

# 오스테나이트계 스테인리스강(STS304)과 탄소강(SS275) 용접접합부의 최대내력

육심철<sup>1</sup> · 김태수<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>박사과정, 한밭대학교대학원, 건축공학과, <sup>2</sup>교수, 한밭대학교, 건축공학과

## Ultimate Strength of Austenitic Stainless Steel (STS304) and Carbon Steel (SS275) Welded Connection

Yuk, SimChul<sup>1</sup>, Kim, Tae Soo<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student (Doctor Course), Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

<sup>2</sup>Professor, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

**Abstract** - This paper investigated ultimate behaviors such as ultimate strength and weld metal fracture mechanism of austenitic stainless steel (STS304) and carbon steel (SS275) welded connections with TIG (tungsten inert gas) welding through test results. Main variables of specimens are weld length and welding direction against loading. Fractures of specimens were classified into tensile fracture and shear fracture in weld metal. Material properties of base metal and weld metal satisfied the minimum requirement of Korean Standard (KS). Strengths of TFW series specimens with transverse fillet weld got larger than those of LFW series specimens with longitudinal fillet weld. It is known that current design specifications such as ASCE, KDS and AISC did not provide accurate strength prediction for the dissimilar steel welded connections with weld metal fracture.

**Keywords** - Austenitic stainless steel, Carbon steel, Dissimilar steel welded connection, Weld length, Welding direction, Design specification

### 1. 서론

스테인리스강은 우수한 내식성이 장점으로 건축물의 외장재뿐만 아니라 별도의 마감재 없이 외기에 노출된 건축 구조부재의 2차 부재 또는 구조부재의 재료로서 널리 사용되고 있다. 그러나, 국내 건축물 강구조 설계기준(KDS 41 31 00)<sup>[1]</sup>에서는 스테인리스강이 구조용 강재로 포함되어 있지 않으며, 관련 구조설계기준이 마련되어 있지 않다. 현재, 한국강구조학회(KSSC)에서 미국토목학회(American Society of Civil Engineers, ASCE) 냉간성형 스테인리스강 설계기준을 참조, 국내생산 스테인리스강의 재료적 특성을 반영한 냉

간성형 스테인리스강 구조설계 지침을 2020년에 출간하였다<sup>[2]</sup>. 국내에서도 국내생산 스테인리스강의 재료특성과 성형에 따른 강도증가 및 부재의 구조거동을 반영한 스테인리스강 구조설계기준을 제정할 필요가 있다. 이에 따라 국내 연구자에 의해 스테인리스강을 적용한 압축부재, 볼트접합부 및 용접접합부에 관한 연구가 수행되고 있다<sup>[3][12]</sup>.

스테인리스강의 우수한 내식성 및 내진성으로 2차 부재 및 내진용 구조 부재로서의 수요증가와 함께 시공 시 주요 구조부재로 사용되는 탄소강 부재와 접합해야 하고 볼트접합외에 용접이 요구되는 경우 스테인리스강과 탄소강의 이종강종을 용접해야 한다. 스테인리스강과 탄소강을 용접하는 경우 스테인리스강의 열전도율(평균 14 W/(m·K))이 탄소강의 열전도율(평균 46 W/(m·K)의 약 1/3)보다 약 1/3 수준으로 낮고 선팽창계수(열팽창률)가 탄소강보다 약 1.5배 높아 용접성이 탄소강보다 불리해서 용접 시 뒤뜸발생과 잔류응력이 발생하므로 용접봉도 모재로 사용되는 스테인리스강에 해당하는 KS 규격에 따라 스테인리스강 용접봉을 사용해야 한다.

Note.-Discussion open until October 31, 2021. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on February 23, 2021; revised March 08, 2021; approved on March 11, 2021.

Copyright © 2021 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

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

E-mail. tskim@hanbat.ac.kr

한국 건축물 강구조 설계기준(KDS)<sup>[1]</sup>과 미국강구조학회(American Institute of Steel Construction, AISC)<sup>[13]</sup>의 탄소강 구조설계기준뿐만 아니라 미국토목학회(ASCE)<sup>[14]</sup> 스테인리스강 설계기준은 용접접합부의 강도 산정 시 접합하는 모재의 파단강도뿐만 아니라 용접재(용착금속)의 파단강도를 고려하여 산정해야 한다고 규정하고 있다. 그러나, 건설 분야에서 스테인리스강과 탄소강의 용접접합부에 대한 구조안전성 평가에 관한 연구가 거의 수행되지 않은 실정이다.

이 연구에서는 스테인리스강 중 가장 많이 사용하는 오스테나이트계 스테인리스강(STS304)과 탄소강인 일반구조용 압연강재(SS275)를 대상으로 용접방향과 용접길이를 변수로 하여 용착금속부(용접재)가 파단되는 필릿 용접접합부 실험체를 계획한다. 접합부의 단순인장실험을 수행하고 필릿 용접접합부의 변수에 따른 용착금속부의 파단강도를 비교·분석한다. 또한, 스테인리스강 및 탄소강의 이종강종 용접접합부의 구조안전성을 확인하고 현행설계기준식의 적용성에 대해 검토를 연구목적으로 한다.

## 2. 용접접합부 용접재 강도설계식

오스테나이트계 스테인리스강과 탄소강의 이종강종을 스테인리스강 용접봉으로 용접한 용접접합부의 용착금속부 파단강도를 산정하고 실험결과와 비교하기 위해 현행 미국토목학회의 냉간성형 스테인리스강 기준(이하 ASCE2002)<sup>[14]</sup>과 국내 강구조 설계기준(이하 KDS2019)<sup>[1]</sup> 및 미국강구조학회 설계기준(이하 AISC2016)<sup>[13]</sup>의 용착금속부 강도식을 다음에 정리한다.

### 2.1 미국토목학회 기준(ASCE2002)<sup>[14]</sup>

미국토목학회의 냉간성형 스테인리스강 기준(ASCE2002)에서는 용접접합부의 설계기준강도( $P_n$ )를 산정하는데 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. 다음은 용접재(용착금속부)가 파단되는 경우 내력식을 정리하였다.

- (1) 하중직각방향용접(for transverse fillet weld): 용접선이 하중방향과 직각인 경우 용접재(용착금속부)에서 인장파단이 발생하고 다음식으로 강도를 산정한다.

$$P_n = a l_{et} F_{uw} \quad (1)$$

- (2) 하중방향용접(for longitudinal fillet weld): 용접선이 하중방향과 평행인 경우 용접재(용착금속부)에서 전단파단이 발생하고 다음식으로 강도를 산정한다.

$$P_n = 0.75 a l_{ev} F_{uw} \quad (2)$$

여기서,  $a$ 는 용착금속의 유효목두께(= 0.707s),  $l_{et}$ 는 용접재 인장 유효길이(=  $l_t - 2s$ ),  $l_{ev}$ 는 용접재 전단 유효길이(=  $l_v - 2s$ ),  $F_{uw}$ 는 용접재 인장강도,  $s$ 는 필릿 용접 크기,  $l_t$ 와  $l_v$ 는 각각 하중직각방향과 하중방향 용접재의 길이이다.

### 2.2 국내(KDS2019)<sup>[1]</sup> 및 미국강구조학회 기준(AISC2016)<sup>[13]</sup>

국가건설기준센터의 국내 강구조 설계기준 KDS2019와 미국강구조학회 설계기준 AISC2016에서는 용접부의 설계강도를 모재의 한계상태와 용접재(용착금속부)의 한계상태 강도 중 작은 값으로 규정하고 있다. 이 연구에서는 용접접합부의 모재파단이 아닌 용착금속부파단과 내력평가에 초점을 둔다. 식 (3)과 같이 용접재(용착금속부)의 유효단면적( $A_{we}$ )에 용접재의 공칭강도( $F_{nw}$ )를 곱한 값을 필릿용접부의 용접재 강도( $P_n$ )로 규정하고 있다.

$$P_n = A_{we} F_{nw} \quad (3)$$

여기서,  $A_{we}$ (용접재의 유효단면적) =  $a l_e$ ,  $F_{nw}$ (용접재 공칭강도) =  $0.6 F_{uw}$ ,  $a$ (유효목두께) =  $0.7s$ ,  $l_e$ (유효용접길이) =  $l - 2s$ ,  $s$ : 필릿용접크기,  $F_{uw}$ : 용접재 인장강도,  $l$ : 용접길이.

필릿 용접접합부에서 하중방향 용접강도(전단파단강도)와 하중직각방향 용접강도(인장파단강도) 산정에서 용접재 공칭강도( $F_{nw}$ )는 동일하게  $0.6 F_{uw}$ 을 적용한다.

## 3. 이종강종 용접접합부 실험계획

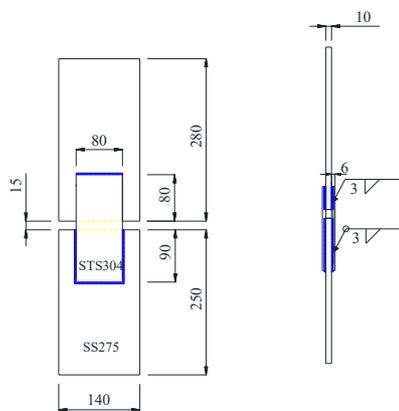
### 3.1 실험계획 및 방법

오스테나이트계 스테인리스강(STS304)<sup>[15]</sup>과 탄소강인 일반구조용 압연강재(SS275)<sup>[16]</sup> 평판을 열전도율이 낮고 열팽창계수가 커서 용접이 어려운 스테인리스강을 기준으로 하여 스테인리스강 용접봉으로 용접하는 각 실험체별 2개씩 총

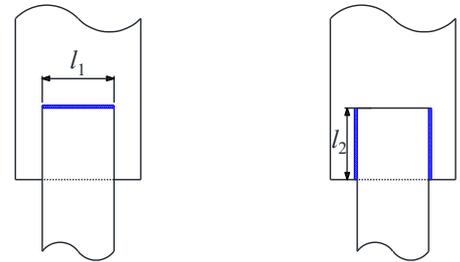
8개의 필릿 용접접합부 실험체를 계획·제작하였다. Table 1에는 실험체명, 두 강판의 모재 공칭두께( $t_n$ ), 공칭용접크기( $s_n$ ) 및 용접선의 용접길이( $l_1, l_2$ )를 나타냈다.  $l_1$ 은 하중직각 방향 용접길이,  $l_2$ 는 하중방향 용접길이,  $l_t$ 는 각 실험체의 전체 용접길이이다. Fig. 1과 같이 상하부의 내판을 일반구조용 압연강재 SS275의 공칭두께 10 mm 평판의 중앙부 양쪽에 오스테나이트계 스테인리스강 STS304 공칭두께 6 mm 평판 두 개를 공칭 용접크기 3mm로 필릿용접을 한다. 용접봉은 용접성이 낮은 스테인리스강을 기준으로 용접봉을 오스테나이트계 스테인리스강용인 K사의 T308(KS Y308)<sup>[17]</sup>으로 선정하였다. 용접방법으로 GTAW(gas tungsten arc welding) 중에 박판 스테인리스강 용접에 사용되는 TIG(tungsten inert gas) 용접을 적용한다. 용접접합부의 주요 변수는 Fig. 2와 같이 하중에 대한 용접선의 방향(하중직각방향 용접: TFW, 하중방향 용접: LFW)과 용접길이(40 mm와 80 mm)이다.

**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)
	Stainless steel STS304	Carbon steel SS275		$l_1$	$l_2$	
CATFW40-1	6.0	10.0	3.0	40	-	80
CATFW40-2				80	-	160
CATFW80-1				-	80	160
CATFW80-2				-	160	320
CALFW40-1				-	80	160
CALFW40-2				-	160	320
CALFW80-1				-	160	320
CALFW80-2				-	160	320



**Fig. 1.** Geometry of specimen for CATFW80 (Unit : mm)



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

Table 1의 실험체명 중 ‘CATFW40-1’와 ‘CALFW80-2’에서 첫 번째 문자 ‘C’는 탄소강(carbon steel)을, 두 번째 ‘A’는 스테인리스강(austenitic stainless steel)을, 세 번째 ‘TFW’와 ‘LFW’는 각각 용접선이 하중방향과 직각인 경우(transverse fillet weld)와 용접선이 하중방향과 평행인 경우(longitudinal fillet weld)를 나타내며 숫자 ‘40’과 ‘80’은 용접길이를, 마지막으로 ‘1’과 ‘2’는 실험체 번호를 나타낸다.

접합부 실험은 2,000kN급의 만능시험기(UH-200A)를 사용하여 단순인장실험을 실시하였다. 실험체는 하중방향의 강재변위를 측정하기 위해 시험기 후면에 두 개의 변위계(LVDT)를 설치하고, 만능시험기(UH-200A)의 자동제어를 위해 Winsoft 프로그램의 변위제어방법으로 분당 0.5 mm의 속도로, 항복 이후에는 분당 1.0 mm의 속도로 하중방향 변위를 증가시키면서 실험체가 중국파단되어 내력이 급격히 저하된 시점까지 가력을 수행하였다.

### 3.2 모재 재료시험

오스테나이트계 스테인리스강(STS304)과 탄소강인 일반구조용 압연강재(SS275)의 기계적 성질을 파악하기 위하여 KS B 0801<sup>[18]</sup>에 따라 Fig. 1의 중앙부 양쪽에 위치한 STS304의 공칭두께 6 mm 평판과 상하부 내판인 SS275의 공칭두께 10 mm 평판에 대해 인장시험편을 각각 3개씩 제작하였다. 재료인장시험 결과 얻어진 응력-변형도 곡선과 재료적 특성을 Table 2에 정리하였다. 항복강도는 0.2% offset 방법에 의해 산정하였다. 오스테나이트계 스테인리스강(STS304)의 평균 항복강도( $F_y$ )는 294.84 MPa, 인장강도( $F_u$ )는 712.84 MPa, 탄성계수( $E$ )는 152.32 GPa, 항복비( $F_y/F_u$ )는 41.35%, 연신율( $EL$ )은 56.48%로 나타났다. 탄소강 SS275의 평균 항복강도( $F_y$ )는 310.99 MPa, 인장강도( $F_u$ )는 480.36 MPa, 탄성계수( $E$ )는 191.71 GPa, 항복비( $F_y/F_u$ )는

64.72 %로 나타났다. 두 강종 모두 KS<sup>[15],[16]</sup>의 최저 항복강도(스테인리스강과 탄소강에 대해 각각 205 MPa과 275 MPa) 및 인장강도(스테인리스강과 탄소강에 대해 각각 520 MPa과 410 MPa) 기준을 만족하였다. 오스테나이트계 스테인리스강은 탄소강에 비해 항복강도와 항복비는 낮았고 인장강도와 연신율은 높게 나타났다.

### 3.3 용착금속 재료시험

오스테나이트계 스테인리스강 용접봉 Y308로 이중강종을 TIG 용접한 용착금속(용접재)의 기계적 성질을 파악하기 위해 KS B 0821<sup>[19]</sup>(ASTM E8/E8M<sup>[20]</sup>)에 따라 Table 3의 봉시험편 제작치수를 기준으로 Fig. 3과 같이 용착금속 인장시험편 3개를 비드(bead) 부분에서 와이어 절단가공으로 제작하였다. 시험편명 ‘304-W-1’에서 ‘304’는 오스테나이트계 스테인리스강을, ‘W’는 용착금속부(weld)를, 마지막으로 ‘1’은 시험편 번호를 나타낸다. 인장시험을 수행한 결과를

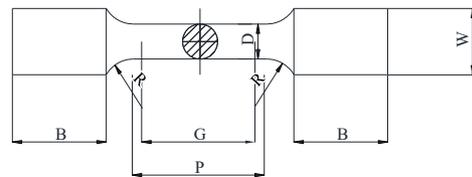
Table 4에 정리하였다. 평균 항복강도( $F_{yw}$ )는 296.49 MPa, 인장강도( $F_{uw}$ )는 869.17 MPa, 탄성계수( $E$ )는 178.86 GPa, 항복비( $F_{yw}/F_{uw}$ )는 34.06 %, 연신율( $EL$ )은 35.94 %로 나타났다. 스테인리스강 모재인 STS304의 재료특성과 비교한 결과, 인장강도와 탄성계수는 높게 나타났고 항복강도는 유사했으며 항복비와 연신율은 낮게 나타났다. 용접 시 스테인리스강 용접봉과 스테인리스강 모재뿐만 아니라 탄소강 모재도 용융되어 용착금속이 형성되어 연신율이 낮아졌다. 오스테나이트계 스테인리스강의 TIG 용접봉(Y308)의 재료에 대한 KS D 7026<sup>[17]</sup>은 폐지되어 동일 재료인 피복아크 용접봉(T308)에 대한 KS D 7014<sup>[21]</sup>에서는 용착금속의 최저 인장강도를 550 MPa로 최저 연신율을 35 %로 규정하고 있다. 한쪽의 모재인 탄소강이 일부 용융되어 용착금속에 포함되었지만 형성된 스테인리스강 용착금속의 재료성질(Table 4)은 KS D 7026 기준을 만족하였고 탄소강과 스테인리스강의 이중강종 용접시 용착금속의 설계강도는 사용한 스테인리스강 용접봉의 KS 강도를 적용 가능하리라 사료된다.

**Table 2.** Coupon test results for STS304 and SS275 base metals

Coupon	Actual thickness $t_e$ (mm)	Young's modulus $E$ (GPa)	0.2 % offset yield stress $F_y$ (MPa)	Tensile strength $F_u$ (MPa)	Yield ratio $F_y/F_u$ YR (%)	Elongation $EL$ (%)
STS304-1	5.94	151.29	282.62	706.85	39.98	56.36
STS304-2	5.92	157.15	301.82	717.33	42.08	55.48
STS304-3	5.90	148.51	300.07	714.36	42.01	57.60
Average	5.92	152.32	294.84	712.84	41.35	56.48
SS275-1	9.78	216.09	303.14	470.89	64.38	29.62
SS275-2	9.77	172.55	328.89	497.48	66.11	34.16
SS275-3	9.77	186.48	300.95	472.71	63.66	35.86
Average	9.77	191.71	310.99	480.36	64.72	33.21

**Table 3.** Geometric information for weld metal (KS D 0821 and ASTM E8-E8M-09)

Notation	Coupon and dimension (mm)
	304-W
Gage diameter, $D$	2.5 ( $\pm$ 0.1)
Gage length, $G$	12.5 ( $\pm$ 0.1)
Section parallel, $P$	20
Radius of fillet, $R$	2
Grip length, $B$	30
Grip width, $W$	5



(a) Drawing of weld metal cut tensile coupon



(b) Weld metal cut tensile coupon

**Fig. 3.** All weld metal test specimen and cut tensile coupon

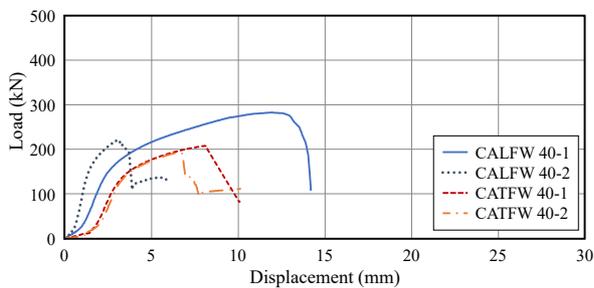
**Table 4.** Coupon test results for STS304 weld metal

Coupon	Measured diameter $D$ (mm)	Young's modulus $E$ (GPa)	0.2 % offset yield stress $F_{yw}$ (MPa)	Tensile strength $F_{uw}$ (MPa)	Yield ratio $F_{yw}/F_{uw}$ YR (%)	Elongation $EL$ (%)
304-W-1	2.55	170.93	248.24	743.51	33.39	38.18
304-W-2	2.55	189.89	298.53	932.41	32.02	36.12
304-W-3	2.54	175.77	342.70	931.59	36.79	33.53
Average	2.55	178.86	296.49	869.17	34.06	35.94

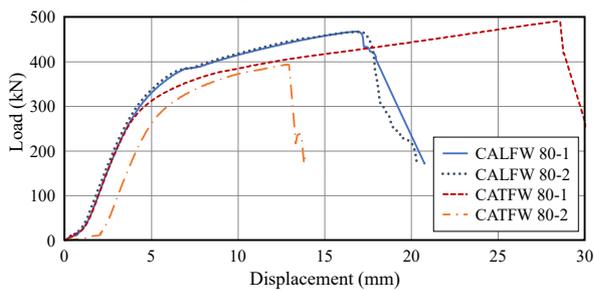
### 4. 용접접합부 실험결과

#### 4.1 파단형상 및 하중-변위곡선

3.1절의 용접접합부 실험방법에 따라 단순인장실험을 수행하였다. 실험결과로부터 얻어진 하중-변위곡선과 실험종료시점에서 관찰된 대표적인 파단형태를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타냈다. 용접선이 하중방향과 수직인 용접실험체 CATFW 시리즈는 용착금속부의 인장파단(tensile fracture, Fig. 5(a)·Fig. 5(b) 참조)이, 용접선이 하중방향과 평행인 CALFW 시리즈는 용착금속부의 전단파단(shear fracture, Fig. 5(c)·Fig. 5(d) 참조)이 발생하였다. Fig. 4의 하중-변위 곡선으로부터 CATFW 시리즈와 CALFW 시리즈의 실험체는 각각 용착금속부의 인장파단과 전단파단에 의해 내력이 급격하게 저하되는 것을 알 수 있다.

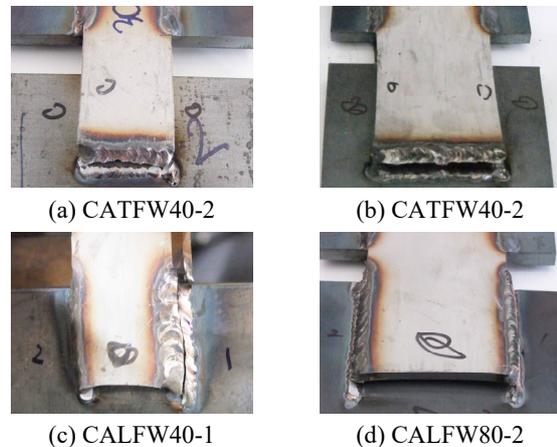


(a) CA40 series



(b) CA80 series

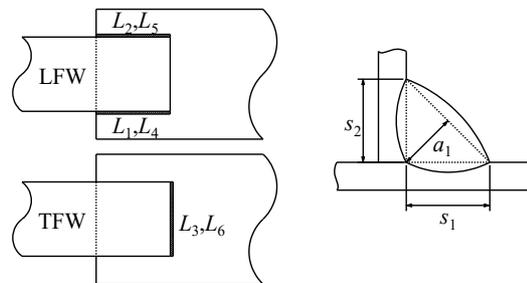
**Fig. 4.** Load-displacement curves of welded specimens



**Fig. 5.** Fracture shape of specimen in each series

#### 4.2 실측치수 및 최대내력 비교

변수별 동일조건에서 실험내력을 비교하기 위해 실험전에 실험체로부터 Fig. 6에 표시한 기호를 참조하여 각 실험체별 용접길이와 필릿용접크기를 측정하였다. 측정결과를 Table 5에 정리하였다. 필릿용접크기는 동일 용접선상에서 2개수에서 측정한 값의 평균값으로 하였다. CALFW 시리즈 실험체에서 측정한 용접길이를 앞면에 대해서  $L_1$ 과  $L_2$  뒷면에 대해서  $L_4$ 와  $L_5$ , CATFW 시리즈 실험체에 대해서 측정한 용접길이는  $L_3$ 과  $L_6$ 로 표시하였다. 용접크기는  $s_1$ 과  $s_2$ 로, 평균 용접크기는  $s_m$ , 평균 유효목두께는  $a_{1m}$ 으로 정의하였다.



**Fig. 6.** Symbol of weld length and weld size

Table 6에 실험결과 얻어진 최대내력( $P_{ue}$ ), 각 실험체 필릿 용접의 유효목두께( $a_{1m}$ ) 등을 정리하였다. 용접방향 및 용접 길이에 따른 최대내력을 비교하기 위해 동일조건에서의 용접길이와 용접크기로 실험내력을 보정하였다. 각 실험체에서 측정된 용접크기의 평균( $s_m$ )에 0.707을 곱한 값인 평균유효목두께( $a_{1m}$ ) 중에 실험체 CATFW40-1의 값과 Table 1의 총설계용접길이( $l_t$ )를 기준으로 산정한 보정계수( $\alpha$ )를 실험내력( $P_{ue}$ )에 곱하여 보정최대내력( $P_{uem}$ )을 산정하였고 그에 대한 평균값( $P_{uem,a}$ )을 표시하였다. 동일용접방향에 대해 용접길이에 따른 내력비교를 위해 공칭용접길이가 80 mm인 실험체의 평균최대내력을 공칭용접길이가 40 mm인 실험체의 평균최대내력으로 나눈 용접방향별 용접길이에 따른 평균내력비( $P_{uem,a(l:80)}/P_{uem,a(l:40)}$ )를 정리하였다.

CATFW 시리즈와 CALFW 시리즈의 평균내력비는 각각

2.27, 1.73으로 나타났고 평균 2.00으로 용접길이가 2배 증가함에 따라 내력도 동일한 비율로 증가하는 경향을 보였다. Table 6의 실험결과에서 알 수 있듯이 CATFW80-1 실험체의 내력이 CATFW80-2보다 상대적으로 높았고 CALFW 40-2 실험체의 내력이 CALFW40-1보다 낮았기 때문에 길이에 따른 최대내력비에 있어 차이가 발생한 것으로 판단된다. Table 7은 동일용접길이를 기준으로 인장파단된 CATFW 시리즈의 최대내력에 대한 전단파단된 CALFW 시리즈의 최대내력비를 정리하였고 평균 0.66으로 나타났다. 탄소강(SS275) 용착금속 파단 용접접합부를 실험한 기존연구에서 인장파단내력에 대한 전단파단내력비는 0.45로 나타났다<sup>[10]</sup>. 오스테나이트계 스테인리스강 용접접합부 실험<sup>[7]</sup>에서는 편심이 작용하지 않는 경우 평균내력비가 이 연구와 유사한 0.62값으로 나타났다. 현행설계기준인 스테인리스강 ASCE

**Table 5.** Measured weld length and weld size

Specimen	Measured front weld length (mm)						Total weld length $L_t$ (mm)	Measured weld size (mm)			Measured average throat thickness $a_{1m} = 0.707s_m$ (mm)
	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$L_6$		$s_1$	$s_2$	$s_m$	
CATFW40-1			41.10			42.50	83.60	7.56	6.73	7.15	5.05
CATFW40-2			41.10			45.15	86.25	6.88	6.12	6.50	4.59
CATFW80-1			83.05			85.20	168.25	7.41	5.82	6.61	4.68
CATFW80-2			84.20			83.28	167.48	7.84	5.82	6.83	4.83
CALFW40-1	43.30	40.25			42.25	43.10	168.90	6.98	5.83	6.40	4.53
CALFW40-2	42.40	43.20			41.74	40.06	167.40	5.60	4.76	5.18	3.66
CALFW80-1	80.62	83.75			80.78	79.53	324.68	6.68	5.94	6.31	4.46
CALFW80-2	79.95	82.52			83.27	81.25	326.99	7.22	5.89	6.55	4.63

**Table 6.** Test results and strength ratio

Specimen	Test ultimate strength $P_{ue}$ (kN)	Average throat thickness $a_{1m}$ (mm)	Modification factor $\alpha$ $a_{1m(CATFW40-1)}/a_{1m}$	Mean strength $P_{uem,a}$ (kN)	Strength ratio $P_{uem,a(l:80)}/P_{uem,a(l:40)}$	
CATFW40-1	207.52	5.05	0.96	197.93	2.27	
CATFW40-2	193.30	4.59	1.02			
CATFW80-1	491.25	4.68	1.03			
CATFW80-2	393.84	4.83	1.00			
CALFW40-1	282.67	4.53	1.06	294.66	1.73	
CALFW40-2	220.19	3.66	1.32			
CALFW80-1	468.13	4.46	1.12	510.62		
CALFW80-2	467.26	4.63	1.07			
Average						2.00

**Table 7.** Strength ratio according to weld direction

Equation of weld length for strength ratio according to weld direction	Strength ratio	Average strength ratio
CALFW40/(CATFW40*2)	0.74	0.66
CALFW80/(CATFW80*2)	0.57	

**Table 8.** Strength comparison of test results and design predictions

Specimen	Test ultimate strength $P_{ue}$ (kN)	Design strength $P_n$ (kN)		Strength ratio ( $P_n/P_{ue}$ )	
		ASCE	KDS/AISC	ASCE	KDS/AISC
CATFW40-1	207.52	259.06	155.43	1.25	0.75
CATFW40-2	193.30	257.94	154.76	1.33	0.80
CATFW80-1	491.25	617.94	370.76	1.26	0.75
CATFW80-2	393.84	630.50	378.30	1.60	0.96
CALFW40-1	282.67	372.31	297.85	1.32	1.05
CALFW40-2	220.19	322.42	257.94	1.46	1.17
CALFW80-1	468.13	854.85	683.88	1.83	1.46
CALFW80-2	467.26	889.32	711.45	1.90	1.52
Average				1.49	1.06

기준의 경우, 식 (1)-(2)에서 용착금속의 인장파단강도에 대한 전단파단강도비는 0.75임을 알 수 있다. 그러나 탄소강 기준식인 AISC/KDS에서는 용접방향에 관계없이 동일내력식(즉, 내력비는 1.0)으로 규정하고 있다.

### 5. 설계내력과 실험내력 비교

2절에 기술한 냉간성형 스테인리스강 설계기준 ASCE 2002<sup>[14]</sup>와 열간압연 탄소강 설계기준인 KDS2019<sup>[1]</sup>와 AISC2016<sup>[13]</sup>으로 Table 5의 실측 용접길이와 평균유효목두께( $a_{em}$ )를 적용하여 산정한 설계내력( $P_n$ )과 실험 최대내력( $P_{ue}$ )을 비교하여 Table 8에 나타냈다. 2.1절과 4.2절에서 언급한 바와 같이 ASCE2002 기준에서 인장파단은 용접재 인장강도인  $F_{uw}$ 를, 전단파단에서는 전단강도인  $0.75F_{uw}$ 를 적용한다. 용접접합부에서 실측된 유효목두께와 용접길이를 적용하여 기준내력을 계산하였다. 용접재 인장강도( $F_{uw}$ )는 Table 4에서 다른 두 시험편에 비해 강도가 낮은 304-W-1 시험편의 시험결과를 제외하고 평균값을 적용하였다. 2.2절에서는 CATFW와 CALFW 실험체에 대한 필릿용접부의 용

착금속강도 계산 시 KDS2019/AISC2016 기준은 동일하게 용접선의 방향과 상관없이 용착금속의 전단강도( $= 0.6F_{uw}$ )를 기준으로 하고 설계내력을 산정하였다.

실험최대내력( $P_{ue}$ )에 대한 설계기준내력( $P_n$ )의 최대내력비( $P_n/P_{ue}$ )는 ASCE 기준에 의해서는 1.25 - 1.90의 분포(평균 1.49)를, AISC/KDS 기준에 의해 0.75 - 1.52의 분포(평균 1.06)를 나타냈다. 최대내력 비교결과, ASCE 기준은 실험체 전체에 대해 과대평가했고 AISC/KDS 기준은 인장파단된 CATFW 시리즈 실험체에 대해서는 과소평가를, 전단파단된 CALFW 시리즈 실험체에 대해서는 CALFW40-1를 제외하고는 과대평가하는 경향을 보였다. ASCE 기준에서는 인장파단강도에 비해 전단파단강도를 높게 과대평가하였는데 이는 4.2절에서 언급한 바와 같이 실험결과에서는 인장파단내력에 대한 전단파단내력의 비가 0.64였는데 기준에서는 0.75로 규정되어 있어 상대적으로 기준 전단파단강도가 높게 평가되었다. AISC/KDS 기준에서는 설계인장파단강도가 실험내력을 과소평가하였는데 이는 실험결과에서 인장파단강도가 전단파단강도보다 높음에도 불구하고 2.2절의 식 (3)에서와 같이 공칭강도로 전단강도를 적용하기 때문인 것으로 판단된다.

## 6. 결론

오스테나이트계 스테인리스강(STS304) 판두께 6 mm 평판과 탄소강인 일반구조용 압연강재(SS275) 판두께 10mm 평판의 이종강종을 오스테나이트계 스테인리스강 용접봉을 사용하여 TIG 용접으로 용접재(용착금속부)가 파단되도록 실험체를 제작하였고 단순인장실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 모재인 STS304의 재료성질과 오스테나이트계 스테인리스강 용접봉으로 용접하여 생성된 용착금속의 재료성질을 비교한 결과, 용접열에 의한 열처리 효과로 인장강도와 탄성계수는 높았으며 항복강도는 유사했고 항복비와 연신율은 낮게 나타났다. 다른 모재인 탄소강 SS275와 비교할 때 항복강도는 유사하고, 인장강도는 1.81배 높았고 항복비는 큰 인장강도 값으로 탄소강에 비해 47% 낮았다. 두 모재 및 용착금속강도는 KS의 최저기준을 모두 만족하였다. 스테인리스강 용접봉에 의해 형성된 용착금속의 재료적 성질이 다른 강종인 탄소강 모재가 일부 용융되고 열영향에 의해 스테인리스강 모재와 강도와 연신율에 있어 차이가 발생하였다.
- (2) 하중방향에 대한 용접선의 배치에 따라 용접재(용착금속부)에서 CATFW 시리즈 실험체에서는 인장파단이, CALFW 시리즈 실험체에서는 전단파단이 발생하였다. 동일 용접방향에 대해 용접길이가 2배 증가하였을 때 평균 실험내력도 평균 2배 증가하였다. 동일용접길이와 용접크기를 기준으로 하중방향에 대한 용접선의 배치에 따른 최대내력은 인장파단된 CATFW 시리즈 실험체가 전단파단된 CALFW 시리즈 실험체보다 평균 34% 높게 나타났다.
- (3) 스테인리스강 설계기준인 ASCE와 탄소강 설계기준인 KDS/AISC의 현행기준식에 의한 용접재(용착금속부)의 설계내력과 실험내력을 비교한 결과, ASCE 기준은 CATFW와 CALFW 시리즈 접합부의 내력을 평균 49% 과대평가하였고, KDS/AISC기준은 용접선의 하중방향별에 따른 강도차이를 구분하지 않은 관계로 인장파단된 CATFW 시리즈 실험체의 내력을 과소평가하였다. 전단파단된 CALFW 시리즈 실험체에 대해서는 전반적으로 과대평가하였다.

추후, 이 연구결과로부터 이종강종간 용접접합부의 용착금속의 인장파단내력과 전단파단력이 차이가 있으므로 용접선의 하중방향별 형태에 따라 내력식을 구분하고 최대내력 결정시점에서 응력분포를 고려해서 이종강종간 용접부의 재료특성을 반영한 설계내력식을 추천할 필요가 있다. 또한, 반복피로하중을 받는 경우에 대한 안전성 검토가 요구된다.

## 참고문헌(References)

- [1] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2019) *Steel Structures Design Standard for Building Structure* (KDS 41 31 00: 2019), Korea (in Korean).
- [2] KSSC (2020) *Design of Cold-Formed Stainless Steel Structures*, Goomiseoguan (in Korean).
- [3] Kim, S.S., Kim, J.W., and Kim, T.S. (2019) An Experimental Study on the Buckling Behaviors of Stainless Steel Tubular Columns Under Concentric Axial Compression, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.31, No.4, pp.273-282 (in Korean).
- [4] Kim, S.S., Kim, J.Y., and Kim, T.S. (2020) Finite Element Analysis on Buckling Strength of Stainless Steel Circular Hollow Section Columns Under Concentric Axial Compression, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, 20, pp.1831-1848.
- [5] 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).
- [6] Kim, T.S., and Kim, M.S. (2013) An Experimental Study on Structural Behaviors of Double Shear Bolted Connections Fabricated with Ferritic Stainless Steel (STS430), *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.5, pp.463-474 (in Korean).
- [7] Kim, T.-S. (2013) Ultimate Strength of Fillet-Welded Connection in Thin-Walled Austenitic Stainless Steel, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.29, No.9, pp.31-38 (in Korean).
- [8] 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).
- [9] Lee, H.C., Hwang, B.K., and Kim, T.S. (2017) Ultimate

- Strength of Austenitic Stainless Steel Fillet-Welded Connections with Weld Metal Fracture, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.116, pp.145-153.
- [10] Kim, T.S., and Kang H.S. (2020) An Experimental Study on Ultimate Strength of Carbon Steel Welded Connection with Weld Metal Block Shear Fracture, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.4, pp.225-234 (in Korean).
- [11] Kim, T.S., Hwang, B.K., and Lim, Y.C. (2019) 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.
- [12] Kim, G.Y., Kim, T.S., Hwang, B.K., and Kim, J.S. (2020) Ultimate Strength of Lean Duplex Stainless Steel Single-Shear Bolted Connections with Four Bolts, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.155, 106950.
- [13] American Institute of Steel Construction (2016) *Specification for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 360-16), USA.
- [14] American Society of Civil Engineers (2002) Specification for the Design of Cold-Formed Stainless Steel Structural Members (SEI/ASCE-8-02), USA.
- [15] Korean Agency for Technology and Standards (2020) *Hot Rolled Stainless Steel Plates, Sheets and Strip* (KS D 3705: 2020), Korea (in Korean).
- [16] Korean Agency for Technology and Standards (2018) *Rolled Steels for General Structure* (KS D 3503: 2018), Korea (in Korean).
- [17] Korean Agency for Technology and Standards (2010) *Stainless Steel Welding Rods and Wires* (KS D 7026: 2010), Korea (in Korean).
- [18] Korean Agency for Technology and Standards (2007) *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0801: 2007), Korea (in Korean).
- [19] Korean Agency for Technology and Standards (2007) *Methods of Tension and Impact Tests for Deposited Metal* (KS B 0821: 2007), Korea (in Korean).
- [20] American Society for Testing and Materials (2015) *Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials* (ASTM E8/E8M-15a), USA.
- [21] Korean Agency for Technology and Standards (2008) *Stainless Steel Covered Electrodes* (KS D 7014: 2008), Korea (in Korean).

---

**요 약**: 이 연구에서는 실험적 연구를 통해 오스테나이트계 스테인리스강(STS304)와 일반구조용 강재인 탄소강(SS275)의 이중간 티그 용접접합부의 최대내력과 용착금속 파단메커니즘을 조사하였다. 실험체의 주요변수는 용접길이와 하중방향에 대한 용접방향이 다. 실험체의 파단은 용착금속에서 인장파단과 전단파단이 발생하였다. 모재와 용착금속의 재료성질은 한국산업규격(KS)에서 규정하는 최저요구조건을 만족하였다. 하중직각방향 용접선을 갖는 TFW 시리즈 실험체의 내력은 하중방향 용접선을 갖는 LFW 시리즈 실험체의 내력보다 높았다. 현행설계기준식인 미국토목학회(ASCE), 한국설계기준(KDS)과 미국강구조학회(AISC) 기준은 이중강종 용접 접합부의 최대내력을 과대평가하거나 과소평가하는 것으로 조사되었다.

**핵심용어**: 오스테나이트계 스테인리스강, 탄소강, 이중강종 용접접합부, 용접길이, 용접방향, 설계기준

---