

## 서브머지드 아크 용접에 의한 異種金屬 接합부의 機械的 性質에 관한 연구

### A Study on the Mechanical Properties of Submerged Arc-Welded Zone between Different Kinds of Metal

강재원\* 김형종\*\*  
Kang, Jai Won Kim, Hyung Jong

#### ABSTRACT

Some mechanical properties of the submerged arc-welded(SAW) zone between different kinds of metal (SS400+SB450) are investigated and compared with that between same kinds of metal (SS400+SS400 and SB450+SB450). The analysis of the chemical components and observation of the micro-structure by SEM of the weld zone are also carried out. And the effect of the stress relief annealing is examined by comparing tensile strength, elongation, toughness and hardness of SAW specimens before and after the heat treatment.

#### 1. 서론

최근 산업의 급속한 발전으로 각종 金屬 및 合金의 개발과 이를 접합시키는 용접法은 급진적으로 발전하고 있다. 특히, 電氣 및 電子制御 기술을 도입시킨 전자동 및 반자동화의 대표적인 용접法 중 하나로 서브머지드 아크 용접(submerged arc welding; SAW)[1]을 들 수 있다. 이 용접法은 성능이 우수하고 大電流, 高密度의 능률을 확보할 수 있어 造船, 建築, 航空, 原子力 등의 중공업 분야는 물론 각종 구조물 제작에 이르기까지 널리 사용되고 있다.

지금까지 대부분의 구조물 제작에 사용된 재료들은 同種金屬 용접에 국한되었고 異種金屬 용접은 抵抗熔接, 壓接, 摩擦熔接 등에 한정되고 있는 실정이다[2-6]. 機械的 性質 및 化學的 性質을 동시에 충족시키기 위하여 화학플랜트의 경우, 설계사양에 따라 시공하는 데 있어 강도가 크고 값이 비싼 스테인레스강과 破壞靱성이 좋고 값이 싼 炭素鋼과의 異種, 異質재료의 사용은 경제적 측면에서 필연적인 과제라 할 수 있다[7-9].

본 연구에서는 일반구조용 壓延鋼材(SS400)와 보일러 및 壓力 容器用 炭素鋼(SB450)을 사용하여 서브머지드 아크 용접에 의한 多層熔接[10]을 한 후, 熔着 金屬의 化學成分 분석을 실시하고, 보일러 제조에서 필요한 應力除去熱處理(stress relief annealing)를 하기 전과 하고 난 후의 상태에서 異種金屬(SS400+SB450) 용접부와 同種金屬(SS400+SS400 및 SB450+SB450) 용접부의 機械的 性質과 組織을 비교·분석함으로써 용접성에 관한 기초 자료들을 실험적으로 밝혀 보고자 하였다.

#### 2. 실험

##### 2.1 실험 재료

본 연구에서 試驗片을 제작하기 위하여 사용한 용접 母材는 두께 25 mm의 일반구조용 壓延鋼材(KS D 3503: SS400)와 보일러 및 압력용기용 炭素鋼(KS D 3560 3종: SB450)이다. Table 1~5는 母材와 와이어(wire) 및 유제(flux)의 機械的 性質과 化學成分을 나타낸 것이다.

\* 강원대학교 산업대학원 석사과정, 원주직업전문학교 교사

\*\* 강원대학교 기계공학과 부교수

Table 1 Mechanical properties of the base metal

Material	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Yield stress (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
SS 400 (KS D 3503)	46.7	30.3	28
SB 450 (KS D 3560)	52.6	33.5	24

Table 2 Chemical composition of the base metal

Material	Element (%)						
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Fe
SS 400 (KS D 3503)	0.16	0.24	0.73	0.021	0.008	-	Bal.
SB 450 (KS D 3560)	0.24	0.25	0.8	0.017	0.003	-	Bal.

Table 3 Mechanical properties of the solid wire

Material AWS EH-14	Yield stress (kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Remark
solid wire(ø4.0) (조선선재)	48.9	58.4	28	300°C 1시간 건조

Table 4 Chemical composition of the solid wire

Element (%)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Fe
	0.12	0.03	2.00	0.014	0.01	0.18	Bal

Table 5 Chemical composition of the flux

SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +MnO	CaO+MgO	CaF
65.2	29.1	6.7

## 2.2 용접방법 및 조건

母材金屬에 Fig. 1과 같은 X형 홈을 가공하고 多層熔接을 하여 시편을 준비하였다. 모든 試片은 Table 6에 표시한 熔接條件을 동일하게 적용하였다. 母材金屬의 용접은 Fig. 2와 같이 A형(SS400+SS400), B형(SB450+SB450), C형(SS400+SB450) 등 3종류로 구분하였다.

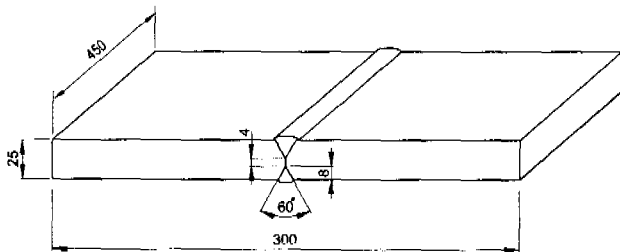


Fig. 1 Double V groove weld with manual backing

Table 6 Welding conditions for the SAW

Element	Bead no.	Wire diameter (mm)	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Remark
Front side	1	4.0	380	32	50	
	2	4.0	400	34	40	
	3	4.0	420	35	35	
	4	4.0	460	38	30	
Rear side	5	4.0	410	35	50	gouging
	6	4.0	430	35	40	
	7	4.0	490	39	34	

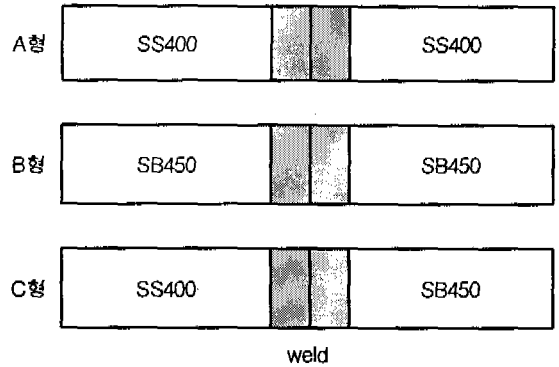


Fig. 2 Sampling of the tensile specimens

## 2.3 실험방법

### (1) 化學成分 檢査

熔接部の 부분별 化學成分 分포를 알아보기 위하여 試驗片을 채취하였다. 檢査위치는 母材(BM), 熔着部(WMZ), 接合部(bond)를 선택하였으며 측정할 면을 평면연삭기로 가공한 후 분광분석기를 이용하여 檢査를 실시하였다.

### (2) 引張試驗

各 시험편에 대하여 熔接線 방향과 직각 방향으로 Fig. 3과 같은 KS B 0833(맞대기 이음 引張試驗) 규격에 따라 시험편을 조건별로 제작하였으며, KS B 5521에 의거한 萬能引張試驗機를 사용하여 引張強度, 降伏強度, 延伸率 등을 측정하였다.

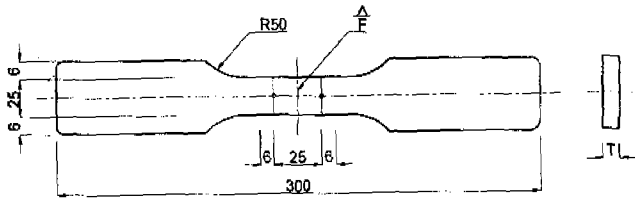


Fig. 3 Dimension of a tensile specimen

(3) 硬度試驗

硬度試驗片은 母材, 熱影響部(HAZ), 熔着部로 구분하여 KS B 0806의 Rockwell 試驗片 규격대로 채취하였으며, KS B 5526 규격의 Rockwell 硬度試驗機(적용경도: 20-100 H<sub>RB</sub>)를 사용하여 熔着金屬의 중심부를 기점으로 하여 熱影響部에서 母材쪽으로 2 mm 간격으로 경도값을 측정하였다.

(4) 衝擊試驗

衝擊値를 비교하기 위하여 母材, 熱影響部, 熔着部로 구분하여 試驗片을 채취하고, KS B 0809 4호(금속 재료 충격시험편)에 의거하여 Fig. 4와 같이 가공하였다. KS B 5522 Charpy형 衝擊試驗機를 사용하여 소수점이하 첫째 자리까지 衝擊値를 측정하였다(KS B 0810 金屬材料 衝擊試驗 方法에 의거).

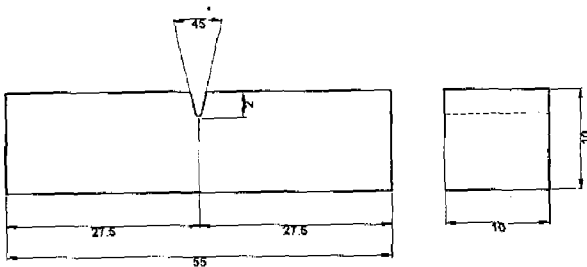


Fig. 4 Dimension of CVN specimen

(5) 組織 觀察

衝擊試驗 후 母材, 熱影響部, 熔着金屬의 파단면 조직을 주사전자현미경(scanning electron microscope; SEM)으로 관찰하였다. 破斷面을 시료 홀더에 고정시킨 후 通電을 위하여 銀粉으로 固着시키고 진공상태에서 안정된 晝面을 유지하여 스캐닝한 후 필름에 印刷하여 着色하였고, X200 배율로 촬영하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 化學成分 分析

熔接 試驗片의 化學成分 分析結果는 Table 7에 나타내었다. 熔接 試驗片에 따라 化學成分 조성은 금속 원소별로 차이가 많았으며 Mn, Si 및 Cu 양은 母材보다 증가하였고 탄소량은 熔着金屬部에서 감소하였다.

Mn과 Cu 양이 증가한 원인은 유제와 와이어에 다량 함유된 Mn(2.0%)과 와이어 표면에 부식 및 通電을 위하여 도금된 Cu가 熔着金屬으로 이행한 것으로 보인다. Si 양이 증가한 것은 유제의 주성분인 SiO<sub>2</sub>의 還元反應에 의한 것으로 생각된다. 또한 증가된 원소는 母材와 희석률이 낮은 熔着金屬 중심부에 집중된 것을 확인하였다.

탄소 함유량이 감소한 것은 와이어의 탄소 함유량이 낮아데다 유제에서 발생된 shield gas의 주성분을 이루는 CO나 CO<sub>2</sub>와 결합하여 감소한 것으로 판단된다[11].

Table 7 Chemical composition of welded specimens (wt.%)

Element (%)	Position	A형	B형	C형	
		SS400 + SS400	SB450 + SB450	SS400	SB450
C	WMZ	0.0937	0.1126	0.1065	
	Bond	0.0823	0.2466	0.1172	0.1369
	BM	0.1532	0.2510	0.1769	0.2681
Si	WMZ	0.6813	0.5920	0.5380	
	Bond	0.2669	0.3455	0.2802	0.2072
	BM	0.1874	0.034	0.1991	0.0205
Mn	WMZ	1.5357	1.5029	1.3820	
	Bond	1.5822	1.4612	1.0723	1.2672
	BM	1.2798	0.7165	0.6806	1.2747
P	WMZ	0.0229	0.0236	0.0234	
	Bond	0.0273	0.0183	0.0171	0.0137
	BM	0.0123	0.0101	0.0148	0.0110
S	WMZ	0.0128	0.0142	0.0124	
	Bond	0.0123	0.0952	0.0075	0.0029
	BM	0.0024	0.0064	0.0034	0.0046
Cu	WMZ	0.0751	0.0804	0.0766	
	Bond	0.0865	0.0652	0.0507	0.0284
	BM	0.0243	0.0305	0.0342	0.2357
Ni	WMZ	0.0532	0.0567	0.0482	
	Bond	0.0242	0.0741	0.0419	0.0372
	BM	0.0345	0.0510	0.0486	0.0348

### 3.2 引張 特性

각 조건별로 실시한 인장시험 결과는 Table 8 및 Fig. 5와 같다. 引張強度 및 降伏強度는 母材와 비교하여 A, B, C형 모두 熔接한 상태에서 증가하였으며, 應力除去 熱處理를 한 것은 모두 감소하였다. 熱處理에 의하여 引張強度 및 降伏強度가 낮아진 것은 熱處理 온도로 가열하는 동안 殘留應力이 감소되고 재질이 軟化되어 나타난 결과로 생각된다.

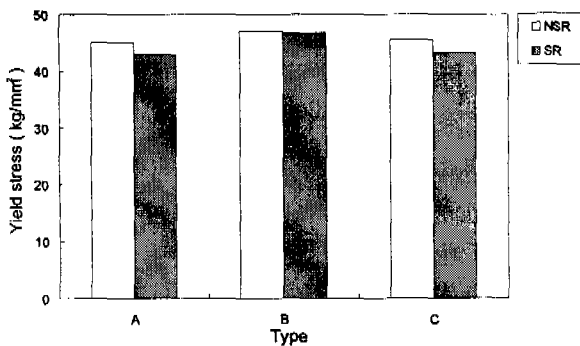
試驗片의 破斷은 모두 강도가 낮은 SS400 방향과 熱影響部 쪽에서 일어났으며, 이는 熔接熱에 의한 熱影響部の 結晶粒이 粗粒化되어 強度와 延性が 감소하여 脆弱한 組織으로 변화된 때문인 것으로 판단된다. 또한, 熔接部에서 破斷이 일어나지 않은 것은 열 집중이 우수하고 와이어와 유체에 함유된 Mn 및 Si의 合金元素가 熔接部에 첨가되어 強靱하고 精鍊된 組織으로 바뀐 결과로 생각된다.

이와 같이 熔接條件, 熱處理, 冷却速度, 合金元素의 희석효과(dilution) 등이 熔接部の 機械的 性質에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

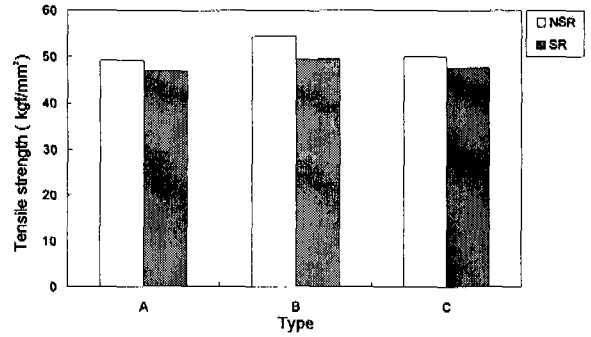
Table 8 Result of the tensile tests

Material		Heat Treatment	Y.S (kgf/mm <sup>2</sup> )	T.S (kgf/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
A형	SS400 + SS400	NSR	45.0	49.1	27.6
		SR	43.0	47.0	29.5
B형	SB450 + SB450	NSR	47.0	54.4	25.8
		SR	46.8	49.5	26.4
C형	SS400 + SB450	NSR	45.5	50.0	26.8
		SR	43.2	47.7	27.0

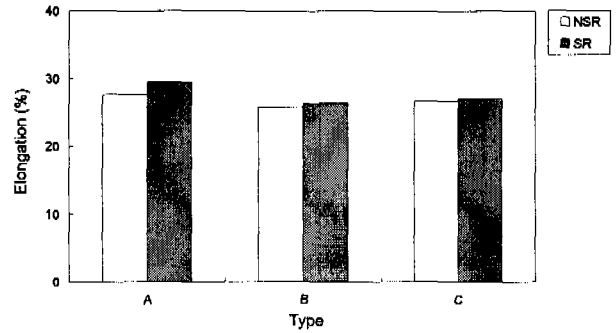
- \* SR : Stress Relief Annealing
- \* NSR : No Stress Relief Annealing



(a) Yield stress



(b) Tensile strength



(c) Elongation

Fig. 5 Change in the mechanical properties by the heat treatment

### 3.3 硬度 特性

熔接部の 硬度分布를 측정된 결과 Table 9 및 Fig. 6과 같이 熔着金屬, 熱影響部, 母材의 순으로 硬度가 높음을 확인하였다.

각 조건별 熔着金屬部の 硬度 값은 탄소 성분이 많은 熔接部の 중심부가 전반적으로 가장 높았으며 熔接部 중앙은 약간 낮았다. 이와 같이 熔着金屬部の 硬度 값이 母材보다 높게 나타난 것은 와이어 및 유체에 함유된 合金元素의 증가와 용융시간이 충분한 정련작용으로 미세화된 結晶組織이 존재하기 때문인 것으로 판단된다.

熱處理 後 狀態의 硬度 分포를 살펴보면 熱處理를 하지 않은 狀態보다 熱處理한 狀態에서 平均 硬度 값이 낮게 나타났다. 이와 같이 應力除去 熱處理 後 熔着金屬 中の 수소제거, 應力除去, 템퍼링 등에 의한 材質의 軟化가 나타난 것으로 생각된다.

Table 9 Result of the hardness test

Material		Treatment	Distance from weld center line and hardness(H <sub>RB</sub> )										
			C	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
A형	SS400 + SS400	NSR	88.0	88.7	89	87.8	85.4	80.2	75.8	77.8	77.0	75.2	74.8
		SR	85.2	85.8	86.2	85.2	83.6	76.8	75.0	76.5	76.8	75.6	75.0
B형	SB450 + SB450	NSR	90.8	91.2	92.2	91.6	90.2	87.6	80.2	78.5	79.0	77.8	75.8
		SR	89.6	90.2	90.6	90	88.2	87	79.1	76.2	78.2	76.8	75.6
C형	SS400 + SB450	NSR	87.0	87.9	89.2	88.2	86.2	81.2	77.2	78.0	77.6	75.8	75.4
		SR	85.7	86.0	86.2	85	81.8	79	77.2	77.6	77.4	75.5	75.2
		NSR	87.0	89.4	89.8	88.8	87.4	83.6	79.2	78.0	78.4	77.4	75.6
		SR	85.7	86.6	87.2	86.8	84.0	82.8	79.1	77.9	78.0	77.2	76.0

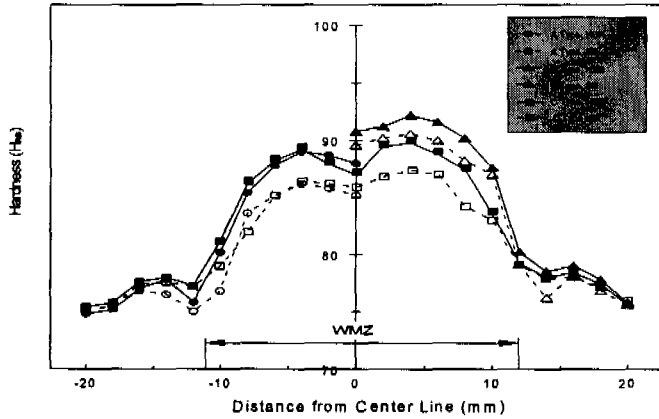


Fig. 6 Hardness distribution of the SAW specimens

### 3.4 衝擊 特性

熔着金屬部, 熱影響部, 母材에 대한 충격 특성은 Table 10 및 Fig. 7과 같다. 응력제거 熱處理를 하지 않은 상태에서 熱影響部の 衝擊値가 가장 낮은 것은 母材에 탄소 함유량이 많고, 자동熔接部에서 느린 冷却速度로 인해 오스테나이트 結晶粒界 및 粒內에 취약한 조직이 析出하여 韌性이 저하된 때문인 것으로 판단된다.

異種材(C형)의 熔着金屬部 衝擊値는 대체적으로 A형과 B형의 중간정도 값으로, 低炭素 熔接 와이어와 中炭素鋼의 회석효과와 A<sub>3</sub> 變態點 이상의 온도로 가열되어 再結晶이 형성되고, 急冷된 組織은 多層熔接 시 노말라이징(normalizing) 되어 結晶粒의 微細化로 衝擊 흡수 에너지가 증가한 것으로 생각된다.

Table 10 CVN Impact values of the SAW specimens

Test material			Impact value (kgf-m/cm <sup>2</sup> )	
			Non-stress relief annealing	Stress relief annealing (625°C, 1hr)
A형	SS400 + SS 400	WMZ	14.1	14.6
		HAZ	12.6	12.8
		BM	18.6	18.7
B형	SB 450 + SB 450	WMZ	11.8	14.6
		HAZ	9.8	12.0
		BM	13.8	13.7
C형	CA	BM	18.8	18.9
		HAZ	10.2	10.6
		WMZ	13.4	14.6
	CB	HAZ	9.2	10.8
		BM	13.6	13.6

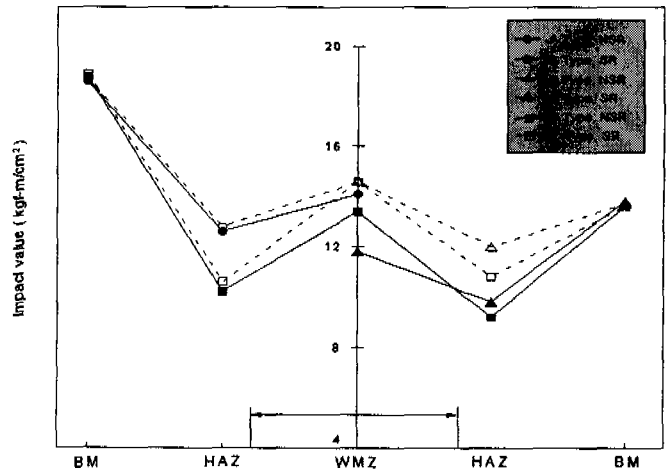


Fig. 7 Distribution of the CVN Impact value

### 3.5 組織 觀察

熔着金屬의 조직은 柱狀晶 영역과 再熱部로 구분되며, 再熱部에서는 再結晶이 일어나고 다시 熱影響을 받아 結晶粒이 粗大化된 組立領域과 再結晶에 의해 微細化된 微細粒 領域으로 나누어진다. 熔接部の 微細組織 分布를 조건에 따라 개략적으로 표시하면 Fig. 8, 9와 같다.

(I) 용착부(WMZ) : 주상정 영역으로 조건(A, B, C형)에 관계없이 입계페라이트(grain boundary ferrite; GBF)와 페라이트 측면판(ferrite side plate; FSP)이 길게 형성되었으며, 입계페라이트 사이에 미세한 침상페라이트(accicular ferrite; AF)가 공통적으로 혼합된 양상을 보이고 있으며 특별한 차이는 보이지 않았다.

(II) 熱影響部(HAZ) : 熱影響部 粗大化 구역과 微細化 구역으로 나누어지며 急熱 急冷에 의하여 粗大化된 페라이트 측면판 조직이 다소 형성되고 있다.

(III) 熱影響部 중의 組立部는 본드와 유사한 組織을 보여주고 있다. 이 영역은 오스테나이트 結晶粒이 粗大化되고 熔接部の 합금 원소량이 적기 때문에 페라이트는 주로 위드만스테텐(widmanstatten) 형성으로 성장하는 경향을 보이고 있다. 따라서 이 영역 내의 微細組織은 입계페라이트 조직과 흑색으로 나타난 퍼얼라이트 등이 혼합되어 복잡한 微細組織을 보여주고 있다.

(IV) 영역 母材부는  $\alpha$ -페라이트+퍼얼라이트 조직을 형성하고 있으며 결정입계와 뚜렷한 層狀組織을 형성하고 있다.

이와 같이 (IV)영역은 熔接熱 영향을 적게 받아 組織의 변화가 거의 없는 母材 고유의 壓延組織을 보여주며 A, B, C형 모두 거의 비슷한 結晶構造를 나타내고 있다.

Fig. 10은 Charpy 충격 시험 후 조건별 破斷面을 확인하기 위하여 熔着部, 熱影響部, 母材를 주사전자현미경으로 관찰하였다.

(I) 충격흡수 에너지 값이 비교적 큰 延性破壞 영역으로 多層熔接에 의한 뜨임 효과를 받아 미세한 딴플(dimple)을 보이고 있다.

(II) SB450의 破斷面은 SS400 보다 延性破壞 영역이 적게 나타났으며, 熱影響部の 結晶입자가 粗大化되

어 나타난 脆性破壞 양상으로 요철이 적고 전반적으로 매끈한 破斷面을 보이며 부분적으로 작은 딴플을 나타내고 있다.

(III) 等軸晶 딴플이 나타나고 있으며 전반적으로 延性破壞 양상으로 衝擊값이 크게 나타난 것을 觀察할 수 있었다.

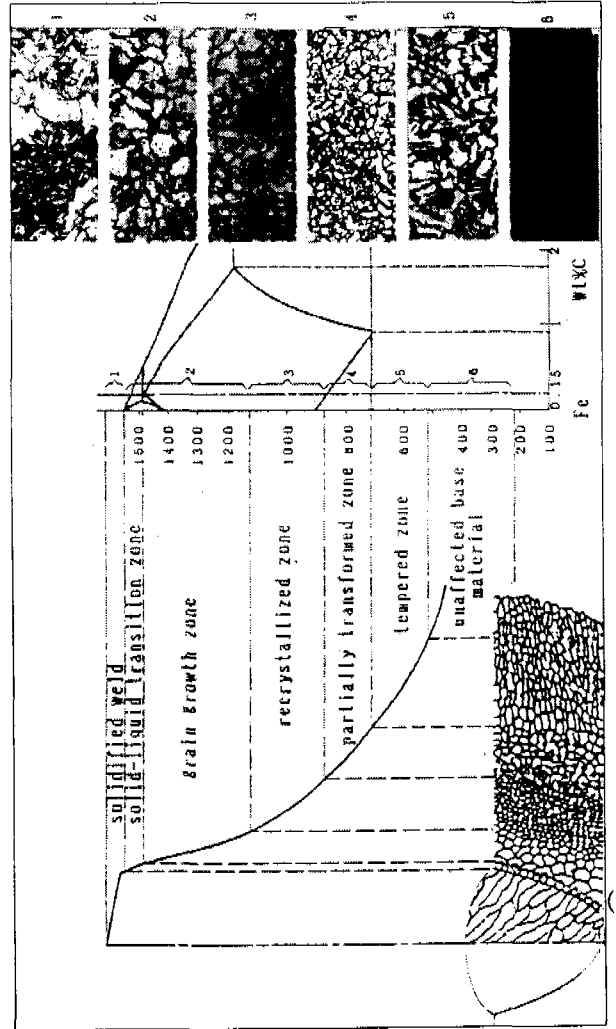


Fig. 8 Micrographs near the weld zone

### 4. 결론

본 研究에서는 서브머지드 아크 熔接(SAW)에 의한 同種金屬 및 異種金屬 熔接部の 化學成分을 분석하고, 응력제거 熱處理를 한 상태와 하지 않은 상태에서 引張試驗, 硬度試驗, 衝擊試驗, 및 組織을 觀察한 결과 다음과 같은 結論을 얻었다.

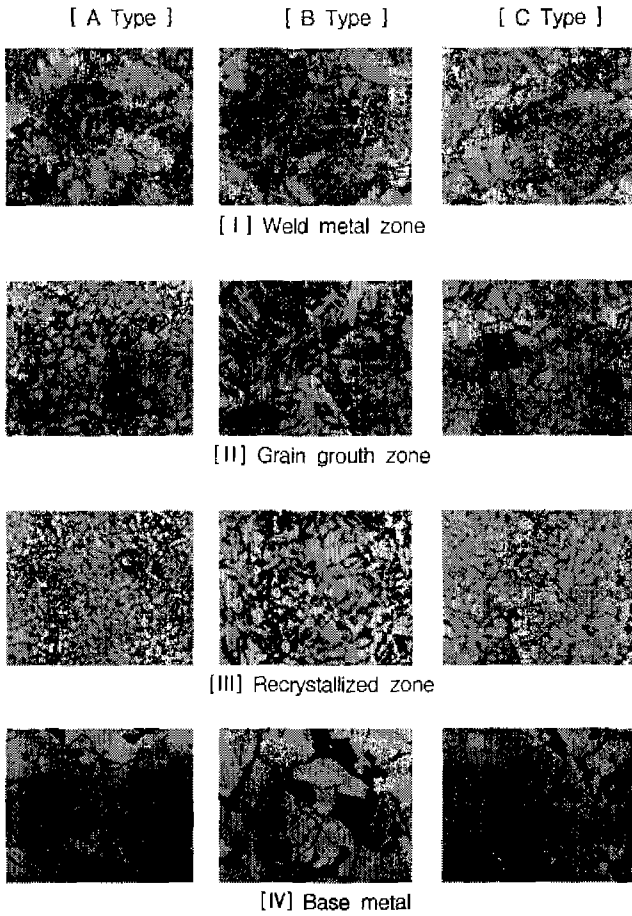


Fig. 9 Microstructure of the welding joint

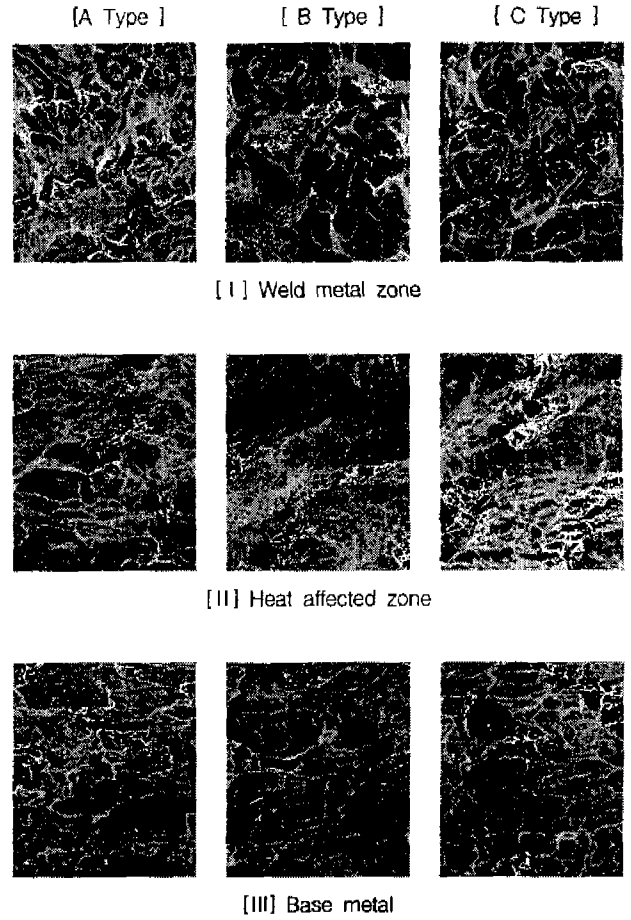


Fig. 10 Fracture surface of Charpy impact specimen (SEM, x200)

- (1) 熔着金屬部 化學成分 造成은 熔接 와이어 및 유제 성분에 의하여 Mn, Si, Cu는 증가하였고, C는 감소하였다.
- (2) 熔接部の 인장강도 및 항복강도는 熔接前 母材보다 증가하였으나, 熔接 후 응력제거 熱處理에 의한 引張強度는 약간 낮아졌으며 延伸率은 큰 변화가 없었다.
- (3) 硬度分布는 熔着金屬 중앙부에서 약간 낮았으나 전반적으로 最大值를 이루고, 熱影響部에서 약간 상승하였으나 母材쪽으로 갈수록 낮아졌으며, 또한 熱處理에 의한 硬度的 변화는 큰 차이가 없었다.
- (4) 衝擊値는 응력제거 熱處理 상태에서 약간 韌性を 回復하였으며 熱影響部에서 가장 낮은 값을 나타내었다.
- (5) 組織 觀察 결과 異種金屬 및 同種金屬의 熔着部

조직은 類似하였으나 熔着金屬部에서 結晶粒子의 크기가 작은 微細組織을 발견할 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] 최선철, 용접해설, 성안당, pp. 201-202, 1990.
- [2] 日本溶接協會誌, "抵抗溶接의 實際", 溶接技術, 産報出版, Vol. 30, 1982.
- [3] AWS Welding Handbook, 9th Edition, Section 15-20, 1985.
- [4] 日本壓接協會, 壓接工學 Hand Book, pp. 95-129, 1980.
- [5] D. F. Adams and S. K. Taylor, "Detection of Faults in Friction Welded Study by Ultrasonics", Welding and Metal Fabrication, pp. 412-421, 1969.

- [6] S. K. Oh, D. J. Kim and L. K. Chung, "Effects of Initial AE Counts During Plastic Deformation in Friction Welding of Dissimilar Steel Tubes on the Weld Quality Control", *Journal of KWS*, Vol. 1, No. 2, 1983.
- [7] G. C. Sih, J. R. Rice, "The Bending of Plates of Dissimilar Materials with Cracks", *Trans. ASME*, E-31-3, pp. 477-482, 1964.
- [8] G. C. Sih and E. P. Chen, "Normal and Shear Impact of Layered Composite with a Crack : Dynamic Stress Intensification", *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, Vol. 47, pp. 351-358, 1980.
- [9] Y. Mukai, A. Nishimura, "Fatigue Crack Propagation Behavior in the Hardness Heterogeneous Field", *Trans. JWS*, Vol. 14, No.1, 1983.
- [10] 姜春植 譯(Kenneth Easterling 原著), *溶接冶金工學*, 半島出版社, pp. 196-200, 1989.
- [11] 鈴木春義, 田村博, *現代溶接技術大系 : 1. 溶接金屬學*, 産報出版株式會社, pp. 105-121, 1980.