

## CO<sub>2</sub> 박판 고속용접에서 용접현상 분석과 전류상승기울기의 영향

김 영 삼\* · 유 회 수\* · 김 희 진\*

\*한국생산기술연구원

### Analysis of Welding Phenomena and Effect of Short Circuit Current Rise Slope in the High Speed CO<sub>2</sub> Welding of Steel Sheets

Young-Sam Kim\*, Hoi-Soo Ryoo\* and Hee-Jin Kim\*

\*Advanced Welding & Joining Technology Team, KITECH, Chonan 330-820, Korea

#### Abstract

In high speed CO<sub>2</sub> welding, it has been known to produce no sound bead with undercut or humping bead. In this study welding phenomena through synchronized high speed camera and output welding voltage and current waveform has been analyzed. For the purpose to improve a welding bead, effect of short circuit current rise slope has been examined. With commercial power source it was produced no sound bead by instantaneous short circuit, long arc period and stubbing at welding speed 2.5mm/min. Humping bead or undercut were showed by instantaneous short circuit and long arc period. Also, the weld bead was not formed during the long short circuit period after stubbing start and long arc extinguishment period after wire sticking by failure of arc regeneration, because the droplet was not transferred to weld pool. With increasing short circuit current rise slope the frequency of stubbing was decreased and the normal short circuit rate was increased. A control of short circuit current rise slope was effective factor in high speed welding.

\* Corresponding author : ysys032@kitech.re.kr

(Received February 14, 2005)

Key Words : Short circuit current rise slope, High speed welding, Stubbing CO<sub>2</sub> arc welding, Short circuit transfer, Welding bead

#### 1. 서 론

GMA 용접은 보호가스에 따라 MIG, MAG, CO<sub>2</sub> 용접으로 나뉘는데, 이 중 CO<sub>2</sub> 용접은 보호가스의 가격이 저렴하다는 장점 때문에 가장 선호되는 용접기법이다. 하지만 이 CO<sub>2</sub> 용접의 큰 문제점은 다량의 스파터가 발생한다는 것이다. 그러나 최근 용접전원이 인버터화되면서 출력의 고속제어가 가능해짐에 따라 기존의 용접전원으로는 불가능하였던 복잡한 출력을 비교적 용이하게 제어할 수 있게 되었으며, 이로써 용접시의 출력을 제어하는 파형제어 기법의 개발로 스파터의 발생을 기존 용접기 대비 1/3~1/4 수준으로 감소시킬 수 있게 되었다<sup>1)</sup>.

CO<sub>2</sub> 용접에서 스파터 저감형 용접기가 개발되면서

용접 수요자들의 관심은 좀 더 낮은 비용으로 더 높은 생산성을 확보할 수 있는지에 집중되었으며, 이에 따라 고속용접에 대한 관심이 높아지게 되었다. 실제 현장의 용접 자동화 라인에서는 어느 정도의 스파터가 발생하더라도 좀 더 빠른 속도의 용접으로 생산성을 높이고자 하는 경향이 있는데, 이는 대량 생산을 위한 생산설비의 증설보다는 용접속도를 고속화하는 것이 더 높은 생산성과 이에 따른 원가의 절감을 가져올 수 있기 때문이다.

일반적으로 CO<sub>2</sub> 박판의 고속용접을 위해서는 전류를 높이고 전압을 낮추어 단락비(short circuit rate)를 증가 시키는 것이 중요하다. 그러나 용접전압이 낮게 설정되면 단락시 상승전류가 낮아져 아크가 재발생되지 않고 용융풀에 부딪치는 스티빙 현상(장기단락)이 발생

되며, 순간단락과 장기아크 등과 같은 현상으로 인하여 언더컷 또는 험핑비드가 발생하여 고속용접에 어려움이 있다<sup>2)</sup>.

국내의 일반 용접기의 경우에는 최대 1~1.5m/min 까지 용접이 가능하다 그러나 일본에서는 고속용접에 관한 활발한 연구로 80년대 말에 이미 3~4m/min까지 용접이 가능한 고속용접기가 개발되었다<sup>3-4)</sup>. 이들 고속용접기의 특징은 공통적으로 단락시 전류상승기울기의 제어를 통하여 고속용접을 실현하고 있다 그러나 국내에서는 아직 CO<sub>2</sub> 고속용접기와 고속용접 현상에 대한 연구가 미비한 실정이다 따라서 본 연구에서는 고속용접시 나타나는 현상에 대하여 용접파형과 고속촬영 영상을 통하여 분석하고 고속용접 또는 고속용접기 개발에 기초가 되는 단락전류상승기울기가 고속용접에 미치는 영향에 대하여 연구하였다

## 2. 실험방법

본 실험에 사용된 용접전원은 단락전류상승기울기 설정기능이 있는 500A급 인버터 용접전원으로서 국내에서 제조된 것을 사용하였다 용접실험에 사용된 용접재료는 직경 1.2mm의 CO<sub>2</sub> 용접용 와이어 (KS규격: YGW11)를 사용하였다 용접은 2.3mm 두께의 연강 판재 위에 비드 온 플레이트(bead-on-plate)용접을 실시하였다 보호가스는 100% CO<sub>2</sub> 를 사용하였고 가스유량은 25 l/min이었다.

고속용접은 용접속도 2.5m/min 및 와이어 송급속도 5.5m/min 의 조건에서 수행하였으며 단락전류상승기울기가 고속용접에 미치는 영향에 대한 시험은 용접속도 2m/min 및 와이어 송급속도 6.7m/min의 조건에서 수행하고 단락전류상승기울기 값은 Table 1의 6가지 조건으로 용접을 실시하였다 여기서 단락전류상승기울기라 함은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 용접기 자체

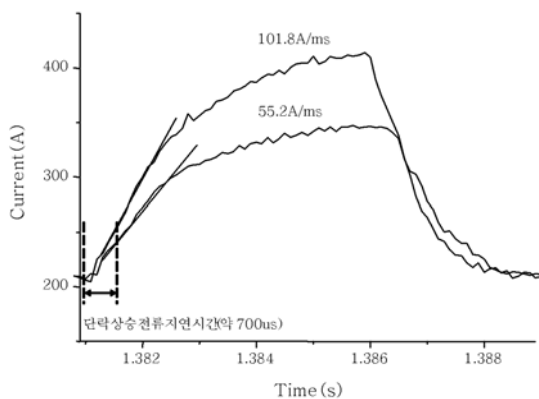


Fig. 1 The change of current waveform by short circuit current rise slope

의 단락전류상승지연시간(약 700μs) 후의 전류측정치에서부터 300A에 이르는 시간까지의 전류 변화율이다

용접파형은 20kHz의 샘플링 속도로 5초간 측정하였으며, 또한 용접현상을 보기위하여 디지털 고속 카메라로 촬영하였다. 이 때 촬영속도는 4,000frame/s 였으며, 셔터속도는 1/16,000s 였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 CO<sub>2</sub> 고속용접 현상

#### 3.1.1 순간단락, 장기아크 현상

일반 인버터형 용접기를 사용하여 2.5m/min의 속도로 비드 온 플레이트(Bead-on-plate) 용접을 실시하면서 용접현상을 관찰하였다 이 때의 용접 전류, 전압 조건은 173A, 19V (WFS: 5.5m/min, CTWD: 12mm) 이었다.

Fig. 2는 고속용접시 발생하는 순간단락(Instantaneous Short Circuit, I.S.C)과 장기아크 현상을 보여주는 동기화된 고속영상과 용접파형이다 아크 재생 후 Fig. 2의 ①~⑧ 기간동안 순간단락과 장기아크로 인하여 용적이 용융풀로 이행되지 못하고 용적이 점점 거대화되는 것을 볼 수 있으며, ⑧에 이르러서 큰 용적이 중력에 의하여 정상단락(Normal Short Circuit, N.S.C)으로 용적이 이행하고 있다 이로 인하여 연속적인 순간단락과 장기아크가 발생하는 용접구간은 용적이 이행되지 못하여 오목한 비드가 형성되며 조대해진 용적이 단락이행 되는 시점은 불룩한 비드가 형성이 된다 그러므로 순간단락과 장기아크 험핑비드(humping bead) 또는 언더컷(under cut)을 발생시킨다. 언더컷은 단락이행 사이에 순간단락 또는 장기아크에 의해서 용적이 이행되지 못하여 생기며, 단락이행 사이에 순간단락 횃

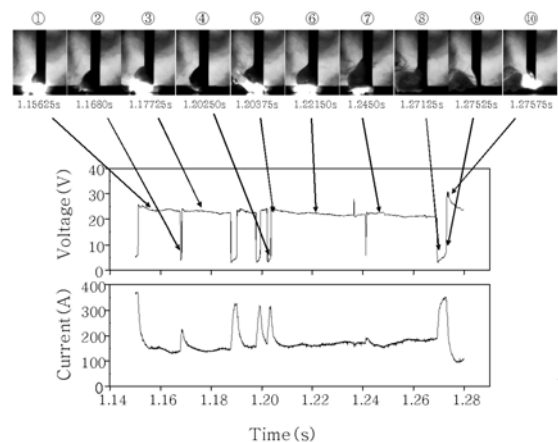
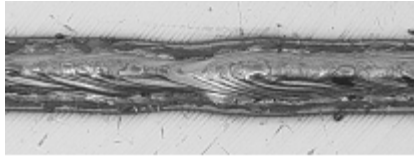


Fig. 2 Synchronized high speed image and welding waveform of the high speed welding - instantaneous short circuit

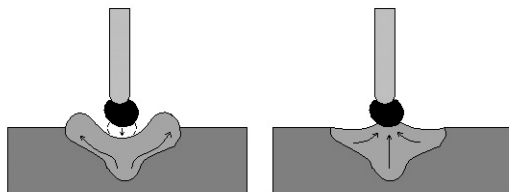


**Fig. 3** Humping bead appearance at the high speed welding formed by the multiple instantaneous short circuit and long arc period

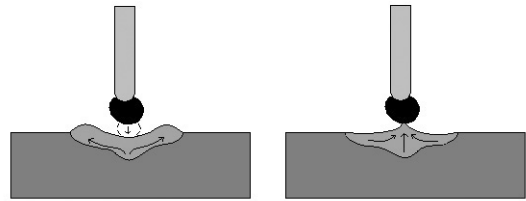
수가 많아지거나 장기아크 기간이 길어질 경우 Fig. 3에 보인 바와 같이 험핑비드를 발생시킨다

순간단락은 저속용접보다 고속용접에서 더욱 많이 발생하게 된다. 즉 같은 전압, 전류 조건에서 0.5m/min 속도로 저속용접 했을 경우, 정상단락 비율이 약 76% 정도 이지만 2m/min 속도로 했을 경우에는 50% 이하로 저하하였다 이러한 차이는 정상단락 용적과 용융풀 간의 상호작용에서 그 원인을 찾을 수 있다. 저속용접은 고속용접에 비하여 입열량이 많기 때문에 용입 깊이와 용융풀이 크게 형성되며 또한 용융풀의 유동이 고속용접보다 활발하게 일어난다. 따라서 저속용접에서는 용융풀의 유동으로 인하여 용적과 용융풀이 충분히 접촉하여 정상적인 단락을 유도하게 된다 일반 저속용접에서의 용융풀 거동에 의한 단락과정의 개략도를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)에 보는 바와 같이 아크기간동안 아크력에 의하여 용융풀이 밖으로 밀려나면서 움푹 파이게 되고, 아크가 용융풀 내에 파묻히게 된다. Fig. 4(b)에서 밀려났던 용융풀이 움푹 파인 부분으로 다시 물러들면서 볼록한 형태를 가지게 된다 이때 볼록한 형태의 높이가 높을수록 정상단락이 되고 낮을 경우 순간단락이 되는 것이다. 따라서 저속용접에서는 용융풀이 충분히 유동할 수 있는 조건이 조성되어 정상단락 비가 커지게 된다

그러나 Fig. 5와 Fig. 2의 고속사진에 보인 바와 같이 고속용접에서는 용접선단에 용융풀이 적게 형성되기 때문에 용융풀의 유동이 적어진다. 결국 용적과 용융풀이 충분히 접촉하지 못하는 상황이 되어 순간단락이 자



**Fig. 4** Schematic diagram of short circuit mechanism by the weld pool oscillation at the low speed CO<sub>2</sub> welding



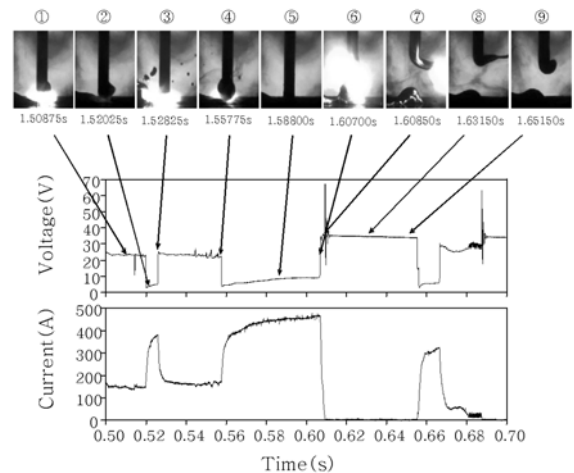
(a) Arc (b) Shot circuit  
**Fig. 5** Schematic diagram of short circuit mechanism by the weld pool oscillation at the high speed CO<sub>2</sub> welding

주 발생하게 되는 것이다. 또한 Fig. 2의 ⑤~⑦에서 보는 바와 같이 용융풀의 유동이 적어지면 단락이 되지 못하고 장기아크를 유발하는 것을 볼 수 있다

따라서 고속용접에서는 용융풀의 유동이 적기 때문에 단락시점에서 전류를 낮추어 순간단락을 정상단락화하는 것이 중요하며, 또한 장기아크를 해소하기 위하여 단락 후 일정 시간이 지나면 전류를 감소시켜 단락을 촉진시키는 것이 중요할 것이다

3.1.2 스텐빙(Stubbing) 현상

단락이행에서 단락구간에서는 전압이 낮아짐과 동시에 전류도 같이 낮아지게 된다. 전류가 낮아지면 용융속도가 저하하여 송급된 와이어가 충분히 용융되지 못하기 때문에 와이어의 송급속도에 비해 용융속도가 느려져 아크의 길이가 점점 짧아지고, 결국에 와이어가 용융풀에 박히는 현상이 나타난다. 이러한 현상을 스텐빙 현상이라고 하는 것이다. Fig. 6은 고속용접시 발생하는 스텐빙 현상을 보여주는 고속영상과 용접파형이다. Fig. 6의 ④에서 단락이 시작된 후 아크가 재발생되지 못하고 장기단락 과정을 거치면서 주울열에 의해



**Fig. 6** Synchronized high speed image and welding waveform of the high speed welding - Stubbing

와이어가 가열된다 ⑥에 이르러 와이어 중간에서 아크가 발생되어 와이어가 파단되는 현상이 발생한다 이는 아크 스타트 실패 시 나타나는 스티킹(sticking) 현상<sup>5)</sup>과 유사한 현상이다 정상단락 기간이 6~7ms 이내인 것에 비하여 스티킹 현상에 의한 장기단락은 48ms로 매우 긴 시간 동안 발생한다

이런 현상은 저속용접에서도 나타날 수 있다 그러나 저속용접에서는 속도가 느리기 때문에 다음 단락 전까지 용융풀의 유동으로 인하여 비드가 형성될 수 있지만, 고속용접에서는 용접속도가 빠르기 때문에 그러한 복원이 어렵다. 스티킹 현상으로 인한 장기단락의 발생 후 와이어가 파단되면 다시 정상적으로 아크가 재발생되는 시점까지 약 50ms의 장시간이 소요되며 그 기간 동안은 아크가 끊김(⑧~⑨)으로 인해 비드가 형성되지 못한다.

따라서 스티킹 현상은 고속용접에서 용접 비드가 형성되지 못하는 가장 큰 원인이 되며 스티킹 현상으로 인하여 Fig. 7에 보인바와 같이 아크가 끊기는 시점을 전후로 비드가 형성되지 못하게 된다 이러한 스티킹 현상을 억제하기 위하여 시판되고 있는 고속용접기의 경우에는 단락전류상승기울기를 높이고 또한 약 6ms이상의 장기단락시 전류를 증가시켜 단락을 촉진시키는 방법을 사용하고 있다<sup>2)</sup>

### 3.2 고속용접시 단락전류상승기울기의 제어

고속용접에서 이와 같은 현상을 제어하기 위하여 단락전류상승기울기의 제어를 하는 것이 효과적이라고 보고된 바 있다<sup>2)</sup>. 특히, 고속용접에서 발생하는 스티킹 현상을 방지하기 위해서는 단락 시 전류상승기울기를 증가시켜 와이어의 용융속도를 높여 일정길이 이상의 아크를 유지해 주는 것이 중요하다는 것이다

Fig. 8 (a)~(d)는 Table 1의 단락전류상승기울기 조건으로 용접했을 때, 각각의 비드, 파형과 피크 전류이다. 이 때 용접속도는 2m/min이었다. Fig. 8 (a)~(c)까지는 앞서 말했던 고속용접시 나타나는 스티킹 현상으로 인한 불건전한 비드와 파형을 보였다 그러나 단락전류상승기울기가 높아질수록 비드와 파형이 양호해졌으며, 전류상승기울기가 더욱 높아진 (d)에 이르러서는 스티킹 현상이 완전히 해소되어 비교적 양호한 비드와 파형을 얻을 수 있었다

Table 2에서 보는 바와 같이 단락전류상승기울기가 증가함에 따라 스티킹 횟수가 감소하고 단락비가 증가하였으며, 정상단락의 비율이 순간단락에 비해 증가하였다. Hermans<sup>6)</sup>에 의하면 단락비와 용융풀의 진동 주파수는 Fig. 9에 보인 바와 같이 비례관계에 있으며 용융풀의 유동에 영향을 주는 것은 아크가 재생될 때의

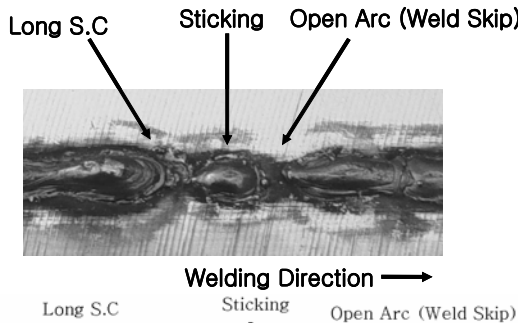


Table 2 Change of high speed welding phenomena for conditions of short circuit current rise slope at welding speed 2m/min

Short Circuit Rate (times/sec)	N.S.C / I.S.C (%)
below 55.2 A/ms	-
55.2 A/ms	58/42
78.9 A/ms	59/41
84.6 A/ms	61/39
91.3 A/ms	60/40
101.8 A/ms	65/35

Fig. 7 Bead appearance formed by stubbing at the high speed CO<sub>2</sub> welding

Table 1 Short circuit current rise slope conditions for the high speed welding.

Condition	Short Circuit Current Rise Slope
1	below 55.2 A/ms
2	55.2 A/ms
3	78.9 A/ms
4	84.6 A/ms
5	91.3 A/ms
6	101.8 A/ms



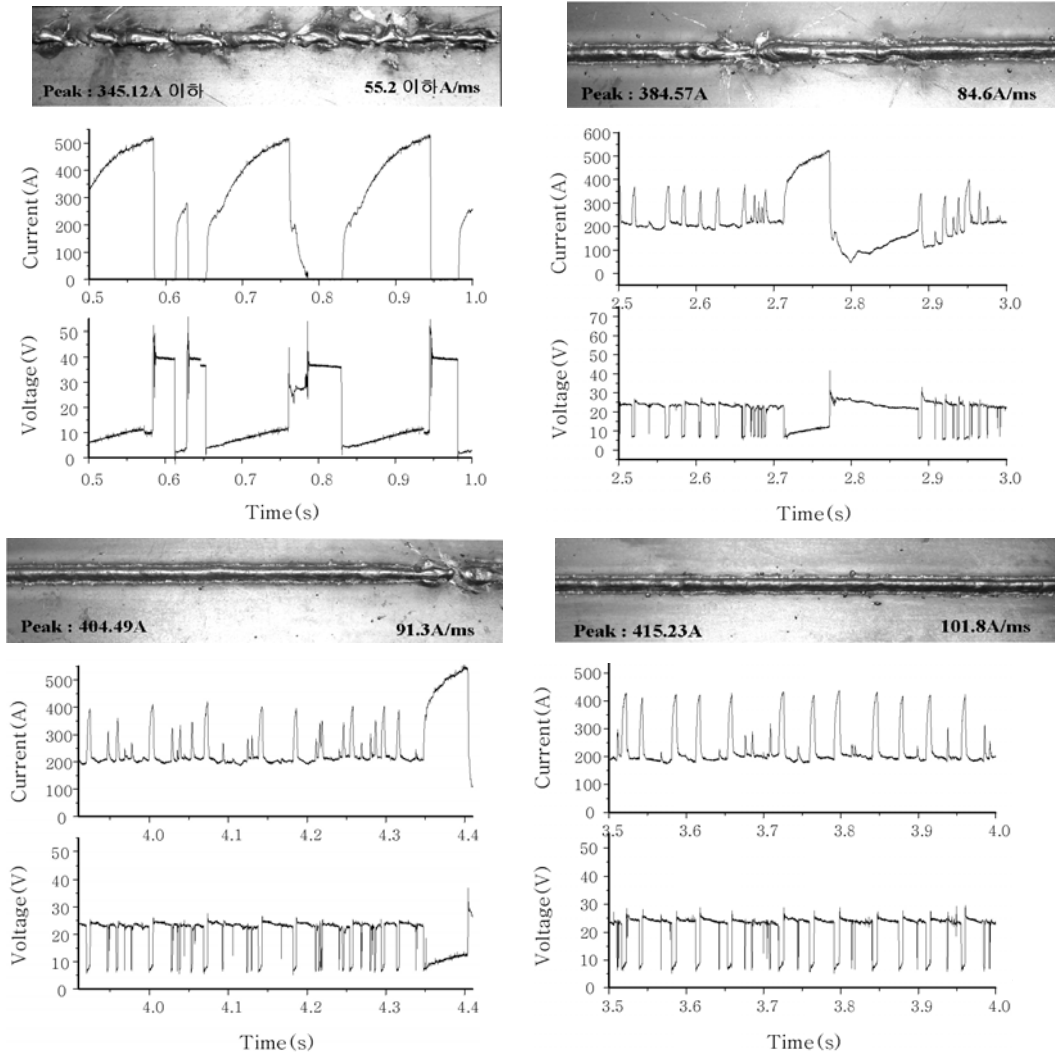


Fig. 8 Bead appearance and waveform by the change of short circuit current rise slope at welding speed 2m/min

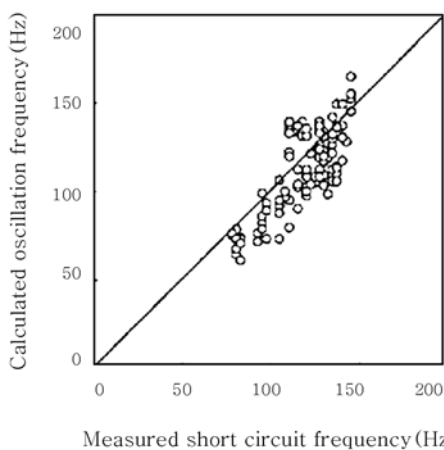


Fig. 9 The calculated oscillation frequency vs. the measured short circuit frequency for conditions of maximum process stability<sup>6)</sup>

아크 압력과 단락 시 가교가 파단되면서 용적이 용융풀로 이행될 때의 순간과 관련이 있다고 하였다 따라서

전류상승기울기가 클 경우 단락 해소 시 피크 전류가 크게 되고 재아크의 압력이 증가하여 용융풀의 유동이 더 활발해질 것이므로 다음 단락 시 용적과 용융풀간의 접촉을 충분하게 하여 정상단락 확률이 높아질 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

CO<sub>2</sub> 고속용접에서 용접현상과 단락전류상승기울기 변화에 따른 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 고속용접에서의 험핑비드와 언더컷의 발생원인은 순간단락과 장기아크의 발생으로 인하여 장기간동안 용적이행이 되지 못하고 그러는 동안 거대해진 용적이 다음 단락에서 용융풀로 한번에 이행되기 때문이다
- 2) 스퍼빙 현상은 단락 시 전류상승기울기가 낮을수

록 발생빈도가 커지며, 장기단락과 아크 끊김 현상을 수반하여 비드가 형성되지 않는 용접구간이 발생한다

3) 스테핑 현상 제어에 있어서 단락전류상승기울기와 피크전류는 매우 중요하며, 단락전류상승기울기가 증가할수록 스테핑 발생빈도가 감소하였고 정상단락 비율은 증가하였다.

## 5. 후 기

본 연구는 한국생산기술연구원 2005년도 생산기술연구사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Hee Jin Kim, Hoi-Soo Ryoo and Bong Yong Kang :

- Application of Waveform Control Technology in GMA Welding, J. KWS. **Vol. 21** (2003), 746-747(in Korean)
2. T. Ogasuwara, T. Maruyama, T. Saito, M. Sato and Y. Hida : A Power Source for Gas Shielded Arc Welding with New Current Waveform, *Welding Journal*, **66-3** (1987), 57-63
3. T. Mita : Progress of Arc Welding Technologies, *Journal of the Japan Welding Society*, **69-3** (2000), 6-12 (in Japanese)
4. K. Okamura : Ultra High-speed Arc Welding (4m/min), *Industrial Robot*, **25-3** (1998), 185-192
5. Duk-Jo Park, Sang-Myung Cho : A Waveform Analytics Study to Improve the Arc Start Failure in GMAW, *Proceeding of The 2004 Spring Annual Meeting of Korean Welding Society*, **42** (2004), 54-56 (in Korean)
6. M.J.M. Hermans, G. Den Ouden : Process Behavior and Stability in Short Circuit Gas Metal Arc Welding, *Welding Journal*, **78-4**(1999), 137s-141s