

## 전류 파형 제어를 적용한 마그네슘 합금의 저항 점 용접 특성

최동순\* · 황인성\*·† · 김동철\* · 류재욱\*\* · 강문진\*

\*한국생산기술연구원 용접접합연구실용화그룹

\*\*한국금속재료연구소합

### Resistance Spot Welding Characteristics of Mg Alloy Applying Current Waveform Control

Dong-Soon Choi\*, In-Sung Hwang\*·†, Dong-Cheol Kim\*, Jae-Wook Ryu\*\* and Moon-Jin Kang\*

\*Advanced Welding & Joining R&BD Group, KITECH, Incheon 406-840, Korea

\*\*Korea Metal Material Research Association, Seoul 138-950, Korea

†Corresponding author : hisman@kitech.re.kr

(Received April 2, 2014 ; Accepted April 15, 2014)

#### Abstract

In automotive industry, applying of Mg alloy to autobody has been issued recently as a light metal. But poor resistance spot weldability of Mg alloy is blocking commercialization. So studies on improving resistance spot weldability of Mg alloy is increasing continuously. For reduce loss of heat input during welding, inverter DC power source is considered because of short rise time to target welding current. But rapid rising of welding current can increase temperature rapidly in nugget and oxide film between electrode and base metal, and that causes generating expulsion on low welding current range.

In this study, for increase optimum welding current range and prevent generating expulsion, applicate various types of welding current waveform controls during resistance spot welding. For analysis effects of each current waveform control, acceptable welding current regions according to electrode force and welding time is determined and lobe diagram is derived. In result, pre heat is proposed as optimum type of welding current waveform control.

Key Words : Resistance spot welding, Mg alloy, Current waveform control, Weldability

#### 1. 서 론

최근 각종 제품에 경량 금속의 적용이 증가하면서, 마그네슘 합금 또한 기존의 주조품 대신 판재의 적용 및 수요가 증가하고 있다. 특히 상용 가능한 금속 중 가장 가볍고 비강도가 높다는 점에서<sup>1)</sup>, 자동차 차체 및 부품에 적용하기 위한 판재 성형 및 접합 기술에 관한 수요가 증가하고 있다<sup>2)</sup>. 연비 향상 및 CO<sub>2</sub> 배출 저감 목적으로 자동차 차체의 경량화 추세에 맞추어 마그네슘을 차체에 적용시키기 위한 연구가 진행되고 있으나, 용접성에 문제가 많아 상용화하는데 걸림돌이 되고 있다<sup>3)</sup>.

마그네슘 합금의 물리적 성질은 대체적으로 알루미늄과 유사하지만 알루미늄 합금보다 비저항이 높고 열전도도가 낮아 저항 점 용접 시 용접 전류가 낮게 형성된다. 또한 기화점이 1000°C 정도로 낮고 증기압이 높아 모재가 쉽게 증발하며 이로 인해 일반적인 아크 용접은 불가능한 것으로 알려져 왔다<sup>4)</sup>. 자동차 차체나 부품에의 적용에 반드시 필요한 저항 점 용접의 경우 전극으로 너깃 주위를 가압하여 용융금속을 가두기 때문에 용접은 잘 이루어지나 전극 형상, 인가 전류에 따라 액상 또는 기화된 마그네슘이 전극과 모재 표면 사이나 모재와 모재 사이로 날리는 날림 현상이 쉽게 발생한다<sup>5)</sup>.

이러한 날림 현상은 주로 높은 전류를 인가하는 경우 발생하나, 전극 오염이나 모재 표면 상태에 따라 적정

용접이 가능한 낮은 전류영역에서도 쉽게 발생할 수 있다<sup>6)</sup>. 날림이 발생한 용접부는 날린 금속의 양만큼 압흔이 깊게 발생하거나 빈 공간으로 남아 강도 저하, 계면 파단이 야기된다. 또한 날린 금속은 모재 표면이나 전극에 부착되어 용접부 품질을 저하시키는 요인이 된다. 따라서 마그네슘 저항 점 용접의 용접 품질 향상을 위해서는 이러한 날림 발생을 억제할 필요가 있다.

마그네슘 합금은 비저항이 낮아 높은 용접 전류를 필요로 하면서도 열전도도가 높아 용접 중 입열량의 손실이 많다. 이로 인하여 마그네슘 합금의 저항 점 용접에는 목표 전류까지 전류를 상승시키는 시간이 짧은 인버터 DC 타입의 용접 전원이 적합한 것으로 알려져 왔다. 그러나 이러한 급격한 용접 전류 상승은 전극과 모재 사이의 산화막 및 너깃의 급격한 온도 증가를 야기하여 낮은 온도에서 기화하는 마그네슘 합금의 특성상 날림이 발생할 위험을 증가시키게 된다. 특히 산화막의 경우 모재에 비해 저항이 높아 필요 이상의 온도 상승을 야기할 수 있으므로, 전류 파형 제어를 통해 이를 방지할 필요가 있다.

본 연구에서는 용접 전류 파형을 제어하여 마그네슘 합금의 저항 점 용접성을 향상시키고자 하였다. 여러 가지 타입의 전류 파형 제어를 적용하여, 마그네슘 합금의 저항 점 용접을 실시하였다. 그리고 용접부의 인장 전단 하중과 너깃 사이즈 측정을 통해 가압력과 용접 시간에 따른 적정 용접 전류 범위를 도출하고 용접성을 비교하였다. 최종적으로 이를 통해 가장 적합한 전류 파형을 도출하였다.

## 2. 실험 소재 및 장비

### 2.1 실험 소재

본 연구에서는 상용 마그네슘 합금 중 성형성, 용접성이 비교적 우수한 AZ31B 1.5t 판재를 사용하였다. Table 1, 2에 AZ31B의 화학 성분과 물리적 성질을 나타내었다. 시험편은 KS B0851 규격에 따라 40×

**Table 1** Chemical compositions of AZ31B (wt%)

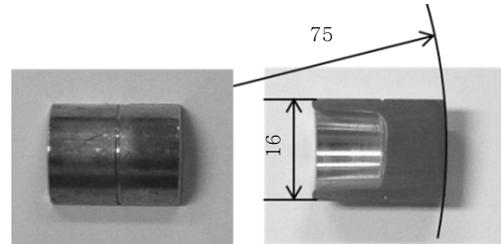
Mg	Al	Zn
96.3	3.0	0.7

**Table 2** Mechanical properties of AZ31B

Y.S. (MPa)	T.S. (MPa)	EL. (%)
202	262	20



(a) Inverter DC resistance spot welding equipment



(b) R75 type electrode

**Fig. 1** Welding equipment and electrode

125mm의 사이즈를 사용하였다.

### 2.2 실험 장비

Fig. 1의 (a)와 같이 Bosch사(社)의 인버터 DC 용접 장비를 사용하였으며, 전용 프로그램을 사용하여 용접 전류 파형을 제어하였다. 용접 전극은 Fig. 1의 (b)와 같이 R75 radius형 전극을 사용하였다.

## 3. 실험 방법

### 3.1 용접 전류 파형 설계

본 연구에 적용한 용접 전류 파형은 step 파형과 slope 파형이다. 본 연구에서는 이를 세분화하여 step 파형의 경우 메인 전류 전, 후 위치에 따라 pre heat, post heat의 두 파형을 적용하였다. slope 파형 또한 메인 전류 전, 후 위치에 따라 up slope, down slope의 두 파형을 적용하였다. 추가로, 파형 제어를 하지 않는 DC 파형과 짧은 DC 파형을 여러 번에 나누어 용접한 multi pulse 파형을 함께 비교하였다. Fig. 2에 각 파형의 대략적인 형상을 정리하였다.

### 3.2 실험 조건

전극 오염 및 마모의 영향을 최소화하기 위하여 매

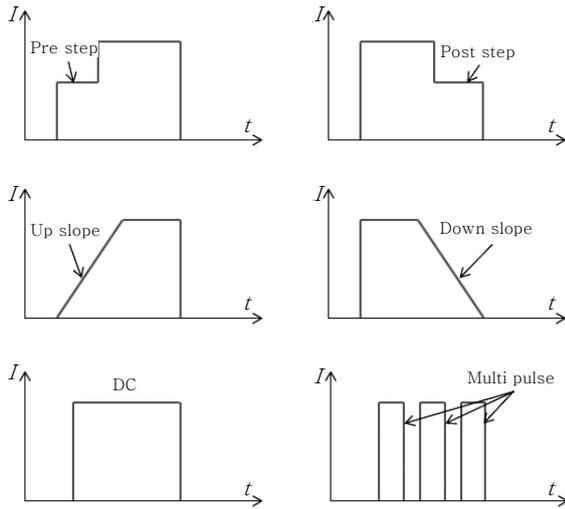


Fig. 2 Various types of current waveform control

Table 3 Designs of various current waveforms

Type	Distribution of time (ms)
DC	150
pre heat	75(pre heat) + 75(main current)
post heat	75(main current) + 75(post heat)
up slope	75(up slope) + 75(main current)
down slope	75(main current) + 75(down slope)
multi pulse	50(each pulse) x3, 16(cooltime)

파형마다 새로운 전극을 교체하여 파형 제어를 하지 않는 19kA, 150ms의 선행 타점을 10회씩 실시한 후 용접을 실시하였다. 모든 파형 제어 조건에서 가압력은 300kgf, 전체 용접 시간은 150ms로 통일하여 설계하였다. 또한 각 파형 제어 시간은 전체 용접 시간 중 50%를 차지하도록 설계하였다. multi pulse 파형은 50ms 동안 메인 전류를 3회 연속 용접하고, 각 pulse간 cool time은 16ms로 설계하였다. Table 3에 각 설계 파형의 시간 배분을 표시하였다.

각 조건에서 인장 전단 시험 시편과 단면 분석 시편을 채취하였다. 마그네슘 합금의 용접부 물성 평가의 기준이 될 수 있는 규격은 아직 세계적으로도 제정된 바가 없으므로, 마그네슘 합금과 기계적 물성이 가장 비슷한 알루미늄 합금의 표준 규격을 참고하였다. 이에 따라, KS B 0850의 알루미늄 합금의 요구 인장 전단 하중 및 너깃 사이즈 평가 방법을 기준으로 이들을 평가하였다. AZ31B 1.5t의 인장 전단 하중은 최소 1.9kN, 너깃 사이즈는 최소 4.9mm로 설정하였다.

## 4. 결과 및 분석

### 4.1 전류 파형 별 용접성

먼저, DC 파형의 분석 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 13~19kA의 적정 용접 영역을 나타내고 있으며, 21kA에서 날림이 발생하였다. 전 용접 영역에서 버튼 파단은 발생하지 않았다.

다음으로, pre heat 파형의 분석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. pre heat 파형 전류는 메인 전류의 70% 수준으로 적용하였다. pre heat 파형이 적용된 시간만큼 DC 파형에 비해 입열량이 적게 들어갔음에도 적정 용접 영역이 2kA 정도 높게 이동했음을 알 수 있다. 13kA에서는 용접이 이루어지지 않지만 21kA에서는 정상적으로 용접이 이루어졌으며, 4kN 이상의 높은 인장 전단 하중을 가지고 버튼 파단이 발생함을 알 수 있다. 이는 DC 파형의 21kA에서 급격한 전류 상승에 의해 발생한 날림 현상이 pre heat 파형을 적용함으로써 급격한 전류 상승이 억제되며 저감됨을 알 수 있다.

Fig. 5는 post heat 파형의 분석 결과이다. post heat 파형 전류 또한 pre heat 파형과 동일하게 메인 전류의 70% 수준으로 인가하였다. 메인 전류 통전 시간이 짧아져 pre heat 파형과 동일하게 13kA에서 정상적인 용접이 이루어지지 않았다.

그리고 21kA에서는 날림이 발생하여 post heat 파형의 적정 용접 영역은 DC 파형보다 좁게 나타났다. 이는 날림 발생에 초기의 급격한 전류 상승이 영향을 미치고 있다는 반증이 될 수 있다. post heat 파형을 적용함으로써 너깃 내 균열 및 기공을 제어할 수 있다

Tensile shear load (kN)	1.98	2.69	3.16	3.63	3.72	
Nugget size (mm)	5.62	6.41	7.38	7.82	8.21	
I (kA)	11	13	15	17	19	21

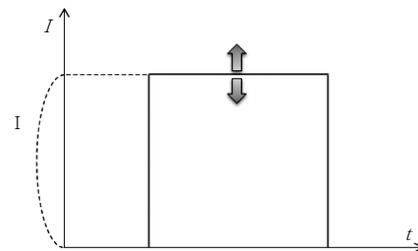


Fig. 3 Tensile shear load and nugget size according to current (DC)

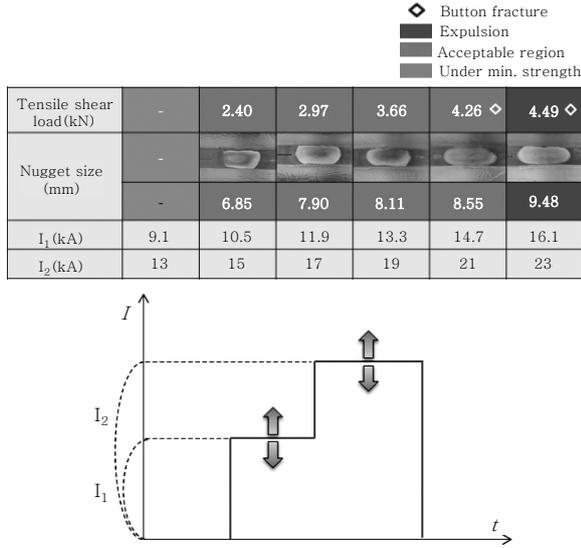


Fig. 4 Tensile shear load and nugget size according to current (pre heat)

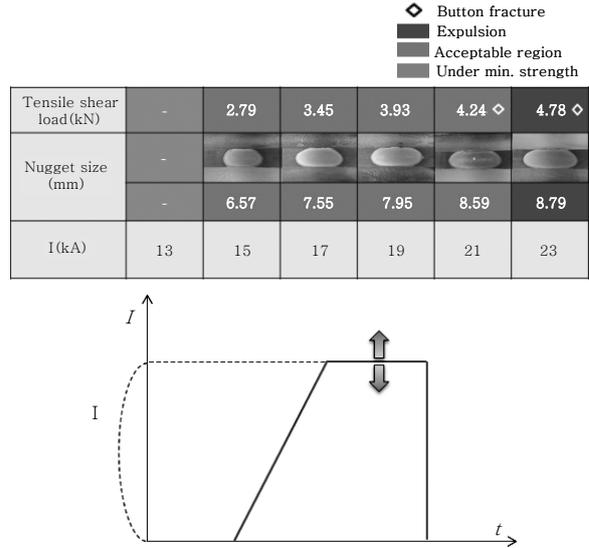


Fig. 6 Tensile shear load and nugget size according to current (up slope)

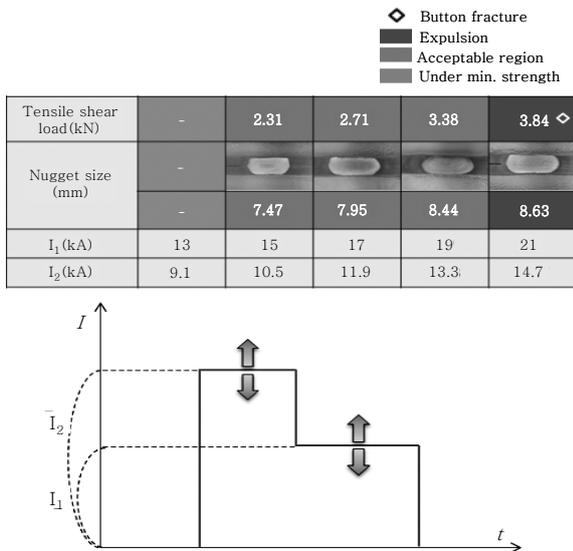


Fig. 5 Tensile shear load and nugget size according to current (post heat)

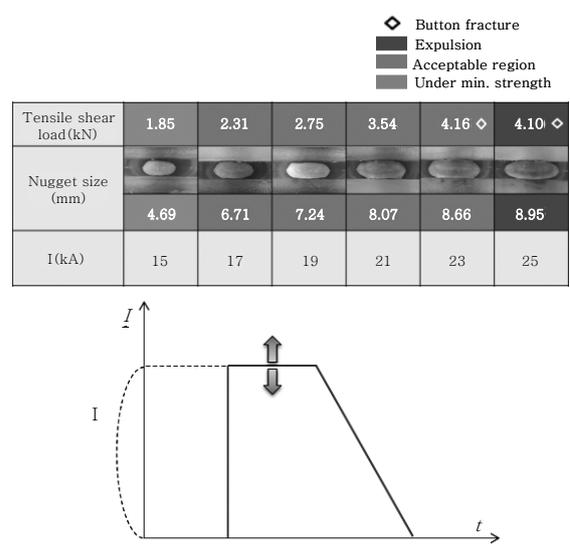


Fig. 7 Tensile shear load and nugget size according to current (down slope)

는 연구 결과가 있으나, 너깃 내 균열과 날림 발생은 별개의 문제이며, 날림 발생 억제를 통해 적정 용접 전류를 높게 가져가고 높은 인장 전단 하중과 버튼 파단 발생을 확보할 수 있다는 점에서, 마그네슘 합금의 저항 점 용접에는 post heat 파형보다 pre heat 파형이 더 적합한 파형이라고 판단된다.

Up slope 파형의 분석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 전반적으로 pre heat 파형과 유사한 적정 용접 영역, 버튼 파단 발생 범위, 인장 전단 하중, 너깃 사이즈를 보였다. 마찬가지로, 초기 급격한 전류 상승을 제어함으로써 날림 발생이 효과적으로 억제되었음을 알 수 있다.

다음 Fig. 7은 down slope 파형의 분석 결과이다. 15kA에서 용접이 이루어지기는 하였으나 요구 인장 전단 하중 및 너깃 사이즈에 미치지 못하였다. 반면에 23kA까지 적정 용접 전류가 상승하고 pre heat, up slope 파형과 유사한 인장 전단 하중 및 너깃 사이즈를 나타내었다. 그러나 이 정도의 적정용접영역을 확보하기 위해 메인 용접 전류를 pre heat나 up slope 파형보다도 더 높게 인가해야 하는 점은 실용적 측면에서 비효율적이라고 판단된다.

마지막으로, Fig. 8에 multi pulse 파형의 분석 결과를 나타내었다. 적정 용접 영역은 down slope 파형과 유사하게 나타났으나, 21kA의 높은 전류 영역에서

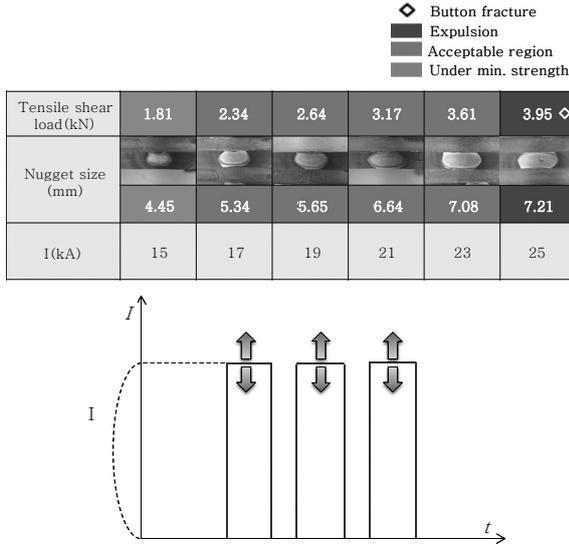


Fig. 8 Tensile shear load and nugget size according to current (multi pulse)

는 인장 전단 하중 및 너깃 사이즈의 상승 폭이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 multi pulse 파형에서 cool time 동안의 급격한 냉각이 너깃의 정상적인 성장을 방해하며 발생하는 것으로 판단된다.

### 4.2 전류 파형 용접성 비교

4.1에서 도출한 각 파형의 용접성을 비교한 결과를 Fig. 9와 10에 나타내었다. Fig. 9의 전단 인장 하중 평가 결과를 보면 DC 파형에 비하여 pre heat와 up slope 파형이 더 높은 용접 전류 범위와 최대 인장 전단 하중을 나타내었다. Post heat 파형의 경우 DC 파형 보다 낮은 인장 전단 하중을 나타내었다. Down slope와 multi pulse 파형의 경우 높은 용접 전류에서 용접이 가능하였으나 DC 파형에 비해 동일 전류에서 인장 전단 하중이 낮게 나타나 인가 전류에 비해 효율이 낮음을 알 수 있다. Fig. 10의 너깃 사이즈 비교 결과 또한 인장 전단 하중과 유사한 경향을 나타내었다.

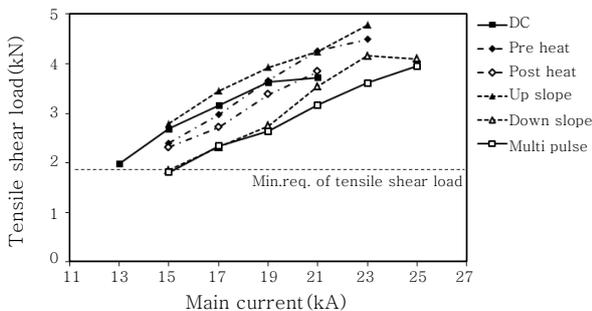


Fig. 9 Tensile shear load distributions with various current waveform controls

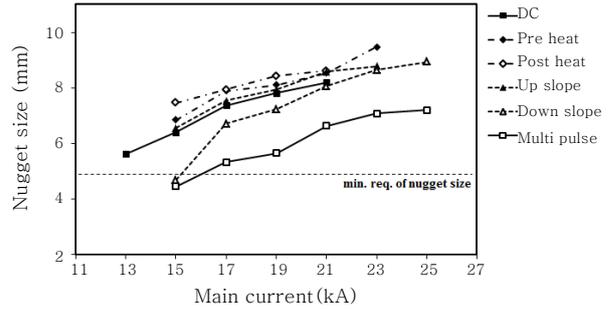


Fig. 10 Nugget size distributions with various current waveform controls

결과적으로, 마그네슘 합금의 저항 점 용접성 향상에는 pre heat, up slope 파형이 우수한 효과를 보였다. 두 파형은 메인 전류 전에 위치하여, 인버터 DC 용접 전원 사용 시 목표 전류까지 급격하게 전류가 상승하는 것을 막아 날림 현상을 억제하는 것으로 파악되었다. 이는 DC 전류 파형에 비하여 더 높은 전류에서 안정적인 용접이 가능하게 하며, 전극 오염이나 모재 표면에 따라 높은 전류 영역에서 간헐적으로 발생할 수 있는 날림 현상도 감소시킬 수 있다고 판단된다. 다만, 마그네슘 합금은 열전도도가 높아 pre heat나 up slope 파형의 시간을 너무 길게 가져갈 경우 모재의 높은 열전도도에 의해 입열 손실이 커지게 되므로 생산성 측면에서는 가능한 짧게 적용하는 것이 유리할 것으로 생각된다.

## 5. 결 론

마그네슘 합금의 저항 점 용접성을 향상시키기 위하여, 각종 용접 전류 파형을 적용하여 효과적인 전류 파형을 찾고자 하였다. 그 결과를 다음에 정리하였다.

- 1) 마그네슘 합금의 저항 점 용접에 적합한 전류 파형 형태는 pre heat, up slope 파형이다.
- 2) Pre heat, up slope 파형은 메인 전류가 인가되기 전, 인버터 DC 용접 전원의 급격한 초기 전류 상승을 제어하여, 용접 중 발생할 수 있는 날림 현상을 효과적으로 억제할 수 있다.
- 3) 입열의 낭비를 최소화하고 pre heat나 up slope 파형의 효과를 극대화하기 위해서는 파형 제어시간을 가능한 짧게 적용하는 것이 유리하다.

## Reference

1. Phenomenon and Application of Resistance Spot Welding (1), JWS bulletin No.8, 1983.3
2. T. W. Yoon, R. H. Kim, M. Y. Lee and K. H. Lee :

- The Development of Car Body Part Using Mg AZ31, The Korea Society of Automotive Engineers, 2012 Autumn Annual Meeting (2012), 97-101
3. D. S. Choi, I. S. Hwang, D.C. Kim and M.J. Kang : Electrode life test of Resistance Spot Welding on Mg Alloy Using Dome Type Electrode, Journal of KWJS, **31-6** (2013), 27-31 (in Korean)
  4. M. Y. Lee : Recent Trends in Welding of Magnesium Alloy, KWJS, Abstracts of 2012 Autumn Annual Meeting of KWJS, 2012, 111-117 (in Korean)
  5. L. Liu, S. Q. Zhou, Y. H. Tian, J. C. Feng, J. P. Jung and Y. N. Zhou : Effects of Surface Conditions on Resistance Spot Welding of Mg Alloy AZ31, Science and Technology of Welding and Joining, **14-4** (2009), 356-361
  6. I. S. Hwang, D. C. Kim, M. J. Kang : Inverter DC Resistance Spot Welding of Magnesium Alloy AZ31, Archive of Material Science and Engineering, **48-2** (2011), 112-117