

용접방향에 따른 오스트나이트계 스테인리스강(STS304L) 용착금속파단 용접접합부의 내력에 관한 실험적 연구

김태수¹, 이후창², 황보경², 조태준^{3*}

Experimental Study on Strength of Austenitic Stainless Steel (STS 304L) Fillet-Welded Connection with Weld Metal Fracture According to Welding Direction

Tae Soo Kim¹, Hoochang Lee², Bokyung Hwang², Taejun Cho^{3*}

Abstract: Austenitic stainless steels have excellent corrosion resistance, durability and fire resistance. Especially, since STS304L among austenitic types is a low-carbon variation of STS304 and has excellent intergranular corrosion resistance, it can often be used under the welded condition without heat treatment after field welding. This paper investigated ultimate behaviors such as ultimate strength and weld metal fracture mechanism of STS304L fillet-welded connections with TIG(tungsten inert gas) welding through test results. Main variables of specimens are weld length and welding direction against loading. Fracture of specimens are classified into three modes(tensile fracture, shear fracture and block shear fracture). Ultimate strengths were compared according to the welding direction and weld length and TFW series with transverse fillet weld had the highest strength compared with other types(LFW series with longitudinal fillet weld and FW series with all round weld). It is known that current design specifications such as KBC 2016 and AISC2010 underestimated the strength of TFW and LFW specimens and provided unconservative estimates for FW specimens. Finally, strength equations were proposed considering material properties of STS 304L material.

Keywords: Austenitic stainless steel(STS304L), Weld length, Welding direction, Weld metal fracture, Design specification

1. 서 론

건축물의 외장재뿐만 아니라 별도의 마감재가 필요없고 외기에 노출된 건축구조부재의 구조용 재료로써 스테인리스강이 널리 사용되고 있다. 그러나, 한국건축구조설계규준에서는 스테인리스강이 구조용 강재로 지정되어 있지 않으며, 최근에 국내 강구조기준(AIK, 2016a)과 한계상태 설계법인 미국 ASCE기준(ASCE, 2002)을 준용하여 설계되고 있는 실정이다. 용접접합부 설계시 ASCE기준에서는 용접봉 또는 용착금속의 강도를 고려해서 모재강도와 비교하여 최솟값을 용접부의 접합강도로 산정하고 있다. 그래서, 용접접합부 강도를 계산하는 구조기술자가 용접봉 및 용착금속의 강도를 평가하는데 어려움을 겪고 있다.

Jo et al.(2006)에 의해 SM520-TMC 고강도강 극후판에 대

상으로 모재의 두께(20 mm, 60 mm, 82 mm)와 용접치수(6 mm, 8 mm, 16 mm)에 따른 필릿용접부의 용착금속의 파단강도에 관한 실험적 연구를 수행하였고, 실험내력이 기준내력보다 1.3~2.4배 크게 나타났고 하중방향이 용접축에 직각인 접합부가 평행인 접합부보다 내력이 크다는 것을 알았다.

또한, 페라이트계 스테인리스강(STS430)으로 제작된 모재 블록전단파단에 관한 실험적 연구가 수행되어 실험내력이 현행 기준식에 의한 모재 블록전단파단내력보다 최대 93% 크게 나타났다(Kim, 2016b).

오스테나이트계 스테인리스강 중 우수한 내식성 및 내구성으로 건축분야에서 가장 많이 사용되고 있고 대표되는 STS304(Cr 18%-Ni 8%)는 현장에서 용접 후 열처리를 실시하지 않는 경우 용접손상이 발생할 수 있다. 그래서, 고열에 노출될 시 내입계부식 성능을 향상시키기 위해 탄소함유량을 줄이고 니켈함유량을 높인 STS304L이 적용될 수 있다. 국내의 건축구조기준인 KBC2009(AIK, 2009)에서는 용접접합부의 내력평가 시 모재항복강도 기준으로 용접부를 설계하였으나 최근에 개정고시된 KBC2016(AIK, 2016a)에서는 모재강도뿐만 아니라 용접재(용착금속)의 강도를 고려하여 용접부의 설계강도를 산정해야 한다. 본 연구에서는 고내입계 부식성능의 오

¹정회원, 한밭대학교 건축공학과, 교수

²학생회원, 한밭대학교 건축공학과, 석사과정

³정회원, 대전대학교 건설시스템공학과, 교수, 교신저자

*Corresponding author: taejun@daejun.ac.kr

Department of Civil Engineering, Daejin University, Pocheonm 11159, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

스테나이트계 스테인리스강 STS304L를 대상으로 용접방향과 용접길이를 변수로 하여 용착금속부가 과단되는 필릿 용접접합부를 제작하여 구조적 거동을 파악하고자 한다. 필릿 용접접합부의 과단형태 및 최내내력을 고찰하고, 현행 설계기준식의 타당성을 검증하고 수정된 내력식을 제안하는 것을 연구목적으로 한다.

2. 필릿 용접접합부 용접재 강도설계식

2.1 KBC2016과 AISC2010 기준식

국내의 구조설계기준 KBC2016(AIK, 2016a)과 미국강구조학회의 AISC2010(2010)에서는 용접부의 설계강도를 모재의 한계상태와 용접재(용착금속부)의 한계상태 강도 중 작은 값으로 산정하고 있다. 본 연구에서는 용착금속부의 내력평가에 초점을 두므로 용접재 강도에 대해 기술한다. 식 (1)과 같이 용접재(용착금속부)의 유효단면적(A_{we})에 용접재의 공칭강도(F_{nw})를 곱한 값을 필릿용접부의 용접재 강도(P_n)로 산정하고 있다. KBC2016에서는 필릿용접의 용접재 강도 산정에 있어 용접선의 하중방향에 대한 구분이 없이, 하나의 설계기준식을 규정하고 있으나, AISC2010에서는 용접선이 하중방향에 평행하고 수직인 조합 용접접합부에 대해 식 (2)와 (3) 중 큰 값을 용착금속부 내력으로 산정한다.

$$P_n = A_{we} F_{nw} \quad (1)$$

여기서, A_{we} (용접재의유효단면적) $=a l_e$, F_{nw} (용접재공칭강도) $=0.6 F_{uw}$, a (유효목두께) $=0.7s$, l_e (유효용접길이) $=l - 2s$, s : 필릿사이즈, F_{uw} : 용접재인장강도, l : 용접길이

$$P_n = P_{nwl} + P_{nwt} \quad (2)$$

$$P_n = 0.85P_{nwl} + 1.5P_{nwt} \quad (3)$$

여기서, P_{nwl} = 하중방향 용접강도(전단파단강도)
 P_{nwt} = 하중직각방향 용접강도(인장파단강도)

필릿용접부에서 하중방향 용접강도와 하중직각방향 용접강도산정에서 용접재 공칭강도(F_{nw})는 동일하게 $0.6 F_{uw}$ 을 적용한다.

2.2 ASCE 기준식

미국토목학회 ASCE(2002)의 냉간성형 스테인리스강 기

준에서는 필릿용접부의 설계기준강도(P_n)를 산정하는 데 있어 하중방향용접(용접선이 하중방향과 평행)과 하중직각방향용접(용접선이 하중방향과 직각)으로 구분하고 있으며 또한, 각 용접방향에 대해 용접부의 모재파단과 용접재(용착금속부)파단으로 재분류하여 강도를 산정한다. 아래에 용접재(용착금속부)가 과단되는 경우 내력식을 정리한다.

① 하중방향용접(For longitudinal fillet weld, 전단파단)

$$P_n = 0.75 a l_{ev} F_{uw} \quad (4)$$

② 하중직각방향용접(For transverse fillet weld, 인장파단)

$$P_n = a l_{et} F_{uw} \quad (5)$$

여기서, a (유효목두께) $=0.707s$, l_{ev} = 용접재 전단유효길이, l_{et} = 용접재 인장유효길이

3. 스테인리스강 용접접합부 실험계획

3.1 실험계획 및 제작

오스테나이트계 스테인리스강 STS304L을 사용하여 총 12개의 필릿용접 접합부 실험체를 계획·제작하였다. Table 1에 실험체명, 모재두께(t_n), 공칭용접사이즈(s_n) 및 용접길이(l_1 , l_2)를 나타낸다. Fig. 1과 같이 중앙의 공칭두께 10 mm 평판의 양쪽에 공칭두께 6 mm 평판 두 개를 필릿용접사이즈 3 mm로 용접한다. 용접 접합부의 주요변수는 Fig. 2와 같이 하중에 대

Table 1 List and geometry of specimens

Specimen	Nominal thickness of base metal t_n (mm)	Fillet size s_n (mm)	Weld length (mm)		Total weld length $l_t = 2(l_1 + l_2)$ (mm)
			l_1	l_2	
SALTFW40-1	6.0	3.0	40	-	80
SALTFW40-2					
SALTFW80-1			80	-	160
SALTFW80-2					
SALLFW40-1			-	80	160
SALLFW40-2					
SALLFW80-1			-	160	320
SALLFW80-2					
SALFW40-1			40	80	240
SALFW40-2					
SALFW80-1			80	160	480
SALFW80-2					

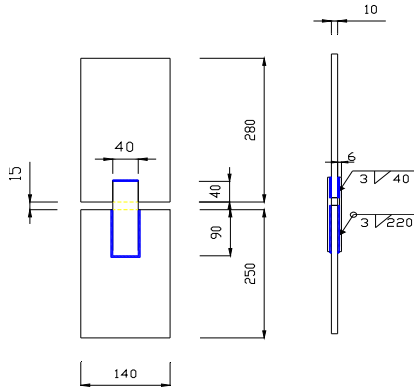


Fig. 1 Geometry of specimen for SALTFW40(Unit : mm)

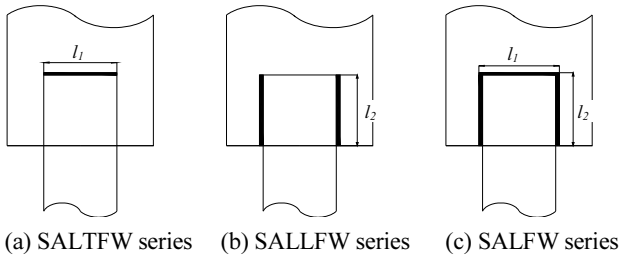


Fig. 2 Specimen series according to the welding direction for loading

한 용접선의 방향(하중직각방향 용접: TFW, 하중방향 용접: LFW, 하중직각방향 용접과 하중방향 용접의 조합: FW)과 용접길이(40 mm, 80 mm)이다. 용접방법으로 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding) 중에 박판 스테인리스강 용접에 사용되는 TIG(Tungsten Inert Gas)용접을 사용하여 각 실험체마다 2개씩 제작하였다. Table 1의 실험체명에서 ‘SALTFW’, ‘SALLFW’, ‘SALFW’는 각각 하중방향과 용접선이 직각인 실험체(Transverse Fillet Weld), 하중방향과 용접선이 평행한 실험체(Longitudinal Fillet Weld), 하중방향과 하중직각방향의 3면이 용접된 실험체(Full Fillet Weld)를 나타내며, 맨 앞의 ‘SAL’은 저탄소강(Low Carbon) 오스테나이트계 스테인리스강(Austenitic Stainless Steel) 그리고 숫자 ‘40’, ‘80’은 용접길이를 의미한다.

3.2 재료시험 및 실험방법

탄소함유량을 줄이고 니켈함유량을 높여 내입계 부식성을 향상시킨 오스테나이트계 스테인리스강 STS304L의 기계적 성질을 파악하기 위하여 KS B 0801(KS, 2007a)에 따라 Fig. 1의 양쪽에 위치한 STS304L의 6 mm판에 대해 인장시험편을 3개씩 제작하였다. 중앙의 10 mm 평판에 대해서는 별도의 재료시험을 수행하지 않았다. 재료인장시험 결과 얻어진 응력-변형도 곡선을 Fig. 3에 나타냈다. 스테인리스강은 탄성역 이후에 응력-변형도 곡선상에서 접선탄성계수가 급격하게 저하되어 0.2% offset 방법에 의해 항복강도를 산정하면

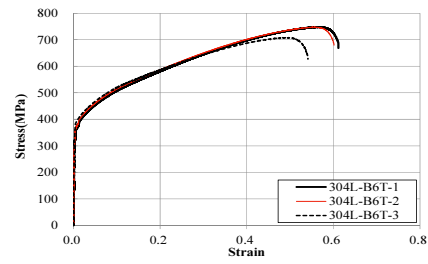
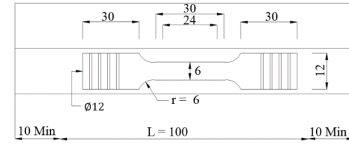


Fig. 3 Stress-strain curves for materials(STS304L) for 6.0 mm thick plate



(a) Drawing of weld metal cut tensile coupon



(b) Weld metal cut tensile coupon

Fig. 4 All weld metal test specimen and cut tensile coupon

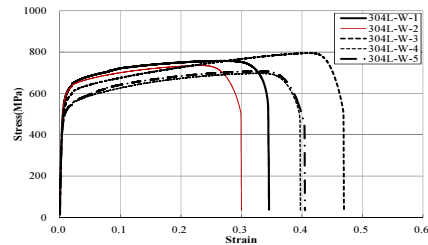


Fig. 5 Stress-strain curves for welded materials(STS304L)

일반탄소강에 비해 항복강도의 상승정도가 높게 나타난다.

그래서 국부좌굴에 대한 폭두께비의 보수적인 값을 제공하기 위해서 스테인리스강의 항복강도 산정에 있어 일본의 JIS Z 4321(JIS, 2000)에 따라 0.1% offset방법을 채용한다. 평균 항복강도(F_y)는 346.70 MPa, 인장강도(F_u)는 734.00 MPa, 탄성계수는 193.06 GPa, 항복비(F_y/F_u)는 47.02%, 연신율(EL)은 58.50%로 나타났다. 오스테나이트계 스테인리스강은 탄소강에 비해 항복비는 낮고 연신율이 높아 에너지 흡수능력이 우수하여 구조용 재료로 우수하다.

3.3 용착금속 재료시험

용착금속(용접재)의 기계적 성질을 파악하기 위해 KS B 0821(KS, 2007b)에 따라 Fig. 4와 같이 용착금속 인장시험편을 비드(Bead) 부분기준으로 해서 인장시험편을 5개씩 제작

Table 2 Coupon test results for STS304L weld metal

Coupon	Measured diameter D (mm)	Young's modulus E (GPa)	0.1% off-set Yield stress F_{yw} (MPa)	Tensile strength F_{uw} (MPa)	Yield ratio F_{yw}/F_{uw} YR(%)	Elongation EL(%)
304L-W-1	2.48	173.63	418.98	758.17	55.26	44.06
304L-W-2	2.48	177.25	442.33	735.84	60.11	40.19
304L-W-3	2.47	173.31	393.54	795.81	49.45	69.10
304L-W-4	2.46	170.60	370.32	697.90	53.06	53.13
304L-W-5	2.46	168.50	380.75	708.11	53.77	54.68
Average	2.47	172.66	401.19	739.17	54.33	52.23
COV	0.004	0.019	0.073	0.053	0.071	0.215

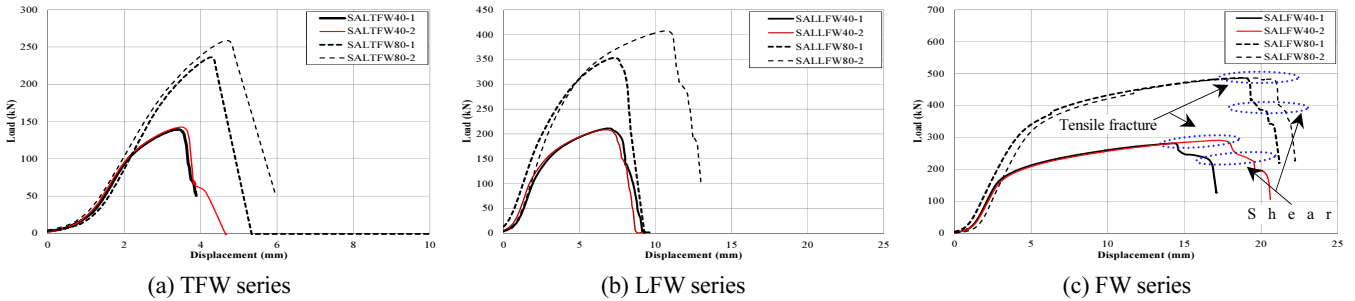


Fig. 6 Load-displacement curves of welded specimens

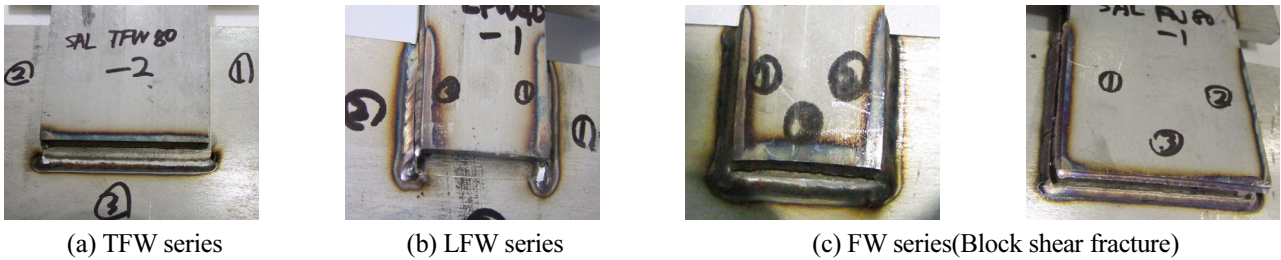


Fig. 7 Fracture shape of specimen in each series

하였다. 인장시험을 수행한 결과를 Fig. 5와 Table 2에 정리하였다. 평균항복강도(F_{yw})는 401.19 MPa, 인장강도(F_{uw}) 739.17 MPa, 탄성계수(E)는 172.66 GPa, 항복비(F_{yw}/F_{uw})는 54.33%, 연신율은 52.23%로 나타났다. 모재부분과 비교한 결과, 항복강도, 인장강도와 항복비는 약간 높게 나타났으며 탄성계수와 연신율은 낮은 경향을 보였다.

4. 접합부 실험결과

4.1 파단형상 및 최대내력

Figs. 6과 7은 각각 실험결과로부터 얻어진 하중-변위곡선과 실험종료시점에서 관찰된 대표적인 파단형태를 나타낸다. 용접선이 하중방향과 수직인 용접실험체 SALTFW시리즈는

용착금속부의 인장파단(Tensile fracture, Fig. 7(a)참조), 용접선이 하중방향과 평행인 SALLFW시리즈는 용착금속부의 전단파단(Shear fracture, Fig. 7(b)참조), 그리고 하중직각방향과 하중방향으로 모두 용접된 SALFW시리즈는 인장파단과 전단파단이 조합된 블록전단파단(Block shear fracture, Fig. 7(c)참조)이 발생하였다. Fig. 6의 하중-변위 곡선으로부터 SALTFW시리즈, SALLFW시리즈, SALFW시리즈의 실험체는 각각 인장파단, 전단파단, 전면부 인장파단후 측면부 전단파단에 의해 내력이 급격하게 저하되는 것을 알 수 있다.

Table 3에 실험결과 얻어진 최대내력(P_{ue})과 각 실험체의 용접부에서 측정된 필릿용접의 유효목두께(a_{em})를 정리하였다. 용접방향 및 용접길이에 따른 최대내력을 비교하기 위해 각 실험체에서 실측된 유효목두께(a_{em})에 대한 최대내력을 공칭용접치수($s_n=3.0$ mm)에 대한 유효목두께($a=0.7s_n$)에

Table 3 Test results

Specimen	Test ultimate strength P_{ue} (kN)	Measured average throat thickness(a_{em}) (mm)	Modification factor(α) a/a_{em}	Modified strength P_{uem} (kN)
SALTFW40-1	139.55	2.45	0.86	119.53
SALTFW40-2	142.61	2.30	0.91	130.11
SALTFW80-1	236.18	2.48	0.85	199.86
SALTFW80-2	258.68	2.37	0.89	229.37
SALLFW40-1	221.21	2.10	1.00	221.71
SALLFW40-2	208.54	2.11	1.00	207.56
SALLFW80-1	353.47	2.02	1.04	367.11
SALLFW80-2	407.17	2.02	1.04	422.91
SALFW40-1	281.73	2.04	1.03	290.68
SALFW40-2	291.53	2.14	0.98	285.76
SALFW80-1	486.86	2.14	0.98	477.23
SALFW80-2	486.24	2.16	0.97	473.29

Table 4 Strength ratio according to weld length

Specimen	Mean strength P_{uem} (kN)	Strength ratio ($P_{uem-l=80}/P_{uem-l=40}$)	Ultimate strength fracture shape
SALTFW40	124.82	1.72	Tensile crack
SALTFW80	214.61		
SALLFW40	214.63	1.84	Shear crack
SALLFW80	395.01		
SALFW40	288.22	1.65	Tensile + Shear crack
SALFW80	475.26		
Average		1.74	
COV		0.056	

대하여 보정한다. 용접접합부의 인장과 전단파단은 유효목두께에서 발생하므로 실측유효목두께(a_{em})를 공칭용접치수에 대한 유효목두께($a = 0.7s_n = 2.1 \text{ mm}$)로 나눈 보정비($\alpha = a/a_{em}$)를 실험최대내력(P_{ue})에 곱하여 보정최대내력(P_{uem})을 산정하였다.

4.2 실험결과와 최대내력 비교

Table 4에서 용접길이가 80 mm인 실험체의 최대내력을 용접길이가 40 mm인 실험체의 최대내력으로 나눈 용접방향별 용접길이에 따른 평균내력비($P_{uem-l=80}/P_{uem-l=40}$)를 평가하였다. 평균내력비는 1.65~1.84의 범위를 나타냈으며, 동일용접방향에 대해서 용접길이가 2배 증가했음에도 불구하고 용접부 실험결과에서는 내력상승은 2배에 미치지 못했다. 하중방향에 대한 용접선의 배치차이에 따른 내력을 비교하기 위해서 Table 1의 총 용접길이를 기준으로 Table 4의 보정평균 최대내력을 Table 5의 관계식에 의해 내력비를 산정하였다.

Table 5 Strength ratio according to weld direction

Equation of weld length for strength ratio according to weld direction	Strength ratio	Average strength ratio
SALLFW40/(SALTFW40*2)	0.86	0.89
SALLFW40/(SALTFW80*2)	0.92	
SALFW40/(SALTFW40*3)	0.77	0.75
SALFW80/(SALTFW80*3)	0.74	
SALFW40/(SALLFW40*1.5)	0.90	0.85
SALFW80/(SALLFW80*1.5)	0.80	
SALFW40/(SALTFW40+SALLFW40)	0.85	0.81
SALFW80/(SALTFW80+SALLFW80)	0.78	

동일 용접길이에 대해 SALTFW(하중직각방향용접)에 대한 SALLFW(하중방향용접)의 비는 전체 실험체 평균 0.89으로 하중직각방향 용접인 인장파단강도가 평균 11% 높게 나타났다. 블록전단파단된 3면 용접 SALFW 실험체의 내력에 대한

SALTFW 실험체와 SALLFW 실험체의 내력 또는 조합배치에 의한 내력의 비는 0.74~0.90의 범위로 나타났고, 이로부터 블록전단파단된 SALFW의 용접실험체의 내력이 다른 용접방향의 실험체보다 내력이 10%~26% 낮은 것을 알 수 있다.

정리하면, 하중방향에 대한 용접선의 배치에 따른 내력은 SALTFW 실험체가 가장 높았고, SALFW 실험체가 가장 낮게 나타났다.

5. 기준식 비교 및 내력식 제안

5.1 기준식 비교

Table 3의 실측 평균목두께(a_{em})를 반영하여 KBC2016[1]/AISC2016[6]과 ASCE2002[2]의 설계기준식에 의하여 산정한 설계내력(P_n)과 실험을 통하여 얻은 실험 최대내력(P_{uc})을 비교하여 Table 6에 나타냈다. 2.1절에서 언급한바와 같이 SALTFW와 SALLFW 실험체에 대한 필릿용접부의 용착금속강도 계산시 KBC2016기준은 AISC2010기준과 동일하게 용접선의 방향과 상관없이 용착금속의 전단강도($=0.6F_{uw}$)를 기준으로하고 있다. ASCE2002기준의 경우 용접부의 용착금속파단이 하중방향용접(전단파단)과 하중직각방향용접(인장파단)으로 구분하여 규정되어 있다. ASCE2002기준에서는 AISC2010과는 달리 인장파단에서는 용접재 인장강도인 F_{uw} 를, 전단파단에서는 전단강도인 $0.75F_{uw}$ 를 적용한다. 용접재

(용착금속)에서 블록전단파단(인장파단과 전단파단의 조합)되는 SALFW 실험체의 강도산정에 대해 AISC2010에서는 식 (2)와 (3)으로 규정하고 있지만, KBC2016과 ASCE2002에서는 별도로 규정되어 있지 않다. 그래서, ASCE2002의 식 (4)와 (5)의 합으로 블록전단파단내력을 하여 실험최대내력과 비교하였다. 용접접합부에서 실측된 유효목두께와 용접길이을 적용하여 기준내력을 계산하였다. Table 8에서 P_{uc} 는 실험 최대내력, P_n 은 현행기준식에 의한 필릿용접부 용착금속부 파단의 설계내력이다.

SALTFW와 SALLFW 실험체의 실험최대내력(P_{uc})에 대한 설계기준내력(P_n)의 최대내력비(P_n/P_{uc}) AISC2010/KBC2016에 의해 0.64~0.90의 분포(평균 0.70)를 나타냈고, ASCE기준에 의해서는 0.89~1.20의 분포를 보였다. AISC2010는 SALTFW와 SALLFW 실험체 내력을 과소평가하고 있고, ASCE2002는 편차는 있지만 평균 최대내력비가 1.01로 양호한 대응을 보여주고 있다. SALFW 실험체에 대해서는 두 기준 모두 과대평가하는 경향을 보였다.

5.2 하중방향(SALLFW)과 하중직각방향(SALTFW)의 필릿용접접합부의 내력식 고찰

SALTFW와 SALLFW 실험체에 대해 AISC2010의 필릿용접접합부의 용착금속파단에 대한 설계강도는 Table 9에서 알 수 있듯이 과소평가하고 있고 파단형태에 따라 기준식을 분리하고 있는 스테인리스강 구조설계기준인 ASCE2002의 식이 일부 실험체를 제외하고는 근접한 내력을 예측하고 있다. SALTFW 실험체와 SALLFW 실험체에 대해 최대내력비(P_n/P_{uc}) 평균은 각각 1.04, 0.99로 나타났다. 그 결과, 하중방향으로 용착금속부가 전단파단되는 SALLFW의 접합부는 ASCE의 식 (4)을 그대로 적용하는 것이 적절하며 SALTFW의 접합부에 대해서는 내력식에 대한 수정을 고찰해 볼 필요가 있다.

식 (5)은 용접재(용착금속) 유효단면적(a_{et})과 용접재 인장

Table 6 Strength comparison of test results and design predictions

Specimen	Test ultimate strength P_{uc} (kN)	Nominal strength of Fillet weld (P_n)		Strength ratio (P_n/P_{uc})	
		AISC 2010	ASCE 2002	AISC 2010	ASCE 2002
		SALTFW40-1	139.55	83.56	139.27
SALTFW40-2	142.61	76.57	127.61	0.54	0.89
SALTFW80-1	236.18	169.68	282.80	0.72	1.20
SALTFW80-2	258.68	163.43	272.38	0.63	1.05
SALLFW40-1	221.21	157.14	196.43	0.74	0.93
SALLFW40-2	208.54	149.20	186.50	0.72	0.89
SALLFW80-1	353.47	317.56	396.95	0.90	1.12
SALLFW80-2	407.17	324.02	405.03	0.80	0.99
SALFW40-1	281.73	284.86	314.22	1.01	1.12
SALFW40-2	291.53	292.47	322.83	1.00	1.11
SALFW80-1	486.86	634.72	690.54	1.30	1.42
SALFW80-2	486.24	610.30	663.83	1.26	1.37
Average				0.85	1.09
COV				0.329	0.137

Table 7 Strength comparison of test results and proposed design strength for SALTFW series

Specimen	Test ultimate strength P_{uc} (kN)	Proposed strength P_{np} (kN), Eq.(6)	Proposed strength (P_{np}/P_{uc})
SALTFW40-1	139.55	132.31	0.95
SALTFW40-2	142.61	121.23	0.85
SALTFW80-1	236.18	268.66	1.14
SALTFW80-2	258.68	258.76	1.00
Average			0.98
COV			0.122

Table 8 Strength comparison of test results and proposed design strength for SALFW series

Specimen	Test ultimate strength P_{ue} (kN)	Proposed strength P_{np} (kN)			Proposed strength(P_{np}/P_{ue})		
		Eq.(7)	Eq.(8)	Eq.(9)	Eq.(7)	Eq.(8)	Eq.(9)
SALFW40-1	281.73	314.22	278.10	274.27	1.09	1.12	0.97
SALFW40-2	291.53	322.83	285.78	281.97	1.08	1.11	0.97
SALFW80-1	486.86	690.54	608.65	594.48	1.39	1.42	1.22
SALFW80-2	486.24	663.83	585.06	571.35	1.34	1.37	1.18
Average					1.23	1.25	1.08
COV					0.093	0.090	0.098

강도(F_{uw})의 곱으로 구성되며 유효인장응력계수(f_{et})가 1.0이다. AISC의 식 (3)에서는 블록전단파단의 인장응력계수를 0.85로 하고 있으며, 본 연구에서도 기준식내력의 안전측을 고려하여 실험결과와 식 (5)를 토대로 유효인장응력계수를 $P_{ue}/(a_{et}F_{uw})$ 의 평균에 근사한 값이 0.95로 설정하였고 하중직각방향 용접의 인장파단내력은 식 (6)과 같이 제안하였다. Table 7에 식 (6)에 의한 예측내력과 실험내력을 비교한 결과를 정리하였다.

- 하중직각방향용접(For transverse fillet weld)

$$P_{np} = 0.95a_{et}F_{uw} \quad (6)$$

5.3 하중방향과 하중직각방향의 용접이 조합된(SALFW) 필릿용접접합부의 내력식

AISC2010과 ASCE2002 기준식에 의해 용접재(용착금속)의 인장파단과 전단파단의 조합인 블록전단파단이 발생된 SALFW 실험체의 내력이 과대평가되고 있다. 그래서, 본 절에서는 다음과 같은 다양한 조합의 식을 고찰해 본다. 하중방향용접(전단파단)과 하중직각방향용접(인장파단)의 설계강도식인 식 (4)와 (5)의 조합(식 (7)), 인장파단에 대해 수정된 내력식인 식 (6)과 식 (4)의 조합(식 (8)) 그리고 AISC2010기준의 모재 블록전단파단식(식 (10))을 적용한다.

AISC2010기준의 블록전단기준식은 용접부의 모재파단에 대한 규정으로 용착금속파단에 관한 내력식이 규정은 아니다. 그래서 기존에 블록전단기준식에 인장저항순단면적(A_{nt})을 용착부분 인장저항순단면적(A_{wt})으로, 전단저항순단면적(A_{nv})을 용착부분 전단저항순단면적(A_{wv})으로 변경하였다.

$$P_{np} = a_{et}F_{uw} + 0.75a_{ev}F_{uw} \quad (7)$$

$$P_{np} = 0.95a_{et}F_{uw} + 0.75a_{ev}F_{uw} \quad (8)$$

$$P_{np} = F_{uw}A_{wt} + 0.6F_{uw}A_{wv} \quad (9)$$

여기서, A_{wt} = 용접재 인장저항유효단면적

A_{wv} = 용접재 전단저항유효단면적

식 (7), (8)과 (9)에 의한 예측내력(P_{np})과 실험최대내력(P_{ue})과의 최대내력비(P_{np}/P_{ue})를 Table 8에 정리하였다. 상기 3식에 의한 평균최대내력비는 1.23, 1.25, 1.08로 나타났으며, 용착금속부에서 블록전단파단되는 용접접합부의 최대내력을 과대평가하는 경향을 보였다.

4.2절에서 검토된 바와 같이 SALTFW(인장파단), SALLFW(전단파단), SALFW(블록전단파단)의 실험체중 동일 용접길 이로 변환한 내력을 비교해 봤을 때 SALFW 시리즈가 가장 낮은 내력을 보였다. 이로부터 용접재의 블록전단파단 내력을 평가하는데 있어 용접재의 인장파단강도식과 전단파단강도식의 단순 누가하는 방법은 적절하지 않는 것으로 판단된다.

Topkaya(2004, 2007c)는 탄소강으로 제작된 용접접합부의 모재부분에서 블록전단파단 거동에 관하여 실험 및 해석적 연구결과를 토대로 현행기준식의 블록전단파단내력식과 상이한 식 (10)을 제안하였다. 용접접합부의 구조거동은 응력삼축효과로 인장파단거동시 하중방향으로만 응력이 집중되는 것이 아니라 하중직각방향과 두께방향으로 구속력이 발생되어 하중방향 응력은 줄어들고 하중직각방향과 두께방향으로 응력이 증가되어 하중방향의 인장파단강도가 증가하는 현상을 나타낸다. 이 결과를 토대로 Topkaya는 1.25배 증가된 인장응력을 확인하여 다음과 같은 식을 유도하였다.

$$P_n = 1.25F_uA_{gt} + \frac{F_u}{\sqrt{3}}A_{gv} \quad (10)$$

본 연구는 용접접합부에서 용접재(용착금속부)파단의 구조적 거동에 초점을 두므로 모재부분의 파단에 대한 식 (10)을 그대로 적용할 수 없다. 그래서, 모재인장강도(F_u)대신 용착금속의 강도(F_{uw} , F_{yw})로 대체하고, 모재와 용접재의 경계부분에서 인장저항총단면적(A_{gt})과 전단저항총단면적(A_{gv})

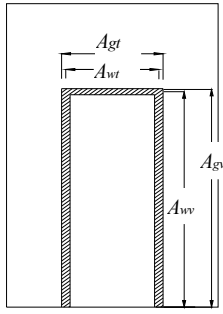


Fig. 8 Block shear fracture section in welded connection

Table 9 Strength comparison of test results and proposed design strength for SALFW series

Specimen	Test ultimate strength	Proposed strength		Strength ratio	
	P_{ue} (kN)	Eq.(11)	Eq.(12)	Eq.(11)	Eq. (12)
SALFW40-1	281.73	272.64	240.86	0.97	0.85
SALFW40-2	291.53	280.18	247.58	0.96	0.85
SALFW80-1	486.86	596.28	524.21	1.22	1.08
SALFW80-2	486.24	573.17	503.85	1.18	1.04
Average				1.08	0.95
COV				0.102	0.113

이 아닌 용착금속(비드부분)의 위험단면에서 인장저항순단면적(A_{wt})과 전단저항순단면적(A_{wv})을 적용하여 다음 식을 제안하였다(Fig. 8 참조). 식 (11)은 블록전단파단시 인장파단과 전단파단이 동시에 발생한다는 가정하에 용접재(용착금속)의 인장강도(F_{uw})만을 고려하고 있고, 식 (12)에서는 실험 결과에서 관찰된 파단의 순서에 따라 인장파단이 발생된 후 최대내력이 결정되고 추가적으로 전단파단되는 메카니즘으로 전단강도 산정시 용착금속의 항복강도와 인장강도 평균값($(F_{yw} + F_{uw})/2$)을 적용하였다.

$$P_{np} = F_{uw}A_{wt} + \frac{F_{uw}A_{wv}}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

$$P_{np} = F_{uw}A_{wt} + \frac{(F_{uw} + F_{yw})A_{wv}}{2\sqrt{3}} \quad (12)$$

상기 두식에 의한 예측내력(P_{np})과 실험내력(P_{ue})에 대한 최대내력비를 Table 9에 정리하였다. 식 (7), (8), (9)는 용착금속부의 블록전단파단강도를 전반적으로과대평가 하는 경향을 보였으나, 식 (11), (12)은 평균최대내력비가 각각 1.08, 0.95로 내력예측정도가 개선된 것을 알 수 있다. 특히, 전단강도 산정시 용접재의 인장강도 항복강도를 동시에 고려한 식

(12)이 가장 근접한 값을 제시하는 것으로 나타났다. 그러나, SALFW80 실험체는 식 (12)에 의해서 4~8%과대평가하는 경향을 보여 추후 추가적인 실험 또는 유한요소해석에 의한 변수해석을 통해 제안식의 타당성을 고찰할 필요가 있다.

6. 결론

내입계 부식성능을 갖는 저탄소 오스테나이트계 스테인리스강 STS304L 판두께 6 mm 평판을 필릿 용접사이즈 3 mm 로 TIG용접하여 용접재(용착금속부)가 파단되도록 실험체를 제작하였고 단순인장실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 하중방향에 대한 용접선의 배치에 따라 용접재(용착금속부)에서 인장파단, 전단파단, 블록전단파단이 발생하였다. 용접길이가 2배 증가하였을 때 내력은 평균 1.74배 증가하였고, 하중방향에 대한 용접선의 배치에 따른 내력은 SALFW실험체가 가장 높았고, SALFW실험체가 가장 낮았다.
 - 2) KBC2016(AISC2010)와 ASCE2002의 현행기준식에 의한 용접재(용착금속부)의 내력과 실험내력을 비교한 결과, KBC2016(AISC2010)는 TFW와 LFW 시리즈 접합부의 내력을 평균 30% 과소평가하였고, ASCE2002에 의한 평균 내력비는 1.01로 근접한 값을 제시한 것으로 나타났다. FW 시리즈 접합부의 내력에 대해서 현행기준식은 과대평가하였다.
 - 3) ASCE2002를 토대로 TFW 시리즈(인장파단)의 접합부에 대해서는 유효 필릿사이즈와 유효용접길이를 토대로 인장응력계수를 0.95로 조절한 내력식을 제안하였다. 블록전단파단된 FW 시리즈 접합부(하중직각방향 용접과 하중방향 용접의 조합)에 대해서는 ASCE의 인장파단식과 전단파단내력식을 조합한 식 (7), (8)와 AISC의 볼트 블록전단파단내력식을 수정한 식 (9)는 접합부의 내력을 8~25% 과대평가하였다. 그래서, 탄소강 용접접합부의 연구결과 제시된 Topkaya의 식 (10)을 참조하고 실제파단선의 위험단면과 전단파단시의 응력상태를 고려한 오스테나이트계 스테인리스강(STS304L) 용접접합부의 용착금속부의 블록전단파단식(식 (12))을 제안하였다.
- 추후, 실험결과를 토대로 유한요소해석 모델의 구축과 해석의 타당성을 확인하고 변수해석으로 본 연구에서 제시된 내력식의 검증은 할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단(교육부) 지역대학 우수과학자 지원사업(과제번호 : NRF-2015R1D1A3A01016603)하에 이루어진 연구결과의 일부임.

References

AIK (2009), Korea Building Code, Architectural Institute of Korea, Kimoodang (in Korean).
AIK (2016a), Korea Building Code, Architectural Institute of Korea, Kimoodang (in Korean).
American Institute of Steel Construction (AISC) (2010), Steel Construction Manual. AISC 325-11, Chicago, USA.
American Society of Civil Engineers (2002), Specification for the design of cold-formed stainless steel structural members, SEI/ASCE-8-02, USA
JIS (2000), Stainless Steel for Building Structure, JIS GZ 4321, Japan Industrial Standards, Tokyo.

Jo, J. B., Jung, K. S., and Lee, J. W. (2006), Effects of Plate Thickness and Weld Size on the Strength of Fillet Welded Lap Joints, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, 18(3), 331-337 (in Korean with English abstract).
Kim, T. S. (2016b), An Experimental Study on Block Shear Fracture of Base Metal in Ferritic Stainless Steel Welded Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, 28(5), 303-312 (in Korean with English abstract).
Korea Standard (2007a), Test pieces for tensile test for metallic materials, Korean Standards, KS B 0801, Seoul, Korea.
Korea Standard (2007b), Methods tension and impact tests for deposited metal, KS B 0821, Seoul, Korea.
Topkaya, C. A. (2004), Finite element parametric study on block shear failure of steel tension members, *Journal of Constructional Steel Research*, 60, 1615-1635.
Topkaya, C. A. (2007c), Block shear failure of gusset plates with welded connection, *Engineering Structures*, 29(1), 11-20.

Received : 08/18/2017

Revised : 10/14/2017

Accepted : 10/31/2017

요 지 : 오스테나이트계 스테인리스강은 우수한 내식성, 내구성 및 내화성을 지닌다. 특히, 오스테나이트계 스테인리스강중의 대표인 STS304에 비해 저탄소를 함유하고 있는 STS304L은 현장용접 후 별도의 열처리 없이 높은 내입계부식성을 지니고 있어 용접후 내입계 부식이 우려되는 부재 접합에 적용할 수 있다. 본 연구에서는 티그(TIG)용접으로 필릿 용접된 STS304L 용접접합부의 용접재(용착금속부) 내력과 파단 메카니즘을 조사하고자 한다. 주요변수인 하중방향에 대한 용접선의 배치에 따라 TFW(하중직각방향 용접), LFW(하중방향용접), FW(하중방향용접과 하중직각방향 용접조합)시리즈의 실험체를 제작하여 인장실험을 실시하였고, 각각 인장파단, 전단파단, 블록전단파단(인장파단과 전단파단의 조합)이 발생하였다. 동일 용접길이에 대해 TFW 시리즈의 접합부가 가장 높은 내력을 나타냈으며, 현행기준식(KBC2016/AISC2010)과 기존 연구자의 식에 의한 예측내력과 비교한 결과, TFW와 LFW접합부는 과소평가되었고 FW실험체는 과대평가되었다. 실제 파단 위험단면과 블록전단파단 메카니즘을 고려한 내력식을 제안하였다.

핵심용어 : 오스테나이트계 스테인리스강(STS304L), 용접길이, 용접방향, 용착금속파단, 설계기준
