

# 플라즈마 절단 후 제작된 용접부의 기계적 특성

신규인\*, 김형곤\*\*, 박재학\*\*\*, 김성청\*\*\*\*

## Mechanical Properties of Welded Materials after Plasma Cutting

Kyu In Shin\*, Hyung Gon Kim\*\*, Jai Hak Park\*\*\* and Sung Chung Kim\*\*\*\*

### ABSTRACT

The influence of surface preparation methods after plasma cutting on the quality of weld zone was investigated. For comparison, three types of welded specimens were prepared by machining(WM), plasma cutting with light regrinding(WPG) and without regrinding(WP), by using three kinds of materials, carbon steel(SM45C), stainless steel (STS304) and aluminum alloy (A6061-T6). Nondestructive examination, hardness test, microstructure examination, and fracture toughness test were performed. The results showed that there was no appreciable reduction in hardness or fracture toughness in WP specimens. But a little difference in heat affected zone size was observed.

**Key Words** : Plasma cutting(플라즈마 절단), Weld zone(용접부), Microhardness(미세경도), Fracture toughness(파괴인성)

### 1. 서론

절단 공정은 용접구조물의 제조에 있어서 기본 공정이다. 그러나 일반적으로 열에 의한 절단 공정은 화학 반응이나 용융 등의 반응으로 기계 절단 가공과는 다르다. 특히 플라즈마 절단 후 용접 공정이 이루어지는 곳에서는 많은 경우에 플라즈마 절단 표면이 기계 절단 표면 보다 더 조악한 것으로 알려져 있다. 따라서 플라즈마 절단 후에는 기계 가공이나 연삭 가공으로 표면 작업을 한 후에 용접을 하는 것이 필요하다. 그러나 용접시 재료 표면에 필요한 질적인 요소가 플라즈마 절단만으로도 충분하다면, 기

계가공이나 연삭 표면 작업을 생략 할 수 있을 것이다. 따라서 본 논문에서는 서로 다른 절단작업이 용접부의 기계적 성질에 미치는 영향을 살펴보려 한다.

먼저 이에 관한 문헌들을 살펴보면<sup>[1]</sup>, 여러 가지 종류의 알루미늄 합금에 대하여 플라즈마 절단을 행한 후 바로 용접을 행한 경우와 기계절단 후 용접을 행한 경우를 서로 비교한 결과, 플라즈마 절단 후 용접을 행한 경우가 비드 형태에 있어서 좋지 않았고, 기공(blow hole)도 많이 남겨 X선 탐상에서 1급 판정을 받기가 어렵다고 한다<sup>[1]</sup>. 또한 플라즈마 절단 후 용접한 경우가 전반적으로 기계가공 후 용접을 한

\* 충북대학교 안전공학과 대학원  
\*\* 충북대학교 정밀기계공학과 대학원  
\*\*\* 충북대학교 안전공학과  
\*\*\*\* 충북대학교 정밀기계공학과

경우보다 질이 떨어지나 인장시험과 굽힘시험에서의 강도에 관한 JIS의 기준은 만족한다고 하고 있다<sup>1)</sup>.

Mutnansky<sup>12)</sup> 등은 몇 가지 종류의 강에 대하여 기계가공을 한 후 용접을 한 경우(M조건), 플라즈마 절단 후 가벼운 연삭 가공 후 용접을 한 경우(PG조건) 및 플라즈마 절단 후 용접을 한 경우(P조건)에 대해 기계적 성질들을 비교하여 P조건에서도 용접부의 강도저하나 충격치의 심한 저하는 나타나지 않는다고 한다. 또한 열영향부 및 용접부의 금속조직 및 특성에 관한 연구<sup>13~16)</sup>들이 있다.

이에 본 연구에서는 두께 25mm의 탄소강(SM45C), 스테인리스강(STS304) 및 알루미늄 합금(A6061-T6)의 세 재료로부터 기계로 절단한 후에 용접한 조건(WM), 플라즈마로 절단한 후에 절단 표면의 연삭 작업 후 용접한 조건(WPG) 그리고 플라즈마 절단 후에 가공 없이 직접 용접을 행한 조건(WP)의 세 가지로 나누어 용접을 한 후에 용접부의 비파괴검사( $\gamma$ 선 검사)와 경도측정, 미세조직 관찰 그리고 파괴인성 시험 등을 실시하여 용접부의 기계적 특성을 살펴보았다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 사용 재료 및 플라즈마 절단, 용접 조건

본 실험에 사용된 재료는 두께 25mm(25T)의 탄소강(SM45C), 스테인리스강(STS304) 그리고 알루

미늄 합금(A6061-T6)의 세 재료로, 화학 성분은 Table 1에 나타내었다. 세 재료로부터 용접부의 기계적 특성을 알아보기 위하여 다음과 같이 세 조건으로 나누어 용접을 하였다.

첫 번째 조건은 WM 조건으로 기계로 절단한 후에 용접을 하여 일반 용접 상태로 가정하였다. 두 번째 조건은 WPG 조건으로 플라즈마로 절단한 후에 절단 표면으로부터 두께 방향의 2~3mm 깊이로 연삭 표면 작업을 한 후에 용접을 실시하였다. 세 번째 조건은 WP 조건으로 용접시 표면에 필요한 질적인 요소가 플라즈마 절단만으로도 충분한지 살펴보기 위하여, 플라즈마로 절단한 후에 표면 작업을 하지 않고 절단면에 직접 용접을 실시하였다.

본 실험에 사용된 플라즈마 절단기(plasma cutting machine)는 최대 용량이 380A, 450V인 절단기로 일반 공장에서 상용화되어 사용되는 기기이다. 세 재료의 플라즈마 절단시 절단 조건은 노즐과 팁과의 거리는 10mm로, 절단 전류(cutting current)는 250A로 일정하게 주었다. 혼합 가스는 아르곤(Ar) 가스 30ℓ/min, 수소(H<sub>2</sub>) 20ℓ/min, 질소(N<sub>2</sub>) 5ℓ/min으로 하였다. 이때 절단 속도는 탄소강은 400mm/min, 스테인리스강과 알루미늄 합금은 600mm/min으로 주어 절단하였고, 세 조건 모두 한 면은 판에 수직으로, 다른 한 면은 45° 경사지게 절단하였다.

기계 가공과 플라즈마에 의해 절단된 세 재료로부터의 용접 방식을 살펴보면 탄소강의 경우 MIG(metal inert gas) 용접 방식으로, 스테인리스강

Table 1 Chemical composition of the used materials (wt%)

Materials	Thickness mm	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mg	Zn	Ti	Fe
SM45C	25	0.45	0.24	0.72	0.18	0.04	0.01	-	0.03	-	-	-	-
STS304	25	0.37	0.53	1.07	0.22	0.02	18.05	8.10	-	-	-	-	-
A6061-T6	25	-	0.58	0.47	-	-	0.23	0.003	0.24	1.00	0.007	0.017	0.50

Table 2 Welding conditions for each material

Materials	Thickness ( mm )	Welding Method	Filler Material	Current ( A )	Voltage ( V )	Shield Gas
SM45C	25	MIG	S50C	280	380	CO <sub>2</sub>
STS304	25	TIG	308	350	380	Ar
A6061-T6	25	MAG	5356	350	380	Ar

은 TIG(tungsten inert gas) 용접 방식으로, 그리고 알루미늄 합금은 MAG(metal active gas) 용접 방식으로 용접을 실시하였다. 그 외 세 재료로부터의 각각의 용접 방식에 대한 용접 조건은 Table 2에 나타내었다.

탄소강과 스테인리스강의 경우 플라즈마에 의해 절단된 재료의 하단부에 생성된 드로스(dross)를 연삭 표면 가공으로 제거 한 후에 한 면은 판에 직각으로 다른 한 면은 45° 방향의 경사면으로 용접을 하여 파괴인성 시험시 균열 성장이 직각인 면에서 성장하도록 하였다.

알루미늄 합금의 경우 양면 용접으로 실시하였고 다른 두 재료와는 달리 플라즈마에 의한 절단 후, 재료의 하단부에 생성된 드로스를 제거하지 않고 바로 용접을 실시하였다. 또한 파괴인성 시험을 위하여 재료 두께의 중간부에 위치한 모재와 용접부 사이의 경계면에 노치 가공을 하였다.

노치 가공을 하여 균열 성장이 모재와 용접부의 경계면을 따라 성장하도록 하였다.

용접부 C(T) 시편의 형상 및 크기는 Fig. 1(a)에 나타내었다.

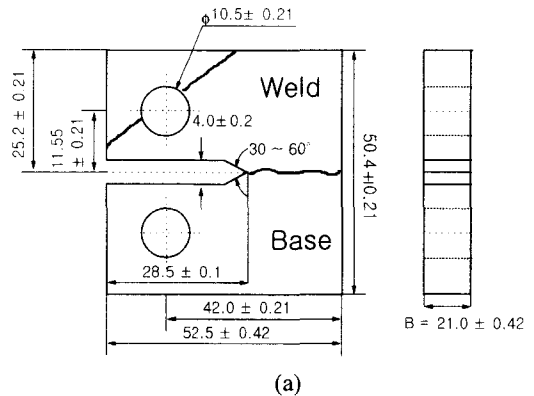


Fig. 1 Schematic diagrams of welded specimens (a) C(T) and (b) tensile specimens

## 2.2 용접부의 비파괴검사, 경도 측정 및 미세 조직 관찰

세 재료로부터 WM 조건, WPG 조건 그리고 WP 조건으로 용접을 한 후에 용접 상태를 평가하기 위하여 KS-B-0845 규격에 준하여 비파괴 검사(γ선-검사)를 실시하였고, 각각의 용접 조건에 대해서 용접부와 열영향부(HAZ) 그리고 모재의 경도를 알아보기 위하여 미세경도기를 이용하여 경도를 측정하였다. 이때 하중(load force)은 500 gf로, 지속 시간은 10 sec로 하였다. 또한 모재, 열영향부 그리고 용접부 조직의 상태를 알아보기 위하여 금속 광학 현미경을 이용하여 모재와 용접부의 미세 조직을 관찰하였다.

## 2.3 파괴인성 시험

용접부 균열의 안전성을 평가하기 위하여 파괴인성 시험(KIC)을 실시하였다. 파괴인성 시험을 위하여 세 재료로부터 WM 조건, WPG 조건 그리고 WP 조건에 대한 용접부 C(T)시편과 순수 모재에서 준비한 모재 C(T)시편의 4 가지 종류의 C(T) 시편을 가공하였다.

탄소강과 스테인리스강의 경우 용접부 C(T) 시편 제작시 직각방향의 모재와 용접부 사이의 경계면을 따라 노치 가공을 하였고, 알루미늄 합금의 경우 양면 용접 방식으로 되어 있어 재료 두께의 중간부에 위치한 모재와 용접부 사이의 경계면에

## 3. 용접부 특성 시험 결과 및 고찰

### 3.1 용접부의 비파괴검사

탄소강, 스테인리스강, 알루미늄 합금의 세 재료로부터 WM 조건, WPG 조건 그리고 WP 조건으로 용접을 한 후, 용접부에 대한 비파괴검사(γ선-검사) 결과는 Table 3에 나타내었다. 탄소강과 스테인리스강의 경우 세 조건 모두 1급 판정을 받았지만, 알루미늄 합금의 경우 WP 조건에서 용접부와 모재 사이에 용입 불량에 의한 기공이 길게 선 모양으로 형성되어 4급 판정을 받았다.

참고문헌<sup>1)</sup>에서도 알루미늄 합금에 대해서 플라즈마로 절단한 후 용접을 행한 경우는 비드(bead) 형태에 있어서 좋지 않고, 기공(blow hole)도 많이 생성되어 X선 탐상 결과에서도 1급 판정을 받기가 어렵다고 하고 있다.

Table 3 Test results of  $\gamma$  - ray NDT

Material	Specimen Conditions	Grade
SM45C	WM <sup>1)</sup>	1
	WPG <sup>2)</sup>	1
	WP <sup>3)</sup>	1
STS 304	WM	1
	WPG	1
	WP	1
A6061-T6	WM	1
	WPG	1
	WP	4

WM<sup>1)</sup> was welded specimen after machining cut, WPG<sup>2)</sup> and WP<sup>3)</sup> were welded specimens after plasma cutting with light regrinding and without regrinding respectively.

### 3.2 경도 측정

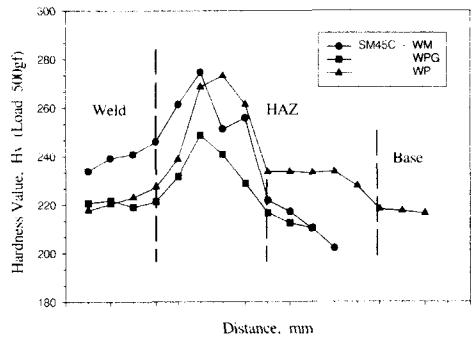
세 재료로부터 WM 조건, WPG 조건 그리고 WP 조건으로 용접한 후에 용접부와 열영향부 그리고 모재에 대하여 미세경도기(micro-Vickers hardness tester)를 이용하여 경도를 측정된 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 2 (a)의 탄소강을 보면 세 조건 모두 열영향부(HAZ)의 경도 값이 모재나 용접부보다 높게 나타난 것을 알 수 있다. WM 조건과 WP 조건의 경우 열영향부의 최고 경도값이 각각 274.6 Hv, 273.2 Hv이었지만 WPG 조건의 경우 248.7 Hv로 약간 낮은 값을 가졌고, 전체적으로도 열영향부의 경도 분포가 낮았다. 그러나 WP 조건의 경우 다른 두 조건보다 열영향부가 더 넓게 형성되었음을 알 수 있었다.

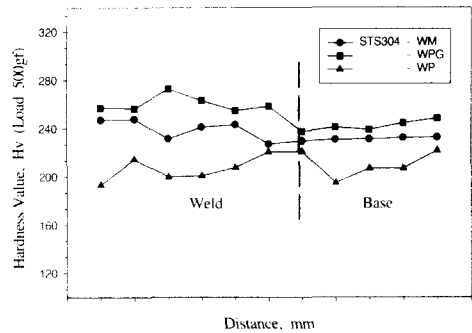
Fig. 2 (b)의 스테인리스강의 경우 용접부와 모재의 경도값이 탄소강과는 달리 크게 차이가 나지 않았지만, 용접부의 경도값이 모재보다 약간 높게 나타났다. 그러나 WP 조건의 경우 WM 조건, WPG 조건 보다 경도값의 분포가 낮게 나타나는 것을 알 수 있었다.

Fig. 2 (c)는 알루미늄 합금의 경도 분포를 나타낸 것이다. 알루미늄 합금의 경우도 스테인리스강과 마찬가지로 용접부가 모재 보다 높게 나타남을 알 수 있었다. 또한 세 조건의 경도분포는 다른 재료와는 달리 큰 차이가 나지 않았다.

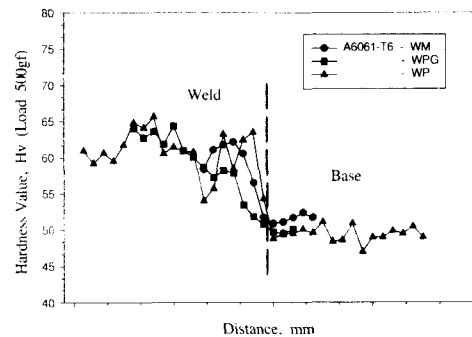
### 3.3 인장 시험



(a)



(b)



(c)

Fig. 2 Hardness distribution near weld zone in each material (a) SM45C (b) STS304 (c) A6061-T6

탄소강, 스테인리스강 그리고 알루미늄 합금 용접부 재료의 인장시험을 위하여 Fig. 1 (b)에서와 같이 인장 시편을 준비하였다. 인장 시편에서 용접부는 시편의 표점거리 내에 있도록 하였다. 세 재료로부터 각각의 조건에 대한 인장 시험결과는 Table 4에 나타내었다. 탄소강의 경우 모재의 항복강도가 361.1 MPa로 가장 높았고, 용접부의 인장강도를 비교해보면 WM 조건, WPG 조건 그리고 WP 조건에서의 인장 강도는 크게 차이는 지 않았으나 WM 조건이 WP 조건보다 높은 것을 알 수 있었다. 스테인리스강의 경우 모재의 항복 강도가 236.8 MPa로 가장 높았지만, WM 조건이 다른 두 조건보다 높고 WPG 조건과 WP 조건의 항복강도는 214.7 MPa로 같은 항복강도를 가졌다. 알루미늄 합금의 경우도 다른 두 재료와 같이 모재의 경도값이 115.9 MPa 가장 높았다. 그러나 스테인리스강과는 달리 WPG 조건이 WP 조건보다 약간 높은 항복강도를 가졌다.

참고 문헌[1]에서도 알루미늄합금에 대하여 플라즈마 절단 후 용접을 행한 경우가 기계로 절단하여 용접을 행한 경우보다 전반적으로 질은 떨어지나 항복강도에는 큰 차이가 없는 것으로 발표되고 있다.

Table 4 Tensile properties of the three materials

Materials		Yield Strength (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)
SM 45C	Base	361.1	669.4	28.41	56.27
	WM	304.6	715.0	14.25	27.88
	WPG	295.3	705.6	14.7	23.77
	WP	289.1	662.1	22.32	-
STS 304	Base	236.8	688.3	84.68	81.91
	WM	221.0	527.3	24.72	-
	WPG	214.7	618.9	31.70	-
	WP	214.7	647.3	51.21	-
A6061-T6	Base	115.9	195.4	-	44.95
	WM	-	-	-	-
	WPG	82.5	142.4	20.17	26.93
	WP	79.5	135.8	14.17	26.36

3.4 미세 조직 관찰

Fig. 3, Fig. 4 그리고 Fig. 5는 탄소강, 스테인리

스강 그리고 알루미늄 합금의 세 재료에 대한 WM 조건과 WP 조건의 모재부와 용접부의 조직 사진을 나타낸 것이다.

Fig. 3 (a), (b)는 탄소강 재료의 WM 조건과 WP 조건의 모재와 용접부의 조직 사진이다. 탄소강의 경우 200배 배율로 용접부에서 모재까지 이어서 관찰하였다. 사진에서 보면 왼쪽이 용접부이고, 오른쪽이 모재로, 가운데 열영향부의 결정성장 영역을 볼 수 있다. WP 조건의 경우 경도 분포에서도 알 수 있었던 바와 같이 열영향부가 더 넓게 형성된 것을 확인 할 수 있었다. 이는 고온의 플라즈마 절단에 의해 절단면에 형성된 탄화물이 용접시 모재와 용접부 사이인 열영향부 조직 형성에 영향을 주는 것으로 추측된다.

Fig. 4 (a), (b)는 스테인리스강 재료의 WM 조건과 WP 조건의 모재와 용접부의 조직 사진이다. 사진에서 보면 두 조건 모두 오스테나이트 기지에 Cr 탄화물이 석출되어 있으나, 탄소강과는 달리 열영향부에는 큰 차이가 나지 않은 것을 볼 수 있었다. 또한 스테인리스강 용접 금속은 다층 용접으로 인하여 주상 조직이 소실되지 않고, 용접 방향에 대략 수직으로 주상 조직이 발달한 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 5 (a), (b)는 알루미늄 합금 재료의 WM 조건과 WP 조건의 모재와 용접부의 조직 사진이다. 사진에서 보면 WM 조건과 WP 조건 모두에서 용접부와 모재의 경계면에 셀상 경계면(cellular interface)이 형성되어 있고, 모재와 용접부 사이의 열영향부에서 탄화물이 석출되어 있는 것을 볼 수 있다.

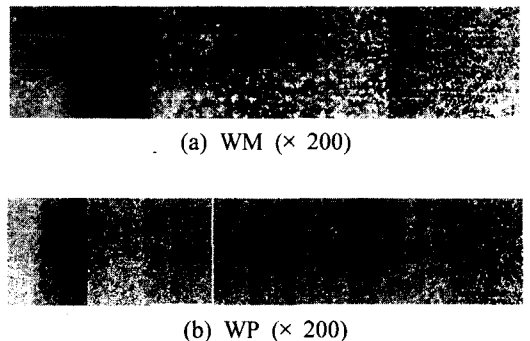
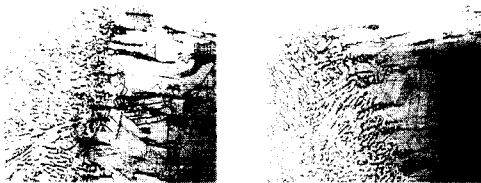
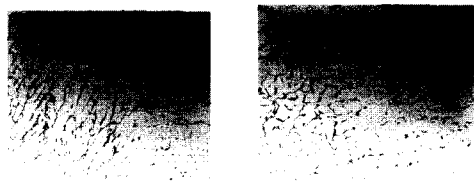


Fig. 3 Microstructure of the weld joints of SM45C



(a) WM (× 200) (b) WP (× 200)

Fig. 4 Microstructure of the weld joints of STS304



(a) WM (× 100) (b) WP (× 100)

Fig. 5 Microstructure of the weld joints of A6061-T6

### 3.5 파괴인성(KIC) 시험

Table 5는 탄소강, 스테인리스강 그리고 알루미늄 합금의 세 재료로부터 WM 조건, WPG 조건, WP 조건의 세 조건에 대한 파괴인성 시험의 결과와 파괴인성치가 되기 위하여 계산된 최소 시편 두께를 함께 나타낸 것이다. 파괴인성 시험은 ASTM E399 측정규격에 의해 시험 후에 결정된  $K_Q$  값이 다음의 식을 만족할 경우, 파괴인성치  $K_{IC}$ 이 된다.

$$B, a \geq 2.5 \left( \frac{K_Q}{\sigma_{ys}} \right)^2$$

여기서 B는 시편의 두께, a는 균열길이이다.

계산 결과 세 재료 모두 시험에 의해 결정된  $K_Q$  값이 윗 식을 만족하지 못하여 파괴인성치  $K_{IC}$ 로는 되지 못하였다. 그러나 동일한 두께의 재료에 대한 비교이므로  $K_Q$  값으로 파괴인성의 정도를 비교할 수 있다.

탄소강의 경우 용접부의 파괴인성  $K_Q$  값이 모재보다 높게 나타났지만, WM 조건, WPG 조건 그리고 WP 조건의 용접부의 파괴인성 값은 큰 차이가 나지 않았다.

스테인리스강의 경우 모재의 파괴인성  $K_Q$  값이 가장 낮았고, WM 조건, WPG 조건 그리고 WP 조건의 용접부의 파괴인성 값을 비교해보면 WM 조

건의 값이 53.19 MPa√m으로 가장 높았다.

알루미늄 합금의 경우 모재의 파괴인성  $K_Q$  값이 18.37 MPa√m 가장 높게 나타났다. 용접부의 파괴인성 값을 비교해보면 세 조건 모두 파괴인성 값이 거의 유사한 값을 얻을 수 있었다.

Mutnansky<sup>[2]</sup> 등은 몇 가지 강에 대하여 기계가공을 한 후 용접(M조건)을 한 경우와 플라즈마 절단 후 가벼운 연삭 가공 후 용접을 한 경우(PG조건) 및 플라즈마 절단 후 용접을 한 경우(P조건)에 대하여 -50℃와 65℃에서 충격 시험을 행한 결과, P조건의 경우가 M조건에 비해 충격치가 크거나 거의 유사한 값을 얻은 것으로 발표하고 있다. 충격치와 파괴인성이 유사한 경향을 나타냄을 고려하면 본 실험에서와 동일한 경향의 결과임을 알 수 있다.

Fig. 6, Fig. 7 그리고 Fig. 8은 세 재료에 대한 WM 조건과 WP 조건으로부터 용접부의 파괴인성 시험을 파단 후 SEM으로 파단면을 관찰한 것이다. Fig. 6과 Fig. 7의 사진에서 보면 탄소강과 스테인리스강의 WM 조건, WP조건 모두 딴플(dimple)에 의한 연성 파괴(ductile fracture)임을 보여준다. Fig. 8의 알루미늄 합금의 경우 딴플이 형성된 연성 파괴 주변에 취성 파괴가 함께 보이는 혼합 파괴 형상을 보여 준다.

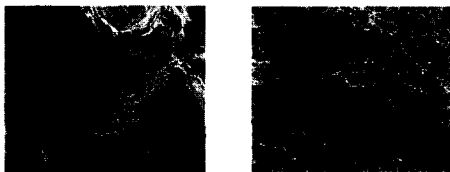
Table 5 Results of the fracture toughness test

Materials		$K_Q$ (MPa√m)	Minimum thickness for $K_{IC}$ (mm)
SM45C	Base	79.40	129.1
	WM	97.05	267.8
	WPG	98.39	279.0
	WP	98.30	307.6
STS304	Base	31.78	55.84
	WM	53.19	82.72
	WPG	39.65	96.04
	WP	40.63	96.04
A6061-T6	Base	18.37	66.20
	WM	13.04	69.03
	WPG	13.16	62.58
	WP	12.28	61.41



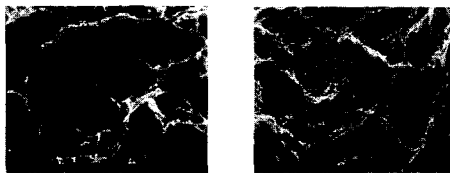
(a) WM3 (× 1000) (b) WP3 (× 1000)

Fig. 6 Fracture morphology in SM45C carbon steel



(a) WM2 (× 1000) (b) WP2 (× 1000)

Fig. 7 Fracture morphology in STS304 stainless steel



(a) WM1 (× 1000) (b) WP3 (× 1000)

Fig. 8 Fracture morphology in A6061-T6 aluminium alloy

#### 4. 결론

두께 25T(25mm)의 탄소강(SM45C), 스테인리스강(STS304), 알루미늄 합금(A6061-T6)의 세 재료로부터 기계 절단 후 용접(WM), 플라즈마 절단 후 연삭 표면 작업 후 용접(WPG) 그리고 플라즈마 절단 후 용접(WP)의 세 조건으로 나누어 용접을 하여 용접부의 기계적 특성을 관찰하였다. 이러한 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다

1. 용접부에 대한  $\gamma$  선 비파괴검사 결과 모두 1급 판정을 받았지만 알루미늄 합금의 WP조건에서는 기공으로 인하여 4급 판정을 받았다.
2. 용접부에 대한 인장시험 결과 WP 조건의 경우, WM 조건과 WPG 조건에 비해 약간의 강도의

감소가 관찰되었지만 거의 유사한 값을 나타내었다.

3. 용접부에 대한 미소경도 측정과 조직관찰을 통하여 열영향부의 크기를 구하였다. 탄소강의 경우 WP 조건의 경우 다른 두 조건보다 열영향부가 넓게 형성되었다. 그러나 스테인리스강과 알루미늄 합금에서 세 조건의 경도분포는 큰 차이가 나지 않았다.

4. 용접부에 대한 C(T) 시험편을 제작하여 파괴인성을 측정하였다. WP 조건의 경우 다른 조건의 경우에 비해 강도나 파괴인성의 큰 감소는 관찰되지 않았다.

#### 후기

이 논문은 1996년 학술진흥재단 대학부설연구소과제 연구비에 의하여 지원되었습니다.

#### 참고문헌

1. Welding Procedure Committee, "Effects of Plasma Cut Surface on the Quality of Aluminium Alloy Welds," *Welding International*, No. 4, pp. 322-342, 1988.
2. V. Mutnansky and K. Handl, "Mechanical Properties of Welded Joints with Weld Areas Prepared by Plasma Cutting," *Welding International*, No. 8, pp. 663-667, 1991.
3. 조종춘, 김영석, 김학민, "스테인리스강용접 열영향부의 KAL 거동 및 기계적 특성에 관한 연구," *대한용접학회지*, Vol. 8, No. 4, pp. 27- 34, 1990.
4. 윤국한, 김도훈, "레이저빔에 의한 이중 스테인리스강(오스테나이트계/페라이트계)의 접합에 관한 연구," *대한금속학회지*, Vol. 34, No. 10, pp. 1367-1374, 1996.
5. T. Wantanabe, S. Shibata and H. Goto, "Grain-Boundary Behavior in the Heat Affected Zone of an Austenitic Stainless Steel and Its Relation to Weld Metal Grain Growth," *Welding International*, Vol. 9, No. 12, pp. 967-975, 1995.
6. A. A. Wells, "Welding and Fracture," *Materials and Science and Engineering*, Vol. 4, pp. 189-192, 1969.