

**研究論文**

## 알루미늄 합금의 점용접에서 용접전류 형태가 용접성에 미치는 영향

한 용 섭\*

### Effect of Welding Current Type on Weldability in Spot Welding of Aluminum Alloy

Yong-Seop Han\*

**Key Word** : Spot welding (점용접), Aluminium alloy (알루미늄 합금), Current type (전류 형태), Weldability (용접성), Electrode life (전극팁 수명)

#### Abstract

Spot welding is one of the important welding processes for the construction of thin metal sheet. Because of low investment cost, alternating welding current is widely applied for power source. Direct current type could be, however, recommended for high quality weldment.

In this study, the effect of welding current type on the weldability and the electrode life in spot welding of aluminium alloy were investigated. Various welding tests were done by using three phase direct and alternating welding current, respectively.

In spite of high variation of welding force, weld quality and electrode life with alternating welding current were shown better results than those with direct current for 2mm thick aluminium alloy sheets. This was due to excessive erosion of the positive electrode in direct welding current compared with the negative one. On the contrary to 2mm sheets, the welding parameters of alternating current for 1mm sheets must be carefully selected.

#### 1. 서 론

알루미늄 합금은 낮은 비중에 비해 강도가 높을

뿐만 아니라, 열간 및 냉간 가공성이 우수하며 내부식성도 우수하기 때문에 경량화 재료로 많이 사용되고 있다. 특히 최근 연료의 소모를 줄이기 위해 자동차 혹은 객차와 같은 수송기계에서는 차체

\* 정회원, 대우중공업 선박해양기술연구소

의 경량화가 요구되며, 이에 따라 알루미늄 합금의 사용이 늘어나고 있다.

저항 점용접법은 빠른 용접 속도뿐만 아니라, 로봇 등의 자동화가 가능하기 때문에 두께 0.5 - 3.0mm의 박판 용접에 많이 적용되고 있다<sup>1)</sup>. 그러나 알루미늄 합금에 대한 저항 점용접 방법은 용접 품질이 불안정하고, 용접 전극팁 수명도 일반 강판의 경우보다 매우 짧기 때문에 주요 부위에는 제한적으로 적용되고 있다. 전극팁의 수명이 짧은 경우 전극팁 교체에 의해 수시로 생산 공정을 중단하여야 하기 때문에 전극팁 수명은 특히 자동차 차체와 같은 대량 생산 공정에서의 적용에 결정적인 제한 요소가 된다.

알루미늄 용접의 품질이 불안정하고 전극팁 수명이 짧은 것은 알루미늄 합금의 화학적, 물리적 특성 때문이다. 알루미늄 합금의 우수한 전기전도성과 열전도성은 Steel에 비해 용융점이 낮음에도 불구하고 용접 시 짧은 시간 내에 매우 높은 전류를 요구한다. 또한 알루미늄 합금은 산소와의 친화력이 높기 때문에 표면에 치밀한 산화 피막을 형성하며, 전극팁과 알루미늄의 접촉부위에는 높은 접촉저항을 갖게된다. 전류가 흐르면 이 접촉 부위에는 집중적인 열이 발생하여 전극팁 표면과 알루미늄 합금의 표면에서 두 금속간의 합금현상이 발생하며, 이에 따라 전극팁의 표면이 마모되어 전극팁 수명이 단축된다<sup>2,3)</sup>.

전극팁 수명에 미치는 요소들은 여러 가지가 있으나 특히 용접가압력, 전극팁 형상 및 재료, 알루미늄 합금의 종류 및 용접 전류의 형태가 많은 영향을 미친다고 보고되어 있다<sup>3-8)</sup>.

점용접용 용접기로는 교류, 단상 직류, 삼상 직류 및 Inverter 등의 전원을 이용한 다양한 용접기가 산업계에 사용되고 있다. 교류용접기 경우 장비 가격이 싸기 때문에 일반적으로 가장 많이 사용되고 있으나, 삼상전류 중 단상 혹은 두상만 사용하기 때문에 1차측 전류 공급에 불균형을 가져온다. 직류 용접기는 정류기를 이용하여 삼상을 조합하여 사용할 수 있기 때문에 1차측의 부하 손실도 줄일 수 있고, 2차측의 유도기전력도 줄일 수 있다는 장점이 있다<sup>9)</sup>. 알루미늄의 용접 경우 철강 재료에 비해 2-3배 이상의 높은 전류를 순간적으로 흘려야 하기 때문에 직류용접기가 일반적으로 추천된다.

용접전류의 형태는 용접품질과 전극팁 수명에도 영향을 미친다. Knobloch와 Gengenbach는 직류용접의 경우 교류용접에서 발생하는 소위 "Skin Effect"가 없기 때문에 용접시 전류의 분포가 균일하여 우수한 용접 품질을 얻을 수 있다고 보고하였다<sup>8,9)</sup>. 또한 Emonts는 직류용접의 경우 용접시 용융물의 과열 현상이 교류에 비해 적기 때문에 "Expulsion" 현상이 적게 발생한다는 장점이 있다는 보고를 하였다<sup>10)</sup>. 이에 비해 Dilay는 전류형태는 용접품질에 영향을 주지 않는다는 보고도 하였다<sup>5)</sup>. 또한 교류용접의 경우 양쪽 전극팁이 균일하게 마모되나, 직류용접의 경우 양극이 음극보다 우선적으로 마모한다는 보고도 있다<sup>5,7)</sup>. 이와 같이 전류 형태가 용접부의 품질에 미치는 영향에 대한 보고는 많이 있으나, 대부분 실험에서 직류용접기와 교류용접기를 동일 종류를 사용하지 않았기 때문에 이들 실험 결과의 유효성은 한계를 가지고 있다. 그 이유는 용접품질과 전극팁 수명은 용접전류의 형태뿐만 아니라 용접도중 용접기의 기계적 및 동적 움직임에도 직접적인 영향을 받기 때문이다.

따라서 본 논문에서는 알루미늄 합금의 용접시 용접전류의 형태 즉, 직류용접과 교류용접이 용접 품질 및 전극팁의 수명에 미치는 영향에 대해 검토하였다. 이를 위해 본 실험에서는 동일한 용접기를 사용하여 용접을 수행하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 용접장비

본 실험에 사용된 용접기로는 용량이 200KVA인 3상 직류용접기를 사용하였다. 이 용접기는 1차측의 3상에 6개의 정류기를 사용하여 교류를 직류로 전환할 수 있다. 이를 위해 본 실험에서는 교류 용접의 경우에는 직류용접기의 정류기를 제거한 후 3개로 구성된 변압기중 1개만 사용하여 용접하였다. 그림1에는 점용접기의 형태를 간략히 나타내었다.

### 2.2 알루미늄 합금

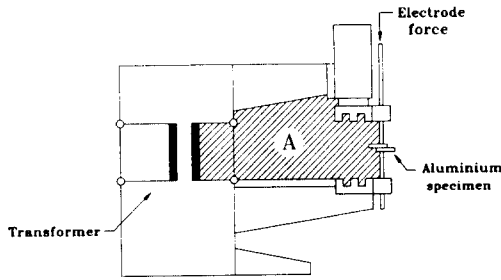


Fig. 1 Schematic diagram of spot welding machine

본 실험에 사용된 알루미늄 합금은 KS5154합금과 KS7N01-T6합금으로 각각 1.0 과 2.0mm 두께의 판재를 사용하였다. 표1에는 사용된 합금의 합금성분과 기계적 성질을 간단히 나타내었다.

KS5154합금은 가공경화 방법으로 강도를 향상시킨 합금으로 자동차 및 일반 산업용에 많이 사용되고 있다. KS7N01합금은 알루미늄 합금 중 고강도의 합금에 속하는 것으로 시효경화 처리에 의해 강도를 향상시킨 합금이다. 실험에 사용된 합금의 전기전도성은 비슷한 수준으로 20-23 Ωm/mm<sup>2</sup>, 열전도성은 120-170 W/m K를 가지고 있다.

시험 표면의 산화막 상태를 일정하게 유지하기 위해 본 실험에서는 용접전 모든 판재를 화학적 방법에 의해 표면 처리를 하였다. 모든 판재는 인장전단강도(이하 전단강도) 시험에 적합한 크기(L×B×t = 110×50×2 혹은 1mm)로 자른 다음, 다음의 화학처리 과정을 거친 후 사용하였다.

- 1) 산세 과정 : 약 60℃의 NaOH 수용액 (60g/l)에 약 4분간 담근다.
- 2) 세척 과정 : 흐르는 물을 이용해 부식액을 씻어낸다.
- 3) 중화 과정 : 30% HNO<sub>3</sub>에 담근 후 다시 물로 씻어낸다.
- 4) 건조 과정 : 매탄올에 담근 후 더운 바람을 이

용하여 빠르게 말린다.

표면 전처리가 끝난 후 화학처리의 상태를 확인하기 위하여 10장의 판재마다 1장씩 표준화된 측정방법<sup>11)</sup>에 따라 표면저항을 측정하였다. 화학적 처리를 거친 판재는 상온에서 약 48시간 보관한 후 실제 시험에 사용하였다. 그 이유는 화학적 처리를 행한 알루미늄 합금은 대기 중의 산소와 접촉하여 새로운 산화막을 형성하여 최초 수시간 내에는 표면저항이 급속히 증가하기 때문이다. 이러한 과정을 지난 판재의 표면저항을 측정한 결과 표면저항은 약 10-25Ω 이었으며, 전처리 전의 판재의 표면저항은 100 -250Ω 정도로 불균일하였다.

### 2.3 사용 전극팁

실험에 사용된 전극팁은 캡형 전극으로 전극의 분류 Class2에 해당하는 Copper-Chromium-Zirconium (CuCrZr) 합금을 사용하였으며, R=100mm 와 R=75mm를 가진 구면형(R형)의 전극팁을 사용하였다. 본 전극은 Cr이 0.5-1%, Zr이 0.02% 포함된 Cu합금으로 경도는 로크웰 81-90B, 인장강도는 540-640 N/mm<sup>2</sup>, 전기전도도는 44-55 Ωm/mm<sup>2</sup>를 각각 나타낸다.

전극팁의 제조 시 발생할 수 있는 표면상태의 불균일성은 전극팁 수명에 직접적인 영향을 준다. 따라서 실험에 사용되는 전극팁의 표면을 균일하게 하기 위해 1200번 연마지를 이용하여 표면을 연마하였다.

### 2.4 연속타점 실험

용접전류의 형태가 전극팁의 수명에 미치는 영향을 조사하기 위한 연속타점 실험은 원칙적으로 인장전단강도 시험편(L×B×t = 110×50×2 혹은 1mm)을 이용하여 수행하였다. 그러나 시험편을

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of Aluminium alloys

Alloy	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Yield Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Chemical composition (%)					
				Zn	Mg	Mn	Cr	Ti+Zr	Al
KS 5154	255-294	Min. 177	Min. 8	-	3.1-3.9	Max. 0.1	0.15-0.35	-	rest
KS 7N01	Min. 333	Min. 275	Min. 10	4.0-5.0	1.0-2.0	0.2-0.7	Max. 0.7	Max. 0.25	rest

절약하기 위해 일부 연속타점은 동일한 시험편에 최대 3번의 연속타점까지 용접을 허용하였다. 알루미늄 합금은 전기전도성이 높기 때문에 인근 용접부와의 간격이 작으면 용접품질에 영향을 주기 때문에 본 실험에서는 용접부의 간격을 참고문헌(1)에서 추천한 용접부 간격 20mm보다 큰 40mm를 유지하였다. 매 50회의 용접타점 간격에서 최소 10개의 인장전단강도 시험편이 얻을 수 있게 실험을 수행하였다.

### 3. 실험결과 및 검토

#### 3.1 용접조건이 용접품질에 미치는 영향

그림 2에는 2mm 두께의 KS5154합금을 이용한 삼상직류 용접 시 용접조건에 따른 너깃 직경과 인장전단강도의 변화를 보여주고 있다. 본 실험에서 사용한 전극팁의 끝단부는 R=100mm이었다. 용접시간은 120msec이었으며, Hold time과 Squeeze time은 각각 1800msec 이었다. 그림 2에서 너깃 직경과 전단강도는 용접전류가 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다. 너깃 직경과 전단강도는 각 조건에서 10개 시험편의 평균값을 나타내었다.

알루미늄 합금의 점용접 시 용접품질은 인장전단강도와 너깃 직경으로 결정한다. 일반적으로 요구되는 평균 인장전단강도는 알루미늄 합금 소재의 인장강도에 따라 결정되며, 평균 너깃 직경은 판재의 두께에 따라  $5\sqrt{t}$  (여기서 t는 판재 두께)로 결정된다. 따라서 2mm 두께의 판재 경우 너깃 직경은 약 7mm 가 요구되며, 이를 위한 용접조건은 용접가압력이 4.0 kN일 경우 평균 30.0 kA가 요구되었다. 이때 전단강도는 평균 5.85 kN을 나타내었으며, 표준편차는 5.5%이었다.

그림 3에는 두께 2mm KS 7N01합금의 삼상직류 용접 시 용접조건에 따른 너깃 직경과 인장전단강도의 변화를 보여주고 있다. 용접 시 기본 조건은 그림2와 같다. KS 5154합금과 같이 용접전류가 증가하면 너깃 직경과 전단강도는 동시에 증가하고 있다. 평균 너깃 직경이 7mm가 요구되는 용접조건은 용접가압력 4.0 kN의 경우 30.2 kA로 KS 5154합금과 유사하였다. 그러나 이때의 전단강도는 4.53 kN으로 5154합금보다는 낮았으며, 표준편

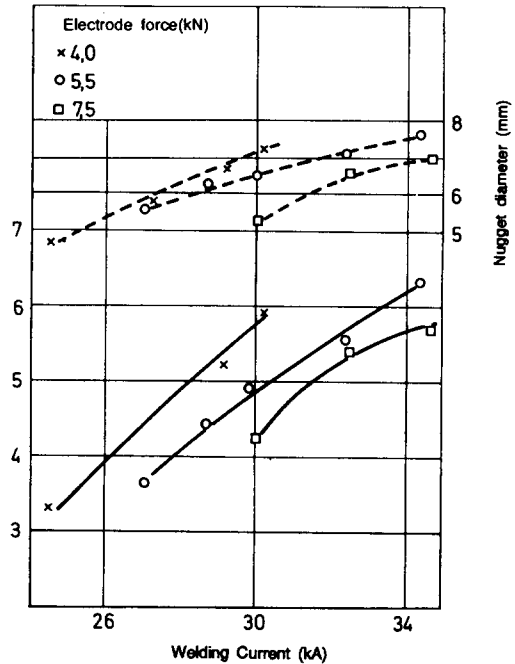


Fig.2 Effect of welding parameters on nugget diameter and tensile shear strength of KS 5154 alloy (t=2mm) in 3-phase direct current welding. (CuCrZr Electrode, R=100mm, Welding time=120msec)

차는 약 3.4%로 5154합금보다는 우수하였다.

그림 2와 3을 비교해 보면 같은 너깃 직경에서 5154합금의 전단 강도는 7N01합금의 전단강도에 비해 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 일반적으로 알루미늄 합금의 점용접 시 고강도 합금이 저강도 합금보다 높은 인장전단강도가 요구되는 기준에는 위배된다. 이와 같이 7N01합금의 전단강도가 낮은 이유는 본 합금은 시효경화에 의해 강도를 향상시킨 합금으로 용접 시 경화용 석출물이 용해되어 경화 효과가 제거되었기 때문이다. 이에 비해 5154합금은 가공경화법에 의해 강도를 향상시킨 합금으로 그 영향은 크지 않기 때문에 판단된다.

7N01합금의 용접부는 용접 후 시간이 지나면 자연시효 현상이 발생하여 3개월이 지나면 용접부의 강도도 다시 증가한다는 보고<sup>12)</sup>에 따라 본 실험에서도 용접 후 3개월간 상온에 유지하여 강도의 변화를 조사하였다. 또한 인공시효의 효과도 비교하

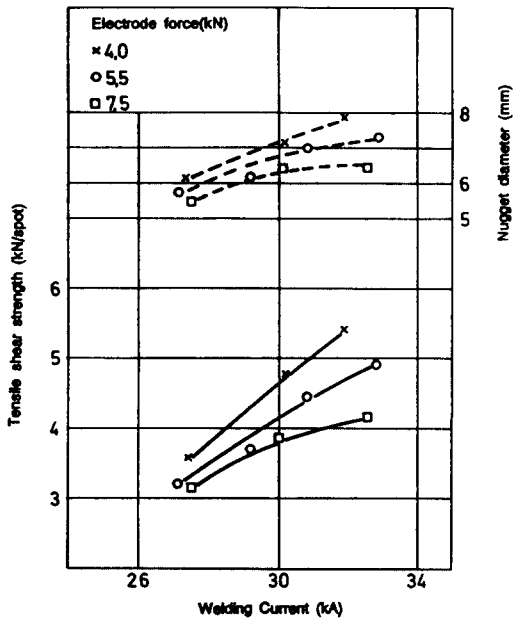


Fig. 3 Effect of welding parameters on nugget diameter and tensile shear strength of KS 7N01 alloy ( $t=2\text{mm}$ ) in 3-phase direct current welding. (CuCrZr Electrode,  $R=100\text{mm}$ , Welding time= $120\text{msec}$ )

기 위해 모재의 T6처리와 유사하게 상온에서 5일간 유지한 후  $120^\circ\text{C}$ 의 온도로 100시간 시효처리를 하였다. 시효처리 결과 3개월의 자연시효 처리한 시편의 전단강도는 약 5.96 kN, 인공시효 경우 약 6.05 kN까지 각각 증가하였다. 그러나 시효처리 후에도 5154합금에 비해 전단강도는 크게 증가하지 않았다. 따라서 알루미늄 합금의 점용접에서 요구되는 인장전단강도의 기준을 모재의 인장강도 기준하기에는 무리가 있음을 알 수 있다. 즉, 시효경화 합금은 용접에 의해 경화용 석출물이 용해되어 경화효과가 없어지며, 가공경화 합금은 용접 도중 재결정이 일어나 경화효과가 없어져 용접부의 강도는 모재의 강도보다 낮아지게 된다.

그림 4에는 2mm 두께 5154합금의 교류용접 시 용접조건에 따른 너깃 직경과 인장전단강도의 변화를 나타내었다.

교류용접의 경우도 직류용접과 마찬가지로 전류가 증가함에 따라 너깃 직경과 인장전단강도는 증가하였다. 평균 너깃 직경 7mm를 얻기 위한 용접

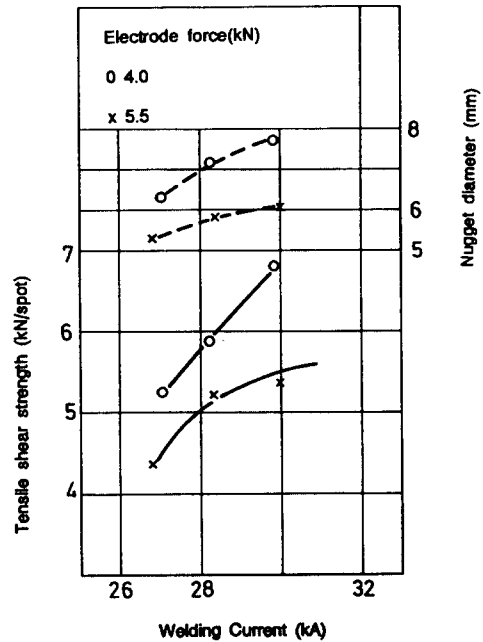


Fig. 4 Effect of welding parameters on nugget diameter and tensile shear strength of KS 5154 ( $t=2\text{mm}$ ) alloy in alternating current welding. (CuCrZr Electrode,  $R=100\text{mm}$ , Welding time= $120\text{msec}$ )

전류는 용접가압력 4.0 kN의 경우 28.2 kA가 필요하였다. 이때 전단강도는 약 5.87 kN을 나타내었으며, 표준편차는 2.1%이었다.

직류용접과 비교할 때 같은 너깃 직경을 얻기 위한 용접전류는 약 2 kA 정도 낮았다. 이러한 결과는 기 보고된 논문<sup>5,10</sup>과는 반대 결과를 나타내었다. 이러한 차이는 사용된 용접기의 전원 용량 차이 때문으로 판단된다. 교류용접기의 용접전류의 크기는 기본 용접파형에서 필요한 만큼 잘라 사용하기 때문에 극성이 바뀔 때마다 전류가 흐르지 않는 "중단시간"이 필요하다. 용접기의 용량이 용접 전류에 비해 매우 큰 경우 중단시간이 길게 된다 (그림5 참조). 알루미늄 합금의 경우 열전도도가 높기 때문에 용접전류에 의해 발생한 용접열은 중단시간 동안 모재로 전달되어 실제 용융에는 더 많은 용접열이 필요하다. 그러나 본 실험에 사용된 용접기의 용량은 필요한 용접전류에 비해 높지 않기 때문에 중단시간이 거의 없어 용접도중의 용접열 손실은 발생하지 않은 것으로 판단된다.

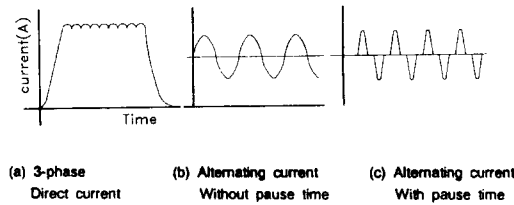


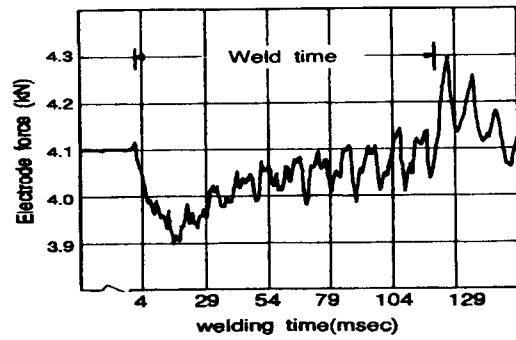
Fig. 5 Typical patterns of welding current

너깃의 형상을 비교할 때 교류용접의 경우는 너깃이 직류용접보다 비대칭적으로 형성되었다. 예를 들어 용접가압력 4.0 kN과 용접전류 28 kA 경우 너깃형상은 시편의 길이 방향으로 6.5mm, 폭 방향으로 7.8mm가 관찰되었다. 비대칭적인 너깃 형성은 교류용접 시 용접가압력의 변동 폭이 크기 때문으로 판단된다. 즉, 용접 시 용접장비에 전류가 흐르면 자장이 발생하여 판재를 누르는 Arm에 영향을 주게되어 용접가압력이 변하게 되며, 교류용접의 경우 전류 흐름이 계속 바뀌게 되어 용접가압력의 변동 폭은 크게된다. 본 실험에서는 용접가압력의 변화를 관찰하기 위하여 Piezoelectric 효과를 이용한 압력측정기를 사용하였다. 압력을 측정기를 이용하여 전압으로 변화시킨 다음 최대 200kHz의 속도를 가진 12bit A/D 변환기와 컴퓨터를 이용하여 용접 시 변화를 측정하였다. 측정된 결과 용접가압력이 4.0 kN 경우 교류용접 시의 변동 폭은  $\pm 1.2$  kN이나, 직류용접에서는  $\pm 0.2$  kN을 나타내었다(그림 6 참조).

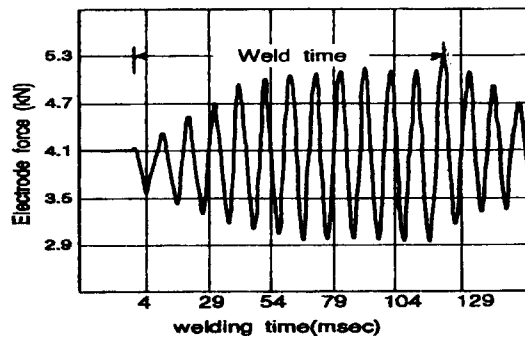
두 전극사이에 알루미늄 판재를 두고 용접가압력을 가하면 용접장비의 Arm은 미세하나마 용접가압력에 비례하여 용접장비의 전면으로 밀리게 된다. 판재의 표면으로부터 2mm 높은 지점에서 측정된 결과 용접가압력 4.0kN의 경우 0.45mm의 밀림이 관측되었다. 직류 용접 시에는 용접가압력의 변화가 작아 전극이 거의 일정한 위치에 있게 되나, 교류용접 시에는 가압력의 변화가 크기 때문에 용접전극의 상대적 위치가 많이 변하게 되어 너깃의 형상이 비대칭으로 나타났다고 판단된다.

그림 7에는 1mm두께 KS5154 합금의 삼상직류 및 교류 용접 시 용접조건이 용접품질에 미치는 영향을 나타내었다. 이때 용접시간은 60msec 이었으며, 전극팁의 끝단부 형상은 R=75mm 이었다.

삼상직류 용접의 경우 1mm판재에서 요구되는



(a) 3-phase DC welding



(b) AC welding

Fig. 6 Variation of electrode force depending on welding current type. (CuCrZr electrode, R=100mm, Welding time=120msec, Welding current=30kA)

평균 너깃 직경 5mm를 얻기 위한 용접전류는 용접가압력 4.0 kN에서 약 25 kA이었으며, 이때 전단강도는 약 2.7 kN이었다. 같은 너깃 직경을 얻기 위한 교류용접 조건도 직류용접과 비슷한 수준이었다. 그러나 용접가압력이 3 kN인 경우는 Expulsion현상 때문에 건전한 용접부를 얻을 수 없었다. 이는 앞에서 설명한 과대한 용접가압력의 변동과 높은 Peak전류 때문으로 판단된다. 교류용접의 경우 유효전류 26kA를 얻기 위한 Peak전류는 38.7kA를 나타내었으나 3상 직류용접의 Peak 전류는 27.5kA에 불과하였다. 높은 Peak전류는 용접 시 용융부에 순간적인 과열을 발생시키며, 용접가압력의 변동에 따라 Expulsion이 나타날 가능성을 높이게 된다.

같은 너깃 직경에서 2mm판재와 1mm판재를 비

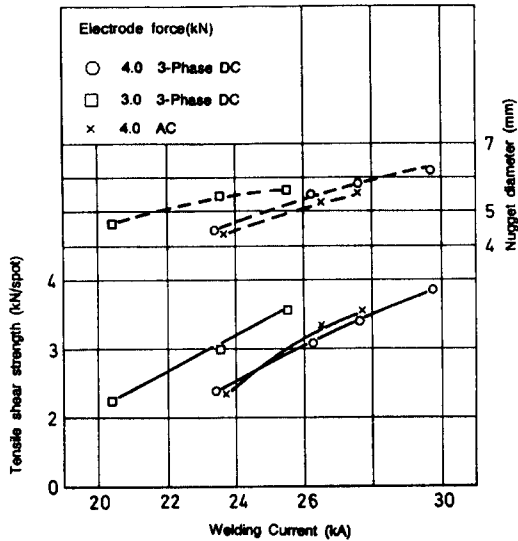


Fig. 7 Effect of welding parameters on nugget diameter and tensile shear strength of KS 5154 (t=1mm) alloy with 3-phase DC and AC welding current. (CuCrZr Electrode, R=75mm, Welding time=60 msec)

교할 때 1mm판재가 낮은 인장전단강도를 나타내었다. 이러한 차이는 점용접부의 인장전단 시험이 모재 두께의 강성에 영향을 받기 때문이다. 즉, 얇은 판재의 경우 전단 시험 시 시험편에 Bending이 발생하여 실제 강도가 낮게 나타난다.

인장전단시험 시 파손형상은 판재의 두께에 따라 차이를 보이고 있었다. 1mm판재의 경우 너깃 직경에 따라 소위 "Button fracture"와 "Shear fracture"가 동시에 관찰되었으나, 2mm판재의 경우는 Shear fracture만 관찰되었다. 일반적으로 Steel의 점용접 시에는 용접품질의 안정성을 간단히 파손형상으로 판별하여, Button fracture가 나타나면 우수한 용접품질로 판별한다. 이러한 관점에서 볼 때 2mm 두께의 본 실험 결과는 만족스럽지 못한 것으로 판단될 수 있다. 이를 확인하기 위해 용접전류를 높여 너깃 직경을 9mm 까지 만들어 인장전단 시험을 하였다. 그러나 이 경우에도 역시 파손형상은 Shear fracture이었다. 이에 비해 1mm 판재에서는 너깃 직경에 따라 파손형태가 달라짐이 관찰되었다. 즉, 너깃 직경이 5.6mm 이상에서는 Button fracture가 관찰되었으나, 그 이하에서는

Shear fracture가 관찰되었다. 이러한 결과를 볼 때 Steel의 점용접부와 달리 알루미늄의 점용접부의 용접품질은 단순히 인장전단 시험의 파손형상으로 판단할 수 없음을 알 수 있다.

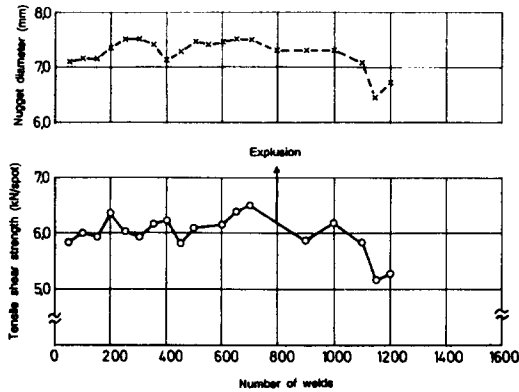
인장전단 시험 이외에 점용접부의 건전성을 평가하는 또 다른 방법으로 Peel시험법이 있다. 이 방법은 현장에서 용접부의 건전성을 판별하는 간단한 방법으로 많이 사용된다. 2mm판재를 Peel 시험한 결과 너깃 직경이 7mm 경우 전단시험과 달리 Button fracture가 관찰되었다.

### 3.2 용접조건이 전극팁 수명에 미치는 영향

용접전류의 형태가 전극팁의 수명에 미치는 영향을 조사하기 위하여 본 실험에서는 2mm판재를 사용하여 용접가압력 4.0 kN 및 용접시간 120msec의 용접조건으로 용접하였다. 전극팁으로는 끝단부가 R=100인 것을 사용하였다. 전극팁의 수명은 동일 전극팁으로 계속 용접하면서 용접부의 표면상태가 불량한 시점과 인장전단강도나 혹은 너깃 직경이 기준에 미달한 것을 기준하였다.

그림 8에는 KS5154합금의 삼상직류 용접 시 용접타점이 증가함에 따른 너깃 직경과 전단강도의 변화를 보여주고 있다.

최초 용접 시 너깃 직경은 7.07mm이었으며, 전단강도는 5.85 kN을 나타내었다. 용접이 진행됨에 따라 너깃 직경은 약간 증가하다가 일정한 직경으로 계속 머물렀다. 이와 같이 최초의 너깃 직경이 증가하는 것은 용접하면서 전극팁의 끝단부에 변형이 약간 일어나 실제 판재와의 접촉면적이 증가하였기 때문으로 판단된다. 약 800회 정도의 용접이 진행된 후 양극 전극팁과 판재의 접촉부위에서 최초로 Expulsion이 발생하였다. 그러나 계속된 용접에서는 Expulsion이 발생하지 않았다. 용접수가 1100회가 지남에 따라 Expulsion은 수시로 발생하였으며, 이에 따라 인장전단강도도 낮아지고 너깃 직경도 작아지기 시작하였다. 특히 문제가 되는 것은 용접부 품질의 표준편차가 증가하는 것이었다. 용접수가 1000이하에서는 인장전단강도의 표준편차가 3.2-7.2%이었으나, 용접수가 1000-1100사이에서는 인장전단강도가 5.82 kN 및 표준편차가 10.2%로 증가하며, 1100회가 지나서는 전

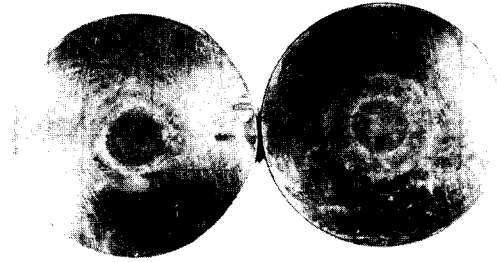


**Fig. 8** Tensile shear strength and nugget diameter depending on number of welds in 3-phase direct current welding of KS5154 alloy. (CuCrZr Electrode, R=100mm, Electrode force=4.0kN, Welding time=120msec, Welding current=30kA)

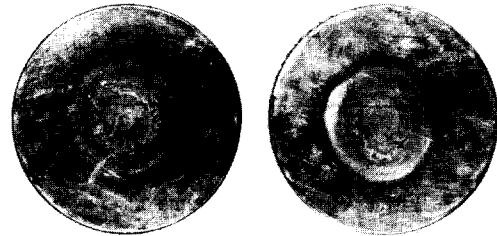
단강도가 5.15 kN 및 표준편차가 14.2%를 나타내었다. 따라서 본 실험에서는 수시로 발생하는 Expulsion과 너깃 직경 및 인장전단강도의 변화를 고려하여 시험을 중단하였다.

사진1에는 용접수에 따른 전극팁 표면의 변화를 보여주고 있다. 용접수가 15번 경우 양극 전극팁에서 최초로 반원 형태의 미세한 손상이 발생하였으며, 용접이 진행함에 따라 이 손상은 계속 증가하였다. 용접수가 80회가 지난 사진 (a)에서는 전극팁 표면의 손상이 명확히 관찰되었다. 양극에 비해 음극에서는 전극팁의 손상이 관찰되지 않았다. 약 200회가 지난 전극팁 표면(사진 b)에서는 양쪽 전극팁에서 표면손상이 발생하였으며, 특히 양극의 손상이 음극보다 많음을 알 수 있다. 이러한 양극과 음극 전극팁의 손상 차이는 알루미늄 합금의 용접 시 발생하는 현상으로 다른 논문에서도 보고되었다<sup>5,7,10</sup>. 그 원인으로서는 전류가 이종금속 간의 접촉부위에 흐를 때 전류방향에 따라 발생하는 열량이 차이가 나는 소위 "Peltier" 효과 등의 Thermo-electric 효과 때문으로 알려져 있다<sup>13</sup>.

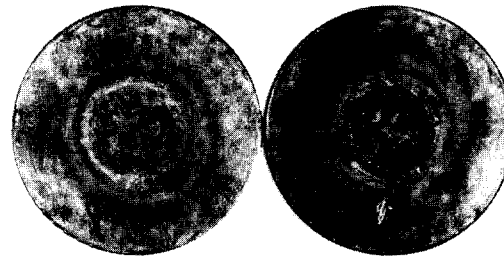
사진2에는 용접수에 따른 용접부 내부의 조직변화를 보여준다. 일반적으로 알루미늄 합금의 점용접부는 내부에 기공 등의 용접 불량률이 많이 발생하며, 이는 판재의 강도가 높을수록 더욱 많이 발생한다<sup>3</sup>. 이 기공은 용접부 전체의 1/3이 넘지 않음



(a) After 80 welds



(b) After 200 welds



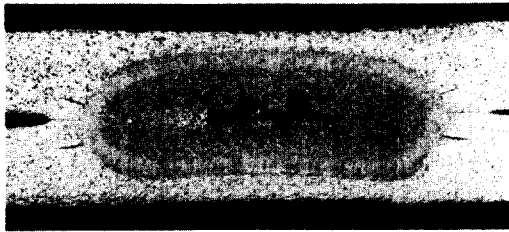
(+) (c) After 1200 welds (-)

**Photo 1.** Damage of electrode depending on number of welds in 3-phase direct current welding of KS 5154 alloy. (CuCrZr Electrode, R=100mm, Electrode force=4.0kN, Welding time=120msec, Welding current=30.0kA)

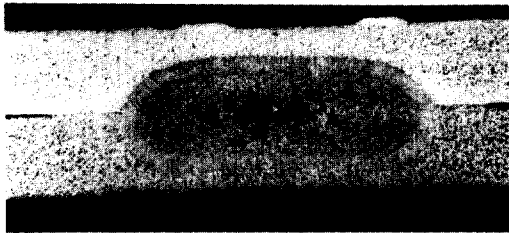
면 용접부의 강도에는 영향을 주지 않는다.

이 사진에서 보면 최초 용접 시에는 용접부 기공이 적게 발생하나 용접수가 증가함에 따라 기공의 양은 점차 증가하고 있음을 알 수 있다. 최종 용접부인 1198회에서는 용접부의 기공이 전체 용접부의 약 21%까지 차지하였다.

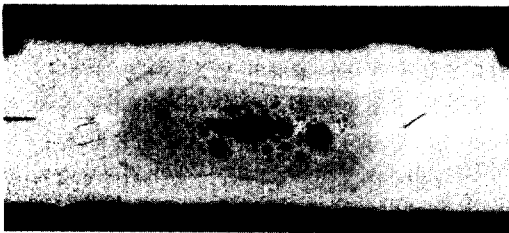




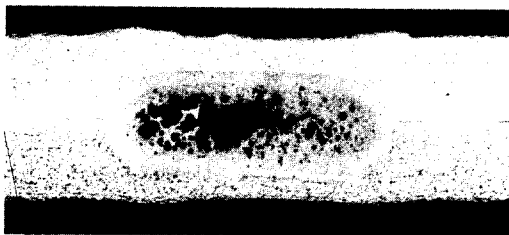
(a) 47th Welds



(b) 455th Welds



(c) 986th Welds

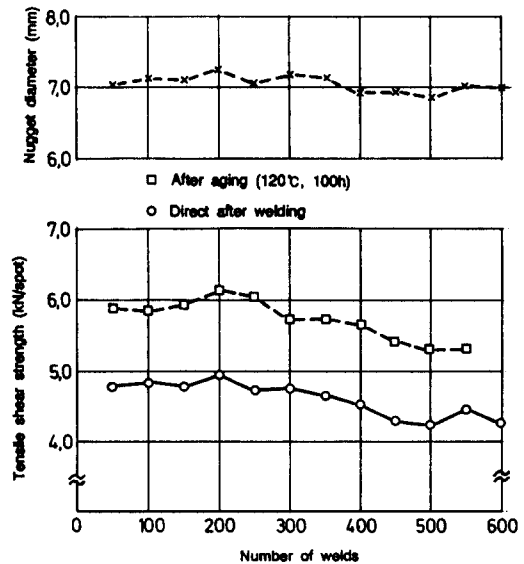


(d) 1198th Welds

**Photo 2.** Effect of number of welds on macrostructure in 3-phase direct current welding of KS 5154 alloy. (CuCrZr Electrode, R=100mm, Electrode force=4.0kN, Welding time=120msec, Welding current=30.0kA)

그림 9에는 KS7N01합금 2mm판재의 삼상직류용접 시 용접수의 증가에 따른 인장전단강도와 너깃 직경의 변화를 나타내었다. 본 실험에서 사용한 용접조건은 용접가압력은 4.0 kN, 용접전류는 30.5 kA, 전극팁은 KS5154합금과 같은 것이었다. 전단강도는 용접 직후와 120℃에서 100시간 시효 처리한 후의 결과를 동시에 나타내었다.

최초 용접 시 인장전단강도는 시효처리 전에 4.76 kN을 나타내었으며, 너깃 직경은 7.1mm이었다. 용접수가 증가함에 따라 전단강도와 너깃 직경은 약간 증가하였다. 용접수가 200회가 지날 때 너깃 직경은 7.25mm, 전단강도는 4.9 kN을 각각 나타내었으나, 이들은 그후 용접수가 증가함에 따라 조금씩 감소하기 시작하였다. 이러한 경향은 시효 처리한 시편에서도 동일하게 관찰되었다. 용접수 500회가 지난 후 너깃 직경은 6.7mm, 전단강도는 4.25 kN을 나타내었으며, 전단강도의 평균편차는 7.5%이었다. 본 용접은 낮은 인장전단강도와 Expulsion의 발생빈도가 높아 용접수 600회에서 중단하였다.



**Fig. 9** Tensile shear strength and nugget diameter depending on number of welds in 3-phase direct current welding of KS7N01 alloy. (CuCrZr Electrode, R=100mm, Electrode force=4.0kN, Welding time=120msec, Welding current=30.5kA)

그림8과 그림 9을 비교하면 5154합금의 경우가 7N01합금보다 전극팁의 수명이 긴 것을 알 수 있으며, 이는 두 합금의 모재 강도와 용융점 차이 때문으로 판단된다. 일반적으로 알루미늄 합금의 점용접 시 요구되는 용접가압력은 모재강도가 높을수록 높은 값을 요구한다. 따라서 7N01합금의 용접 시 높은 용접가압력이 요구되며, 용접수가 증가하여 용접부의 마모가 일어나면 실제 용접부에 작용하는 가압력이 낮아져 전극팁과 판재의 접촉부위에서 쉽게 Expulsion이 일어난다. 또한 7N01합금의 용융점이 5154합금보다 낮아 전극팁과 판재사이의 Pick-up이 발생하기 쉽다.

그림10에는 두께 2mm KS5154합금을 교류용접한 경우의 용접수 증가에 따른 너깃 직경과 전단강도의 변화를 보여준다. 교류용접을 직류용접과 동일한 조건에서 비교하기 위하여 전극팁과 용접가압력은 직류용접과 동일하게 선정하였으며, 용접전류는 전단강도와 너깃 직경을 직류용접과 동일하게 얻기 위해 28.2 kA로 선정하였다.

교류용접 시에도 직류용접과 유사하게 초기에는 용접수가 증가함에 따라 인장전단강도와 너깃직경은 약간 증가하였다. 용접수 50회까지는 인장전단강도가 5.68 kN, 너깃 직경은 7.18mm를 나타내었으나, 200회가 지난 후 전단강도는 6.55 kN, 너깃

직경은 7.49mm를 나타내었다. 이 값들은 용접수가 800회가 지나면서 약간씩 감소하기 시작하였다. 용접수 1200회부터 1400회까지 감소한 전단강도는 1400회가 지남에 따라 다시 약간 증가하였다. 이와 같이 감소하던 전단강도가 다시 증가하는 현상은 일반 Steel용접에서 흔히 나타나는 현상으로 소위 "자연치유"로 알려져 있다. 본 실험은 용접수 1600회까지 너깃직경과 전단강도의 변화가 나타나지 않아 중단하였다.

그림8과 그림10을 비교할 때 직류용접보다 교류용접의 전극팁 수명이 길다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 다른 논문<sup>10)</sup>과 반대의 결과이며, 그 이유는 앞에서 설명한 바와 같이 사용 용접기의 용량차이 때문으로 판단된다. 교류용접기의 용량이 필요 용접전류보다 과도하게 크게 되면 용접중단 시간이 길어 동일한 너깃을 얻기 위해 높은 용접전류가 필요하다. 따라서 전극팁은 높은 열응력을 받아 쉽게 손상된다. 그러나 본 실험에 사용된 용접기와 같이 용량이 크지 않으면 용접중단시간이 극히 짧아(그림 5 참조) 동일한 너깃을 얻기 위해 직류용접과 유사한 용량의 용접전류로 족하다.

동일한 용접전류를 사용할 경우 교류용접에 사용된 전극팁의 수명이 직류용접보다 유리하다. 그 이유는 Photo 1에서 보는 바와 같이 직류용접의 경우 양극 전극팁이 우선적으로 마모되어 전체 용접 품질에 영향을 미치기 때문이다. 직류용접과 달리 교류용접의 전극팁은 양쪽 전극이 균일하게 마모되었다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 알루미늄 합금의 점용접 시 용접전류의 형태가 용접품질과 전극팁의 수명에 미치는 영향에 대해 검토하였다. 이를 위해 KS5154합금과 KS7N01의 판재를 이용하여 교류용접과 삼상 직류용접을 행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 같은 너깃 직경을 얻기 위한 용접조건은 교류용접과 직류용접 두 경우 모두 큰 차이는 보이지 않았다.

(2) 교류용접의 경우 너깃 형상은 직류용접에 비해 비대칭을 나타내었다.

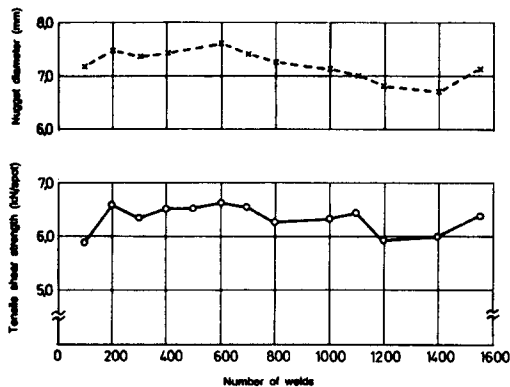


Fig. 10 Tensile shear strength and nugget size with number of welds in alternating current welding of KS5154 alloy. (CuCrZr Electrode, R=100mm, Electrode force=4.0kN, Welding time=120msec, Welding current=28.2kA)

(3) 두께 1mm 판재의 교류용접 시 낮은 용접가압력의 조건에서는 Expulsion이 많이 발생하여 건전한 용접부를 얻을 수 없었다.

(4) 전극팁 수명은 교류용접의 경우가 직류용접보다 길었다. 이는 직류용접의 경우 양극 전극팁이 음극보다 마모가 빨리 일어나 전체 용접품질을 저하시키기 때문이다.

(5) 전극팁 수명은 너깃 직경이나 전단강도의 감소보다는 전극팁 표면의 심한 마모에 따른 전극팁 표면과 판재의 접촉부에서 나타나는 Expulsion과 이에 따른 용접 품질의 불균일에 의해 결정되었다.

(6) 전극팁 수명은 KS 7N01합금의 용접보다 KS 5154합금의 용접이 길게 나타났다. 이는 KS 7N01합금의 용접 시 높은 용접가압력이 요구되기 때문에 용접 도중 전극팁 끝단부 마모가 용접가압력에 더욱 많은 영향을 미치기 때문으로 판단된다.

(7) KS 7N01합금은 모재의 강도는 KS 5154합금보다 높으나 용접부의 강도는 오히려 낮았다. 따라서 알루미늄 합금의 점용접에서 요구되는 인장전도강도의 기준을 모재의 인장강도로 기준하기는 무리가 있음을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. AWS, Welding hand book volume 3, (1996)
2. J. Ruge : Handbuch der Schwesstechnik, Springer verlag Berlin Heidelberg New York 1980
3. L. Dorn : Widerstandspunktschweissen von Aluminiumwerkstoff, Teil 1: Blech Rohre Profile, 13(1981), pp25-29, Teil 2: Blech Rohre Profile, 13(1981), pp30-35
4. N. F. Budailov : Method of increasing the durability of electrodes in the resistance spot welding of thin sheets of aluminium alloys, Weld. Prod., vol. 2, (1980), pp37-39.
5. W. Dilay, E. A. Rogala and E. J. Zubinski : Resistance Welding aluminium for automotive Production, (1977), SAE Paper 77030
6. E. Ostgaard : Spot Welding aluminium as delivered, Metal Const., 12, (1980), pp78-86
7. F. R. Hoch : Joining of aluminium alloys 6009/6010, (1978), SAE Paper 780396
8. I. F. Knobloch : Widerstandsschweissen grossflaechiger Werkstuecke mit Gleichrichter schweissmaschinen, Werkstatt und Betrib, 112, (1979), pp111-115
9. O. Gengenbach : Der Sekundaerstromkeis bei Widerstandsschweissenmaschine, DVS Fach-buchreich 35, Schweisstechnik, 1962, pp35-61
10. M. Emonts : Beitrag zum Widerstandspunktschweissen- und Buckelschweissen von Aluminiumwerkstoffen unter besonderer beruecksichtigung der Stromform, Dissertation RWTH Aachen, 1977
11. DVS, Widerstandsschweissen, Messen des Uebergangswiderstandes an Aluminiumwerkstoffen, Merkblatt DVS 2929, 1983
12. T. Tomoto, A. Sakaguchi, T. Tanaka and S. Sababe : Journal of Light Metal Welding and Construction, 2, (1979), pp51-62
13. H. D. Wendler, W. Scheel and A. Pause : Der Einfluss des Peltier-Effekts auf die Linsenausbildung beim Widerstandspunktschweissen, ZIS-Mitt., 10, (1968), pp446-456