

이종(異種)금속의 플라즈마 아크용접에서 용접부의 기계적 특성에 관한 연구

이일준* · 김진무
기계자동차공학부

<요약>

이종(異種)금속재료의 용접은 화학플랜트, 해상구조물, 조선, 항공 등의 분야에서 금속접합 방법으로 적용시키는 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 일반 구조용 압연 강재(SS 400)와 오스테나이트계 스테인레스 강재(STS 304)를 사용하여 플라즈마 아크용접으로 맞대기 이음 용접을 한 후 모재부(BM), 열영향부(HAZ) 및 용착금속부(WAZ)의 인장, 경도 및 굽힘 시험으로 기계적 특성과 현미경 조직 사진을 통한 금속조직의 변화를 고찰·검토하였다.

A Study on the Mechanical Properties of Weld Zones in Plazma Arc Welding of Dissimilar Metals

Lee, Il Jun · Kim, Jin Moo
School of Mechanical and Automotive Engineering

<Abstract>

Rolled steel for general structure(SS 400) and austenitic stainless steel(STS 304) were selected as base metals. The base metals were joined by plasma arc welding under proper welding conditions. Specimens were cut out from welded metal zone(WMZ), heat affected zone(HAZ) and base metal(BM) respectively.

Tensile test, micro vickers hardness test, bending test and microstructure inspection were performed and the mechanical properties and microstructures investigated.

* 울산기능대학, 조교수

I. 서 론

중화학 공업에서 사용되는 강재는 고강도, 내식성, 내마멸성 등의 특성이 요구되므로 구조용, 내식용 및 내열용 특수강이 많이 사용되고 있다. 특히 내식용 특수강 중 스테인레스강은 종류도 다양하고 화학 플랜트, 해상구조물, 조선, 보일러 등의 분야에 없어서는 안될 중요한 금속재료로 사용범위는 계속 늘어날 전망이다. 또한 중화학 공업에서 필수적인 접합 기술로서 용접은 전기 및 전자제어 기술의 급속한 발전과 더불어 고품질 및 고능률의 금속접합 기술로 발전을 하고 있다.

산업 현장에서는 부식환경에 노출되는 화학운반선을 탱크건조할 때 제작 및 유지비용을 절감하고 내부식성을 고려해서 화학물질에 직접 접촉하는 내부는 스테인레스강을 사용하고 나머지 부분은 도장된 강재를 사용하여 이중 금속용접을 해서 제작하고 있다.

연강과 스테인레스강을 접합하기 위한 용접법으로는 피복아크용접(SMAW), TIG용접(GYAW), MIG용접(GMAW), 잠호용접(SAW), 플라즈마아크용접(PAW) 등이 있으며, 침단의 용접방법으로 전자빔용접(EBW), 레이저용접(LBM) 등이 이용되고 있다.

그러나 연강과 스테인레스강의 이중금속 용접시 용융점, 열팽창계수, 비중 및 열전도도의 차이와 희석에 따른 용착금속부의 조성변화, 탄소의 이동에 따른 탈탄층과 침탄층 등의 발생과 그로 인한 기계적, 금속학적 성질변화의 문제점이 발생된다⁽¹⁾. 스테인레스강 중에서도 높은 강도와 우수한 내식성을 갖고 있는 오스테나이트계 스테인레스강(STS 304)과 일반 구조용 압연강재(SS 400)의 이중재료 용접에 관한 연구는 계속 이루어지고 있다.^{(2)~(4)} 이와같이 이중금속 용접에 관해서 가능한 용접법의 특성을 연구하고 현장에서 활용하기 위한 연구가 계속 이루어져 왔으나 플라즈마 아크 용접에 의한 이중금속 접합에 관한 연구는 극히 미약한 실정이다.

본 연구는 일반구조용 압연강재(SS 400)와 오스테나이트계 스테인레스강(STS 304)을 플라즈마 아크 용접(PAW)으로 접합을 수행한 후 용접부의 인장강도, 연신율, 경도 및 금속조직을 재료시험과 조직검사를 통하여 그 변화를 관찰하고 특성을 밝혀 산업현장에서 실무에 적용할 수 있는 기본자료를 제시하고자 한다.

II. 실험 장치 및 방법

2.1 시험편

2.1.1 모재(base metal)

시험편을 제작하기 위하여 사용한 용접 모재는 두께 3.2mm의 일반 구조용 압연강재(SS 400)와 오스테나이트계 스테인레스 강판(STS 304)을 사용하였으며, 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1 및 2와 같다.

Table 1 Chemical compositions of base metals (wt, %)

element	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Fe
SS 400	0.17	0.05	0.83	0.01	0.01	0.04	0.07	0.03	remainder
STS 304	0.052	0.5	1.50	0.02	0.01	0.01	18.2	8.10	remainder

Table 2 Mechanical properties of base metals

element	tensile strength(kgf/mm ²)	yield strength(kgf/mm ²)	elongation(%)
SS 400	43.6	26.7	23.8
STS 304	61.1	36.3	48.1

2.1.2 용가재(filler metal)

시험편을 제작하기 위하여 사용한 용가재는 용착금속에 페라이트가 함유되어 내균열성, 내식성 및 내열성이 우수하여 연강과 스테인레스강의 이종금속 용접에 주로 사용되는 AWS A5.9 ER309(Ø2.4×1000)이며 용가재의 화학성분과 기계적 성질은 Table 3 및 4와 같다.

Table 3 Chemical compositions of filler metal

composition	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
wt(%)	0.11	0.62	2.2	0.02	0.03	24.4	12.8	remainder

Table 4. Mechanical properties of filler metal

tensile strength(kgf/mm ²)	yield strength(kgf/mm ²)	elongation(%)
59.2	29.1	42.3

2.1.3 용접조건

본 실험에서 사용된 모재는 Fig.1과 같이 폭×길이×두께를 150mm×200mm×3.2mm가 되게 절단한 후 플라즈마 아크 용접기를 사용하여 용접선 길이 방향으로 아래보기 맞대기 용접을 수행하였다. 용접조건을 설정하기 위하여 주요 변수인 용접전류, 보호가스량, 오리피스 가스량, 전극의 setback 등을 변화시켜 예비 실험을 실시한 후 이를 분석한 다음 최적의 용접조건을 확인하고 그 값을 Table 5와 같이 선정하였다.

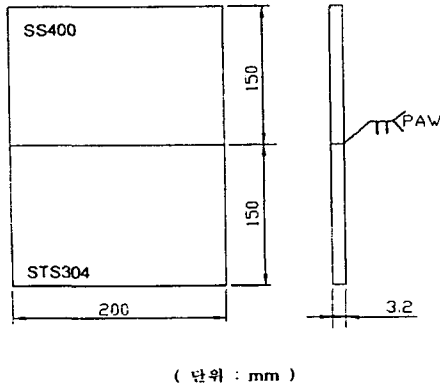


Fig. 1 Dimension of base metal for welding (annealing)

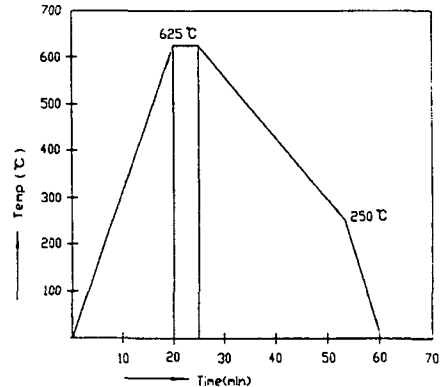


Fig. 2 Heat treatment cycle

Table 5 Welding conditions for the plasma arc welding

joint	weld speed (cm/min)	current (A)	voltage (V)	diameter of orifice(mm)	gas flow(l /min)		electrod diameter(mm)	shield gas
					orifice	shielding		
butt	5.8~6.2	65~75	20~22	1.6	0.6	7.0	2.4	Ar

2.1.4 열처리 조건

용접시험편의 잔류 응력을 제거하기 위하여 전기열처리에서 후열처리를 실시하였다. 풀림(annealing)에 적용한 조건은 10분당 300°C로 20분간 가열한 후 노내 온도를 625±25°C로 5분간 유지시킨 후 10분당 150°C정도로 냉각시키고 250°C에서 공냉시켰다. 열처리 과정은 Fig.2와 같다.

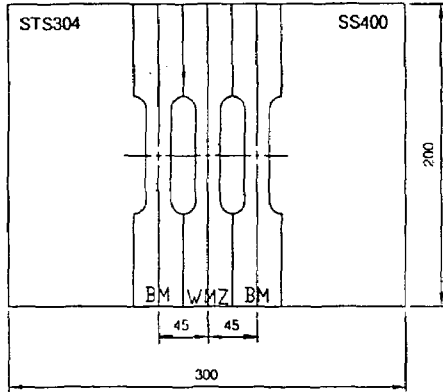
2.2 시험편

최적의 조건으로 플라즈마 아크 용접을 행한 시험편 용접부의 덧살을 연삭가공하고 #1500의 샌드페이퍼로 연마한 후, 일반 구조용 압연 강재부분은 3% Nital 용액으로 10초간 부식시킨 후 알콜로 세척하였으며⁽⁵⁾ 스테인레스 강재 및 용착부는 10ml HNO₃, 30ml HCl 및 30ml Glycerol을 혼합한 Glyceregia로 30초간 부식 후 알콜로 세척하였다⁽⁶⁾. 금속현미경으로 관찰한 결과 용착부의 폭은 약 8mm이고, 열영향부의 폭은 약 6mm로 나타났다. 이것을 기준으로 하여 시험편을 제작하였다.

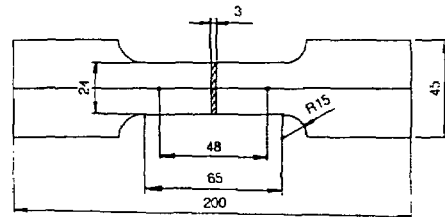
2.2.1 인장시험편

인장특성을 비교 분석하기 위하여 용접선 방향으로 모재부(BM)와 용접부(WMZ)로 구분

하여 Fig.3과 같이 KS B 0801의 14-B호 규격의 형상과 치수로 제작하고, 용접부의 현미경조직을 근거로 하여 용접선의 가로방향으로 모재부(BM), 열영향부(HAZ) 및 용착부(WMZ)로 구분해서 시험편을 채취하여 KS B 0864의 1호 용접 구조물 노치 인장 시험편의 규격을 적용하여 Fig.4와 같은 형상의 시험편을 제작하였다.



(a) weld zones of specimen

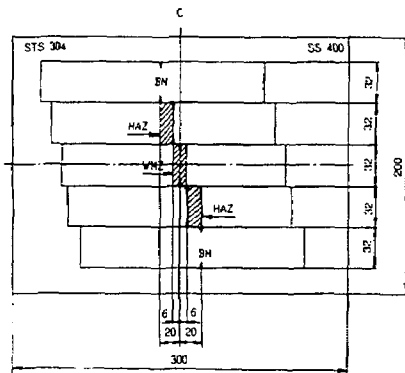


(b) tensile specimen

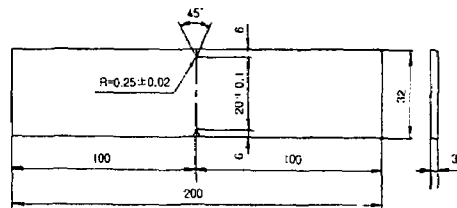
Fig.3 Dimension of tensile specimen (KS B 0801 14 B호)

2.2.3 경도시험편

경도시험편은 모재부, 열영향부 및 용착부로 구분하여 한 시험편에서 측정할 수 있도록 Fig.5와 같은 형상의 치수로 와이어 커팅머신에서 채취한 후 평면 연삭기로 정밀 연삭하고 #1500 샌드페이퍼로 표면을 연마하였다.



(a) weld zones of specimen



(b) V-notch tensile specimen

Fig.4 Dimension of V-notch tensile specimen (KS B 0864 1)

2.2.4 굽힘시험편

굽힘시험편은 용접부의 표면 및 이면의 연성 유무를 조사하기 위하여 KS B 0803에 의한 규격으로 Fig.6과 같은 형상과 크기로 와이어 커팅머신으로 채취한 후 용접부를 평면연삭기로 정밀 연삭하였다.

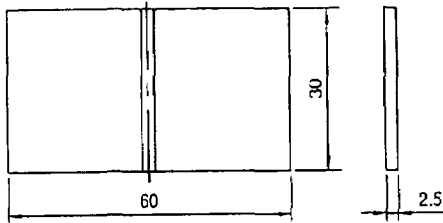


Fig.5 Specimen for hardness

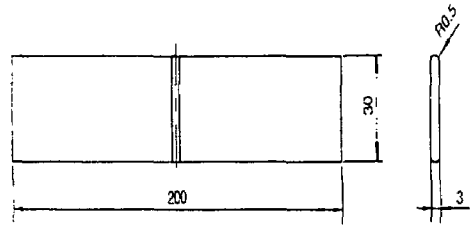
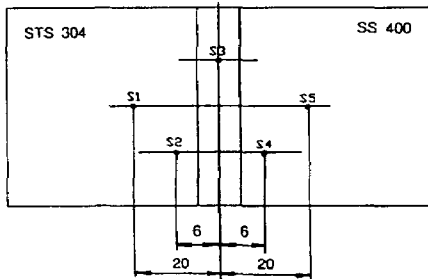


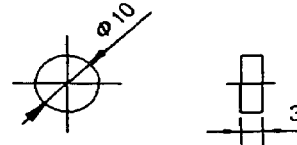
Fig.6 Specimen for bending test

2.2.5 현미경 조직 시험편

현미경조직 검사용 시험편은 모재부, 열영향부, 용착부 등을 한 시험편에서 검사할 수 있도록 Fig.7과 같은 형상과 치수로 시험편을 와이어 커팅머신으로 채취한 후 마운팅하여 #1500 샌드페이퍼로 표면을 연마하였다



(a) positions for metallography inspection



(b) dimension of specimen for metallography inspection

Fig.7 Specimen for microstructure inspection

2.3 실험장치 및 방법

이종 금속의 용접시험편은 플라즈마 아크용접기(Model ps-3000, USA)로 용접하여 제작하였다. 인장시험은 용접선 방향의 모재부와 용접부에 대해서 시행하여 인장강도, 항복강도 및 연신율을 측정하였다. 또한 용접 구조물의 노치 인장 시험편은 용접선과 가로 방향의 모재부(BM), 열영향부(HAZ) 및 용착부(WMZ)에서 채취하여 인장강도와 항복강도를 측정하였다.

경도시험은 Fig.8과 같이 용접 중심부로부터 STS 304와 SS 400방향으로 각각 3mm 간격으로 18mm까지 경도를 측정하였다.

굽힘시험은 만능시험기를 사용하여 용접부의 표면 및 이면에 대한 굽힘을 행하여 균열의 유무를 관찰하였다. 용접 시험편을 Al_2O_3 분말($0.05\mu m$)의 수용액으로 정밀 연마하고 Nital용액 및 Glyceria용액으로 부식을 한 후, 알콜로 세척하여 건조기에서 건조시킨 후 400배로 확대하여 관찰하고 용착부, 열영향부 및 모재부의 조직을 촬영하였다.

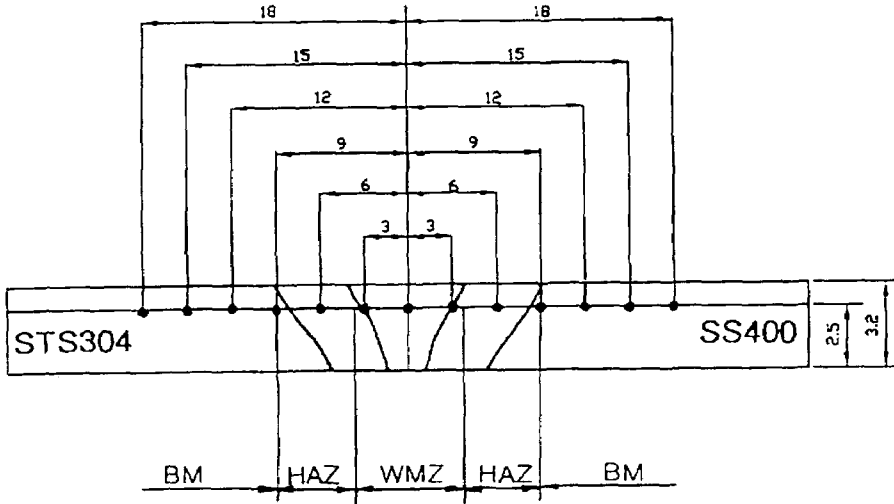


Fig.8 Measuring points for hardness test

III. 실험결과 및 고찰

3.1 인장시험

용접 시험편을 플라즈마 아크 용접한 후 용접부에 따른 인장 특성을 규명하기 위하여 용접선방향으로 시험편을 채취하여, 인장시험을 한 결과는 Fig.9와 같다. 모재부와 용접부의 인장강도 및 연신율은 SS 400보다 STS 304가 높았다. SS 400과 STS 304가 용융 결합된 용접부의 인장강도는 STS 304보다 다소 작고 SS 400보다는 상당히 컸으며, 연신율은 SS 400 보다 약간 작았다. 이러한 현상은 용착금속 및 열영향부의 인성이 모재보다 저하된 것으로 생각된다.

또한 노치 인장특성을 규명하기 위하여 용착 금속부(WMZ), 열영향부(HAZ), 모재부(BM) 등으로 구분하여 용접선과 가로방향으로 시험편을 채취하여 인장시험을 한 결과는 Fig.10과 같다. 노치 인장시험 결과 인장강도 및 항복강도는 SS 400보다 STS 304가 높았으며 용착 금속부는 SS 400보다는 크고, STS 304보다는 다소 낮았으나 용접선 방향의 인장

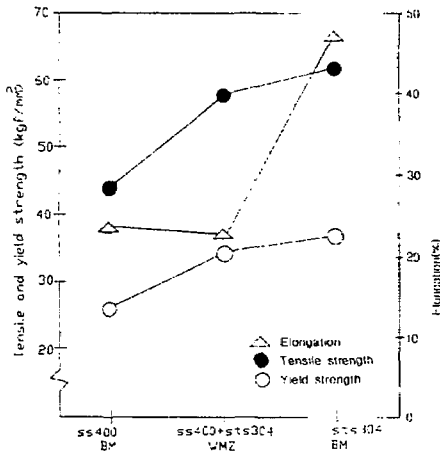


Fig.9 Tensile strength and elongation in weld zones

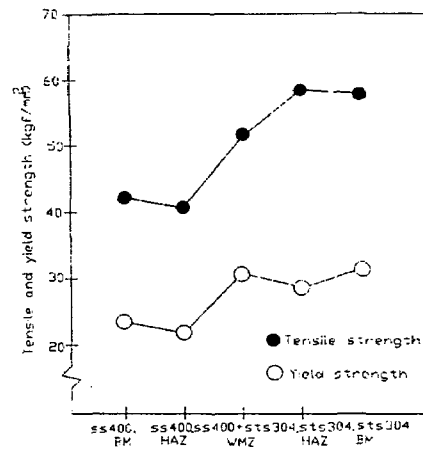


Fig.10 Tensile properties in weld zones of SS 400 and STS 304(transverse direction)

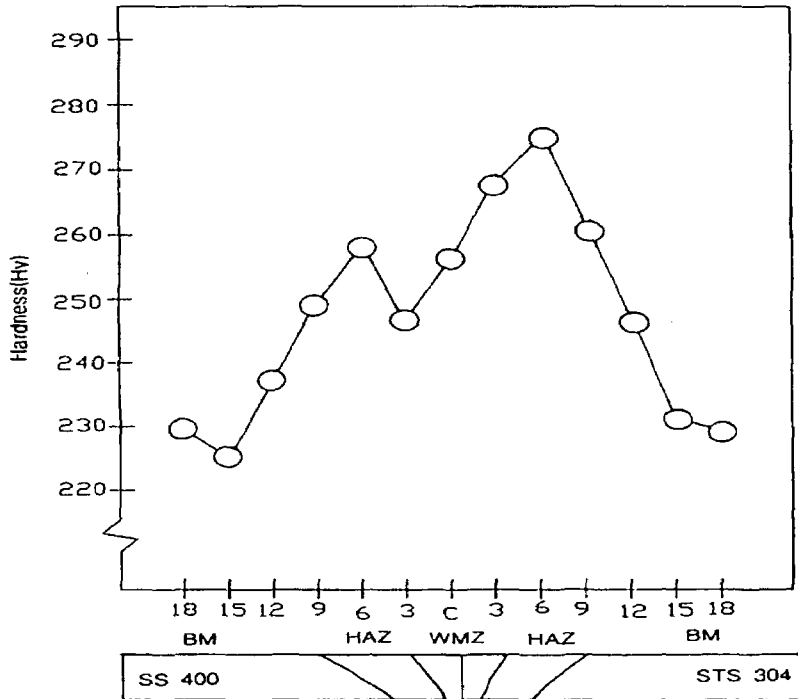
시험 결과보다는 그 차이가 작았다. SS 400의 열영향부는 모재부보다 다소 낮은 인장강도를 보였으나 STS 304의 열영향부에서는 모재와 거의 비슷하였다. 이와같이 SS 400의 열영향부의 강도가 저하된 것은 모재부와 용가재가 용융되면서 발생하는 용착금속의 회석 때문인 것으로 사료된다. SS 400측의 용융부와 미용융부 경계면에 탈탄층이 형성되고 결정이 조대화되어 약화된 것이며, STS 304측의 열영향부의 강도가 증가된 것은 용접열과 후열처리시 열에 의하여 연성과 인성을 저하시키는 취약한 금속간 화합물인 시그마(FeCr)와 경한 탄화크롬(Cr₄C)이 석출된 것에 기인한 것으로 사료된다.

3.2 경도시험

Fig.11은 SS 400과 STS 304와의 용접시험편을 annealing한 시험편의 경도를 측정된 결과를 나타낸 그림이다. SS 400측은 열영향부(HAZ)에서 최고치(Hv 259)를 나타냈으며 본드부에서 최저치(Hv 246)를 보였다. 본드부에서 경도가 최저치가 된 것은 이종금속간의 용접으로 SS 400측의 탄소가, 친화력이 큰 크롬이 다량 함유된 STS 304측으로 이동하여 탄소 함유량이 감소되었기 때문으로 판단된다. STS 304측은 열영향부에서 경도(Hv 274)가 최대이고, 용착금속부에서 다소 감소 되었으며, 모재부는 감소의 경향이 비교적 컸다. 이와같이 열영향부의 경도가 증가한 이유는 용접시 용접열과 후열처리시 열에 의하여 탄화크롬(Cr₄C)이 석출되어 경도가 커진 것으로 사료된다.

3.3 굽힘시험

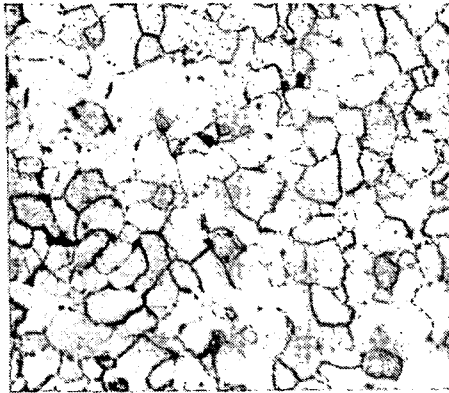
용접부의 연성변화를 규명하기 위하여 굽힘시험을 행한 결과 모든 시험편에서 용착부에는 균열 및 파단의 흔적이 없어서 다른 용접법에 비하여 결함 발생이 적은 양호한 용접법으로 사료된다.



Distance from center of welded metal zone(mm)
 Fig.11 Variation of hardness from welded metal zone to base metal of SS 400 and STS 304

3.4 금속 현미경 조직검사

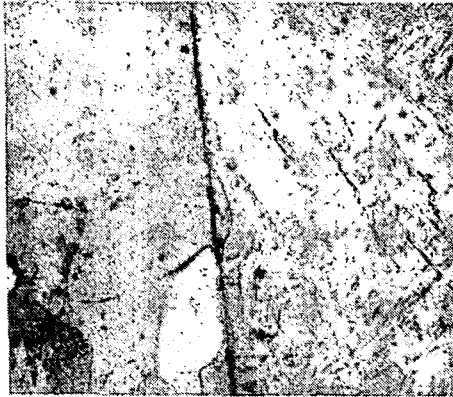
용접열에 의한 용접부의 금속조직을 규명하기 위하여 금속 현미경을 이용하여 용접부의 결정조직을 400배로 확대하여 관찰하고 촬영한 결과는 Fig.12 및 13과 같다. Fig.12에서 알 수 있는 바와 같이 SS 400쪽의 모재부(BM)와 비교하여 열영향부(HAZ)에서 조직이 모재의 조직보다 조대하고, Fig.13에서 STS 304의 모재부와 열영향부의 조직을 비교했을 때, 열영향부 입자의 크기가 모재의 입자크기와 거의 비슷하였다. 용착부의 금속조직은 SS 400, STS 304 및 용가제와의 용융 합금된 수지상 조직으로 형성되어 있음을 알 수 있다. Fig.12의 본드부와 열영향부에서 SS 400부분의 조직이 용접열의 영향으로 조대하여 겹고 페라이트 부분이 많아진 것은 희석현상으로 탄소가 용착금속부축으로 이동된 것으로 생각된다. 분광분석기를 이용한 용접부의 화학성분 조사 결과에서도 SS 400측의 탄소가 용착금속축으로 약 7%정도 이동되었음이 확인되었다. 탄소의 이동은 탄소량이 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 이동되지만 합금의 농도 차이에 의하여도 이동이 일어난다. SS 400과 STS 304의 이종금속 용접시는 주로 크롬의 친화력이 커서 크롬량이 많은 STS 304쪽으로 탄소의 이동이 일어나게 된다. 용착금속부는 austenite 기지로써, 용접 직후 공랭이나 편석에 의하여 δ-ferrite를 함유하는 austenite-ferrite 2상(dual phase)조직으로 되어있다. 이러한 준안전상의 δ-ferrite는 기계적 성질에 영향을 미치게 되어 강도를 향상시킨다.



(a) SS 400 BM



(b) SS 400 HAZ



(c) SS 400 HAZ-WMZ Bond

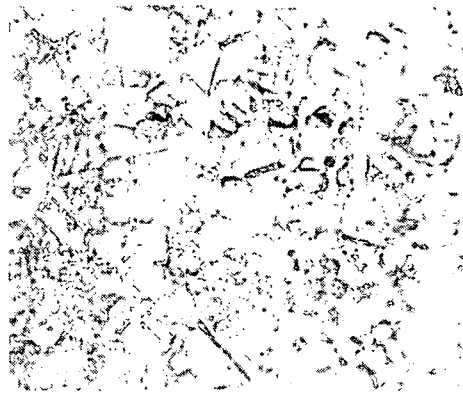


(d) SS400+STS304 WMZ

Fig.12 Microstructure in weld zones of SS 400 (X400)

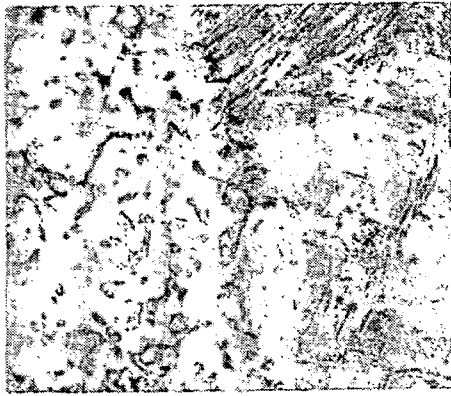


(a) STS 304 BM



(b) STS 304 HAZ

(Fig.13 continued)



(c) STS 304 HAZ-WMZ Bond



(d) SS400+STS304 WMZ

Fig.13 Microstructure in weld zones of SS 304 (X400)

IV. 결 론

본 연구에서는 이종금속(SS 400과 STS 304)을 플라즈마 아크 용접으로 맞대기 이음 용접을 행한 후, 각각의 모재부(BM), 열영향부(HAZ), 용착금속부(WMZ) 등으로 나누어 시험편을 채취해서 인장, 경도 및 굽힘시험을 실시하여, 기계적 특성을 고찰하고 현미경 조직 검사를 통하여 용접부의 금속학적 조직 변화를 고찰하였다. 이종금속에 대한 용접 특성을 비교·검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 노치인장시험에서 인장강도는 SS 400부재의 열영향부(40.7kgf/mm^2)에서 가장 낮게 나타났으며, STS 304부재의 열영향부(58.5kgf/mm^2)는 가장 높았고, 용착부는 중간적인 특성을 보였다.
2. 경도는 STS 304의 열영향부가 가장 높게(Hv 274)나타났고, SS 400의 본드부(Hv 246)까지 감소하였으며, SS 400의 열영향부는 평균경도가 Hv 255였다.
3. 굽힘시험에서는 SS 400의 열영향부가 가장 많이 늘어났으며, STS 304의 열영향부와 용착금속부에서는 변형이 적었다.
4. 용접부의 현미경 조직검사 결과 SS 400의 열영향부는 모재보다 조직이 조대하여졌으며, STS 304의 열영향부는 모재와 거의 비슷한 크기의 조직을 보였고, 용착금속부는 수지상 조직을 나타냈다.

참고문헌

1. H.S. PARK, W.Y. Kim and C.Y. Kang, "Welding and Bonding of Dissimilar Metal, Steel/Nonferrous Metal", Journal of KWS, Vol.14, No6, pp.1~2(1996).
2. S.O. Park, "A Study on Mechanical Properties of Welded SS41 and SUS304", Dankook Univ. M. S. Thesis(1987).
3. D. W. Toun, "A Study on the Dissimilar Welding Characteristic with Respect to the Variation of Ar. gas", Azoo Univ. M. S. Thesis(1991).
4. J. M. Han, "The Influence of Post Weld Heat Treatment on Mechanical Properties of Stainless Steel Weldment", Journal of KWS, Vol.14, no.3, pp.75~84(1996).
5. 한상욱, 금속열처리 조직해석, 골드기술사, pp.30~34(1988).
6. John W. Pridgeon, Metals Handbook, 9th edition, Vol.9, pp.297~302(1985).