

박판 Al MIG 용접용 AC 펄스 전류 파형의 설계 및 출력특성

조상명* · 김태진** · 이창주*** · 임성룡**** · 공현상**** · 김기정****

*부경대학교 신소재공학부 생산가공공학전공

**한국 전기연구원 전력전자 연구실

*** (주) 세일기전

****부경대학교 대학원 소재프로세스공학과

Design and Output Characteristic of AC Pulse Current Waveform for MIG Welding of Al Sheet

Sang-Myung Cho*, Tae-Jin Kim**, Chang-Ju Lee***, Sung-Lyong Lim****, Hyun-Sang Kong**** and Ki-Jung Kim****

*Course of Production and Joining Eng., Div. of Materials Science & Eng., Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

**P.O. box 20, Changwon 641-600, Korea

***Seil electronics co. Ltd, Kimhae 621-840, Korea

****Dept. of Production and Joining Eng. Graduated school, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

Abstract

Since new types of vehicles or structures made from thin aluminum alloy are under rapid development and some products are already on the market, welding of aluminium sheet is increasing. MIG(Metal Inert Gas), MIG-Pulse, TIG(Tungsten Inert Gas) welding are the typical Al welding. MIG welding has the advantage of high speed, but it is difficult to apply to the thin plate, because of burn-through by the high heat input and spatter. MIG-Pulse welding can weld without spatter and burn-through, but when the gap exists at the welding joint, there is quite a possibility of burn-through. TIG welding is difficult to weld at a high speed.

AC Pulse welding alternates between DCEP(Direct Current Electrode Positive) and DCEN(Direct Current Electrode Negative). DCEN is higher wire melting rate than DCEP, while lower temperature of droplet than DCEP. In AC Pulse welding, for fixed welding current, wire melting rate increases as the EN ratio increases. For fixed wire feed rate, welding current decreases as the EN ratio increases. Because of these features, the temperature of droplet, the depth of penetration, the width of bead decrease and the reinforcement height increases as EN ratio increases, and these are able to weld at a high speed, lower heat input. It is the purpose of this study that design of AC pulse current waveform for MIG welding of Al sheet and estimation of output characteristic.

(Received July 25, 2002)

Key Words : MIG welding, AC pulse, DCEN, DCEP, EN ratio, Heat input, Shallow penetration, Lap-joint, Butt-joint, Burn through

1. 서 론

최근 건축 구조물이나 차량 등에서의 내식성과 경량화 요구에 따라 알루미늄 합금(이하 알루미늄)의 용접 수요가 늘어나고 있고, 특히 차량 등에는 두께 1mm

정도의 박판을 적용하는 경우가 많이 있다.

일반적인 알루미늄 아크 용접법으로는 MIG, MIG Pulse, TIG 용접이 있는데, MIG 용접은 고속 용접이 가능하지만 소모전극(이하 와이어)을 사용하기 때문에 아크에 의한 열량과 이행하는 용적이 보유하는 열량이 더해져 모재에 입열¹⁾되고, 이로 인해 박판의 경우 용락

이 발생할 가능성이 매우 높으며, 저전류에서 다량의 스파터가 발생하게 된다. MIG Pulse 용접은 스파터와 용락이 거의 없는 용접이 가능하지만 박판의 겹치기 이음이나 맞대기 이음에서 이음부에 갭이 존재할 경우 용락이 발생할 가능성이 현저히 증가한다. TIG 용접은 비드의 외관이 미려하고, 박판 알루미늄에서도 용락 등의 용접 불량 발생하지 않도록 용접하는 것이 가능하지만 낮은 용접속도로 인해 생산성이 낮은 단점이 있다. 따라서 갭이 존재하는 경우에도 용락이 생기지 않을 정도의 낮은 입열로 저전류에서 스프레이 이행할 수 있는 고속 용접법이 필요하다.

본 연구에서 적용한 AC Pulse 용접법은 DCE P (Direct Current Electrode Positive)와 DCEP보다 와이어의 용·용속도가 높지만 용적의 보유 열량이 작은 DCEN(Direct Current Electrode Negative) 구간을 반복하는 용접법으로서, 일정한 용접전류에서는 EN비와 와이어 용·용속도는 비례하고, 일정한 와이어 송급속도에서는 EN비와 용접 전류는 반비례하는 특성이 있다. 이로 인해 EN비가 증가함에 따라 용적의 온도, 용입 깊이, 비드 폭은 감소하고, 덧살 높이는 높아지며, 용착량 증가로 인한 고속 용접과 낮은 입열, 스파터 없는 용접이 가능하다. 본 연구에서는 AC Pulse 용접을 위한 전류 파형을 설계하고, 설계된 파형을 토대로 개발된 용접기를 통하여 출력 특성을 검토하였다.

2. 아크 용접의 극성에 대한 특성

아크는 Fig. 1에서와 같이 양극 전압강하, 음극 전압강하, 아크기동 전압강하의 3구역으로 구분되며, 아크에서 전류의 흐름은 전자에 의하여 유지되고, 양극과 양극 전압강하 구역은 아크에서 발생한 전자를 받아들여 아크를 유지시키는 역할을 한다²⁾.

음극의 온도가 증가하면 음극 표면에서는 전자가 방출되는데, 이와 같이 고온에서 전자가 방출되는 현상을

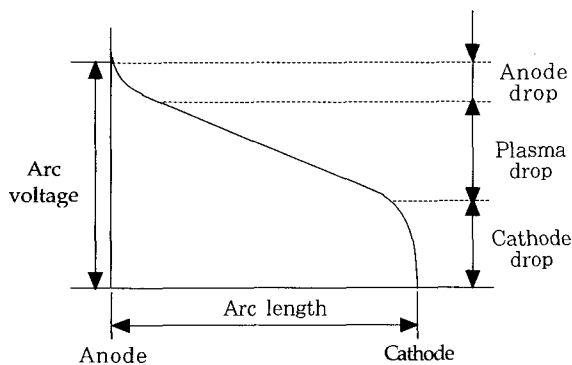


Fig. 1 The characteristic of arc voltage

열전자 방출현상이라 하며, 음극에서의 전류밀도는 아래 식에 의하여 나타낸다³⁾.

$$J = AT^2 \exp(-e\phi/KT) \tag{1}$$

여기서, J : 전류밀도

T : 온도

ϕ : 일함수

A : 상수

일함수는 음극의 표면에서 전자를 방출하기 위하여 요구되는 전압으로서 재질에 따라 다르다. 음극의 온도가 일정하다면 재질의 일함수가 낮을수록 많은 전자가 방출되어 전류밀도는 증가한다. 용접에서 사용되는 높은 전류를 얻으려면 고온이 요구되며 고온에 의하여 전극으로부터 전자가 방출되려면 전극의 재료로 탄소나 텅스텐과 같이 고온에서 녹지 않는 재질이 요구된다. 그러나, 철강이나 알루미늄 등의 소모성 와이어를 음극으로 이용하는 경우는 전극의 방출에 필요한 온도에도 달하기 전에 와이어가 용융 및 이탈되므로 Eq.(1)을 이용할 수 없다. 이와 같은 경우의 전자 방출 현상을 비 열전자 방출이라 하며 원리는 다음과 같다. 고온에서 음극이 용융되면 음극의 표면이 산화되어 산화막이 형성된다. 일반적으로 산화막의 일함수는 금속에 비해 낮기 때문에 전자는 Fe나 Al과 같은 금속보다 방출에 소요되는 에너지가 작은 산화막에서 방출된다. 그러므로 낮은 온도에서도 전자가 발생하게 되어 용접에 필요한 높은 전류를 얻을 수 있다. 일반적으로 음극에서의 전류 밀도는 $10^6 - 4 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ 정도로서 양극의 전류밀도($10^2 - 10^5 \text{ A/cm}^2$)보다 높으며, 음극의 방출점에서는 이온 충격에 의해 산화물이 파괴되는 상당히 짧은 시간동안에 능률이 좋은 전자방출이 지속되고, 그것이 끝나면 다른 방출점으로 빠르게 이동한다. 따라서 양극과 달리 고정되어 있지 않고 음극 표면상을 불규칙적으로 빠르게 이동하는 특성이 있다. 그러므로 아크는 집중되지 못하고, 와이어 선단으로부터 뒤쪽으로 상당한 거리까지 이동하여 거시적으로는 와이어 끝부분 일부를 아크가 둘러싼 형태로 되어 있다. 또한, 와이어 용·용속도는 양극보다 빠르지만 아크는 불안정하며 용적의 온도는 양극에서보다 낮아진다³⁾.

양극의 역할은 전자를 발생시키는 음극에 비하여 단순하며 양극점은 고정되어 있다. 또한, 전자가 충돌하면서 보유한 에너지를 방출하기 때문에 양극에서 발생하는 열량은 음극에 비하여 높지만 고정된 양극점의 파열로 인하여 와이어 용·용속도는 늦게 된다.

3. AC Pulse 전류 파형의 설계 개념

3.1 EN비의 정의

AC pulse 파형은 DCEP와 DCEN을 주기적으로 반복하는 것으로서 Eq.(2)와 같이 정의되는 EN비를 적용하여 와이어 용융속도 및 입열량을 제어하였다. Fig. 2는 AC 펄스 파형을 개략적으로 나타낸 것이다¹⁾.

$$EN\ ratio(\%) = \left[\frac{I_{EN} \times T_{EN}}{I_{EP} \times T_{EP} + I_{EN} \times T_{EN}} \times 100 \right] \quad (2)$$

여기서, I_{EN} : DCEN구간의 평균전류(A)

I_{EP} : DCEP구간의 평균전류(A)

T_{EN} : DCEN구간 유지시간(s)

T_{EP} : DCEP구간 유지시간(s)

Fig. 3은 Ushio 등이 연구한 EN비에 따른 와이어 용융속도를 나타낸 것이다.¹⁾ EN비가 증가할수록 일정한 용접 전류에서는 와이어 용융속도가 높아지고, 일정한 와이어를 용융시키기 위해 필요한 용접 전류는 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 EN비의 증가에 따른 비드의 형상을 개략적으로 나타낸 것이다.

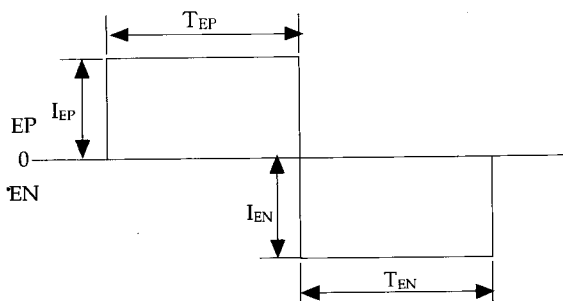


Fig. 2 Schematic of AC Pulse waveform

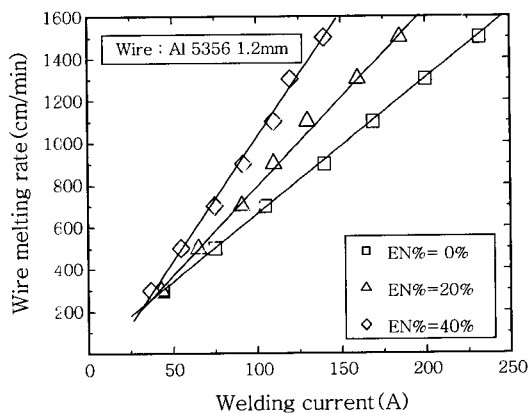


Fig. 2 Schematic of AC Pulse waveform

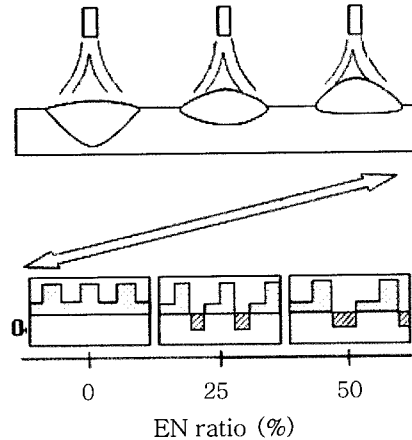


Fig. 4 The shape of bead by EN ratio

Table 1 Electric property of steel and Al alloy

	Resistivity ($\Omega/\text{mm}^2/\text{mm}$)	Electric conductivity (% IACS)
Al 5052	0.050	35
SS400	0.120	16
Cu	0.018	100

3.2 와이어 송급속도와 출력 전류의 관계

아크 용접의 와이어 용융은 고온의 아크와 돌출된 와이어의 저항발열이 합해져서 이루어진다²⁾. 저항발열의 경우 전류의 제곱과 소재의 고유저항에 비례하기 때문에 전류가 증가할수록, 금속의 고유저항이 높을수록 저항발열은 증가한다. 따라서 일반적으로 강을 용접하는 경우의 와이어 송급속도는 전류에 따른 2차식으로 증가하도록 하지만, 알루미늄의 경우는 Table 1과 같이 도전율은 강에 비해 약 4배정도로 높고, 고유저항은 강의 약 1/5정도이기 때문에 돌출된 와이어의 저항 발열에 대한 고려 없이 1차식의 와이어 송급속도로 설계할 수 있다.

3.3 용적 크기와 펄스 주파수의 관계

Fig. 5와 같이 일반적인 펄스 용접에서의 용적이행은 피크 전류에서 급격히 상승한 전류로 인한 전자기적 핀치력으로 인해 피크 전류의 끝부분에서 발생하는 1 pulse - 1 drop을 한다. 본 연구에서 적용한 AC pulse 용접도 마찬가지로 정상상태에서 단락이 없는 스프레이 이행으로 1 pulse - 1 drop 하는 것을 목표로 한다. 따라서 와이어 송급속도가 정해졌을 때, 적절한 용적의 크기를 이행시키기 위해서는 그에 상응하는 펄스 주파수를 결정해야 한다. Eq. (3)는 용적크기와 펄스 주파수의 관계를 나타낸 식이다.

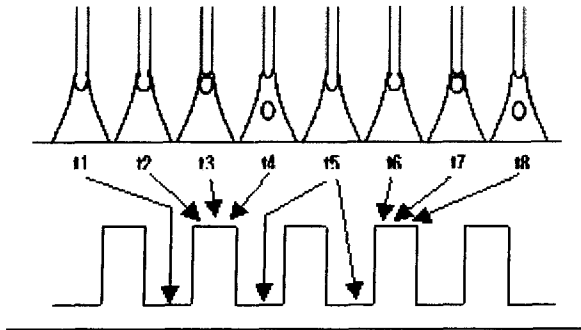


Fig. 5 Schematic of metal transfer on pulse welding

$$f_p = (Rw \times (\frac{D_w}{2})^2 \times \pi) / ((\frac{Dd}{2})^3 \times \frac{4}{3} \times \pi) \quad (3)$$

여기서, f_p : 펄스 주파수 (Hz)
 Rw : 와이어 송급속도 (mm/sec)
 D_w : 와이어 직경 (mm)
 Dd : 용적 직경 (mm)

펄스 주파수는 용적 직경에 반비례하는 것을 알 수 있다.

3.4 AC Pulse 전류 파형의 형상

Fig. 6은 외국 제품의 전류 파형과 본 연구에서 개발된 전류 파형을 나타낸 개략도이다. AC Pulse 전류는 0점을 통과하기 때문에 이 때, 매우 높은 고전압으로서 아크를 유지하게 된다. 또한, 0점을 통과한 후 아크가 불안정해지기 쉽기 때문에 본 연구에서는 0점 통과 후 바로 피크 전류로 상승하는 형태의 전류 파형을 설계하였다.

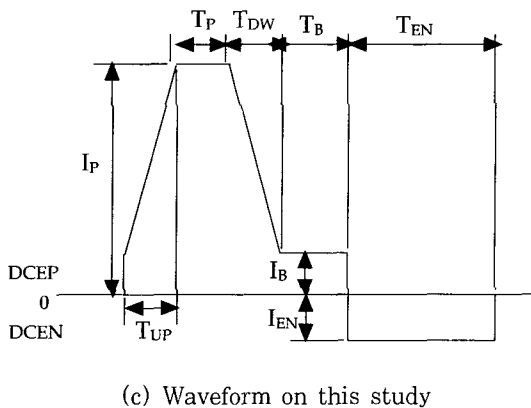
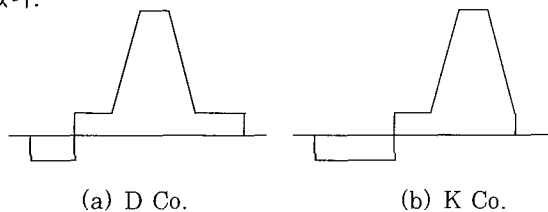


Fig. 6 Schematic of design waveform

3.5 아크길이 제어 알고리즘

Fig. 7은 펄스 용접에서 일반적으로 적용되고 있는 아크 길이 제어를 간략하게 나타낸 것으로, 아크 길이를 제어하기 위해 앞선 주기의 전압을 파드백하여 베이스 시간을 변화시킨다. 그러나 이런 방식의 제어는 용접 중 아크 길이가 변했을 때, 용적의 크기와 용적 이행의 주기가 함께 변화하기 때문에 용접성에 불리한 작용을 할 것이라고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 용접 중 아크 길이가 변할지라도 펄스 주기가 항상 일정하게 될 수 있도록 하기 위하여 베이스 전류로서 아크 길이를 제어했다. 즉, 아크 길이가 길어졌을 때 베이스 시간은 동일하게 하고, 베이스 전류를 낮게 하여 아크 길이를 원래대로 하고, 반대로 아크 길이가 짧아졌을 때에는 베이스 전류를 높게 하여 아크 길이를 원래대로 하였다. Fig. 8은 본 연구에서 사용된 아크 길이의 제어를 나타낸 개략도이다.

전술한 바와 같이 와이어 송급속도와 그에 따른 펄스 주파수, 평균전류에 따른 EN 전류(I_{EN})를 결정하고, 이를 토대로 하여 EN비 20%일 때의 AC 펄스 파형을 설계하였다. Fig. 9는 설계된 파형을 통하여 계산된 이론적인 평균전류이며, Fig. 10은 이 때의 이론적인 EN비를 나타낸 것이다.

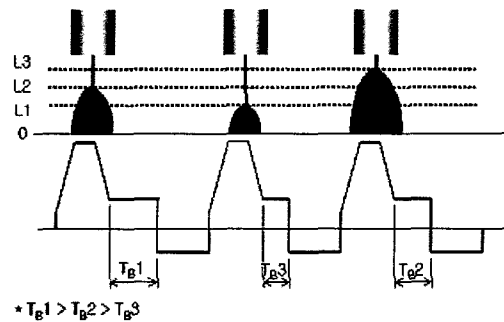


Fig. 7 Common control of arc length

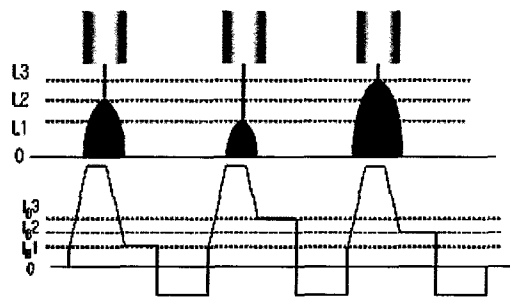


Fig. 8 Control of arc length on this study

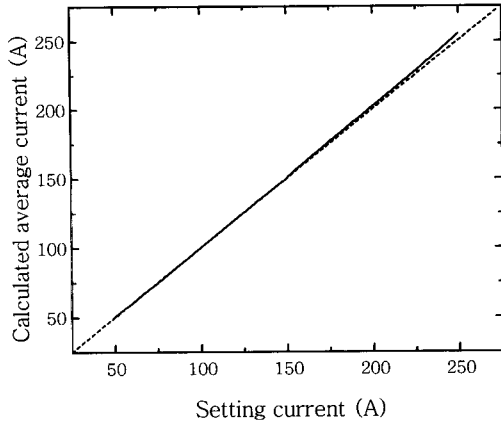


Fig. 9 Comparison between calculated and setting average current (EN ratio 20%)

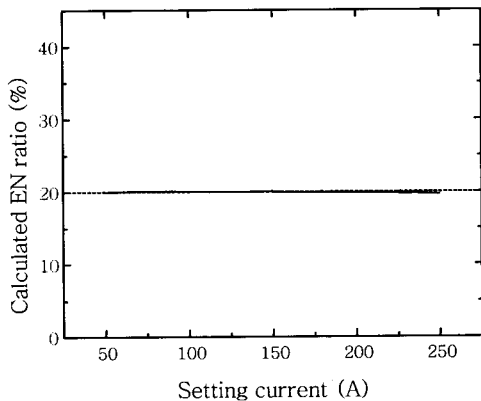


Fig. 10 Calculated EN ratio by setting average current (EN ratio 20%)

4. 사용재료 및 실험방법

설계된 AC Pulse 파형을 적용한 용접기를 사용하여 파형의 출력특성을 평가하기 위한 실험에서는 알루미늄판(AI 5052, 길이 : 300mm, 폭 : 50mm, 두께 : 1.2, 3 5mm)을 사용하였다. 실드가스 100%Ar, A5356 (Φ1.2)와이어를 사용하여 120cm/min의 속도로 비드 용접과 겹치기 용접을 하였고, 비드 용접에서는 평균전류를 50 ~ 150A까지 20A씩, EN비는 5 ~, 40%까지 5%씩 증가시켰다. 또한, 겹치기 용접의 경우는 이음부의 설정 갭을 0, 0.5, 1, 1.5mm로 하여 평균전류 60A, EN비 0, 20%로 하였다.

용접 중 출력 전류와 전압, 송급속도는 전류, 전압, 송급속도, 송급전압의 4채널을 계측할 수 있는 아크 모니터 시스템(WAM4000N)을 사용하여 샘플링 주파수 10000Hz로 계측하였으며, 계측된 파형은 별도로 제작된 프로그램을 통하여 분석하였다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 EN비에 따른 와이어 용융속도

Fig. 11은 본 연구에서 실험을 통해 획득한 EN비에 따른 와이어 용융속도이다. Ushio 등¹⁾이 연구한 결과와 거의 동일한 경향을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

5.2 평균전류에 따른 비드외관

Fig. 12는 EN비 20%로 용접했을 때의 각 평균전류에 따른 비드 외관과 평균전류 110A에서의 용접전류, 전압파형을 나타낸 것이다. 120cm/min의 고속으로 용접했음에도 단락이 없는 매우 양호한 용접 비드를 나타내고 있는 것을 비드 외관과 출력 파형을 통해 확인할 수 있었다.

5.3 EN비에 따른 파형 및 비드 단면

Fig. 13은 AC Pulse 용접에서 EN비에 따른 용접전류, 전압 파형을 나타낸 것이다. EN전류의 시간과 EN비가 비례하는 것을 알 수 있고, 이로 인해 와이어 송급속도와 입열량을 제어하게 된다. Fig. 13은 동일한 와이어 송급속도에서 EN비 변화에 따른 용접 비드의 단면 사진이다.

Fig. 14에서 EN비가 증가함에 따라 용입깊이는 얇아지고, 비드 폭은 좁아지며 덧살높이는 증가하는 것을 알 수 있다. Fig 15는 평균 전류 110A에서 EN비 변화에 따른 용입깊이, 비드 폭, 덧살높이의 관계를 나타낸 그래프이다.

Fig. 16은 겹치기 용접에 있어서 루트 갭이 존재할 때의 용접성을 나타낸 그림이다. 설정 루트 갭이 0mm 일 때에는 EN비 0, 20%에서 용락이 발생하지 않았지

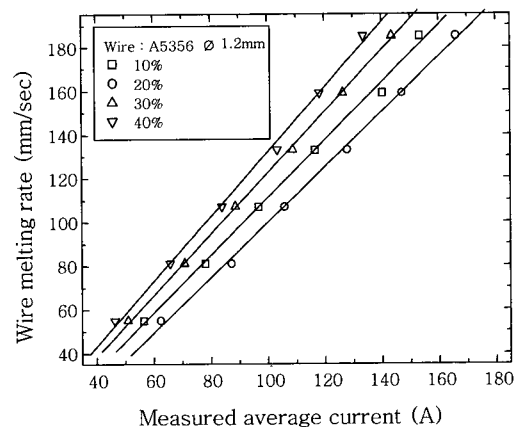
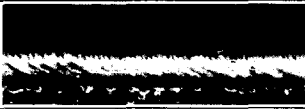

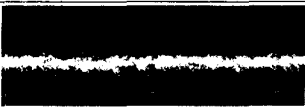



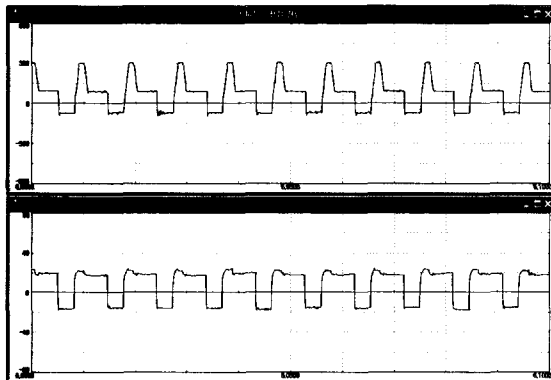


Fig. 11 Relationship between EN ratio and wire melting rate

Current (A)	t (mm)	Bead shape
56.55	1.2	
78.12	3	
96.81	3	
116.72	3	
133.05	3	
153.40	5	

* t : plate thick

(a) Bead shape by average current



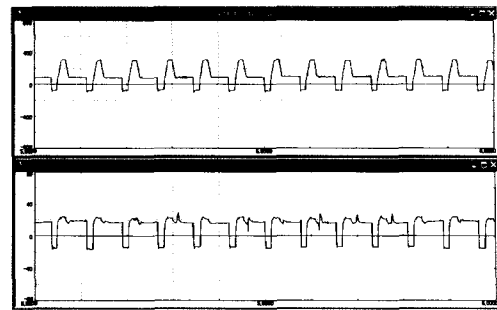
(b) Waveform (average current 110A)

Fig. 12 Bead shape by average current and waveform

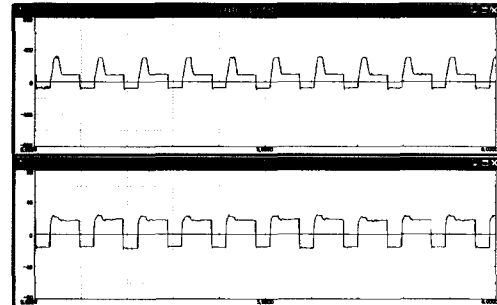
만 그 외의 설정 루트 갭(0.5, 1.0, 1.5mm)에서는 EN비 0%에서는 용락이 발생하였고, EN비 20%에서는 용락이 발생하지 않은 양호한 비드가 형성되었음을 알 수 있다.

6. 결 론

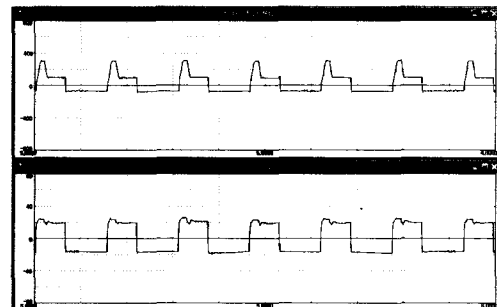
본 연구에서는 박판 알루미늄 용접의 품질 및 생산성을 향상시키기 위하여 AC Pulse 전류 파형을 설계하였다. 개발된 용접기를 사용하여 획득한 파형과 비드 외관, 단면을 통하여 와이어 송급속도와 EN비에 따른



(a) Average current : 110A, EN ratio : 10%











(b) Average current : 110A, EN ratio : 20%



(c) Average current : 110A, EN ratio : 40%

Fig. 13 Waveform by EN ratio

Setting root-gap	EN ratio	
	0%	20%
0mm		
0.5mm		
1.0mm		
1.5mm		

Average current : 60A, Welding speed : 120cm/min, thick of specimen : 1.2mm

Fig. 14 The shape of bead cross-section by EN ratio

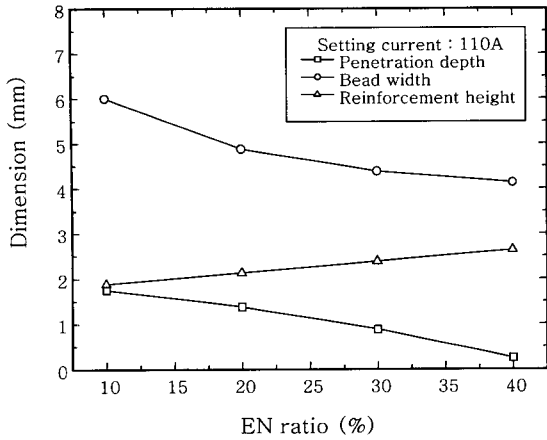


Fig. 15 Variation of bead shape by EN ratio

Setting root-gap \ EN ratio	0%	20%
0mm		
0.5mm		
1.0mm		
1.5mm		

Average current : 60A, Welding speed : 120cm/min, thick of specimen : 1.2mm

Fig. 16 The shape of bead cross-section by setting gap on lap joint

출력 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 와이어 송급속도와 출력 전류와의 관계는 알루미늄이라는 소재의 특성에 따라 1차식으로 설계할 수 있었다.

2) 용적에 대한 펄스 주파수의 관계를 통하여 적절한

용적 크기를 결정함에 따라 펄스 주파수를 결정할 수 있었다.

3) 기존의 아크길이 제어방식인 T_B 제어 보다 더 유리한 I_B 제어방식을 확립할 수 있었다.

4) 기준이 되는 EN비 20%에서 와이어 송급속도를 변경하면서 용접한 결과 전체적으로 단락이 거의 없고 비드 외관 또한 우수한 용접결과를 얻을 수 있었다.

5) 동일 전류에서 EN비를 변경하면서 용접한 결과 EN비의 증가에 따른 용접 전류, 및 입열량의 감소로 인해 용입깊이, 비드 폭은 감소하고, 덧살높이는 증가하였다.

6) 박판에서 주로 적용되는 겹치기 용접에 있어서, 루트 갭이 존재하는 경우는 EN비 20%에서는 용락이 없는 우수한 용접부를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- Masao Ushio : Improve Sheet Metal Welding Quality & Productivity with AC Pulsed Welding System, IIW Doc. XII-1629-00
- 대한용접학회편 : 용접·접합편람, 대한용접학회, 1998 (in Korean)
- B. Altshuller, A Guide to GMA Welding of Aluminum, Welding Journal, June-1998, 49-55
- Lim Sung Lyong : Design Concept and Output Characteristic of AC pulse Waveform for MIG Welding of Al sheet, Proceedings of the 2002 Spring Annual Meeting of Korean Welding Society, Vol.39 (2002), 43-45 (in Korean)
- Kong Hyun Sang : The effect of EN ratio in AC pulse Welding affected burn through on MIG Welding for sheet Al metal, Proceedings of the 2001 Annual Autumn Meeting of Korean Welding Society, Vol.38 (2001), 15-18 (in Korean)
- Ueyama Tomoyuki : MIG Welding Machine of Aluminum and Its Alloy, Journal of the Japan Welding Society, 70-3 (2001-3), 39-44 (in Japanese)