

# 가열주형 수평식연속주조법에 의한 Al-Si 합금 용접봉 제조

김원태\* · 김명한\* · 이보영\*\*

## The preparation of Al-Si alloy welding rod by the horizontal continuous casting process with the heating mold

W. T. Kim\*, M. H. Kim\* and B. Y. Lee\*\*

### Abstract

The horizontal continuous casting process with the heating mold was adopted for fabricating defect-free 4043 Al alloy rods of 3.2mm dia. with mirror surfaces. These rods were drawn into 2.4mm dia. rods for GTAW welding. The GTAW welding tests were carried out by use of these welding rods with 6061 Al alloy as a base metal. After welding, the X-ray tests, tensile strength tests, bending tests, and microstructural analysis of welded zone and HAZ were carried out. The results represented that the welding rods with good surfaces and welding properties could be made by the horizontal continuous casting, and followed by the drawing process.

### 1. 서론

Al합금은 내식성, 강도, 연성 및 가공성이 우수하고 또한 가격이 비교적 저렴하여 철강다음으로 널리 사용되는 재료이다. 특히 Al합금은 비중이 작아 에너지 절약을 위한 경량구조물에 적합하여 최근 전세계적으로 자동차, LNG Tank, 고속전철 차체등에 그 수요가 확대일로에 있고 이에따른 Al합금 구조물의 용접에 필요한 Al용접봉의 수요도 점차 증가

되고 있다. 본 연구에서는 이러한 Al합금 용접봉 제조를 위해 수평식 가열주형 연속주조법을 적용하였다. 이 가열주형연속주조법은 냉각주형을 사용하는 기존의 연속주조법과는 달리 주형내벽을 용탕의 용융점 이상이 되도록 유지시켜 주형내벽상에서의 핵생성을 저지<sup>1)</sup>하고 응고가 주형출구 끝단에서 이루어지도록 제어하기 때문에 주괴의 표면이 평활 미려하며 내부의 수축공이나 기공등의 결함이 없는 양질의 일방향응고 주괴를 제조할 수 있는 방법<sup>2)</sup>으로 지금까지는 주로 고급전자재료용 일방향응고 주괴

\* 비회원, 충북대학교 재료공학과, 급속응고신소재연구소

\*\* 정회원, 한국기계연구소 용접기술연구부

제조에 적용 되어왔다. 특히 이방법은 대형압출설비 없이 용탕으로 부터 직접 3-10mm 직경의 소구경 wire 또는 rod를 제조하는데 적합하다. 본 연구에서는 이러한 연속주조법을 이용하여 직경 3.2mm의 4043 Al 합금 rod를 연속주조 한후 이를 소정크기의 GTAW 용접봉으로 인발가공 하였고 이에 따른 연속주조주괴 또는 용접봉의 조직, 표면조도, 진원도 및 용접특성을 조사 연구 하였다.

## 2. 용접봉제조 및 용접성 실험방법

### 2.1. 용접봉제조

본 연구에서는 가열주형수평식 연속주조장치를 이용하여 3.2mm의 경면주괴를 제조하였고, 이장치는 그림 1에 나타내었다. 이장치는 가열주형장치, 용탕유지로, 용탕조절 level 장치, 냉각장치 및 인출장치로 구성되어 있고, 용해시에는 10<sup>-4</sup>Torr의 진공도를 유지할 수 있도록 되어 있다. 용탕유지로는 흑연도가니, 흑연발열체와 복사열 방지벽으로 구성되어 있으며, 용탕온도와 가열주형의 온도제어에는 K-type 열전대와 P.I.D 조절기(Proportional band Integral time Derivative time setting system)가 이용되었다. 용해도가니는 고순도 흑연을 사용하였으며, Al을 기준으로, 내용적은 2kg이고 실제작업에 있어서는 1회 장입량이 1,400g이 되도록 제작되었다. 주괴의 인출장치는 DC모터에 의해 구동되는 세쌍의 pinch roll로 구성되어 있으며, 스테인레스강 봉에 의해 수평으로 인출할 수 있게 되어 있다. 냉각장치는

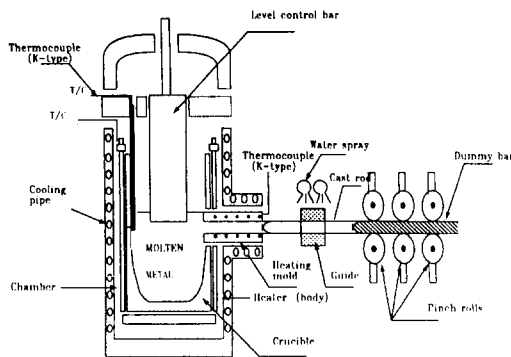


Fig. 1 Schematic diagram of the horizontal continuous casting apparatus

냉각수로 채워진 용기내로 주괴가 통과함으로써 냉각효과를 극대화 시키도록 했으며, 가이드역할을 겸하도록 제작하였다. 이러한 가열주형수평식 연속주조장치를 이용하여 표 1과 같은 화학적조성의 4043 Al ingot를 10<sup>-4</sup>Torr의 진공중에서 700<sup>o</sup>C의 온도에서 용해한후, 1기압하의 아르곤 분위기 하에서 주형온도 680<sup>o</sup>C, 냉각수량 0.2 l/min, 냉각거리 10mm의 조건 하에서 200mm/min의 인출속도로 주조를 행하였다.

Table 1. Chemical analysis of Al alloy

Element	Si	Fe	Cu	Ti	Mg	Zn	Al
wt%	4.782	0.196	0.006	0.009	0.006	0.008	remainder

연속주조에 의해 얻어진 경면의 3.2mmφ 4043 Al rod는 열처리없이 GTAW 2.4, 2.0 및 1.2mmφ 선재로 8두 연속선선기를 이용하여 인발 되었고 인발시 선속은 3.2mmφ rod로부터 1.2mmφ 선재로의 가공시 모두 등속으로 하였고, 이때 윤활제로는 석유계유기 용제를 사용하였다. 또한 원괴와 인발가공된 선재의 표면조도, 진원도, 미세조직 및 인장강도가 조사 되었다.

### 2.2 용접시험

본 연구에 사용된 용접모재는 KS D 7028에 준하여 Al alloy 6061 T6로서 125×380mm의 크기로 질삭한 후 역변형을 주고, 교류전류를 이용하여 다층 맞대기 이음용접을 실시 하였다. 용접을 시작할때 모재의 온도는 40<sup>o</sup>C이하로 했으며, 후열처리 및 피닝은 없었다. 용접은 아래보기 자세로 했으며, 받침쇠를 사용하지 않았기 때문에 뒷면을 가우징한후 뒷면용접을 실시 하였다. Shield gas로는 Ar을 사용하였고 수평식연속주조후 인발한 2.4φ 4043 Al alloy 용접봉을 이용하여 GTAW용접을 실시 하였다. 시험편의 홈(Groove)형상과 적층순서는 그림 2와 같고, 용접조건은 표 2에 나타내었다.

표 2에 나타낸 용접조건에서 용접을 실시한 후, X-ray 투과 시험을 하였고 X-ray 투과시험 조건은 표 3에 나타내었다. X-ray 시험후 시편을 기계질삭 하여

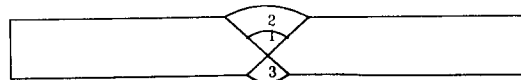
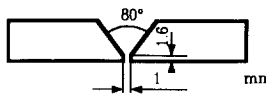


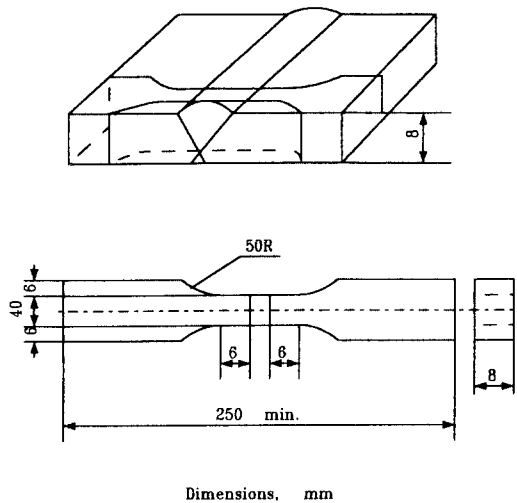
Fig. 2 80° single-v-groove

**Table 2.** Welding condition

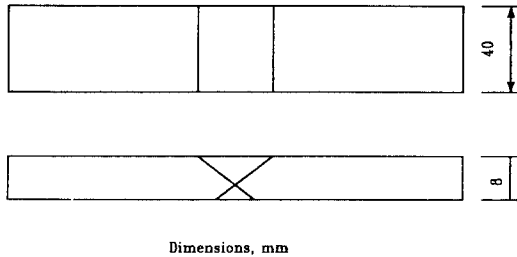
Welding materials	6061-T6 plate(8mm)+4043 Al alloy weld rod(2.4φ)
Welding equipment	Cyber TIG Welding Machine of Lincoln Co.
Shield gas	Argon
Amount of gas	6ℓ/min
Current	210 Amp
Voltage	14 Volt
Joint Preparation	

**Table 3.** The condition for X-ray test

Current	Voltage	Exposure time
125kv	3mA	1 min



**Fig. 3** Tension test specimen of weldment



**Fig. 4** Face and root bend specimens

인장시험과 굽힘시험을 실시 하였다. 인장시험은 KS B 0802 에 준하여 굽힘시험편은 KS B 0835에 준하여 제작하였으며, 각 시험편의 치수는 그림 3과 4에 나타내었다. 인장시험과 굽힘시험후 각각의 시험편의 파단면을 EDX 및 SEM 으로 분석하였다.

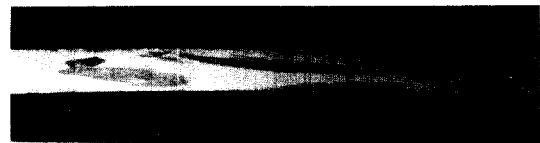
### 3. 시험결과 및 분석

#### 3.1. 용접선재의 제조 결과

사진 1은 수평식연속주조에의해 제조된 3.2mm의 경면 Al주괴와 이 주괴를 열처리 없이 가공하여 제조된 2.4mm φ GTAW용 용접봉을 보여주고 있다. 3.2 mmφ의 Al alloy주괴는 사진 2에 나타난 바와 같이 내부결함 및 개재물이 없고, 완전한 일방향성임을 보여주고 있고 내부결함과 개재물은 존재하지 않았다.



**Photo. 1** The 3.2mm dia. ingot with mirror surface (a) and the 2.4mm dia. welding rod drawn from the ingot (b)



**Photo. 2** Macrostructure of 3.2mm dia. Al alloy ingot (×2.8)

연속주조된 3.2mmφ 원주괴와 이를 인발가공하여 얻은 2.4mmφ의 용접봉에 대해 표면조도 및 진원도 조사를 했다. 표면조도는 표면거칠기 정도를 나타내는 Ra를 표면조도기를 이용하여 시험편에서 임의의 5.0 mm구간을 7회 측정하여 평균을 내었다. 여기서 연속주조의 경우 평균 Ra는 0.16μm, 인발재의 경우 0.12

μm로 연주재 및 인발재 모두 우수한 표면조도를 갖고 있었다. 또한 측정범위를 5-30mm사이에서 변화시켜 연주재의 표면조도를 측정한결과 표면조도 Ra가 0.16 μm 이었고, 이결과로서 측정방법에 따라 표면조도는 큰 차이가 없음을 알 수가 있었다. 이러한 연주재 및 인발재의 표면거칠기는 VTR 의 head drum의 표면 거칠기에 해당되는 값들이며, 이로서 가열주형연속 주조에 의해서 주조된 주괴는 우수한 경면을 띄고 있는것을 알 수 있다. 진원도의 측정은 Hobson Taylor사의 진원도 측정기기를 이용해 측정했다. 진원도는 임의의 부위를 선택하여 3회 측정하여 평균낸 결과 연속주조주괴는(3.2mmμ) 진원도가 0.077mm 이었고, 이를 인발가공하여 얻은 용접봉(2.4mmφ)은 진원도가 0.004mm 이었다. KS D 7028의 용접봉 규

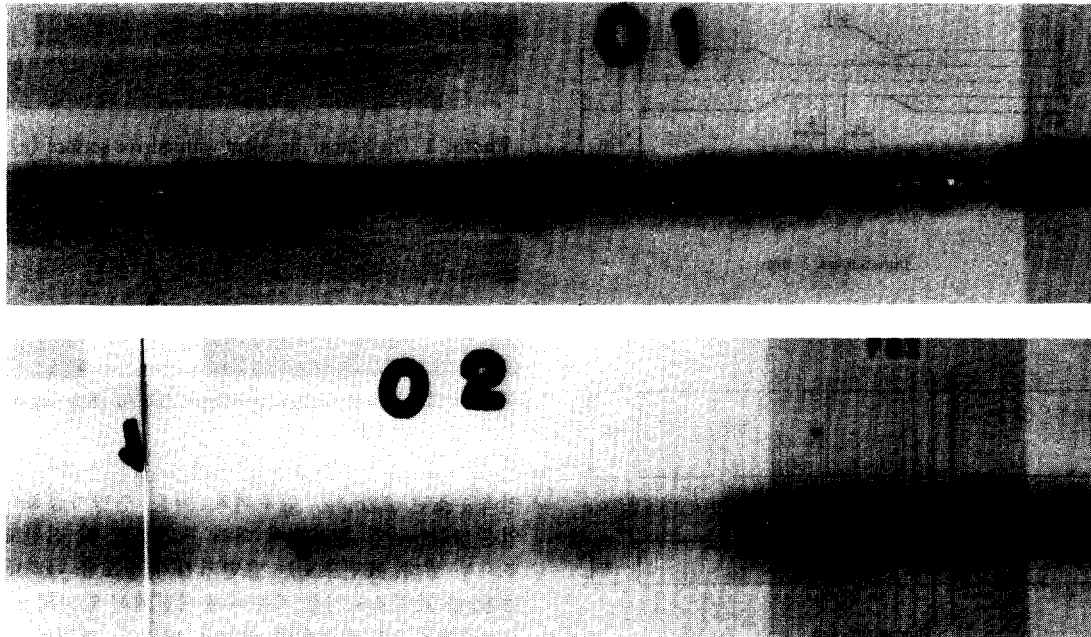
격에 의하면 용접봉은 진원에서 ± 0.06mm의 범위를 벗어나지 않아야 하는데, 본 연속주괴 및 이를 가공하여 제조한 용접봉은 모두 이러한 규격범위내에 있었고 거의 진원에 가까움을 알 수가 있었다. 한편 표 4는 연속주조된 원주괴와 이를 인발가공하여 얻은 선재의 인장시험 결과이다.

### 3.2 용접부 비파괴시험 결과

아래보기용접을 실시한후 용접비드를 외관으로 관찰한 결과 용접비드 주위에 극소량의 spatter가 발견된 이외에는 외관상 언더컷, 파이프, 오버랩 및 균열과 같은 용접결함은 없었다. 사진 3은 01시편 및 02시편에 대해 용접후 X-ray투과 시험을 한결과를 인화한 사진으로 (01)시편의 경우 용접부 중앙부위를 따라 하얀점이 나타나고 있으며 이것을 EDX로 확인한 결과 이는 Al oxide임이 확인할 수 있었다. (01) 및 (02) 시편에 까만점은 용융된 텅스텐전극봉이 혼입된 개재물을 확인할 수 있었다. 이들 외의 특별한 결함은 발견되지 않았다.

**Table 4.** The tensile test results of the casted rod and drawn wires

Diameter of rod (mm)	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )
3.2	24.1
2.4	28.3
2.0	28.1
1.2	37.7



**Photo. 3** X-ray test results of weldments

### 3.3 용접부의 형상 및 조직

용접부의 형상을 알기위해 시편의 단면을 취하였으며 연마와 Kellers reagent로 부식을 한후 접사촬영하였고 사진 4와 같다.

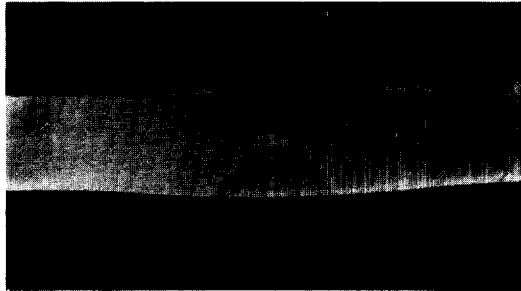


Photo 4 Weld pool shape of butt joint (×1.5)

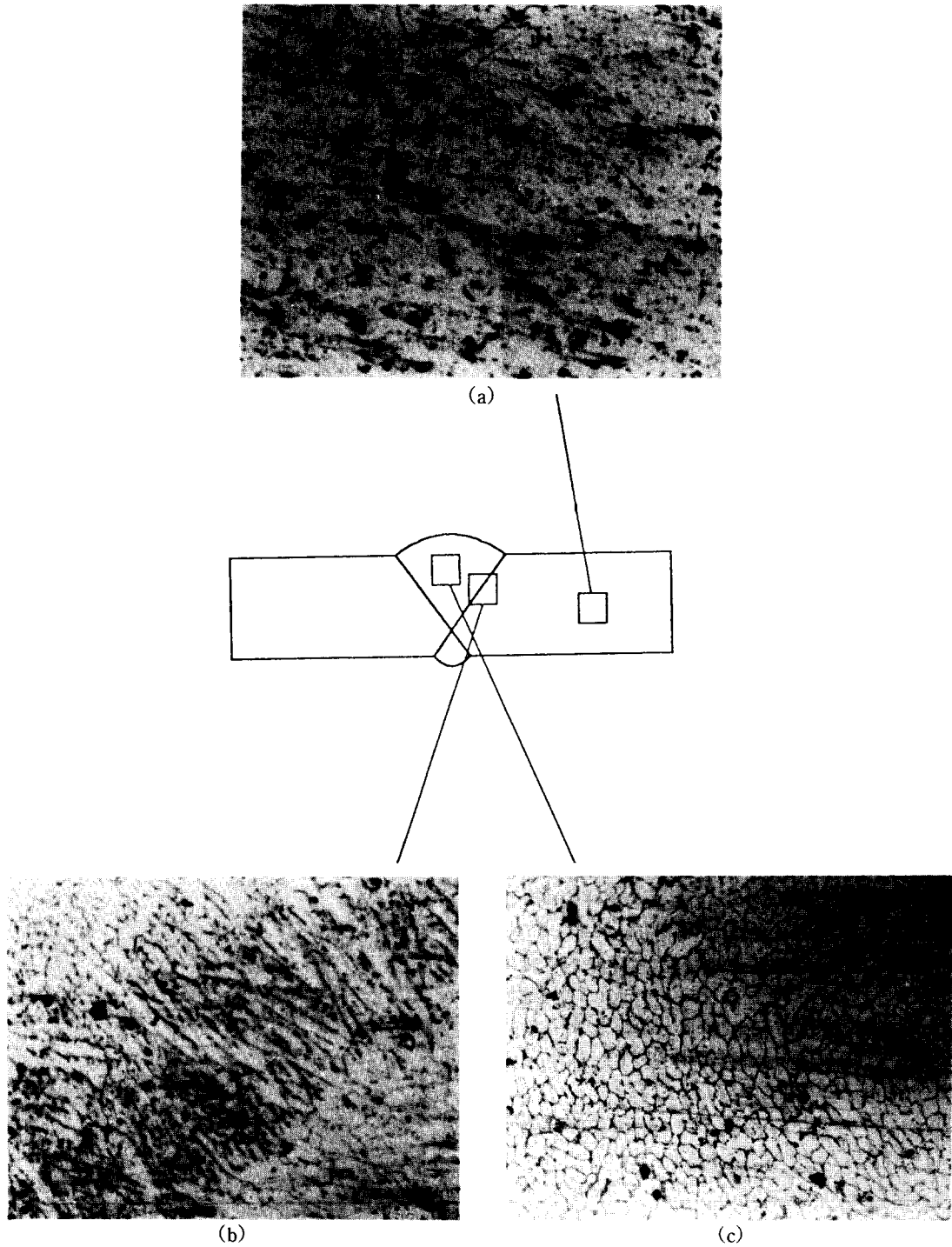
여기서 모재 두께는 8mm이고, 각도가 80°인 single-v-groove butt joint의 홈의 용접부에서는 루트면 중앙부위가 모두 용융된 것을 볼수가 있다. 사진 5의 (a)는 용접에 사용한 두께 8mm의 6061-T6의 단면 사진을 나타낸 것 이다. 여기서 검은점은 EDX로 확인한결과 Mg<sub>2</sub>Si 이며, 알루미늄 고용체의 결정은 이 Mg<sub>2</sub>Si를 함유하고 있는 것을 볼 수 있다<sup>3)</sup>. 사진 5의 (b)는 용접열영향부로서 용착금속 일부와 용융선 및 열영향을 받은 모재의 조직 모습을 보여주고 있다. 용접비드에 알루미늄-실리콘공정의 내부덴드라이트 망상조직(interdendritic network)으로 존재함을 알 수 있고 열영향부(HAZ)에 Al-Mg<sub>2</sub>Si공정이 검은띠로 나타나 있다. 사진 5의 (c)는 용접 bead 중앙에 Al-Si공정이 망상조직으로 존재한다. 이상의 사진에서 기공등의 특별한 결함등은 나타나지 않았으며, 6061-T6 판재를 4043 Al alloy weld rod로 용접시 일반적으로 나타나는 microstructure와 거의 같은 양상임을 알 수 있었다<sup>4)</sup>.

### 3.4 용접부의 인장강도 및 굽힘시험

표 7은 용접부의 인장시험결과 이다. 인장시편은 용접부, 열영향부, 모재가 각각 화학성분 및 조직이 다를 수 있고, 이에따라 강도와 변형도 각각 다르게 된다. 그러므로 인장시험시 파단은 강도가 가장 약한곳에 일어나게 되고 이 강도는 용접부의 인장강도가 된다. 6061-T6 Al plate의 경우 33kgf/mm<sup>2</sup>의 인장강도를 갖지만 annealing한경우 인장값은 17 kgf/mm<sup>2</sup>이므로<sup>4)</sup>, 모재의 열영향부에서의 인장값은 규정값을 만족하는것을 알 수 있다. 사진 6는 시험편 A1 및 B2의 인장시험시 파단 부분을 보여주고 있고, 여기서 파단은 모두 모재부에서 일어난 것을 확인할 수가 있었다. 사진 7은 파단이 모재에서 발생하여 정상적인 인장값을 보여주고 있는 B2 시편의 파단면을 SEM 및 EDX로 분석한 결과이다. 파단시 재료의 소성변형에 따라서 재료내의 석출물, 개재물의 미립자가 핵으로서 미소공동(microvoid)이 많이 형성, 합체하여 파괴되면서 파단면은 전형적인 dimple 형상을 보여주고 있으며, 또한 파단면에서는 W 입자, 기공등이 발견되지 않았으며 EDX 분석결과로도 합금성분인 Al, Si, 및 Mg 이외는 다른 이물질 성분의 개재물이 없는 것을 확인 할 수 있었다. 사진 8은 굽힘시험결과를 나타내주는 것으로 표면 및 이면굽힘 시험 모두에서 굽힘시 균열이 전혀 발생 하지 않았다

Table 7. The tension test results

Test temp.	Tensile value(kgf/mm <sup>2</sup> )			Fracture Position
	Specification	Sample No.	Test result	
Room temp.	17.0	A1	16.9	Base metal
		B2	17.2	Base metal



**Photo. 5** Microstructure of base metal (a), HAZ (b), and weld metal (c). ( $\times 100$ )

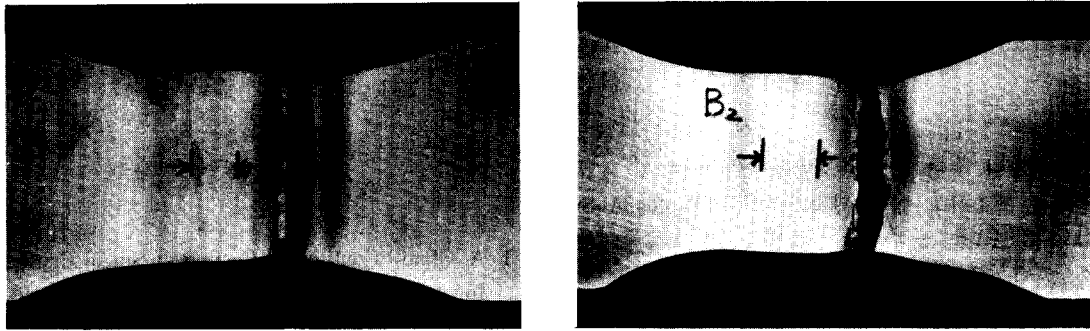


Photo. 6 The fractured tension test specimens A1 and B2 which were fractured on the base metal

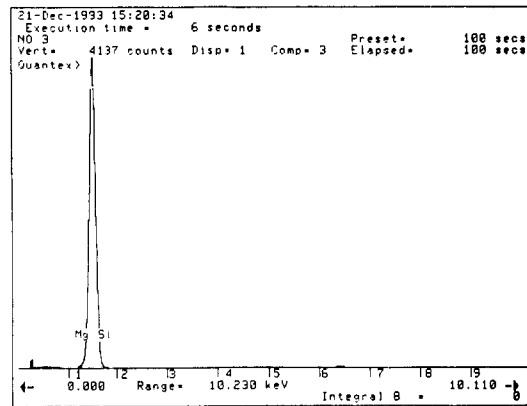
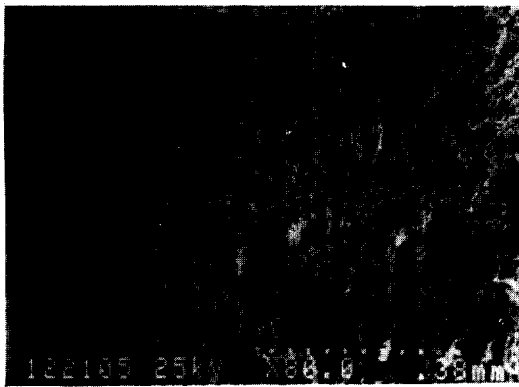
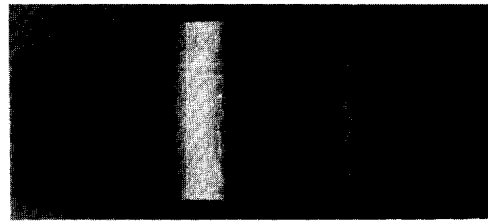
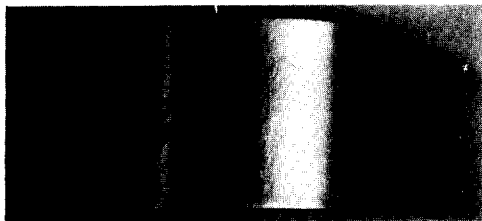
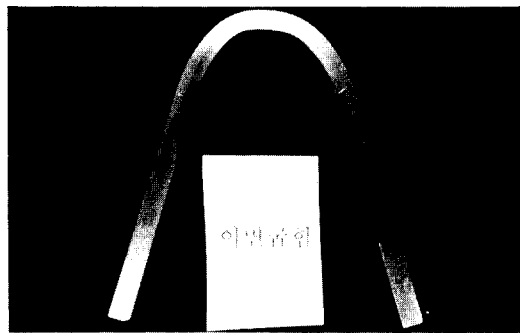
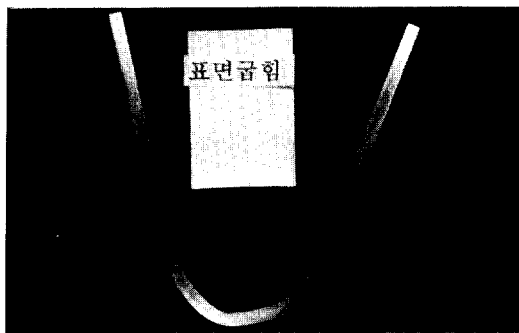


Photo. 7 SEM(a) and EDX(b) analysis of the fractured surface of the tension test specimen



(a)

(b)

Photo 8 The bend test results of the specimen B1(surface bending)(a) and B2 (root bending)(b)

#### 4. 결 론

가열주형 수평식연속주조법을 이용하여 Al 합금 주괴를 제조하고 이어 인발가공에 의해 4043Al-Si 합금 GTAW용 용접봉을 제조하고, 그 용접특성을 조사, 연구한 결과는 다음과 같이 종합 정리될 수 있다.

1. 가열주형 연속주조법에 의해 내부 및 표면불량이 없는 3.2mm 직경의 4043 Al합금 소구경 주괴의 제조가 가능하였다.

2. 가열주형 연속주조법에 의해 제조된 3.2mm 직경의 Al 합금주괴를 인발가공하여 얻은 2.4mm 직경의 GTAW용 용접봉은 평균표면거칠기(Ra)가 0.12  $\mu\text{m}$ 로 매우 우수한 표면을 갖고 있었으며, 진원도 역시 용접봉 규격범위( $\pm 0.06\text{mm}$ ) 보다 훨씬아래에 있는 0.004mm 이었다.

3. 제조된 2.4mm 4043 Al 합금용접봉을 이용하여 GTAW용접시험을 행하였고, 용접부의 형상 및 조직

은 4043 Al 용접시 나타나는 양상과 같았으며, X-ray test, 미세조직, 인장 및 굽힘시험결과 모두 양호한 결과를 보였다.

#### 참 고 문 헌

1. A. Ohno : Continuous Casting of Single Crystal Ingots by the O.C.C process, J. of Metals, January (1986), P. 14
2. 大野篤美 : Structures and Workabilty of Unidirectional Solidified Sn-Zn Alloy Ingots obtained by a New Continuous Casting Process, 日本金屬學會會報, Vol. 51, No. 10, (1984), P. 73
3. American Society for Metals : Metals Handbook, 9th ed., v. 9, (1985), P. 382
4. 輕金屬學會 : アルミニウムの組織と性質, (1991), PP. 278-295
5. American Society for Metals : Metals Handbook, 9th ed., v. 2, (1979), P. 116