알루미늄 합금 6061에 대한 저항 점용접성에 미치는 전극 페이스 두께의 영향

김동철* · 조형근* · 김영민* · 강문진* · 황인성*,†

*한국생산기술연구원 용접접합그룹

Effects of Electrode Face Thickness on Resistance Spot Weldability of Aluminium Alloy 6061

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

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

†Corresponding author : hisman@kitech.re.kr

(Received August 26, 2019 ; Accepted October 11, 2019)

Abstract

Aluminium alloy sheets are being utilized in automotive parts such as hood, trunk, and tailgate. However, the spot welding of aluminium alloy has many problems, such as electrode sticking and expulsion, and therefore research on the resistance spot welding of aluminium alloy sheets is necessary. In this study, we evaluated the effects of electrode face thickness on the resistance spot weldability of aluminium alloy 6061. The two electrode face thickness conditions were compared, and the electrode face thickness was determined to be an important process variable that affected the spot weldability of aluminium alloy 6061.

Key Words : Resistance spot welding, Aluminium alloy, Electrode face thickness, Sticking, Expulsion, Radius type electrode

1. 서 론

국외뿐만 아니라 국내에서도 자동차 업계는 연비 향상을 목표로 자동차 부품 경량화를 추진하고 있다¹⁾. 자동차 부품 경량화를 위해 초고강도 소재를 적용하거나 알루미늄, 마그네슘, 복합소재 같은 경량 소재를 적용하는 방향으로 진행되고 있다²⁾. 국내의 자동차 부품 경량화 방향은 주로 고강도강 및 초고강도강 적용을 확대하는 방향으로 진행되어 왔고, 관련된 많은 연구가 진행되어 왔다. 이런 결과로 국내 완성차 업체뿐만 아니라 부품 업체는 해외 자동차 업체에 비교하여 고강도강 및 초고강도강 관련 접합기술은 해외 선진사와 동등한 수준을 보유하고 있다.

수년전까지 국내 자동차 업계는 알루미늄 합금과 같

은 경량소재는 주로 용접이 필요없는 주조재 위주로 적용하였으나 최근에는 알루미늄 판재 적용을 확대하고 있다. 알루미늄 판재의 적용 부품은 주로 고급차 부품, 하이브리드(hybrid) 자동차 및 전기자동차 부품이고 대표적인 부품은 후드, 트렁크, 테일 게이트 등이다³⁾.

알루미늄 판재를 이용하여 자동차 부품을 제작하는 대표적인 자동차 메이커인 아우디는 셀프피어싱리벳(SPR)이라는 기계적인 체결법을 적용하여 부품을 제작하고 있다. 강판을 이용한 자동차 차체 부품 제작에 가장 많이 적용되어온 저항 점용접은 알루미늄 판재 도입 당시의 기술적인 한계점인 전극의 모재 부착 등의 문제로 생산현장 적용이 불가하였다.

현재도 알루미늄 판재 저항 점용접은 전극의 모재 부착 등의 기술적인 문제점을 완전히 해결하지 못했지만 국외뿐만 아니라 국내 생산현장에 적용되고 있다. 알루미늄

미늄 판재의 국내 생산 현장 적용은 강판에 비해 상대적으로 적고, 알루미늄 판재 점용접은 강판에 적용되는 기존 용접시스템으로 용접하기 불가능하며 상대적으로 고가인 시스템을 구축해야 하기 때문에 학연 연구기관의 관련 연구가 부족한 상황이다.

현재 국내 생산 현장에 적용되고 있는 알루미늄 판재 용 저항 점용접 시스템을 구성하는 용접용 로봇, 용접 타이머, 용접 변압기, 용접 건, 전극 드레서 등 거의 모든 장비가 해외 선진사 제품을 사용하고 있는 상황이다.

M.Kondo 등은 알루미늄 5022, 두께 1.0mm, 전극 가압력 2.95kN, 전극 선단 직경과 반경은 각각 6mm와 40mm인 돔형 전극 조건에서 2500타점까지 전극 수명 평가를 수행하였다⁴⁾. 현재의 국내 생산현장의 전극 연속타점 수명을 20~30타점, 해외 선진사의 80타점을 고려했을 때 위 연구는 획기적인 연구라고 생각할 수 있으나 전극의 모재 부착 문제, 모재의 외관 문제 등을 고려하지 않은 연구로 생산현장에 적용하기 어려운 연구 결과로 볼 수 있다. 현재의 기준으로 볼 때 이 연구의 문제점은 전극 가압력이 알루미늄 점용접에 적용되기에는 작고, 특히 전극을 강판용접에 적용되는 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 주기 때문에 AWS C1.1⁵⁾에 따르면 알루미늄 합금 두께 1.0mm일 경우 저항 점용접용 전극은 래디우스(radius)형으로 전극 선단 반경은 76mm, 전극 가압력은 2.67kN을 추천하고 있다. AWS에서 추천하는 전극 가압력도 현장에서 사용하는 4.5~8.0kN에 비하여 매우 낮은 수준이다.

Jo 등은 알루미늄 합금 6061 판재에 대하여 래디우스(radius)형 전극으로 선단 반경과 전극 가압력에 따른 용접성을 평가하여 전극 가압력이 600kgf 조건에서 적정 용접전류범위 확대 및 날림이 발생하지 않는 높은 영역 용접전류 적용으로 인한 너깃 증가 및 이에 따른 용접부 강도가 증가한다고 주장하였다⁶⁾.

알루미늄 판재는 전기 전도성이 우수한 특징과 판재 표면에 수십 나노미터로 존재하는 비도전체인 알루미늄 산화물의 존재는 전극과 모재사이의 통전 측면에서 상호 반대되는 역할을 한다. 이런 이유로 알루미늄 판재와 전극사이에서 통전시 상대적으로 높은 접촉저항이 형성되고 이는 전극의 열화의 원인이 된다. 따라서 알루미늄 판재 저항 점용접에서 전극의 형상은 강판에 비하여 훨씬 중요한 역할을 수행한다.

현재까지 전극 페이스 형상에 대한 비교적 다양한 연구는 진행되었지만⁷⁾ 전극 페이스 두께와 관련된 연구는 진행된 사례가 없다. 전극 페이스 두께는 전극을 교체하고 점용접의 타점이 증가할수록, 중간에 전극 드레싱을 수행할수록 그 두께가 지속적으로 감소하는 특징이 있고 이는 궁극적으로 전극의 냉각효과에 영향을 주는 인자라고 할 수 있다.

본 연구에서는 전극 페이스 두께 변화(2 수준)에 따른 저항 점용접 특성과 각 조건에 따라 연속 타점 용접을 수행하여 알루미늄 판재 저항 점용접 특성에 관하여 고찰하였다. 또한 현장 상황을 반영한 연구를 수행하기 위해 100타점까지의 점용접 품질 평가에 초점을 맞추어 연구를 수행하였다.

2. 사용 소재 및 장비

2.1 사용 소재

본 연구에 사용한 점용접 소재는 알루미늄 판재 6061-T6, 두께 1.5mm 판재였다. Table 1, 2에 알루미늄 판재의 화학 성분과 기계적 물성을 나타내었다.

2.2 용접 장비

알루미늄 합금은 강판에 비하여 전기 전도성이 우수하고 열전달이 잘 되므로 짧은 시간 내에 대전류를 인가하여 용접해야 하므로 이에 적합한 Harms wende사의 MFDC (Medium frequency direct current) 인버터 저항 점용접기를 사용하였다. 그리고 알루미늄 합금의 저항 점용접은 강판 점용접과 비교하여 1.5~2배의 높은 가압력을 인가하여 용접을 수행해야 양호한 용접 품질을 확보할 수 있다. 전극 가압력은 Fig. 1과 같은 나우테크사의 서보가압제어형 용접건을 사용하였다.

저항 점용접용 전극 소재는 일반적으로 강판의 점용접에 적용하고 있는 RWMA Class 2 크롬동(Cu-0.8Cr) 전극을 사용하였다. 일반적으로 강판에는 전극 페이스 직경이 6mm인 돔형 전극을 사용하지만 알루미늄 판재

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

Fig. 1 Resistance spot welding gun

Fig. 2 Radius type electrode

에는 래디우스(radius)형이 사용된다⁵⁾. 본 연구에서는 전극 직경이 20mm이고 선단 반경이 50mm(R50)이고 전극 페이스 두께(electrode face thickness)가 12mm(EFT12)와 8mm(EFT8)인 전극에 대하여 용접성 평가를 수행하였다. Fig. 2는 두 가지 전극에 대하여 절단한 단면을 보여주고 있다. 전극은 용접중 발열을 방지하기 위해 전극 내부를 수냉시키고 있다. 따라서 전극 페이스 두께가 큰 경우가 작은 경우보다 전극 냉각 측면에서는 불리하다고 할 수 있다.

3. 실험 방법

2.2절에서 선정한 EFT12, EFT8 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 현장 조건과 유사하게 특별한 전처리 없이 용접을 수행하였다. 점용접 실험은 크게 두 종류를 수행하였다. 첫 번째는 두 전극 조건에 대하여 용접시간에 변화에 따른 용접성을 평가하였다. 선행연구⁶⁾를 통하여 확보된 적정 용접조건인 전극 가압력은 600kgf, 용접전류는 34kA로 고정하고 용접시간을 변화시키면서 용접시간에 따른 용접부 너깃사이즈 및 용접부 강도를 비교 평가하였다. 저항 점용접은 각 조건에 대해 5회 수행하였고 2개 시험편에 대하여 매크로시험을 수행하여 용접부 너깃 직경 데이터를 확보하였으며, 나머지 3개 시험편에 대하여 용접부 인장전단시험을 수행하였다.

두 번째는 두 전극 조건에 대하여 100타점까지 연속 타점 용접을 수행하였다. 전극 가압력은 600kgf, 용접전류는 34kA, 용접시간은 67ms로 고정하고 1타점부터 5타점마다 용접부 강도를 평가하였고, 2타점부터 5타점마다 너깃사이를 평가하였고 매 타점마다 날림 발생 유무, sticking 발생 유무를 조사하였다.

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

4. 결과 및 분석

4.1 전극 페이스 두께에 따른 점용접 특성

알루미늄 판재 저항 점용접은 강판의 점용접과 비교하여 높은 전류와 큰 전극 가압력을 사용하기 때문에 전극의 직경이 크다. 특히 전극과 모재간의 합금화로 인해 모재 표면 손상 및 전극 페이스 면의 마모 등은 용접품질을 악화시킨다. 따라서 필요이상의 용접시간은

EFT12	Macro section						
Type	Weld time	17ms	33ms	50ms	67ms	83ms	100ms

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

Table 3 Experimental welding conditions

Electrode force (kgf)	600
Welding current (kA)	34
Welding time (ms)	17, 33, 50, 67, 83, 100

Fig. 4 Weld strength with increasing weld time

전극의 열화를 가중시키는 원인이 되기 때문에 용접시간 관리가 매우 중요하다.

두 전극 EFT12와 EFT8에 대하여 Table 3과 같이 용접전류를 34kA로 고정시키고 용접시간을 17ms, 33ms, 50ms, 67ms, 83ms, 100ms로 변화시키면서 점용접을 수행하였고 그 결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 3은 용접전류를 34kA로 고정하고 용접시간이 증가할 경우 점 용접부 너짓 형성과정을 보여주고 있다. 용접부 단면에서 하부 알루미늄 판은 전극의 (+)극과 접촉한 부분이고 상부 알루미늄 판은 전극의 (-)극과 접촉한 부분이다. 두 전극 조건 모두 용접시간이 증가함에 따라 너짓 사이즈가 증가하고 있다는 것을 알 수 있다. 너짓 사이즈 최소 요구조건인 6.1mm은 두 전극 조건 모두에서 용접시간 50ms부터 만족시키고 있다. 너짓 요구조건을 만족시키는 조건(50ms~100ms)에서 두 전극의 점용접 너짓 형상으로부터 가장 큰 차이점은 EFT8이 EFT12보다 두께 방향의 너짓 두께가 상대적으로 작다는 것이다. EFT12인 경우는 용융 영역이 거의 표면까지 이르렀다는 것이고 EFT8은 모재 표면까지 확장된 조건은 없었다. 알루미늄 저항 점용접에서 특히 문제가 되고 있는 전극과 모재사이의 부착현상의 주요 원인인 전극의 합금화는 전극과 모재사이의 높은 발열이고 이를 최소화 시킬 필요가 있고 냉각수에 의해 발열을 저감시키고 있다. Fig. 3에서처럼 EFT8이 상대적으로 너짓 사이즈가 두께방향으로 성장하지 않는 이유는 EFT12보다 우수한 전극냉각효과 때문이라고 생각된다.

Fig. 4는 용접전류 34kA, 전극 가압력 600kgf일 경

우 용접시간을 변화시키면서 두 전극 EFT12와 EFT8을 이용한 저항 점용접 용접부에 대하여 인장전단시험을 수행한 결과를 보여주고 있다. 각 조건에서 시험편 3개에 대한 평균값을 보여주고 있다. 용접부 강도는 용접시간이 증가함에 따라 증가하고 있다는 것을 알 수 있다. 17ms에서 83ms까지 증가하다가 100ms에서는 약간 감소하였다. 용접시간 100ms에서 용접부 강도 감소 원인은 긴 용접시간으로 인해 일부 시험편에서 용접중 날림이 발생하고 이로 인해 용접부 강도의 평균값을 저하시키는 경향을 나타내었다. 용접부 전단강도는 EFT12 용접부가 EFT8 용접부보다 약간 높은 값을 보여 주었다.

4.2 연속 타점 저항 점용접 특성

알루미늄 합금의 저항 점용접은 높은 전류에서 용접을 수행하기 때문에 전극과 소재 사이의 용착을 방지하기 위해서는 가능한 용접전류는 낮고 용접시간이 짧은 용접조건을 확보할 필요가 있다. Fig. 2의 두 전극에 대한 연속 타점 저항 점용접 실험에서는 4.1절의 용접 결과로부터 용접시간을 67ms로하고 전극 가압력 600kgf, 용접 전류 34kA로 고정하고 100타점까지의 용접을 수행하면서 점용접 특성을 관찰하였다.

100 타점 동안 EFT12 전극은 날림(expulsion)과 sticking이 각각 21%, 14% 발생하였고, EFT8 전극은 날림(expulsion)과 sticking이 각각 9%, 4% 발생하였다. EFT12 경우 날림과 sticking이 어떤 특정한 패턴없이 불규칙적으로 발생하였고, EFT8 경우 날림과 sticking이 24타점이후 어떤 특정한 패턴없이 발생하였다. EFT8 전극이 EFT12 대비 날림과 sticking 발생 비율이 상대적으로 낮은 비율을 나타내었다.

Fig. 5는 100타점까지 2타점부터 5타점 간격으로 확보된 시험편을 이용하여 단면 매크로 시험을 수행한 결과를 보여주고 있고 Fig. 6은 타점별 너짓 사이즈의 변화 과정을 보여주고 있다. 100타점중 20%에 대한 용접부 단면 매크로 분석 결과 점용접 타점이 진행될수록 너짓 형상의 불규칙성이 증가하고 있다는 것을 알 수 있다. EFT12 전극의 경우 너짓 사이즈 요구조건 6.1mm를 만족시키지 못한 타점이 30%에 해당하였고 EFT8 전극인 경우는 모두 만족시키는 결과를 보여주었다. EFT12 전극에서 날림이 발생한 제 12 타점과 제 22타점의 경우는 너짓 사이즈가 과도하게 작아 용접부 강도 저하에 문제가 될 가능성이 높다고 생각된다. 제 47 타점과 57 타점인 경우 날림이 발생한 경우라도 너짓 사이즈가 과도하게 작아지지 않는 이유는 날림이 상대적으로 약하게 발생하였기 때문이라고 생각된다.

Fig. 7은 100타점까지 1타점부터 5타점 간격으로 확

EFT12	Macro section
	Nugget size	6.1mm	7.0mm	5.2mm	6.7mm	4.4mm	7.1mm	6.6mm	5.5mm	5.7mm	6.5mm
EFT8	Macro section
	Nugget size	6.1mm	7.0mm	6.9mm	6.9mm	6.7mm	7.0mm	7.1mm	6.8mm	6.9mm	6.3mm
Type	Weld Number	2	7	12	17	22	27	32	37	42	47

EFT12	Macro section
	Nugget size	6.3mm	7.6mm	6.2mm	6.3mm	6.4mm	6.4mm	6.7mm	5.9mm	5.9mm	6.4mm
EFT8	Macro section
	Nugget size	6.4mm	7.4mm	7.1mm	6.2mm	6.4mm	7.2mm	6.7mm	6.8mm	6.3mm	6.4mm
Type	Weld Number	54	57	62	67	72	77	82	87	92	97

Fig. 5 Weld cross-section and nugget size vs. weld number

Fig. 6 Weld nugget size vs. weld number

Fig. 7 Weld strength vs. weld number

보된 시험편을 이용하여 용접부 인장전단시험을 수행한 결과를 보여주고 있다. EFT12 전극은 3.5~4.7kN의 용접부 강도를 나타내었고 제 76타점에서 최소인 3.5kN

를 나타낸 이유는 날림이 발생하였기 때문이다. EFT8 전극은 3.8~4.5kN의 용접부 강도를 나타내었고 비교적 현저하게 강도 저하를 나타내는 타점은 없었다.

Fig. 8은 100타점까지 10타점 간격으로 전극의 마모 정도를 파악하기 위해 상하 전극에 대하여 carbon imprint를 수행한 결과를 보여주고 있다. EFT12 전극은 20타점부터 전극의 마모가 진행되고 있다는 것을 알 수 있고 EFT8 전극은 40타점부터 전극의 마모가 진행되고 있다는 것을 알 수 있다. 두 전극 모두 (+) 전극 측에서 더 많은 전극 마모가 진행되고 있다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 연구 결과는 현장에서 주로 20타점 내외에서 전극 드레싱을 수행하는 것과 유사한 결과라고 생각된다.

지금까지의 연구 결과를 종합하면 본 연구에서 설정한 전극 페이스 두께 차이를 둔 두 전극 EFT12와 EFT8에 대한 실험 결과 EFT8이 EFT12에 대비하여 날림, sticking, 연속타점 수명 등에서 우수한 용접 특성을 나타내었다.

5. 결 론

알루미늄 합금 6061-T6 1.5t에 대하여 전극 페이스 두께에 대한 두 종류의 전극에 대하여 시간에 따른 용접특성 및 연속타점 점용접성을 비교 평가한 결과,

1) 두 가지 전극 페이스 두께 12mm과 8mm를 이용한 저항 점용접 결과, 전극 가압력 600kgf, 용접전류 34kA에서 용접시간 17~100ms 범위에서 전극 페이스 두께가 8mm인 전극이 sticking 방지 측면에서 우수한 너جت 형상을 형성하는 것을 알 수 있었다.

2) 두 가지 전극 페이스 두께 12mm과 8mm를 이

Type	Polarity	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
EFT12	-
	+
EFT8	-
	+

Fig. 8 Carbon imprints of electrode tip face vs. weld number

용하고 전극 가압력 600kgf, 용접전류 34kA에서 용접 시간 67ms 용접조건에서 100타점까지 연속타점 저항 점용접 결과, 전극범위에서 전극 페이스 두께가 8mm 인 전극이 12mm 전극보다 날림과 sticking이 적게 발생하고 전극 마모도 적게 발생하는 것을 알 수 있었다.

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

ORCID: Insung Hwang: <https://orcid.org/0000-0001-5572-8670>

References

1. Y. Kim, K.Y. Park and K.D. Lee, Development of Welding Technologies for Lightweight Vehicle, *J. Weld. Join.* 29 (6) (2011) 1-3.
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2011.29.6.621>
2. Y. Kim, K.Y. Park and S.B. Kwak, Mechanical Fastening and Joining Technologies to using multi mixed materials of car body, *J. Weld. Join.* 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 and D. Y. So, Importance of Fundamental Manufacturing Technology in the Automotive Industry and the State of the Art welding and Joining Technology, *J. Weld. Join.* 34 (1) (2016) 21-25.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.1.21>
4. M. Kondo, H. Nagata, A. Nishimura, and H. Kokawa, Degradation mechanism of electrode tip during resistance spot welding of aluminum alloy sheets, *Sci. Technol. Weld. Join.* 16 (2) (2011) 126-132.
<https://doi.org/10.1179/136217111X12972560551725>
5. AWS C1.1:2012, Recommended Practices for Resistance Welding, *American Welding Society (AWS)*, (2012).
6. H. G. Jo, Y. M. Kim, M. J. Kang, D. C. Kim, Effect of electrode face radius and force on resistance spot weldability of aluminium alloy 6061, *J. Weld. Join.* 36 (6) (2018) 46-51.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2018.36.6.8>
7. D. R. Sigler, B. E. Carlson and P. Janiak, Improving aluminum resistance spot welding in automotive structures, *Weld. J.* 92 (6) (2013) 64-72.