알루미늄 합금 6061에 대한 저항 점용접의 용접성에 미치는 전극 반경과 가압력의 영향

조형근* · 김영민* · 강문진* · 김동철*,†

*한국생산기술연구원 용접접합그룹

Effects of Electrode Face Radius and Force on Resistance Spot Weldability of Aluminium Alloy 6061

Hyeong-geun Jo*, Young-Min Kim*, Moon-Jin Kang*, and Dong-Cheol Kim*,†

*Korea Institute of Industrial Technology, Incheon, 21999, Korea

†Corresponding author : dckim@kitech.re.kr

(Received August 16, 2018 ; Revised October 29, 2018 ; Accepted November 13, 2018)

Abstract

Recently, with automobile body weight reduction trend, aluminium alloy sheets are introduced to automotive moving parts such as hood, trunk, and tailgate. Researches about joining technologies on aluminium alloy sheet are necessary. However aluminium alloy has many troubles with spot weldability. In this study, we evaluate effects of electrode face radius and electrode force on weldability of resistance spot welding of aluminium alloy 6061. The two electrode face radius conditions showed the same acceptable welding current range to produce acceptable spot welding quality. However, high electrode force showed larger welding current process window than low electrode force in resistance spot welding of aluminium alloy 6061

Key Words : Resistance spot welding, Aluminium alloy, Electrode face radius, Radius type electrode, Electrode force

1. 서 론

자동차 업계는 배기가스 배출 저감과 연비 향상을 목표로 차체 경량화를 추진하고 있다¹⁾. 차체 경량화 방법으로는 고강도 소재 적용하여 두께를 감소시키는 방법과 알루미늄, 마그네슘, 복합소재 같은 경량 소재를 적용하는 방법으로 크게 나눌 수 있다²⁾. 국내의 차체 경량화 방향은 주로 고강도강 및 초고강도강 적용을 확대하는 방향으로 진행되어 왔고, 이런 강종에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 이런 원인으로는 국내 완성차 업체가 해외 자동차 업체에 비교하여 상대적으로 고강도강 및 초고강도강 적용에 우선했던 결과라고 생각된다.

그러나 최근에는 국내 완성차 업체에서도 경량소재인 알루미늄 합금 적용을 확대하고 있다. 기존에는 주로 고

급차종에만 적용된 알루미늄 합금을 하이브리드(hybrid) 자동차 및 전기자동차 부품에 확대 적용하고 있다. 대표적인 부품으로 후드, 트렁크, 테일 게이트 등이다³⁾.

알루미늄 합금의 적용 확대에 따라 자동차 자체 부품에 조립에 가장 많이 적용되는 저항 점용접 공법에 대한 연구가 필요한 상황이다. 그러나 일반강 또는 고강도강 저항 점용접에 대한 많은 연구 결과가 발표되었지만 알루미늄 합금에 대한 저항 점용접에 대한 국내 연구 실적은 매우 부족할 뿐만 아니라, 현재 국내의 몇 개 업체에서 알루미늄 부품을 제작하는 데 사용되는 용접용 로봇, 용접 타이머, 용접 변압기, 용접 건, 전극 드레서 등 거의 모든 장비가 해외 선진사 제품을 사용하고 있는 상황이다.

M.Kondo 등은 알루미늄 합금 5022, 두께 1.0mm, 전극 가압력 2.95kN, 전극 선단 직경과 반경은 각각

6mm와 40mm인 돔형 전극 조건에서 2500타점까지 전극 수명 평가를 수행하였다⁴⁾. 이들 연구의 문제점은 가압력이 작고, 특히 전극을 돔형전극을 사용하여 용접을 수행한 것으로 알루미늄 용접에 적합하지 않는 전극으로 용접을 수행한 것이다. 전극 선단 직경이 작은 돔형 전극인 경우 알루미늄 점용접 시 전류 통전 경로의 불균일성으로 인해 용접품질에 영향을 준다. 이런 문제점으로 인해 AWS C1.1⁵⁾에 따르면 알루미늄 합금 두께 1.6mm일 경우 저항 점용접용 전극은 래디우스(radius)형으로 전극 선단 반경은 76mm, 전극 가압력은 3.34kN을 추천하고 있다. M. Rashid 등은 알루미늄 합금 5182 점용접 너깃 형성에 대한 연구에서 래디우스(radius)형 전극으로 선단 반경은 50mm 전극을 사용하였고 전극 가압력은 6kN을 사용하였다⁶⁾. D.R. Sigler 등은 자체 개발한 전극 선단부 형상에 대하여 다양한 전극 소재 종류에 따른 저항 점용접 특성을 평가하였다⁷⁾. 기존 전극에 비교하여 이들이 제시한 전극은 전극 표면에 일정한 형태의 동심원을 바이트 가공을 통하여 부여하여 알루미늄 소재 표면에 분포하고 있는 알루미늄 산화물로 인한 용접성 저하 문제를 해결할 수 있다고 하였다. 알루미늄 저항 점용접의 적용상의 가장 큰 장애요인은 연속 용접 시 구리 합금 전극과 알루미늄 합금 판재 사이의 부착(sticking)현상 으로 인해 잦은 팁 드레싱을 수행해야 한다는 것이다^{3,7)}.

알루미늄 합금 저항 점용접이 강판 용접과 강장 큰 차이점은 30~40kA의 높은 전류를 사용하는 것 외에도 전극 가압력은 2배 정도이고 전극형상도 래디우스(radius)형의 선단 반경이 큰 전극을 사용한다는 것이다. 전극 선단 반경이 클수록 알루미늄 시트 표면과 접촉하는 면적을 크게 하여 전류가 흐르는 영역을 크게 하여 더 큰 너깃 직경을 확보할 가능성이 있다. 그러나 전극 형상 및 가압력을 고려한 체계적인 연구가 진행되지 않았다.

본 연구에서는 래디우스(radius)형 전극을 사용하여 전극 선단 반경 변화 및 가압력 변화에 따른 알루미늄 합금의 저항 점용접 특성에 관하여 고찰하였다.

Table 1 Chemical compositions of AA6061-T6 (wt%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.595	0.392	0.237	0.035	1.061	0.188	0.002	0.035	Rem

Table 2 Mechanical properties of AA6061-T6

Y.S. (MPa)	T.S. (MPa)	EL. (%)
303	342	11

2. 사용 소재 및 장비

2.1 사용 소재

본 연구 사용한 점용접 소재는 알루미늄 합금 6061-T6, 두께 1.5mm 판재였다. Table 1, 2에 알루미늄 합금의 화학 성분과 물리적 특성을 나타내었다.

2.2 용접 장비

알루미늄 합금은 짧은 시간 내에 대전류를 인가하여 용접해야 하므로 이에 적합한 Harms wende사의 MFDC (Medium frequency direct current) 인버터 저항 점용접기를 사용하였다. 또한 알루미늄 합금 저항 점용접은 강판용접과 비교하여 높은 가압력을 인가하여 용접을 수행해야 한다. 전극 가압력은 나우테크사의 서보 가압제어형 용접건을 사용하였다.(Fig. 1)

저항 점용접용 전극 소재는 일반적으로 강판의 점용접에 적용하고 있는 RWMA Class 2 크롬동(Cu-0.8Cr) 전극을 사용하였다. 전극의 도전율은 78.45%였고 경도는 HRB 76이었다. 일반적으로 강판에 적용된 전극은 돔형 전극을 사용하지만 알루미늄 합금에 사용되는 전극은 래디우스(radius)형이 사용된다⁵⁾. 본 연구에서는 전극 직경이 20mm이고 선단 반경이 50mm(R50)와 75mm(R75)인 전극에 대하여 용접성 평가를 수행하였다. Fig. 2는 전극을 절단한 단면을 보여주고 있다. 알루미늄 저항 점용접에 사용하는 전극의 직경이 강판 점용접에 사용하는 전극의 직경(약 16mm)에 비

Fig. 1 Resistance spot welding gun

Fig. 2 Radius type electrode

해 큰 이유는 알루미늄 점용접시 용접 전류를 약 5배 이상 높은 전류를 사용하기 때문에 전극에서의 발열을 최소화할 필요가 있기 때문이다.

3. 실험 방법

2.2절에서 선정된 R50, R75 크롬동 전극을 사용하여 알루미늄 합금 6061-T6에 대하여 저항 점용접을 수행하였다. 저항 점용접에 사용된 시험편은 KS B0851에 따라 40×125mm의 사이즈를 사용하였다. 용접 전 소재는 특별한 전처리 없이 용접을 수행하였다. 저항 점용접은 각 조건에 대해 5회 수행하였고 2개 시험편에 대하여 매크로시험을 수행하여 용접부 너짓 직경 데이터를 확보하였으며, 나머지 3개 시험편에 대하여 용접부 인장전단시험을 수행하였다. 그리고 알루미늄 합금의 저항 점용접인 경우, 높은 전류에서는 알루미늄 소재와 전극 사이의 합금화로 인해 소재와 전극이 서로 부착(sticking)하는 현상이 발생하므로 이와 같은 전극 표면의 불균일성으로부터 발생하는 문제점을 제거하기 위해 고전류 영역에서는 매 용접마다 전극을 드레싱한 후 용접을 수행하였다. 전극 가압력이 400kgf 인 경우에 대하여 R50과 R75 전극에 대하여 Table 3과 같은 용접 조건에서 용접을 수행하였으며, 전극 가압력이 600kgf 인 경우에 대하여는 Table 4와 같은 용접조건에서 용접을 수행하였다.

저항 점용접에서 너짓 직경 최소 요구조건은 일반적으로 $4\sqrt{t}$ 또는 $5\sqrt{t}$ 로 결정되고 본 연구에서는 보다 엄격한 $5\sqrt{t}$ 로 하였다.

Table 3 Experimental welding conditions for electrode force 400kgf

Electrode force (kgf)	400
Welding current (kA)	26, 28, 30, 32, 34, 36
Welding time (ms)	50, 83

Table 4 Experimental welding conditions for electrode force 600kgf

Electrode force (kgf)	600
Welding current (kA)	28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42
Welding time (ms)	50, 83

4. 결과 및 분석

4.1 전극 가압력 400kgf에서의 점용접 특성

알루미늄 합금 저항 점용접은 강판의 점용접과 비교하여 높은 전류 및 높은 가압력을 사용한 반면에 용접 시간은 짧은 시간에 이루어져야 양호한 용접 특성을 확보할 수 있다. 적절한 용접시간 조건을 결정하기 위해 용접전류를 고정시킨 후, 용접시간을 변화시키면서 용접을 수행하였다. 두 전극 R50과 R75에 대하여 용접 전류를 32kA로 고정시키고 용접시간을 17ms, 33ms, 50ms, 67ms, 83ms, 100ms (1cycle~6cycles)로 변화시키면서 점용접을 수행하였고 그 결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 3은 용접전류 32kA로 고정하고 용접시간을 증가할 경우 점용접부 너짓 형성과정을 보여주고 있다. 용접부 단면에서 하부 알루미늄 판은 전극의 (+)극과 접촉한 부분이고 상부 알루미늄 판은 전극의 (-)극과 접촉한 부분이다. 대부분 너짓 형상으로부터 (+)전극 쪽으로 너짓의 성장이 많이 되었다는 것을 알 수 있다. 이는 Peltier 효과로 발생하는 현상으로 알루미늄 저항 용접 시 (-)극 대비 (+)극에서 열 발생량이 많기 때문이다. Fig. 4는 용접시간 증가에 따른 너짓 직경 변화

Fig. 3 Weld nugget cross-section with increasing weld time

Fig. 4 Weld nugget diameters with increasing weld time

를 보여주고 있다. R75인 경우 용접시간 33ms에서 이미 너깃 직경 요구조건을 만족시키고 있다는 것을 알 수 있고, 50ms까지 너깃 사이즈가 급속히 증가하고 이후 증가량이 둔화되고 있다는 것을 알 수 있다. 본 실험에서 전극이 R50인 경우에는 100ms로 용접할 경우 날림이 발생하였다. 알루미늄 합금의 저항 점용접은 높은 전류에서 용접을 수행하기 때문에 전극과 소재 사이의 용착을 방지하기 위해서는 가능한 용접전류는 낮고 용접시간이 짧은 용접조건을 확보할 필요가 있다. 이후 점용접 실험에서는 용접시간을 50ms와 83ms로 고정하고 다양한 용접전류 조건에서 용접을 수행하였다.

Fig. 5는 전극 가압력이 400kgf일 경우 전극 R50과

R75을 이용한 저항 점용접 용접부 단면과 너깃 직경을 보여주고 있다. 적정 용접전류 하한경계는 너깃 직경의 $5\sqrt{t}$ 를 적용하였고, 상한경계는 날림이 발생하는 조건으로 하였다. R50과 R75 전극에 대하여 모두 용접전류가 증가할수록 그리고 용접시간이 증가할수록 용접 너깃 직경이 증가하는 경향을 보여주고 있다. R50과 R75 전극에 대하여 용접시간이 50ms인 경우에는 30kA~34kA의 범위에서, 83ms인 경우에는 28kA~34kA의 범위에서 너깃 요구조건을 만족시키면서 날림이 발생하지 않는 용접전류 적정구간을 보여주었다. 전극 가압력이 400kgf의 조건에서는 본 연구에서 설정한 전극 선단의 두 반경 조건에서 용접전류 적정구간은 동일한 결과를 보여주고 있다. 날림이 발생한 용접전류 조건에서는 너깃 직경이 증가한 경우도 있고 감소한 경우도 있어 불규칙적인 현상을 보여주었다.

Fig. 6은 전극 가압력이 400kgf일 경우 전극 반경 R50과 R75을 이용한 저항 점용접 용접부에 대하여 인장전단시험을 수행한 결과를 보여주고 있다. 각 조건에서 시험편 3개에 대한 평균값 및 편차를 그래프에 나타내었다. 용접전류가 증가함에 따라 용접부 인장전단강도는 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그리고 전반적으로 용접부에서 날림이 발생한 경우에는 인장전단강도가 하락하는 경향을 보여주고 있다. 본 인장전단강도 결과로부터 두 전극 반경에 대한 인장전단강도 차이는 크지

		<div>Expulsion</div> <div>Acceptable region</div> <div>Under req. nugget</div>					
R75	83 ms	Macro section					
		Nugget dia.	6.0 mm	6.5 mm	7.0 mm	7.6 mm	7.5 mm
	50 ms	Macro section					
		Nugget dia.	4.2 mm	5.5 mm	6.1 mm	6.5 mm	6.7 mm
R50	83 ms	Macro section					
		Nugget dia.	5.5 mm	6.1 mm	6.7 mm	7.5 mm	7.8 mm
	50 ms	Macro section					
		Nugget dia.	5.0 mm	5.3 mm	6.3 mm	6.6 mm	6.7 mm
Electrode	Time	Weld Current	26 kA	28 kA	30 kA	32 kA	34 kA

Fig. 5 Weld nugget diameter with weld currents and radius of electrode tip face (Electrode force: 400kgf)

Fig. 6 Tensile shear strength for different weld currents and radius of electrode tip face (Electrode force: 400kgf)

않지만 동일한 조건에서 약 33ms 용접시간 차이가 발생할 경우 인장전단강도 차이는 뚜렷하다는 것을 알 수 있다.

4.2 전극 가압력 600kgf에서의 점용접 특성

Fig. 7은 전극 가압력이 600kgf일 경우 전극반경 R50과 R75을 이용한 저항 점용접 용접부 단면과 너짓 직경을 보여주고 있다. R50과 R75 모두 용접전류와 용접시간이 증가할수록 용접 너짓 직경이 증가하는 경향을 보여주고 있다. R50과 R75 두 전극에 대하여 30kA~40kA의 범위에서 용접전류 적정구간을 보여주었고, 두 전극반경 차이에 따른 적정 용접전류 구간 변화는 없었다. 그러나 전극 가압력이 400kgf인 경우와 비교했을 때 용접전류 적정구간이 4~6kA정도 확대되었다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 전극 가압력이 600kgf일 경우 전극반경

Fig. 8 Tensile shear strength with different weld currents and radius of electrode tip face (Electrode force: 600kgf)

R50과 R75을 이용한 저항 점용접 용접부에 대하여 인장전단시험을 수행한 결과를 보여주고 있다. Fig. 6의 결과와 유사하게 용접전류가 증가함에 따라 용접부 인장전단강도는 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그리고 용접부에서 날림이 발생한 경우에는 인장전단강도가 하락하는 경향을 보여주고 있다.

Fig. 9는 Fig. 6과 Fig. 8로부터 R50 전극에 대한 데이터를 바탕으로 전극 가압력과 용접시간 변화에 용접부 인장전단강도 결과를 보여주고 있다. 조건별 구분을 명확히 하기 위해 인장전단강도 값은 편차를 제외하고 평균값만으로 나타내었다. 그림으로부터 동일한 용접전류에서 전극 가압력이 낮을수록 높은 인장전단강도를 보여주고 있다. 이는 낮은 전극 가압으로 소재 사이의 접촉저항 증가로 인한 저항발열 증가 때문이라고 생각된다. 반면에 높은 전극 가압력을 적용할 경우 양호한 용접부를 확보할 수 있는 용접전류 영역이 증가하고

				Expulsion	Acceptable region	Under req. nugget				
R75	83 ms	Macro section								
		Nugget dia.	5.9 mm	6.6 mm	6.7 mm	7.4 mm	7.6 mm	7.5 mm	8.3 mm	8.0 mm
	50 ms	Macro section								
		Nugget dia.	5.6 mm	6.1 mm	6.2 mm	6.2 mm	6.3 mm	6.6 mm	7.2 mm	7.2 mm
R50	83 ms	Macro section								
		Nugget dia.	5.5 mm	6.4 mm	6.7 mm	6.9 mm	8.2 mm	8.3 mm	8.4 mm	8.1 mm
	50 ms	Macro section								
		Nugget dia.	5.0 mm	6.2 mm	6.4 mm	6.7 mm	7.0 mm	7.4 mm	8.2 mm	7.3 mm
Electrode	Time	Weld Current	28 kA	30 kA	32 kA	34 kA	36 kA	38 kA	40 kA	42 kA

Fig. 7 Weld nugget diameter with weld currents and radius of electrode tip face (Electrode force: 600kgf)

Fig. 9 Tensile shear strength with different weld currents and electrode force for electrode R50

상대적으로 높은 전류 영역에서도 날림이 없는 용접부를 확보할 수 있는 장점이 있다. 이로 인해 낮은 가압력 보다 높은 전극 가압력을 적용할 경우 용접부의 최대 강도는 확보가 가능하다.

지금까지의 연구 결과를 종합하면 본 연구에서 설정한 R50과 R75의 전극 반경 차이로 인한 적정 용접전류의 범위는 차이는 없었다. 그러나 전극 가압력 400kgf와 600kgf의 차이로 인한 적정 용접전류구간은 높은 가압력을 사용할 경우 양호한 결과를 보여주었으며 용접부 인장전단강도도 우수하였다.

5. 결 론

알루미늄 합금 6061-T6 1.5t에 대하여 래디우스(radius)형 전극 두 종류의 반경에 대하여 MFDC 인버터 저항 점용접성을 비교 평가한 결과,

1) 두 가지 전극 반경 R50과 R75를 이용한 저항 점용접 결과, 전극 가압력 400kgf, 용접시간 83ms인 경우 적정용접전류 범위는 28~34kA, 전극 가압력 600kgf, 용접시간 83ms인 경우 적정용접전류 범위는 30~40kA로 동일한 전극 가압력 조건에서 적정 용접전류 범위는 같은 결과를 보여주었다.

2) 두 가지 전극 반경 R50과 R75를 이용한 저항 점용접 결과, 전극 가압력 400kgf 인 경우 용접부 최대 전단강도는 각각 5.2kN, 5.3kN 이었고, 전극 가압력

600kgf 인 경우 용접부 최대 전단강도는 각각 5.9kN, 5.8kN 로 동일한 전극 가압력 조건에서 용접부 인장전단강도는 유사한 결과를 보여주었다.

3) 두 가지 전극 가압력 조건에서는 가압력이 큰 600kgf 조건에서 적정 용접전류범위 확대 및 날림이 발생하지 않는 높은 영역 용접전류 적용으로 인한 너깃 증가 및 이에 따른 용접부 강도 증가를 확인하였다.

ORCID: Hyeong-geun Jo: <http://orcid.org/0000-0002-6018-9250>

ORCID: Dong-Cheol Kim: <http://orcid.org/0000-0001-6667-2094>

References

1. Y. Kim, K.Y. Park, K.D. Lee, Development of Welding Technologies for Lightweight Vehicle, *Journal of Welding and Joining*, 29 (6) (2011), 1-3
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2011.29.6.621>
2. Y. Kim, K.Y. Park, S.B. Kwak, Mechanical Fastening and Joining Technologies to using multi mixed materials of car body, *Journal of Welding and Joining*, 33 (3) (2015), 12-18
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2015.33.3.12>
3. I.S. Chang, Y.J. Cho, H.S. Park, D.Y. So, Importance of Fundamental Manufacturing Technology in the Automotive Industry and the State of the Art welding and Joining Technology, *Journal of Welding and Joining*, 34 (1) (2016), 21-25
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.1.21>
4. M. Kondo, H. Nagata, A. Nishimura, H. Kokawa, Degradation mechanism of electrode tip during resistance spot welding of aluminum alloy sheets, *Science and Technology of Welding and Joining*, 16 (2) (2011), 126-132
<https://doi.org/10.1179/136217111X12972560551725>
5. D.R. Sigler, B.E. Carlson, P. Janiak, Improving aluminum resistance spot welding in automotive structures, *Welding Journal*, 92 (6) (2013), 64-72
6. AWS C1.1:2012, Recommended Practices for Resistance Welding, 20-23
7. M. Rashid, J.B. Medley, Y. Zhou, Nugget formation and growth during resistance spot welding of aluminium alloy 5183, *Cadadian Metallurgical Quarterly*, 50 (1) (2011), 61-71
<https://doi.org/10.1179/000844311X552322>