

# 합금강(ASTM A387 Gr. 91) - 탄소강(ASTM A516 Gr.70) 이종금속의 FCA 다층 용접부 특성 평가 : Part. 2

신 태 우\* · 현 준 혁\* · 고 진 현\*<sup>†</sup>

\*한국기술교육대학교 신소재공학과

## A Study of Characteristics on the Dissimilar Metals (Alloy steel : A387 Gr. 91 - Carbon Steel : A516 Gr. 70) Welds Made with FCA Multiple Layer Welding: Part 2

Tae Woo Shin\*, Jun Hyeok Hyun\*, and Jin Hyun Koh\*<sup>†</sup>

\*Korea University of Technology and Education, Cheonan 31253, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author : jhkoh@kut.ac.kr

(Received January 5, 2017 ; Revised March 21, 2017 ; Accepted April 5, 2017)

### Abstract

Characteristics of dissimilar metal welds between alloy steel ASTM A387 Gr. 91 and carbon steel ASTM A516 Gr.70 made with Flux cored arc welding(FCAW) have been evaluated in terms of microstructure, mechanical strength, chemical analysis by EDS as well as corrosion test. Three heat inputs of 15.0, 22.5, 30.0kJ/cm were employed to make joints of dissimilar metals with E71T-1C wire. Post-weld heat treatment was carried out at 750°C for 2.5 h. Based on microstructural examination, Intragranular polygonal ferrite and grainboundary ferrite were formed only in first layer of weld metal. Another layers consisted of acicular ferrite and Widmannstätten ferrite. The amount of acicular ferrite was increased with decreasing heat input and layer. Heat affected zone of alloy steel showed the highest hardness due to the formation of tempered martensite and lower bainite. Lower and upper bainite were formed in heat affected zone of carbon steel. Tensile strengths of dissimilar metal welds decreased with increasing heat inputs. Dissimilar metal welds showed a good hot cracking resistance due to the low HCS index below 4. The salt spray test of dissimilar metals welds showed that the weight loss rate by corrosion below 170 hours was decreased with increasing heat inputs due to the increase of the amount of acicular ferrite.

Key Words : Dissimilar weld, FCA multipass, Acicular ferrite, Widmannstätten ferrite

### 1. 서 론

압력용기 제작시 경제적 관점에서 이종재료 용접에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히, 용접 와이어의 선택은 이종재료 용접에서 고려해야 할 중요한 인자 중 하나이다. 본 연구는 이종재료 용접 시 와이어의 선택이 용접부 특성에 미치는 영향을 조사하기 위한 일련의 연구로서 이미 수행된 합금강 와이어의 특성에 대한 연구에 이어 금번에는 탄소강 와이어 사용 시 용접부 특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 수행되었다<sup>1)</sup>.

SA516 Gr.70은 C함유량이 0.21%~0.26%인 강으로 저온에서의 신뢰성이 높고 비교적 높은 강도와 노치 인성을 갖기 때문에 중, 저온에서의 압력 용기 등에 사용되고 있다. 또한 이 강은 내수소균열 압력용기(HIC resistant pressure vessel)용으로도 사용되고 있다. 하지만 용접부의 탄소당량이 높아 용접 시 균열이 발생될 수 있어 용접성을 보증하기 어렵다는 단점이 있다<sup>2)</sup>.

SA387 Gr.91은 9%Cr-1%Mo 강에 미량의 Nb, V, N등이 첨가되어 고온에서 우수한 강도를 가져 600°C까지 도달하는 스팀 제너레이터에 많이 사용되고 있다<sup>3-7)</sup>. 최근 이 강재는 한랭지역으로 사용환경 확대 및 후물화로 인

해 -30°C 저온인성에 대한 안전성이 필요하며, 용접부 물성 확보를 위한 장시간 용접후열처리(Post-Weld Heat Treatment, PWHT)가 요구되고 있다<sup>8)</sup>.

본 연구에서는 탄소강 와이어를 사용하여 고능률성, 생산성 및 신뢰성 확보가 우수한 FCAW로 이중 금속을 용접하고 이어 PWHT 된 용접부의 특성(미세조직, 기계적 성질 및 내식성)을 조사하였다<sup>1,9)</sup>.

## 2. 실험방법

### 2.1 시편 준비 및 용접 조건

모재는 300(L)×300(W)×16(T) 크기의 A516 Gr. 70과 A387 Gr. 91강재이다. 용접부 형상은 Fig. 1과 같이 두 강재 사이 홈 각도 60°, 루트면 2mm, 루트간격 2.5mm로 한 후 위빙을 하여 4패스의 FCA 용접이 실시되었다. 보호가스는 100% CO<sub>2</sub>를, 용접봉으로는 탄소강 와이어 E71T-1C를 사용하였다.

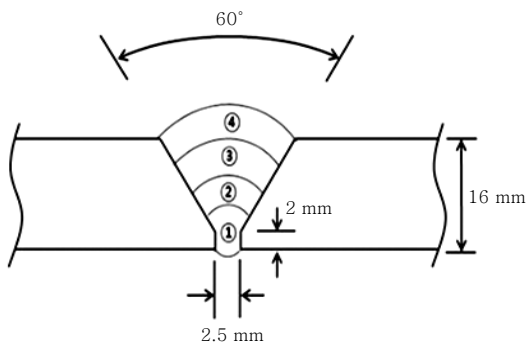


Fig. 1 A weld joint design with a four-pass weld

Table 1 Welding conditions

	No	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)	PWHT
FCAW	1	200	25	20	15.0	750 °C 2.5h
	2	300	25	20	22.5	
	3	400	25	20	30.0	

Table 2 Chemical composition and mechanical properties of base metals and wire (wt%, MPa)

	C	Mn	P	S	Si	Mo	Cr	Ni	Nb	V	N	Yield	Tensile
A387 Gr. 91	0.06~0.15	0.25~0.66	0.025	0.012	0.18~0.56	0.80~1.1	7.90~9.6	0.43	0.05~0.11	0.16~0.27	0.025~0.08	> 415	585~760
A516 Gr. 70	0.27	0.79~1.30	0.035	0.035	0.13~0.45							> 260	485~620
E71T-1C (wire)	< 0.3	< 1.75	< 0.03	< 0.03	< 0.6	< 0.3	< 0.2	< 0.5				> 390	490~670

용접 시편은 전류값(A)을 변화시켜 입열량 15.0, 22.5, 30.0 kJ/cm 으로 용접하였다. PWHT는 750°C에서 2.5h 유지 후 로냉하였다. 본 실험에서의 용접 조건은 Table 1, 사용한 이중 금속과 와이어의 화학성분 및 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다.

### 2.2 미세조직 및 기계적 시험

시편을 정밀연마 후 용접부 및 탄소강은 나이탈 5%, 합금강은 왕수로 에칭 후 두 강의 표면 직하 2mm부근의 열영향부와 용착금속의 조직을 관찰하였다. (Fig. 2 참조)

기계적 특성은 충격, 인장, 경도시험으로 분석되었고, 화학적 특성은 부식시험 및 화학성분 분석으로 평가되었다. 충격시험은 KS B 0809 4호 시험편을 제작하여, -45 ~ -15°C 구간에서 하중 30kg-m의 샤르피 충격시험기로 수행하였으며, 인장시험은 KS B 0801의 비례 14 A호 시험편을 용접선에 수평 방향으로 채취하여 만능인장시험기로 실험을 수행하였다. 경도시험은 마이크로 비커스 경도기로 표면 직하 2mm 부근과 용접부에서 수행하였으며 하중은 10kgf 였다.

부식시험은 KS D 9502에 따라 표준 염수(NaCl) 분무 시험기를 이용하여 35°C, 염도 pH 6.5~7.2분위기에 시간에 따른 무게 변화율을 측정하였고, 화학성분은 EDS를 이용하여 조성을 분석하였다.

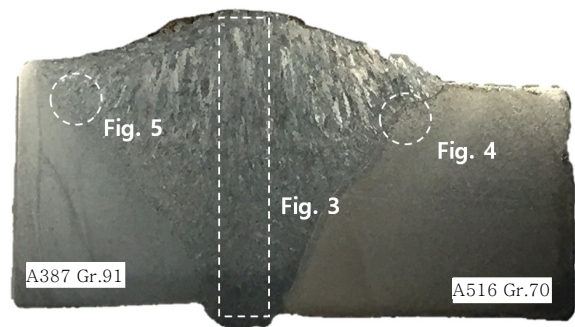


Fig. 2 A macrograph of weld section showing locations for microstructural observations

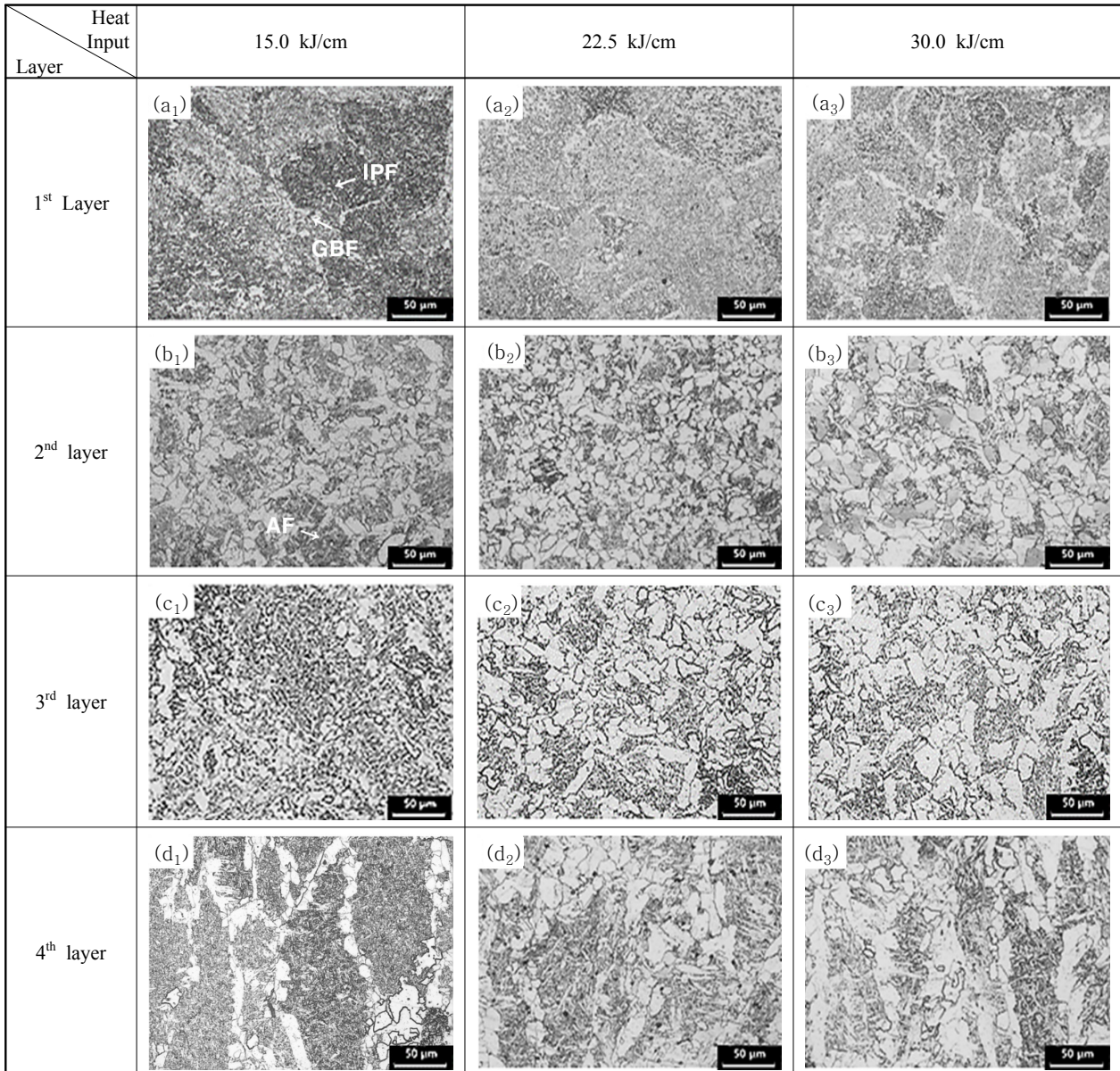


Fig. 3 Microstructures of weld metal with layers and different heat inputs

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 미세조직 관찰

Fig. 3은 A387과 A516의 이중금속 용접부에서 입열량에 따른 각 패스 구간의 조직이다. 입열량 15.0kJ/cm 일 때 초층(1st layer) 조직인 Fig. 3(a<sub>1</sub>)에서 미세한 입내 괴상 페라이트(Intragranular polygonal ferrite, IPF)와 입계페라이트(Grainboundary ferrite, GBF)가 관찰되었고, 입열량이 증가할수록 IPF, GBF가 조대해졌다.

Fig. 3(b)는 입열량에 따른 두 번째 층의 용착금속 조직이다. 입열량 15.0 kJ/cm 일 때의 조직 Fig. 3(b<sub>1</sub>)을

보면 1pass 구간보다 조대화 된 페라이트 입자와 비드만스테텐 페라이트(Widmannstätten Ferrite, WF), 적은 양의 아시쿨러 페라이트(Acicular ferrite, AF)가 혼합된 조직이 보여지고, 입열량이 증가함에 따라 GBF의 입자 크기가 증가하며 WF가 감소함을 Fig. 3(b<sub>2</sub>), (b<sub>3</sub>)에서 관찰할 수 있다.

Fig. 3(c)는 입열량에 따른 용착금속에서 세 번째 층의 조직이다. Fig. 3(c<sub>1</sub>)에서는 많은 양의 AF와 GBF, WF가 혼합된 조직이 관찰되며, 입열량이 증가할수록 AF가 감소함을 Fig. 3(c<sub>2</sub>), (c<sub>3</sub>)에서 확인할 수 있다.

Fig. 3(d)는 입열량에 따른 용착금속에서 네 번째 층의 조직이다. 전반적으로 GBF, WF, AF가 혼합된 조직이 관찰되며, 입열량이 증가함에 따라 GBF가 조대화 되었

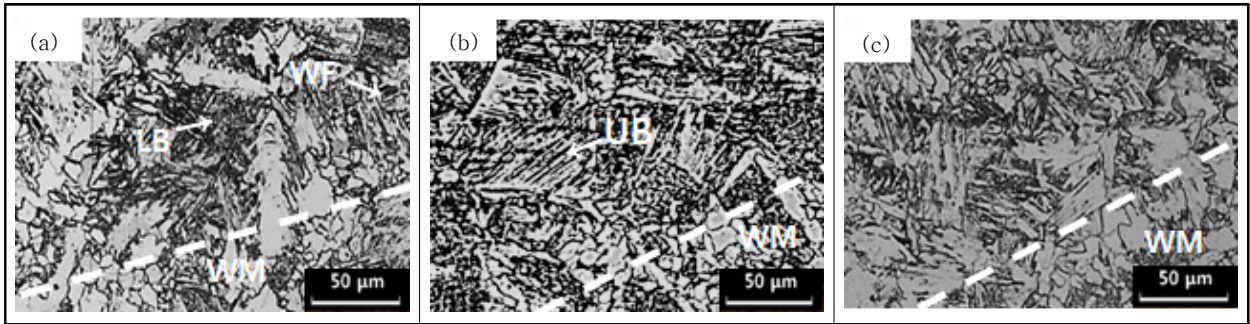


Fig. 4 Microstructures of heat-affected zone(HAZ) adjacent to A516-70 steel with different heat inputs ((a) 15.0 kJ/cm, (b) 22.5 kJ/cm, (c) 30.0 kJ/cm)

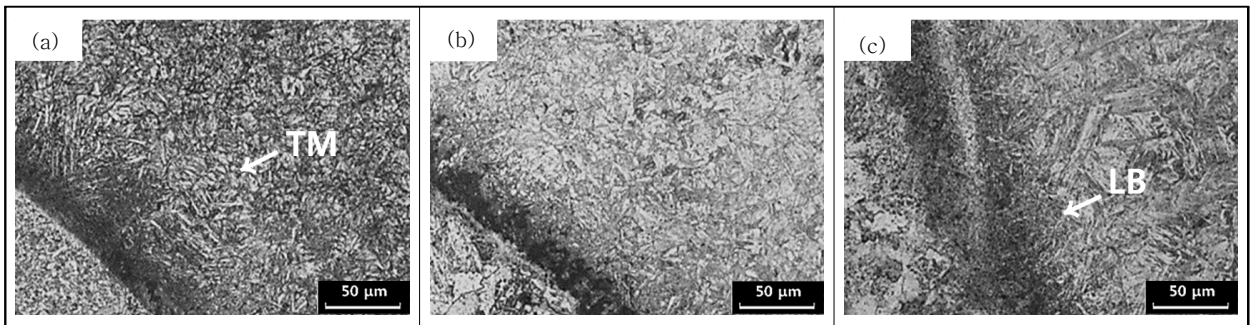


Fig. 5 Microstructures of heat-affected zone(HAZ) adjacent to A387-91 steel with different heat inputs ((a) 15.0 kJ/cm, (b) 22.5 kJ/cm, (c) 30.0 kJ/cm)

으며 AF 분율은 감소하였다.

Fig. 4는 A387과 A516의 이중금속 용접부에서 입열량에 따른 A516-70강재 쪽 HAZ에서의 조직으로 입열량 15.0kJ/cm일 때 하부 베이나이트(Lower Bainite, LB)와 WF가 혼합된 조직이 관찰되었다. 이 구간에서 입열량이 증가함에 따라 LB가 사라지고 상부 베이나이트(Upper Bainite, UB)가 형성되었으며, 30.0kJ/cm의 입열량일 때는 대부분 괴상의 GBF와 UB가 혼합된 조직이 형성되었다.

Fig. 5는 A387과 A516의 이중금속 용접부에서 입열량에 따른 A387강재 쪽 HAZ에서의 조직으로 템퍼드 마르텐사이트(Tempered Martensite, TM)가 관찰된다. 또한 입열량이 증가함에 따라 TM가 조대해졌으며, 30.0kJ/cm 입열량일 때는 TM, LB 혼합 조직이 형성되었다.

### 3.2 인장 시험

Fig. 6은 이중금속용접부에서 입열량에 따른 인장시험 결과이다. 입열량이 증가할수록 인장강도는 567.4, 542.9, 527.2 MPa로 감소하였고, 연신율은 33.69, 35.86, 36.97로 증가하였다. 이 결과는 입열량이 증가할수록 용접부에서 경한 조직인 AF 분율이 낮아지고 연한 조직인 GBF 분율이 높아졌기 때문이다.

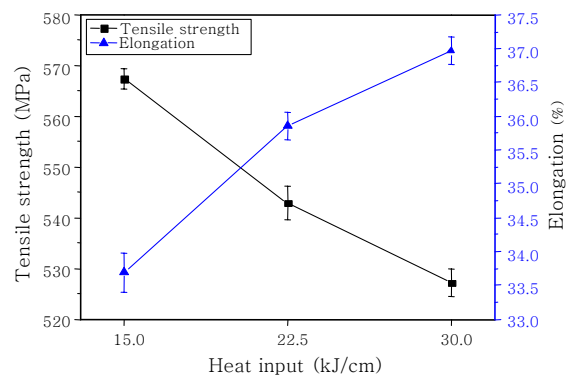


Fig. 6 Tensile strengths with different heat inputs

### 3.3 충격 시험

Fig. 7은 탄소강 와이어로 용접한 이중금속용접부의 입열량에 따른 충격시험 결과로 합금강 와이어로 용접된 용접부와는 반대로 입열량이 증가함에 따라 충격흡수에너지는 감소하였다<sup>1)</sup>. 일반적으로 아시쿨러 페라이트는 용접부에서의 저온인성을 향상시키는 것으로 보고 되는데<sup>10)</sup>, Fig. 3에서 고찰되었듯이 본 연구에서는 입열량이 증가함에 따라 용접부에서의 아시쿨러 페라이트 분율이 감소하여 충격 흡수에너지가 감소한 것으로 보인다. 또한 충격 흡수에너지의 변화로 보아 천이온도는 약 -35 ~ -25℃ 범위이다.

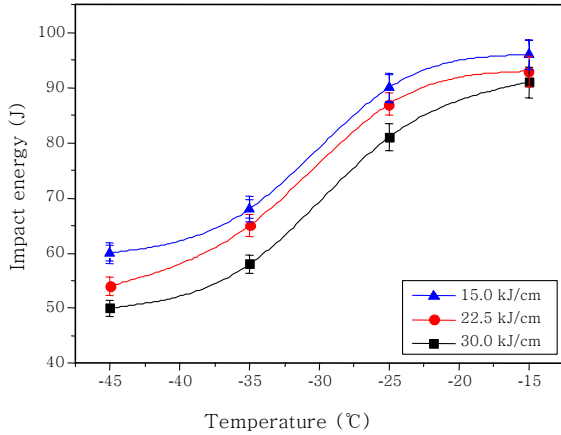


Fig. 7 Impact energy as a function of testing temperature

### 3.4 경도 시험

Fig. 8은 용접 시편 표면 직하 2mm에서 수평방향으로 측정된 경도값이다. 용접부의 경도는 A387의 모재와 HAZ보다 낮고 A516강재의 모재와 HAZ보다 높았다. 용접부와 HAZ에서의 경도는 입열량이 낮을수록 높았다. Fig. 4-6에서 고찰되었듯이 입열량이 낮아짐에 따라 용접부에서는 아시쿨러 페라이트 형성이 증가하였고, A516의 HAZ 영역에서는 하부 베이나이트가 형성되었으며 A387의 HAZ 영역에서는 템퍼드 마르텐사이트가 생성되었기 때문이다.

Fig. 9는 입열량에 따른 다층 용접부에서의 수직 방향 경도값을 나타낸 것이다. 전반적으로 첫 패스 구간에서의 경도가 가장 높고 층이 누적됨에 따라 경도가 증가하였으며, 입열량이 증가할수록 전 패스 구간에서의 평균 경도값은 감소하였다. 이는 Fig. 3에서 고찰되었듯이 첫 패스 구간에서는 미세한 페라이트가 형성되었고 입열량 감소와 패스 증가에 따라 아시쿨러 페라이트 형성이 증가하였기 때문으로 보인다. 또한, 각 층 사이에

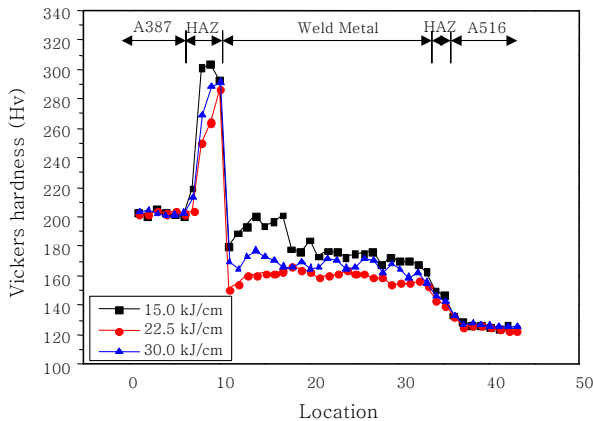


Fig. 8 Hardness variation across weld metal tested in horizontal direction at 2mm under weld surface

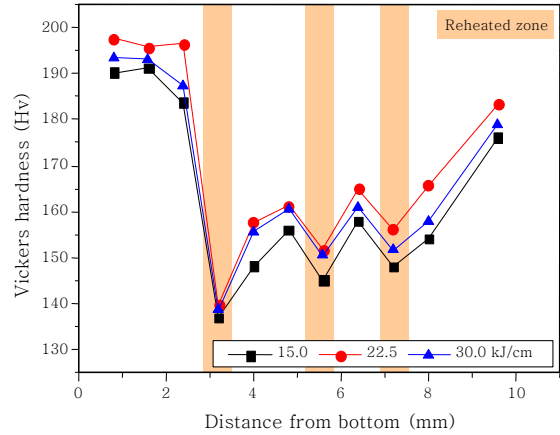


Fig. 9 Hardness variation of weld metal in the vertical direction

경도가 감소하는 구간은 다층 용접시 후속패스에 의한 재가열로 인하여 재열부(Reheated zone) 때문으로 사료된다<sup>11)</sup>.

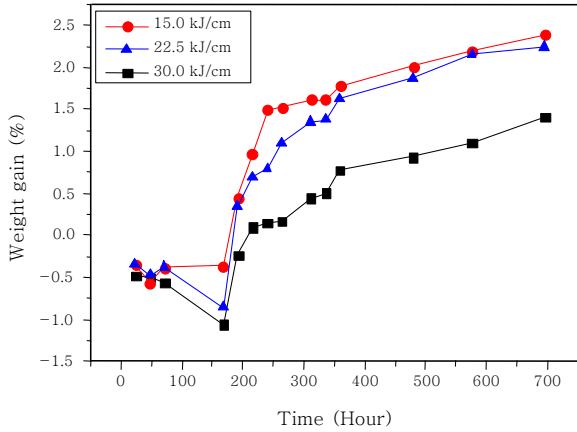
### 3.5 EDS 성분 분석

Table 3은 입열량에 따른 이중금속용접부를 EDS로 분석한 화학 조성으로 입열량이 증가함에 따라 일부 원소(Si, S)를 제외한 대부분의 원소 함량은 증가하였다. 특히, 용접부는 와이어보다 Cr양을 더 많이 함유하고 입열량이 증가함에 따라 증가하였다. 이는 입열량이 증가함에 따라 A387의 Cr이 타원소보다 용접부로 많이 확산이동된 것으로 사료된다.

$$HCS = \frac{C \times (P + S + \frac{Si}{2S} + \frac{Ni}{100})}{(3Mn + Cr + Mo + V)} \times 10^3 \quad (1)$$

Table 3 Chemical composition (wt%) of weld metal with different heat inputs

	15.0 kJ/cm	22.5 kJ/cm	30.0 kJ/cm
C	0.201	0.213	0.221
N	0.002	0.002	0.001
Si	0.4185	0.4134	0.3815
P	0.0301	0.0341	0.0333
S	0.0394	0.0327	0.0331
V	0.0616	0.0639	0.0657
Cr	1.078	1.084	1.112
Mn	1.1038	1.1049	1.1264
Ni	0.1012	0.1062	0.1425
Nb	0.0642	0.0958	0.0987
Mo	0.1573	0.1493	0.1489



**Fig. 10** Weight gain of dissimilar metals welded joints by salt spray corrosion test as a function of hour

입열량에 따른 이종금속용접부의 고온균열감수성(Hot Cracking Susceptibility, HCS)을 확인하기 위해서 Wilkinson이 제안한 식(1)을 이용하여 계산한 결과, 입열량이 증가함에 따라 용접부 내 C 함량이 증가하여 3.806, 3.898, 3.902로 증가하였지만 고온 균열 위험성 안정지수  $HCS < 4$ 를 모두 만족하였다<sup>12)</sup>.

### 3.6 부식 시험

Fig. 10는 염수 분무 시험기를 이용한 시험 시간에 따른 이종금속 용접부의 무게 변화율을 나타낸 것이다. 그래프를 보면 약 170시간까지 무게가 감소하였고, 입열량이 증가할수록 무게 감소율은 증가하였다. 일반적으로 부식 초기에는 공식에 의해 무게가 감소되는데 이것은 미세조직이 조대할수록 공식에 의한 무게 감소율이 증가하였기 때문이다<sup>13)</sup>.

Fig. 3에서 관찰되었듯이 입열량이 증가함에 따라 용접부에서는 미세한 조직인 아시쿨러 페라이트 생성이 줄었고, 내공식성에 영향을 미치는 원소인 Mo이 감소하였기 때문에 입열량 증가에 따라 무게 감소율도 증가한 것으로 보인다<sup>14)</sup>. 170시간 경과 이후에 무게가 증가한 것은 산화철이 지속적으로 증가하였기 때문으로 보인다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 압력용기용 강으로 많이 사용되는 합금강 ASTM A387 Gr. 91과 탄소강 ASTM A516 Gr. 70을 탄소강용 와이어를 이용하여 3가지 입열량 (15.0, 22.5, 30.0 kJ/cm)으로 FCA 다층 용접 후 PWHT를 실시하였다. 용접 후 이종금속 용접부에서의 미세조직 관찰, 충격 시험, 인장시험, 경도시험 및 부식

시험을 실시하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 용접부에서의 미세조직은 입내와 입계 페라이트, 비드만스테텐 페라이트, 아시쿨러 페라이트가 생성되었다. 특히, 입열량이 감소하고 패스가 증가함에 따라 아시쿨러 페라이트의 생성이 증가하였다.

2) A516강의 HAZ에서는 비드만스테텐 페라이트, 상·하부 베이나이트가 관찰되었으며 입열량이 증가함에 따라 상부 베이나이트, 비드만스테텐 페라이트의 생성이 많아졌다.

A387강의 HAZ에서는 템퍼드 마르텐사이트와 하부 베이나이트가 관찰되었고, 입열량이 증가하면서 템퍼드 마르텐사이트의 분율은 감소하고, 하부 베이나이트의 분율이 증가하였다.

3) 용접부에서의 경도는 초층이 가장 높았으며, 평균 경도값은 입열량이 증가할수록 감소하였다. 또한 입열량이 증가할수록 인장강도가 낮아졌다.

A387강재와 A516강재의 이종금속 용접부에서는 입열량이 증가할수록 충격흡수에너지는 감소하였으며 약 -30℃에서 천이온도가 나타났다.

4) EDS성분 분석을 통한 용접부에서의 고온균열감수성(Heat cracking susceptibility, HCS)은 입열량이 증가함에 따라 높아졌지만 표준 안전치( $HCS < 4$ )를 만족시켰다.

5) 이종금속 용접부의 부식은 약 170시간까지 공식에 의한 무게가 감소하였고, 입열량 감소에 따라 공식에 의한 무게 감소율은 적어졌다. 이는 아시쿨러 페라이트의 생성이 증가하였기 때문이다.

## References

1. Tae-Woo Shin, Bok-Su Jang, Jin-Hyun Koh, A study of characteristics on the Dissimilar Metals (Alloy steel, A387 Gr. 91 - Carbon steel, A516 Gr. 70) Welds made with FCA multiple layer welding, Part 1, *J. of Welding and Joining*, 34(3) (2016), 61-68 (in Korean)
2. Ho-Chun Yoo, Effect of Cr, Nb and Ti on the properties in HAZ of A516-70 steels with low HIC-susceptibility, *Proceedings of KWJS*, 1 (1998), 138-139 (in Korean)
3. Won-Chan Seo, Kook-Soo Bang and Byung-Ha Chi, Effects of carbon content on the weldability of B-containing 620℃ grade high Cr ferritic cast steel for turbine casing, *Journal of KSOE*, 22(6) (2008), 41-45 (in Korean)
4. Krauss G, Principles of heat treatment of steels, Metals Park(OH), American society of metals(ASM), (1980)
5. Willby C, Walters J, Material choice for the commercial fast reactor steam generators In:Pugh SF, Little EA, editors. Proceedings of the international conference on ferritic steels for fast reactor steam generators, London, *British nuclear energy society(BNES)*, (1978), 9-40

6. Sanderson SJ, Mechanical properties and metallurgy of 9Cr-1Mo steel, In:Khare AK, editor. Proceedings of the international conference on production, Fabrication and properties and application of ferritic steels for high temperature applications. Metals Park(OH), ASM, (1982), 9-85
7. Wood DS, Materials property requirements for steam generator components in the creep range, *Nucl technol*, 55 (1981), 8-332
8. Il-Wook Han, Soon-Taik Hong, Development trend of steel and welding consumables for pressure vessel, *Journal of KWJS*, 28(2) (2010), 125-132 (in Korean)
9. Ghang-Soo Kim, Dae-Soon Kim, A study on the charpy impact property of the FCAW welds for low temperature service, *Proceedings of KWJS*, 39 (2002), 85 (in Korean)
10. Jin-Hyun Koh, Jung-Han Kook, A study on the effect of heat input on the microstructure and toughness of weldments made by domestic flux cored wires, *Journal of KWS*, 11(4) (1993), 57-69 (in Korean)
11. In-June Moon, Bok-Su Jang, Se-Cheol Kim, Jin Hyun Koh, A study characteristics of dissimilar welds between super duplex stainless steel INS S32750 and Carbon steel A516-70 with FCAW, *J. of Welding and Joining*, 32(4) (2014), 26-33 (in Korean)
12. KWJS, *Welding & Joining Handbook*, ferrous & non-ferrous metals II, *KWJS*, (2008), 289 (in Korean)
13. Sami I. Al-rubaiey, Eman A. Anoon, Mahdi M. Hanoon, The influence of microstructure on the corrosion rate of carbon steels, *Journal of Eng & Tech*, 31(10) (2013), 1825-1836
14. KWJS, *Welding & Joining Handbook*, ferrous & non-ferrous metals I, *KWJS*, (2008), 118 (in Korean)