

研究論文
------

大韓熔接學會誌  
 第8卷第1號 1990年 3月  
 Journal of the Korean  
 Welding Society  
 Vol.8, No.1, Mar., 1990

## GMAW 공정에서 아크 안정성의 실시간 측정

원윤재\* · 부광석\*\* · 조형석\*\*

### Real-Time Estimation of Arc Stability in GMAW Process

Y.J. Won\*, K.S. Boo\*\*, H.S. Cho\*\*

**Key Words** : Arc Stability(아크 안정성), Stability Index(안정도 지수), Waveform Factor(파형 인자), Welding Circuit Modeling(용접 회로 모델링), Weighted Average(가중 평균), Weighted Standard Deviation(가중 표준 편차), Recursive Index(순차적 지수), Real-Time Estimation(실 시간 측정)

#### Abstract

Arc must be stable during welding first of all other factors for obtaining sound weldment, especially in the automation of welding process.

Arc stability is somewhat sophisticated phenomenon which is not clearly defined yet. In consumable electrode welding, the voltage and current variation due to metal transfer enables to assess arc stability. Recently, statistical analyses of the voltage and current waveform factors are performed to assess the degree of arc stability which is assessed and controlled by operator's own experience by now. But, considering the increasing need and the trend of automation of welding process, it is necessary to monitor arc stability in real-time. In this study, the modified stability index composed of two voltage and current waveform factors(arc time and short circuit time) reduced from four factors(arc time, short circuit time, average arc current and average short circuit current) in Mita's index by the welding electrical circuit modeling is proposed and verified by experiment to be well estimating arc stability in the static sense. Also, the recursive calculation form estimating present arc stability in the dynamic sense is developed for real-time estimation. The results of applying the recursive index during welding show good estimation of arc stability in real-time. Therefore, the result of this study offers the mean for real-time control of arc stability.

\* 정회원, 국방품질관리소

\*\* 정회원, 한국과학기술원 생산공학과

## 1. 서 론

GMAW는 소모성 전극과 모재 사이에 전기적 아크를 발생시켜 전극과 모재를 동시에 용융하여 접합부를 형성하는 용접 방법(Fig.1)이다. 최근 생산성 증대 및 원가 절감을 위해 용접 자동화에 대한 연구가 활발히 이루어 지고 있는데<sup>1)</sup>, 자동화를 위해서는 용접 중 외란에 대한 보상 능력이 있어야 하며 이 보상은 주로 용접 전압, 전류 또는 용접 속도 등의 열 입력 변화로 이루어 진다. 그러나, 이러한 변화가 아크의 안정성을 유지하면서 이루어지지 않으면 용접부 결함 발생, 비드 불균일, 스패터 량 과다, 외관 불량 등의 나쁜 결과가 유발되어<sup>2)</sup> 원래의 목적인 외란에 대한 보상 능력을 발휘할 수 없게 된다. 따라서, 용접 중 특히 자동화에 있어서 아크를 안정하게 유지한다는 것은 다른 무엇보다도 기본적으로 이루어져야 할 사항이다.

용접 도중 아크를 불안정하게 하는 원인은 여러 가지가 있을 수 있는데 아크 전류 및 전압의 영향, 전극 송급 속도의 불균일, 보호가스의 영향 등이 대표적이다. 아크 전류 및 전압의 영향으로는 적절한 전류/전압 조합이 이루어지지 않으면 아크가 불안정해져 전류, 전압 파형이 불균일해지는 것으로서<sup>3)</sup> 적절한 전류/전압 조합은 전극 직경, 보호 가스 종류 등에 따라 다르게 나타난다. 전극 송급 속도의 불균일은 전극 송급 튜브 내의 이물질에 의한 튜브와 전극의 갭 및 전극 송급 conduit liner의 굴곡으로 인한 conduit liner와

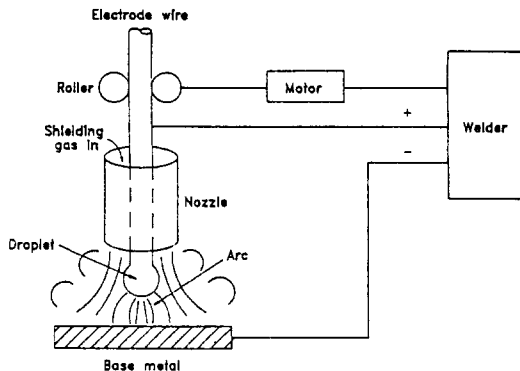


Fig. 1 Schematic diagram of the GMAW process

전극간의 마찰력 변화에 따라 발생하며<sup>4)</sup>, 보호가스의 영향으로는 Ar 가스를 사용할 때 보다 CO<sub>2</sub> 가스를 사용할 때 아크가 상대적으로 불안정해 진다.

아크 안정성은 아크의 안정한 정도를 말하지만 용접의 모든 상황에 적합한 정의는 내려져 있지 않다. GTAW와 같은 비소모성 전극을 사용하는 용접에서는 아크가 꺼지지 않고 켜져있는 상태로 유지되는 것을 아크가 안정하다고 할 수 있고, 소모성 전극을 사용하는 용접에서는 용융 금속의 이행에 따라 전류와 전압의 변동이 발생하므로 이 변동 주기가 일정할 때 안정하고 일정치 않을 때 불안정하다고 할 수 있다<sup>5)</sup>. 이는 금속 이행이 일정할 때 아크가 안정하다는 것을 의미한다. 따라서, 본 연구의 대상인 GMAW에서는 이러한 측면과 앞에 언급한 아크 불안정 요인이 결과적으로 아크 전류와 전압의 불균일을 초래한다는 점을 생각하면 아크 전류 및 전압 파형의 균일성 정도를 분석함으로써 아크 안정성을 평가할 수 있다.

지금까지의 아크 안정성 평가는 용접 작업자의 경험에 따라 아크 상태의 관찰, 소음 청취 등의 방법으로 개개인에 따라 정성적으로 평가되어 왔다. 그러나, 최근의 컴퓨터 기술의 발달로 아크 안정성을 아크 전류 및 전압의 파형 분석으로 정량적으로 평가하고자 하는 시도가 가능케 되었다. Arai<sup>6)</sup>는 CO<sub>2</sub> 가스 아크 용접에 대해 저 전류 영역(140-210A; 단락 금속 이행 모드)에서 아크 전압 파형을 분석하여 아크 시간(arcing time)의 표준 편차가 아크 안정성과 강한 상관 관계가 있음을 밝혔고, Lucas<sup>7)</sup>는 단락 시간(short-circuit time)의 최고전류치와 단락 주기의 균일성이 아크 안정성을 반영해 준다고 분석하였다. 최근 Mita<sup>8)</sup>는 용접 전류 및 전압 파형으로부터 얻어지는 여러 인자를 충분히 고려하여 회귀분석(regression analysis)을 통해 아크 시간(Ta), 단락 시간(Ts), 평균 아크 전류(Ia), 평균 단락 전류(Is)로 구성된 안정성 지수를 제시하였다. 이 지수는 아크 안정성을 정량적으로 평가하여 주는 좋은 방법이나 용접 후 통계적으로 얻어 평가하는 것으로서 실 시간으로 안정성을 평가할 수는 없다.

그런데, 자동화를 위해서는 실 시간의 안정성

평가가 필수적이므로 본 연구에서는 Mita 지수를 근간으로 실 시간 계산시간을 줄이기 위해 용접 회로 모델링을 통해 지수를 구성하는 인자를 감소시켜 수정 지수를 제안하고 실험을 통해 Mita 지수와 비교하여 타당성을 검증하였다. 또한, 수정 지수를 실 시간 계산 형태를 변환하여 실제 용접 중 아크 안정성을 평가하여 봄으로써 아크 안정성을 실 시간으로 평가할 수 있음을 보였다.

## 2. 아크 안정성 지수

### 2.1. Mita의 안정성 지수

Mita는 아크 안정성이 가장 문제가 되는 CO<sub>2</sub> 가스 아크 용접에 대하여 아크 안정성에 영향을 미치는 전압, 전류 파형에서의 가능한 인자들과 이를 종합 반영한 안정성 지수를 제시하였다<sup>3)</sup>.

안정성 지수의 제시 목적은 이전까지의 경험에 따른 정성적 평가와 부분적인 정량적 연구에 비해 사용 용접 전류의 충분한 영역(100A-300A)에서의 정량적 평가가 가능토록 하고자 하는 것으로서 전압 및 전류 파형으로부터 안정성 반응이 가능한 12개의 인자를 채택하여 경험상의 안정성과 이 인자들과의 '상관 관계 및 인자 간의 상관 관계'를 다중 회귀 분석(multiple regression analysis)을 통해 아래와 같은 안정성 지수(Wa)를 도출하였다.

$$W_a = \ln \left( \frac{s[Ts]}{1.3} \times \frac{s[Ts]}{3.8} \times \frac{s[Is]}{24.0} \times \frac{s[Is]}{23.6} \right) \quad (1)$$

여기에서,

Ts=단락 시간(short-circuit time)

Ta=아크 시간(arc time)

Is=평균 단락 전류  
(average short-circuit current)

Ia=평균 아크 전류(average arcing current)

s[·]=표준 편차(standard deviation)

1.3, 3.8, 24.0, 23.6=19V, 130A에서의 해당 인자 표준 편차임을 나타낸다(Fig.2 참조).

또한, 여기에 저 전류 영역 및 고 전류 영역에 대한 보정을 위해

$$W_R = 2 \times \ln \left[ \frac{R_a}{R_i} \right] : \text{저 전류 영역 보정} \quad (2)$$

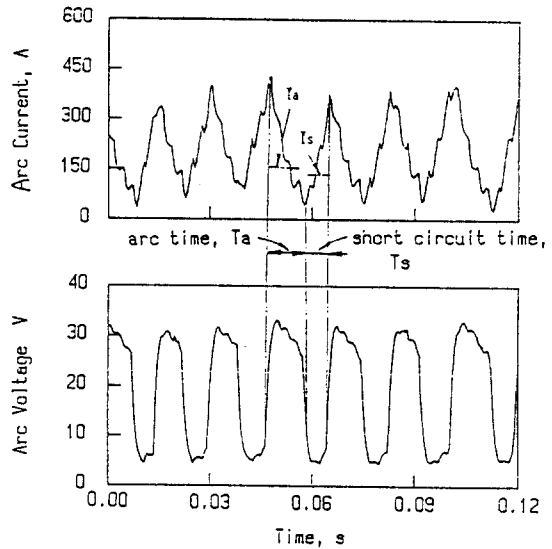


Fig. 2 Waveform factors of the arc current and arc voltage

$$W_P = \ln \left[ \frac{P_a}{P_i} \right] : \text{고 전류 영역 보정} \quad (3)$$

여기에서,

Ri=최적 안정 조건일 때의 아크 시간 중의 저항

Pi=최적 안정 조건일 때의 아크 시간 중의 파워를 추가하여 아래의 안정성 지수를 제시하였다.

$$W = W_a + W_R + W_P \quad (4)$$

이 지수를 일정 전류에서 전압을 변동시키며 용접을 실시한 실험에 적용하여 그 전류에서 아크가 가장 안정되게 하는 전류/전압 조건이 존재함을 보였으며 또한, 전류의 변동에 따른 최적 안정 전류/전압 조합과 그때의 지수 값을 구하였다.

### 2.2. 용접 회로 모델링을 통한 수정 지수

식 (4)에 표현된 Mita지수는 첫째, 여러 인자로 구성되어 있어 용접 중 실 시간 내에 계산하기는 힘들고, 둘째, 식 (1)에서 보는 바와 같이 19 V, 130A에 대한 상대적인 값이므로 완전한 의미의 정량적인 평가라고는 볼 수 없으며, 셋째, 이 지수를 사용함에 있어 W<sub>R</sub>, W<sub>P</sub>는 아크가 극히 불안정한 영역에 적용되는 것으로서 보통의 용접 시 적용되지 않으며 단지 그 상태에서의 지수값을 보정해 주는 역할만 하기 때문에, 본 연구에서는 안정성 변화 여부를 실 시간으로 측정할 수 있는 수

정된 지수를 제한함에 있어서 Mita의 안정성 지수  $W_0$ 만을 사용하여 이 지수가 단락 시간(Ts)과 아크 시간(Ta)의 함수 만으로도 표시될 수 있음을 보여서 실 시간 계산이 가능하도록 수정하였다.

아크 용접 시스템은 Fig.3과 같은 전기 회로로 모델링 되는데<sup>8)</sup> 여기에 Kirchoff 법칙을 적용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

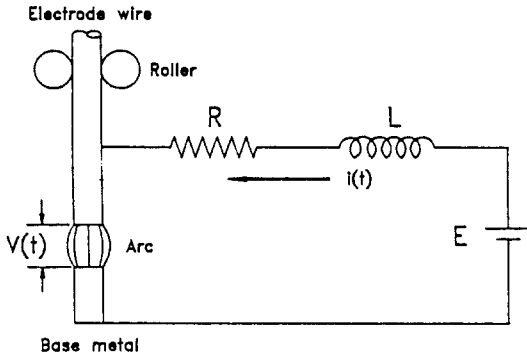


Fig. 3 The arc welding system

$$L \frac{di(t)}{dt} + R i(t) = E - V(t) \quad (5)$$

위에서 L은 회로의 인덕턴스, R은 저항,  $i(t)$ 는 아크 전류,  $V(t)$ 는 아크 전압, E는 전원의 외부 특성이다. E는 용접기 자체의 특성으로서 본 연구에 사용된 정전압형에서는 일정( $E_0$ )하다고 볼 수 있다.

위 식 (5)를  $E_0 - V(t) = Va(t)$  라 놓고 다시 쓰면

$$\frac{L}{R} \frac{di(t)}{dt} + i(t) = \frac{E_0 - V(t)}{R} = \frac{Va(t)}{R} \quad (6)$$

가 되며 이를 Laplace 변환하면

$$\frac{I(s)}{Va(s)} = \frac{1}{R} \frac{1}{\frac{L}{R}s + 1} = \frac{1}{L} \frac{1}{s + \frac{R}{L}} \quad (7)$$

이 된다. 이를 컴퓨터에서 처리가 용이하도록 z-domain으로 변환하면

$$\frac{I(z)}{Va(z)} = \frac{1 - e^{-(R/L)T}}{R} \frac{1}{z - e^{-(R/L)T}} \quad (8)$$

가 되며 역 z-변환하면

$$I(k) = e^{-(R/L)T} I(k-1) + \frac{1 - e^{-(R/L)T}}{R} Va(k-1) \\ = a I(k-1) + b Va(k-1) \quad (9)$$

$$(a = e^{-(R/L)T}, b = \frac{1 - e^{-(R/L)T}}{R},$$

T=sampling time)

을 얻을 수 있다.

이 모델의 타당성을 검증하기 위해 여러 조건에서의 아크 전압 및 전류 파형을 측정하여 최소자승법으로 a,b 값(Table 1)을 구한 후 식 (9)에 대입, 측정된 전압을 입력으로 하였을 때 모델로부터의 출력인 전류 파형을 얻어 측정된 전류 파형과 비교하였다. 비교 결과 Fig.4의 예와 같이 전체적으로 모델 출력과 측정치가 일치함을 볼 수 있으므로 용접 회로 시스템은 식 (9)와 같은 1차

Table 1 System parameters

Welding condition (Current/Voltage)	a	b
110A/15V	0.96999	0.108814
150A/16.5V	0.96673	0.10543
160A/20V	0.96468	0.1148
208A/25V	0.96159	0.12768
240A/30V	0.96958	0.09846

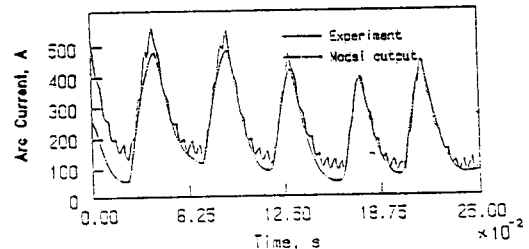
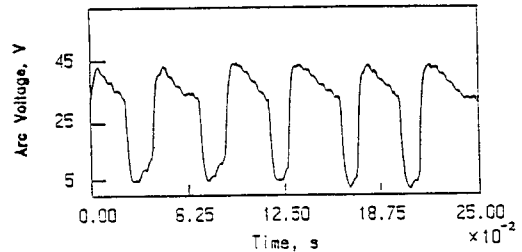


Fig. 4 Comparison of the welding circuit model output with experimental welding current : welding voltage=25V, Current=208A

모델로 표시할 수 있음을 검증하였다. Fig.4에서 전체적인 전압, 전류 파형의 진동에 부가해 실려 있는 작은 진동은 용접 외부 전원 및 용접기의 특성(3상, SCR 형)으로 인한 출력의 불균일 현상으로 판단된다.

앞에서 구한 모델을 사용하면  $I_a$ 와  $I_s$ 를 다음과 같이 구할 수 있다. 우선 용접 중 아크 전압의 파형은 아크 시간과 단락 시간의 교대 발생으로 구형파의 형태를 갖는 것으로 볼 수 있으므로  $V(t)$ 를 step 입력으로 놓을 수 있고 이에 따라  $V_a(t)$  또한 step 입력이 된다. 그러므로 아크 시간과 단락 시간을 각각  $T_a, T_s$ 라 하면,

$$V_a(s) = \frac{V_m}{s} (1 - e^{-T_s \cdot s} + e^{-(T_s + T_a) \cdot s} - \dots) \quad (10)$$

로 나타낼 수 있다. 여기에서  $V_m$ 은  $V_a(t)$ 의 크기이다.

계산을 용이하게 하기 위해 한 주기에 대해서 생각하면,

$$V_a(s) = \frac{V_m}{s} (1 - e^{-T_s \cdot s}) \quad (11)$$

가 되고 이를 식 (7)에 대입하면,

$$\begin{aligned} I(s) &= \frac{V_m}{s} \frac{1}{L} \frac{1}{(s + \frac{R}{L})} (1 - e^{-T_s \cdot s}) \\ &= \frac{V_m}{R} \left( \frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{R}{L}} - \frac{e^{-T_s \cdot s}}{s} + \frac{e^{-T_s \cdot s}}{s + \frac{R}{L}} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

가 되어 역 Laplace 변환하면,

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{V_m}{R} (1 - e^{-(R/L)t}) u(t) - \frac{V_m}{R} \\ &\quad (1 - e^{-(R/L)(t-T_s)}) u(t-T_s) \\ &\quad (0 \leq t \leq T_s + T_a) \end{aligned} \quad (13)$$

이 된다. 여기에서 평균치를 구하면,

$$\begin{aligned} \bar{I}_s &= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i(t) dt = \frac{V_m}{R T_s} \int_0^{T_s} (1 - e^{-(R/L)t}) dt \\ &= \frac{V_m}{R} \left\{ 1 + \frac{L}{R T_s} (e^{-(R/L)T_s} - 1) \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_s &= \frac{1}{T_a} \int_{T_s}^{T_s+T_a} i(t) dt \\ &= \frac{V_m}{R T_a} \left\{ \int_{T_s}^{T_s+T_a} (1 - e^{-(R/L)t}) dt \right. \\ &\quad \left. - \int_{T_a}^{T_s+T_a} (1 - e^{-(R/L)(t-T_s)}) dt \right\} \\ &= \frac{V_m}{R^2} \frac{L}{T_a} \{ e^{-(R/L)(T_s+T_a)} \\ &\quad - e^{-(R/L)T_s} - e^{-(R/L)T_a} + 1 \} \end{aligned} \quad (15)$$

가 된다. 결국  $\bar{I}_s$ 는  $T_s$ 의 함수,  $\bar{I}_a$ 는  $T_a$ 의 함수 ( $T_s$  고정시)로서 표시되며 각각  $T_a, T_s$ 에 대해 단조 증가, 단조 감소의 관계가 있으므로  $s[\bar{I}_s]$ 는  $s[T_s]$ 에,  $s[\bar{I}_a]$ 는  $s[T_a]$ 에 반영될 수 있다. 따라서, 아크 안정성을 판별하는 지수로 아래와 같은 수정 지수를 제안할 수 있다.

$$W_{mod} = \ln(s[T_s] \times s[T_a]) \quad (16)$$

### 2.3. 수정 지수와 Mita 지수의 비교

수정 지수가 아크 안정성을 잘 나타내 주는 것을 검증하기 위하여 Mita의 실험 조건과 유사하게 용접을 실시하여 수정 지수와 Mita 지수를 구해 서로 비교하였다.

Fig.5의 전체적인 장치도에 나와 있는 바와 같이 용접 토치에서의 아크 전압과 전류를 신호 처리 회로에서 처리, 컴퓨터에서 샘플링하여 수정 지수와 Mita 지수를 계산하였다. 실험에 사용된 용접기는 NAS-AUTO 350NH 로서 최대 용량 36 V, 350A의 반자동 DC 정전압형 GMAW 용접기이며 컴퓨터는 16비트 IBM-PC AT(Super)를 사용하였고, 용접은 사람이 할 때의 기타 다른 외란을 배제할 수 있는 X-Y manipulator에서 실시하였다. 용접 시 보호가스는 CO<sub>2</sub>가스, 유량 15 l/

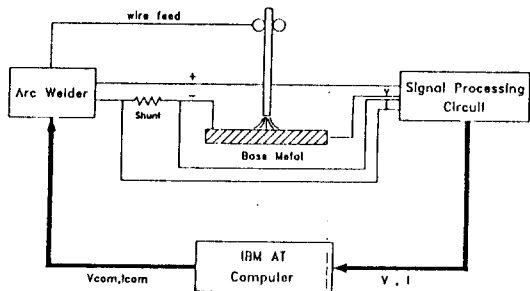


Fig. 5 Schematic diagram for measurement of the arc stability

min, 토치 팁과 모재와의 간격 15mm(200A 이하), 20mm(200A 이상), 용접 속도는 30cm/min., 전극은  $\phi 1.2$ mm를 사용하였다.

지수들을 구하기 위해 일정 아크 전류에서 전압을 변동시키며 용접을 실시, 용접 중 샘플링 간격 1msec로 2 sec 간 샘플링, 컴퓨터에 저장해, 용접 종료 후 지수들을 계산하였다. 저 전류일 때와 고 전류일 때의 대표적인 결과는 Fig.6, 7과 같은데, Fig.6은 아크 전류 80A로 고정되고 아크 전압이 각각 12, 13, 14, 15, 16V일 때의 수정 지수와 Mita 지수의 값으로서 아크 전압이 14V일 때 안정성 지수가 가장 작은 값을 나타내며 이는 이 조건에서 아크 전류가 80A일 경우 가장 안정한 상태를 의미한다. 그리고, 아크 전압이 14V에서 멀어 질수록 지수가 커져 아크가 불안정해짐을 알 수 있다. Fig.7은 아크 전류 240A에서의 동일한 방법의 실험 결과로서 Fig.6의 결과와 같이 특정 전류에 대해 아크가 가장 안정한 특정 전압 조건이 있으며 이 전압으로부터 멀어질 때 아크가 불안정해짐을 알 수 있다. 이와 같은 결과들에서 수정 지수와 Mita 지수의 경향이 일치하므로 수정 지수가 아크 안정성을 평가할 수 있는 좋은 지수임을 확인할 수 있다.

실험으로부터 얻은 결과를 고찰해 보면 아크 전

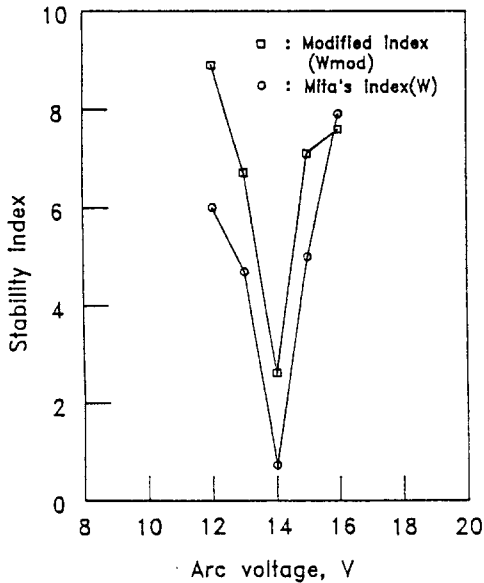


Fig. 6 Comparison of the modified index with Mita's index : arc current = 80A

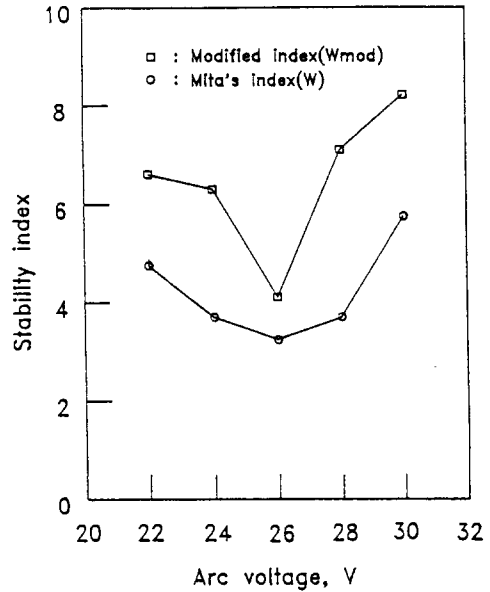


Fig. 7 Comparison of the modified index with Mita's index : arc current = 240A

류가 190A 이하의 저 전류 영역에서는 안정한 아크 전압 조건에서 지수의 경향이 급격한 경사를 이루어 안정된 용접 조건의 폭이 좁으며 190A 이상의 고 전류 영역에서는 경사가 완만하여 안정된 용접 조건의 폭이 넓음을 알 수 있다. 그러나, 고 전류 영역에서의 가장 안정할 때의 지수 값은 저 전류 영역의 그 값보다 크므로 상대적으로 아크가 불안정해졌음을 의미한다(Fig.8). 이는 200A 이

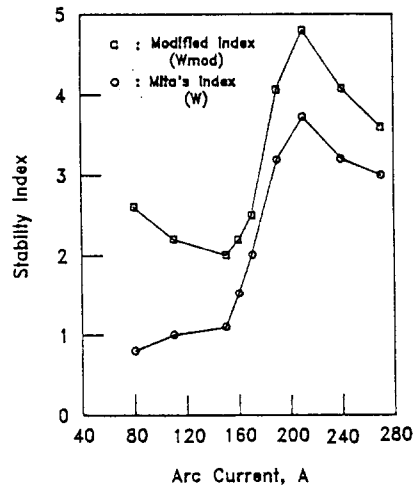


Fig. 8 Stability index under the most stable welding condition

하에서는 금속 이행이 단락 모드(short circuit mode)이나, 200A 이상에서는 단락 모드보다 상대적으로 불안정한 globular 모드 중 repelled 이 행으로 변했기 때문이다<sup>31,9)</sup>.

또한, 전류의 변화에 따른 최적 안정성을 갖는 전압의 조합을 그림으로 나타내면 Fig.9와 같은데 이 관계를 보면 아크를 안정하게 유지하려면 전류와 전압을 동시에 커지거나 줄어든게 하여야 함을 알 수 있다.

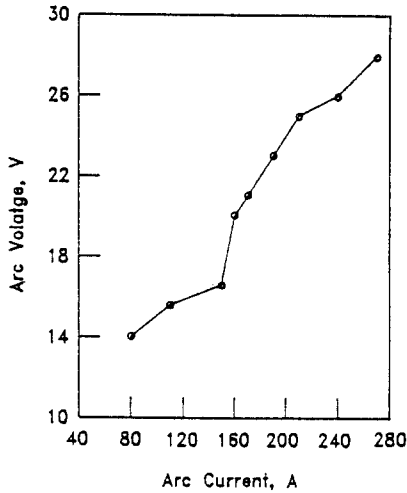


Fig. 9 Relation between arc current and voltage for stable arc condition

### 3. 아크 안정성 지수의 실 시간 측정

#### 3.1. 수정 지수의 실 시간 측정 형태 변환

앞 장에서 제시되고 입증된 아크 안정성 지수  $W_{mod}$ 도 아직까지는 일정 시간 구간 동안의 data로부터 구해지는 값으로서 실 시간 측정에는 사용할 수 없다. 따라서, 실 시간 측정이 가능하도록  $W_{mod}$ 를 다음과 같은 실 시간 측정 형태로 유도하였다.

실 시간 측정이라는 것은 현재 상태에 주로 관심이 있는 것이므로 가중 평균 및 편차를 생각하여 현재에 가중치가 높게 부여되도록 하였다.

즉, n번째 data에서의 가중 평균  $\bar{x}_n$ 은,

$$\bar{x}_n = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i x_i)}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad (17)$$

여기에서,  $a_i$ =가중치 (weighting factor) 이고 가중 편차  $s[x_n]$ 은,

$$s[x_n]^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \{a_i (x_i - \bar{x}_n)^2\}}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad (18)$$

이다.

여기에서 (n+1) 번째의 가중 평균  $\bar{x}_{n+1}$ 은,

$$\begin{aligned} \bar{x}_{n+1} &= \frac{\sum_{i=1}^{n+1} (a_i x_i)}{\sum_{i=1}^{n+1} a_i} \\ &= \frac{\left\{ \sum_{i=1}^n (a_i x_i) + a_{n+1} x_{n+1} \right\}}{\sum_{i=1}^{n+1} a_i} \\ &= \left( \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{\sum_{i=1}^{n+1} a_i} \right) \bar{x}_n + \left( \frac{a_{n+1}}{\sum_{i=1}^{n+1} a_i} \right) x_{n+1} \quad (19) \end{aligned}$$

과 같이 지난 번 평균치  $\bar{x}_n$ 과 현재의 data,  $x_{n+1}$ 로 표시된다.

한편, 가중 편차  $s[x_{n+1}]$ 에 대해서는 다소 복잡한데 우선  $s[x_{n+1}]^2$ 은,

$$\begin{aligned} s[x_{n+1}]^2 &= \frac{\sum_{i=1}^{n+1} a_i (x_i - \bar{x}_{n+1})^2}{\sum_{i=1}^{n+1} a_i} \\ &= \left\{ \sum_{i=1}^n a_i (x_i - \bar{x}_{n+1})^2 \right. \\ &\quad \left. + a_{n+1} (x_{n+1} - \bar{x}_{n+1})^2 \right\} / \sum_{i=1}^{n+1} a_i \quad (20) \end{aligned}$$

이 되는데, 이 식 중 좌변 첫번째 항에서

$$\begin{aligned} (x_i - \bar{x}_{n+1})^2 &= \left\{ x_i - \left( \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{\sum_{i=1}^{n+1} a_i} \right) \bar{x}_n \right. \\ &\quad \left. - \left( \frac{a_{n+1}}{\sum_{i=1}^{n+1} a_i} \right) x_{n+1} \right\}^2 \\ &= \left\{ (x_i - \bar{x}_n) + \left( \frac{a_{n+1}}{\sum_{i=1}^{n+1} a_i} \right) (\bar{x}_n - x_{n+1}) \right\}^2 \\ &= (x_i - \bar{x}_n)^2 + \left( \frac{a_{n+1}}{\sum_{i=1}^{n+1} a_i} \right)^2 (\bar{x}_n - x_{n+1})^2 \\ &\quad + 2 \left( \frac{a_{n+1}}{\sum_{i=1}^{n+1} a_i} \right) (\bar{x}_n - x_{n+1}) (x_i - \bar{x}_n) \quad (21) \end{aligned}$$

이 되어

$$\sum_{i=1}^n ai(x_i - \bar{x}_{n+1})^2 = \sum_{i=1}^n ai(x_i - \bar{x}_n)^2 + (a_{n+1})^2$$

$$\sum_{i=1}^n ai / \left( \sum_{i=1}^{n+1} ai \right)^2 (\bar{x}_n - x_{n+1})^2 \quad (22)$$

이 된다.

결국 (n+1) 번째의 가중 편차 s[n+1]은.

$$s[x_{n+1}]^2 = \left\{ \sum_{i=1}^n ai(x_i - x_n)^2 + (a_{n+1})^2 \sum_{i=1}^n ai \right.$$

$$\left. / \left( \sum_{i=1}^{n+1} ai \right)^2 (\bar{x}_n - x_{n+1})^2 + a_{n+1} \right.$$

$$\left. (x_{n+1} - \bar{x}_{n+1})^2 / \sum_{i=1}^n ai \right.$$

$$= \left( \sum_{i=1}^{n-1} ai / \sum_{i=1}^n ai \right) s[x_n]^2 + (a_{n+1})^2$$

$$\left. / \left( \sum_{i=1}^{n+1} ai \right)^2 (\bar{x}_n - x_{n+1})^2 \right.$$

$$\left. + a_{n+1} / \sum_{i=1}^n ai (x_{n+1} - \bar{x}_{n+1})^2 \quad (23)$$

이 되어 지난 번의 편차, 평균치 및 현재의 data,  $x_{n+1}$ 로 구할 수 있다.

여기에서 가중치를  $a_i = \alpha^{-i}$  ( $0 < \alpha < 1$ )로 놓으면  $a_{i-1}/a_i = \alpha$ 로서 한 step 전의 data에 대해  $\alpha$ 만큼의 비율로 가중을 감소시키는 것을 의미한다. 이를 사용하여 식 (19)과 식 (23)을 다시 쓰면,

$$\bar{x}_{n+i} = \frac{\alpha(\alpha^n - 1)}{\alpha^{n+1} - 1} \bar{x}_n + \frac{\alpha - 1}{\alpha^{n+1} - 1} x_{n+i} \quad (24)$$

$$s[x_{n+1}]^2 = \frac{\alpha(\alpha^{n-1} - 1)}{\alpha^n - 1} s[x_n]^2 + \frac{\alpha - 1}{\alpha^{n+1} - 1}$$

$$(x_{n+1} - \bar{x}_n)^2 \quad (25)$$

이 되어 현재에 가중치를 많이 주면서 지난 번의 계산치로서 현재의 값을 구할 수 있는 순차적 계산 형태로 변환되었다.

따라서, 수정 지수  $W_{mod}$ 내에 있는 s[ $T_s$ ]와 s[ $T_a$ ]를 위 식으로 계산하여 수정 지수를 구하면 실 시간 아크 안정성 측정이 가능하며 이와같이 구한 지수를 순차적 수정 지수(recursive modified index)라 명명한다.

### 3.2. 실 시간 측정 실험

앞 절에서 구한 식 (24), (25)를 이용한 순차적 지수로서 실제 용접 도중 아크 안정성의 변화를 실험을 통해 모니터링하여 보았다. 실험 장비 및 조건은 2.3.절에서 실시한 바와 같으나, 필요에 따라 아크 안정성의 변화가 생기도록 전압 및 전류를 용접 도중 변화시켰다.

가중치  $a_i$  중  $\alpha$ 에 의한 영향을 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.98일때에 대해 분석해 본 결과,  $\alpha$ 가 작을수록 안정성 변화에 민감하고  $\alpha$ 가 1에 가까우면 안정성 변화에 둔감하다는 것을 알 수 있었다. 이는  $\alpha$ 가 작을수록 최근의 data만이 안정성 지수에 반영되고, 1에 가까울수록 과거의 data가 많이 반영되기 때문이다. 안정성 지수는 통계적 개념에서 나온것으로서 안정성 변화에 너무 민감해도 좋지않고, 또한 실 시간 측정 개념으로 볼때 너무 둔감해서도 좋지않으므로 여기에서는 급격히 둔감해지기 이전의 값인  $\alpha = 0.9$ 를 채택하였다.

#### 3.2.1. 전압, 전류가 일정한 경우

우선 용접 도중 전압, 전류가 변화하지 않아 안정성이 거의 일정하지만 전체적으로 안정성에 차이가 있는 여러 경우에 대해 안정성 지수를 실 시간 측정하여 비교하였다.

Fig.10(a)는 20A, 160A의 안정한 경우이며 (b)와 (c)는 각각 24V, 133A와 16V, 200A의 불안정한 경우로서 모두 열입력(전압×전류)은 같은 상태이다. 그림에서 보는 바와 같이 안정한 경우는 전체적으로 안정성 지수가 작으면서(2 정도), 또한 불안정한 경우는 전체적으로 안정성 지수가 크면서(4,6 정도) 그때그때의 안정, 불안정 상태를 잘 나타내줄을 알 수 있다.

#### 3.2.2. 전압, 전류가 용접 중 변하는 경우

여기에서는 아크 안정성의 변화가 발생되었을 때 순차적 지수가 이를 잘 나타내 주는가를 알아 보았다.

우선 아크의 안정성이 갑자기 변하는 경우로서, 전류는 일정하게 유지되는데 갑자기 전압이 변동할 경우와 반대로 전압은 일정하게 유지되는데 갑자기 전류가 변동할 경우의 여러 가지에 대해 실험한 결과 아크가 갑자기 불안해 질때 순차적 지수가 이를 잘 나타내 주고 있음을 알 수 있었다.



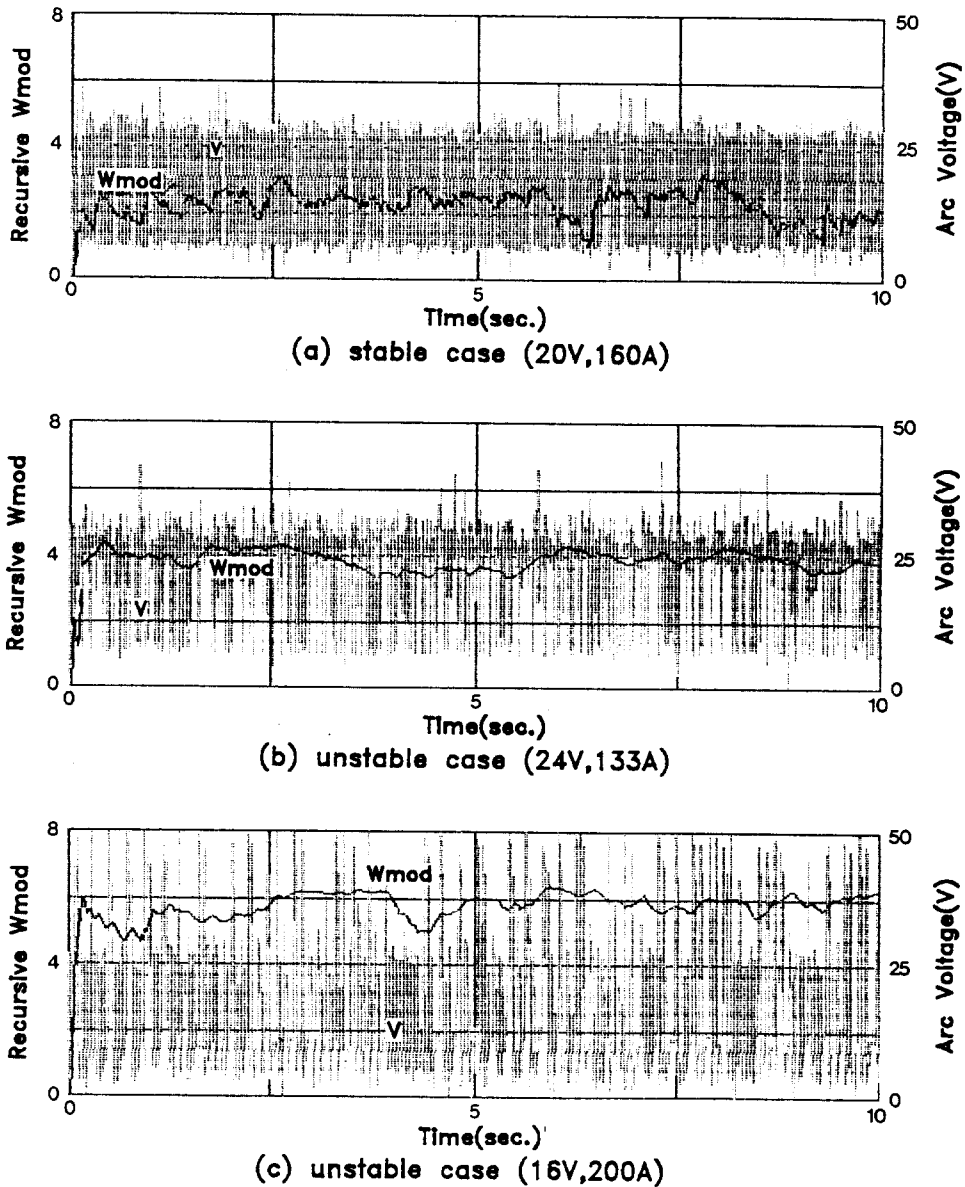
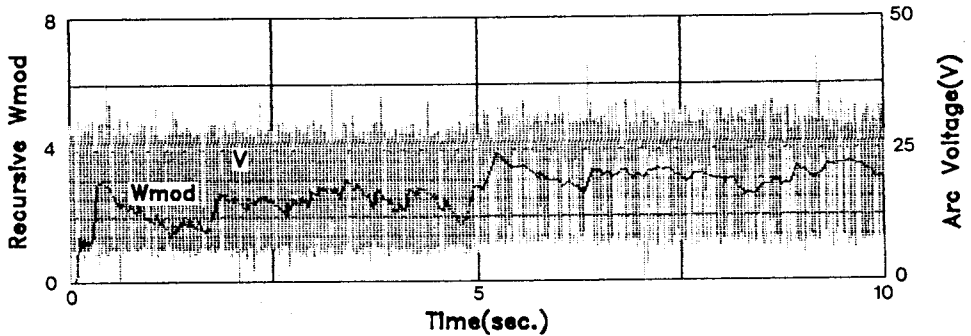


Fig. 10 Voltage waveform and recursive modified index

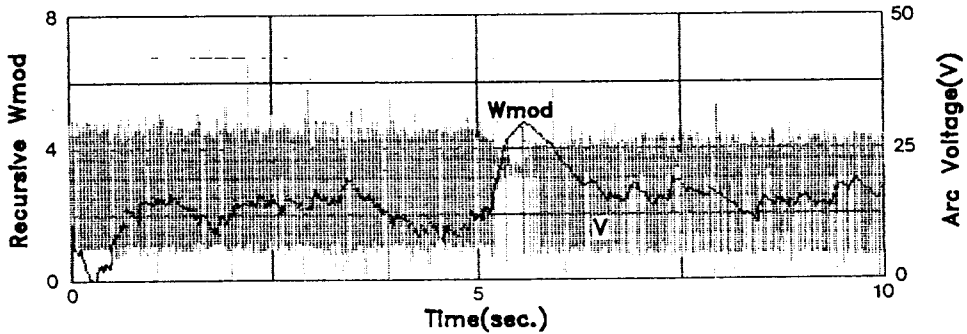
Fig.11 (a)는 20V, 160A의 안정한 조건을 유지하다가 5sec 후 전압이 24V로 증가한 경우이고 (b)는 100A로 감소한 경우로서 전압 파형과 순차적 지수의 변화를 나타내고 있다.

다음으로는 아크의 안정성이 서서히 변하는 경우로서 Fig.12(a)는 전류가 160A로 유지되면서 전압이 15V에서 30V로 직선적으로 변하는 경우이고, (b)는 전압이 20V로 유지되면서 전류가 80

A에서 240A로 직선적으로 변하는 경우이다. 그림에서 보는 바와 같이 이 경우에서도 아크의 안정성을 순차적 지수가 잘 나타내주고 있는 것을 알 수 있다. Fig.12 (a)에서 안정성의 변화를 잘 관찰해 보면 특정 전류에서 특정 전압일 때 가장 안정하고 이로부터 멀어지면 불안정성이 더 심해진다는 2.3절의 결과를 여기에서도 확인 할 수 있다. 또한 Fig.12 (b)를 보면 전압이 일정할 때도

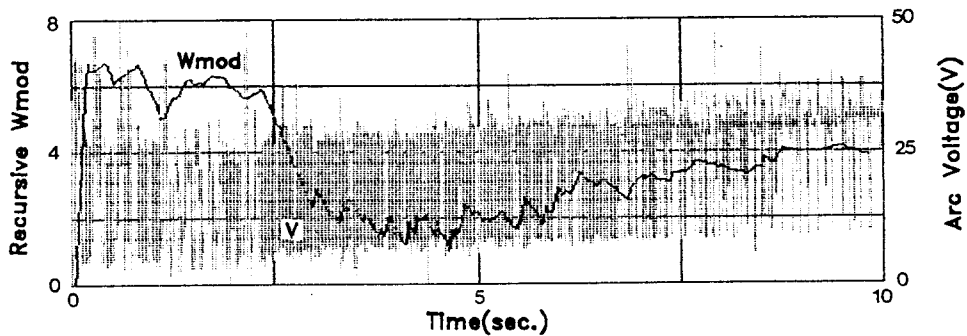


(a) sudden change from 20V,160A to 24V,160A at 5 sec.

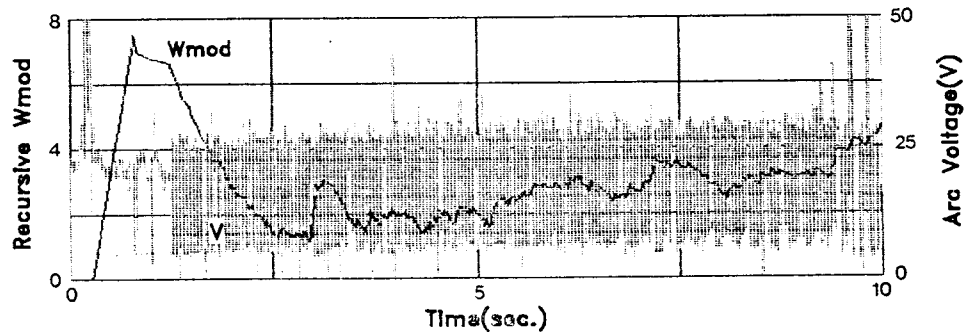


(b) sudden change from 20V,160A to 20V,100A at 5 sec.

Fig. 11 Voltage waveform and recursive modified index



(a) gradual change in voltage from 15V to 30V at 160A



(b) gradual change in current from 80A to 240A at 20V

Fig. 12 Voltage waveform and recursive modified index

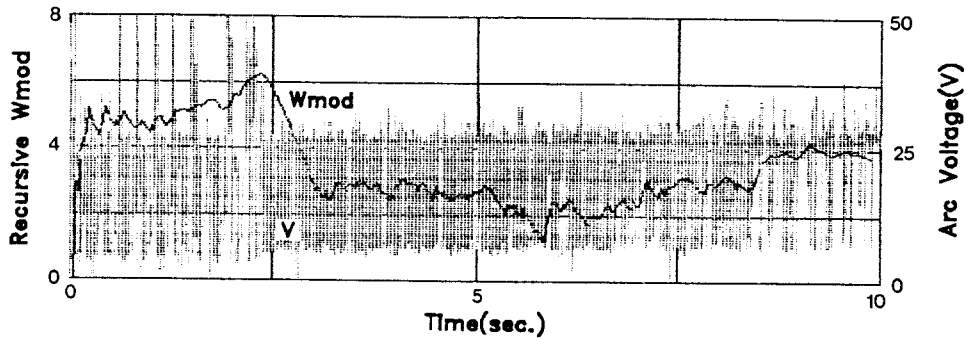


Fig. 13 Voltage waveform and recursive modified index in case of gradual change both in voltage and current from 15V, 213A to 30V, 107A : constant  $q$

같은 관계가 있음을 알 수 있다.

이와 같이 순차적 지수가 아크의 안정성을 실시간으로 잘 나타내주고 있음을 확인한 후 부가적으로 열입력은 일정하나 전압, 전류 조건이 변하는 경우에 대해 같은 절차로 아크 안정성을 실시간 측정해보니, 위의 결과와 마찬가지로 순차적 지수가 아크의 안정성을 잘 나타내 줌을 알 수 있었다. Fig.13은 이 중 전압이 15V에서 30V로 직선적으로 변함에 따라 열 입력이 일정하도록 전류가 따라서 변한 경우로서 안정 조건에 비해 전압이 작은(전류는 큰) 경우가 전압이 큰(전류는 작은) 경우보다 더 불안정해지기 쉬움을 알 수 있다.

본 실험에 사용된 실시간 순차적 지수 계산 프로그램은 지수를 계산할 때의 최대 샘플링 시간이 3.5 msec로서 용접 전압 변동 약 140 Hz까지 사용이 가능한데, 실제 용접 시 나오는 전압의 주파수는 대개 100 Hz 이하로서 실시간 기능 수행에 이상이 없었다.

#### 4. 결 론

GMAW 용접 공정의 자동화를 위한 아크 안정성 실시간 측정 연구를 수행한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 아크 안정성을 실시간으로 측정할 수 있게 하기 위해서 Mita의 아크 안정성 지수를 근간으로 용접 전기 회로 모델링을 통해 단락시간과 평균 단락 전류, 아크 시간과 평균 아크 전류의 관계를 구해 아크 전류 및 전압 파형의 제반 인자

중 단락 시간과 아크 시간만으로 구성되는 수정된 아크 안정성 지수를 구하였다.

(2) 동일한 용접 실험에 대해 수정 지수와 Mita 지수를 구해 비교한 결과, 최적의 안정도를 갖는 전류/전압 조건이 일치하며 이 조합에서 멀어지면 불안정도가 심화되는 동일한 경향을 볼 수 있어 수정 지수가 아크 안정성을 잘 반영해 줌을 알 수 있었으며, 아크 안정성은 전압, 전류의 조합에 따라 변동하며 열 입력이 증가(감소)할 때 최적 안정 조건을 유지하려면 전압, 전류가 직선적으로 증가(감소)하여야 함을 확인할 수 있었다.

(3) 수정 지수를 가중 평균 및 가중 편차를 이용하여 최근에 많이 가중치가 부여되는 순차적 지수로 변환, 실시간 측정이 가능한 형태를 구해 실제 용접 중에 적용하여 본 결과, 아크 안정성이 급격히 변할 때와 서서히 변할 때의 어느 경우에서도 아크 안정성을 실시간으로 평가할 수 있었다.

(4) 본 연구 결과인 순차적 지수가 아크 안정성을 실시간으로 평가해 줌으로써 용접 자동화에 있어서 아크 안정성의 실시간 제어수단이 제공되었다.

#### 참고문헌

- 1) G. E. Cook : Robotic arc welding : Research in sensory feedback control, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol 30, No.3, (1983), pp.252-268
- 2) P. T. Houldorft: Welding Process

- Technology, Cambridge Univ., 1977
- 3) T. Mita et al. : Quantitative estimates of arc stability for CO<sub>2</sub> gas arc welding, *Welding International*, No.2, (1988), pp.152-159
  - 4) T. Yamada, O. Tanaka : Fluctuation of the wire feed rate in gas metal arc welding, *Welding J.*, Vol. 66, No.9, (1987), pp.35-42
  - 5) S. Liu, T. A. Siewert : Metal transfer in gas metal arc welding, *Welding J.*, Vol.68, No.2, (1989). pp.52s-58s
  - 6) T. Arai et al : The investigation of arc phenomena by means of a computer, 일본 용접학회지, Vol.1, No.3, (1983), pp.317-322
  - 7) W. Lucas : Microcomputer systems, software and expert system for welding engineering, *Welding J.*, Vol.66, No.4, (1987), pp.19-30
  - 8) I. Ukita et al. : Effect of welder characteristic on stability of welding arc, 일본 용접 학회지, Vol.49, No.11, (1980), pp. 742-747
  - 9) A. Lesnewioch : Control of melting rate and metal transfer in gas-shielded metal-arc welding : Part II-control of metal transfer, *Welding J.*, Vol.37, No.4, (1958), pp.418s-425s
  - 10) 강성택 : GMAW 공정에서 아크 안정성의 실시간 측정, 한국과학 기술원, 생산공학과 석사 논문, 1989