

탄소강 용착금속 블록전단파단 용접접합부의 최대내력에 관한 실험적 연구

김태수¹ · 강현식^{2*}

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

An Experimental Study on Ultimate Strength of Carbon Steel Welded Connection with Weld Metal Block Shear Fracture

Kim, Tae Soo¹, Kang, Hyun Sik^{2*}

¹Professor, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

²Professor, Dept. of Architectural Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, Jinju, 52725, Korea

Abstract - The purpose of this study is to investigate the ultimate strength of carbon steel (SS400) fillet-welded connections with weld metal fracture not base metal fracture through monotonic tensile test. Main variables of the specimens are weld length and welding direction against applied force. Three types of specimens with transverse fillet weld against loading direction (CTFW series), longitudinal fillet weld against loading direction (CLFW series) and full fillet weld (CFW series) failed by tensile fracture, shear fracture and block shear fracture in the weld metal, respectively. Test strengths were compared with design strengths calculated by current design specifications (Korean Design Standard [KDS] and American Society of Steel and Construction [AISC]) and the design codes tended to underestimate the weld metal fracture strength of test results by up to 73 %.

Keywords - Carbon steel, Welded connection, Weld length, Welding direction, Weld metal fracture, Design code

1. 서론

최근 개정된 건축구조기준(KBC 2016)^[1]과 국가건설기준센터의 국가건설기준(KDS 41 31 00, 건축물 강구조설계기준)^[2]에서 강구조 용접접합부의 설계강도는 모재의 인장파단, 전단파단 한계상태에 의한 강도와 용접재(용착금속부) 파단한계상태 강도 중 작은 값으로 산정해야 하는 것으로 규정하고 있다. 용접접합부의 모재와 용착금속이 파단되는 형태는 현행기준에 언급한 바와 같이 인장파단과 전단파단 외에 인장파단과 전단파단의 조합인 블록전단파단

(block shear fracture)도 발생할 수 있으나 이에 대한 설계식은 부재한 상태이다.

탄소강 용접접합부에서 블록전단파단내력에 관한 기존 연구로 Topkaya^{[3],[4]}와 Oosterhof and Driver^[5]는 탄소강(SM400급과 SM490급)으로 제작된 용접접합부에서 용착금속이 아닌 모재파단에 관한 실험 및 해석적 연구를 수행하였다. 미국강구조학회 기준인 AISC 2005^[6]는 블록전단파단내력을 16 % 정도 과소평가한다는 것을 확인하였다. 용접접합부에서만 발생가능한 두께방향과 하중직각방향의 구속작용인 응력삼축작용효과(stress triaxiality effect)를 고려해서 인장파단내력 계산시 증폭된 인장응력계수(= 1.25)가 반영된 수정내력식을 제안하였다. 전단파단에 대해서는 모두 미세스응력조건을 고려한 전단응력계수로 0.6이 아닌 $\sqrt{3}$ 을 적용하였다.

Jo *et al.*^[7]에 의해 SM520-TMC 고강도강 극후판을 대상으로 모재의 두께와 용접치수에 따른 필릿용접부의 용착금속의 파단강도에 관한 실험적 연구를 수행하였고, 하중방향

Note.-Discussion open until February 28, 2021. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 17, 2020; revised July 03, 2020; approved on July 10, 2020.

Copyright © 2020 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-55-751-3405 Fax. +82-55-751-3409

E-mail. hskang@gntech.ac.kr

이 용접축에 직각인 접합부가 평행인 접합부보다 내력이 크다는 것을 확인하였다. 최근에, 고강도 강재의 언더매칭 필릿용접부에 관한 기존연구자료를 토대로 매칭비에 따른 보정계수를 제시하였고^[8], 필릿용접부 공칭강도 산정에 있어 용접방향에 따른 횡방향 보정계수를 제안하였다^[9]. 또한, Kim *et al.*^[10]에 의해 내입계 부식성을 갖는 오스테나이트계 스테인리스강(STS304L) 필릿 용접접합부의 용접재(용착금속부)가 파단에 관한 실험적 연구가 수행되었고, 실제파단선의 위험단면과 전단파단시의 응력상태를 고려한 용착금속부의 인장파단, 전단파단 및 블록전단파단내력식을 수정·제안하였다.

본 연구에서는 건축구조용으로 가장 많이 적용되고 있고 용접이 가능한 일반구조용 탄소강(SS400, 신KS SS275) 공칭평판두께 12 mm를 대상으로 모재가 아닌 용착금속부가 파단되도록 용접접합부를 용접길이와 하중방향에 따른 용접선방향을 변수로 하여 제작하여 단순 인장실험을 실시한다. 그리고 탄소강 현행기준식(KDS와 AISC)의 용착금속부 파단내력식의 적용성을 검토하고 실제파단선과 응력분포를 고려한 수정내력식을 제안하는 것을 연구목적으로 한다.

2. 실험계획 및 재료시험

2.1 실험계획 및 제작

일반구조용 탄소강 SS400(신KS SS275)를 사용하여 7종류 각 2개씩 총 14개의 필릿용접 접합부 실험체를 계획·제작하였다. Table 1에 실험체명, 탄소강 모재두께(t_n), 공칭용접사이즈(s_n) 및 중간판의 용접용 절단길이(l_1, l_2)를 정리하였다. Figs. 1-2는 각각 실험체의 주요형상과 실험체의 구성을 나타낸다. Fig. 2와 같이 양단(상하 물림고정부)과 중앙의 양쪽편은 공칭두께 12 mm로 절단해서 필릿용접사이즈 5.0 mm로 용접하도록 2개씩 계획하였다. 용접접합부의 주요 변수는 Fig. 1과 같이 작용하중에 대한 용접선의 방향(하중 직각방향 용접: CTFW, 하중방향 용접: CLFW, 하중직각방향 용접과 하중방향 용접의 조합: CFW)과 용접길이(25 mm, 40 mm, 60 mm)이다. 용접봉은 가스금속아크용접(gas metal arc welding, GMAW)중 CO₂ 용접에 H사의 SF-71(KS D 7104^[11])의 YFW-C50DX에 상응하고 AWS A5.20의 E71T-1C에 해당; 연강, 고장력강 및 저온용 강용 아크용접 플럭스코어선)을 사용하였다. KS의 최저항복강도는 390 MPa, 인장강도는 490 MPa, 연신율은 22 %로 규정하고 있다.

Table 1. Specimen list

Specimen	Nominal thickness of base metal t_n (mm)	Fillet size s_n (mm)	Geometry (mm)		Total length l_t (mm)
			l_1	l_2	
CLFW25-1	12.00	5.00	-	25	100
CLFW25-2			-	25	100
CLFW40-1			-	40	160
CLFW40-2			-	40	160
CLFW60-1			-	60	240
CLFW60-2			-	60	240
CTFW25-1			25	-	50
CTFW25-2			25	-	50
CTFW40-1			40	-	80
CTFW40-2			40	-	80
CTFW60-1			60	-	120
CTFW60-2			60	-	120
CFW40-1			40	40	240
CFW40-2			40	40	240

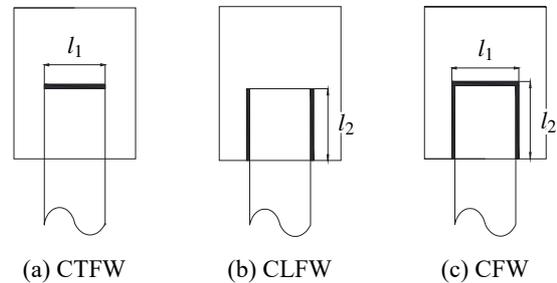


Fig. 1. Specimen type and geometry

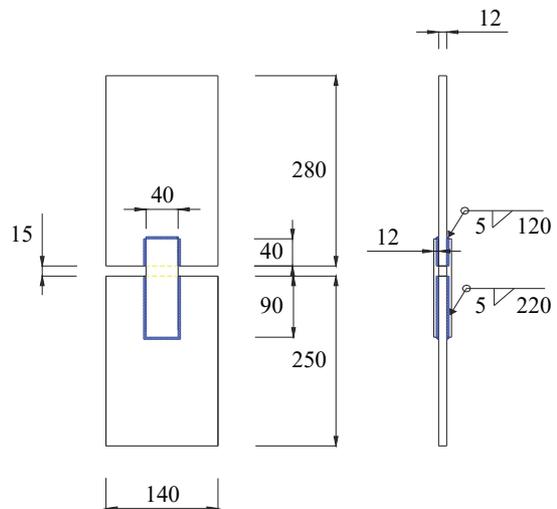


Fig. 2. Assembly of weld specimen

Table 1의 실험체명에서 ‘CLFW25-1’, ‘CTFW25-1’, ‘CFW40-1’은 첫번째 ‘C’는 탄소강(carbon steel), 두 번째인 ‘LFW’, ‘TFW’, ‘FW’는 각각 하중방향과 용접선이 평행한 실험체(longitudinal fillet weld), 하중방향과 용접선이 직각인 실험체(transverse fillet weld), 하중방향과 하중직각방향의 3면이 용접된 실험체(full fillet weld)를 나타내며, 세 번째 숫자 ‘25’ 등은 용접길이이고 마지막 숫자 ‘1’ 또는 ‘2’는 실험체 번호를 의미한다.

2.2 재료시험

2.2.1 모재 평판재료시험

Fig. 2의 양쪽 중앙부와 양단 물림고정부에 사용한 공칭 평판두께 12 mm의 일반 구조용 탄소강의 기계적 성질을 파악하기 위하여 KS B 0801^[12]에 따라 평판의 재료인장시험편 3개를 제작하였다. 단순인장 재료시험 결과를 Table 2에 정리하였고 평균 항복강도(F_y)는 288.31 MPa, 인장강도(F_u)는 460.35 MPa, 탄성계수는 194.27 GPa, 항복비(F_y/F_u)는 62.63 %, 연신율(EL)은 43.21 %로 나타났다.

2.2.2 봉시험편 재료시험

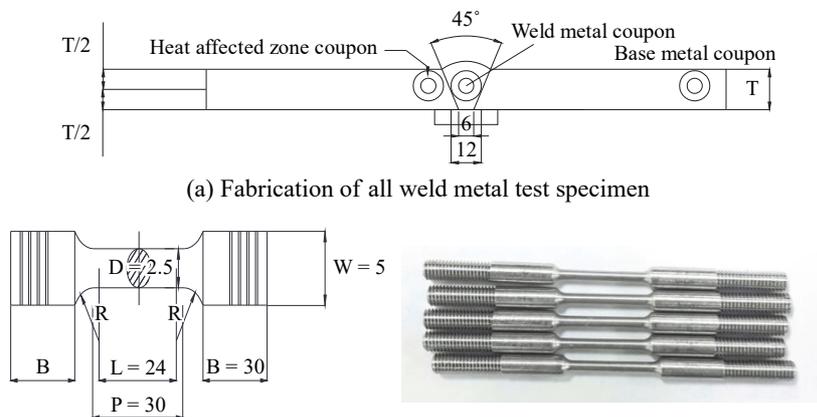
용착금속(용접재), 열영향부 및 모재의 기계적 성질을 파악하기 위해 KS B 0821^[13]에 따라 Fig. 3과 같이 용착금속부 시험편(CBEAD)은 3개, 열영향부 시험편(CHAZ)은 5개, 모재시험편(CBASE)은 2개를 제작하였다.

Fig. 3(a)는 용접부의 봉 시험편을 제작하기 위한 용접실험체의 형상^[13]이고, Fig. 3(b)와 Fig. 3(c)는 각각 봉 재료시험편의 제작치수와 만능시험기에 설치상황을 나타낸다.

봉시험편에 대한 인장시험을 수행한 결과를 Table 3와 Fig. 4에 정리하였다. 용착금속부(CBEAD)의 평균항복강도(F_{yw})는 388.33 MPa, 인장강도(F_{uw})는 506.02 MPa, 탄성계수(E)는 200.46 GPa, 항복비(F_{yw}/F_{uw})는 76.77 %, 연신율은 22.61 %로 나타났다. 2.1절에서 언급한 KS D 7104^[11]의 최저 기준에서 항복강도(390 MPa)를 약간 하회하는 값을 나타냈지만 다른 용접재의 재료성질을 만족하였다. 항복강도와 인장강도는 용착금속부에서 가장 컸고, 열영향부(CHAZ)와 모재(CBASE)로 갈수록 항복강도와 인장강도는 낮게 나타났다.

Table 2. Material test results of 12 mm thick base material tests

Coupon	Measured thickness (mm)	Young's modulus E (GPa)	Yield strength F_y (MPa)	Tensile strength F_u (MPa)	Yield ratio F_y/F_u YR (%)	Elongation EL (%)
C12T-1	11.91	225.41	286.67	454.67	63.05	43.74
C12T-2	11.77	179.23	288.58	462.18	62.44	41.60
C12T-2	11.75	178.18	289.69	464.20	62.41	44.30
Average	11.81	194.27	288.31	460.35	62.63	43.21
COV	0.007	0.139	0.005	0.011	0.006	0.033



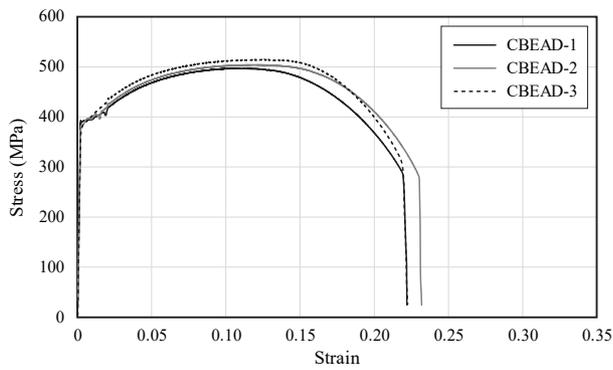
(b) Geometry of round coupon

(c) Set-up of material test

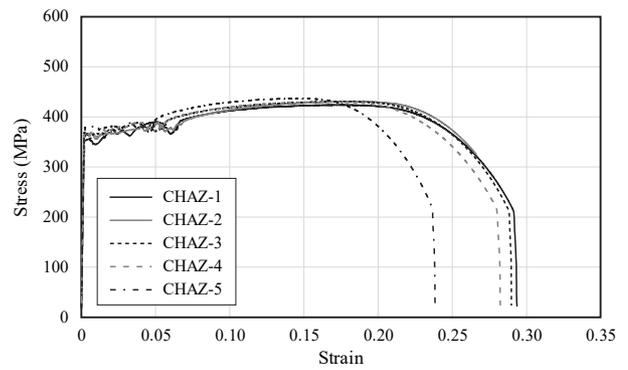
Fig. 3. Fabrication, geometry and set-up of round coupon

Table 3. Material test results of round coupons

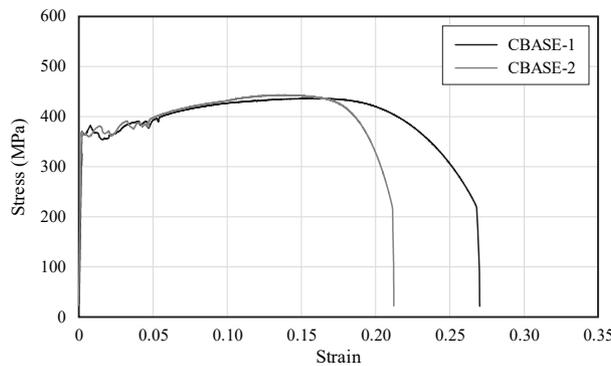
Coupon	Diameter D_e (mm)	Young's modulus E (GPa)	Yield strength F_y (MPa)	Tensile strength F_u (MPa)	Yield ratio F_y/F_u YR (%)	Elongation EL (%)
CBEAD-1	2.51	197.87	392.96	498.06	78.90	22.19
CBEAD-2	2.50	200.52	386.29	504.97	76.50	23.19
CBEAD-3	2.51	203.00	385.75	515.02	74.90	22.44
Average	2.51	200.46	388.33	506.02	76.77	22.61
COV	0.002	0.013	0.010	0.017	0.026	0.023
CHAZ-1	2.52	201.65	354.43	442.97	80.01	29.38
CHAZ-2	2.56	212.28	384.97	439.98	87.50	26.63
CHAZ-3	2.53	202.83	367.86	467.72	78.65	29.00
CHAZ-4	2.52	205.38	367.73	465.69	78.96	28.25
CHAZ-5	2.52	207.62	376.78	437.49	86.12	23.88
Average	2.53	205.95	370.35	450.77	82.25	27.43
COV	0.007	0.021	0.031	0.033	0.051	0.082
CBASE-1	2.53	203.60	364.21	436.33	83.47	22.19
CBASE-2	2.50	197.66	364.56	443.83	82.14	23.19
Average	2.52	200.63	364.39	440.08	82.81	22.69
COV	0.008	0.021	0.001	0.012	0.011	0.031



(a) CBEAD



(b) CHAZ



(c) CBASE

Fig. 4. Stress-strain curves obtained from the material tests of round coupon

모재에 대해서 평판시험편에 비해 봉시험편이 와이어 컷팅과 밀링가공에 의해 항복강도는 26.38 % 높게 나타났고 연신율은 47.50 % 낮았다.

3. 용접접합부 실험결과

3.1 실험 및 치수

용착금속부 파단 탄소강 용접접합부의 실험을 수행하기 전에 변수별 내력비교와 현행기준식에 의한 내력산정을 위해 용착금속부의 용접크기와 용접길이를 측정하였다.

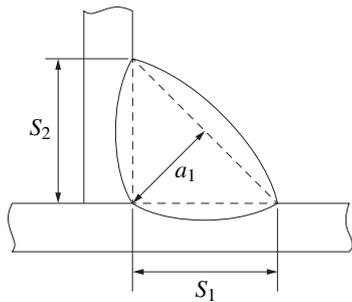


Fig. 5. Geometry of fillet weld part

Fig. 5와 같이 양면의 용착금속부의 용접크기를 S_1 과 S_2 로 하고 용접방향별 실험체에서 전면의 용접길이를 Fig. 6에 표시한 바와 같이 L_1, L_2, L_3 로, 후면의 용접길이를 L_4, L_5, L_6 로 정의하였다. 실측된 모재의 평판두께(t_e), 용접크기와 용접길이를 Table 4에 정리하였다. 평균용접크기(S_e)는 공칭 용접크기 5 mm보다 1.39 mm - 2.36 mm 크게 용접된 것으로 나타났다.

3.2 파단형상 및 내력

Table 1의 용접부 실험체를 대상으로 단순인장실험을 수행하였고, Figs. 7-8은 실험종료시점에서 파단형태과 하중-

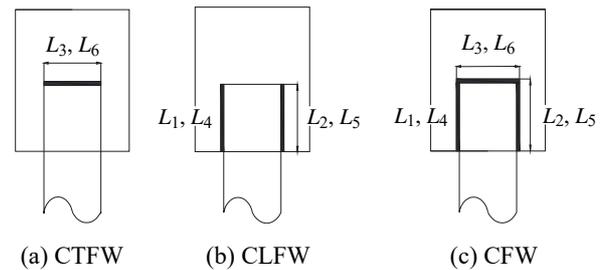


Fig. 6. Weld length symbol of specimen by welding direction

Table 4. Specimen list and measured dimensions

Specimen	Measured plate thickness (mm)	Measured front weld length L_1, L_2, L_3 (mm)			Measured back weld length L_4, L_5, L_6 (mm)			Total weld length (mm)	Measured weld size (mm)			Effective throat thickness a_1 (mm)
	t_e	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6		L	S_1	S_2	
CLFW25-1	11.41	24.48	25.21	-	24.14	25.21	-	99.04	7.86	6.85	7.36	5.15
CLFW25-2	11.70	24.27	27.86	-	24.32	25.40	-	101.85	7.78	6.60	7.19	5.03
CLFW40-1	11.73	39.89	38.90	-	42.80	39.46	-	161.05	7.49	5.89	6.69	4.68
CLFW40-2	11.79	37.60	40.00	-	39.31	40.41	-	157.32	6.97	5.86	6.42	4.49
CLFW60-1	11.82	62.82	59.39	-	58.33	65.27	-	245.81	7.05	6.02	6.54	4.57
CLFW60-2	11.83	63.83	60.56	-	59.89	58.51	-	242.79	6.82	6.13	6.48	4.53
CTFW25-1	12.87	-	-	29.80	-	-	31.02	60.82	8.03	6.73	7.38	5.17
CTFW25-2	11.80	-	-	31.80	-	-	31.30	63.10	8.19	5.50	6.85	4.79
CTFW40-1	11.57	-	-	41.01	-	-	45.84	86.85	8.35	6.11	7.23	5.06
CTFW40-2	11.53	-	-	43.60	-	-	46.50	90.10	7.06	6.67	6.87	4.81
CTFW60-1	11.86	-	-	62.50	-	-	59.94	122.44	7.14	6.17	6.66	4.66
CTFW60-2	11.77	-	-	64.29	-	-	65.45	129.74	6.74	6.59	6.67	4.67
CFW40-1	11.39	45.39	43.36	55.54	45.51	44.82	55.59	290.21	6.61	6.24	6.43	4.50
CFW40-2	11.30	48.10	47.27	54.62	49.48	49.23	56.88	305.58	6.66	6.12	6.39	4.47

변위관계곡선을 정리하였다. Table 5에는 실험최대내력, 평균용접크기와 보정최대내력을 나타냈고 보정최대내력은 변수에 따른 실험최대내력(P_{ue})을 비교하기 위해 실측평균용접크기(S_e)를 기준으로 수정계수(m)을 곱해 보정한 최대내력(P_{uem})을 의미한다. 수정계수(m)는 실험체 CLFW25-1의 평균용접크기를 다른 실험체의 용접크기를 나눈 값으로 정의하였다.

용접선이 하중방향과 평행한 CLFW시리즈 접합부에서는 Figs. 7(a)-7(e)에서와 같이 하중방향과 나란하게 용착금속부에서 전단파단(shear fracture)이 발생하였고 용접선이

하중방향과 직각인 CTFW시리즈 접합부에서는 Figs. 7(f)-7(h)에서와 같이 용착금속에서 인장파단(tensile fracture)이 관찰되었다. Fig. 8의 하중-변위곡선에서 전단파단과 인장파단이 발생하여 급격한 내력저하가 발생하였다. 용착금속의 파단각도는 전단파단의 경우 용착금속의 중앙부 근처에서 파단되었지만, 인장파단의 경우에는 Figs. 7(b)-7(h)에서 확인할 수 있듯이 모재에 근접한 부분에서 파단이 발생하였다. 이러한 파단 경향은 Lu *et al.*^[14]에 의한 용착금속파단 필릿용접부에 대한 하중방향 용접과 하중직각방향 용접에 대한 파단각도의 연구결과에서도 확인되었다.

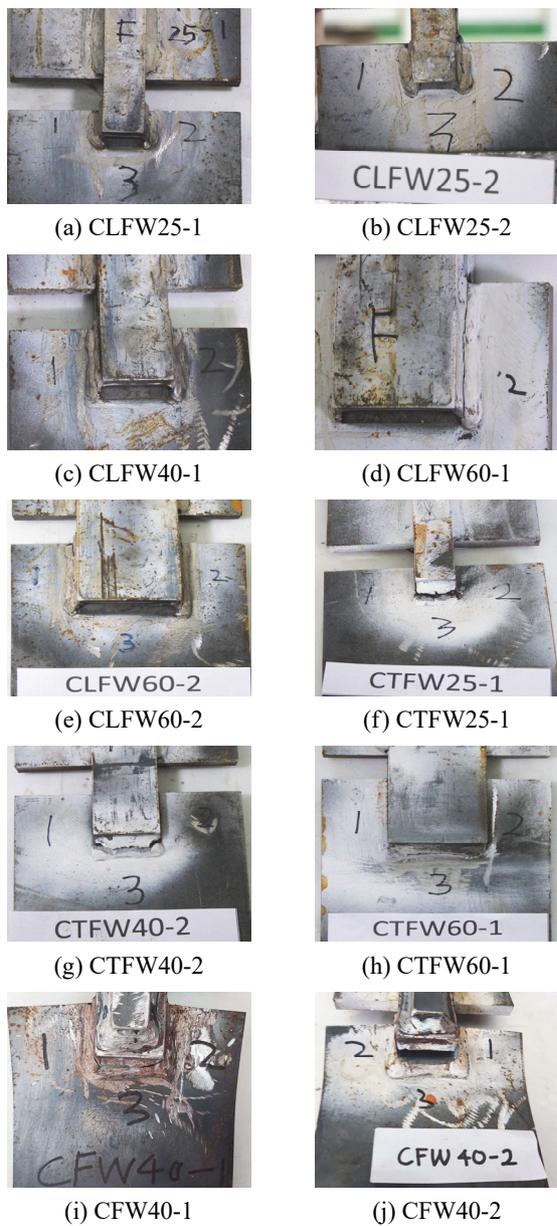


Fig. 7. Fracture shapes at test end

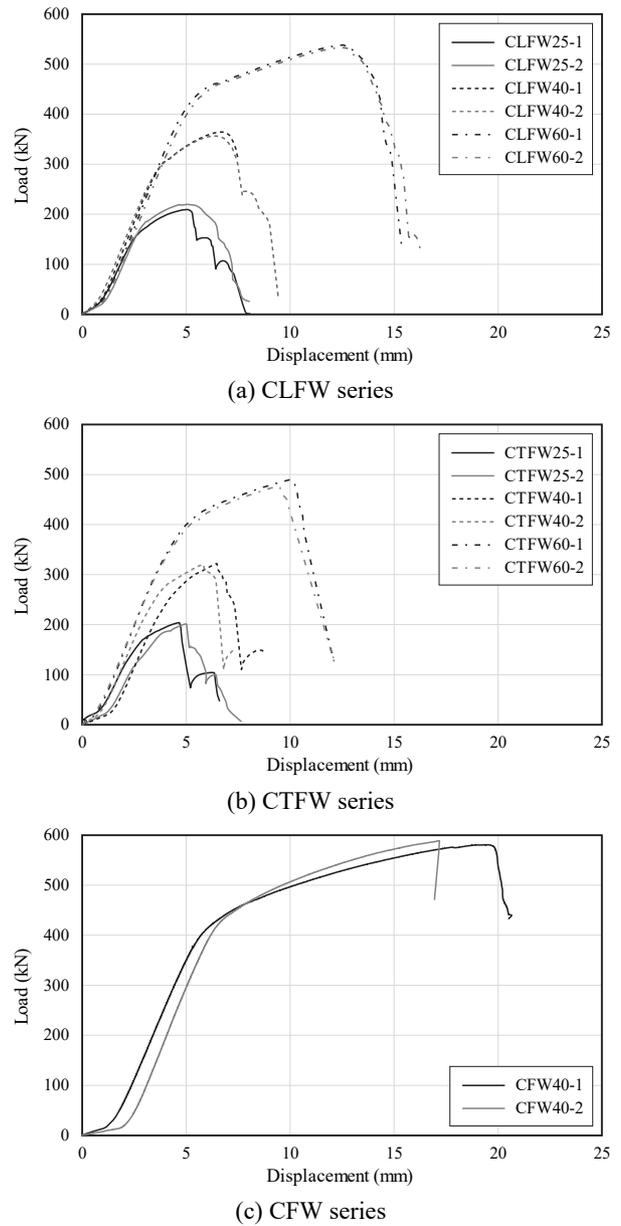


Fig. 8. Load-displacement relationship

하중직각방향과 하중방향 모두 용접한 CFW 시리즈 접합부에서는 Figs. 7(i)-7(j)와 같이 용착금속부에서 하중직각방향의 인장파단과 하중방향의 전단파단이 거의 동시에 발생한 블록전단파단(block shear fracture)이 발생하였다. Fig. 8(c)에서 CFW 시리즈의 실험체의 최대변위가 CLFW와 CTFW 시리즈 실험체의 최대변위보다 큰 것은 CLFW와 CTFW 시리즈 실험체는 용착금속부분에 변형이 집중되어 상대적으로 변형이 작았지만, 블록전단파단이 발생하기 전까지 중간연결재나 모재부분에서도 변형이 발생되었기 때문이다.

3.3 변수에 따른 내력비교

Table 5에 실험결과 최대내력과 동일용접크기에 대한 보정최대내력을 동일실험체의 평균 최대내력(P_{uemA})을 정리하였다. 또한, 하중방향에 대한 용접선의 방향의 차이에 따른

최대내력을 조사하기 위하여 용접길이를 동일하게 하여 최대내력을 비교하였다. 하중방향과 용접선이 직각인 실험체 CTFW의 인장최대내력($P_{uemA(TFW)}$)에 대한 하중방향과 용접선이 평행인 실험체 CLFW의 전단최대내력($P_{uemA(LFW)}$)의 내력비와 두 방향의 최대내력의 합에 대한 전방향 용접 실험체 CFW의 블록전단파단내력의 내력비를 Table 6에 정리하였다. 용착금속부의 전단파단된 CLFW 시리즈의 접합부의 최대내력은 인장파단된 CTFW 시리즈 접합부의 최대내력에 비해 평균 55 % 낮게 나타났다. 이는 미세스 항복조건에 의해 전단응력이 인장응력의 $1/\sqrt{3}(=0.577)$ 이라는 값보다 더 작은 것을 알 수 있다. 또한, CLFW시리즈와 CTFW 시리즈의 최대내력의 합에 대한 블록전단파단된 CFW40 시리즈의 접합부의 최대내력의 내력비는 0.93으로 나타났고, 7 % 정도의 차이가 발생했지만 용착금속부의 전단파단내력과 인장파단내력을 합산하여 내력을 산정해도 무리가 없을 것으로 판단된다.

Table 5. Test results

Specimen	Ultimate strength P_{ue}	Average weld size S_e (mm)	Modification factor m	Modified ultimate strength P_{uem} (kN)	Average modified ultimate strength P_{uemA} (kN)
CLFW25-1	209.52	7.36	1.00	209.52	226.12
CLFW25-2	220.03	6.67	1.10	242.72	
CLFW40-1	365.15	7.19	1.02	373.53	383.26
CLFW40-2	357.47	6.69	1.10	392.99	
CLFW60-1	539.51	6.57	1.12	604.43	605.34
CLFW60-2	533.71	6.48	1.14	606.25	
CTFW25-1	203.13	7.46	0.99	200.41	207.91
CTFW25-2	200.47	6.85	1.07	215.41	
CTFW40-1	321.83	7.23	1.02	327.39	335.30
CTFW40-2	320.34	6.87	1.07	343.20	
CTFW60-1	489.02	6.66	1.11	540.46	532.87
CTFW60-2	476.36	6.67	1.10	525.28	
CFW40-1	579.57	6.43	1.14	663.92	669.57
CFW40-2	586.63	6.39	1.15	675.22	

Table 6. Strength ratio according to welding direction for same weld length

$P_{uemA(LFW)}/P_{uemA(TFW)}, P_{uemA(FW)}/(P_{uemA(TFW)}+uemA(LFW))$			
CLFW25/(CTFW25*2)	CLFW40/(CTFW40*2)	CLFW60/(CTFW60*2)	CFW40/(CTFW40+CLFW40)
0.46	0.44	0.44	0.93

4. 현행기준식 및 실험내력 비교

4.1 현행기준식 및 내력비교

열간압연 탄소강 용접접합부에 대한 현행구조설계기준으로 한국건축구조기준인 KBC 2016^[1], 한국설계기준인 KDS 2019^[2]와 미국강구조학회의 AISC 2016^[15]이 있으며 KBC 2016과 KDS 2019는 동일하다. 상기 기준 모두 용접접합부에서 모재파단과 용접재(용착금속부) 파단강도 중 최솟값을 접합부 강도로 규정하고 있다. 본 연구에서는 용착금속부가 파단되어 최대내력을 결정하였기 때문에 다음에 용착금속부의 인장파단, 전단파단 및 블록전단파단 내력식에 대하여 정리하였다.

국내 강구조설계기준인 KDS 2019와 미국강구조학회 기준인 AISC 2016에서는 용착금속부 파단강도 산정에 있어서 인장파단과 전단파단에 대한 구분없이 용착금속의 전단강도($0.6F_{uw}$)에 유효용접면적(A_w)의 곱인 식 (1)을 적용한다.

$$P_n = 0.6F_{uw}A_w \tag{1}$$

여기서, A_w 는 유효용접면적($=a_1L_e$)이고, a_1 는 목두께, L_e 는 유효용접길이($L - 2S$), S 는 필릿용접크기, F_{uw} 는 용접재(용착금속)의 인장강도이다.

미국강구조학회 기준인 AISC 2016에서도 필릿용접접합부에서 용착금속부의 인장파단과 전단파단에 대해서는 식 (1)을 채용하고 있으며 추가로 용접선이 하중방향에 직각인 인장파단과 하중방향에 평행인 전단파단의 조합인 블록전단파단강도는 식 (2)와 식 (3) 중 큰 값으로 규정하고 있다.

$$P_n = P_{nwl} + P_{nwt} \tag{2}$$

$$P_n = 0.85P_{nwl} + 1.5P_{nwt} \tag{3}$$

여기서, P_{nwl} 는 하중방향 용접강도(전단파단강도), P_{nwt} 는 하중직각방향 용접강도(인장파단강도)이고 식 (1)을 동시에 적용한다.

Table 3과 Table 5의 자료를 토대로 현행기준식에 의한 최대내력을 용접선의 하중방향별로 산정해서 Table 7에 기준 최대내력(P_n)과 실험내력(P_{ue})에 대한 최대내력비(P_n/P_{ue})를 나타냈다. KDS/AISC의 식 (1)에 의한 최대내력비(P_n/P_{ue})는

Table 7. Strength comparison of test results and design predictions

Specimen	Test ultimate strength	Design strength of weld metal (P_n) (kN)			Strength ratio (P_n/P_{ue})	
	P_{ue} (kN)	KDS/AISC Eq. (1)	AISC Eq. (2)	AISC Eq. (3)	KDS/AISC	AISC Eq. (3)
CLFW25-1	209.52	62.74			0.30	
CLFW25-2	220.03	68.50			0.31	
CLFW40-1	365.15	158.59			0.43	
CLFW40-2	357.46	149.40			0.42	
CLFW60-1	539.51	272.37			0.50	
CLFW60-2	533.71	268.38			0.50	
CTFW25-1	203.13	49.08			0.24	
CTFW25-2	200.47	52.47			0.26	
CTFW40-1	321.83	85.44			0.27	
CTFW40-2	320.34	87.86			0.27	
CTFW60-1	489.02	133.75			0.27	
CTFW60-2	476.36	142.90			0.30	
CFW40-1	579.97	291.00	291.00	321.97	0.50	0.56
CFW40-2	586.63	310.86	310.86	346.45	0.53	0.59
Average					0.37	0.57

0.24 - 0.53의 분포로 평균 0.37을 나타냈고, 블록전단파단된 CFW실험체에 대해 AISC기준식(식 (3))에 의해 평균최대 내력비는 0.57로 나타났다. 현행기준식(식 (1))에 의해 용착 금속부의 인장파단, 전단파단 및 블록전단파단되는 접합부에 의해 평균 63 %, 식 (3)의 블록전단파단 설계식에 의해서는 CFW 시리즈 접합부에 대해서는 평균 43 % 과도하게 과소평가하는 것을 알 수 있다. 이는 접합부의 용접길이가 비교적 짧은 것에 비해 유효용접길이 산정 시 용접크기의 2배를 공제하는 것과 인장파단강도를 전단파단강도와 동일강도로 가정하기 때문인 것으로 판단된다.

4.2 내력식 고찰

4.1절에서 언급한 바와 같이 현행기준식에서는 용착금속부의 인장파단강도를 전단파단강도를 동일식으로 규정하고 있으나 Table 5의 실험결과에서 인장파단된 CTFW실험체의 최대내력이 전단파단된 CLFW실험체의 최대내력보다 55 % 높게 나타났으므로 두 파단형태별 내력식을 구분하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 또한, 용접길이가 용접크기에 비해 크지 않은 경우, 유효면적산정 시 유효용접길이(전체용접길이에서 용접크기의 2배를 공제한 값)가 작아져 내력이 과소평가되었다. 그래서 본 연구의 결과와 추가적인 연구를 통해 실측용접길이에 유효목두께를 곱한 유효용접면적(A_{vw}, A_{tw}), 용착금속강도(F_{uw}), 실험최대내력을 토대로 전단응력계수와 인장응력계수를 산정하여 용접방향별 용착금속파단내력식을 고찰할 필요가 있다.

5. 결론

건축구조용 강재로 실무에서 용접용으로 사용되는 탄소강(SS400, 신KS의 SS275) 공칭두께 12 mm 평판을 대상으로 하중방향에 대한 용접선방향과 용접길이를 변수로 하여 CO2가스용접(GMAW)하여 용접재(용착금속부)가 파단되도록 실험체를 제작하였고 단순인장실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 용접선이 하중방향에 평행인 CLFW 시리즈 실험체, 용접선이 하중방향에 직각인 CTFW 시리즈 실험체와 하중방향과 하중직각방향 모두 용접합 CFW 시리즈 실험체로 구분하였고 각각 용착금속의 전단파

단, 인장파단, 블록전단파단(인장파단과 전단파단의 조합)이 발생하였다.

- (2) 동일 용접선방향의 실험체에 대해서는 용접길이에 비례하여 최대내력도 증가하였고, 동일 용접크기와 용접길이에 대해 전단파단된 CLFW 실험체에 비해 인장파단된 CTFW 실험체의 최대내력이 평균 55 % 낮게 나타났다. 블록전단파단된 CFW 실험체의 최대내력은 CLFW 실험체의 내력과 CTFW 실험체 내력의 합에 대해 7 % 낮게 나타났지만 큰 차이는 없는 것으로 조사되었다.
- (3) 현행기준식인 한국설계기준(KDS 2019)과 미국강구조학회 기준(AISC 2016)에 의한 용접접합부의 용착 금속부 파단내력을 실험내력과 비교한 결과, 전단파단과 인장파단 접합부에 대해서는 50 % - 76 % 범위로, 블록전단파단된 접합부에 대해서는 41% - 50 %의 범위로 과소평가되었다.

추후, 추가적인 실험연구를 통해 실제 용접파단선과 용접접합부의 특성(삼축응력효과)를 고려한 하중방향별 용착금속부 파단내력 평가식을 고찰할 필요가 있다.

참고문헌(References)

- [1] Architectural Institute of Korea (2016) *Korean Building Code -Structural* (KBC 2016), AIK, Korea (in Korean).
- [2] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2019) *Korean Building Code for Steel Structures* (KDS 41 30 00: 2019), Korea (in Korean).
- [3] Topkaya, C. (2004) Finite Element Parametric Study on Block Shear Failure of Steel Tension Members, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.60, No.11, pp.1615-1635.
- [4] Topkaya, C. (2007) Block Shear Failure of Gusset Plates with Welded Connection, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.29, No.1, pp.11-20.
- [5] Oosterhof, S.A., and Driver, R.G. (2010) Effects of Connection Geometry on Block Shear Failure of Welded Lap Plate Connections, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.67, No.3, pp.525-532.
- [6] American Institute of Steel Construction (2005) *Specification for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 360-05), USA.
- [7] 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, Vol.18, No.3, pp.331-337 (in Korean).
- [8] Jo, J.B., and Kim, Y.G. (2018) Strength of Under-matching Fillet Welded Longitudinal Joints of High Strength Steel, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.30, No.6, pp.347-354 (in Korean).
- [9] Jo, J.B., and Kim, Y.G. (2018) Proposal of Transverse Correction Factor for the Calculation of Nominal Strength of Fillet Welded Joints, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.31, No.3, pp. 163-170 (in Korean).
- [10] Kim, T.S., Lee, H., Hwang, B., and Cho, T. (2018) Experimental Study on Strength of Austenitic Stainless Steel (STS 304L) Fillet-Welded Connection with Weld Metal Fracture According to Welding Direction, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol.22, No.1, pp.81-89 (in Korean).
- [11] Korean Agency for Technology and Standards (2012) *Flux Cored Wires for Gas Shielded and Self-Shielded Metal Arc Welding of Mild Steel, High Strength Steel and Low Temperature Service Steel* (KS D 7104: 2012), Korea (in Korean).
- [12] Korean Agency for Technology and Standards (2007) *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0801: 2007), Korea (in Korean).
- [13] Korean Agency for Technology and Standards (2007) *Methods of Tension and Impact Tests for Deposited Metal* (KS B 0821: 2007), Korea (in Korean).
- [14] Lu, H., Dong, P., and Boppudi, S. (2015) Strength Analysis of Fillet Welds Under Longitudinal and Transverse Shear Conditions, *Marine Structures*, Elsevier, Vol.43, pp.87-106.
- [15] American Institute of Steel Construction (2016) *Specification for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 360-16), USA.

요 약: 모재가 아닌 용착금속부가 파단되는 탄소강(SS400) 필릿용접부의 단순인장실험을 통해 최대내력을 조사하는 것이 이 연구의 목적이다. 주요변수는 용접길이와 작용하중에 대한 용접방향이다. 용접선이 하중방향에 직각인 CTFW 실험체, 용접선이 하중방향에 평행인 CLFW 실험체와 하중직각방향과 하중방향을 모두 용접한 CFW 실험체의 실험결과 각각 용착금속부의 인장파단, 전단파단과 블록전단파단이 발생되었다. 실험내력은 한국설계기준(KDS)과 미국강구조학회 설계기준(AISC)의 현행기준식에 의해 산정된 설계내력과 비교하였고 최대 73 %까지 실험내력을 과소평가하였다.

핵심용어: 탄소강, 용접접합부, 용접길이, 용접방향, 용착금속파단, 설계기준
