연 구 논 문

ISSN 1225-6153
Online ISSN 2287-8955

슈퍼듀플렉스 스테인리스강 UNS S32750과 탄소강 A516-70의 이종금속 FCA 용접 특성에 대한 연구

문인준* · 장복수* · 김세철* · 고진현*,†

*한국기술교육대학교 에너지 · 신소재 · 화학공학부

A Study on Characteristics of Dissimilar Welds between Super Duplex Stainless Steel UNS S32750 and Carbon Steel A516-70 with FCAW

In-June Moon*, Bok-Su Jang*, Se-Cheol Kim* and Jin-Hyun Koh*,†

*School of Energy · Materials · Chemical, Korea University of Technology and Education, Cheonan 330-708, Korea

†Corresponding author : jhkoh@koreatech.ac.kr

(Received February 12, 2014 ; Revised April 2, 2014 ; Accepted April 22, 2014)

Abstract

The metallurgical and mechanical characteristics, toughness and corrosion resistance of dissimilar welds between super duplex stainless steel UNS S32750 and carbon steel ASTM A516Gr.70 have been evaluated. Three heat inputs of 21.12, 24.00, 26.88kJ/cm were employed to make joints of dissimilar metals with flux cored arc welding(FCAW). Based on microstructural examination, vermicular ferrite was formed in the first layer of weld at low heat input(21.12kJ/cm) and Cr_{eq}/Ni_{eq} of 1.61 while acicular ferrite was formed in last layer of weld at high heat input(26.88kJ/cm) and Cr_{eq}/Ni_{eq} of 1.72. Ferrite percentage in dissimilar welds was lowest in the first layer of weld regardless of heat inputs and it gradually increased in the second and third layers of weld. Heat affected zone showed higher hardness than the weld metal although reheated zone showed lower hardness than weld metal due to the formation of secondary austenite. Tensile strengths of dissimilar welds increased with heat input and there was 100MPa difference. The corrosion test by ferric chloride solution showed that carbon steel had poor corrosion resistance and pitting corrosion occurred in the first layer(root pass) of weld due to the presence of reheated zone where secondary austenite was formed. The salt spray test of carbon steel showed that the surface only corroded but the amount of weight loss was extremely low.

Key Words : Super duplex stainless steel, FCA multipass, pitting corrosion, Secondary austenite, Dissimilar weld

1. 서 론

듀플렉스 스테인리스강(duplex stainless steel, SDSS)은 페라이트와 오스테나이트 상이 거의 1:1의 비율로 혼합된 미세조직을 갖는 스테인리스강이다. 실질적으로는 C, N 정련기술 확립으로 현재와 같은 야금학적 특성을 갖는 듀플렉스 스테인리스강이 상용화되었다[1-3].

최근 원자력발전소의 해수처리설비, 해수담수화설비와 화력발전소의 탈황설비, 석유화학 공장 등 환경 및 에너지 산업의 급속한 팽창으로 2상계 슈퍼 듀플렉스 스테인리스강의 기술 개발에 관심이 높아지고 있다[4,5].

하지만 2상계 슈퍼 듀플렉스 스테인리스강의 사용 측면에서 용접과 열처리 특히 용접 후 용접균열, 부식 등이 문제이다[6-8].

또한 듀플렉스 스테인리스강은 고가이기 때문에 사용

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.

Journal of Welding and Joining, Vol.32 No.4(2014) pp26-33
http://dx.doi.org/10.5781/JWJ.2014.32.4.26

이 제한되고 있다. 이 때문에 듀플렉스 스테인리스강은 부식환경이 취약한 곳에서 다른 금속과 이종금속 용접하여 사용되고 있다. 특히 산업현장에서는 듀플렉스 스테인리스강에 오스테나이트계 스테인리스강, 탄소강 또는 저 합금강과 용접하여 사용되고 있다[9-11].

그러나 듀플렉스 스테인리스강과 오스테나이트계 스테인리스강의 두 금속간 이종 금속 용접 연구는 다수 수행되었지만 듀플렉스 스테인리스강과 탄소강의 이종금속 용접 연구는 미비하다. 이러한 이유로 본 연구는 듀플렉스 스테인리스강 UNS S32750과 탄소강 ASTM A516-Gr70을 FCA 다층 용접을 실시하여 조직 및 상의 변화와 기계적 특성 그리고 내 공식성을 평가하고자 한다.

2. 실험 방법

사용된 모재는 25%Cr-7%Ni 슈퍼 듀플렉스 스테인리스강(UNS S32750)과 탄소강(ASTM A516-70)이며 모재와 와이어의 화학성분은 Table 1에 나타내었다.

용접은 FCA 다층 용접을 실시하였으며 전류를 달리하여 용접 입열량을 조절하였다. FCA의 용접 입열량(kJ/cm)은 22.12, 24.00, 26.88을 사용하였으며, V형 그루브 홈에 3개 용접층(layer)으로 시험편을 제작하였다. 용접하기 전 상온(20℃)에서 예열을 실시하였으며 각 층에 1패스의 용접을 실시하였다. 층간온도는 150℃이하로 유지하였으며 후열은 따로 하지 않고 상온에서 선행하였다. 용접조건은 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of base metal and wires(wt.%)

	C	Cr	Ni	Mo	Mn	N
FCAW (wire)	0.02	25.00	8.7	3.80	0.85	0.17
UNS S32750	0.030	25.30	7.0	3.8	1.20	0.25
	C	S	Si	Mn	P	
ASTM A516-70	0.27	0.035	0.15	0.85	0.035	

Table 2 Welding conditions

Welding Process	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cpm)	Heat input (kJ/cm)
FCAW	220	32	20	21.12
	250	32	20	24.00
	280	32	20	26.88

조직관찰은 시편을 정밀연마 후 무라카미 용액을 이용하여 에칭하여 관찰하였으며, 열처리 온도별로 모재와 용접부의 페라이트(ferrite) 상분율을 Ferritescope Fmp30을 이용하여 측정하였다.

부식시험은 듀플렉스 스테인리스강의 공식시험인 ASTM G48 method E에 의거하여 6%$FeCl_3$ + 1%HCl 용액에 50℃에서 5℃간격으로 30℃까지 24시간 유지하였으며, 탄소강의 부식 상태를 보기 위해 KDS 9502 표준 염수(NaCl) 분무 시험을 실시하였다. 용액의 농도는 50g/L이며 시간은 2h, 6h, 24h, 48h, 96h, 168h이다. 용액의 압력은 0.12MPa이며 온도는 50℃를 유지하였다[12].

기계적 특성은 경도시험, 충격시험 그리고 인장시험으로 조사하였다. 경도시험은 마이크로 비커스 경도기 하중 1kgf로 실시하였다. 충격시험은 KS B 0809의 4호 시험편을 제작하여 하중 30kg-m의 샤르피 충격 시험기로 수행하였으며 인장시험은 KS B 0801의 비례 시험편 중 14B호를 참고하여 제작한 시편을 만능 인장 시험기로 시험속도 1mm/min으로 수행하였다.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 미세 조직 관찰

Fig. 1은 용접부의 매크로 사진이며 사진을 통하여 용접부와 재열부의 경계를 뚜렷하게 관찰할 수 있었다.

Fig. 2에 입열량별 조직사진을 층별로 나타내었다. Fig. 2의 경우 용접방향에 대하여 종방향으로 절삭하여 용접부의 중앙에서 촬영한 사진이다(Fig. 1 참조). 초층에서는 전체적으로 기지 조직인 페라이트 양이 적어 보인다. 입열량이 낮은 Fig. 2(a)의 경우 다른 입열량의 조직 사진보다 페라이트 양이 적게 나타났다. Fig. 2(a)의 조직사진은 탄소강의 탄소함유량이 0.06%일 때의 조직사진과 유사하다[13]. 용접봉은 Cr, Ni 그리고 Mo 등의 성분이 듀플렉스 스테인리스강과 비슷하다. 따라서 용접부는 기본적인 듀플렉스 스테인리스강의 용접부의 형태이다.

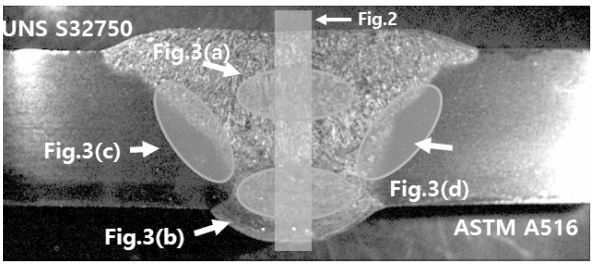

Fig. 1 Macrograph of weld section

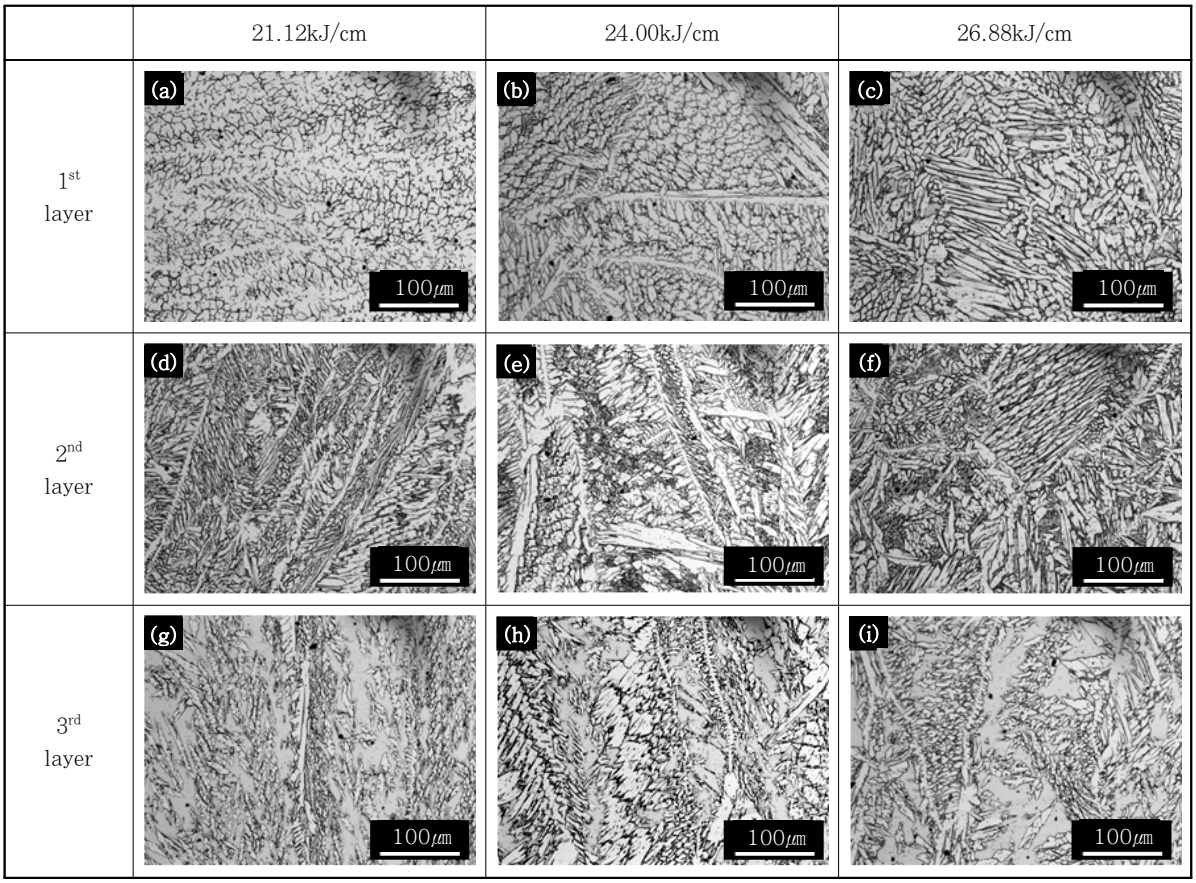

Fig. 2 Microstructures of weld metals with different heat inputs and layers

하지만 초층의 경우 모재사이(루트) 간격이 좁아 다른 층보다 두 모재간의 용융이 잘 되어 모재와 용접봉의 희석률이 높다. 또한 입열량이 낮은 경우 다른 입열량 보다 용착 금속량이 적을 수 있다. 이로 인하여 저입열의 초층의 경우 탄소강의 모재성분이 용융과정에서 다른 층보다는 많이 희석됨으로써 용접봉이 듀플렉스강에 상응하는 성분 함유량이지만 탄소강과 유사한 조직의 형상이 나타난 것으로 보인다.

철강재료 원소 중 C의 경우 오스테나이트를 안정화시켜 오스테나이트의 온도 영역을 확대시킨다. 모재 중 탄소강(A516-70)에는 C의 함유량이 0.27%이고, 슈퍼 듀플렉스 스테인리스강(UNS S32750)에는 0.03%로 그 차이가 매우 크다. 초층에서 낮은 입열량으로 용융되면서 탄소강에 함유되어 있던 C가 용접금속에 많이 용융된 것으로 여겨진다. 따라서 용접부의 탄소량이 증가하여 듀플렉스강의 조직보다는 탄소강의 조직으로 나타난 것으로 보여진다.

또한 입열량이 가장 낮은 Fig. 2(a)조직은 평활계면(planar interface) 응고 형상을 보인다. 성장속도가 느린 경우 생성되는 상으로 주상결정은 관찰되지 않았다. 또한 버미큘라(Vermicular) 페라이트 형상을 띄고 있으며 Cr_{eq}/Ni_{eq}의 값이 적을 때 생성되는 페라이트 형상이다[13]. 입열량 24.00kJ/cm인 Fig. 2(b)에서는 조직이 한 방향으로 길게 성장하여 수지상과 비슷한 형상을 하고 있다.

입열량이 가장 높은 26.88kJ/cm Fig. 1(c)의 경우 조직이 셀(cell) 형상이다. 셀형 조직은 철강 및 비철금속합금 용접부에서 흔히 관찰되는 응고조직이다.

저입열에서 나타난 평활계면 응고는 결정립들의 방향성에 따라 경쟁적 성장(competitive growth)을 하게 된다 이러한 형태로 응고한 응고조직은 주상결정의 조직이 전혀 보이지 않으며, 평활계면으로 성장 후에는 셀상 계면의 형태로 성장하게 된다.

2nd layer 〔Fig. 2(d),(e),(f)〕의 조직 사진을 관찰해 보면 초층과 달리 오스테나이트가 일정한 방향성을 갖고 성장한 것을 확인할 수 있다. 전체적으로 수지상 형태의 조직을 보여준다. 또한 후속패스 용착에 의한 재열과 열이력에 의하여 오스테나이트 입계에서 작은 상들이 생성됨을 확인할 수 있다. Fig. 2(f)의 경우 초층에서 나타난 셀상의 조직들을 확인 할 수 있다.

상층부의 조직사진에서 입열량이 제일 높은 Fig. 2(i)에서 침상(Acicular) 페라이트 형상을 보여준다. 침상

페라이트는 초층의 버미큘라 보다 Cr_{eq}/Ni_{eq}의 값이 높을 때 나타나는 페라이트 형태의 종류중 하나이다.

마지막 층은 두 번째 층과는 달리 오스테나이트 입계에 생성된 다른 상들은 발견되지 않았다. 다른 층과 비교하여 재가열에 의한 열이력이 없으며 다른층 보다 급랭되기 때문에 상의 석출보다는 조직이 방향성을 갖고 성장한 것으로 보여진다.

Fig. 3은 재열부[(a), (b)]와 열영향부[(c), (d)]의 조직 사진이다. 조직사진에 위치를 Fig. 1에 나타내었다. 열영향부는 용접부와 모재사이에서 형성되는 영역으로 고상에서 모재에 비하여 금속조직학적 및 역학적 변화가 일어난 부분이다. 열영향부는 거의 고상선의 온도 부근까지 급속히 가열되며 또한 급속히 냉각되기 때문에, 이 과정에서 제2상 즉 탄·질화물 등의 고용 또는 석출이 일어난다.

또한 급속 냉각조건하에서 듀플렉스 스테인리스강의 열영향부(HAZ) 및 재열부(RZ)에서는 비평형적으로 형성되었던 페라이트로부터 오스테나이트 상이 생성된다. 이러한 영향으로 핵의 추가적인 성장 결과 이차 오스테나이트 상이 생성된다. Fig. 3(a)와 (b)의 조직 사진에서 오스테나이트 입계 사이에 미세한 조직인 이차 오스테나이트 상을 관찰할 수 있다. 이 상은 인성을 향상시키지만 내공식성을 떨어뜨리는 것으로 알려져 있다[14-16].

이차 오스테나이트의 생성 메커니즘은 크게 두 가지가 있다. 첫째는 단순히 기존의 오스테나이트가 성장하는 것이고, 두 번째는 Cr_2N의 영향이다.

듀플렉스 스테인리스강에서 석출물의 하나인 Cr_2N은 페라이트와 오스테나이트 계면에서 생성된다. Cr_2N에서 페라이트 촉진원소인 Cr이 고갈되면서 Cr_2N이 용해되기 시작한다. 이때 N은 핵이 인접한 오스테나이트 상의 계면과 접하게 되면서 성장한다. 이때 성장한 상이 이차 오스테나이트 상이다[17,18].

Fig. 3(c)는 듀플렉스 스테인리스강과 용접부Fig. 3(d)는 탄소강과 용접부의 경계면 조직 사진이다. Fig. 3(c)와는 달리 Fig. 3(d)에서는 탄소강 조직과 가까운 형상을 보이며 용융 과정에서 C의 증가와 Cr 및 Ni의 감소로 조직의 형상이 다른 것으로 보인다[13].

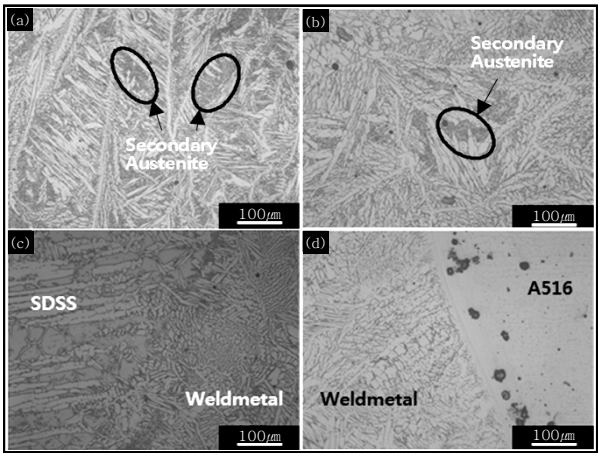

Fig. 3 Microstructures of reheated zone((a),(b)) and weld metal-base metal interfaces ((c), (d))

3.2 페라이트 분율 측정

Fig. 4는 페라이트 스코프를 이용하여 측정한 페라이트 함유량을 보여주고 있다. Fig. 1의 조직사진과 비교하여 육안으로 관찰 할 수 없었던 페라이트 함유량을 알 수 있으며 조직사진과 비교하여 전체적으로 상층부로 갈수록 페라이트 함유량이 증가하였고 초층부에서 페라이트 함유량이 가장 낮았다. 이는 전형적인 다층용접의 특징이다. 저 입열인 경우 페라이트 분율이 초층에서는 15%정도로 다른 입열량에 비해 현저히 낮게 측정 되었다.

3.3 상 성분 분석

Fig. 5는 입열량 21.12kJ/cm의 층별 성분원소의 평균 함유량을 나타내고 있다. 두 번째 층과 세 번째 층의 성분원소의 차이가 적은 것과 달리 초층과 두 번째 층에서는 Cr과 Ni의 함유량이 각각 5%, 3%정도 차이가 났다. 특히 Cr의 함유량은 20%이하로 떨어진 것을 확인하였다. 상대적으로 입열량이 적어 와이어의 용착량도 적으며 이종 금속 용접이기 때문에 용융시 듀플렉스 스테인리스강과 탄소강이 함께 용융됨에 따라 용접와이어 및 듀플렉스 스테인리스강의 크롬 함유량보다 크게 떨어진 것으로 보인다.

두 번째 층과 세 번째 층에서는 함유량의 차이가 크

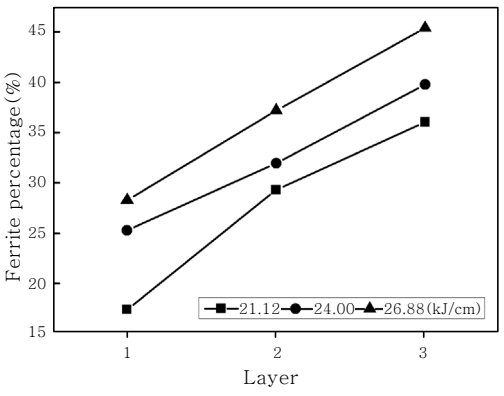

Fig. 4 Ferrite percentage in the weld metal according to heat inputs and weld layers

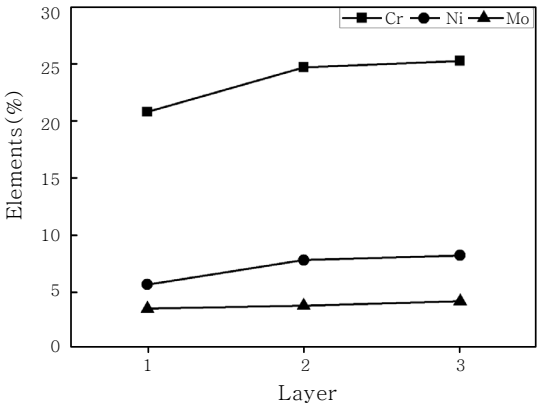

Fig. 5 Elements profile (Heat input : 21.12 kJ/cm)

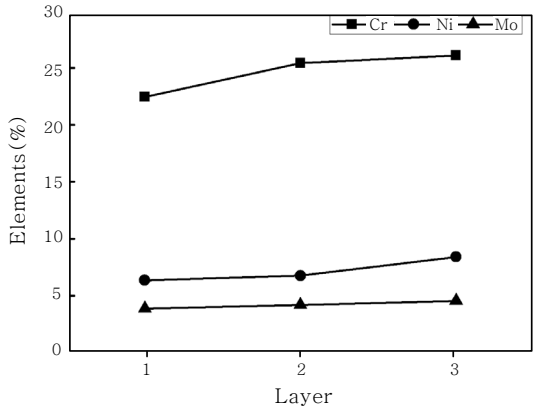

Fig. 6 Elements profile (Heat input : 24.00 kJ/cm)

지 않다. 용접시 초층보다 두 모재사이(루트) 간격이 크기 때문에 용접 와이어의 용융량이 크며 또한 재열에 의한 열이력이 있기 때문에 변화가 적은 것으로 보여진다.

Fig. 6은 입열량 24.00kJ/cm에서 성분 원소 함유량이다. Cr 경우 저입열과 비슷하게 초층과 두 번째 층의 함유량이 크게 차이가 났지만 Cr의 함유량은 20% 이상으로 저 입열보다 높게 나타났다. Ni의 경우 두 번째 층과 세 번째 층사이 함유량의 차이가 크다.

Fig. 7은 고 입열인 26.88kJ/cm에서의 성분원소 함유량이다. 다른 입열량과 비교하여 용접부 전역에 Cr, Ni, Mo의 원소량 분포가 모든 용접층에서 차이가 가장 적었다. 또한 Cr의 함유량도 25%정도로 용접와이어 및 듀플렉스강의 Cr 함유량과 비슷한 값을 나타내었다.

이와 같이 입열량이 증가할수록 와이어의 용착량이 증가한다. 와이어는 Cr과 Ni의 함유량이 듀플렉스 스테인리스강에 상응한다. 이러한 이유로 다른 입열량에 비하여 고입열에서 층간 성분원소의 차이도 적으며 Cr, Ni과 Mo의 함유량도 와이어 및 듀플렉스 스테인리스강과 차이가 크지 않았다.

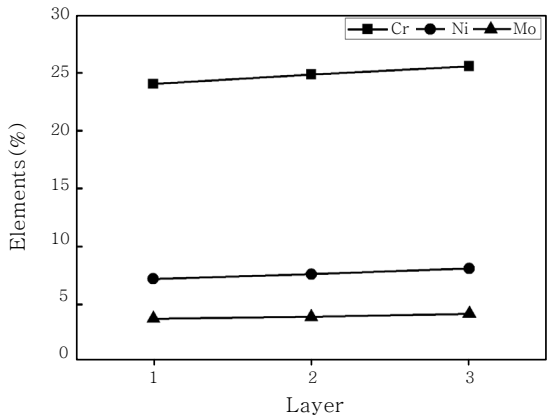

Fig. 7 Elements profile (Heat input : 26.88 kJ/cm)

Table 3 Microstructural change in accordance with Cr_{eq}/Ni_{eq} in weld metals[13)]

Heat Input (kJ/cm)	Cr_{eq}/Ni_{eq}		Microstructual change
21.12	1st layer	1.61	1. Austenite 2. Inter cellular ferrite **3. Vermicular ferrite** 4. Lathy ferrite **5. Acicular ferrite** 6. Widmanstatten austenite 7. Ferrite
	2nd layer	1.64	
	3rd layer	1.66	
24.00	1st layer	1.67	
	2nd layer	1.68	
	3rd layer	1.69	
26.88	1st layer	1.67	
	2nd layer	1.82	
	3rd layer	1.72	

듀플렉스 스테인리스강의 경우에는 냉각과정에서 오스테나이트 상이 석출하여 상온에서 페라이트+오스테나이트의 2상 조직을 가지며, 상온에서의 조직 형상은 Table 3에 식(1)과 식(2)를 이용하여 Cr_{eq}/Ni_{eq} 값과의 관계로 나열하였다.

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1.5 \times \%Si + 0.5 \times \%Nb \quad (1)$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30 \times \%C + 30 \times \%N + 0.5 \times \%M \quad (2)$$

Cr_{eq}/Ni_{eq}값이 작으면 오스테나이트 단일상을 나타내며 Cr_{eq}/Ni_{eq}값이 커질수록 페라이트 형상을 나타내었다. Table 3에 조직변화는 Cr_{eq}/Ni_{eq}값이 작은 쪽에서부터 큰 순서로 나열한 것이다.

조직 사진(Fig. 1)에서 언급하였던 페라이트 조직에 따른 Cr_{eq}/Ni_{eq} 값은 입열량 21.12kJ/cm의 초층에서 약 1.61이며 입열량 26.88kJ/cm의 마지막 층에서는 1.72 정도였다. 침상 페라이트가 버미큘라 페라이트보다 Cr_{eq}/Ni_{eq}값이 높은 것을 확인하였다. 또한 3.2절의 페라이트 함유량과 비교하여 Cr_{eq}/Ni_{eq}가 높을수록 페라이트 함유량이 높은 것을 확인 하였다

3.4 경도 시험

Fig. 8은 용접표면과 수평방향으로 측정된 경도값으로 용접부보다 열영향부에서 경도가 높다. 용접 입열량 26.88kJ/cm에서 경도값이 가장 높다. 입열량이 높을수록 냉각 효과가 크기 때문에 이에 따라 경도가 높다고 여겨진다.

Fig. 9는 용접부 중앙에서 수직 방향으로 측정한 재열부의 경도값이 용접부보다 낮게 나타났다. 일반적으로 재열부에서 페라이트는 감소하고 오스테나이트는 증가한다고 보고 되고 있다[15,18].

또한 용접부의 초층으로 갈수록 경도가 낮다. 상대적으로 마지막 층은 초층보다 열영향을 받지 않으므로, 바로 급냉이 이루어지기 때문에 다른 층보다 경도가 높게 나타났다. 각 입열량 별로 초층과 두 번째 층의 경도값이 비슷한 이유도 용접후 재가열에 의한 영향으로 보인다. 또한 입열량이 가장 낮은 경우 경도값이 낮고 입열량 26.88kJ/cm에서 경도가 가장 높았다.

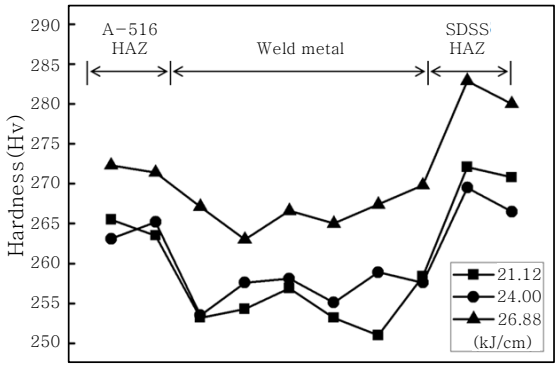

Fig. 8 Hardness variation across weld metal tested in horizontal direction at 2mm under weld surface

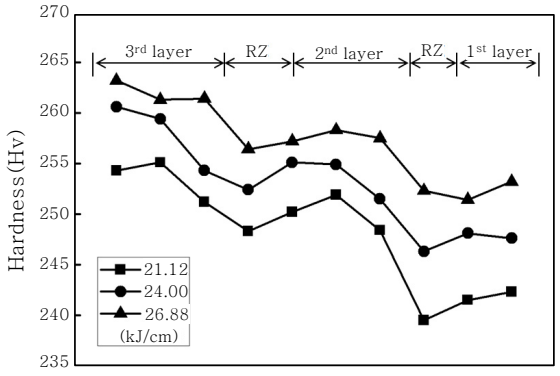

Fig. 9 Hardness variation across weld metal in the vertical direction

3.5 충격 시험

Fig. 10은 이종금속용접부의 충격 시험 결과로 입열량에 따른 파면율과 충격에너지의 차이는 크지 않았다. 충격 시험 온도 20℃를 기준으로 연성파면과 취성파면이 일어났다. -20℃ 이상에서는 연성파괴가 일어났으며 20℃이하에서는 취성파괴가 일어났다. 이것은 슈퍼 듀플렉스 스테인리스강의 연성-취성 천이온도가 43℃인 것을 감안할 때 20℃가 높다[8].

3.6 인장 시험

Fig. 11은 이종금속용접부의 인장시험 결과이다. 입열량이 증가할수록 인장강도의 값은 각각 845, 823, 733MPa로 증가하였다. 입열량 26.88kJ/cm에서 인장강도가 가장 높고, 입열량 21.12kJ/cm에서 인장강도가 가장 낮아 100MPa정도 차이가 났다.

듀플렉스 스테인리스강의 인장강도는 800MPa이다. 입열량이 24.00, 26.88kJ/cm일때는 이에 상회하는 값을 나타냈지만 입열량이 낮은 21.12kJ/cm 일 때는

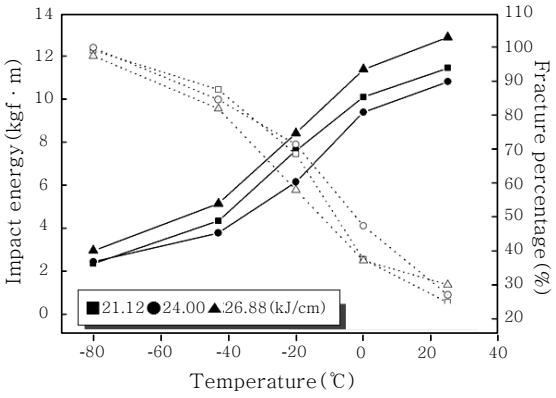

Fig. 10 Impact energy and fracture percentage as a function of testing temperature

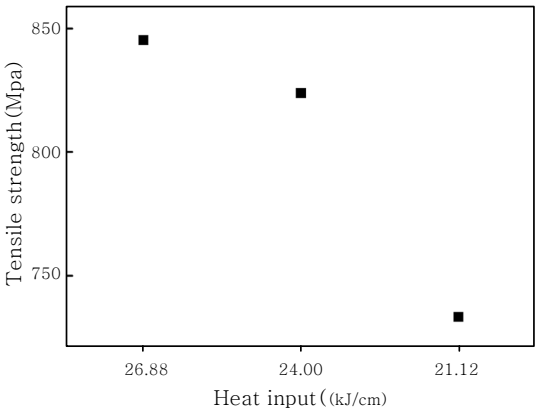

Fig. 11 Tensile strengths with different heat inputs

이에 못 미치는 값을 나타내었다. Ni은 재료의 인성을 증가시키며 Cr은 적은 양으로도 재료의 경도와 인장강도를 증가 시킨다.

앞에서 고찰된 바와같이 성분함유량과 용접미세조직의 영향으로 인장강도에서 차이가 생겼다고 여겨진다.

경도시험과 인장시험 결과 입열량 21.12kJ/cm에서 용접한 경우 기존의 듀플렉스 스테인리스강보다 기계적 성질이 저하되었다.

3.7 부식 시험

슈퍼 듀플렉스 스테인리스강의 경우 일반적으로 임계공식 온도(CPT)가 70~80℃로 보고되고 있다[12]. 본 시험 결과에서도 듀플렉스 스테인리스강은 시험온도 50℃에서 공식이 발생하지 않았다(Fig. 12). 하지만 탄소강 부분에서 공식이 일어나 용접부와 탄소강이 분리가 되는 형상을 관찰 할 수 있다. 이는 입열량과 상관없이 공통적인 결과이다. Fig. 12는 염화제이철 용액을 이용한 공식 시험 결과로 탄소강이 염화제이철 용액에 매우 취약하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 12((a),(b))를 보면 공식은 용접부의 루트 패스(초층)에서 발생한 것을 알 수 있다. 초층의 경우 루트간격이 좁아 두 모재간의 용융이 잘되어 기존의 듀플렉스강보다 페라이트량과 Cr의 함유량이 낮아 공식이 발생한 것으로 보인다.

Fig. 13은 KDS 9502 표준 염수(NaCl) 분무 시험을 이용한 부식 시험 결과의 시편 표면 사진이며, Fig. 14는 부식 후 무게 감소량을 나타낸 것이다. 표면상으로는 탄소강 부분에서 부식이 일어난 것을 관찰 할 수 있다. 하지만 무게 감소량 측정 결과, 부식 시험시간 24h에서 입열량 별로 각각 0.0036g, 0.0043g, 0.0018g 이었으며, 240h에서 0.006g, 0.0073g, 0.004g으로 입열량 증가에 따라 무게 감소량이 적었고 차이도 크지 않았다.

이종금속용접부에 대한 두 가지의 부식시험 결과 듀플렉스 스테인리스강은 염수에는 강해 부식이 일어나지

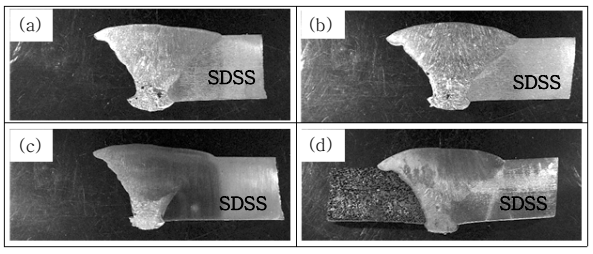

Fig. 12 Pitting corrosion tested surfaces (Test solution : 6%$FeCl_3$) (a) 50℃, (b) 45℃, (c) 40℃, (d) 35℃

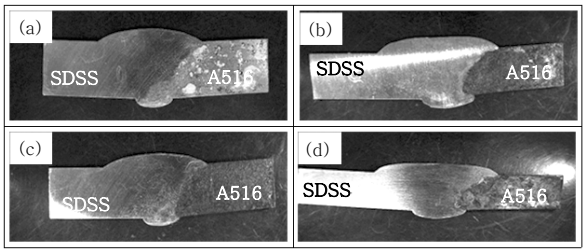

Fig. 13 Corrosion tested surfaces with the variation of time (Test solution : NaCl) (a) 24h, (b) 96h, (c) 168h, (d) 240h

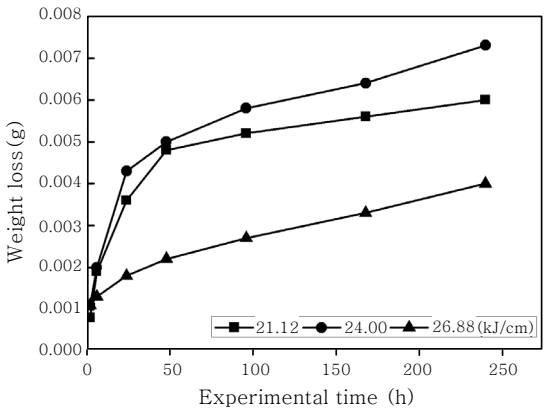

Fig. 14 Weight loss(g) as a function of experimental time (Test solution : NaCl)

않았고 염화제이철 용액에서도 매우 양호한 표면 상태를 보였다. 그러나 탄소강의 경우 염화제이철 용액에서는 매우 취약하였다. 하지만 염수 시험에서 표면이 부식 되었지만 무게감소량이 매우 작아 부식이 심하게 일어나지 않는 것으로 판단된다. 결과적으로 산업현장에 적용시 부식 환경에서는 듀플렉스와 탄소강을 적절하게 용접하는 것이 중요하다고 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 듀플렉스 스테인리스강(UNS S32750)과 압력용기용 탄소강(ASTM A-516Gr.70)을 FCA 이종 용접하였다. 용접은 3가지 입열량(21.12, 24.00, 26.88 kJ/cm)으로 다층 용접하고 용접부의 미세조직 변화와 상 및 성분분석, 페라이트 함유량 측정을 하였다. 인장, 충격과 경도시험으로 기계적 특성을 평가하였고 부식시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 미세조직은 Cr_{eq}/Ni_{eq} 값이 낮은 입열량 21.12kJ/cm의 초층에서는 버미큘라 페라이트, 높은 값인 26.88 kJ/cm의 마지막 층에서는 침상 페라이트가 형성되었다. 또한 입열량과 상관없이 상층부에서 조직은 방향성을 띄고 성장하였고 재가열부에서는 내식성이 약한 이차 오스테

나이트상이 생성되었다. 그리고 모재간(루트)의 간격이 작고 입열량이 작은 21.12kJ/cm의 초층에서 두 금속 간의 용융이 많이 일어나 탄소강에 가까운 조직 형상을 나타내었다.

2) 모든 입열량에서 초층부의 페라이트 함유량이 가장 낮았고 상층부로 갈수록 페라이트 량이 증가하였다.

3) 열영향부가 용접금속보다 경도가 높고 재열부는 이차오스테나이트 생성으로 용접부에 비하여 경도가 낮았다. 그리고 상층부에서 초층부로 갈수록 경도가 낮았고 입열량이 작을수록 경도가 낮았다.

4) 연성-취성 천이온도는 -20℃로 기존의 듀플렉스강에 비해 20℃가량 높았다. 이종금속 용접 용접과정에서 서로 다른 두 재료의 성분이 용융되어 충격인성이 저하된 것으로 여겨진다.

5) 입열량이 높을수록 인장강도는 높았고 입열량이 가장 큰 26.88kJ/cm에서 용접부와 입열량이 가장 낮은 21.12kJ/cm에서 용접부의 인장강도는 약 100MPa 차이가 났다.

6) 부식용액 염화제이철에서 부식 시험결과 탄소강이 아주 취약하였고, 탄소강과 용접부의 계면과 초층 용접부에서 공식이 발생하였다. 염수분무시험에서 탄소강 표면이 부식되었으나 무게 감소량은 낮았다.

Reference

1. P. Guha and C. A. Clark: "Properties and Application of Chromium Duplex Stainless Steels", Int. Conf. Proc. of Duplex Stainless Steels (1983) 355~368
2. G. Herbsleb and P.Schwaab, "Precipitation of Intermetallic Compounds, Nitrides and Carbides in AF 22 Duplex Steel and Their Influence on Corrosion Behavior in Acids", Int. Conf. Proc. of Duplex Stainless Steels (1983) 15~38
3. Jong-Sub Lee and Sook Hwan Kim, A Study of Weld Fusion Zone Phenomena in Austenitic Stainless Steels(2) - Effect of Nitrogen on Microstructural Evolution and Hot Cracking Susceptibility of GTA Welds in STS 304 -, Journal of KWJS, **18-1** (2000), 59-69 (in Korean)
4. Charles J. Super duplex stainless steels: structure and properties. In: Charles J, Bernhardsson S, editors. Duplex Stainless Steels 91: Proceedings of the Third Internationl a Conference on Duplex Stainless steels, **1**. 3-48 Les editions de physique. (1991)
5. H. D. Solomon and T. M. Devine, Proc. Conf. on Duplex Stainless Steels, (ed: R. A. Lula), p.693, ASTM, Metal Park, Ohil, USA, 1983
6. J. Charles, Proc. Conf. on Duplex Stainless Steels, (eds: J. Charles and S. Bernhardsson), 3, Beaune, France (1991)
7. K. Johansson, Pro. Conf. on Duplex Stainless Steels, (eds: J. Charles and S. Bernhardsson), p.13, Associazione Italiana Metallurgia, Venezia, Italy, 2000
8. J.-O. Nilsson : "Super duplex stainless steels", Matereals Science and Technology, August (1992), **8**, 685-700
9. Badji R, Bouabdallah M. Effect of solution treatment temperature on the precipitation kinetic of sigma phase in 2205 duplex stainless steel welds. Mater Sci Eng A 2008;496:447-54
10. Seong-Kil Nam, Se-Jin Park, Hye-Sung Na and Chung-Yun Kang, Effect of Thermal Cycle on Microstructure and Pitting Corrosion Property of Multi-pass Weldment of Super-duplex Stainless Steel, Journal of KWJS, **28-4** (2010), 18-25 (in Korean)
11. C. Y. Kang, H. J. Ki,, C. G. Kim, I. S. Kim, D. W. Joo and J. H. Seong : J. Kor. Soc. Heat Treat, **11** (1998), 192
12. ASTM G48-03, "Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution", West Conshohocken, PA: ASTM, 2007
13. The Korean Welding and Joining Society, "Ⅰ. Steel and nonferrous meta", Welding & Joining Handbook (2008) 133-134
14. Zhang Wei, Jiang Laizhu. Effect of ageing on precipitation and impact energy of 2101 economical duplex stainless steel. Mater Charact 2009; 60:50-5
15. Ramirez, A. 2001. Ph.D. dissertation, University of Sao paulo, Sao Paulo
16. Serna, C.P., remarez, A.J., Alonso-Falleros, N., and Brandi, S. D. 2003. pitting corrosion resistance of duplex stainless steel multipass welds, in Proceeding of the 6th International conference on Trends in Welding Research, As International, Materials Park, OH, 17-22
17. Nilsson, J.-O., Jonsson, P., and Wilson, A. 1994. Formation of secondary austenite in super duplex stainless steel weld metal and its dependence on chemical composition, Paper 39 in Duplex Stainless Steels '94, **1**, Abington Publishing, cambridge
18. Ramerez, A. J., Brandi, S., and Lippold, J.C. 2003. The relationship between chromium nirtide and secondary austenite precipitation in duplex stainless steeSls, Metallurgical Transactions A, 34A(8): 1575-1597