

고강도 강재의 언더매칭 종방향 필릿용접부 공칭강도

조재병¹ · 김윤기^{2*}

¹교수, 경기대학교, 토목공학과, ²박사과정, 경기대학교, 토목공학과

Strength of Undermatching Fillet Welded Longitudinal Joints of High Strength Steel

Jo, Jae Byung¹, Kim, Yun Gi^{2*}

¹Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyonggi University, Kyonggi, 162270, Korea

²The Doctor's Course, Dept. of Civil Engineering, Kyonggi University, Kyonggi, 162270, Korea

Abstract - Recently, the demand for undermatching weld has increased as high strength steel is used and also expected to be used more for steel structures. Presented in this study is a more appropriate formula for a nominal strength of undermatching fillet welded longitudinal joints of high strength steel ($f_u \geq 600 MPa$). Relevant test data were collected from overseas as well as Korea and analyzed to derive the formula. Tensile strength of parent materials and matching ratio of weld metal to base material strength were selected as major parameters. The derived formula was compared with the test results and showed good agreement. In addition, the effects of matching ratio were investigated for the parent material(HSB460 and HSB690) and weld metal combinations according to KS and also compared with the test data. In general, the values of nominal strength calculated in accordance with the domestic steel structure design standards (KDS 14 31 25) are smaller than the test data and the differences are becoming even greater as the matching ratio decreases. However, by applying the matching ratio correction factors proposed in this study, the values of calculated nominal strength were found to lie on the safe side with almost same level of differences from the test data for all range of matching ratios reviewed.

Keywords - Undermatching weld, Matching ratio, Longitudinal fillet weld, High strength steel, Nominal strength

1. 서론

높은 기능성과 경제성이 요구되는 강구조물의 건설에 근래 들어 고강도, 고성능 강재의 사용이 증가하고 있다^[6]. 고강도 강재를 적절하게 잘 사용하기 위해서는 인성과 용접성이 좋은 고성능 강재의 개발뿐만 아니라 강구조물 연결부의 구조적 안전성, 시공성 및 경제성이 확보되어야 한다. 이와 관련 용접부에 대해서는 용접 길이, 용접 상세 및 목두께, 그리고 용접재료 등이 요구되는 강도에 적합하도록 최적화가 이루어져야 할 것이다^{[7],[8]}.

사용하는 용접금속의 강도에 따라 매칭용접(용접금속의 강도

가 모재의 강도와 동일하거나 강도등급 한 단계 이내의 범위에서 큰 경우) 또는 언더매칭용접(용접금속의 강도가 모재의 강도보다 작은 경우)으로 구분할 수 있는데, 일반적인 경우 매칭용접의 적용을 원칙으로 하고 있다. 그러나 고강도 강재에 매칭용접을 실시할 경우 용접부에서 요구되는 인성을 얻기 어렵고, 열영향부에 마르텐사이트 조직이 과도하게 형성되기 쉬워서 용접균열이 발생할 가능성이 높아지는 등 전반적으로 용접성이 떨어진다. 따라서 모재의 강도가 높아질수록 용접성을 확보하기 위해 언더매칭용접을 적용할 필요성이 더 커진다고 할 수 있다.

이와 같은 경우를 고려해서 국내 강구조 연결 설계기준^[1] KDS 14 31 25, 4.1.2.4(3)에서는 HSB690과 같은 고강도 강재에 언더매칭 용접을 할 경우 모재 강도뿐만 아니라 용접재료의 강도도 같이 고려하여 용접부의 강도를 결정할 수 있도록 규정되어 있다. 또한 설계기준의 용접부 강도는 매칭용접을 기준으로 하고 있으며, 언더매칭용접에 대해서는 용접금속의 인장강도를 사용하도록 규정하고 있다.

Note.-Discussion open until June 30, 2019. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 16, 2018; revised October 29, 2018; approved on November 01, 2018. Copyright © 2018 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-10-6229-0872 Fax. +82-31-248-7506

E-mail. goodream@hanmail.net

이와 같이 언더매칭용접의 필요성과 설계강도에 대해서 설계 기준에 규정되어 있음에도 불구하고 매칭비(모재의 인장강도에 대한 용접금속 인장강도의 비)가 용접부의 강도에 미치는 영향에 대해서 구체적으로 연구되고, 시험 결과 등의 분석을 통해 제안된 것은 없는 상태이다. 다만, 언더매칭 용접부의 강도 산출에 모재의 인장강도보다 작은 용접금속의 인장강도를 기본변수로 사용하여 계산한 용접부의 강도는 실제보다는 안전 측이 될 것이라는 추정은 가능할 것이다.

이 연구에서는 세계 각국에서 수행한 필릿용접부에 대한 강도 시험 결과를 수집하고 분석하여, 고강도 강재의 언더매칭 종방향 필릿용접부의 강도를 적절하게 산출할 수 있는 계산식을 제안하고자 한다.

2. 문헌조사 및 연구방향

2.1 국내의 설계기준

설계기준에 적용되고 있는 필릿용접부의 강도는 국내의 강구조 연결 설계기준^[1]의 경우 모재의 인장강도를, 세계 각국 대부분의 설계기준에서는 모재 또는 용접금속의 인장강도 중 하나를 주요변수로 하고, 여기에 모재 강종 및 하중 방향에 따른 보정계수를 곱한 값을 공칭강도로 정하고 있다. 한편, 스웨덴의 기준 BSK07^[3]은 용접부 강도의 주요변수로 모재와 용접금속의 인장강도를 모두 직접 고려하는 방법을 택하고 있다. 대표적인 국내의 설계기준의 필릿용접부 공칭강도 계산식은 다음 Table 1과 같다.

2.2 국내의 문헌

언더매칭 필릿용접부의 강도에 대해 국내에서 수행된 연구는 알려진 것이 없다. Jo and Lee(2012)^[5]은 강종에 따른 필릿용접부의 공칭강도 추정식으로 주로 매칭용접된 시험체에 대한 시험 결과를 바탕으로 식(1)을 제안하였고, 언더매칭에 따른 영향의 검토 등은 이루어지지 않았다.

$$\nu_n = 187.7 \times f_u^{(-0.821)} \times \frac{f_u}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

Table 1. Comparison of nominal strength of fillet welds on Design standards of each country

Design standards	Fillet welds nominal strength
KDS 14 31 25(2017) ^[1]	$0.6F_u$ ¹⁾
ANSI/AISC 360-10 ^[4]	$0.60 F_{exx} (1.0 + 0.5 \sin^{1.5}\theta)$ ²⁾
Eurocode 3 ^[2]	$\frac{f_u}{\sqrt{3} \beta_w}$ ³⁾
BSK07 ^[3]	$f_u < f_{exx} \rightarrow 0.6 \sqrt{f_u f_{exx}}$ $f_u \geq f_{exx} \rightarrow 0.6 f_{exx}$

where, F_u = Parent Material Strength

F_{exx} = Weld metal Strength

1) HSB460 = $0.56 F_u$, HSB690 = $0.45 F_u$

Apply F_{exx} Strength instead of F_u for under-matching

2) Application of the correction factor according to the load angle measured from the welding longitudinal axis

3) Correction factor for steel grades β_w (= 0.8~1.2)

국외에서는 Ligtenberg(1968)^[20]가 식(2)와 같이 모재와 용접금속의 인장강도 산술 평균값을 용접부 강도 계산식의 주요변수로 사용할 것을 처음 제안하였으며, 스웨덴 강구조설계 기준의 초기 버전에 적용되었다.

$$F_k = \frac{F_u + F_{w,u}}{2} \quad (2)$$

여기서, F_k : 용접부 강도 계산식의 주요 변수

독일의 Rasche(2012)^[19]는 Kob P.의 시험자료를 분석하여 고강도 강재의 미스매칭 용접부의 공칭강도 계산식을 아래 식(3)과 같이 제안하였다.

$$\tau = \frac{0.25F_{u,GW} + 0.75F_{u,SZW}}{\sqrt{3} \beta_w} \quad (3)$$

여기서, τ : 필릿용접부의 공칭강도

$F_{u,GW}$: 모재의 인장강도

$F_{u,SZW}$: 용접금속의 인장강도

β_w : 강종에 따른 보정계수

2.3 조사 결과 분석 및 연구 방향

국내외 설계기준과 관련 문헌을 조사하고, 검토한 결과 언더매칭 필릿용접부의 강도에 대해 요점을 정리하면 다음과 같다.

- 스웨덴 기준 BSK07^[3]을 제외한 대부분의 설계기준은 모재

또는 용접금속의 인장강도 중 하나를 주요변수로 택하여 필릿용접부의 강도를 계산한다.

- 국내 기준 KDS^[1]에서는 모재의 인장강도를 주요 변수로 정하고, 여기에 전단강도를 고려하기 위한 계수 0.6을 곱해 필릿용접부의 공칭강도를 계산한다. 고강도 강재의 경우에는 모재의 강도에 따른 보정계수를 추가로 곱한다. 언더매칭용접의 경우에는 모재의 인장강도 대신 용접금속의 인장강도를 주요 변수로 사용한다.

- 유럽의 EC 3^[2]에서는 모재의 인장강도를 주요 변수로 정하고, 여기에 모재의 강도에 따른 보정계수로 나누어서 필릿용접부의 공칭강도를 계산한다. 이것은 매칭용접을 기준으로 한 것이며, 언더매칭 용접의 경우에 대해서는 언급이 없다.

- 스웨덴 기준 BSK07^[3]에서는 언더매칭용접의 경우 국내의 기준 KDS와 동일하게 용접금속의 인장강도를 주요변수로 사용하고 있다. 그러나 오버매칭용접의 경우(용접금속의 강도가 모재의 강도보다 큰 경우)에는 모재와 용접금속 인장강도의 기하학적 평균값을 주요변수로 사용한다.

- ANSI/AISC^[4]에서는 용접금속의 강도를 주요변수로 사용하며 모재의 강도에 따라 적용 가능한 용접금속의 종류는 기준에 명기되어 있다. 모재의 강도에 따른 보정계수는 없으나 용접 축에 대한 하중작용 방향에 따른 보정계수는 수식으로 계산한 값을 적용한다.

- 고강도 강재 언더매칭 용접에 대한 근래의 연구결과에 따르면 주요 변수 선정시 모재와 용접금속의 인장강도에 대한 영향을 일정비율로 구분 하여 모두 고려하는 방안이 제안되었다.

이상과 같이 국내의 기준과 근래의 연구결과를 포함하고 있는 문헌의 내용을 살펴본 결과 언더매칭 필릿용접부의 강도에 대해서도 다르게 제시된 것으로 분석되었다. 앞으로 고강도 강재의 사용은 계속 증가할 추세이며, 이에 따라 더 많은 언더매칭용접의 적용이 요구될 것으로 예상된다. 따라서 좀 더 적절하고 합리적인 언더매칭 필릿용접부 강도 계산식이 요구된다.

이 연구에서는 고강도 강종에 대해 수집 가능한 모든 필릿용접부 강도시험 결과를 수집하여 분석하고, 통계처리하여 언더매칭 필릿용접부의 강도를 적절히 추정할 수 있는 합리적인 대안을 제시하고자 한다.

3. 언더매칭 필릿용접부 강도 추정식 도출

3.1 시험자료 분석

이 연구의 분석에 사용한 시험결과는 모재의 인장강도가

600MPa이상, 매칭비가 0.6~1.1의 범위인 경우를 대상으로 하였으며, 그 출처는 Table 2와 같다.

Table 2. Test cases and sources used for analysis

Parent Material		weld metal		source
Code	F_u	Code	$F_{u,wm}$	
S960	1,076	13.31	915	Bjork et al. (2012) ^[9]
		12.64	690	
HSF 640	746	OK74.78	739	Niemi(1988) ^[10]
Weldox 700	833	OK75.75	758	Collin and Johansson (2005) ^[11]
Domex 650	827	OK48.00	548	
A 514	843	E7018	483	Preece(1968) ^[12]
		E9018	621	
		E11018	758	
S690	826~854	G42	577~590	Kob et al.(1987) ^[13]
S460	614~671	T46	618	Saal and Hölbling (2005) ^[14]
FeE460	613~725	G60	620	Eurocode 3 Editorial Group(1990) ^[15]
S690	873	G69	815	Kuhlmann et al. (2008) ^[16]
		G62	796	
		G46	639	
S690Q	760~797	G89	981	Kuhlmann et al. (2008) ^[18]
		G69	836	
S700M	891	G89	1028	Kuhlmann and Rasche(2012) ^[17]
		G69	800~834	
		G46	627	
S600Q	851	G89	1028	
		G69	800~834	
		G46	627	

각각의 시험결과는 인장강도가 서로 다른 모재를 사용한 경우에 대한 것이므로 시험결과를 분석하기 위해 다음과 같이 모재의 전단강도로 무차원화 시킨 무차원필릿용접시험강도 값을 사용했다.

$$\overline{F_{w,e}} = \frac{F_{w,e}}{F_{us}} = \frac{\sqrt{3} \times F_{w,e}}{F_u} \quad (4)$$

여기서, $\overline{F_{w,e}}$: 무차원필릿용접시험강도

$F_{w,e}$: 필릿용접시험강도 (MPa)

F_{us} : 모재 전단강도(MPa) ($= \frac{F_u}{\sqrt{3}}$)

F_u : 모재의 인장강도 (MPa)

또한 시험결과를 분석하기 위한 주요변수로 다음 식 (5)와 같이 계산되는 매칭비를 사용하였다.

$$\gamma = \frac{F_{u, WM}}{F_u} \quad (5)$$

여기서, γ : 매칭비

$F_{u, WM}$: 용접금속의 인장강도 (MPa)

F_u : 모재의 인장강도 (MPa)

Fig. 1.은 무차원필릿용접시험강도를 모재의 인장강도에 따라 나타낸 것으로서, 전체적으로 모재의 인장강도가 증가할수록 그 값이 감소하는 것을 보여주고 있다.

Fig. 2.는 무차원필릿용접시험강도를 매칭비에 따라 나타낸 것이다. 매칭비가 작을수록 무차원화 시킨 시험강도의 값은 작아지는 것으로 나타났다.

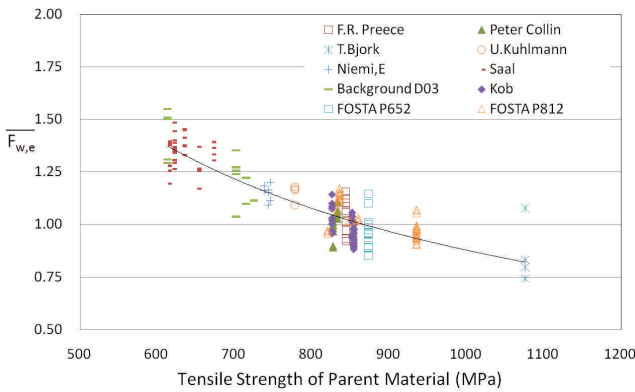


Fig. 1. Non dimensional test strengths of fillet welds vs. tensile strengths of parent material

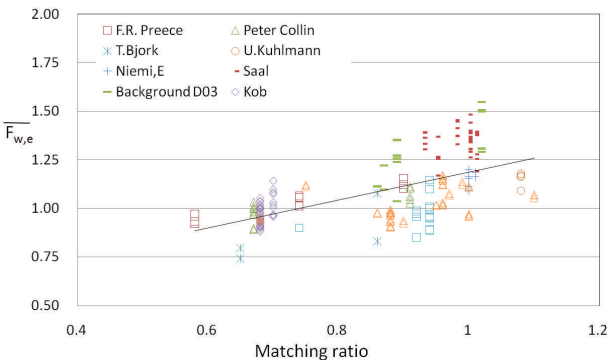


Fig. 2. Non dimensional test strengths of fillet welds vs. weld metal matching ratios

3.2 강도 계산식 도출

위의 3.1에서 보는 바와 같이 무차원화 시킨 필릿용접강도는

모재의 인장강도와 용접금속의 매칭비에 따라 영향을 받는 것으로 나타났으므로 이 연구에서는 필릿용접강도 계산식을 다음 식 (6)과 같이 모재의 전단강도에 모재의 인장강도에 따른 보정계수와 용접금속의 매칭비에 따른 보정계수를 곱해서 구하는 형식으로 정하였다.

$$F_{w, cal} = \alpha_1 \alpha_2 \frac{F_u}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

여기서, $F_{w, cal}$: 계산에 의한 필릿용접강도 추정 값

F_u : 모재의 인장강도 (MPa)

α_1 : 모재의 인장강도에 따른 보정계수

α_2 : 용접금속의 매칭비에 따른 보정계수

식 (6)에 적용된 보정계수 α_1 와 α_2 는 각각 모재의 인장강도와 매칭비의 함수이며, 무차원필릿용접시험강도 값으로부터 계산되는 보정계수 $\alpha_{1,e}$ 와 $\alpha_{2,e}$ 는 각각 다음 식 (7), (8)과 같다.

$$\alpha_{1,e} = f(F_u) = \frac{\overline{F_{w,e}}}{\alpha_2} \quad (7)$$

$$\alpha_{2,e} = f(\gamma) = \frac{\overline{F_{w,e}}}{\alpha_1} \quad (8)$$

여기서 보정계수 $\alpha_{1,e}$ 와 $\alpha_{2,e}$ 는 각각 α_2 와 α_1 을 전제로 구할 수 있으므로 우선 매칭비가 0.95~1.05인 데이터를 사용하여 시험결과에 가장 근접하는 식 $\alpha_1 (= f(F_u))$ 을 구한다. 다음에는 바로 전 단계에서 구한 $\alpha_1 (= f(F_u))$ 을 식 (8)에 적용하여 시험결과에 가장 근접하는 식 $\alpha_2 (= f(\gamma))$ 을 구한다. 이와 같은 방법을 반복 적용하면 α_1 와 α_2 각각에 대해 최종 수립된 함수식을 구할 수 있다. 이와 같은 방법으로 구한 모재인장강도 보정계수, α_1 과 매칭비 보정계수, α_2 의 계산식은 다음과 같다.

$$\alpha_1 = 192.5 \times (F_u)^{-0.77} \quad (9)$$

$$\alpha_2 = 0.280 \gamma + 0.721 \quad (10)$$

무차원화 시킨 필릿용접시험강도를 식 (10)의 α_2 로 나눈 값을 모재의 인장강도에 따라 나타내면 Fig. 3.과 같으며, 여기에 식 (9)도 곡선으로 같이 표시하였다.

또한 무차원화 시킨 필릿용접시험강도를 식 (9)의 α_1 로 나눈 값을 매칭비에 따라 나타내면 Fig. 4.와 같으며, 여기에 식 (10)을 직선으로 같이 표시하였다.

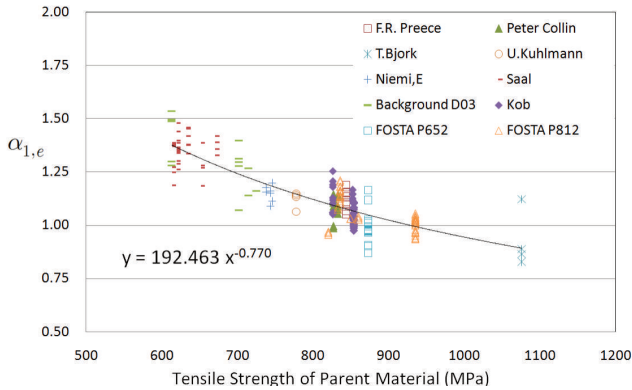


Fig. 3. $\alpha_{1,e}$ value calculated from Non dimensional test strengths of fillet welds vs. tensile strengths of parent material

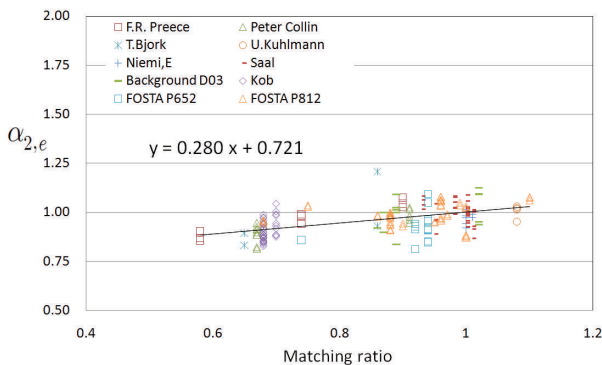


Fig. 4. $\alpha_{2,e}$ value calculated from non dimensional test strengths of fillet welds vs. weld metal matching ratios

이상과 같이 시험결과로부터 도출한 보정계수를 식 (6)에 대입하여 정리하면 다음 식 (11)과 같은 강도 계산식이 된다.

$$F_{w,cal} = (192.5 \times (F_u)^{-0.770}) (0.280 \gamma + 0.721) \frac{F_u}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

시험에 의한 필릿용접 강도를 식 (11)로 계산한 강도로 나누어 무차원화 시킨 값을 각각 모재의 인장강도와 용접금속의 매칭비에 따라 나타내면 각각 Fig. 5., Fig. 6.과 같다. 식 (11)로 무차원화 시킨 값들은 검토한 모재 인장강도와 매칭비 전 구간에 걸쳐 1.0 부근에 분포되어 있다.

3.3 공칭강도 추정식 제안

식 (11)로 계산한 강도로 나누어 무차원화 시킨 필릿용접 시험 강도 값들은 평균이 1.0이고 표준편차는 0.063이다. 정규분포로 간주하고 공칭강도 값으로 95% 값을 취하면 공칭강도 계산식은 식 (12)와 같다.

$$F_{w,cal} = (172.5 \times (F_u)^{-0.770}) (0.280 \gamma + 0.721) \frac{F_u}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

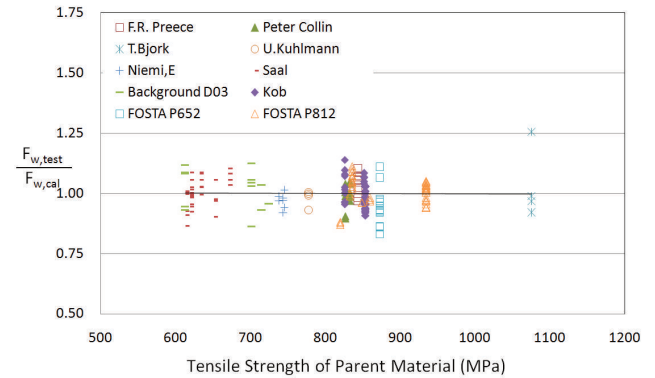


Fig. 5. Non dimensional value of test strengths over calculated strengths vs. tensile strengths of parent material

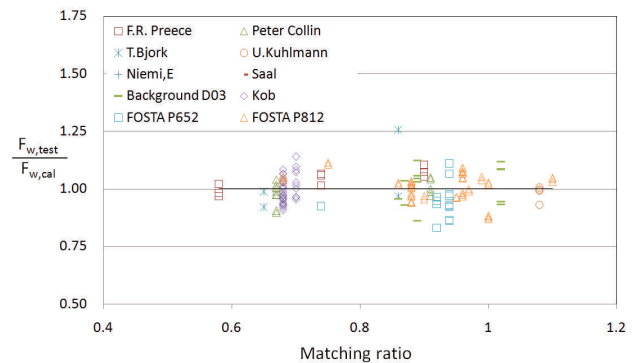


Fig. 6. Non dimensional value of test strengths over calculated strengths vs. weld metal matching ratios

4. 고찰

4.1 공칭강도 추정식 검토

식 (12)를 사용하여 계산한 필릿용접부의 공칭강도와 시험결과를 비교하여 나타내면 Fig. 7.과 같다. 각각의 시험자료에 제시된 모재와 용접금속의 인장강도를 사용해 계산한 공칭강도 값은 시험에 의한 용접부의 강도와 잘 일치하고 있다.

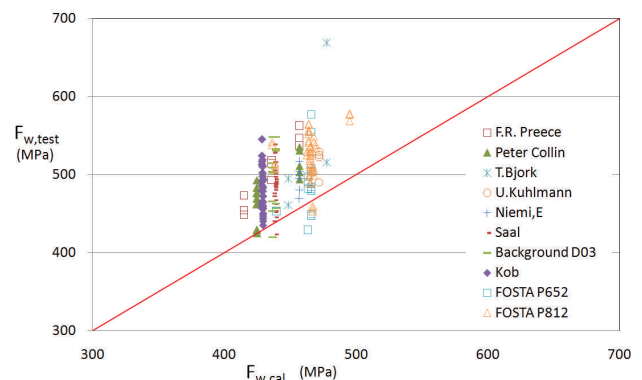


Fig. 7. Test strength vs. Proposed nominal strength

4.2 언더매칭용접에 따른 보정방법 검토

언더매칭용접에 따른 필릿용접부의 강도 보정에 대하여 식 (10)에서 구한 보정계수와 기존 설계기준 및 문헌에 제시된 강도 보정을 비교하여 보았다.

국내 강구조 기준 KDS 14 31 25^[1]의 언더매칭용접에 의한 강도 보정은 모재보다 강도가 낮은 용접금속의 인장강도를 기준으로 용접부의 공칭강도를 계산하므로 스웨덴 기준 BKS07의 경우와 동일하나, 매칭비가 0.6일 경우 C.Rasche에 의한 보정방법 대비 0.85배, 본 연구의 제안식에 의한 보정계수 대비 0.67배로 나타났다.

따라서 매칭비가 작은 언더매칭 필릿용접부의 공칭강도는 본 연구에서 제안한 매칭비에 따른 보정계수를 적용할 필요가 있을 것으로 판단된다.

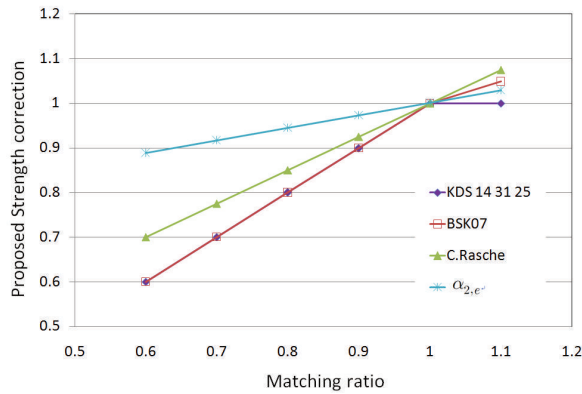


Fig. 8. Proposed strength correction for fillet welds depending on weld metal matching ratios

4.3 고강도 강재의 언더매칭 용접에 따른 보정계수

국내 KS 관련 표준에 따른 고강도 강재와 용접재료의 조합에 대해 언더매칭 필릿용접부의 공칭강도 값을 비교하였다. 인장강도 600MPa급인 HSB460과 800MPa급인 HSB690을 모재로 사용하였으며, 용접금속은 KS D 7006^[21]에 규정된 인장강도 490~780MPa의 용접금속을 사용하였다. KDS 14 31 25^[1]에 준하여 용접금속의 인장강도를 기본으로 산정한 공칭강도, 이 연구의 제안 공칭강도인 식 (12)에 의한 값, 그리고 모재 인장강도를 기준으로 KDS 14 31 25^[1]에 따른 공칭강도에 식 (10)에 의한 매칭비 보정계수를 곱한 값을 이용하여 매칭비에 따른 영향을 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다.

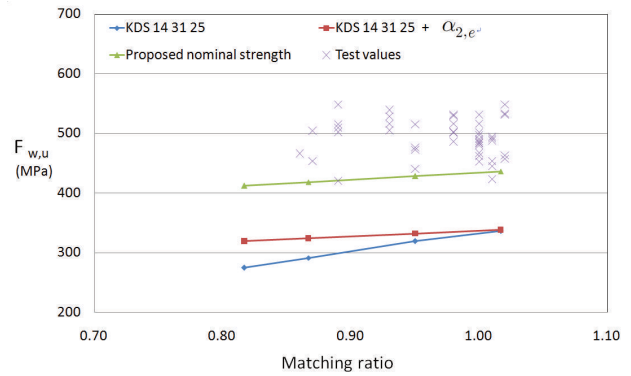


Fig. 9. Effects of weld metal matching ratios on the strength of fillet welded joints of steel class 600MPa

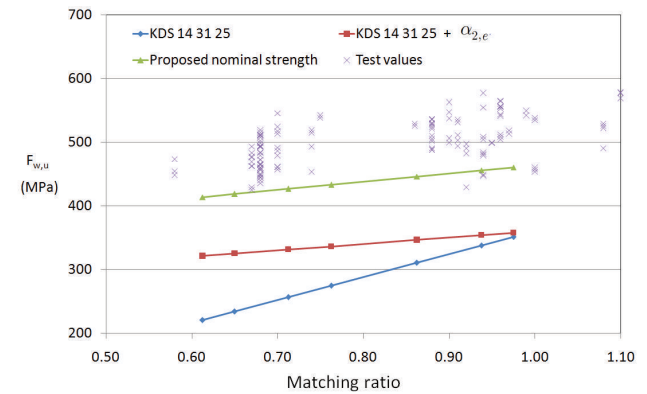


Fig. 10. Effects of weld metal matching ratios on the strength of fillet welded joints of steel class 800MPa

KDS 14 31 25^[1]에 따른 공칭강도 값은 매칭비가 작아질수록 시험 값과의 차이가 점점 더 크게 발생하여 매칭비에 따른 안전측 여유가 일정하지 않은 것으로 나타났다. 모재 인장강도를 기준으로 KDS 14 31 25^[1]에 따라 산출한 공칭강도에 이 연구의 매칭비 보정계수를 곱한 값은 시험 값과 비교할 때 용접금속의 종류에 상관없이 전체적으로 균일한 안전측 여유를 확보하는 것으로 나타나 기존 방식보다 합리적인 것으로 판단된다. 이에 따라 KS 표준의 용접금속 사용에 따른 매칭비 보정계수를 Table 3과 같이 제안하고자 한다.

Table 3. Correction factor α_2 for weld metal class according to KS D 7006

Steel grade	E43	E50	E53	E58	E62	E70	E80
HSB 460	0.95	0.96	0.98	1.00	-	-	-
HSB 690	0.89	0.90	0.92	0.93	0.96	0.98	1.00

5. 결 론

이 연구에서는 고강도 강재의 언더매칭용접시 적용되는 모재 인장강도와 매칭비에 대한 영향을 고려하여 필릿용접부의 강도를 분석하였다. 이를 위하여 국내외 설계기준과 문헌자료를 조사하고 차이점을 검토하였다. 필릿용접부 파괴시험에 대한 시험값을 분석하여 모재 강종에 따른 보정계수와 매칭비에 따른 보정계수를 포함한 필릿용접부의 공칭강도 계산식을 제안하였다. 또한 언더매칭용접시 KDS 14 31 25에 의한 공칭강도 값과 이 연구에서 제안한 매칭비에 따른 보정계수를 고려한 계산 강도값을 비교하였다.

이 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 모재의 인장강도와 매칭비를 변수로 하여 언더매칭된 고강도 강재의 필릿용접부 강도 계산식을 제안하였으며, 이를 사용하여 구한 필릿용접부의 강도값을 시험치와 비교해본 결과 잘 부합되는 것으로 나타났다.

(2) BKS07을 제외한 모든 설계기준은 모재의 인장강도 또는 용접금속의 인장강도를 주요 변수로 필릿용접부의 강도를 산정한다. 언더매칭 용접의 경우에는 인장강도가 적은 용접금속의 인장강도를 기준으로 공칭강도 값을 산정하며, 그 결과는 실험결과에 비하여 보수적인 것으로 나타났다.

(3) 필릿용접부의 무차원필릿용접시험강도는 모재의 인장강도가 증가할수록 감소하고, 매칭비가 감소할수록 감소하는 것으로 나타났다.

(4) HSB460과 HSB600에 KS 표준의 용접봉을 적용한 언더매칭용접에 대해 KDS 14 31 25에 따라 산출한 필릿용접부의 공칭강도는 시험결과 값에 비해 전체적으로 작은 쪽에 놓이며, 그 차이는 강종에 상관없이 매칭비의 감소에 따라 점점 더 크게 증가하는 것으로 나타났다.

(5) 이 연구에서 제안한 매칭비에 따른 보정계수를 적용하여 산출한 공칭강도는 검토한 범위의 매칭비에 대해서 시험결과로 얻는 강도 대비 모두 거의 일정한 수준의 안전 측에 놓이게 되는 것으로 나타났다.

참고문헌(References)

- [1] 국토교통부(2017) 강구조연결 설계기준(KSD 14 31 25: 2017). Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2017) *Steel Structure Design Code and Commentary* (KSD 14 31 25: 2017), Korea (in Korean).
- [2] European Committee for Standardization (2004) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.8: Design of Joints* (EN 1993-1-8: 2004), Belgium.
- [3] Boverket (2007) *Boverkets Handbok om Stalkonstruktioner* (BSK 07, Swedish Design Code for Steel Structures), Boverket, Sweden (in Swedish).
- [4] American Institute of Steel Construction (2016) *Specification for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 360-16), USA.
- [5] 조재병, 이혜영(2012) 강종에 따른 종방향 필릿용접부 공칭강도 계산식의 제안, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제5호, pp.503-510.
Jo, J.B., and Lee, H.Y. (2012) Proposal of Estimation Equation for Nominal Strength of Longitudinal Fillet Welds with Different Types of Steel, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.5, pp.503-510 (in Korean).
- [6] 이은택, 김종락, 최영한, 김상섭(2016) HSA800 강재의 FCAW 용접성, 용접자세 및 이음성능 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제28권, 제4호, pp.281-292.
Lee, E.T., Kim, J.R., Choi, Y.H., and Kim, S.S. (2016) A Study for the Weldability, Welding Position and Welded Joint Performance on the FCAW of HSA800 Steel, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.4, pp.281-292 (in Korean).
- [7] 홍형주, 최영한, 김상섭(2018) SM490TMC 극후판(120mm) 강재의 서브머지드아크용접(SAW)을 활용한 용접성 및 이음성능에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제30권, 제3호, pp.127-136.
Hong, H.J., Choi, Y.H., and Kim, S.S. (2018) A Study of a Weldability and Welded Joint Performance with Submerged Arc Welding(SAW) of SM490TMC 120mm Thick Plate, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.30, No.3, pp.127-136 (in Korean).
- [8] 최영한, 김상섭(2017) HSA800 강재의 SAW 용접성 및 이음성능 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제29권, 제1호, pp.37-48.
Choi, Y.H., and Kim, S.S. (2017) A Study for the Weldability and Welded Joint Performance on the SAW of HSA 800 Steel, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.29, No.1, pp.37-48 (in Korean).
- [9] Björk, T., Toivonen, J., and Nykänen, T. (2012) Capacity of Fillet Welded Joints Made of Ultra High-Strength Steel, *Welding in the World*, International Institute of Welding, Vol.56, pp.71-84.

- [10] Niemi, E. (1988) *Tests on Fillet Weld Joints with High Strength Steel Specimens*, Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT, Finland.
- [11] Collin, P., and Johansson, B. (2005) Design of Welds in High Strength Steel, *Proceedings of the 4th European Conference on Steel and Composite Structures (Vol. C)*, European Convention for Constructional Steel, Netherlands, pp.4.10-89-4.10-98.
- [12] Preece, F.R. (1968) *AWS-AISC Fillet Weld Study: Longitudinal and Transverse Shear Tests*, Testing Engineers, Inc., USA.
- [13] Kob, P., Harre, W., and Schmidt, H. (1987) *Einfluß geometrischer Verhältnisse auf die Tragfähigkeit statisch beanspruchter Kehlnahtverbindungen (Influence of Geometrical Factors on the Load-Bearing Capacity of Statically Stressed Fillet Weld Joints)*, Otto-Graf-Institut, Germany (in German).
- [14] Saal, H., and Höbling, W. (2005) *Zusammenfassung der Ergebnisse von Versuchen an Kehlnahtprüfkörpern aus HISTAR 460/460L hergestellt im Blockgussverfahren (Summary of the Test Result on Fillet Weld Test Specimens Made of HISTAR 460/460L Manufactured in the Block Casting Process)*, Report No. 042119-2, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine (Karlsruher Institut für Technologie), Germany (in German).
- [15] Eurocode 3 Editorial Group (1990) *Evaluations of Test Results on Welded Connections Made from FeE 460 in Order to Obtain Strength Functions and Suitable Model Factors*, Background Documentation Document D.03 Annex D, European Committee for Standardization, Belgium.
- [16] Kuhlmann, U., Günter, H.-P., Rasche, C., Werner, F., Hildebrand, J., Wudtke, I., Vormwald, M., Beier, T., Versch, C., Köhler, G. Heinemann, H. (2008) *Wirtschaftliche Schweißverbindungen höherfester Baustähle (Economic Welded Connections of High Strength Steels for the Construction Sector)*, FOSTA P652 Final Report: Project No. AiF/IGF 14195 BG, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Germany (in German).
- [17] Kuhlmann, U., and Rasche, C. (2012) *Tragfähigkeit von Kehlnahtverbindungen höherfester Baustähle S690 im Stahlbau (Load Bearing Capacity of Fillet Welded Connections of High Strength Steel S690 for the Construction Sector)*, FOSTA P812: Project No. AiF/IGF 16097 N, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Germany (in German).
- [18] Kuhlmann, U., Günther, H.-P., and Rasche, C. (2008) *Versuche zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Flankenkehlnahtverbindungen höherfester Baustähle S690Q, Test Report (Tests to Determine the Load-Bearing Capacity of Flank Fillet Joints of High-Strength Structural Steel S690Q, Versuchsbericht)*, Message No. 2008-21X, Institute of Structural Design of University of Stuttgart, Germany (in German, Unpublished).
- [19] Rasche, C. (2012) *Zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Kehlnahtverbindungen höherfester Baustähle (Load Bearing Capacity of Fillet Welded Connections of High Strength Steel)*, Ph.D. Dissertation, University of Stuttgart, Germany (in German).
- [20] Ligtenberg, F.K. (1968) *International Test Series: Final Report (IIW Doc. XV-242-1968)*, Delft University of Technology, Netherlands.
- [21] 국가기술표준원(2013) 고장력 강용 피복 아크 용접봉(KS D 7006: 2008). Korean Agency for Technology and Standards (2013) *Covered Electrodes for High Tensile Strength Steel (KS D 7006: 2008)*, Korea (in Korean).

요 약: 최근 고강도 강재가 점점 더 많이 사용됨에 따라 언더매칭 용접의 적용에 대한 요구도 증대되고 있다. 이 연구에서는 고강도 강재의 언더매칭용접부에 대해 보다 적합한 공칭강도를 산출할 수 있는 계산식을 제안하였다. 인장강도 600MPa 이상의 강재에 대한 국내외의 관련 시험자료를 수집 분석하고, 모재의 인장강도와 매칭비를 변수로 한 종방향 필릿용접부의 공칭강도 계산식을 도출하였다. 제안한 계산식과 시험결과를 비교하여 그 적합성을 보였다. 또한 국내의 고강도 강재 HSB460과 HSB690에 KS 표준에 따른 여러 등급 용접금속을 적용한 경우에 대하여 KDS 14 31 25에 따라 산정한 공칭강도 값과 시험 값을 비교하였다. 현행 국내의 강구조 연결 설계기준에 따른 공칭강도 값은 시험에 의한 강도 값에 비해 전체적으로 작은 쪽에 놓이며, 그 차이는 강종에 상관없이 매칭비의 감소에 따라 점점 더 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이 연구에서 제안한 매칭비에 따른 보정계수를 적용한 공칭강도는 검토한 범위의 매칭비에 대해서 시험결과로 얻는 강도 대비 모두 거의 일정한 수준의 안전 측에 놓이게 되는 것으로 나타났다.

핵심용어: 고강도 강재, 언더매칭 용접, 종방향 필릿용접, 필릿용접부 공칭강도, 매칭비, 모재인장강도