적이고, F_u 는 모재의 인장강도이다.

(3) 블록전단파단(block shear fracture, BS)

하중직각방향 인장파단과 하중방향의 전단파단 또는 전단항복의 조합인 블록전단파단 내력에 다음 두 식으로 규정하고 있고 내력 중 최솟값은 블록전단파단내력으로 하고 있다. 각 식에서 인장파단과 전단파단 또는 전단항복의 위험 단면선은 Fig. 6에 표시한다.

$$P_{ut} = U_{bs} A_{nt} F_u + 0.6 A_{gv} F_y \quad (3)$$

$$P_{ut} = U_{bs} A_{nt} F_u + 0.6 A_{nv} F_u \quad (4)$$

여기서, U_{bs} 는 인장응력이 균일한 경우 1.0으로 한다. F_y 는 모재의 항복강도이다.

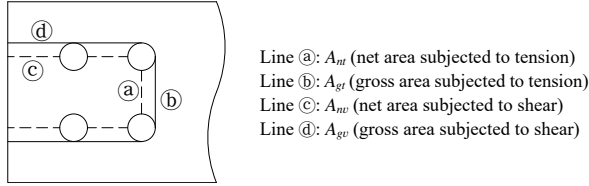


Fig. 6. Critical section of block shear

4.1.2 AIJ(2010)^[19]: 열간압연 탄소강

일본건축학회(AIJ)의 순단면파단 내력식은 식 (2)와 동일하고, 종전단파단과 지압파단은 별도로 구분하지 않고 식 (5)의 단일식으로 규정하고 있다.

(1) 종전단파단, 지압파단

$$P_{ut} = e_1 t F_u \quad (5)$$

여기서, $e_1 = \text{Min}(e, p)$, t : 판두께, p = 하중방향 볼트간 중심간격. 단, 냉간성형강에 대한 AIJ 기준은 하중방향 연단 거리가 판두께의 13배를 초과하는 경우 최대연단거리(e)는 $13t$ 로 규정한다.

(2) 블록전단파단

$$P_{ut} = A_{nt} F_u + 0.5 A_{gv} F_u \quad (6)$$

4.1.3 AISI(2016)^[20]

미국 AISI 기준에서도 4.1.1의 KDS/AISC의 블록전단 파단내력 산정식 식 (3)과 식 (4) 중 최솟값으로 규정한다.

(1) 종전단파단

$$P_{ut} = 2(0.6e_2 t \sigma_u) \quad (7)$$

여기서, e_2 는 2행 1열 볼트배열인 경우 하중방향 연단에 가장 근접한 볼트구멍의 연단까지의 거리이고 2행 2열의 경우는 $e_2 = \text{Min}(e - \phi/2, p - \phi)$ 로 결정한다.

(2) 순단면파단

AISI 기준에서는 전단지연효과를 고려한 순단면 파단내력식을 규정하고 있다.

$$P_{ut} = A_e F_u \quad (8)$$

여기서, $A_e = U_{sl} A_{nt}$,

$$U_{sl} = 0.9 + 0.1 \left(\frac{d}{s} \right),$$

$$A_{nt} = A_g - n\phi t + \sum \left[\frac{p^2}{4g + 2\phi} \right] t.$$

(n : 볼트 개수, d_h : 구멍 직경, p : 피치, g : 게이지)

4.1.4 EC3(1996, 2005)^{[21],[22]}

유럽기준의 순단면파단내력식은 KDS 및 AISC와 동일하고 블록전단파단식에서는 전단응력계수로 0.6 대신 미세스 항복조건으로 $1/\sqrt{3}$ 을 적용하고 있다.

(1) 종전단파단

$$P_{ut} = e \cdot t \cdot F_u / 1.2 \quad (9)$$

(2) 블록전단파단

$$P_{ut} = A_{nt} F_u + A_{nv} F_y / \sqrt{3} \quad (10)$$

4.1.4 SEI/ASCE(2002)^[1]

SEI/ASCE 기준에서는 블록전단파단내력에 대해서는 별도로 규정하고 있지 않다.

(1) 종전단파단

$$P_{ut} = e_3 \cdot t \cdot \sigma_u \quad (11)$$

여기서, $e_3 = \text{Min}(e, p - \phi/2)$.

(2) 블록전단파단

이면전단 볼트접합부의 경우 다음 식으로 산정한다.

$$P_{ut} = A_n F_u \left(1.0 - 0.9r + \frac{3rd}{g} \right) \leq A_n F_u \quad (12)$$

여기서, r : 총인장력에 대한 파단선상의 볼트가 부담하는 내력의 비율($r \leq 0.2$ 인 경우 0으로 한다; 1행 1열 $r = 1$, 1행 2열 $r = 1/2$, 2행 1열 $r = 1$, 2행 2열 $r = 1/2$).

4.1.5 Teh and Deierlein(2017)^[24]

Teh와 Deierlein은 실험과 기존 볼트접합부 연구 데이터를 토대로 블록전단파단에서 전단파단위험단면을 전단지향 총단면적과 전단지향 순단면적의 평균값(식 (13))을 적용한 블록전단파단 내력식을 제안하였다.

$$P_{ut} = A_{nt}F_u + 0.6 \frac{A_{gv} + A_{nv}}{2} F_u \quad (13)$$

4.2 최대내력 비교

4.1의 현행 설계기준식(중전단, 순단면 및 블록전단파단)과 기존 연구자에 의해 제시된 블록전단파단내력식을 토대로 실험종료시점에서의 파단형태를 기준으로 설계내력과 실험내력을 비교하여 Tables 4-6에 정리하였다.

Tables 4-5에는 Table 3의 실험결과에서 중전단파단된 SA2D16E32와 2행 2열 볼트접합부 중에 실험종료시점에서 순단면파단되거나 순단면파단내력과 비교·확인이 필요하다고 판단된 SA4D16E48, SA4D16E64, SA4D16E80에 대한 설계 중전단파단 및 순단면파단내력과 실험내력을 비교하였다. Table 6에는 최대내력 시점에서 중전단파단이 명확한 SA2D16E32를 제외한 실험체에 대해 설계 블록전단파단내력과 실험내력을 비교하였다.

설계중전단내력식은 Tables 4-5에서 알 수 있듯이 실험내력에 대한 평균 설계내력비는 0.68 - 0.90의 범위로 실험에서 중전단파단된 실험체 SA2D16E32의 내력을 전체적으로 과소평가하는 것으로 나타났다. KDS/AISC 기준이 평균내력비 0.9로 가장 근접하게 평가하였다. 순단면파단내력에 대해서는 현행 설계식이 실험체 SA4D16E48, SA4D16E64,

SA4D16E80에 대해 2% - 14%의 범위로 과대평가하는 경향을 보였다. 3.2.1에서 언급한 전형적인 순단면파단형태를 보인 SA4D16E80가 다른 두 실험체에 비해 설계순단면파단내력에 근접한 것으로 나타났다.

Table 6에서 설계블록전단파단내력과 실험내력을 비교한 결과, AISC/KDS/AISI 기준과 EC3 기준은 접합부내력을 전형적인 순단면파단된 SA4D16E80을 제외하고 16% - 52% 과소평가했다. 블록전단파단식에서 전단파단내력 산정시 재료의 인장강도(F_u)를 적용하고 있는 AIJ 기준과 Teh and Deierlein 식(식 (5)과 식 (13))에 의한 블록전단파단내력은 다른 설계식에 비해 실험내력에 근접하였다. 2행 1열 볼트접합부는 실험내력에 대한 설계내력비가 0.79 - 1.03의 범위로, 2행 2열에서는 최대내력비가 0.96 - 1.17의 범위로 나타났다. 즉, AIJ 기준과 Teh and Deierlein 식은 전단저항에 대해 볼트구멍에서 하중방향의 연단거리에만 영향을 받는 2행 1열 볼트접합부가 하중방향의 볼트간 중심(피치)과 하중방향 연단거리의 합의 영향을 받는 2행 2열 볼트접합부의 내력을 예측하는데 정확도가 높은 것으로 판단되었다.

결과적으로, 오스테나이트계 스테인리스강(STS304)의 이면전단 볼트접합부의 내력을 평가하는데 현행 기준식과 기존 연구자 제안식의 적용성에 다소 문제가 있는 것으로 나타났다.

Table 4. Strength comparison between design prediction and test result for shear-out mode

Specimen	Test strength P_{ue} (kN)	Fracture mode at test end	Design strength P_{ur} (kN)				Design-test strength ratio P_{ur}/P_{ue}			
			AISC/KDS	AISI	ASCE/AIJ	EC3	AISC/KDS	AISI	ASCE/AIJ	EC3
SA2D16E32	169.74	S	152.44	121.95	139.39	115.32	0.90	0.72	0.82	0.68

Table 5. Strength comparison between design prediction and test result for net-section fracture mode

Specimen	Test strength P_{ue} (kN)	Fracture mode at test end	Design strength P_{ur} (kN)			Design-test strength ratio P_{ur}/P_{ue}		
			AISC/KDS/AIJ/EC3	AISI	ASCE	AISC/KDS/AIJ/EC3	AISI	ASCE
SA4D16E48	269.11	N	292.84	289.61	307.48	1.09	1.08	1.14
SA4D16E64	280.67	BS	293.87	290.63	308.56	1.05	1.04	1.10
SA4D16E80	283.04	N	290.78	287.57	305.31	1.03	1.02	1.08
Average						1.06	1.05	1.11
COV						0.029	0.029	0.029

Table 6. Strength comparison between design prediction and test result for block shear fracture mode

Specimen	Test strength P_{ue} (kN)	Fracture mode at test end	Fracture mode at ultimate state*	Design strength P_{ur} (kN)				Design-test strength ratio P_{ur}/P_{ue}			
				AISC/KDS/AISI	AIJ	EC3	Teh and Deierlein	AISC/KDS/AISI	AIJ	EC3	Teh and Deierlein
SA2D16E40	197.37	BS	TF+SY	108.36 Eq. (3)	155.71	98.58	162.07	0.55	0.79	0.50	0.82
SA2D16E48	217.17	BS	TF+SF	116.43 Eq. (3)	173.25	106.35	183.12	0.54	0.80	0.49	0.84
SA2D16E64	240.88	BS	TF+SF	131.65 Eq. (3)	206.88	121.03	223.65	0.55	0.86	0.50	0.93
SA2D16E80	256.56	BS	TF+SY	146.64 Eq. (3)	240.01	135.50	263.58	0.57	0.94	0.53	1.03
SA4D16E32	255.58	BS	TF+SY	149.25 Eq. (3)	244.28	121.34	245.82	0.58	0.96	0.47	0.96
SA4D16E40	264.01	BS	TF+SF	155.15 Eq. (3)	258.23	127.33	263.22	0.59	0.98	0.48	1.00
SA4D16E48	269.11	N	TF+SY	164.30 Eq. (3)	277.54	135.97	286.06	0.61	1.03	0.83	1.06
SA4D16E64	280.67	BS	TF+SF	181.02 Eq. (3)	313.61	151.99	329.06	0.64	1.12	0.84	1.17
SA4D16E80	283.04	N	N	195.10 Eq. (3)	345.02	165.77	367.37	0.69	1.22	0.85	1.30
Average								0.59	0.95	0.60	0.99
COV								0.080	0.152	0.273	0.157

*TF: tensile fracture, SY: shear yielding, SF: shear fracture

5. 결론

이 연구에서는 오스테나이트계 스테인리스강인 STS304 이면전단 볼트접합부(2행 1열과 2행 2열, 공칭두께 3.0 mm, 볼트직경 16 mm, 피치와 게이지 48 mm, 하중직각방향 연단거리 60 mm, 하중방향 연단거리 32 mm - 80 mm) 실험체 10개에 대해 단순인장 실험을 수행하였고 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) STS304의 재료인장시험 수행 결과, 평균 탄성계수는 191.49 GPa, 항복강도는 295.11 MPa, 인장강도는 769.49 MPa, 파단 연신율은 69.83 %이었고, KS D 3698에 제시된 STS304의 최저기준을 모두 만족하였다.
- (2) 하중방향 연단거리를 변수로 하는 2행 1열과 2행 2열 이면전단 볼트접합부 실험 결과, 실험종료시점에서 종전단파단, 블록전단파단과 순단면 인장파단이 발생하였다. 2행 1열의 하중방향 연단거리가 가장

작은 실험체 SA2D16E32는 하중방향으로 전형적인 종전단파단이, 2행 2열의 실험체 SA4D16E48와 SA4D16E80는 실험종료시점에서 볼트 간 인장파단과 하중직각방향 연단으로 추가 인장파단이 되는 순단면 인장파단이 발생되었고 두 실험체의 파단 형상에 있어 차이점은 하중방향 연단으로 블록전단파단에서 관찰되는 돌출현상이 SA4D16E48에서는 발생한 것이다. 나머지 실험체는 볼트 간 인장파단과 하중방향으로 전단위험단면에서의 전단파단 또는 전단항복의 조합인 블록전단파단으로 최대내력이 결정되었다.

- (3) 하중방향 연단거리가 증가함에 따라 파단형태의 구분 없이 실험최대내력은 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 최대내력시점에서 블록전단파단으로 분류된 실험체의 경우는 현행기준식의 블록전단파단 내력식에서 하중방향 연단거리에 비례하여 내력이 증가하는 것에 부합하는 것으로 나타났다.
- (4) 현행기준식인 KDS/AISC/AISI, AIJ, EC3와 기존 연

구자인 Teh and Deierlein의 블록전단제안식에 의해 설계내력과 실험내력을 비교하였다. 종전단파단 설계내력의 경우 실험내력을 10% - 32%의 범위로 과소평가하였다. 순단면파단 설계내력식 중 전단지연효과를 고려한 AISI 기준에 의한 순단면파단내력이 실험종료시점에서 순단면파단으로 명확하게 분류되는 SA4D16E80의 실험내력에 근접하였다. 블록전단파단내력에 대해서는 재료의 전단항복을 고려하는 KBC/AISC/AISI와 EC3 기준식은 실험내력을 각각 평균 41%, 40% 과소평가하였고 재료의 전단최대강도를 고려하는 AIJ와 Teh and Deierlein의 블록전단파단내력식은 실험내력에 근접한 값을 제시하는 것으로 나타났다.

이 연구결과로부터 이면전단 볼트접합부의 설계식은 대부분 탄소강의 재료적 성질을 반영하여 실험과 해석결과로부터 제시되었다는 것을 확인하였고 냉간성형 스테인리스강 기준 ASCE 또한 최근의 스테인리스강 연구결과가 반영되지 않았기 때문에 파단형태별 실험내력과 설계내력에 있어 차이가 발생한 것으로 판단된다.

추후, 재료시험 및 실험 결과를 토대로 스테인리스강 이면전단 볼트접합부의 유한요소해석모델을 구축하여 하중방향 연단거리, 하중직각방향 연단거리, 평판두께 등을 변수로 추가해석을 통해 변수별 파단형태 경계조건을 조사하고 수정된 내력평가식을 검토할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 2018년도 한국연구재단 연구비 지원에 의한 결과의 일부임(NRF-2018R1D1A1B07046021).

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] Standards Australia/Standards New Zealand (2001) *Cold-Formed Stainless Steel Structures* (AS/NZS 4673: 2001), Australia.
 [4] Korea Construction Standards Center (2017) *General Rules for Steel Structure Design (Load Resistance Factor Design)*, KDS 14 31 10: 2017, Korea (in Korean).
 [5] KSSC (2020) *Design of Stainless Steel Structures*, Gumiseogwan, Korea (in Korean).
 [6] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2022) *Design Specification of Cold-formed Stainless Steel Structures* (KDS 41 30 40, Draft) Korea (in Korean).
 [7] 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. 211-217 (in Korean).
 [8] 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).
 [9] 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).
 [10] 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).
 [11] 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 (in Korean).
 [12] 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 (in Korean).
 [13] 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 the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.33, No.1, pp.41-48 (in Korean).
 [14] Kim, T.S., Hwang, B.K., and Lim, Y.C. (2020)

- Development on Ultimate Strength Equation of Ferritic Stainless Steel (STS430) Two-Bolted Connection, *Advances in Structural Engineering*, Sage, Vol. 23. No.6, pp.1209-1223.
- [15] 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).
- [16] Kang, H.S., and Kim, T.S. (2019) Experimental Study on Structural Behaviors of Duplex Stainless Steel (STS329FLD) Bolted Connections with Four Bolts, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.31, No.1, pp.13-22 (in Korean).
- [17] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2019) *Korean Building Code for Steel Structures* (KDS 41 30 00: 2019), Korea (in Korean).
- [18] American Institute of Steel Construction (2016) *Specification for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 360-16), USA.
- [19] 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 (1996) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-3: General Rules - Supplementary Rules for Cold-Formed Thin Gauge Members and Sheet Piling* (ENV 1993-1-3), Belgium.
- [22] European Committee for Standardization (2005) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-8: Design of Joints* (EN 1993-1-8: 2005), Belgium.
- [23] Teh, L.H., and Clements, D.D.A. (2012) Block Shear Capacity of Bolted Connections in Cold-Reduced Steel Sheets, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.138, No.4, pp.459-467.
- [24] Teh, L.H., and Deierlein, G.G. (2017) Effective Shear Plane Model for Tearout and Block Shear Failure of Bolted Connections, *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction, Vol.54, No.3, pp. 181-194.
- [25] Korean Agency for Technology and Standards (2015) *Cold Rolled Stainless Steel Plates, Sheets and Strip* (KS D 3698: 2015), Korea (in Korean).

요약: 이 연구는 국내 스테인리스강 구조설계기준을 작성하기 위해 기초연구로서 건축구조물에 가장 많이 사용되고 있는 오스테나이트계 스테인리스강 STS304로 제작된 이면전단 볼트접합부의 파단형태와 최대내력의 구조거동을 조사하는 것을 연구 목적으로 한다. 주요변수는 볼트배열과 하중방향연단거리이고 총 10개의 실험체가 제작되었다. 2행 1열의 볼트접합부에서는 가장 짧은 하중방향 연단거리를 갖는 실험체에서는 종전단파단이 발생하였고 그 외 실험체는 블록전단파단이 관찰되었다. 2행 2열 볼트접합부에서는 가장 긴 하중방향 연단거리를 갖는 실험체에서는 전형적인 순단면 인장파단이, 그 외 실험체에서는 블록전단파단형태가 발생되었다. 현행설계기준식과 기존연구자 제안식에 의한 스테인리스강 이면전단 볼트접합부 설계내력과 실험최대내력을 비교하였다. 그 결과, 볼트배열에 따른 블록전단파단내력식을 평가하는데 있어 개선이 필요하다는 것을 확인하였다.

핵심용어: 오스테나이트계 스테인리스강, 이면전단, 볼트접합부, 볼트배열, 블록전단, 설계기준
