

**研究論文**

## 304 스테인리스강의 Plug 용접성에 관한 연구

황종근\* · 장경복\*\* · 강성수\*\*\*

### A Study on the Plug Weldability of 304 Stainless Steel

J. K. Hwang\*, G. B. Jang\*\* and S. S. Kang\*\*\*

**Key Words** : Plug Welding (플러그 용접), Optimum Welding Condition (최적 용접조건), Upper Plate (상판), Lower Plate (하판), Shielding Gas (실드 가스), Tensile Shear Test (인장 전단시험)

#### Abstract

In this study, the plug weldability of STS 304 was investigated. The parameters which influence plug weldability were pushing pressure of the plates, position of welding wire and composition of shielding gases. Among these factors, the composition of shielding gases and hole diameter of the upper plate were found to be the major factors influencing weld quality.

To evaluate weldability, tensile shear strength of the plug welded specimen was measured and compared with tensile strength of butt welded specimen. Hardness was measured for both plug weld and butt weld. The microstructure of the weld metal and HAZ were also characterized.

#### 1. 서 론

자동차나 철도 차량 등의 외부 차체에는 저탄소 강판, 알루미늄 합금판 및 스테인리스 강판 등이 사용되어지고 있는데, 특히 철도 차량 차체의 경우에는 경량화, 내식성을 증시하여 스테인리스 차량 및 알루미늄 합금 차량이 사용되어지고 있다.

이러한 차체 구조의 접합에는 저항 점용접, 아크 용접, 레이저 용접, TOX 등의 접합법이 이용되고 있으며, 이 중 저항 점용접과 아크 용접이 널리 사용되고 있다.

그런데, 철도 차량 차체의 경우에는 스테레스 강재로 제작되기 때문에 수축정수가  $22.7 \times 10^{-3}$  으로서 일반강재 SS 41의  $17.4 \times 10^{-3}$  보다 훨씬 높으며 알루미늄(A 5083)의  $20.4 \times 10^{-3}$  보다도 높기 때

※ 1997년 11월 6일 접수

\* 정회원, 한국원자력 연구소

\*\* 학생회원, 부산대학교 기계공학과 대학원

\*\*\* 정회원, 부산대학교 기계공학과

문에 용접시 용접 변형이 크게 발생한다<sup>1)</sup>. 그러므로, 용접변형을 최소화하기 위해 MAG(Metal Active Gas Shield Arc Welding) 용접 등의 고속, 소입열화를 이용한 자동화 용접과 점용접이 주로 사용된다.

그러나, 저항 점용접은 저항 발열을 이용하여 용접을 행하기 때문에 판재의 두께가 두껍거나 용접 지점의 간격이 허용 한도보다 좁을 경우 원하는 작업 결과를 얻기가 어렵게 된다. 더우기 접합부의 양쪽 면에서 동시에 가압을 가해줘야 하기 때문에 형상에 따라 작업의 제한을 받는 단점이 있다.

이와같이 점용접이 사용 제약을 받는 경우, 일반적으로 플러그(plug) 용접이 이용된다.<sup>2)</sup>

플러그 용접이란 접합되어야 할 두 판재 중 한쪽에 구멍을 뚫은 후 그 구멍을 통해 용탕을 채워 판재를 접합시키는 용접법으로 아아크 점용접(arc spot welding)이라고도 한다. 이 방법은 판재의 한쪽 면만을 통한 접합이 가능하며, 약 6.4mm 두께의 강판까지 겹치기 용접이 가능한 것으로 알려져 있다.<sup>3)</sup> 이처럼 플러그 용접은 점용접보다 사용 가능 범위가 넓음에도 불구하고 일반 구조용강에 대한 연구는 어느정도 진행되고 있지만<sup>4)</sup> 차량용으로 사용되는 스테인리스강에 대한 플러그 용접성 연구는 미흡한 실정이다. 즉, 저항 점용접에 대한 연구는 활발한 반면 플러그 용접에 대한 연구는 용접 변수와 최적 용접 조건과의 관계<sup>5)</sup>, 인장 전단 시편에 대한 인장 강도 평가<sup>6)</sup>와 같은 기초적인 연구에 머물고 있는 실정이며 또한, 피로 성능에 관한 연구는 최근에 인장 전단 시편으로 행한 피로 강도 실험<sup>7)</sup>의 결과가 보고된 바 있다. 그리하여, 본 연구에서는 스테인리스강의 플러그 용접성에 대한 전반적인 연구를 수행하여 정량적인 데이터를 획득하고자 하였다.

스테인리스강 중 가장 일반적으로 사용되고 있는 STS 304를 이용하여 여러 조건으로 플러그 용접을 수행한 후 외관, 강도가 가장 우수한 용접 조건을 최적의 용접조건으로 선택하였는데 특히, 외관

상 상판과 하판의 비드가 거의 나오지 않는다면 플러그 용접 후 상·하판의 비드 제거 공정을 거치지 않고 사용할 수 있다. 따라서, 용접 후 후가공이 필요없게 되므로 이러한 용접조건을 찾고자 하였다.

플러그 용접부의 강도가 아아크 맞대기 용접부의 강도에 상당하는 수준으로 확보 되어진다면 차량 차체의 제작에 있어서 플러그 용접의 채택이 가능하게 되므로 플러그 용접과 아아크 맞대기 용접을 수행한 인장 전단 시편과 인장 시편을 각각 제작하여 인장 시험을 실시하여 용접부의 강도를 비교·평가 하였고, 용접부의 경도 분포를 측정·비교하여 경도분포가 용접부 강도에 미치는 영향을 조사 하였으며, 각 용접부의 조직검사를 실시하여 열영향부의 크기 등을 비교하여 강도와와의 상관관계를 조사하였다. 또한, 용접부 재질의 미시적인 요인과 강도와와의 상관관계를 고찰하여 강도를 떨어뜨리는 원인을 규명하여 스테인리스강의 플러그 용접성을 평가하였다.

## 2. 용접재료 및 실험방법

### 2.1 용접재료

본 연구에 사용한 피용접재는 스테인리스강 중 가장 일반적으로 사용되고 있는 STS 304(두께 2mm)를 사용하였다. 피용접재의 화학 성분과 주요 전기적, 기계적 물성치를 Table 1과 Table 2에 각각 정리하였다.

플러그 용접을 위한 용접 와이어(wire)는 JIS Z 3323에 규정되어 있는 0.9 mmφ YF 308를 사용하였다.

Table 1. Chemical composition of base metal

재 료	화학성분(wt%)					
	C	Si	P	S	Ni	Cr
STS 304	0.08	1.00	0.045	0.03	8.13	18.20

Table 2. Electrical and mechanical properties of base metal

재 료	전기적 성질			기계적 성질		
	전기저항 (μΩ cm)	열전도도 (w/mK)	열팽창 계수 (10 <sup>-6</sup> /K)	항복강도 (kg/mm <sup>2</sup> )	인장강도 (kg/mm <sup>2</sup> )	연신율(%)
STS 304	72	20.1	17.61	21	60	50

실험을 위한 용접 시험편은 반자동 아크 용접기 (Gas Metal Arc Welder)인 Miller 사의 Millermatic 250MP를 이용하여 직접 플러그 용접 및 아크 용접을 실시하여 제작하였다. 보호 가스로는 Ar (95%)+CO<sub>2</sub>(5%)의 혼합가스를 사용하였다.

시험편의 형상은 Fig. 1에 나타내었다. 플러그 용접 시험편의 구멍의 크기와 강도와와의 관계를 조사하기 위해 구멍의 직경을 6mm, 6.5mm, 7mm의 세 가지 종류로 만들었다.

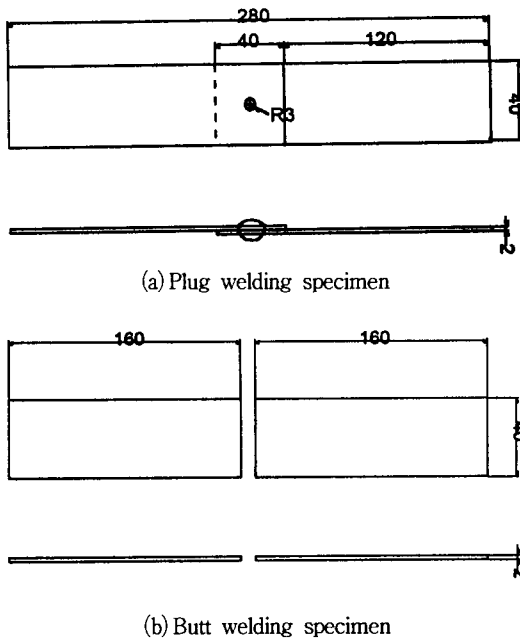


Fig. 1 The shape and dimension of welding specimen

## 2.2 실험 방법

각 시험편의 인장 강도는 인장 속도 (loading speed)를 10mm/min로 하여 인장 시험을 실시하였다. 시험이 끝난 시험편은 접합부 (nugget)의 크기와 인장전단 강도와와의 관계를 조사하기 위해 접합부의 크기를 측정하였다. 또한, 단면에 대한 관찰이 필요한 시험편은 연마한 후 글리세린 (Glycerin), 질산 (Nitric Acid), 염산 (Hydrochloric Acid), 명초산 (Acetic Acid), 증류수를 혼합한 부식액으로 부식

시켜 광학 현미경을 이용하여 단면의 미시 조직을 촬영하거나 용접부의 크기를 측정하였다.

경도 측정은 마이크로 비커스 경도기를 이용하여 측정하였다. 경도 측정 위치는 플러그 용접의 경우는 판 간의 경계면에서 0.5mm떨어진 위치에서 0.5mm간격으로 측정을 하였으며, 맞대기 용접의 경우는 시험편의 중심을 따라 즉, 1 mm되는 곳에서 0.5mm 간격으로 측정하였다. 이 때 측정 하중은 200g으로 하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 용접조건 설정

일반적으로 강의 경우 박판 용접에는 직경 0.8~0.9mm의 용접 와이어가 사용되며, 전압은 16~22V, 전류는 60~160A의 조건에서 양호한 용접부가 생성되는 것으로 알려져 있다.<sup>2)</sup> 그러나, STS 304와 같은 오스테나이트계 스테인레스강의 경우 합금량이 많기 때문에 위의 조건과는 다르므로 적절한 용접 조건을 찾아내는 데에는 많은 변수가 작용한다.

플러그 용접에 영향을 미치는 인자로는 상판과 하판을 밀착시켜 주는 가압력, 상·하판 사이의 간격, 용접 와이어의 위치, 용접표면의 청결상태, 보호가스의 조성 등을 들 수 있다. 이러한 여러 인자를 고려하여 전압과 전류, 그리고 용접 시간을 다양하게 바꾸어 가며 비이드의 외부 형상, 용융부의 단면 형상, 인장 시험을 통한 인장 강도 등을 종합적으로 비교하여 가장 양호한 것을 용접 조건으로 설정하였다.

Fig. 2에는 여러 가지 조건하에서 행하여진 인장 전단 실험 결과 중 최적 용접조건에 근접하는 조건에 대한 결과를 나타내었으며 각 경우의 용접조건은 Table 3에 나타내었다. 그리고, 최종적인 플러그 용접과 맞대기 용접의 용접조건은 Table 4에 나타내었다.

이러한 인자 중 보호가스의 조성에 가장 민감하게 반응하였다. 스테인리스강의 경우 보호가스로서 아르곤과 이산화탄소 또는 아르곤과 헬륨의 혼합가스를 사용하는데 헬륨보다는 무거운 아르곤이 평면 위치에서의 용접에 유리하며 아크보호에도

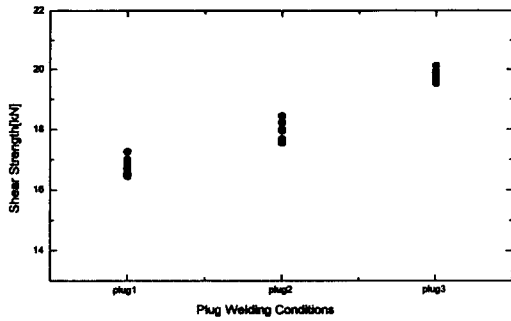


Fig. 2 The tension shear strength for each plug welding conditions

Table 3. Welding conditions for each plug welding

용접 종류	와이어 송급속도 (ipm)	전압 (V)	시간 (sec)
plug 1	350	23	2
plug 2	350	25	2.2
plug 3	353	26	2.4

Table 4. Welding conditions for plug and butt welding

용접 종류	와이어송급속도 (ipm)	용접 전압 (V)	용접 시간 (sec)
Plug 용접	353	26	2.4
맞대기 용접	225	16.7	off

\* off : 용접건을 누르고 있는 동안 용접.

더 효과적이므로 아르곤과 이산화탄소의 혼합가스를 사용하였다. 아르곤과 이산화탄소의 조성비는 아르곤 70%, 80%, 그리고 95%의 세가지로 하여 용접하였다. 아르곤의 함량이 작을 경우에는 상판 구멍의 가장 자리가 완전하게 채워지지 않아 용접부가 충분한 강도를 지니지 못하였는데 아르곤의 함량이 많아질수록 이러한 결함은 없어지고 양호한 용접부를 형성하였다. Fig. 3는 이를 잘 나타내고 있다. 아르곤이 70%인 경우는 이러한 결함을 확인할 수 있으며 95%인 경우에는 언더컷 없이 상판과 하판이 완전하게 접합되어 있음을 알 수 있다. 이는 이산화탄소 함량이 많은 경우는 용입이 깊고 스패터(spatter)가 심하기 때문인 것으로 판단된다. 그리고, 그림 (b)의 경우 상판의 비드거

거의 나오지 않아 상판의 경우는 비드 제거 공정이 필요 없음을 알 수 있다.



(a) Ar 70% + CO<sub>2</sub> 30%



(b) Ar 95% + CO<sub>2</sub> 5%

Fig. 3 The nugget shape with shield gas composition

### 3.2 플러그 용접과 맞대기 용접의 인장 시험의 결과

플러그 용접 인장전단 시험 결과를 Fig. 4에 나타내었는데 상판의 구멍의 크기에 따른 전단강도의 분포를 보여주고 있다. 전반적으로 인장전단 강도는 19~20.8 kN 정도를 나타내었으며 전체적으로 데이터의 산포가 비슷하나 상판구멍의 직경이 7mm 인 경우가 다소 산포의 범위가 넓게 나타나고 있다. 이는 구멍의 직경이 크면 용접부의 상태가 일정하지 않음을 보여준다. 즉, 상판 구멍의 직경이 클 경우 한정된 시간에 용융부가 채워야 할 양이 많아져 용접불량이 많이 발생 한다. 만약 이를 보완하기 위해 시간을 늘릴 경우는 하판으로 용착되는 양이 많아지는 현상이 발생하였다. 그리고, 구멍의 직경이 증가함에 따라 인장전단 강도

가 다소 증가함을 알 수 있으나 그 정도가 크지는 않음을 알 수 있다. 그러므로, 두께 2 mm의 STS 304의 플러그 용접의 경우 구멍의 직경은 6mm 정도가 가장 적당하다고 판단된다.

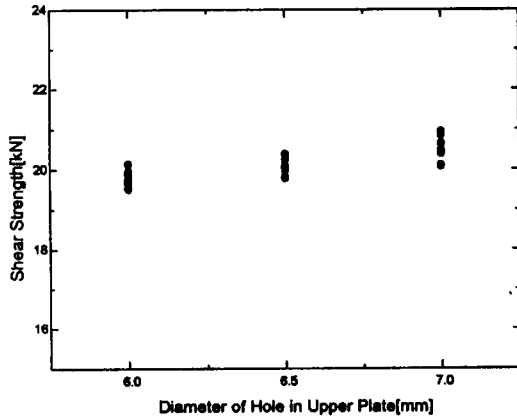


Fig. 4 The tension shear strength for plug welding.

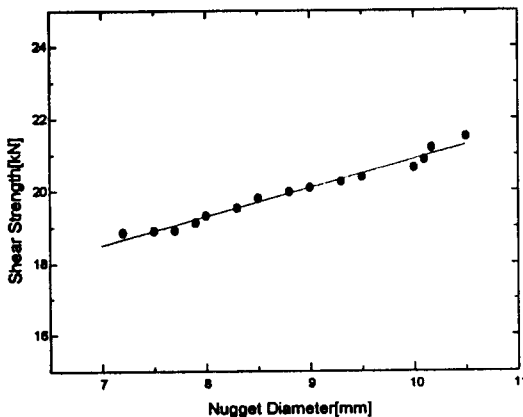


Fig. 5 The relationship between tension shear strength and nugget diameter.

플러그 용접의 접합부 직경과 인장전단 강도와의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 접합부의 직경 증가에 따라서 인장전단 강도가 다소 증가하고 있음을 알 수 있다. 결국 플러그 용접부의 전단강도에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 접합부의 직경임을 알 수 있는데 이는 小野英彦<sup>8)</sup> 등의 결과와 일치한다.

그리고, 접합부의 직경이 상판구멍 직경보다 다소 크울 알 수 있다. 일반강의 경우는 접합부의 직

경이 상판의 구멍직경과 거의 일치한다. 이러한 차이는 보호가스에 의한것으로 일반강의 경우 보호가스로 이산화탄소를 사용하기 때문에 스패터 (spatter)가 심하고 비이드의 직경이 작고 용입이 깊게 나타나는 반면, 아르곤 (95%)과 이산화탄소 (5%)의 혼합가스를 사용하는 스테인리스강의 경우 비이드 형상의 직경이 크고 얇기 때문이다. 실제로 STS 304를 이산화탄소의 보호가스로 플러그 용접을 수행한 결과 접합부의 직경은 상판 구멍의 직경과 거의 일치하였다. 플러그 용접시의 상판 비이드의 직경이 15~17 mm 정도로서 넓고 비이드 표면이 모재와 깊이 차가 거의 없으므로 사포로 간단히 드레싱 해주면 상판은 비이드 제거를 위한 후가공이 필요 없을 것으로 판단된다. 하판의 경우는 비이드의 직경이 5.3~6.2 mm 정도로 상판 구멍의 직경과 크게 차이가 없었다. 맞대기 용접 시험편의 인장 시험 결과, 인장강도는 26~30 kN 정도를 나타내었다.

플러그 용접과 맞대기 용접의 강도를 비교해보면 플러그 용접의 인장전단 강도가 맞대기 용접의 인장강도의 55%~66% 정도를 나타내고 있다. 그러므로, 플러그 용접으로도 용접 구조물에서 상당한 강도를 확보 할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.3 용접부위의 조직 관찰과 경도 측정 결과

Fig. 6에 플러그 용접의 단면의 형상과 조직의 변화 추이를 함께 관찰하기 위해 용접부 단면을 연속 촬영하여 나타내었다. 용융부와 열영향부, 그리고 모재로 이어지는 조직의 변화를 관찰 할 수 있다. 상판과 하판이 접하는 하판 부위에서의 열영향부의 조직이 상판의 열영향부보다 더 조대화 되어 있는 것을 관찰 할 수 있다. 이는 상판과 하판이 접하는 영역이 가장 늦게 냉각되기 때문에 열영향부의 결정립이 성장할 수 있는 시간이 충분하기 때문인 것으로 판단된다. 열영향부와 용착부가 만나는 영역은 서로 다른 조성의 재질이 만나는 부분이므로 기계적 성질이 급변하고 기계적 성질의 열화(劣化)가 일어나 결합력이 약하여 실제로 대부분의 균열이 여기서 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. 그 중에서도 이처럼 열영향부의 조직이 가장 조대한 상판과 하판이 접하는 즉, 하판의 윗



Fig. 6 The microstructure of the cross section in the plug welding specimen

부분이 조직적으로 가장 취약하며 노치(notch) 효과에 의한 응력집중이 발생하기 때문에 대부분의 균열이 여기서 발생하였다.

Fig. 7에는 플러그 용접부와 맞대기 용접부의 용융부와 열영향부를 나타내었다. 본 연구에 사용된 STS 304의 경우 크롬 당량이 20.5 이고 니켈 당량이 12.5 정도이므로 용접부의 조직은 Schaeffler Diagram를 참조하면 오스테나이트와 페라이트로 이루어져 있음을 짐작할 수 있다. 오스테나이트계 스테인레스강의 용접부는  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$ 의 값이 증가할수록 오스테나이트에서 공정 페라이트(eutectic ferrite), 골격 페라이트(skeletal ferrite), 가지 페라이트(lathy ferrite), 위드만스테틴(widmanstatten ferrite)로 변화한다<sup>9)</sup>. STS 304의 경우 Cr이 18.2% Ni이 8.13% 정도이므로 용접부의 조직은 오스테나이트 위에 골격 페라이트와 가지 페라이트의 혼합조직 즉, 페라이트의 망상구조<sup>10)</sup>로 이루어져 있음을 알 수 있는데 Fig. 7에서의 용접부 조직은 이를 잘 나타내고 있다. 그런데, 플러그용접이 맞대기 용접보다 용접시간이 짧아 입열량이 작기 때문에 가지 페라이트가 많이 보이는 반면 맞대기 용접부는 입열량이 크므로 인해 골격 페라이트가 많이 형성되어 있으며, 열영향부의 경우도 입열량의 차이로 인해 플러그 용접의 경우가 덜 조대화 되어 있음을 알 수 있다.

플러그 용접부와 맞대기 용접부의 경도 분포를

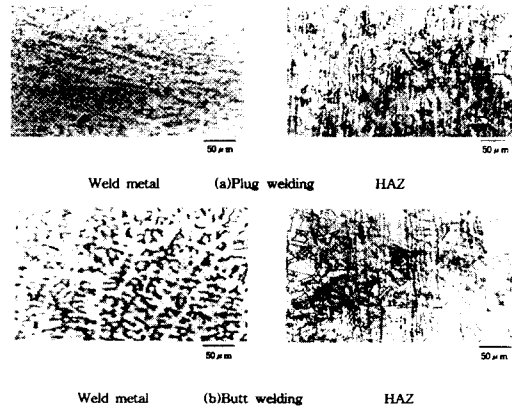
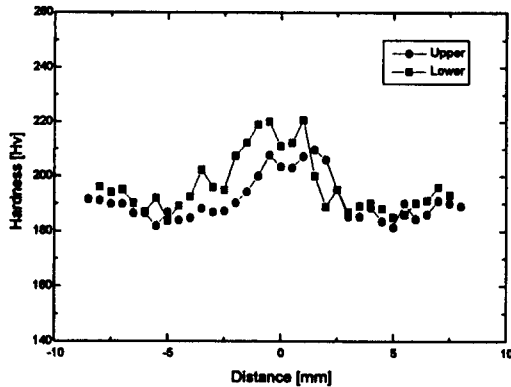
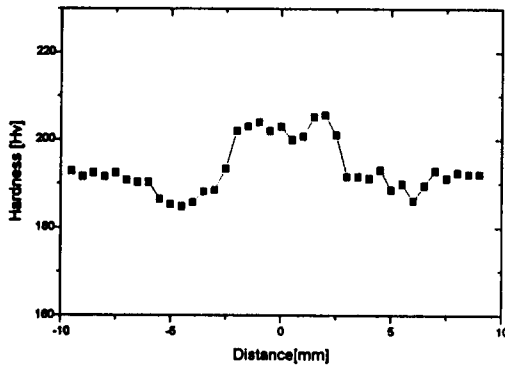


Fig. 7 Microstructure of weld metal and HAZ

Fig. 8에 나타내었다. 플러그 용접의 경우 전체적으로 하판이 상판보다 높게 나타났다. 이것은 입열량의 차이에 의한 냉각속도의 차이 때문인 것으로 판단된다. 즉, 상판의 경우가 하판보다 입열량이 많아 냉각속도가 하판보다는 느리고 변태점에도 도달한 부분이 많기 때문에 전체적인 경도분포에서 하판이 상판보다 높게 나타나는 것이다. 그러나, 전체적인 경도의 분포 형상은 동일하게 나타나고 있다. 용융부에서 가운데 부분은 서냉되는 영역이므로 경도값이 다소 낮게 나타나고 있고 용융부의 가장자리는 가운데 부분보다는 냉각속도가 빠르므로 조금 높은 경도값을 나타내고 있다.



(a) Plug welding



(b) Butt welding

Fig. 8 Hardness distribution of welding specimen

경도값이 감소하다 일정해지는 영역은 열영향부 영역이다. 플러그 용접의 경우 용접시간이 짧고 입열량이 접합부 부근에 집중되어 모재를 통하여 급랭되기 때문에 용융부에서 열영향부로 천이 영역의 경도값의 변화 정도가 다소 크게 나타나고 있다.

맞대기 용접부의 경우는 용융부의 경도가 플러그 용접부보다 낮게 나타나고 있는데, 이것은 맞대기 용접이 플러그 용접 보다 용접시간이 길어 입열량이 많아 플러그 용접보다 용접부가 서냉되기 때문이다. 그리고, 열영향부의 영역이 플러그 용접에 비해 조금 넓게 분포하고 있는 것을 알 수 있는데 이것 역시 입열량의 차이 때문인 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

STS 304의 플러그 용접성을 평가하기 위해 플러그 용접 시편과 맞대기 용접 시편을 각각 제작하여 인장 시험, 조직검사 및 경도측정 등을 행하였으며 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 두께 2mm의 STS 304를 가지고 직접 플러그 용접을 행한 결과 외관상 비드의 형상이 가장 양호하고 가장 높은 인장전단 강도를 나타내는 최적의 용접조건은 와이어 송급속도 353 IPM, 용접 전압은 26 V, 용접시간은 2.4 sec 이었으며 상판의 구멍의 직경은 6 mm 정도가 가장 양호한 것으로 나타났다. 그리고, 실드가스로는 아르곤(95%)와 이산화탄소(5%)의 혼합가스가 가장 양호한 용접부를 형성하였다. 이러한 조건으로 용접시 상판의 비드 형상이 얇고 넓어 비드가 쌓이지 않으므로 상판의 경우 후가공 없이 사용이 가능한 것으로 판단된다.

2. 플러그 용접의 인장전단 시험편에서 인장강도에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 접합부의 직경이며 인장전단 실험 결과 강도는 19~20 kN 정도로서 맞대기 용접의 인장강도의 60~65% 정도로 나타나 만족할 만한 강도를 지니는 것으로 판단된다.

3. 조직검사 결과 용접부의 조직은 오스테나이트위에 골격 페라이트와 가지 페라이트의 혼합조직으로 되어 있으며 스테인리스강의 열전도도가 낮아 용해선 바로 곁에 입자의 조대화가 발생하였는데 특히 플러그 용접의 경우 상판과 하판이 접하는 부위의 열영향부가 가장 조대하여 대부분의 균열이 여기서 발생하였다. 그리고, 열영향부의 영역도 그리 넓게 나타나지는 않았다.

4. 플러그 용접부의 경도측정 결과 하판의 경도가 상판보다 높게 나타났으며 열영향부에서의 경도값의 변화 정도가 맞대기 용접보다 크게 나타났다.

## 참 고 문 헌

1. 樺況 眞事, "自動車用高張力鋼板の熔接", 熔接學會誌 第 60卷(1991) 第6 pp. 495-498
2. 現代自動車 (株), "電氣抵抗熔接", (1985) pp. 3-60
3. 英國熔接學會, "自動 炭酸가스 熔接", (1984)
4. 한명수, 한종만, 이준열, "CO<sub>2</sub> 아크스폿 용접법에 의한 조립보의 굽힘강도에 관한 연구" 대한 용접학회지, 제 15권, 제 4호, (1997)
5. W. P. Blankenship, etc. "Evaluation of GMA Spot Welding for Assembly of High Performance Sheet Steel Structure", Welding Journal March 1983 pp. 27-33
6. 小野 英彦, etc. "鋼のCO<sub>2</sub>アークスポット熔接 (第1報)", 熔接學會誌 第 51卷(1982), 第7 pp. 604-609
7. 鄭然秀, "薄板 熔接部の 疲勞舉動에 關한 研究", 부산대 석사 학위 논문, (1996)
8. R. B. Wilson, T. E. fine, "Fatigue Behavior of Spot Welded High Strength Steel Joints", SAE 810354 (1981)
9. J. J Smith and R. A Farrar, "Influence of Microstructure and Composition on Mechanical Properties of Some AISI 300 Series Weld Metals", International Material
10. 한종만, 한기형, 이은배, 허만수, 한용섭, "스테인리스강 용접부의 기계적 성질에 미치는 후열처리의 영향", 대한 용접학회지, 제 14권, 제 3호, (1996)