

# 선박·해양 구조물용 YS 460 MPa 강재의 용접금속 특성에 미치는 PWHT의 영향

강 창 룡\* · 정 상 훈\*\* †

\*부경대학교 금속공학과

\*\*조선선재(주) 기술연구소

## Effects of PWHT on Weld Metal Properties of YS 460 MPa Steels for Ship and Offshore Structures

Chang-Yong Kang\* and Sang-Hoon Jeong\*\* †

\*Dept. of Metallurgical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

\*\*R&D Institute, Chosun Welding Co. Ltd., Ulsan 689-896, Korea

†Corresponding author : shjung@csweld.com

(Received : July 4, 2014 ; Revised August 18, 2014 ; Accepted August 21, 2014)

### Abstract

This paper has an aim to study the effect of PWHT(for 140min. at 600 °C) on FCAW weld metal properties (tensile, Charpy impact and CTOD value) of YS 460 MPa steels for ship and offshore structures. On the basis of these study, it was found that strength was decreased and elongation was increased by PWHT. These phenomenon resulted from the reduction of acicula ferrite volume fraction by grain growth. Also, Charpy impact and CTOD value were decreased by PWHT. These phenomenon resulted from grain growth. Because the grain boundary grown by PWHT can play a role as crack initiation site and make the crack propagate more easily. Although weld metal properties were decreased by PWHT, tensile and impact properties could meet the class societies requirements for welds of YS 460 MPa steel, but decrease of fracture toughness need to be consider seriously.

Key Words : FCAW, PWHT, YS 460 MPa steels, Impact toughness, CTOD, Grain growth

### 1. 서 론

최근 선박 및 해양구조물 등의 건조 시 높은 안전성과 신뢰성 확보를 위해 강재의 강도와 구조물의 사용환경 등에 따라 용접구조물에 대해 후열처리(Post Weld Heat Treatment : PWHT)를 요구하는 경우가 많아지고 있다.

고장력강의 용접 구조물에서 PWHT는 용접 잔류응력 완화와 열영향부(Heat Affected Zone : HAZ)의 연화, 용접금속의 연성 증대, 취성과파괴 방지, 내식성 향상 및 피로강도 증대 등의 효과를 얻을 수 있지만<sup>1)</sup>, 충격인성의 감소에 대해서는 다양한 결과가 보

고되고 있다<sup>2-4)</sup>.

선박 및 해양구조물 등은 PWHT 시에도 충분한 저온 충격인성이 요구되기 때문에<sup>5-7)</sup>, PWHT 시 용접부의 저온 충격인성 확보는 용접 시공자의 주요 관심사가 되고 있다.

한편, 해양구조물의 건조 시 용접부의 인성 평가의 기준으로 충격인성 뿐만 아니라 사용 온도에서 균열에 대한 저항성을 평가하는 CTOD(Crack Tip Opening Displacement)를 요구하는 경우가 많아지고 있다<sup>8)</sup>. 그러나 대부분의 선급 규칙에서는 PWHT를 실시하는 경우 CTOD 값을 추가로 요구하지 않기 때문에 PWHT가 파괴인성에[미치는 영향에 대한 연구는 많이 수행되지 않아 크게 부족한 실정이다.

**Table 1** Welding condition

Groove	Material (mm)	layer	Ampere (A)	Voltage (V)	Speed (CPM)	Heat input (KJ/cm)	Welding position	Pass No./layer
X Butt	YS 460 (80)	1st	200	26	14.0	22.3	Vertical up	1
		Rem.	200~230	23.0~26.5	9.5~18.0	16.0~36.0		1 or multi

따라서, 본 연구는 최근 조선·해양 구조물에 적용되고 있는 YS 460 MPa 강재 용접금속의 기계적 성질 및 인성 등에 미치는 PWHT의 영향을 조사하고자 한다.

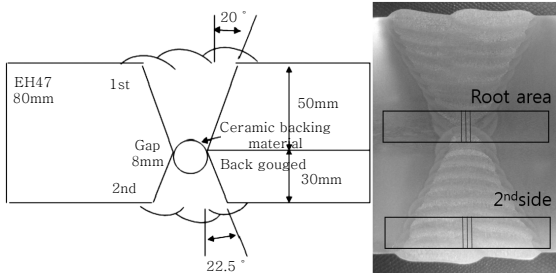
**2. 실험방법**

**2.1 시료 및 용접**

용접재료는 YS 460 MPa급 강재에 적용이 가능하도록 설계된 미국용접협회(AWS) E81T1-K2C의 플럭스 코어드 와이어(Flux Cored Wire, FCW)를 사용하였고, 용접은 두께 80mm의 항복강도 460 MPa 강재를 이용하여, 최대 입열량이 적용될 수 있는 수직상향자세로 맞대기 용접을 실시하였다. 용접부 형상 및 용접조건을 Fig. 1과 Table 1에 나타내었고, 용접시험에 사용된 강재와 용접부의 화학조성을 Table 2에 나타내었다.

**2.2 용접 후 열처리(PWHT)**

PWHT는 AWS 및 선급에서 제시하고 있는 PWHT 범위를 고려하여, 600 °C에서 140분 동안 유지 후 315 °C까지는 55~260 °C/min. 속도로 냉각하고 그 이하는 공랭하는 열처리를 실시하였다.



**Fig. 1** Joint details and macro section of welds

**Table 2** Chemical composition of base and weld metal

	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cu
YS 460	0.065	0.23	1.81	0.005	0.005	0.46	0.19
WM	0.045	0.25	1.35	0.009	0.010	1.55	0.01

**2.3 인장시험**

PWHT에 따른 인장성질 변화를 관찰하기 위해 평행부 지름 10 mm, 길이 50 mm의 인장시험편을 제작하여 cross head speed를 2 mm/min으로 인장시험 하였다. 또한 이때 얻은 항복 및 인장강도는 식(1)을 통해 CTOD시험의 피로균열 생성과 3점 굽힘시험 온도에서 파괴에 필요한 하중 계산에 사용하였다.

$$\sigma_Y = \sigma_{Y0} + \frac{10^5}{(491 + 1.8 \times T)} - 189 \quad (1)$$

T : Test temperature (°C)

$\sigma_{Y0}$  : Yield strength at the temperature of Fatigue pre-cracking (MPa)

$\sigma_Y$  : Yield strength at the temperature of Fracture test (MPa)

**2.4 충격시험**

용접금속 충격인성은 선급규칙에 따라 Fig. 1에 나타난 것처럼 두 번째 용접부(2nd side)와 root부에서 각각 charpy 시험편을 채취하여, 시험온도는 컨테이너선 박에 대한 용접승인시험 시 요구되는 -20 °C에서 초고장력강에 대해 요구하는 -60 °C 사이의 온도(-20, -40 및 -60 °C)에서 각 3개씩 충격시험하여 평균하여 구하였다.

**2.5 CTOD 시험**

피로균열생성실험은 a/W=0.5를 기준으로 5mm까지 균열을 생성시킨 다음 피로균열의 진전 방향이 노치선 단에서 10° 경계선을 벗어나지 않도록 실험을 실시하였다. 용접부 파괴인성 평가를 위한 CTOD시험은 BS7448을 따라 수행하였다<sup>9)</sup>. 이 때 시험편 노치위치는 용접부 중심부에, 노치 방향은 용접 진행방향에 오도록 제작하였고, 시험은 통상 해양구조물 건조 시 많이 요구되는 -10 °C에서 3점 굽힘시험 하였다. CTOD 시험편의 형상과 크기를 Fig. 2에, 시험편 노치의 형상과 크기를 Fig. 3에 나타내었다.

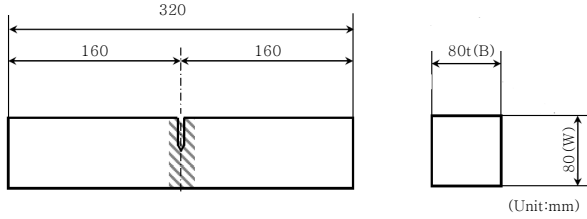


Fig. 2 Shape and size of CTOD specimen

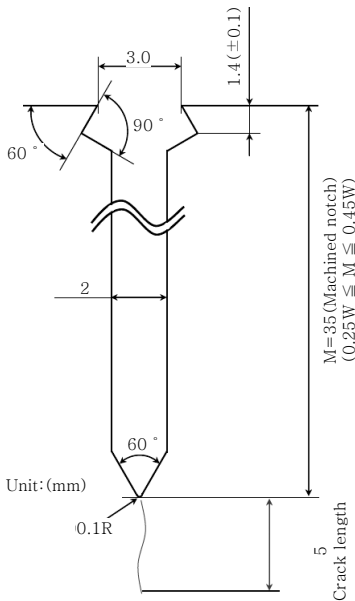


Fig. 3 Notch details of CTOD specimen

### 2.6 미세조직 시험

PWHT한 시료의 미세조직은 광학현미경을 사용하여 관찰하였고, 파괴 개시점의 관찰을 위해 주사전자현미경(SEM)을 이용하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 인장성질에 미치는 PWHT의 영향

Fig. 4는 As-weld재와 PWHT재의 용접금속 인장성질을 조사하여 나타낸 것이다. As-weld재를 PWHT하면 항복 및 인장강도는 낮아지고, 연신율은 증가하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 PWHT에 따른 용접금속 미세조직의 변화를 광학현미경으로 관찰하여 나타낸 것이다. As-weld재의 a)에서는 구 오스테나이트 결정립 계에서 아주 소량의 결정립계 페라이트(PF(G))가 생성되어 있고, 입내에서는 미세한 침상페라이트(AF)와 소량의 다각형 페라이트(PF(I))가 관찰되고 있다. 이에 반하여 PWHT한 b)에서는 결정립계와 내에서 현저한 페라이트의 성

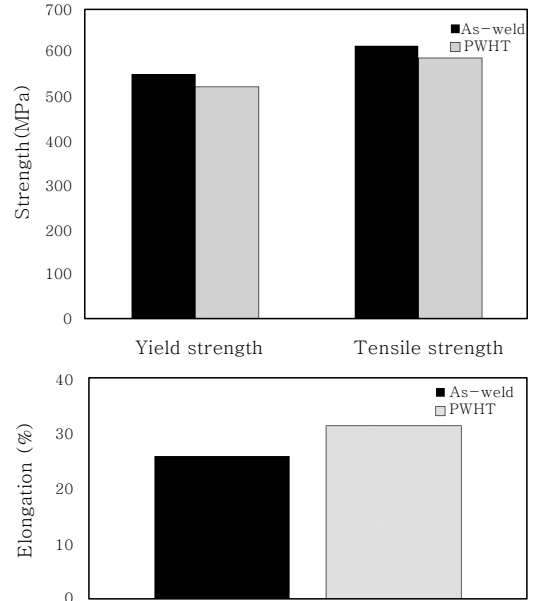


Fig. 4 Effect of PWHT on the tensile properties

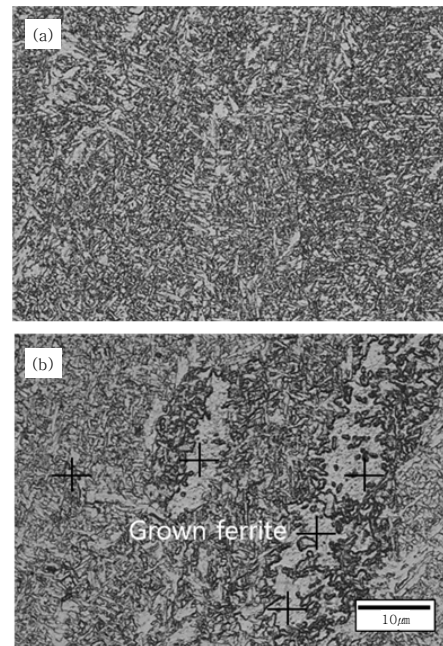


Fig. 5 Optical micrographs showing the effect of PWHT. a) As-weld b) PWHT

장이 관찰되고 있다.

따라서 이러한 결과로부터 PWHT 하면 강도가 낮아지고 연신율이 증가하는 이유는 결정립의 성장에 의해 비교적 강도가 높은 AF 분율이 감소하기 때문인 것을 알 수 있다<sup>10)</sup>.

### 3.2 용접부 충격인성에 미치는 PWHT의 영향

Fig. 6은 As-weld재와 PWHT재의 두 번째 용접부

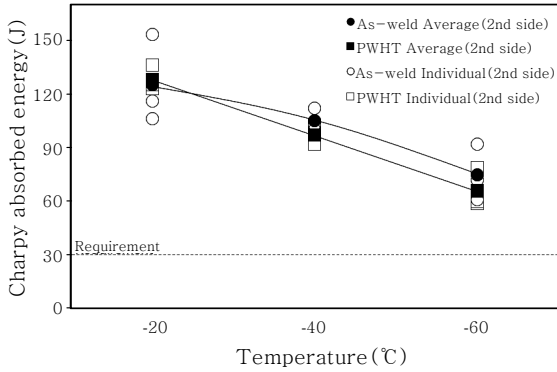


Fig. 6 Effect of PWHT on the impact value at the 2nd side of weld metal

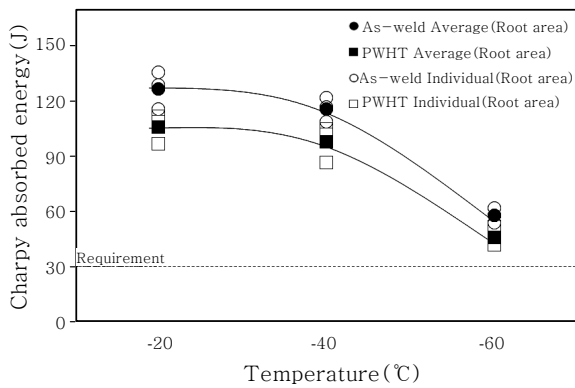


Fig. 7 Effect of PWHT on the impact value at the root area of weld metal

(2nd side)에서의 충격인성을 조사하여 시험온도에 대해 나타낸 것이다. PWHT재가 -20 °C에서는 As-weld 재와 비슷한 충격 인성값을 나타내지만, 온도가 내려갈수록 As-weld재에 비해서 조금씩 낮아지고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 root부의 충격인성을 조사하여 나타낸 것이다. -20 °C~-60 °C 사이의 모든 온도에서 PWHT 재의 충격인성이 낮게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 Fig. 5에서 알 수 있듯이 PWHT로 인해 성장된 결정립계에서 벽개파괴의 개시와 균열진전이 보다 용이하였기 때문으로 판단된다<sup>11-16)</sup>.

한편, -60 °C에서는 root부의 충격인성이 2nd side의 표면부 보다 낮은 값을 나타내고 있는데, 이는 2nd side 표면부에 비해 root부에서는 모재의 희석이 많고, 후행 용접에 의해 반복되는 열영향을 많이 받았기 때문으로 판단된다.

### 3.3 CTOD값에 미치는 PWHT의 영향

Fig. 8은 As-weld재와 PWHT재의 용접금속 CTOD

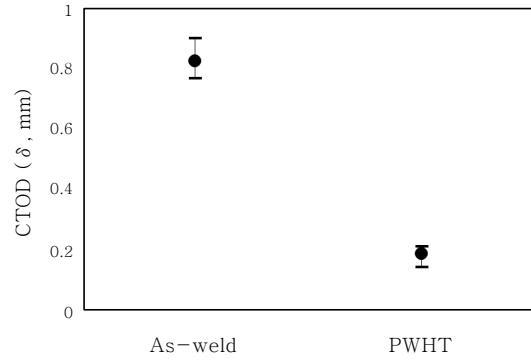


Fig. 8 Effect of PWHT on CTOD value of weld metal

값을 조사하여 나타낸 것이다. As-weld 재를 PWHT 하면 CTOD값이 크게 낮아지고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 -10 °C에서 CTOD 시험한 시료의 파단면을 나타낸 것이다. As-weld재의 경우는 파괴 개시 전에 많은 소성변형이 동반된 것을 알 수 있지만, PWHT재는 소성변형 양이 상대적으로 적은 것을 알 수 있다. 또한 이 결과는 Fig. 8의 CTOD 값과 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 PWHT에 의해 CTOD값이 저하된 원인을 조사하기 위해 용접후 PWHT한 시료의 파단 개시부 아래의 미세조직을 주사전자현미경으로 관찰하여 나타낸 것이다. 파괴가 PWHT에 의해 성장된 페라이트 입계에서 발생하고 있는 것을 알 수 있고, 이 결과로부터 용접부를 PWHT하면 파괴인성 값이 크게 낮아지는

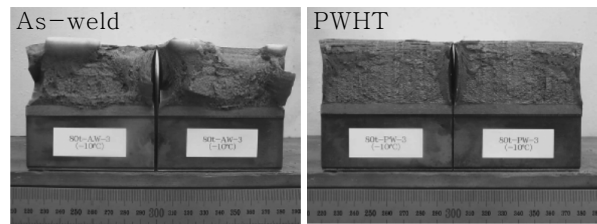


Fig. 9 Fracture surface obtained by CTOD at -10°C

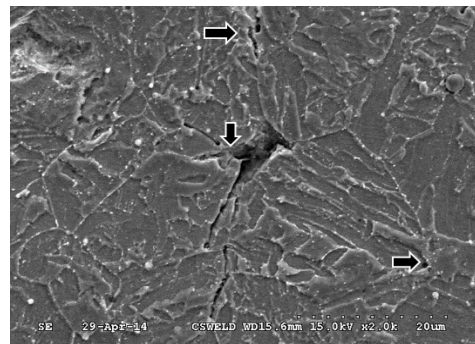


Fig. 10 SEM fractograph beneath the fracture surface of CTOD specimen tested for PWHT material

이유는 PWHT에 의해 성장된 결정립계에서 파괴 개시가 보다 용이하게 일어나기 때문임을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

선박 및 해양구조물 용 YS 460 MPa 급 강재의 플럭스 코어드 아크 용접부의 PWHT에 따른 인장특성과 충격 및 파괴인성 변화를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 용접금속의 강도는 PWHT에 의해 감소하고, 연신율은 증가하였다. 이는 PWHT에 의한 결정립 성장에 기인한 것으로 판단된다.

2) PWHT에 의해 2nd side 및 root부의 충격인성은 모두 감소되었다. 이는 PWHT에 의한 결정립 성장에 의해 파괴 개시 및 균열 전파가 용이해졌기 때문으로 판단된다.

3) 용접금속의 CTOD 값은 PWHT에 의해 크게 저하되었다. 이는 PWHT에 의해 성장된 결정립계가 파괴의 개시점으로 제공되고 있기 때문이다.

4) YS 460 MPa 강재 용접금속의 강도와 충격인성이 PWHT에 낮아지고 있지만, 선급에서 요구하는 값 이상을 안정적으로 만족하였다. 그러나 PWHT에 의한 파괴인성의 큰 감소에 대해서는 시공 시 세심한 고려가 필요한 것으로 판단된다.

#### References

1. T. W. Park, I. O. Shim, Y. W. Kim and C. Y. Kang : The effects of PWHT on the toughness of weld HAZ in Cu-containing HSLA-100 steel, *Journal of KWS*, **13-4** (1995), 55-64 (in Korean)
2. D. H. Ju, B. S. Jang, Y. M. Lim and J. H. Koh : The effect of heat input and PWHT on the mechanical properties and microstructure of HSB600 steel weldments with GMAW, KAIC, **13-5**(2012), 1939-1946
3. J R Still and J H Rogerson : The effect of post weld heat treatment(PWHT) on the properties of weld metals containing Ti, B and Mo, *Metal Construction* 1985 March, 120-123
4. Japan Pressure Vessel Research Council : Characterization of PWHT Behavior of 500N/mm<sup>2</sup> Class TMCP Steels, *WRC Bulletin* 371, April (1992)
5. Offshore standard : Fabrication and Tensing of Offshore structures, DNV-OS-C401 (2013)
6. Rules for the manufacture, testing and certification of materials, Chapter 13, LR (2011)
7. Rules for the classification of steel ships, Part 2, KR (2013)
8. A. A. Wells : The Mechanics of the Fracture Transition in Yielding Materials, CODA P46 document (1970)
9. Fracture mechanics toughness tests, BS 7448 Part 2, British standards institution (1997)
10. H. J. Kim and B. Y. Kang : Microstructural Characteristics of Steel Weld metal, *Journal of KWJS*, **18-5** (2000), 25-32 (in Korean)
11. J. H. Chen, G. Z. Wang, C. Yan, H. Ma and L. Zhu : Advances in the Mechanism of Cleavage Fracture of Low Alloy Steel at Low Temperature, *Int. J. Frac.* **83-2** (1997) 105-120
12. G. T. Hahn : The Influence of Microstructure on Brittle Fracture Toughness, *Metall. Trans. A*, **15-6** (1984) 947-959
13. S. Y. Shin, K. J. Woo, B. C. Hwang, S. H. Kim and S. H. Lee : Analysis of Fracture Toughness in Transition Temperature Region of API X70 and X80 Linepipe steels, *J. Kor. Inst. Met & Mater.*, **45-8** (2007) 447-457 (in Korean)
14. S. W. Kang, M. H. Kim, Y. T. Shin and H. W. Lee : The Effect of Heat Input on Fracture Toughness in Submerged Arc Offshore Steel Weldments, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, **41-6** (2004) 40-47 (in Korean)
15. D. J. Abson and R. J. Pargeter : Factors Influencing As-deposited Strength, Microstructure and Toughness of Manual Metal and Arc welds Suitable for C-Mn Steel Fabrications, *International Metal Reviews*, **31**(1986) 141-194
16. R. A. Farrar and P. L. Harrison : Acicular Ferrite in Carbon Manganese Weld Metals: An overview, *Journal of Materials Science*, **22-11**(1987) 3812-3820