

# GMA 용접전원의 제어기술 동향

유 회 수

## Trends of Control Technology in GMA Welding Power Source

Hoi-Soo Ryoo

### 1. 서 론

전기 용접은 1888년 배터리<sup>1)</sup>를 이용하는 것으로 시작되었으며, 1920년에 AC 트랜스를 이용한 용접전원이 개발되었다. 1969년에 싸리스터(thyristor) 제어형 용접전원이 개발되었고, 성능이 다양하게 발전되었다. 인버터 용접전원은 1983년대 실용화되어 고속제어 및 소형화 그리고 소비전력이 크게 저감되었다. 또한 1980년대부터 마이크로프로세서를 이용하여 Synergic 제어를 통하여 사용자의 편의성이 향상되었다. 1990년대 초부터 스파터를 현저하게 감소시키는 용접전원이 개발되었으며, 최근 들어서는 인버터 스위칭 속도를 100kHz로 높인 용접전원이 상용화되었다.

스파터 저감을 위한 파형제어 기술은 전류상승제어만으로 한계가 있기 때문에 리액터 후단에 2차 스위칭 소자를 추가한 기술이 1980년대 개발되었으나 상용화되지 못하였고<sup>2)</sup>, 1996년대에 고베의 SENSARC 및 링컨의 STT(surface tension transfer) 용접전원이 상용화되었다<sup>3,4)</sup>. 2004년에는 밀러의 RMD(regulated metal deposition)기술이 개발되었다<sup>5)</sup>. 2009년부터 파나소닉은 MTS(metal transfer stabilization) 파형제어 기술<sup>6)</sup>, 다이헨은 CBT(controlled bridge transfer) 파형제어 기술<sup>7)</sup>이 적용된 제품을 판매하고 있다. 이러한 2차 스위칭 소자에 의한 파형제어 기술이 적용된 제품이 출시되는 이유는 스파터에 대한 유저의 요구가 높아 졌다는 것이다. 이러한 용접전원은 기존보다 약 50% 스파터 감소효과가 있다고 보고하고 있다.

이러한 상황에서 국내의 용접로봇에 사용되는 용접전원은 대부분 외산제품이 사용되고 있다. 즉 점점 국산 용접전원의 경쟁력이 떨어지고 있는 실정이다. 따라서 최신 용접전원 기술을 조사하고 용접전원의 개발방향을 보고하고자 한다.

### 2. 용접전원의 제어 기술

용접전원의 제어는 Fig. 1에 보인 바와 같이 용접전류 또는 전압을 피드백하여 설정된 전류 또는 전압의 출력을 내도록 하는 정전압 또는 정전류 제어(피드백제어 또는 메인제어)와, 토치 신호를 받아서 가스 프리플로우, 모터 슬로우 다운, 아크스타트, 메인용접, 크레이터, 모터 정지, 안티스틱 그리고 애프터플로우 등의 시퀀스제어 그리고 단락시 전류상승기울기를 제어하는 파형제어로 구분할 수 있다. 용접전원 제어방식은 Fig. 2와 같이 1980년대부터 8bit 마이크로프로세서를 사용하여 시퀀스 제어를 시작하였으며(Fig. 1), 1996년부터 다양한 용접파형제어 기술이 개발되면서 파형제어를 디지털화하였다. 그리고 2000년대부터 저가의 고속 DSP(digital signal processor)의 등장으로 모든 제어의 풀디지털(full digital)화가 이루어지고 있다<sup>8)</sup>.

#### 2.1 메인(전력)제어 기술

##### 2.1.1 아날로그 제어 기술

아날로그 제어형 인버터 용접전원의 경우 대부분 PWM(pulse width modulation) 제어용 TL494<sup>9)</sup> IC를 사용하였으며, 현재도 가격이 저렴하여 많이 적용되고 있다. 국내 아날로그 제어형 인버터 용접기에 100% 사용한다고 해도 과언은 아니다.

TL494<sup>9)</sup> IC는 Fig. 3에 보인바와 같이 2개의 에러 증폭기가 있고 2개의 오픈컬렉터 PWM 출력단이 있다. 따라서 에러증폭기를 이용하여 피드백 제어회로의 구현이 가능하다.

용접전원의 효율을 올리기 위하여 스위칭 주파수를 100kHz 까지 올리고 있다. 그러나 스위칭 주파수가 증가함에 따라 IGBT(스위칭소자)의 스위칭 손실이 증가하기 때문에 영전압 스위칭(zero voltage switching, ZVS) 방식을 적용하여 스위칭 손실을 줄여야 한다. 이

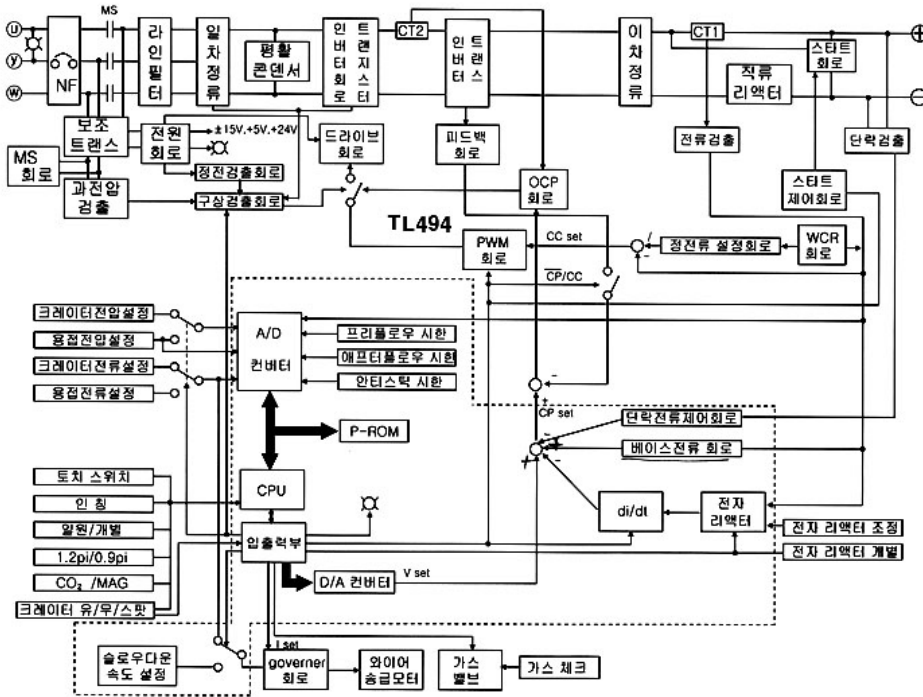


Fig. 1 Schematic diagram of digital sequence controlled GMA welding power source

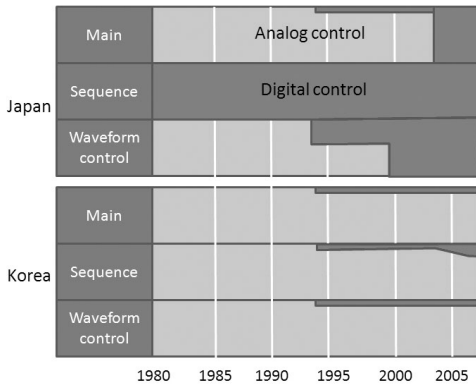


Fig. 2 Trend of inverter control method in welding power source<sup>(7,8)</sup>

를 위해서는 PWM 펄스폭을 고정하고 출력간에 위상 차이를 이용한 위상이동(phase shift) 제어기 UC1875 IC를 사용하며, Fig. 4에 보인바와 같이 4개의 PWM 출력을 내보낸다<sup>(10)</sup>. 위상이동 제어원리는 Fig. 5에 보인바와 같이 OUTA와 OUTC 그리고 OUTB와 OUTD 간의 PWM 위상차이로 출력을 제어한다. 예를 들면 OUTA와 OUTC의 위상차이가 0도 이면 최대 출력 (Fig. 5우측 상단)을 내보내고 위상차이가 90도 이면 두 출력의 상이 겹치지 않기 때문에 출력은 0이 된다.

용접전원의 아날로그 피드백 제어는 Fig. 6에 보인바와 같이 TL494 또는 UC1875에 내장되어 있는 예러 증폭기와 저항 및 콘덴서로 구성된 PI(proportional-integral) 제어 회로를 사용한다. +입력 단에는 설정

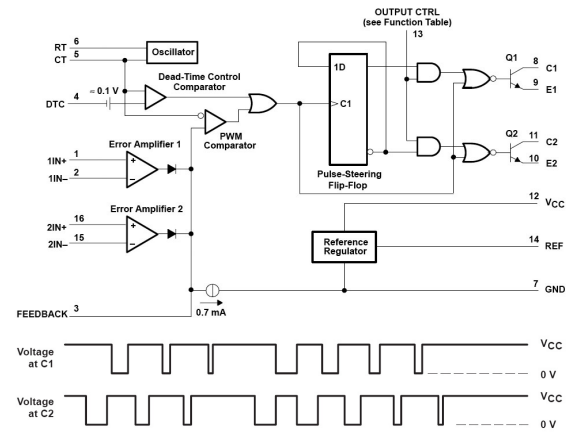


Fig. 3 Functional block diagram of TL494<sup>(9)</sup>

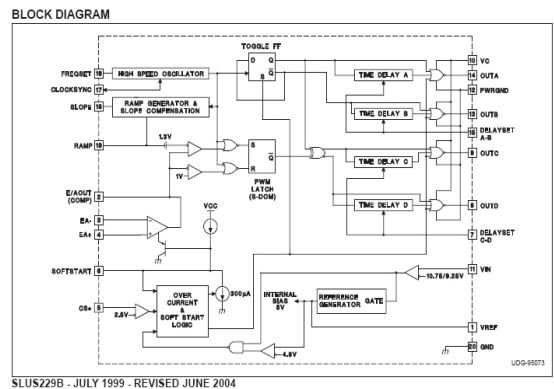


Fig. 4 Functional block diagram of UC1875<sup>(10)</sup>

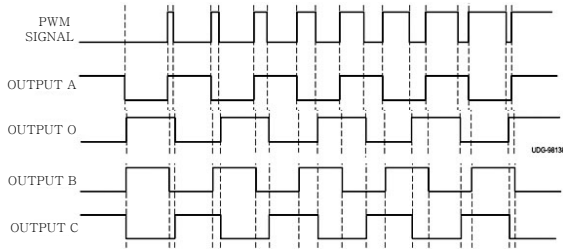


Fig. 5 Phase shifted PWM control waveforms

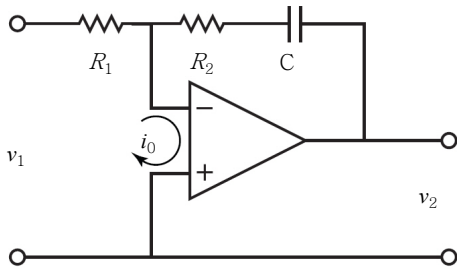


Fig. 6 Circuit diagram of a PI controller by error amplifier

값을 그리고 -입력 단에는 피드백 값을 입력한다. 여기서 저항 R은 비례제어에 해당하고 콘덴서 C는 적분제어에 해당된다. 비례상수  $K_p = R_2/R_1$ 이고, 적분상수  $K_i = 1/(R_1 C)$ 가 된다. TL494에서 오차가 클 경우 PWM 폭을 작게 하여 출력을 줄이고, 오차가 반대일 경우 PWM 폭을 크게 하여 출력을 올림으로서 정전류 또는 정전압 제어를 수행하게 된다.

2.1.2 풀디지털 제어 기술

일반적으로 마이크로프로세서는 Fig. 7에 보는바와 같이 내부에 ADC(analog to digital converter)와 PWM 기능이 내장되어 있어 ADC로 피드백 값을 받아 내부에 PI제어 코드를 수행하고 그 출력을 PWM으로 내보내면 TL494와 같은 제어 루프가 구성된다.

디지털 제어를 위한 PI제어 기본 식은 오차 e에 비례하는 비례동작(P)과 오차 e의 적분에 비례하는 출력을 내는 적분동작(I)의 합으로 표현된다. 즉 비례동작은 현재의 오차의 크기에 대응하며, 적분동작은 과거의 편차의 누적 값에 대응된다. 이를 식(1)에 나타내었다<sup>11)</sup>.

$$V = V_o + K_p \left( e + \frac{1}{T_I} \int edt \right) \quad (1)$$

여기서 V는 조작량, e는 편차,  $K_p$ 는 비례이득,  $T_I$ 는 적분시간이고,  $V_o$ 는 e가 0인 정상상태의 제어 값이다. PI제어를 위해서는 식(1)을 디지털 제어 형태로 변환시켜야한다. 적분항을 다음과 같은 식으로 근사시킬 수

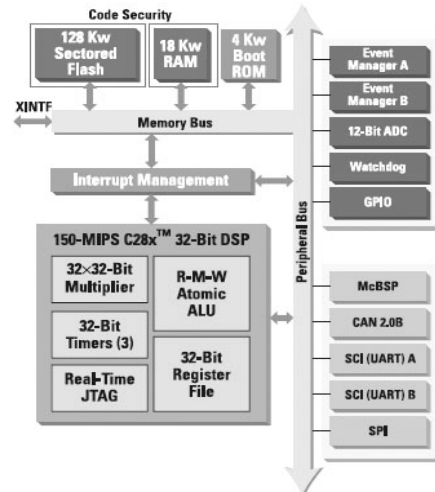


Fig. 7 DSP microprocessor diagram having ADC and PWM

있다. 즉 n 번째 샘플링 순간에 제어기의 출력은,

$$V_n = V_o + K_p \left( e_n + \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^n e_i \right) \quad (2)$$

이고 (n-1)번째의 샘플링 순간에 제어기의 출력은,

$$V_{n-1} = V_o + K_p \left( e_{n-1} + \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^{n-1} e_i \right) \quad (3)$$

따라서 n번째 출력 값과 이전 값을 빼면(식(2)-식(3)) 식(4)를 얻을 수 있다.

$$V_n = V_{n-1} + K_p \left( e_n - e_{n-1} \right) + \frac{T}{T_I} e_n \quad (4)$$

따라서 n 번째 샘플링 순간의 제어기 출력값( $V_n$ )은 이전(n-1)의 제어기 출력값( $V_{n-1}$ )과 n 번째 오차값( $e_n$ )에서 n-1의 오차값( $e_{n-1}$ )을 통하여 계산될 수 있다. 따라서 식(4)는 디지털 제어기에 적합한 식이 되고, C언어로 쉽게 코딩이 가능하다.

여러 가지 상황을 고려한 복잡한 제어는 수식화가 어렵기 때문에 단순 PI제어 방법을 적용하기 어렵다. 이러한 복잡한 제어는 인간의 제어방식과 지식 및 경험을 이용한 퍼지제어 방법을 사용한다.

PI 퍼지제어의 기본규칙은 식(5)에 보인바와 같다.

$$\text{IF } e = PB \text{ AND } \Delta e = ZO \text{ THEN } \Delta V = PB \quad (5)$$

여기서  $\Delta e = e_n - e_{n-1}$  이며,  $\Delta V = V_n - V_{n-1}$ 이다. 그리고 PB(positive big)와 ZO(zero)는 퍼지 규칙이다.

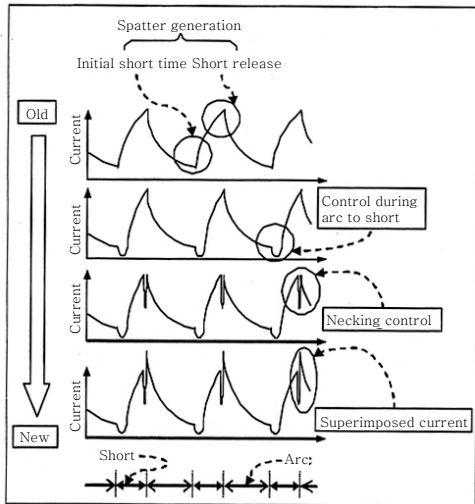


Fig. 8 History of short circuit waveform control<sup>13)</sup>

퍼지제어 용접전원은 1993년도에 아크길이제어와 비드폭 제어 및 아크 안정성 제어를 퍼지로 제어한 제품이 출시된바 있다<sup>12)</sup>.

최근 저가인 마이크로프로세서를 다수 사용하여 디지털 피드백제어, 시퀀스제어, 디스플레이 등을 분리하여 제어속도를 향상시키고 있다.

## 2.2 단락 파형제어 기술

### 2.2.1 단락파형제어의 역사

Fig. 8에 단락파형제어의 발전과정을 나타내었다. 단락파형에서 주요 스파터 발생은 순간단락이 발생할 경우와 단락이 해소됨과 동시에 아크가 재발생하는 시점이다. 이러한 스파터 발생 원리로부터 1980년 단락시점에서 전류를 급격하게 감소시켜 순간단락을 정상단락화 시키고 아크 재발생시 또한 전류를 급감시켜 아크의 폭발력을 감소시키는 기술이 소개되었고<sup>2)</sup>, 1996년도에 실용화 되었다<sup>3,4)</sup>.

Fig. 9에서 보는 바와 같이 용접전원에 따라서 CO<sub>2</sub> 용접시 250A에서 각각 1.5%와 0.7% 이다. 이는 파형제어의 효과를 보여주는 것이다<sup>14)</sup>.

### 2.2.2 아날로그 제어 기술

단락이 발생하면 전류가 급격하게 상승하기 때문에 제어를 하지 않으면 다량의 스파터뿐만 아니라 용접품질이 낮게 된다. 리액터의 L값에 따라 단락상승기울기가 조절되는데, 식(6)에 보인바와 같이 단락 전류상승기울기(dI/dt)는 리액턴스(L)의 크기에 반비례한다. 즉 리액터가 크면 전류상승기울기가 작아지게 된다. 이를 Fig. 10에 나타내었다.

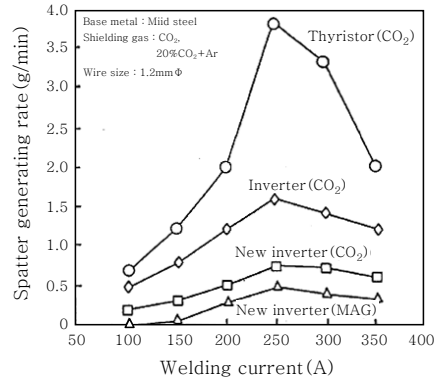


Fig. 9 Comparison in spatter generation rate of various types of welding power supplies<sup>14)</sup>

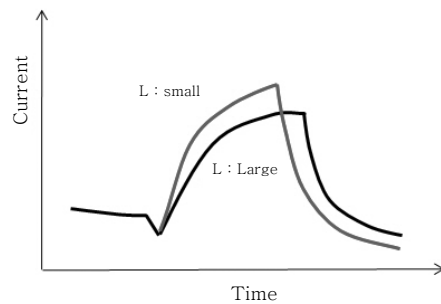


Fig. 10 Short-circuit current slop by reactance

$$\frac{dI}{dt} = \frac{dV}{L} \tag{6}$$

이러한 리액터를 통하여 단락상승기울기를 조절할 수 있지만 용접전류에 따라 기울기를 달리해야 할 경우 매우 어려운 일이다.

따라서 단락시 정전류 제어모드로 전환하고 기준전압(명령신호) 측에 RC회로의 충전특성을 입력하여 단락시 전류상승기울기를 제어하는 기술이 개발되었다. 이를 전자리액터라고 부르고 있다.

Fig. 11에 RC회로에서 보는 바와 같이 충전특성을 R과 C값으로 조절이 가능하다. 즉 단락전류상승기울기를 낮출 경우 R 또는 C 값을 크게 하면 된다. 아날로그 용접전원의 경우 RC값을 달리한 여러 개의 회로를 구성하여 설정전류별로 적당한 RC 값을 선택하도록 한다.

### 2.2.3 디지털 제어 기술

아날로그 제어방법은 RC값의 오차 및 시간에 따른 값의 변화에 대응하기 어렵고, 또한 복잡한 파형인 경우에 RC회로만으로 제어가 불가능하다. 따라서 마이

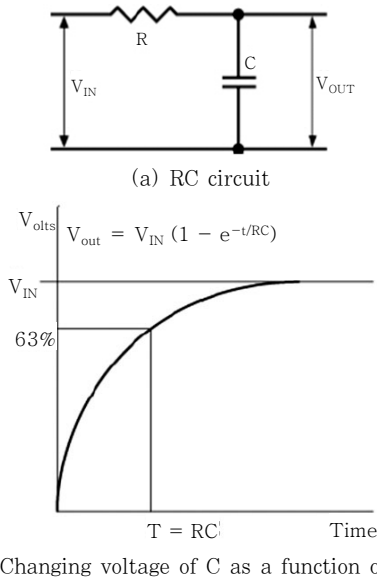


Fig. 11 Short circuit current slop control by RC circuit

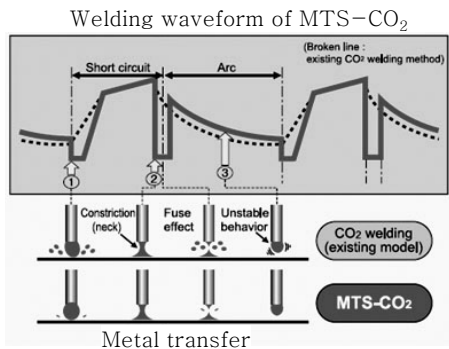


Fig. 12 Short circuit and arc control by full digital control<sup>6)</sup>

크로프로세서를 이용하여 다양한 단락파형을 데이터베이스화하고 DAC(digital to analog converter)로 파형을 출력하거나 직접 PWM을 제어하는 풀디지털 제어 기술이 개발되었다. Fig. 12는 풀디지털 제어 용접전원의 단락-아크 파형을 나타내었다. 이러한 파형은 CO<sub>2</sub> 용접시 250A에서 스파터 발생량이 1.2% 정도이다.

Fig. 13은 풀디지털 용접전원의 제어 구성도를 나타내었다. 아날로그 제어에 비하여 회로가 간단하고, 모든 제어가 프로그램에 의하여 수행됨으로 수정이 간단하고, 또한 다른 전력제어용으로 활용이 가능하다. 또한 용접에 필요한 각종 변수들을 쉽게 변경할 수 있고, 용접전압 및 전류를 7-segment 또는 LCD로 확인할 수 있으므로 매우 편리하다. 또한 통신을 통하여 모터를 제어함으로 연장선에 대한 전선수를 줄여 원가 절감을 가져오는 제품도 개발되고 있다.

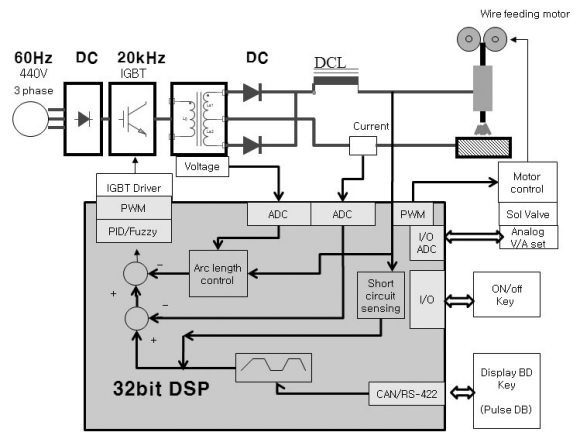


Fig. 13 Schematic diagram of full digital controlled welding power source

### 3. 결 언

국내 용접전원의 개발은 8bit 마이크로프로세서를 이용하여 기존 아날로그 회로에서 로직회로 즉 시퀀스 제어를 대체한 제품이 있지만 아날로그 용접전원의 제어 회로를 사용하기 때문에 성능에서 큰 차이가 없다. 즉 스파터 및 용접성에 대한 발전은 크게 이루지 못하고 있으며, 외산과 큰 격차를 보이고 있다. 따라서 대부분 로봇용 용접전원은 수입에 의존하고 있고, 최근 용접전원과 로봇은 CAN통신을 기반으로 하는 DeviceNet을 통하여 모든 정보를 주고받고 있어 모든 제어가 용접로봇에서도 가능하다. 이러한 상황에서 하루 빨리 국내의 용접전원이 풀디지털화 및 지능화되어 외산과의 수준격차를 줄이도록 노력해야 할 것이다. 특히 2차 스위칭기술을 적용하여 스파터 발생량을 1% 이하로 감소시키고, 용접로봇에 적용 가능한 고 품질의 용접전원이 개발되어야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

1. Miller Electric MFG. Co. :Welding and the World of Metal, 1962
2. I.S. Pinchuk : Stabilization of Transfer and Methods of Reducing the Spattering of Metal in CO<sub>2</sub> Welding with a Short Arc, Svar. Proiz., 6 (1980), 12-14
3. E. K. Stava : The surface tension transfer power source, new, low-spatter arc welding machine, Welding Journal, 72-1(1993), 25
4. CO<sub>2</sub> MAG Power supply SENSARC LS350, KOBE Technical Guide, 37-330, (1997), 8 (in Japanese)
5. Miller Axxess™, RMD™ and Accu-Pulse™ Provides Superior Weldability and Improved Deposition Rates in GMAW, [http://us-cdn.creamermedia.co.za/assets/articles/attachments/33309\\_afrox.pdf](http://us-cdn.creamermedia.co.za/assets/articles/attachments/33309_afrox.pdf)

6. Panasonic, [http://www.panasonicfa.com/pdfs/TAWERS\\_tech\\_specs.pdf](http://www.panasonicfa.com/pdfs/TAWERS_tech_specs.pdf)
7. T. Ueyama : Developments in Advanced Welding Processes, Technical. Commission on Welding Processes JWS, 2009, I-1-12
8. M-J Kang, B-Y Kang and J-H Kim: Trend in Digitalization of Welding Power Source and Application of Information Technology, J. KWS, **21-1** (2003), 14-20 (in Korean)
9. TL494 datasheet, Texas Instruments
10. UC1875 datasheet, Texas Instruments
11. 오성권, C프로그램에 의한 퍼지모델 및 제어시스템, 내하출판사, 2002 (in Korean)
12. S.C. Park and K.H. Ra: "The Trend of Fuzzy-Controlled Welding Machines in Japan", J. KWS, **12-1** (1994), 44-50
13. K. Sato, "The Technical Trend of Welding Machine", Technical. Commission on Welding Processes JWS, 2009, II-44-48
14. M. Ushio, H Yamamoto, Y. Nishida and T. Mita, "Recent Advances in Welding Power Systems for Automated Welding", Trans. JWRI, **23-1** (1994), 1-6



- 유회수(柳會洙)
- 1965년생
- 한국생산기술연구원, 용접집합기술센터
- 디지털용접진원개발, 자동제어, 집합조직
- e-mail : hsryoo@kitech.re.kr