

FCAW 용접부 개선각 축소에 따른 강도특성

이상철²· 조성우²· 양종수¹· 최규원¹· 서정관^{3,†}
STX 조선해양¹
부산대학교 조선해양공학과²
부산대학교 선박해양플랜트기술연구원³

Effects of Reduction Groove Angle on Strength Characteristics of FCAW Weldment

Sang-Chul Lee^{1,2}· Sung Woo Jo²· Jong Soo Yang¹· Kyu Won Choi¹· Jung Kwan Seo^{3,†}
STX Offshore & Shipbuilding¹
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University²
The Korea Ship and Offshore Research Institute, Pusan National University³

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Thick plate is currently widely used in shipbuilding due to the increasing of size of ships. However, its use has increased welding groove angles and volume. The welder's technique must be good enough to improve productivity while preventing defects. Generally, the groove angle can be reduced to less than a flux-cored arc welding (FCAW) machine setting of $35\pm 5^\circ$, requiring fewer welding passes while maintaining high productivity and reduced heat input. Therefore, welding technique can be prevented by improved mechanical properties and welding deformation. Welding defects such as lack of fusion (LF), lack of penetration (LP) and hot cracking should be considered when reducing the groove angle for related applications. In this study, a welding groove angle of $25\pm 5^\circ$ is verified as suitable for FCAW design and fabrication. The experimental results confirm the effects on the strength characteristics of FCAW weldment when reducing groove angle to improve the productivity of shipbuilding industries.

Keywords : Groove angle(개선각), Thick plate(후판), Strength Characteristic(강도특성), FCAW(Flux Cored Arc Welding)

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

대표적인 용접 구조물인 선박 및 육상 철골구조물은 최근 고속화 및 대형화 등에 관련한 새로운 강재 사용과 최적의 용접재료 및 용접기법에 관련한 기술개발이 활발히 진행되고 있다. 또한 최종적으로 구조물의 형태로 제작이 되었을 때 구조상 충분한 성능을 만족하도록 강도평가 및 성능향상 기술 (Kim, et al., 1999; Bang, et al., 2002; Park, et al., 2007; Han, et al., 2009)에 대한 지속적인 연구 개발이 진행되고 있다. 특히 구조물의 대형화로 강도만족을 위하여 보편적으로 후판강재 사용이 빈번해짐에 따라 대입열량의 용접방법이 반영되어지고 있고 따라서 후판강재의 정밀한 용접부 특성분석이 요구되고 있다.

선박의 경우 사용 되는 강판이 두꺼워 질수록 용접부의 개선

각이 커지므로 용접량도 증가 된다. 또한 용접 결함, 변형이 발생할 수 있다. 그러므로 용접 결함을 예방하고 특히, 개선각을 포함한 생산성을 향상하기 위한 다양한 용접기술이 발전하고 있다.

육상건축물의 경우에는 판 이음, 기둥, 보 이음에 있어 이음상세를 보통 개선각도 45° 기준으로 시방서에 명시되어 있고, 용접방법과 적용판 두께 등에 따라 허용차를 두고 있으나 통상적으로 부 재설계에 있어 개선각도 45° 를 주로 반영하고 있는 실정이다 (Kim, 2012; Lee, 2014).

조선 및 해양 분야의 다양한 용접기법 중에 FCAW(Flux Cored Arc Welding)용접기법은 입열량이 적고 자동화가 용이하기 때문에 광범위 하게 활용되고 있다. 일반적으로 FCAW 용접기법의 경우 개선각도는 $35\pm 5^\circ$ 로 지정하여 맞대기용접(butt welding)등에 널리 활용되어지고 있다 (Yoon, 2011). 개선각이 넓으면 LF(Lack of Fusion)결함이나 LP(Lack of Penetration) 결함의 가능성은 낮아지지만, 용접부의 체적이 커져서 용착 금속량이 늘어나

게 되어 용접 Pass 수가 증가하게 될 뿐만 아니라 용접 입열량의 증가로 용접 변형량도 증가하게 된다 (Hwang, et al., 2010). 또한, 층간 온도 유지 시간 증가로 용접 생산성이 현저히 떨어지게 되며, 층간 슬래그 혼입(slag inclusion)의 가능성도 높아지게 된다. 반면, 개선각이 좁아지면 용접 Pass 수가 감소하여 생산성이 높아질 뿐만 아니라 용접부에 투입 되는 입열량도 감소하여 기계적 성질이 향상되고 용접 변형도 예방할 수 있으나 LF, LP 및 고온 균열과 같은 용접 결함이 발생할 가능성이 높아진다 (Jeong, 1999; Park, 2002; Kim & Park, 2003).

따라서 국내 조선소에서는 이러한 용접 개선각에 관련한 연구와 관련한 용접변형 제어를 위한 다양한 연구와 방법을 조선소별로 자체적인 지침으로 제안하여 활용하고 있다 (Shin & Youn, 2007; Yoon, 2011; Choi, 2014). 이러한 내부적인 지침으로 용접방법, 대상부재, 용접기, 용접재 등에 관련한 공개되어진 개선각에 대한 적합성 및 효율성에 정량적인 자료가 부족한 실정이다. 본 연구에서는 조선소에 가장 많이 활용되는 FCAW 용접방법으로 맞대기 용접부를 대상으로 개선각도를 10±5° 축소 시 용접부 및 용착금속의 강도특성을 실험적으로 분석하여 적합성을 확인하고자 한다.

1.2 관련 기술 분석

기존에 연구되어온 다양한 용접기법에 따른 개선각 관련 기술 분석을 통하여 용접부 개선각의 특성을 정리하였다.

Fig. 1는 맞대기 용접부에 발생할 수 있는 LF, LP 결함의 모식도를 보여 주는 것으로써 LF결함의 경우 개선형상이 좁을 경우 개선면을 정상적으로 용융 시키지 못해 발생하는 것으로 개선형상이 좁고 루트갭(root gap)이 거의 없을 때 발생하게 된다. 개선각이 좁을 시 아크 길이(arc length)를 일정하게 유지 하면서 아크가 정상적으로 이루어지도록 하는 것이 중요하다.

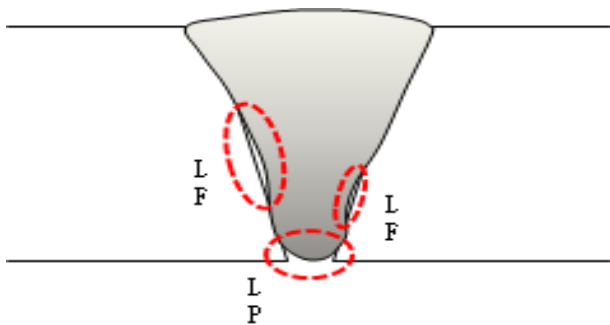


Fig. 1 Schematic view of welding defect in narrow gap

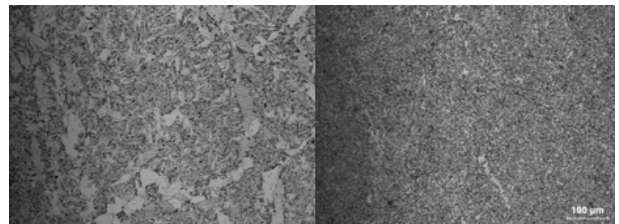
EGW(Electro Gas Welding) 용접기법에 대한 선행 연구 결과 (Yoon, 2011)를 보여주는 것으로서(Figs. 2-3) 기존 개선각도 35°에서 20°도로 변경하여 (b)와 같이 용착 단면적이 약 40% 이상 저감되었다.



(a) Groove angle 35° (b) Groove angle 20°
Fig. 2 EGW cross section at different groove angle

또한 개선각이 좁아짐에 따라 용접금속의 미세조직이 Fig 3(b)와 같이 용접부의 기계적 성질이 향상되어지는 현상인 침상 페라이트(ferrite)가 증가함을 알 수 있다.

대입열 용접기법의 하나인 SAW(Submerged Arc Welding) 용접기법에서는 입열량이 많은 경우에는 개선각을 과대하게 좁히는 것은 고온 균열 민감도를 높일 뿐만 아니라 와이어 경이 큰 관계로 LP불량이나 LF불량의 발생 가능성이 높고, 특히 후판경우 개선각이 넓을 경우 용접부의 Pass 수가 급격히 증가되므로 적절한 개선각을 유지하는 것이 필요하다 (Kim & Ryu, 2010).



(a) Groove angle 35° (b) Groove angle 20°
Fig. 3 Microstructure of a weld at different groove angle

GMAW(Gas Metal Arc Welding)용접 시 용접 단면이 오목비드 형상과 폭 대 깊이비가 적절하지 않아 고온 균열이 발생할 수 있다 (Jeong, et al., 2007).

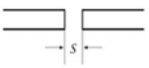
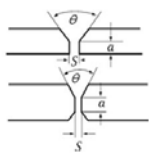
이와 같이 다양한 용접법에 따른 개선형상 및 입열량에 따른 용입형상 등이 고온 균열에 미치는 영향이 크므로 개선각을 검토 시 반드시 이를 고려해야 할 것으로 판단된다.

2. 용접 개선각

현재 다양한 조선 및 해양 분야에 활용되는 용접법 중에서 본 연구에서는 맞대기 용접부에 사용하는 FCAW 용접기법을 대상으로 용접 개선각 축소에 따른 강도특성 실험을 수행하였다. FCAW에서 FC(Flux Cored) 와이어의 일정한 속도로 공급하면서 전류를 통하여 와이어와 모재사이에 아크가 발생되도록 하고, 발생된 아크열로 용융지와 용접비드를 형성하는 기법이다. 또한 FCAW는 외기 차폐용 실드가 관상용 선재내부에 있는 용접봉을 사용하는 방법으로 FC와이어 자체가 차폐효과가 있어 기공 발생성이 낮아 양호한 용접부를 얻을 수 있으므로 용접형상의 제작,

이음 접합부에 관련한 조선분야 가장 널리 사용되는 용접이다 (Kim, 2005).

Table 1 Shape of butt welding

Thickness (mm)	Shape	Dimension (mm)
$t \leq 6.0$		$S \leq 3.0$
$t > 6.0$		$S \leq 5.0$ $a \leq 3.0$ $\theta \geq 50^\circ$

선급기술규칙 맞대기 이음의 (Table 1) 모양 및 용접 토치 (torch), 컨택팁(contact tip)등과 같은 용접 기자재와 용접 재료를 선택하여 용접 생산성을 극대화 하면서 안정된 품질을 유지할 수 있도록 최적화 용접부 개선작을 현장경험(yard practice)으로 설정, 보통 $35 \pm 5^\circ$ 기준으로 명시 하고 있고 용접방법과 적용 두께 등에 따라 허용차를 두고 있으나 통상 $35 \pm 5^\circ$ 로 개선각도를 반영하고 있는 실정이다 (KR, 2015). 따라서 본 연구에서 기존에 용접부 개선각도를 $35 \pm 5^\circ$ 에서 $25 \pm 5^\circ$ 로 줄임으로써 두께가 10t 일 경우 3%, 90t일 경우 약 45%의 용착면적이 감소에 따른 용접 재 절감 및 열변형을 최소화를 통한 생산성 향상을 목적으로 용접부의 강도적 특성 (굽힘, 인장, 충격), 용착금속의 강도적 특성 (인장, 충격)을 실험적으로 규명하여 적합성을 확인하고자 한다.

3. 용접부 특성 시험

3.1 용접방법 및 조건

FCAW 용접부의 개선각 축소에 따라 특성분석을 위하여 Fig.4에서와 같이 용접부 개선각도 $25 \pm 5^\circ$ 로 12t, 48t의 강재를 사용하여 용접부 강도특성 실험을 수행 하였다. 시험에 사용되는 강재 재질은 각 두께별로 조선소에 가장 많이 사용되는 EH36, DH36 강재이며 용접은 FCAW 용접기법을 각 두께, 재질에 1G (아래), 2G(수평), 3G(수직상향)에 해당하는 자세별로 (Fig. 5) 용접을 실시하였다.

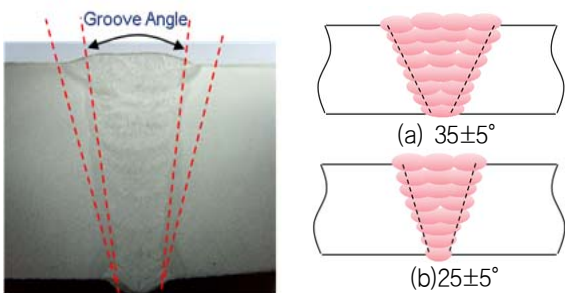


Fig. 4 Test specimen for bending test

용접부 특성분석을 위하여 용접부 굽힘시험(bending test), 용접부 인장시험(tensile test), 용접부 충격시험(impact test)을 통해 물리적 특정치의 선급규정과 비교하여 만족여부를 평가 하였다 (Kim & Kim, 2001; Jeong, 2014). 또한 개선각 및 면적이 감소함에 따라 용접 루트(root)부 입열량을 고려하여 용착금속에 대한 인장시험과 충격시험을 통해 충분히 내력을 검토하였다.

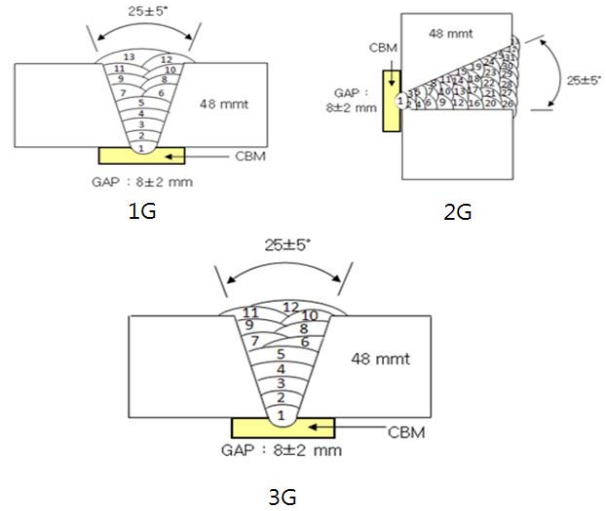


Fig. 5 Section view of weld metal (DH36, EH36) 48t

루트갭(root gap)은 8 mm의 개선 형상으로 가공하였으며 12t의 경우는 용접Pass수는 자세별로 1G (3 Pass), 2G(6 Pass), 3G(3Pass)로 용접하였고, 48t 시편은 Fig. 5와 같이 각각 13Pass, 33Pass, 12Pass로 용접하였다. Fig. 6은 시험편 형상 및 강도특성시험에 사용될 시험편 채취영역을 나타낸 것으로 시험편 크기는 400 mm x 600 mm이다.

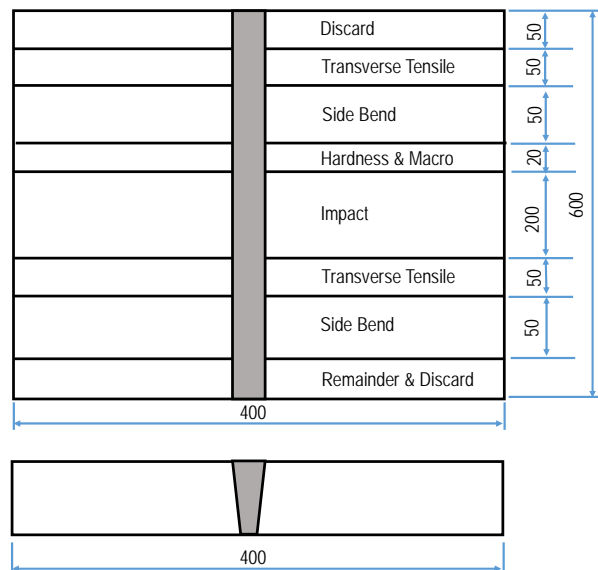


Fig. 6 Test specimen for bending, impact, and tensile test

3.2 굽힘시험

후판강재의 용접부 굽힘시험은 용접부에 굽힘을 가하여 균열 (crack) 발생 유무를 육안으로 확인하며 (Lee, 2014), 용접부 건전성에 관한 기초적인 자료를 얻는 목적으로 수행되는 시험으로 Fig. 7은 용접부 굽힘 시험편의 형상이며 시험편은 각 재료별 4개를 제작하였으며 Table 4와 같이 총16개를 제작하였다.

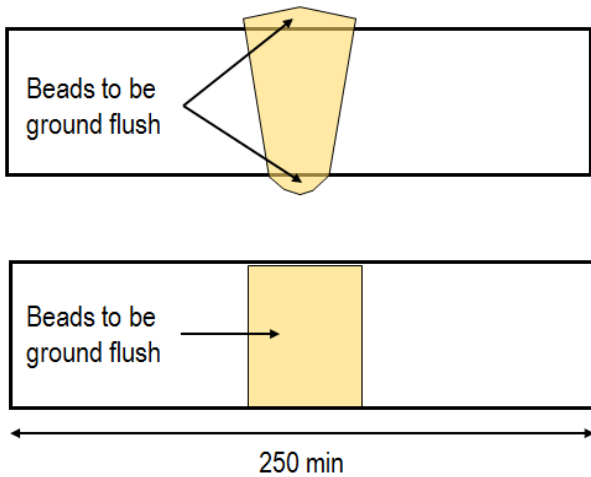


Fig. 7 Test specimen for bending test

3.3 인장시험

강재의 용접부 인장 시험은 용접부 재료강도에 관한 기초적인 자료를 얻는 목적으로 수행되는 시험으로 개선각도 $25 \pm 5^\circ$ 의 인장강도특성을 확인하는데 그 목적이 있다. Fig. 8는 인장 시험편은 국제 규정 (AWS, 2010; DNV, 2013)에 따른 표준형 인장시험편의 형상 및 주요 치수를 보여주고 있다. 시험편은 용접자 세 및 두께 등으로 분류하여 각각 2개 이상의 시험을 수행하였고 상세 시험편은 Table 2에 보여주고 있다.

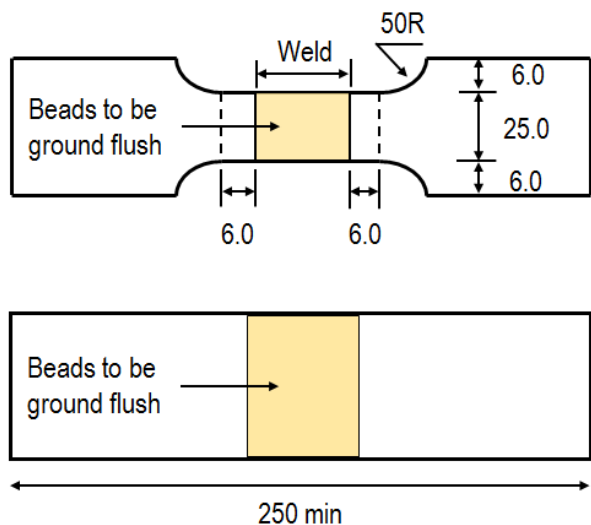


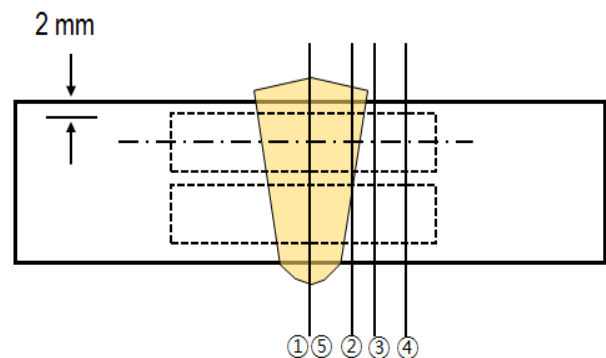
Fig. 8 Test specimen for tensile test

Table 2 Details of tensile test specimen

Position	Specimen No.	Thick. (mm)	Grade	Numbers
1G (FLAT)	(1)(2)	12.0	DH36	2
	(1)(2)		EH36	2
	(1)(2)	48.0	DH36	2
	(1)(2)		EH36	2
2G (HORIZONTAL)	(3)(4)	12.0	DH36	2
	(3)(4)		EH36	2
	(3)(4)	48.0	DH36	2
	(3)(4)		EH36	2
3G (VERTICAL-UP)	(5)(6)	12.0	DH36	2
	(5)(6)		EH36	2
	(5)(6)	48.0	DH36	2
	(5)(6)		EH36	2

3.4 충격시험

샤르피 충격시험기를 이용해서 재료의 인성을 파악하는 시험으로 강재의 기계적 성질을 파악 할 수 있다 (Jang & Kim, 1994; Lee, 2014). 시험 방법은 선급에서 규정하고 있는 용접이음 충격시험 방법에 따르고, 이를 통해 흡수에너지, 충격치, 파면율을 파악하였다. 충격시험편은 샤르피 V-노치 시험편으로 수행하였다. Fig. 9와 같은 영역에서 시험편을 채취하여 Fig. 10의 형상으로 제작하였다.



- At The Center of Weld : (①)
- On Fusion Line : (②)
- 2mm From Fusion Line In HAZ : (③)
- 5mm From Fusion Line In HAZ : (④)
- At the Center of Weld(ROOT) : (⑤)

Fig. 9 Collected location of specimen for impact test

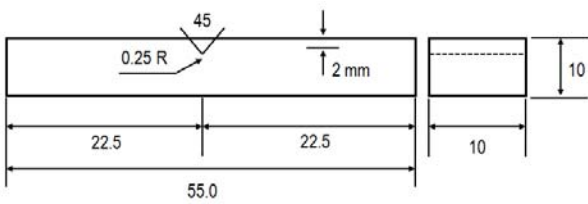


Fig. 10 Test specimen for impact test

본 실험에서는 DH36_48t, EH36_48t 후판 강재의 개선각도 $25\pm 5^\circ$ 에 충격흡수에너지 값을 비교하기 위하여 Table 3과 같은 시험편을 분류하여 충격시험을 실시하였다.

Table 3 Details of impact test specimen

Position	Specimen No.	Thick. (mm)	Grade	Numbers
1G (FLAT)	(1)(2)(3)	12.0	DH36	3
	(1)(2)(3)		EH36	3
	(1)(2)(3)	48.0	DH36	3
	(1)(2)(3)		EH36	3
2G (HORIZONTAL)	(4)(5)(6)	12.0	DH36	3
	(4)(5)(6)		EH36	3
	(4)(5)(6)	48.0	DH36	3
	(4)(5)(6)		EH36	3
3G (VERTICAL-UP)	(7)(8)(9)	12.0	DH36	3
	(7)(8)(9)		EH36	3
	(7)(8)(9)	48.0	DH36	3
	(7)(8)(9)		EH36	3

3.5 실험 결과

3.5.1 굽힘 시험 결과

DH36_48t/12t, EH36_48t/12t 강재의 용접부 개선각도 $25\pm 5^\circ$ 에 파단성향을 파악하기 위하여 Table 4와 대표적인 단면에 대해서 시험편을 굽힘 후 표면에는 어떠한 방향으로도 길이 3 mm 이상의 균열 또는 결함이 발생하지 않았다.

Table 4 Results of bending test

	Specimen No.	1G	2G	3G
DH36_48t	Side bend (4PCS)	Pass	Pass	Pass
DH36_12t	Side bend (4PCS)	Pass	Pass	Pass
EH36_48t	Side bend (4PCS)	Pass	Pass	Pass
EH36_12t	Side bend (4PCS)	Pass	Pass	Pass

Fig. 11은 DH36_12t 및 DH36_48t 시편에 대한 용접 단면을 보여주는 것으로서 슬래그 혼입, LF 및 LP 결함이 발생하지 않은 건전한 용접부가 형성되었음을 알 수 있다. 48t의 경우에 33Pass 용접이 시공 되었음에도 개선면 쪽에서 발생하는 LF 결함은 발생 하지 않았다.

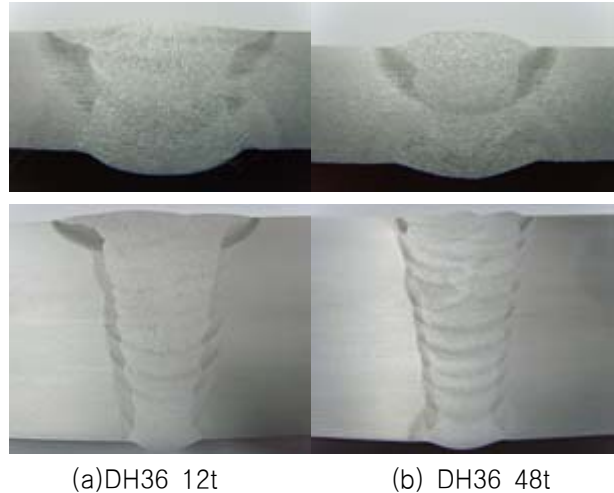


Fig. 11 Macro Etching of DH36

3.5.2 인장 시험 결과

DH36_48t/12t, EH36_48t/12t 강재의 용접부 개선각도 $25\pm 5^\circ$ 에 파단성향을 파악하기 위하여 인장시험을 실시하였다. 대표적인 DH36_48t와 EH36_12t의 시험결과에 대해서 Table 5, 6에서 표현하였다. 시험결과에서 모든 시험편에서 용접 부를 중심으로 모재부에서 파단을 일으켜 개선각도 $25\pm 5^\circ$ 를 반영한 시험편의 용접이음부가 충분한 성능을 갖는 것으로 확인 할 수 있었다. 인장강도는 선급 요구조건인 490MPa을 초과하는 결과를 보였다.

Table 5 Results of tensile test(DH36)

Specimen number	Size(mm)		Tensile strength (N/mm ²)	Fracture location	
	Thick ness	Width			
1G	1	48	25	613	BASE METAL
	2	48	25	622	BASE METAL
2G	3	48	25	631	BASE METAL
	4	48	25	628	BASE METAL
3G	5	48	25	635	BASE METAL
	6	48	25	636	BASE METAL

Table 6 Results of tensile test(EH36)

Specimen No.	Size(mm)		Tensile strength (N/mm ²)	Fracture Location	
	Thick.	Width			
1G	1	12	25	601	BASE METAL
	2	12	25	610	BASE METAL
2G	3	12	25	604	BASE METAL
	4	12	25	615	BASE METAL
3G	5	12	25	603	BASE METAL
	6	12	25	610	BASE METAL

3.5.3 충격 시험 결과

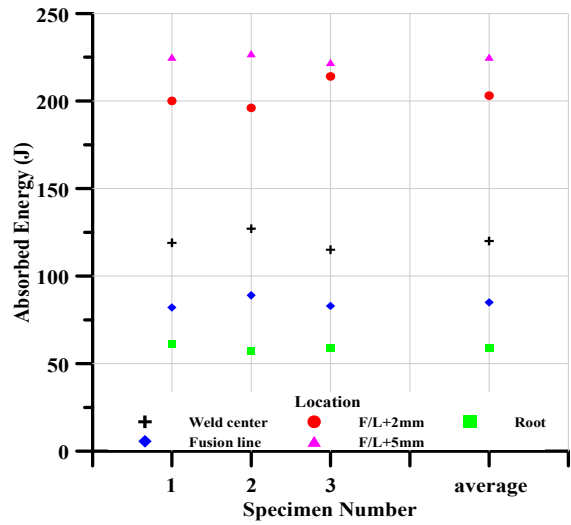
DH36_48t/12t, EH36_48t/12t 강재의 용접부 개선각도 25±5°에 충격흡수 에너지 값을 비교하였다. 시험결과 중 후판인 48t에 대하여 DH36 (Fig. 12) 및 EH36 (Fig. 13)에 대한 용접자 세별로 샤르피 충격시험 결과의 충격흡수 에너지를 나타낸 것이다. 모든 시편은 0°C의 공통된 온도에서 시험을 하였다. 선급 요구 조건인 최소 충격치인 47J를 상회한 우수한 결과를 보여 모든 시험에서 만족시켰다.

4. 용착금속 특성 시험

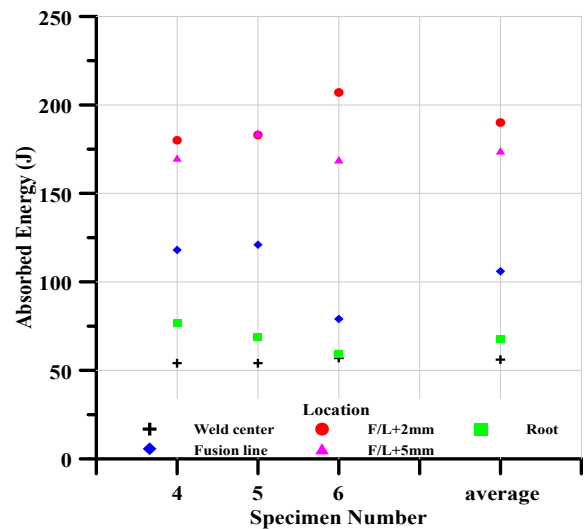
용접 입열량의 크기는 용접부의 냉각속도 및 용접 Pass수에 영향이 있고, 용접 입열량이 클수록 용접부의 냉각속도가 늦어지며, 비드가 두껍고 조적이 조대하여 진다. 그러므로 용착금속의 강도, 특히 항복점의 저하, 용착금속의 충격치 저하가 초래되므로 과대입열에 대한 주의가 필요하다. 또 용접 입열량이 적을수록 냉각속도가 빠르고 모재 열영향부 및 용착금속의 경화로 인하여 용접균열이 발생하므로 용접균열을 방지하기 위해서는 용접 입열량의 적정 범위를 선택해야 한다. 본 실험은 DH36강에 대해서 개선각도 25±5° 경우에 루트부 용접 입열량 차이에 대한 용착금속의 인장 및 충격강도특성을 분석하였다.

4.1 용착금속 인장시험

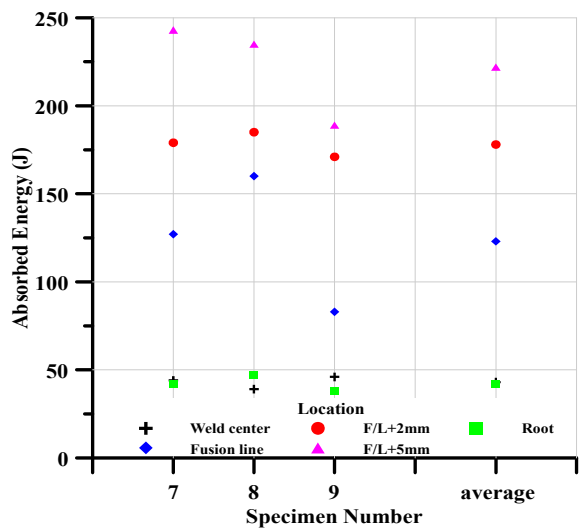
DH36_48t 후판 강재의 용착 금속 인장시험을 위하여 선급에서 제시한 방법에 준하였으나 용접 입열량을 고려한 루트부 특성 시험이 목적이므로 모재(48t) 두께의 60%까지 용접을 하였고 그림 Fig. 14처럼 시험편을 제작 채취하여 시험을 수행 하였다. 용접 입열량 20KJ/Cm, 25KJ/Cm, 35KJ/Cm 과 개선각도 25±5°와 35±5° 형상별 각 1개씩 총 6개의 시편을 제작하였다.



(a) 1G

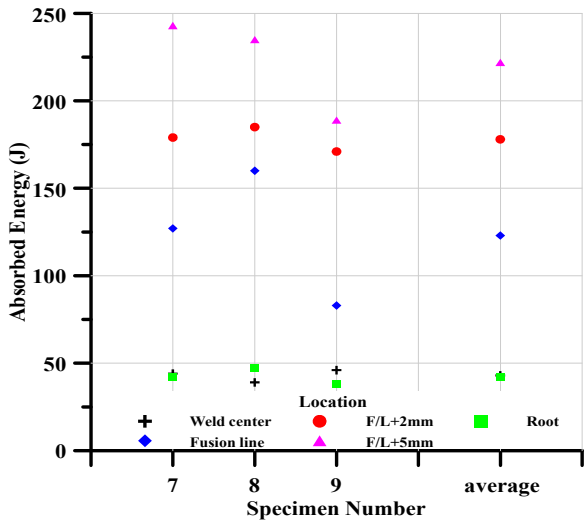


(b) 2G

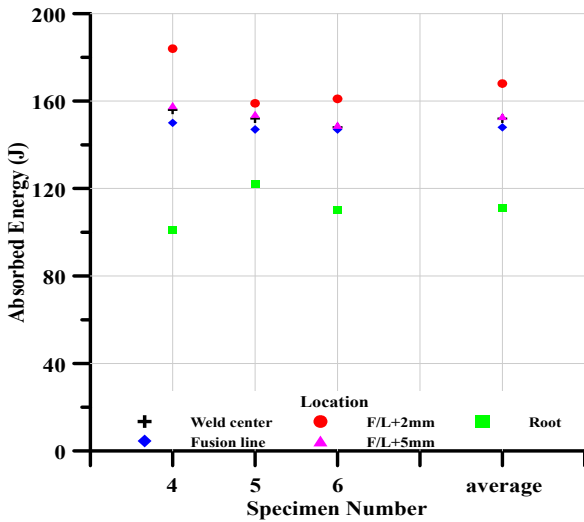


(c) 3G

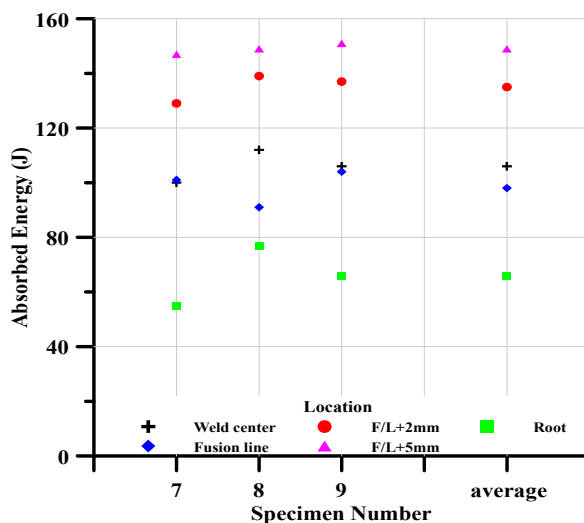
Fig. 12 Results of impact test(DH36_48t)



(a) 1G (continued)



(b) 2G



(c) 3G

Fig. 13 Results of impact test(EH36_48t)



(a) 20 KJ/Cm for 25°



(b) 35 KJ/Cm for 35°

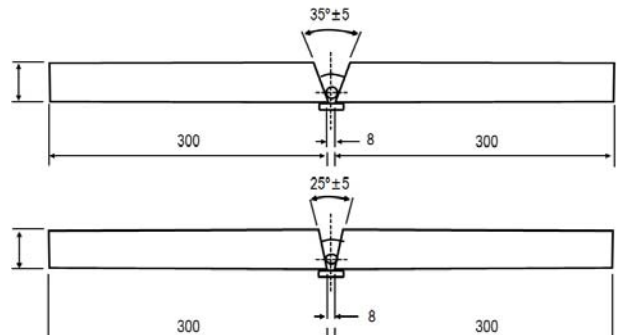
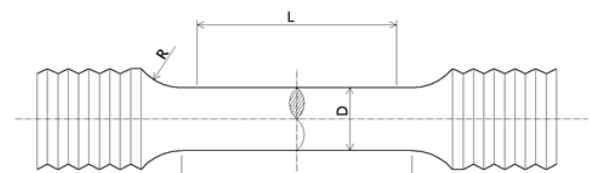


Fig. 14 Collected location of welding metal specimen for tensile test

시험편은 국제규정에 (AWS, 2010) 따른 표준 환봉형태의 따라 Fig. 15와 같은 형상으로 용착금속의 인장시험편을 각 형상 별 1개씩 모두 6개의 시험편을 채취하였다.



Diameter	L	P	R
12.5 mm	50 mm	60 mm	15 mm

Fig. 15 Test specimen of welding metal for tensile test

용착금속인장시험의 결과 값은 다음 Table 7 및 Fig. 16과 같다. 인장강도와 항복강도 모두 선급 요구치인 강도값, 최종인장강도 566 N/mm², 항복강도 486 N/mm²과 비교하였을 때 평균적으로 높게 나와서 충분한 내력을 발휘하고 있는 것으로 나타났다.

Table 7 Results of tensile test(welding metal)

Specimen number		Tensile strength (N/mm ²)	Yield strength (N/mm ²)	Elongation (%)
1	25°(20KJ/Cm)	579.35	472.42	19.75
2	25°(25KJ/Cm)	599.09	520.14	27.25
3	25°(35KJ/Cm)	580.63	497.76	28.50
Average		586.35	496.77	25.16
4	35°(20KJ/Cm)	564.77	502.34	30.50
5	35°(25KJ/Cm)	543.95	466.05	28.00
6	35°(35KJ/Cm)	528.04	456.74	32.00
Average		565.94	485.91	27.67
Rule Requirement		566	486	22



Fig. 16 Test specimen of welding metal after tensile test

4.2 용착금속 충격시험

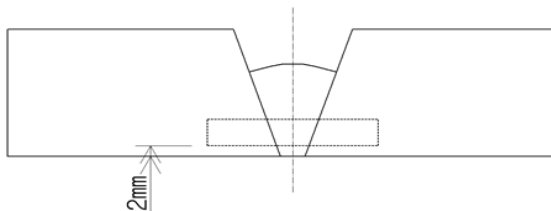


Fig. 17 Collected location of specimen(welding metal) for impact test

DH36_48t 후판 강재의 용착 금속 충격시험 경우에는 모재에 별도 Buttering은 실시하지 않고 최소 15.5 kJ/Cm에서 최대 37.2 kJ/Cm 입열량 조건으로 용접하였다. 시편 제작은 Fig. 17

위치에서 시험편을 채취하여 시험을 실시하였다. 용접 입열량 20 KJ/Cm, 25 KJ/Cm, 35 KJ/Cm 과 개선각도 25±5°, 35±5°형상 별 각 1개씩 총18개의 시편을 제작하였다. 모든 시편은 0°C의 및 -20°C 공통된 온도에서 시험을 수행 하였다.

용착금속 충격시험의 결과 값은 다음 Table 8과 같다. 용접 입열량이 낮을수록 충격치가 향상 되는 결과 값을 알 수 있다

Table 8 Results of impact test(welding metal)

Specimen number	25°		
	0°C	-20°C	
35 (KJ)	1	27	13
	2	20	11
	3	22	20
	Average	23	14
25 (KJ)	4	24	15
	5	29	13
	6	22	15
	Average	25	14
20 (KJ)	7	27	21
	8	27	17
	9	26	18
	Average	27	19

5. 결론

본 연구를 통해 현재 FCAW 용접기법으로 시공되는 맞대기용 접부 개선각도를 35±5°에서 25±5° 축소에 따른 용접부의 특성을 실험을 통하여 분석하였다. 현재 조선소에 활용도가 높은 DH36, EH36 강재를 대하여 용접부 굽힘시험, 인장시험, 충격시험을 통해 용접부의 인성을 조사하여 개선각도 25±5°에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 용접부 굽힘시험을 통한 육안검사에서 전 시험편의 굽힘 후 표면에는 어떠한 방향으로도 길이 3 mm 이상의 균열 또는 결함이 발생하지 않았다. 또한 용접 부 단면에서 기공, 용입 불량 등이 나타나지 않았고, 용접층에서 균일하게 용접이 되어 있는 것을 확인 할 수 있었다.
- 2) 용접부 인장시험 결과 개선각도 25±5°시험편 모두 용접이음 부가 선급에서 제시 한 486 MPa을 상회한 충분한 성능을 갖는 것으로 확인 할 수 있었다.
- 3) 용접부 충격시험 결과 개선각도 25±5°시험편 모두 용접이음 부가 최소 충격치인 47J를 상회한 우수한 결과를 보여 기준을 만족 시켰다.
- 4) DH36재료에 대한 루트부 용접 입열량의 차이가 용착금속 재료강도에 관한 인장시험 결과 인장 강도와 항복강도 모두 선급에서 규정하고 있는 인장, 항복강도 이상으로 높게 나와서 충분한 내력을 발휘하고, 충격시험의 결과 용접 입열량이 낮을수록 충격치가 향상 되는 결과 값을 알 수가 있었다. 또한 루트부 초층 용접 시 낮은 용접 입열량을 유지하는 것이 중요하며 건전한 용접부가 형성 되는 것을 확인 하였다.

References

- AWS, 2010. *Structural Welding Code*. American Welding Society: Florida.
- Bang, H.S. Kim, S.H. Kim, Y.P. & Lee, C.W., 2002. Distribution of Welding Residual Stresses in T-joint Weld with Root Gap. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 39(3), pp.81–88.
- Choi, H.C., 2014. *A study on the effect by number of repair welding on the mechanical properties and microstructures of the weldment*. Master's Thesis. Ulsan: University of Ulsan.
- DNV, 2013a. *Fabrication and Testing of Ship Structures*. Det Norske Veritas: Oslo.
- Han, I.W. Park, Y.H. An, G.B. & An, Y.H., 2009. Development Trends of Steel Plates for Ship Building and Off-Shore Construction and It's Weldability. *Journal of the Korean Welding and Joining Society*, 27(1), pp.25–33.
- Hwang, S.Y., Lee, J.H., Kim, B.J. & Yang, Y.S., 2010. Numerical Analysis of Welding Residual Stresses for Ultra-Thick Plate of EH40 Steel Joined by Tandem EGW. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(6), pp.821–830.
- Jang, D.I. & Kim, D.Y., 1994. Evaluation of Charpy and Fatigue Fracture Behavior of Welded Structural Steels. *International Journal of Steel Structures*, 6(4), pp.179–189.
- Jeong, H.C., 1999. Weld Hot Cracking in C-Mn Steel. *Journal of Korean Welding Society*, 17(5), pp.1–9.
- Jeong, H.C. Park, Y.H. An, Y.H. & Lee, J.B., 2007. Mechanical Properties and Microstructures of High Heat Input Welded Tandem EGW Joint in EH36-TM Steel. *Journal of the Korean Welding and Joining Society*, 25(1), pp.57–62.
- Jeong, K.C., 2014. *The improvement outlook for welding procedure qualification requirement through comparing analysis of classification society rules and international codes*. Master's Thesis. Pusan: Pusan National University.
- Kim, J.R. Kim, S.B. Park, Y.H. & Jung, W.G., 1999. A Statistical Study on the Mechanical Property and Chemical Component of Rolled Steel for Welded Structure. *Journal of Architectural Institute of Korea*, 16(11), pp.52–59.
- Kim, J.R. & Park, Y.H., 2003. A Study on Structural Characteristics of SM490A TMC Thick Steel Plates. *Journal of Korean Society of Steel Construction*, 15(3), pp.331–339.
- Kim, C.R., 2012. *Welding properties according to bevel angle of thick steel plates*. Master's Thesis. Seoul: Soongsil University.
- Kim, H.J. & Ryu, H.S., 2010. Characteristics of high heat input welding. *Proceeding of the KWS conference*, Seoul, 13–14, May 2010, pp.13–17.
- Kim, S.B. & Kim, J.R., 2001. Experimental Study on the Fracture Toughness of Welded Connection of Thick Steel Plate. *Journal of Architectural Institute of Korea*, 17(1), pp.75–82.
- Kim, Y.B., 2005. *A study on the fracture toughness characteristic for different groove shapes in FCAW weldments*. Master's Thesis. Busan: Pusan National University.
- KR, 2015. *Rules and Guidance for the Classification of Steel Ships: Part 2 Material and Welding*. Korean Register: Busan.
- Lee, T.K., 2014. *A study on the material properties and weldability of SM490TMC thick steel plate*. Master's Thesis. Seoul: Soongsil University.
- Park, C.S. Son, Y.R. & Lee, J.S. 2007. A Study on the Application of Vertical Welding to the Shipbuilding with High Deposition Rate. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(5), pp.482–487.
- Park, H.S., 2002. Cracking in Welds and Its Prevention(IV) – Hot Cracking in Welds(III). *Journal of Korean Welding Society*, 20(4), pp.21.
- Shin, S.B. & Youn, J.G., 2007. A Study on the Angular Distortion Prediction of Double Sided Multi-Pass Butt Weldment. *Journal of the Korean Welding and Joining Society*, 25(1), pp.37–41.
- Yoon, H.S., 2011. *A study of reduction of groove angle for improving welding productivity*. STX Offshore & Shipbuilding R&D centre report. Changwon: STX Offshore & Shipbuilding Co. Ltd.



이상철

조성우

양종수

최규원



서정관