

## 研究論文

# 교류 피복 아크 용접에 있어서 아크 안정성의 정량적 평가에 관한 연구

조 상 명\*

## A Study on the Quantitative Evaluation of Arc Stability in AC SMAW

S. M. Cho\*

**Key Words :** Arc Stability Index(아크 안정성 지수), Shielded Metal Arc Welding (SMAW, 피복아크용접), Welding Current(용접 전류), Arc Voltage(아크 전압), Arc Length(아크 길이), Welding Resistance(용접 저항), Coefficient of Resistance Variation(저항변동계수), Arc extinction(아크 끊김).

### Abstract

The shielded metal arc welding (SMAW) by AC power source was performed to evaluate the arc stability by arc monitoring and analysing. In this study, the arc stability index was evaluated quantitatively by using the coefficient of resistance variation for welding time. This coefficient was obtained for the long time (20sec.) by analysing the waveforms of welding current, voltage and resistance. The coefficient was applied to indicate numerically the variation level of arc length and the degree of arc extinction.

Using the coefficient of resistance variation in practical welding, the arc stability of the high titanium oxide electrode(KS E4313) turned out to be better than that of the low hydrogen electrode (KS E4316). In evaluating the skill level of welders by the coefficient, the horizontal fillet weaving welding became clear to be very discriminating because the higher level welder could weave in keeping constant arc length, but the lower level welder showed the characteristics of weaving with the unstable arc length. And it was confirmed that the welding defects as blow holes were formed when the arc stability index were high.

\* 1998년 5월 6일 접수

\* 정회원, 부경대학교 생산가공공학과

## 1. 서언

아크 용접에서 아크 안정성은 아크의 발생과 지속을 안정되게 하는 것을 정성적으로 나타내는 것으로 정의되어 있다<sup>1)</sup>. 이것은 반대로 용접시 아크 길이가 불규칙적으로 변하여 아크 끊김의 위험이 있다던가 또는 아크가 끊겨서 용접 결합이 발생할 우려가 높다면 아크는 근본적으로 불안정하다고 해석할 수 있을 것이다.

오늘날 수동 피복 아크 용접(이하, SMAW, Shielded Metal Arc Welding)은 대부분이 현장 조립이나 자동용접이 곤란한 부분에 적용되고 있으며, 중요한 곳에는 저수소계 용접봉과 같이 기계적 성질은 우수하지만 아크 안정성이 나쁜 것을 사용하도록 규정한다<sup>2)</sup>. 그러나 SMAW용 용접봉의 아크 안정성은 상기의 정의와 같이 작업자가 직접 용접하여 정성적으로 평가하는 수준에 머물러 있다. 특히 용접봉을 개발, 제조하는 입장에서도 종래에는 오실로스코프에 의하여 파형을 관찰하는 정도였으며, 용접 파형을 통계적으로 평가하여 아크 안정성에 관하여 정량적으로 취급한 연구는 보고되지 않고 있다.

한편, Mita 등<sup>3)</sup>은 가스금속 아크 용접(이하, GMAW)에 있어서 스파터의 발생량에 근거한 아크 안정성을 다루었다. 즉 스파터가 많이 발생하면 아크가 불안정하다는 논리가 그것이며, 이러한 연구는 강성구 등<sup>4)</sup>의 보고에서도 나타난다. Ogunbiyi 등<sup>5)</sup>은 GMAW에 있어서 이행모드와 아크 안정성을 함께 판단할 수 있는 방법을 제안하였으나, 최대 및 최소전류와 같은 값을 적용하므로 장기간의 전체적인 경향을 판단하기는 곤란하다. 또한 Rehfeldt 등<sup>6)</sup>은 GMAW 파형을 통계처리하여 전류, 전압, 전력 및 저항에 대한 확률밀도 분포의 패턴을 이용하여 품질 상태를 정성적으로 판단할 수 있는 방법을 제안하였지만, 아크 안정성과 품질의 관계를 직접 언급한 내용은 보이지 않는다.

아크 안정성에 관련된 연구는 용접 파형 계측에 컴퓨터를 본격적으로 이용하기 시작한 1980년대 후반부터 이루어졌다고 할 수 있으나<sup>7, 8)</sup>, 그 대부분이 아크길이가 심하게 변하는 GMAW의 단락이 행에 주안점이 맞추어져 있다. GMAW에서는 단락이나 순간적인 아크 끊김시에도 와이어가 정속 송급되므로 킹크 불안정(Kink instability)<sup>9)</sup>으로 인한

과도한 스파터가 문제시 되고 있지만, SMAW에서는 이러한 과도한 스파터는 발생하지 않는다. 따라서 자유이행(Free flight)을 주로 하는 SMAW에서는 스파터량에 근거한 아크 안정성 평가보다는 기공, 용입불량 및 비드 외관 불량 등에 영향을 미치는 아크 끊김 즉 아크 길이 자체에 근거한 아크 안정성 평가 방법을 확립할 필요가 있다.

본 연구의 목적은 SMAW에 있어서 용접저항의 변동계수를 아크 안정성 지수로 설정하여 이를 간단하면서도 합리적으로 평가하는 방법을 확립하여 용접봉의 종류, 작업자의 기능 수준, 전류의 크기, 아크 길이 및 용접 자세 등에 따른 아크 안정성의 변화를 정량적으로 비교할 수 있는 근거를 마련하는데 두었다. 실험에서는 교류 용접 전류와 전압을 약 20초 동안이라고 하는 상당히 긴 시간 동안 연속적으로 모니터링하고 그 결과를 컴퓨터로 해석하여 전류와 용접저항의 통계적 특성치인 평균과 표준편차를 구하였다. 이에 의하여 변동계수를 얻어서 아크 안정성에 대한 정량적 평가 지표로 삼았다. 또한 용접봉의 종류, 작업자의 기능수준, 전류의 크기, 아크 길이, 용접 자세 등에 따른 아크 안정성 지수의 비교 및 고찰을 행하고, 기공과 같은 용접 결합의 발생과의 관계를 검토하였다.

## 2. 실험 장치 및 실험 방법

본 용접 실험에서는 교류 피복 아크 용접기(용량 15kVA)를 사용하였다. 직경 3.2mm의 고산화티탄계 용접봉(KS E4313)과 저수소계 용접봉(KS E4316)을 써서 용접하여 그 특성을 비교하였다. 용접작업은 기능장 수준의 고기능자와 용접기사2급 실기사험 합격자 수준 또는 기능사보 수준의 저기능자에 의하여 실시하도록 하여 기능수준에 따른 아크 안정성의 평가를 시도하였다. 적용한 용접자세는 아래보기자세, 수평자세, 수직자세 및 수평필렛자세(위빙용접 포함)로서 각 자세에 따른 아크 안정성의 비교를 수행하였다. 또한 용접전류는 용접봉을 모재에 단락시킨 상태에서의 값을 기준으로 하여 70-180A의 범위가 되도록 하여 용접실험을 수행하여 전류 크기에 따른 아크 안정성의 특성을 비교 평가하였다. 용접 실험에 사용한 모재는 연강 SS400이었으며, 두께 6mm, 폭 100mm, 길이 200mm의 판으로서 흑피상태 그대로 용접하였다.

용접중의 아크상태를 모니터링하기 위하여 용접 전류와 전압을 연속적으로 계측하여 기록하였고, 여기에는 노트북 컴퓨터형인 아크 모니터링 시스템(WAM2000N, by Monitech Korea)을 사용하였다. 모니터링시의 초당 데이터 샘플링 속도는 15000회/초로 하였으며, 기본적으로 모니터링 시간은 20초 정도로 유지함으로써 1-2초 등과 같이 너무 짧은 시간동안의 전류, 전압 파형만에 의하여 전체적인 경향을 논의할 때의 문제점을 충분히 보완할 수 있도록 시도하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 아크 안정성 지수의 유도

3.1.1 전류 및 저항의 변동 특성에 대한 개념 도입  
교류 피복 아크 용접에서는 아크가 1/120초마다 재점호 되고, 성장하였다가 작아져서 소멸된 후에 다시 재점호 되는 사이클이 연속적으로 이어진다. 이 때 용접 전류와 아크 전압의 관계에 의해서 용접저항을 알 수 있으며, 이 저항은 아크 길이에 거의 비례하여 변하게 된다<sup>7)</sup>. 그러나 용접봉이 모재에 단락되면 저항은 용접봉의 심선과 회로만에 의하여 결정되며, 실제 전류가 흐를 때, 저항의 크기는 매우 작고 그 변동도 거의 없게 된다.

정현파 형상을 한 교류전류에서는 다음과 같이 실효전류(Effective current, Root mean square of current)  $I_{rms}$ 를 구한다.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} \quad (1)$$

여기서, T : 시간(통상 교류1/2사이클의 시간, 1/120초)

i : 순시전류(A)

$I_m$  : 최대전류(A)

Fig. 1은 피복 아크 용접봉을 이용하여 모재에 단락시켜서 약95A정도의 전류를 흘렸을 때의 전류와 전압 파형을 모니터링하여 나타낸 것이다. 이 파형은 순시 전류와 전압을 나타낸 것으로서 일정한 정현파인 것을 알 수 있으며, 전류는 상당히 크지만 전압은 아주 작아서 단락된 상태임을 추정할 수 있다. Fig. 1의 매우 규칙적인 전류와 전압 파형으로부터 전류의 실효치  $I_{rms}$ 와 전압의 실효치도 함

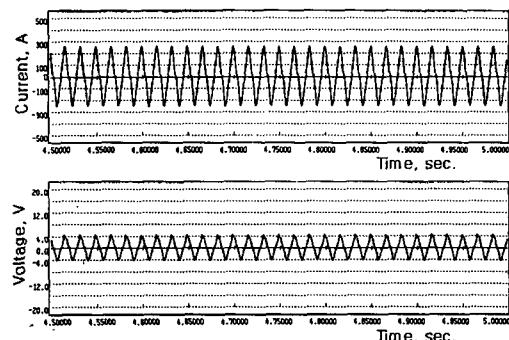


Fig. 1 Waveforms of current and voltage when electrode and work were shorted.

리적으로 계산하기만 하면 매우 균일한 상태로 될 것이며, 저항의 변화도 거의 없을 것으로 보인다.

본 연구에서는 주어진 일정한 시간동안 실효전류와 저항에 대한 변동의 정도는 다음 식(2)와 같이 표준편차와 평균에 의하여 계산되는 변동계수(Coefficient of variation)로 표시하기로 하였다.

$$\text{변동계수} = \frac{\text{표준편차}}{\text{평균치}} \quad (2)$$

따라서 전류 또는 저항의 변동계수가 0이 되면 전류 또는 저항이 수학적으로 일정하게 됨을 의미한다. Fig. 1의 전류 변동계수는 0.022이었고, 저항 변동계수는 0.033으로 되어 실제로 거의 변화가 없으며, 아울러 본 연구에서 활용한 모니터링 시스템의 파형 계산 알고리즘이 합리적이라는 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 2는 용접봉의 길이가 9cm남아 있을 때와 35cm인 새 것을 이용하여 단락시켰을 때의 평균저항(왼쪽 세로축)과 저항변동계수(오른쪽 세로축)의 관계를 나타낸 것이다. 용접봉의 길이가 커짐에 따라 평균저항은 증가하고, 변동계수는 약간 감소하지만 그 절대치가 0.05이하로서 매우 작은 값을 유지하고 있어서 전체적으로는 저항의 변동이 거의 없다. 또한 용접봉을 새 것으로 사용하는 경우와 9cm정도 남았을 때 저항의 차이는 약4m $\Omega$ 에 지나지 않을 정도로 용접시의 전기 회로 저항의 변화는 작게 됨을 알 수 있었다. 이하에서 검토하는 아크저항의 평균 실측치는 150-300m $\Omega$ 의 범위에 있으므로 그 저항의 변화는 아크 길이만에 지배된다고 할 수 있다.

Fig. 3은 용접봉을 모재에 단락시킨 후에 급격히

게 개방시켜서 아크가 끊어지도록 하였을 때의 파형이다. (a)는 순시 전류와 전압의 파형을 보인 것이고, (b)는 실효전류와 용접저항의 변화를 보인

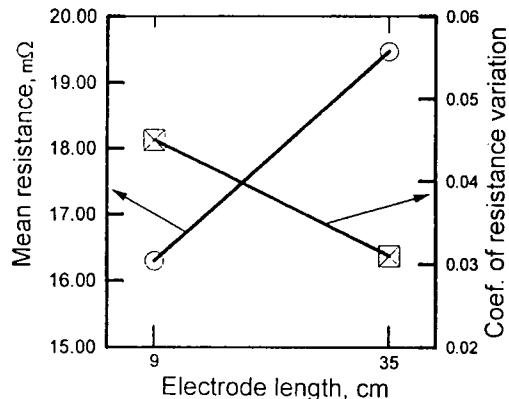
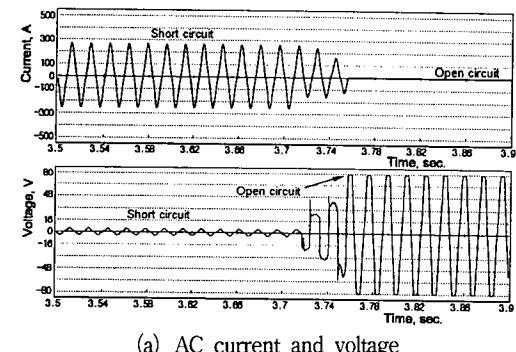
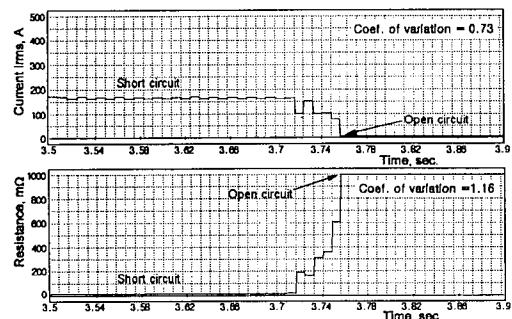


Fig. 2 Relation of mean resistance and coefficient of resistance variation to electrode length.



(a) AC current and voltage



(b) Root mean square of current and resistance

Fig. 3 Waveforms of current and resistance when electrode and work were open after short circuit.

것이다. 이와 같이 단락상태에서 아크가 생기면서 바로 끊기는 경우가 가장 아크 안정성이 나쁜 경우라고 볼 수 있기 때문에 이것에 대한 변동계수를 계산하여 나타내었다. 여기서 아크가 끊기면 전류는 0 A로 되고, 전압은 무부하 전압인 80V정도로 되며 용접저항은 무한대로 되는데, 이렇게 무한대인 값을 그대로 써서는 통계적인 해석이 불가능하다. D. Rehfeldt 등은 GMAW에 있어서 저항의 변동계수를 구하면서 아크가 끊겼을 때의 가상저항값을  $1000\text{m}\Omega$ 으로 두고서 처리하였다<sup>6)</sup>. 그러나 본 연구의 예비 실험에 의하면 인버터 직류 GMAW에서는 저항이  $3000\text{-}5000\text{m}\Omega$ 이 되어도 아크가 끊기지 않지만, 교류 SMAW에서는  $1000\text{m}\Omega$ 정도의 저항이 되면 대부분의 아크가 끊기게 되었다. 따라서 본 연구에서는 아크가 끊겼을 때의 가상저항을  $1000\text{m}\Omega$ 으로 두고 평균치와 표준편차 및 변동계수를 계산하였다.

Fig. 4는 Fig. 3과는 반대로 개방상태에서 모니터링을 개시하여 단락상태로 급격하게 변화시켰을 때의 파형으로서 실효전류Irms와 저항의 변동 상태를 보인 것이다. 이 경우도 아크 안정성이 가장 나쁜 상태라고 할 수 있으며, 용접저항의 변동계수는 거의 1에 가까운 값을 나타내었다.

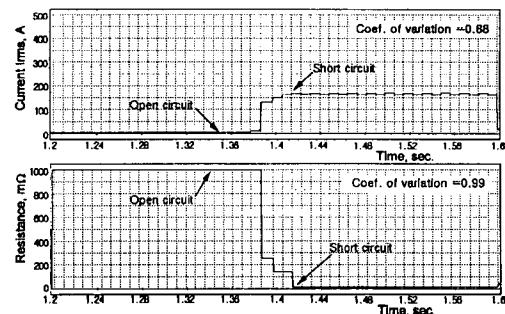


Fig. 4 Waveforms of current Irms and resistance when electrode and work were shorted after open circuit.

한편, 단락 또는 안정된 아크와 같이 저항의 평균과 변동계수가 작은 통계적 특성을 가지는 변수의 분포에 아크 끊김과 같이 큰 저항( $1000\text{m}\Omega$ )의 일정한 값을 가지는 분포가 시간적으로 더해졌을 때, 단락(또는 안정 아크) 시간과 아크 끊김 시간비에 따른 변동계수의 변화는 다음과 같은 식에 의하여 고찰할 수 있다. 다만 안정 아크상태에서 아

크 끊김 상태로 천이하는 과정은 없는 것으로 가정하여 유도하였다. 즉 아크 끊김이 포함된 전체 용접파형에서 저항의 변동계수 Cv는 다음 식(3)과 같이 계산할 수 있다.

$$Cv = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} [\sum (R_i - R_{\text{av}})^2 P_s f_i + (1000 - R_{\text{av}})^2 P_e N]}}{R_{\text{av}}} \\ = \frac{\sqrt{P_s S_s^2 + P_s (R_{\text{av}} - R_{\text{sm}})^2 + P_e (1000 - R_{\text{av}})^2}}{R_{\text{av}}} \quad (3)$$

여기서, N : 모니터링한 총 데이터의 수

$R_i$  : 모니터링한 각 순간의 저항 값

$R_{\text{av}}$  : 아크 끊김이 포함된 전체 용접 파형의 평균저항

$P_s$  : 전체 용접 시간에 대한 단락(또는 안정 아크) 시간비

$f_i$  : 각 저항 값의 度數

1000 : 아크 끊김시의 가상저항 값( $\text{m}\Omega$ )

$P_e$  : 전체 용접 시간에 대한 아크 끊김 시간비 ( $P_s + P_e = 1$ )

$S_s$  : 단락(또는 안정 아크) 시의 표준편차

$R_{\text{sm}}$ : 단락(또는 안정 아크) 시의 평균저항

상기의 식(3)을 활용하면 단락시 저항변동계수 Cv가 거의 0인 상태에서 용접봉을 개방시켜 아크 끊김이 생기게 할 때나, Cv=0.2전후의 안정된 아크상태에서 갑자기 아크가 끊겼을 때에 이론적으로 변동계수를 구할 수 있다. 또한 식(3)에 의하면 아크 끊김시의 가상저항 값이 변동계수에 미치는 영향을 구체적으로 검토할 수 있다. 실제로 식(3)에서 단락 시간비  $P_s=0.5$ , 아크 끊김 시간비  $P_e=0.5$ 인 경우, 변동계수 Cv=1로 계산되어 모니터링하여 통계처리한 결과 즉 Fig. 3 (b) 와 Fig. 4와 대략 일치하였다.

결국 교류 SMAW에서 저항변화가 가장 작은 단락상태에서는 전류와 저항의 변동계수가 0에 가까운 값으로 되었고, 저항변화가 가장 심한 단락후 개방 또는 개방후 단락상태에 대한 각 변동계수는 1에 가까운 값을 가지게 되었다. 따라서 정상 아크 용접에서의 아크 안정성 지수는 0과 1사이의 이들 변동계수에 의하여 정량적으로 평가할 수 있을 것으로 예상되며 이하에서 구체적으로 검토하고자 한다.

3.1.2 실제 아크에 대한 아크 안정성 지수의 검토  
매우 안정된 아크상태를 유지하면서 SMAW를 실제로 행하는 경우와 상당히 불안정한 아크상태에서 용접하는 경우에 대한 변동계수를 비교하기 위하여 실험을 수행하였다.

Fig. 5는 E4313용접봉을 써서 아래보기 자세로 매우 안정적인 아크상태를 유지하면서 용접하였을 때의 파형으로서 가장 안정된 1초간의 경향을 보인 것이다. 이 때 용접전류의 변동계수는 0.1정도이며, 저항변동계수는 0.178이었다.

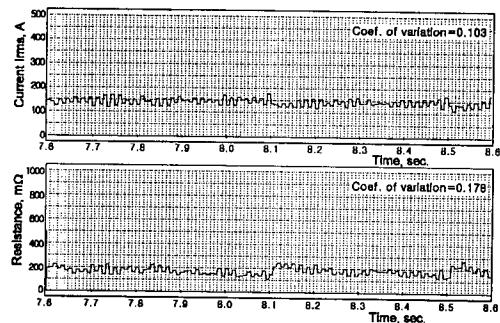
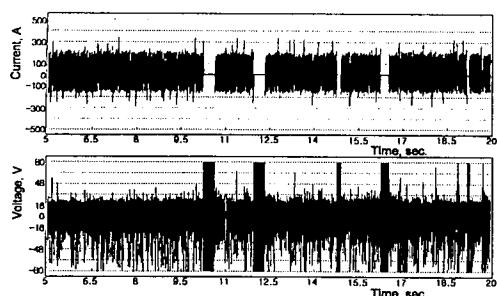


Fig. 5 Waveforms of current  $I_{\text{rms}}$  and resistance when the welding was performed in very stable arc state.

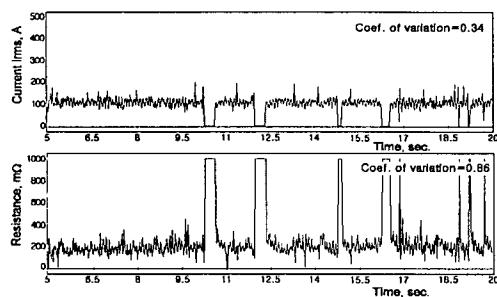
Fig. 6은 E4316용접봉을 써서 용접하였을 때의 파형으로서 계산한 시간 15초동안에 아크가 5-6회 꺼졌을 정도로 상당히 아크가 불안정하여 사실상 기공이나 용입불량이 발생하였을 가능성이 높은 경우이다. 이 때의 전류변동계수는 0.34이었고, 저항변동계수는 0.86이었다.

Table 1은 Fig. 5와 Fig. 6의 두 아크상태에 대한 변동계수를 실제의 모니터링 시스템으로 자동 계산하여 비교한 것으로서 아크가 심하게 불안정하게 되었을 때, 저항변동계수의 변화가 보다 현저하게 나타났다. 이것은 수하특성 전원이나 정전압특성 전원 모두에서 나타날 수 있는 특징으로서 용접저항은 음의 법칙 ( $R=V/I$ )으로 구해지므로 그 변동은 전류와 전압 각각의 변동보다는 확대되어 변하기 때문이다. 즉 아크 길이가 비정상적으로 커졌을 때, 전원의 특성(수하 또는 정전압)에 따라 정도의 차이는 있지만 전류는 감소하고 전압은 증가하며, 이로 인하여 저항은 보다 많이 증가한다.

한편, D. Rehfeldt 등은 GMAW에서 전류, 전압



(a) AC current and voltage



(b) Root mean square of current (Irms) and resistance

Fig. 6 Waveforms of current and resistance when the welding was performed in unstable arc state.

Table 1. Comparision of coefficient of variation for stable and unstable arc.

Coefficient	Arc state			Remark
	Very stable arc	Very unstable arc	Unstable Stable	
Coef. of current variation	0.103	0.34	3.3	-
Coef. of resistance variation	0.178	0.86	4.83	Better discrimination

및 저항의 변동계수를 구하여 실드가스의 차이(혼합가스와 아르곤가스)에 의한 아크 특성을 비교하는데 적용하였으나, 직접 아크 안정성 지수로 연결시켜서 검토하지는 않았다.<sup>6)</sup>

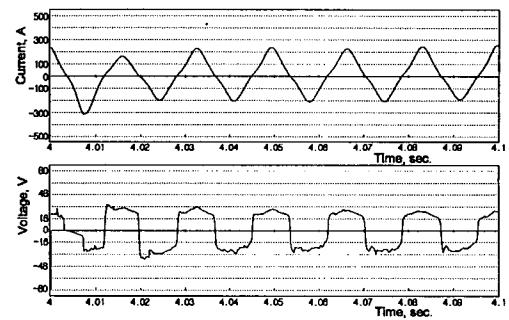
결국, 아크 길이의 변동 특성 즉 그 안정성을 간단하면서도 가장 민감하게 평가할 수 있는 것은 저항의 변동계수라고 할 수 있으므로 본 연구에서는

아크 안정성 지수로서 저항의 변동계수를 적용하기로 하였다.

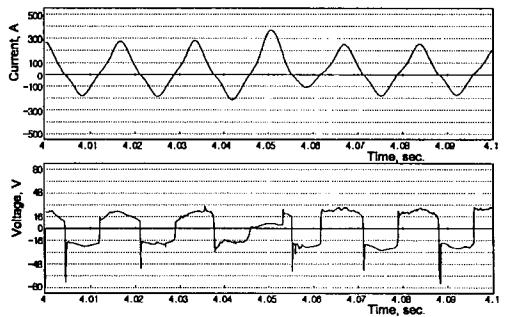
### 3.2 아크 안정성 지수에 의한 용접 상태의 평가

#### 3.2.1 용접봉의 종류에 따른 아크 안정성의 비교

Fig. 7은 E4313과 E4316용접봉을 써서 약150A의 전류(단락시)로 저기능자가 아래보기 자세에서 용접하였을 때 얻은 파형으로서 각각 0.1초씩만 표시하여 상세한 파형을 관찰할 수 있게 한 것이다. 작업성이 좋은 것으로 알려진 고산화티탄계 E4313용접봉은 아크 재점호 전압이 크게 증가하지 않는다. 그러나 용접금속의 기계적 성질은 좋지만 작업성이 나쁜 것으로 알려진 저수소계 E4316용접봉은 극성이 바뀔 때 특히 용접봉이 음극으로 되는 순간은 아크 재점호 전압이 뾰족하게 더욱 높아져 있어서 근본적으로 아크의 재점호가 곤란함을 알 수 있다<sup>10, 11)</sup>. 따라서 용접중 아크가 조금이라도 길



(a) KS E4313



(b) KS E4316

Fig. 7 Comparision of waveforms in practical welding enlarged by zoom in.

Table 2. Coefficient of current and resistance variation for 2 electrodes.

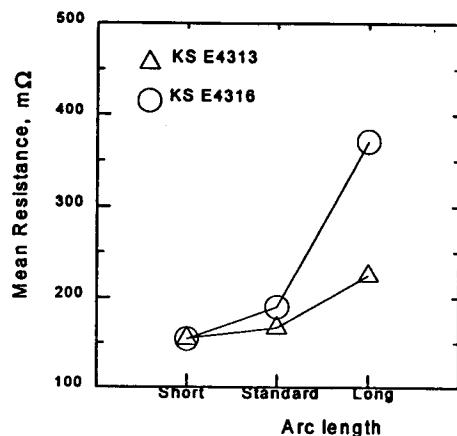
Electrode (φ3.2mm)	Electrode condition	Welding time	Average	Coef. of variation		Arc stability
			Current	Current	Resistance	
KS E4313	Dry	20 seconds	144 A	0.168	0.258	Very stable
KS E4316 #1 test	Dry	20 seconds	138 A	0.201	0.518	A little unstable
KS E4316 #2 test	Dry	20 seconds	138 A	0.239	0.763	Considerably unstable

어지면, 아크 재점호 전압이 무부하 전압을 쉽게 초과하여 아크가 깨지므로 아크 안정성은 나쁘다고 할 수 있다.

Table 2는 E4313과 E4316용접봉을 이용하여 약 150A의 전류로 설정한 상태에서 아래보기자세에서 저기능자가 각각 20초씩 용접을 수행하여 그 시 간동안의 전류와 전압 파형을 모니터링하여 파형 해석한 결과이다. E4313에서는 20초동안 단락이나 아크 끊김 현상이 전혀 없이 안정된 아크가 유지되었기 때문에 저항변동계수는 0.258로 매우 작게 되었다. 그러나 E4316용접봉의 경우는 2번의 시험중 단락과 아크 끊김이 1-3회정도 발생하였기 때문에 각각의 저항변동계수는 0.518과 0.768로서 비교적 큰 값을 갖게 되었다. 따라서 E4316의 아크 안정성은 대체로 E4313보다 나쁜 것으로 판단된다. 또한 저항변동계수가 대략 0.3이하이면 아크는 매우 안정되며, 0.5를 넘어서면 아크가 불안정해진다고 할 수 있다.

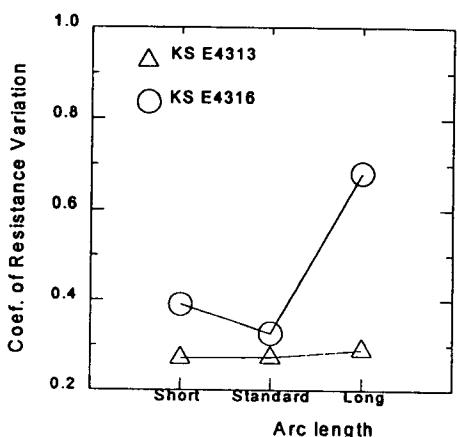
### 3.2.2 아크 길이와 용접 전류에 따른 아크 안정성의 비교

Fig. 8은 E4313과 E4316 용접봉을 써서 고기능자가 아래보기 자세에서 아크 길이 $l_a$ 를 짧게 ( $l_a \approx 2\text{mm}$ ), 표준(E4313  $l_a \approx 3\text{mm}$ , E4316  $l_a \approx 2.5\text{mm}$ )으로, 그리고 길게(E4313  $l_a \approx 4\text{mm}$ , E4316  $l_a \approx 3\text{mm}$ ) 유지하면서 용접하였을 때, 각 조건에서 대표적인 15초동안의 파형을 해석하여 평균저항과 저항변동계수를 보인 것이다. (a)에서 아크를 길게 하면 평균저항은 전체적으로 증가하는 경향을 보인다. 그런데, E4313 용접봉에서는 아크 길이가 커질 때, 평균저항은 약간 증가하지만, E4316에서는 길게의 조건에서 평균저항이 갑자기 크게 증가하였다. 이것은 E4316에서는 아크 길이가 커졌을 때, 아크가 끊기기 쉽고 실제로 아크가 끊겼을 때



(a) Relation of arc length and mean resistance

(a) Relation of arc length and mean resistance



(b) Relation of arc length and coefficient of resistance variation

Fig. 8 Relation of arc length and resistance in welding by 2 kinds of electrodes.

는 그 가상저항을  $1000m\Omega$ 으로 크게 계산하였기 때문이다.

Fig. 8 (b)는 아크 길이를 변화시켰을 때의 저항변동계수를 표시한 것이다. E4313에서는 아크 길이가 표준에서 다소 벗어나더라도 아크 안정성은 크게 변하지 않지만, E4316에서는 아크 길이가 조금이라도 표준에서 벗어나면 아크 안정성은 나빠지며, 특히 아크가 길어지면 저항변동계수는 현저하게 커져서 E4313의 2배이상으로 된다. 이 결과의 고찰에 의하여 E4316을 써서 용접할 때 아크가 길어지지 않도록 각별한 주의를 해야 하는 정량적 근거를 확립하였다.

Fig. 9는 두 종류의 용접봉을 써서 전류 70A에서 140A까지 10A씩 증가시키면서 아래보기자세로 용접하였을 때의 평균저항을 나타낸 것이다. 전체적으로 전류를 증가시키면 아크의 평균저항은 감소하고 있다. 이것은 용접전원의 특성에 의해서도 영향을 받지만, 용접 전류가 증가하면 아크가 커지게 되어 아크 기둥(플라즈마 기둥)의 단면적은 커지고 아크 길이는 거의 일정하기 때문이라고 판

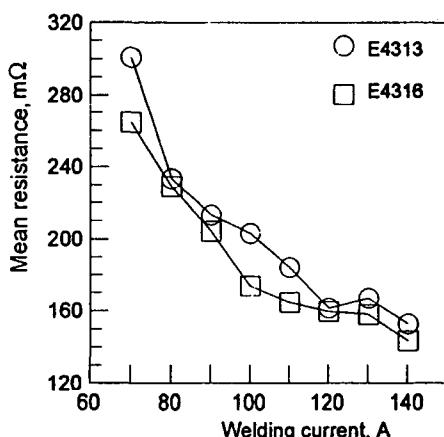


Fig. 9 Relation of welding current and mean resistance by 2 kinds of electrodes.

단된다. 평균적으로 아크 길이를 짧게 유지하면서 용접한 E4316의 평균저항이 E4313보다 약간 더 낮은 것으로 나타났다.

Fig. 10은 Fig. 9와 같은 실험 결과를 이용하여 용접 전류에 따른 저항변동계수의 변화를 나타낸 것이다. E4313은 용접전류에 관계없이 거의 일정한 변동계수를 나타내고 있으나, E4316은 저전류 영

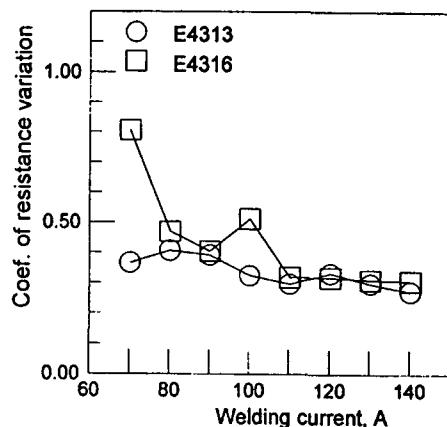


Fig. 10 Relation of welding current and coefficient of resistance variation by 2 kinds of electrodes.

역에서 특히 변동계수가 크게 되며, 대체로 불안정한 경향을 보이고 있어서 E4313에 비하면 아크 안정성이 좋지 않은 것으로 평가된다. 두 용접봉 모두 전류를 높여서 용접하면 아크 안정성은 양호해진다. 또한 E4316의 경우는 용접봉 하나 하나의 품질이 균일하지 못하여 같은 조건으로 용접할 때라도 상당히 다른 아크 안정성을 보이는 특성이 있었다. 이러한 품질의 통계적 산포에 대한 보다 자세한 연구는 금후 별도로 추진되어야 할 것이다.

### 3.2.3 용접 자세와 작업자의 기능 수준에 따른 아크 안정성의 비교

Fig. 11은 용접자세에 따라 용접 작업자의 기능 수준(고기능자와 저기능자)이 아크 안정성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 20초 동안의 결과를 처리하여 나타낸 것이다. 사용한 용접봉은 E4316이었다. 적용한 용접자세는 아래보기(Flat position), 수직상진(Vertical-up position), 수평자세(Horizontal position), 그리고 아래보기 V그루브(V-groove) 용접, 수평필렛 직선(H-fillet straight) 용접, 및 수평필렛 위빙(H-fillet weaving) 용접으로 구분하여 수행하였다. 용접 전류는 각각의 자세에 따라 작업자가 적절히 조절하였다. Fig. 11에서 보면 고기능자가 용접하는 경우는 어떤 자세에서도 평균적으로 비슷한 아크 안정성이 나타났으나, 저기능자는 용접 자세에 따라 심하게 아크 안정성이 나쁘게 되는 특징을 보였다. 특히 수평필렛 위빙 용접시에는 기능수준에 따라 가장 현저한 아크 안

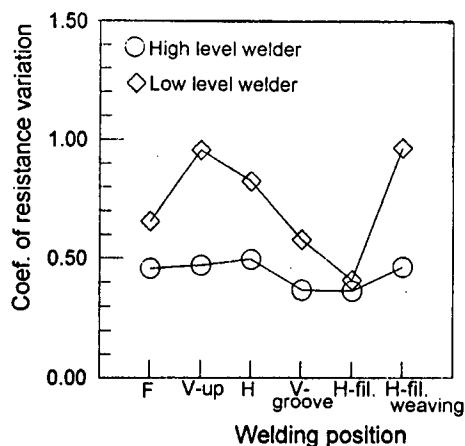


Fig. 11 Relation of welding position and coefficient of resistance variation by 2 welders with different skill.

정성의 차이가 생겼으며, 다음이 수직상진 자세의 경우이었다. 즉 용접 작업자의 기능 수준을 평가함에 있어서 본 연구에서 취급한 용접 자세 중에는 수평필렛 위빙 용접이 가장 변별력이 좋으며, 다음이 수직상진 자세라고 할 수 있다.

Fig. 12는 수평필렛 위빙 용접을 고기능자와 저기능자가 각각 실시토록 하여 그 중에 20초 동안의 파형을 모니터링하여 용접저항의 변화를 보인 것이다. 고기능자라도 위빙 용접을 하기 때문에 저항은 다소 규칙적으로 변동하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 저기능자가 용접한 파형은 저항의 변동이 좀 더 불규칙적이며, 9초 근방에서 한번 끊겼으며, 10초 직전에도 아주 짧은 시간동안 끊겼다. 이어서 14초 바로 앞에서는 아크가 불안정해서 끊길뻔 했던 것으로 보이며, 대략 15초에서 17초 사이에는 비교적 긴 시간동안 아크가 끊겼던 것으로 나타났다. E4316 용접봉을 써서 용접하는 경우에는 아크가 길어지면 쉽게 끊기는 단점 즉 아크 안정성이 우수하지 못한 특징이 있는데, 여기에서와 같이 저기능자가 위빙을 하면서 용접할 때에는 아크 길이가 변하기 쉽고 그것 때문에 아크 안정성이 더욱 나빠지는 경향이 나타난다고 할 수 있다. 따라서 아크 안정성 지수를 활용하면 작업자의 기능 수준을 정량적으로 평가할 수 있을 것이다.

결국, 아크 안정성 지수는 전술한 바와 같이 0.3이

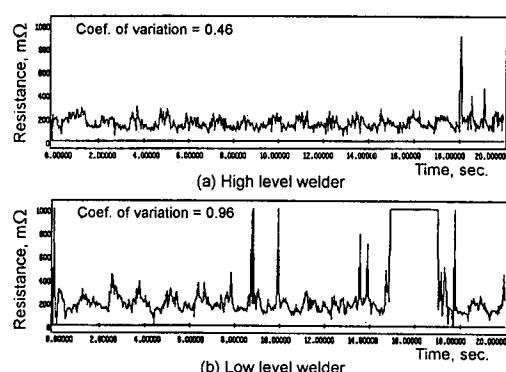


Fig. 12 Variation of resistance in horizontal fillet weaving welding by 2 welders with different skill.

하이면 매우 안정된 상태, 0.3-0.5정도의 값이면 비교적 안정된 상태, 0.5를 넘어서면 불안정한 상태라고 구분할 수 있다.

### 3.2.4 아크 안정성이 용접 품질에 미치는 영향

Fig. 13은 아크가 불안정한 상태에서 용접하여 얻은 비드의 외관과 그 종단면의 마크로 사진으로서, 용접 전류 파형도 위의 비드를 용접할 때에 20초동안 모니터링한 것을 비드 길이와 함께 표시한 것이다. 용접속도는 120mm/min정도로 늦게 하였으며, 단락 전류는 110A이었다. 파형의 가운데

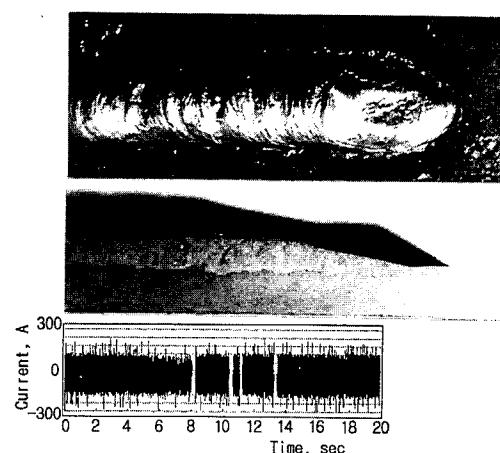


Fig. 13 Bead appearance and longitudinal section with blow holes due to arc extinction (E 4316, 110A, 12cm/min).

부분에서 아크가 짧게 4회정도 끊겼으며, 이 파형의 해석결과 저항변동계수는 0.7정도이었다. 즉 아크 안정성 지수는 0.7정도로서 불안정하다고 할 수 있다. 종단면의 마크로 사진에서 보면 아크가 끊긴 근방에서 기공이 발생한 것을 알 수 있다. 기공이 발생하는 원인으로서는 아크 불안정성이외에 바람, 페인트, 수분 등 다양한 인자가 있지만 본 연구에서는 전류 파형과 함께 판단하여 보면 아크 끊김이 기공 발생의 직접적인 원인이었다고 할 수 있을 것이다. 주변 공기의 습도가 높거나 바람이 약간 있거나 또는 모재의 온도가 심하게 낮을 때는 보다 짧은 아크 끊김에 의해서도 기공이 발생할 것이다. 한편 아크가 끊기면서 아크 안정성이 나쁘게 되면 비드 외관도 나빠지는데, Fig. 13에서도 비드의 중간부근에서 다소 거친 물결 무늬를 볼 수 있다. 이와 같이 비드 외관이 거칠고, 불규칙해지면 용접부의 피로강도가 저하하는 한 원인으로 될 수 있는 것으로 알려져 있다<sup>12)</sup>. 따라서 아크 안정성 지수는 용접 품질 평가를 위하여 적용할 수 있고, 결합 발생 위치를 판별하여 비파괴 검사 위치를 결정하는 데도 유용하게 적용할 수 있다.

#### 4. 결 론

교류 SMAW의 아크 길이 변화와 끊김에 대한 아크 안정성을 평가하기 위하여 고기능자와 저기능자가 E4313과 E4316 용접봉을 써서 여러 가지 자세에서 아크 길이를 변화시키면서 용접 실험을 행하였다. 실험에 의하여 얻어진 전류, 전압 및 저항에 관한 파형을 해석하여 아크 안정성을 정량적으로 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) SMAW에서의 아크 안정성 지수는 용접저항의 변동계수로서 정량적으로 나타낼 수 있음을 확인하였다. 저항의 변동계수가 0.3이하이면 매우 안정된 아크, 0.3~0.5의 범위이면 비교적 양호한 아크로 구분할 수 있고, 0.5이상이면 불안정한 아크로서 기공과 같은 결합 발생의 가능성이 높아진다.

2) 고산화티탄계 E4313 용접봉은 저수소계 E4316 용접봉보다 아크 안정성이 우수하다는 것을 저항변동계수에 의하여 정량적으로 평가할 수 있었다. 그러나 전류가 높아지면 두 용접봉의 아크 안정성은 모두 좋아졌다.

3) E4313에서는 아크 길이가 표준에서 다소 벗어나더라도 아크 안정성은 크게 변하지 않지만,

E4316에서는 아크 길이가 조금이라도 표준에서 벗어나면 아크 안정성은 나빠지며, 특히 아크가 길어지면 저항변동계수는 현저하게 커져서 E4313의 2배이상으로 된다. 이것에 의하여 E4316을 써서 용접할 때 아크가 길어지지 않도록 각별한 주의를 해야 하는 정량적 근거를 확립하였다.

4) 용접 작업자의 기능 수준에 따라 용접시 아크 안정성 지수 즉 저항변동계수는 달라짐을 확인하였다. 본 연구에서 고려한 용접자세중에는 수평필렛 위빙용접이 가장 변별력이 우수하였고, 다음이 수직상진자세이었다. 따라서 아크 안정성 지수를 활용하면 작업자의 기능 수준을 정량적으로 평가할 수 있을 것이다.

5) SMAW에서 아크 안정성 지수가 높으면 용접비드내에 기공이 발생하고, 비드 외관이 불량해지는 현상을 직접 확인할 수 있었다. 따라서 아크 안정성 지수는 용접 품질 평가를 위하여 적용할 수 있고, 결합 발생 위치를 판별하여 비파괴 검사 위치를 결정하는 데도 유용하게 적용할 수 있을 것이다.

#### 후 기

본 연구를 수행함에 있어서 수동 피복아크 용접을 직접 수행하였던 대림자동차의 하형규과장(용접기능장), 한중DCM의 김영곤기사(용접기사 2급), 그리고 자료정리에 도움을 준 광주기능대학의 오동수교수에게 감사의 말씀을 드립니다.

#### 참 고 문 현

1. 대한용접학회 편 : 焊接用語辭典, 원창출판사, (1992), p. 210
2. Boiler & Pressure Vessel Code II Part C, Specification for welding rods, electrodes and filler metals, ASME, (1995), pp. 1-44
3. T. Mita, A. Sakabe, T. Yokoo : Quantitative estimate of arc stability for gas shielded arc welding, Welding International, No. 2, (1988), pp. 152-159
4. 강성구, 문형순, 나석주 : 스파터 양을 이용한 아크 안정성 판별에 관한 연구, 대한용접학회지 제15권 제6호, (1997), pp. 41-48
5. B. Ogunbiyi, J. Norrish : GMAW metal

- transfer and arc stability assessment using monitoring indices, Computer Technology in Welding, Six International Conference, Lanaken, Belgium., 9-12 June, (1996), paper 11
6. D. Rehpelt, A. Bollmann, T. K rbe, N. Kost and W. Rostek : Computer aided quality control by process analyzing monitoring and documentation, Int. J. for the Joining of Materials, Vol. 3 (1), (1991), pp. 11-16
  7. 최병길, 정기철 : 아크 용접변수의 계측과 활용, 대한용접학회지, 제14권 제4호, (1996), pp. 16-23
  8. 나석주, 문형순 : 용접 현상분석을 위한 신호 처리 알고리즘, 대한용접학회지, 제14권 제4호, (1996), pp. 24-32
  9. ランカスター-編著 : 溶接アーケの物理, 社團法人 溶接學會, 溶接アーケ物理研究委員會, (1990) pp. 66-72, pp. 129-158
  10. 安藤弘平, 長谷川光雄 : 溶接アーケ現象, 產報, (昭和51), pp. 299-302
  11. 荒田吉明, 西口公之 : 溶接法の基礎, 現代溶接技術大系 ②, 產報出版, (昭和55), pp. 25-27
  12. 森 猛 : 溶接橋梁部材の疲労亀裂進展壽命に関する研究, 東京工業大學 大學院 土木工學科 博士論文, 昭62, pp. 123-143