

## GMA 용접의 단락이행영역에 있어서 아크 상태 평가를 위한 모델 개발

강문진\* · 이세헌\*\* · 엄기원\*\*

### Development of the Index for Estimating the Arc Status in the Short-circuiting Transfer Region of GMA Welding

Moonjin Kang\*, Sehun Rhee\*\* and Kiwoan Eom\*\*

**Key Words** : CO<sub>2</sub> arc welding(CO<sub>2</sub> 아크 용접), Arc state(아크 상태), Amount of the generated spatters(스패터 발생량), Standard deviation(표준편차), Multiple regression analysis(다중회귀분석)

#### Abstract

In GMAW, the spatter is generated because of the variation of the arc state. If the arc state is quantitatively assessed, the control method to make the spatter be reduced is able to develop. This study was attempted to develop the optimal model that could estimate the arc state quantitatively. To do this, the generated spatters was captured under the limited welding conditions, and the waveforms of the arc voltage and of the welding current were collected. From the collected waveforms, the waveform factors and their standard deviations were produced, and the linear and non-linear regression models constituted using the factors and their standard deviations are proposed to estimate the arc state. The performance test to the proposed models was practiced. Obtained results are as follow. From the results of correlation analysis between the factors and the amount of the generated spatters, the standard deviations of the waveform factors have more the multiple regression coefficients than the waveform factors. Because the correlation coefficient between  $T$  and  $T_s$ , and  $s(T)$  and  $s(T_s)$  was nearly one, it was found that these factors have the same effect to the spatter generation. In the regression models to estimate the arc state, it was found that the linear and the non linear models were also consisted of similar factors. In addition, the linear regression model was assessed the optimal model for estimating the arc state because the variance of data was narrow and multiple regression coefficient was highest among the models. But in the welding conditions which the amount of the generated spatters were small, it was found that the non linear regression model had better the estimation performance for the spatter generation than the linear.

※ 1999년 6월 16일 접수

\* 정희원, 포항산업과학연구원

\*\* 정희원, 한양대학교 정밀기계공학과

# 강문진 : moonjin@rist.re.kr

## 1. 서 론

소모성 전극을 사용하는 가스 메탈 아크 용접(GMAW)은 용접재료의 용융현상에 관계된 비선형적인 힘과 에너지의 작용에 의해 용적이행이 매 순간마다 비선형적으로 변화하는 공정의 특성을 가지고 있다. 특히 CO<sub>2</sub> 아크 용접은 분위기 가스로 활성 가스인 CO<sub>2</sub> 가스를 사용하므로써, 아크 기둥에서의 변동이 더욱 심해져 용접중의 전류변동이 더욱 심해지거나, 용적이행이 매우 불규칙해져 많은 양의 스파터를 유발시킨다.

최근들어 컴퓨터와 데이터 수집장치의 고속화에 따라 복잡한 용적이행현상을 분석하고 아크 안정성을 평가하고자 하는 연구들이 활발하게 진행되어 왔다. Adam<sup>1)</sup>은 용접 전류, 전압 신호를 측정하고 이를 주파수 분석 및 확률론적 파라미터를 통하여 용적이행 모드를 판별하였다. Arai<sup>2)</sup>는 CO<sub>2</sub> 아크 용접에 있어서 저 전류 영역 단락이행모드에서 아크시간의 표준편차와 아크 안정성과의 상관관계를 연구하였는데 인간의 경험에 의한 아크 안정성과 아크시간의 표준편차 사이에 밀접한 관계가 있음을 보였다. Lucas<sup>3)</sup>는 아크의 안정성과 단락 최고 전류와 단락주기의 균일성과의 관계를 연구하였는데 단락최고전류와 단락시간 각각의 표준편차와 안정성간에 관계가 있음을 보였고, 또한 여러가지 타입의 용접전원을 사용하여 다양한 용접 전압 설정조건에서 이들의 표준편차의 분포를 구하였다. Mita<sup>4)</sup>는 숙련된 용접사의 경험지식과 용접전압 및 전류파형에서 얻어지는 여러 인자를 고려하여 다중회귀분석에 의한 아크시간, 단락시간, 평균단락전류의 표준편차, 평균아크 전류의 표준편차로 구성되는 아크 안정성 지수를 제시하였다. Liu<sup>5)</sup>는 이행시간과 아크 안정성과의 관계를 밝혔고 또한 용접전압에 따른 이행시간의 분포를 구하였다. 그런데 이들 연구들에 있어서, 제안된 아크 안정성 예측 모델들은 사용된 인자들의 신뢰범위와 이들 모델들에 대한 실제 스파터 발생량과의 적합성을 검증하지는 못하였다. 강 등<sup>6)</sup>은 용접 전류와 전압파형을 구성하는 인자들의 값과 스파터 발생량과의 상관관계를 분석하여 아크 안정성 판단 인덱스를 제안하였다. 그러나 인덱스를 구성하는 인자들을 선정하는 과정에 있어서 각 인자들에 대한 선형상관계수의 높고 낮음에 따라 인자들이 결정되었다. 선형상관계수는 단지 이들 인자와 스파터 발생량의 선형적인 관계의 정도를 나타내는 수치일 뿐이고, 이 값이 낮다는 것은 이 인자들이 스파터 발생량과 관계가 전혀 없다는 것이 아니라 선형적이지 않지만 다른 함수적인

관계를 가질 수도 있다. 따라서 선형상관계수에 의한 인자의 추출은 개발된 인덱스가 스파터 발생량의 예측정밀도를 낮추는 결과를 초래할 수 있다.

본 연구에서는 4개의 용접전류 조건하에서 용접전압의 변화에 따라 CO<sub>2</sub> 아크 용접을 실시하였을 때, 발생된 스파터를 포집하고 또한 용접전류와 아크전압 파형을 계측하였다. 다만 제한된 용접조건하에서 측정된 스파터 양과 용접전류, 전압 파형을 형성하는 인자들의 상관관계를 분석하였고, 이들 파형인자들 중 스파터 발생에 상당한 영향을 미치는 인자들을 선정하였다. 이들 인자들로 구성된 여러 경우의 모델을 수립, 다중회귀분석을 실시하였고 이들 모델들로 부터 스파터 양을 예측할 수 있는 수학적 모델을 제안하였다. 이들 모델이 발생된 스파터 양을 얼마나 예측하는가를 비교하여 검토된 여러 인덱스 중 스파터의 발생을 가장 적합하게 묘사하는 예측 모델을 개발하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치의 구성도를 Fig. 1에 나타내었는데, 용접용 robot와 용접기, 스파터 포집장치 및 용접공정 변수 계측센서, A/D 변환장치 그리고 용접공정변수 해석을 위한 컴퓨터로 구성하였다.

용접변수로는 용접전류와 아크 전압을 이용하였으며, 용접전류의 계측은 용접기에서 용접모재를 연결하는 접지선에 설치한 홀 센서를 이용하였고, 아크 전압은 용접전원 출력 단자사이의 전압이 계측되었다. 이렇게 얻은 용접변수 신호들은 200 kHz급 A/D 변환장치를 거쳐 컴퓨터에 입력하였고, 메모리에 저장하였다. 이때 신호에 함께 실린 잡음(noise)은 200Hz의 잡음 제거 주파수(cut-off frequency)를 갖는 디지털 저주파 통과 필터(digital low pass filter)를 사용하여 제거하였다. 필터링된 데이터들은 컴퓨터 상에서 용접파형 해석을 위한 각 파형인자의 해석처리가 수행되었다. 한편 용접 공정은 용접전용 로봇과 350A급 인버터 제어형 정전압 용접기를 사용하여 수행하였고 스파터 포집장치는 황동을 사용하여 제작하였다.

### 2.2 실험방법

스파터 발생량 측정을 위한 용접실험에 있어서, 보호 가스는 100% CO<sub>2</sub> 가스를 사용하여 20 l/min의 유량을 용접부에 공급하였다. 용접와이어는 지름 1.2 mm의 AWS ER70S-6을 사용하였으며, 시험소재

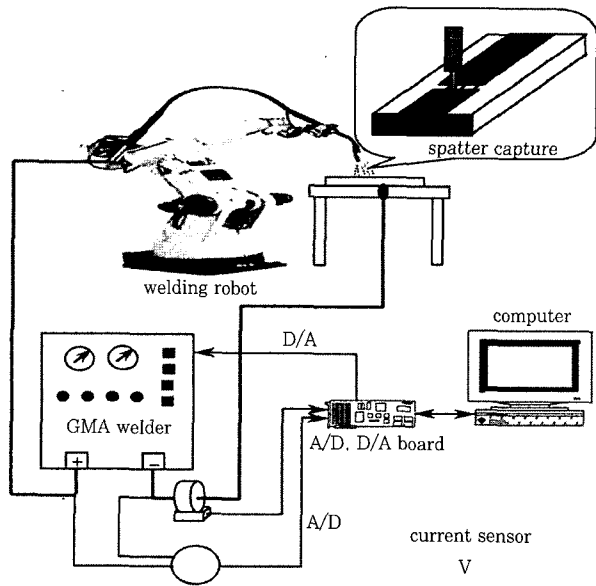


Fig. 1 Configuration of experimental set up

는 두께 6mm의 SS400이었다. 용접속도는 5mm/sec의 고정된 조건으로 하였다. 전극 팁-모재간 거리 (contact tip-to-work distance, 이하 CTWD)는 용접전류 조건 150 A와 200 A 에서는 15 mm로, 용접전류 225 A와 250 A 에서는 20mm로 설정하였다. 용접전압은 용접전류에 따라 19V~28V내에서 약 7V 범위에 걸쳐 적절하게 변화시켰다. 또한 동일 용접 조건에서 6회의 반복실험이 수행되었다. 용접방법은 비드 온 플레이트 용접이 실시되었고, 용접중 데이터 샘플링 속도는 초당 5000개로 하였다. 총 데이터 샘플링 량은 용접 시작 후 10초가 경과한 시점에서 20초 동안 수집하였다. 용접중 발생하는 스파터는 Fig. 1 에서 보여지는 스파터 포집장치를 이용하였고, 용접 후 발생한 스파터를 모두 모아서 300 μm의 눈금을 가진 체로 미세한 가루들을 털어내고 남은 크기의 스파터를 전자저울을 이용하여 그 중량을 측정하였다.

### 2.3 신호 처리

20초동안 수집된 용접전류 및 전압 파형의 데이터는 1초 간격, 즉 5000개 데이터 단위로 처리 하였다. 또한 전술한 바와 같이, 용접전류 및 전압 데이터는 디지털 저주파 통과 필터를 이용하여 필터링하였다. 이렇게 하여 아크기와 단락기를 구별하기 위한 소정의 임계치(threshold voltage) 이상이 되는 값은 1로, 그렇지 않은 데이터는 전부 0의 값으로 만드는 일종의 영역분할을 실시하였고, 그 다음 최고치를 뽑아내는

최고치 식별 함수를 이용하여 아크기와 단락기를 판별하게 하였다. 이에 의거해 단락의 현상을 묘사하는 1초동안의 용접 전압과 전류파형의 여러 특성치들의 값과 그들의 표준편차량을 추출하고, 이렇게 추출된 20개의 값들(20초동안 수집)의 평균치를 도출하였다.

## 3 스파터 발생특성과 아크 안정성

### 3.1 용접조건에 따른 스파터 발생 특성

Fig. 2는 용접전류를 각각150, 200, 225, 250A로 설정하였을 때 용접전압 변화에 따른 스파터 발생량의 거동을 나타낸 것이다. 그림에 의하면 각각의 전류에 있어서 스파터 발생이 상대적으로 적게 발생하는 어떤 적정전압이 존재함을 알 수 있는데, 이 전압을 중심으로 하여 전압이 증가하거나 감소할수록 스파터의 발생량이 증가함을 알 수 있다.

### 3.2 스파터와 아크 상태와의 관계

단락이행 영역에 있어서 스파터가 발생하는 기구는, 잘 알려져 있듯이, 주로 단락의 순간이나 다시 아크가 발생하는 순간 또는 순간 단락이 일어나는 경우에 주로 발생한다. 이 때 단락 기간 또는 아크 기간이 일정하지 않고 불규칙한 경우 규칙적으로 단락이 이루어지는 경우보다 스파터가 많이 발생하게 된다. 이것은 아크 기간이 길어지거나 짧아지면서 용적의 크기가 달라지고 이때의 용적이 용융지와 접촉하는 순간 혹은 용융지 속으로 완전히 이행하여 아크 상태로 되는 순간의 전류 크기로 인한 전자기력의 작용과 아크력의 작용으로 인하여 많은 스파터를 발생시키기 때문이다. 따라서 스파터의 발생량과 아크의 안정성은 밀접한 관계가 있고 아크가 안정하면 스파터 발생량이 적으며, 아크가 불안정(불규칙)한 경우라면 발생량이 많게 된다. 이 때 스파터 양에 가장 큰 영향을 미치는 것은 용적의 크기와 작용력의 크기를 결정하는 용접전류 및 전압파형의 구성인자들이다. 따라서 스파터 발생량에 영향을 주는 전류, 전압의 파형의 인자들을 통계적으로 분석하고, 이들 인자들의 조합과 스파터 발생량의 상관성을 검토하면 아크 상태를 정량적으로 평가할 수 있는 모델을 제시할 수 있다.

### 3.3 아크 안정성 평가 인덱스의 구성인자 결정

단락이행 영역에 있어서 전형적으로 나타나는 용접

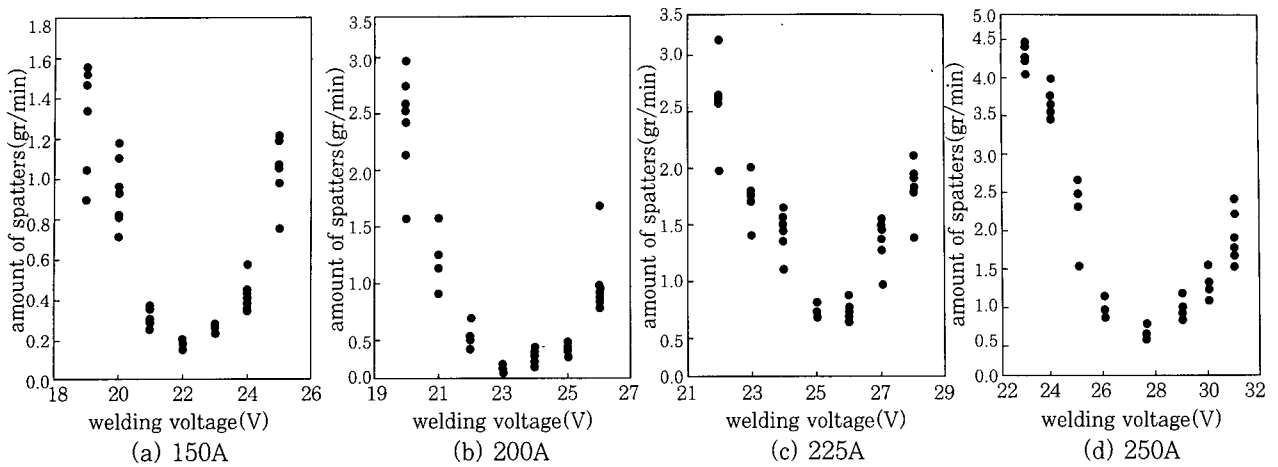


Fig. 2 The characteristics of spatter generation in terms of the arc voltage at different welding current

전류 및 아크전압 파형을 Fig 3에 나타내었다. 아크 상태와 스패터 발생량에 영향을 미칠 것으로 일반적으로 알려진 파형인자들 및 그들의 표준편차들 13개를 정하였고, 용접조건에 따라 용접이 실시되었을 때, 측정된 아크 전압과 용접전류 파형으로부터 이들의 값을 추출하였다.

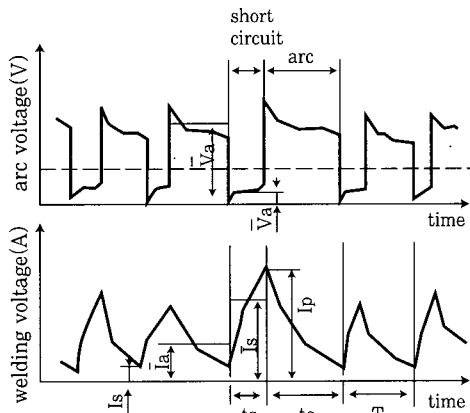


Fig. 3 Waveforms of welding voltage and current in short circuit transfer mode

값이 추출된 인자들(factors)은 단락이행 주기( $T$ ), 아크 시간( $T_a$ ), 단락 시간( $T_s$ ), 단락 최고전류( $I_p$ ), 단락순간 전류( $I_s$ ), 단락이행 평균전류( $\bar{I}$ ), 단락 이행주기의 표준편차( $s(T)$ ), 아크 시간의 표준편차( $s(T_a)$ ), 단락시간의 표준편차( $s(T_s)$ ), 평균 아크전류의 표준편차( $s(\bar{I}_a)$ ), 단락 최고전류의 표준편차( $s(I_p)$ ), 단락순간 전류의 표준편차( $s(I_s)$ ), 단락이행 평균 전류의 표준편차( $s(\bar{I})$ )이었다.

이들 인자들이 아크 상태에 어느 정도 영향을 미치는가를 평가하기 위해서 이들 인자들과 스패터 발생량사

이의 공상관분석(correlation analysis)을 실시하다. Table 1은 공상관분석을 실시한 결과, 각 인자들과 스패터 발생량 그리고 인자끼리의 선형상관계수를 정리하여 나타낸 것이다.

Table 1에 따르면 스패터 발생량과 상관성이 높은 인자들은  $s(\bar{I}_a)$ ,  $s(\bar{I})$ ,  $s(T)$ ,  $s(T_a)$ , 등과 같이 파형 인자들의 표준편차들로 나타났고,  $T$ ,  $T_a$ ,  $T_s$ ,  $I_p$ ,  $I_s$ ,  $\bar{I}$  와 같은 파형인자들 자체는 스패터 발생량에 대한 상관계수가 다소 낮은 것으로 나타났다. 스패터에 대한 인자의 상관계수가 높게 나타난다는 것은 그 인자가 스패터 발생량에 크게 영향을 미칠 수 있음을 의미한다. 그러나 상관계수가 낮다는 것이 스패터와 관계가 없다는 것을 의미하는 것이 아니라, 단지 선형적 상관성(본 논문에서 사용된 상관계수는 파형인자 또는 파형인자의 표준편차와 스패터 발생량의 1:1 상관관계를 나타냄)이 부족하다는 것을 뜻한다. 비록 상관계수가 낮은 인자라고 할지라도 그 인자로 구성된 회귀모델이 스패터 발생량을 보다 정확하게 예측하는데 기여할 수도 있고, 반대로 상관계수가 높은 인자라고 할지라도 회귀모델의 예측성능을 저하하는 결과를 초래할 수도 있다. 따라서 상관계수의 크기에 의한 아크 상태 예측 모델의 인자결정은 바람직 하지 않다. 그러나 Table 1에서 반드시 검증되어야 하는 것은 파형인자 상호간의 상관관계의 검증이다. 즉  $T$ 와  $T_a$  그리고  $s(T)$ 와  $s(T_a)$ 의 상관계수는 거의 1에 가깝다. 따라서 이들 인자들은 스패터 발생량에 같은 효과를 나타내는 것으로 생각될 수 있다. 즉 이들 인자들은 서로 다중공선성(multicollinearity)을 일으켜 회귀 모델의 오차를 일으키는 원인을 제공한다. 그러므로 이들 13개의 인자들 중에서  $T_a$ 와  $s(T_a)$ (또는  $T$ 와  $s(T)$ )를 제거하는 것이 필요하다.

**Table 1** Correlation coefficients between the components of welding current and arc voltage waveforms

	s(T)	s(T <sub>a</sub> )	s(T <sub>s</sub> )	s(I <sub>a</sub> )	s(I <sub>s</sub> )	s(I <sub>p</sub> )	s(İ)	T	T <sub>a</sub>	T <sub>s</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>s</sub>	İ	Spatter
s(T)	1													
s(T <sub>a</sub> )	0.9987	1												
s(T <sub>s</sub> )	0.6839	0.6522	1											
s(I <sub>a</sub> )	0.7168	0.7031	0.7990	1										
s(I <sub>s</sub> )	0.6165	0.6094	0.6799	0.9174	1									
s(I <sub>p</sub> )	0.7288	0.7090	0.8267	0.6467	0.6093	1								
s(İ)	0.7327	0.7196	0.8296	0.9564	0.8426	0.6362	1							
T	0.8583	0.8760	0.3536	0.4254	0.4279	0.5417	0.4733	1						
T <sub>a</sub>	0.8260	0.8464	0.2655	0.3481	0.3607	0.4983	0.3791	0.9920	1					
T <sub>s</sub>	0.5665	0.5548	0.7609	0.7131	0.6428	0.5205	0.8516	0.4514	0.3349	1				
I <sub>p</sub>	0.5790	0.5963	0.3306	0.6289	0.6305	0.3295	0.6983	0.6971	0.6395	0.6813	1			
I <sub>s</sub>	-0.504	-0.475	-0.791	-0.785	-0.615	-0.468	-0.798	-0.052	0.0320	-0.612	-0.157	1		
İ	-0.158	-0.133	-0.248	-0.068	0.0486	-0.021	-1E-04	0.2023	0.1920	0.1525	0.5780	0.5256	1	
Spatter	0.7861	0.7878	0.5594	0.8059	0.6945	0.5089	0.799	0.5859	0.5491	0.4910	0.5812	-0.63	-0.058	1

#### 4. 아크 안정성 평가 인덱스의 개발

##### 4.1 선형 회귀 모델에 의한 아크 안정성 평가 인덱스의 개발

용접전류 및 아크 전압의 파형을 구성하는 인자들과 인자들의 표준편차들 중 T<sub>a</sub>와 s(T<sub>a</sub>)를 제외한 11개의 인자들을 이용하여 식(1)과 같이 아크 상태 예측을 위한 선형 모델을 구성하였다.

$$Y = a + bT + cT_s + dI_p + eI_s + fİ + gs[T] + hs[T_s] + is[I_a] + js[I_s] + ks[I_p] + l[İ] \quad (1)$$

상용 통계분석 프로그램인 SAS(Statistical Analysis System)를 이용하여 식(1)에 대한 다중회귀분석(multiple regression analysis)을 실시하였고, 스패터 발생량에 대한 이 모델의 적합성과 구성 인자들의 신뢰범위를 조사하였다. 식(1)의 인자들을 모두 사용한 경우의 아크 상태 예측 모델의 다중상관계수는 0.9684이었다. 그러나 식(1)의 구성인자 중에서 일부의 인자들이 회귀 모델의 상관성에 오차를 일으키는 원인을 제공한다면 이러한 인자들은 제거되어야 한다. 따라서 식(1)의 구성인자들의 가설검정(hypothesis test)을 실시하였다. 여기에서는 식(1)의 각 구성인자에 대해서 귀무가설(null hypothesis)에 대한 채택 및 기각 여부를 결정하기 위해, Table 2와 같이 각 인자들의 t-분포에 대한 유의확률(significance probability)을 조사하였다. 여기에서

유의수준(significance level)은 5 %로 설정하였다. Table 2를 살펴보면, s(T)와 s(I<sub>a</sub>), s(I<sub>s</sub>), s(I<sub>p</sub>), s(İ)의 유의확률이 각각 75.29 %, 88.44 %, 79.62 %, 97.35 % 및 46.41 %이었다. 이들 인자들의 유의확률이 유의수준 5 %에 비해서 높기 때문에 귀무가설을 채택하였다. 따라서 이들인자들이 식(1)의 회귀모델을 구성할 경우 오히려 모델의 예측 오차를 증가시키는 결과를 초래할 수 있다

따라서 s(T)와 s(I<sub>a</sub>), s(I<sub>s</sub>), s(I<sub>p</sub>), s(İ)를 제거한 수정된 선형회귀모델을 식(2)와 같이 구성하였다.

$$Y = a + bT + cT_s + dI_p + eI_s + fİ + gs[T] \quad (2)$$

식(2)의 선형회귀모델과 스패터 발생량의 다중상관관계를 다시 분석하였다. 수정 선형회귀모델, 식(2)의 다중상관계수는 0.9682이었고, 식(1)의 다중상관계수 0.9684에 비해서 다중상관계수가 0.0002 저하되었을 뿐, 스패터 발생량의 예측에는 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 식(2)의 구성인자들에 대한 유의확률을 다시 평가하여, 수정된 선형회귀모델 식(2)의 정확성을 검증하였다. Table 3은 식(2)의 구성인자들의 유의확률을 나타낸 것이다.

Table 3에 의하면, 식(2)를 구성하는 대부분 인자들의 유의확률이 1 % 미만이거나 또는 거의 0에 가까운 값으로 나타났으나, Y 절편의 유의확률이 13.66 %로 나타났다. 이 값은 수정선형회귀모델 식(2)의 예측 오차에 영향을 줄 가능성이 있다. 그러나 이 값은 상수이기 때문에 일정한 값이고, 다른 인자들의 유의 확률

이 매우 낮기 때문에 식(2)는 아크 상태 예측 모델로 사용할 수 있는 충분한 모델이 될 수도 있다. 따라서 식(2)에 대해서 구성 인자들의 회귀 계수들을 적용하면, 식(3)이 얻어진다.

$$Y = -0.45091 + 0.17055T - 1.053853T_s - 0.003596I_p - 0.049I_s + 0.046913\bar{I} - 0.691385s[T_s] \quad (3)$$

한편 식(2)의 Y절편의 유의확률을 개선하기 위한 수정 회귀모델을 제안할 수 있다. 이를 위하여는 식(2)의 회귀모델을 표준화하는 방법이 주로 이용되는데 본 연구에서는 여러가지 표준화 방법 중에서 식(4)와 같은 방법을 이용하였다.

$$Y = a + b \left( \frac{T - T_{mean}}{T_{max} - T_{min}} \right) + c \left( \frac{T_s - T_{s,mean}}{T_{s,max} - T_{s,min}} \right) + d \left( \frac{I_p - I_{p,mean}}{I_{p,max} - I_{p,min}} \right) + e \left( \frac{I_s - I_{s,mean}}{I_{s,max} - I_{s,min}} \right) + f \left( \frac{\bar{I} - \bar{I}_{mean}}{\bar{I}_{max} - \bar{I}_{min}} \right) + g \left( \frac{s[T_s] - s[T_s]_{mean}}{s[T_s]_{max} - s[T_s]_{min}} \right) \quad (4)$$

표준화된 선형회귀모델 식(4)의 구성인자들의 유의확률은 Table 4와 같다. Table 4를 Table 3과 비교해 보면, 식(4)의 구성 인자들의 유의확률은 Table 3과 같으나 Y절편의 유의확률이 거의 0에 가까운 값으로 되었음을 알 수 있다. 식(4)의 구성인자들의 회귀 계수를 적용하면 식(5)와 같다. 식(5)는 표준화된 선형 아크 상태 예측 모델이다.

$$Y = 1.215841 + 5.0417989 \left( \frac{T - 20.86}{40.196 - 10.607} \right) - 3.45137 \left( \frac{T_s - 3.9745}{5.652 - 2.377} \right) - 0.758225 \left( \frac{I_p - 393.55}{493.19 - 282.33} \right) - 8.165784 \left( \frac{I_s - 95.085}{178.9 - 13.596} \right) + 3.7617046 \left( \frac{\bar{I} - 201.94}{237.09 - 156.9} \right) - 1.563912 \left( \frac{s[T_s] - 1.5385}{3.032 - 0.77} \right) \quad (5)$$

### 4.2 비선형 아크 상태 예측 모델의 개발

Table 1의 공상관분석의 스팩터 발생량과 파형인자들사이의 상관계수는 일반적으로 흔히 사용되는 선형 상관계수이다. 이들 파형인자들은 전술한 바와 같이 상관계수가 낮을지라도 이는 선형적 관계가 낮은 것일 뿐이다. 오히려 어떤 경우에는 비선형적인 관계가 매우 높을 수도 있다. 즉, 스팩터나 아크 안정성에 대한 예측에 있어서 비선형회귀모델에 의한 결과가 더욱 정확할 수도 있다는 뜻이다. 따라서 본 연구에 있어서 비선형 회귀모델에 의한 예측성능을 평가하기 위해서 식(6)와 같이 구성되었다.

$$Y = a \cdot T^b \cdot T_s^c \cdot I_p^d \cdot I_s^e \cdot \bar{I}^f \cdot s[T]^g \cdot s[T_s]^h \cdot s[I_a]^i \cdot s[I_s]^j \cdot s[I_p]^k \cdot s[\bar{I}]^l \quad (6)$$

식(6)의 양변에 로그를 취하면 식(6)은 식(7)과 같이 된다.

$$\ln Y = a^* + b \ln T + c \ln T_s + d \ln I_p + e \ln I_s + f \ln \bar{I} + g \ln s[T] + h \ln s[T_s] + i \ln s[I_a] + j \ln s[I_s] + k \ln s[I_p] + l \ln s[\bar{I}] \quad (7)$$

식(7)은 결국 식(1)과 유사한 선형관계가 됨을 알 수 있다. 식(7)에 대한 다중회귀분석을 실시하였다. 그 결과, 식(7)의 다중상관계수는 0.9551로써 식(1)의 선형상관계수 0.9684보다 다소 낮은 값을 나타내었다. 그러나 이 값의 차는 스팩터 발생량의 예측에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 또한 식(7)을 구성하는 인자들의 유의확률을 검증한 결과를 Table 5에 정리하였다.

Table 5에 의하면,  $\ln I_s$ ,  $\ln s[\bar{I}_a]$ ,  $\ln s[I_s]$  및  $\ln s[I_p]$ 의 유의확률이 20.88%, 35.55%, 65.94% 및 47.94%로 다소 높게 나타났다. 따라서 이들 인자들에 대해서 귀무가설을 채택하였고, 이들 인자들이 제외된 수정 비선형 회귀 모델을 식(8)과 같이 구성하였다.

Table 2 Significant probability of constitution factors in linear regression model (1)

	Intercept	T	T <sub>s</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>s</sub>	$\bar{I}$	s(T)	s(T <sub>s</sub> )	s(I <sub>a</sub> )	s(I <sub>s</sub> )	s(I <sub>p</sub> )	s(I <sub>l</sub> )
Probability Value	0.2256	1.97E-08	4.17E-12	0.0904	9.15E-07	1.54E-12	0.7529	0.0018	0.8844	0.7962	0.9735	0.4641

Table 3 Significant probability of constitution factors in linear regression model (2)

	Intercept	T	T <sub>s</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>s</sub>	$\bar{I}$	s(T <sub>s</sub> )
Probability Value	0.1366	1.27E-38	1.4E-30	0.0064	6.25E-51	1.28E-26	5.27E-08

$$\ln Y = a^* + b \ln T + c \ln T_s + d \ln I_p + f \ln \bar{I} + g \ln s[T] + h \ln s[T_s] + l \ln s[\bar{I}] \quad (8)$$

식(8)의 수정된 비선형 회귀모델과 스파터 발생량의 다중회귀분석을 실시하였다. 수정 회귀모델의 다중상관계수는 0.9441이었고, 식(7)의 다중상관계수 0.9551에 비해서 다중상관계수가 0.011 낮아졌다. 이 정도의 값 차이는 스파터 발생량을 예측하는데 거의 성능의 차이가 나타나지 않는 정도이다. 식(8)의 구성인자들에 대한 유의확률을 다시 평가하여 수정 비선형 회귀모델 식(8)의 정확성이 검증되었다. Table 6은 식(8)의 수정 비선형 회귀 모델에 대한 유의확률을 검증한 결과이다.

Table 6에 의하면 Y의 절편을 포함한 모든 인자들이 스파터 발생량을 예측하는데 3% 이하의 유의확률을 나타냄을 알 수 있다. 따라서 식(8)을 비선형 아크 안정성을 평가 하는 회귀모델로 정하였다. 다중회귀분석의 결과로 얻어진 회귀계수를 식(8)에 대입하면 식(9)와 같은 비선형 아크 상태 예측 모델이 얻어진다.

$$Y = 4.379 \times 10^{-6} \cdot T^{1.076} \cdot T_s^{-2.074} \cdot I_p^{-5.38} \cdot \bar{I}^{3.4622} \cdot s[T]^{1.3084} \cdot s[T_s]^{-1.4628} \cdot s[\bar{I}]^{4.8505} \quad (9)$$

### 4.3 스파터 발생량에 대한 아크 상태 예측 모델의 성능

Fig. 4는 앞서 서술한 두개의 선형 아크 상태 예측

모델과 한 개의 비선형 아크 상태 예측 모델 각각에 대한 스파터 발생량 예측성능을 평가한 것이다.

그림에서 보면 이들 모델들은 스파터 발생량과 대체로 선형적 관계를 나타내고 있는데, 2개의 선형모델은 스파터 발생량을 예측하는데 거의 차이를 발견할 수 없음을 알 수 있다. 한편 선형 모델들은 비선형 모델에 비해 잔차도가 비교적 좁게 분포하는 특성을 나타냄으로써 전체적으로 스파터 발생량을 예측하는 데에는 보다 좋은 성능을 보이고 있으나 예측값이 1이하의 낮은 값에서는 비선형 모델의 경우가 실제 스파터 발생량을 선형모델들 보다 정확하게 묘사할 수 있음을 알 수 있다. 특히 비선형 모델의 경우에서 예측값의 증가와 더불어 실제 스파터 발생량과의 잔차도가 더욱 커지게 되는 특징을 나타내고 있고 따라서 아크의 상태를 잘못 예측할 수 있음을 알 수 있다.

이상과 같이 CO<sub>2</sub> 용접의 단락이행영역에서 제안된 3개의 선형 또는 비선형 아크 상태 예측 모델과 스파터 발생량의 다중상관계수는 표준화되지 않은 인덱스 모델이 0.9684로 가장우수하였으며 또한 이들 모델의 성능평가 결과, 실제 스파터 발생량을 예측함에 있어서도 선형 모델의 예측성능이 비선형 모델의 예측성능보다 전반적으로 우수함을 확인할 수 있었다. 특히 선형 인덱스 모델에 있어서 표준화 되지 않은 인덱스 모델과 표준화된 인덱스 모델의 예측성능은 거의 비슷하였다. 한편, 스파터 발생량이 적은 용접조건에 있어서는 비선형 회귀모델의 예측성능이 선형 모델 보다 매우 우수하였다.

Table 4 Significant probability of constitution factors in normalized linear regression model(4)

	Intercept	T	T <sub>s</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>s</sub>	$\bar{I}$	s(T <sub>s</sub> )
Probability Value	1.06E-85	1.27E-38	1.4E-30	0.0064	6.25E-51	1.28E-26	5.27E-08

Table 5 Significant probability of constitution factors in non-linear regression model(7)

	Intercept	ln T	ln T <sub>s</sub>	ln I <sub>p</sub>	ln I <sub>s</sub>	ln $\bar{I}$	ln s(T)	ln s(T <sub>s</sub> )	ln s( $\bar{I}$ )	ln s(I <sub>s</sub> )	ln s(I <sub>p</sub> )	ln s( $\bar{I}$ )
Probability Value	2.57E-06	0.0365	0.001	0.0002	0.2088	7.85E-06	0.0003	3.64E-05	0.3555	0.6594	0.4794	0.0019

Table 6 Significant probability of constitution factors in non-linear regression model (8)

	Intercept	ln T	ln T <sub>s</sub>	ln I <sub>p</sub>	ln $\bar{I}$	ln s(T)	ln s(T <sub>s</sub> )	ln s( $\bar{I}$ )
Probability Value	1.77E-10	0.0307	6.4E-07	4.86E-07	2.5E-06	8.5E-07	1.59E-06	3.67E-14

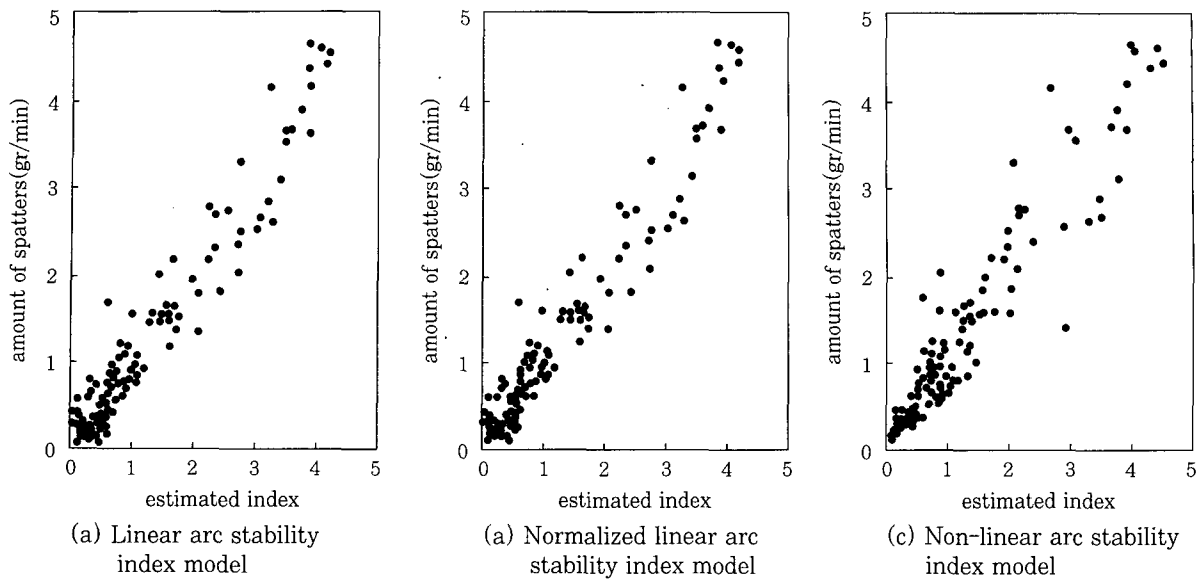


Fig. 4 Relationship between the estimated arc stability index and the weight of spatters for various regression models

5. 결 론

참 고 문 헌

CO<sub>2</sub> 아크 용접의 단락이행영역에 있어서, 용접전류, 아크전압 파형과 스파터 발생량에 입각하여 아크 상태를 예측하고자 시도하였다. 이를 위하여 이들 파형을 구성하는 인자들과 스파터 발생량사이의 상관성을 다중회귀분석에 의해서 선형 회귀 모델과 비선형 회귀 모델을 제안하였고, 이들의 성능평가를 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 파형인자와 그들의 표준편차를 이용하여 스파터 발생량과 공상관분석을 실시한 결과, 파형인자의 표준편차가 선형상관계수가 더욱 높게 나타났다. 또한 파형인자들 중에서  $T$ 와  $T_s$  그리고  $s(T)$ 와  $s(T_s)$ 는 공상관계수가 거의 1에 가까워 스파터 발생량에 같은 영향을 나타냄을 확인하였다.
2. 아크 상태를 예측하는 회귀모델에 있어서는 선형 모델과 비선형 모델이 비슷한 인자들로 구성됨을 알 수 있고, 다중상관계수 조사결과 선형회귀모델의 경우가 0.9684로 가장 우수하게 나타났다.
3. 제안된 모델들의 성능평가 결과, 선형 모델의 경우가 분산의 폭이 적게 나타나고 다중상관계수가 높게 나타나서 최적 아크 상태 예측 모델로 평가되었으나 스파터 발생량이 적은 용접조건에 있어서는 비선형 회귀모델이 매우 우수한 예측성능을 나타냄을 확인하였다.

1. G. Adam and T. Siewert : Sensing of GMAW droplet transfer modes using ER100S-1 electrode, *Welding Journal*, Vol.69, No.3, (1990), pp.103s-108s.
2. T. Arai, M. Kobayashi, T. Yamada, M. Rokujo, K. Hirakoso and T. Kaneko : The investigation of arc phenomena by means of a computer, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, Vol. 1, No. 3, (1983), pp. 15-20.
3. W. Lucas : Microcomputer system, Software and Expert system for Welding Engineering, *Welding Journal*, Vol. 66, No. 4, (1987), pp. 19-30.
4. T. Mita, A. Sakabe and T. Yokoo : Quantitative estimates of Arc stability for CO<sub>2</sub> gas shielded arc welding, *Welding International*, No. 2, (1988), pp.152-159.
5. S. Liu and T. A. Siewert : Metal transfer in gas metal arc welding, *Welding Journal*, Vol.68, No.2, (1989), pp.52s-58s.
6. 강성구, 문형순, 나석주 : 스파터 양을 이용한 아크 안정성 판별에 관한 연구, *대한용접학회지*, 제15권, 제6호, (1997), pp. 527-534.