

# CO<sub>2</sub> 아크 용접에 있어서 다중회귀분석에 의한 아크 끊어짐을 고려한 아크 안정성 예측 모델 개발

강문진 \* · 이세현 \*\* · 우재진 \*\*\*

(1999년 7월 2일 접수)

## Development of Estimation Model for Arc Stability Considering Arc Extinction with Multiple Regression Analysis in CO<sub>2</sub> Arc Welding

Moonjin Kang, Sehun Rhee and Jaejin Woo

**Key Words :** CO<sub>2</sub> Arc Welding (CO<sub>2</sub> 아크 용접), Arc Stability (아크 안정성), Amount of Generated Spatter (스패터 발생량), Standard Deviation (표준편차), Multiple Regression Analysis (다중회귀분석), Arc Extinction (아크 끊어짐)

### Abstract

Welding quality is closely related to the arc state. So, it is very important to estimate the arc state in real time. In the short circuit transfer region of CO<sub>2</sub> arc welding, the spatter, as it is well known, is mainly generated on an instance of short circuit or on an instance that the arc is ignited after short circuit, or on the cases of an instantaneous short circuit. If the short circuit period or the arc time is irregular, the spatter is generated more than it is regular. Thus there is a close relationship of the amount of the spatter generation with the arc stability. In this paper, to develop the index for estimating the arc stability in short circuit transfer range of CO<sub>2</sub> arc welding, the welding current and arc voltage waveforms were measured and the spatter generated was captured and measured. The correlation analysis of the measured amount of the spatter with the factors (the components and the standard deviations of the components) was performed, and the factors that have a considerable influence on the spatter generation among all factors were selected. And some cases of models consisted of the factors were presented, and a mathematical index model which can make an estimation the amount of the spatter from these models with multiple regression analysis. Also, it was compared how much the amount of the spatter generated under the selected welding conditions do these index models fit, and the index model to estimate the arc stability which represent the spatter generation most appropriately was developed

### 기호설명

$T$  : 단락이행 주기 (msec)

$T_a$  : 아크 시간 (msec)

$T_s$  : 단락 시간 (msec)

$I_p$  : 단락 최고전류 (A)

$I_s$  : 단락순간 전류 (A)

$\bar{I}$  : 단락이행 평균전류 (A)

$s[T]$  : 단락 이행주기의 표준편차 (msec)

$s[T_a]$  : 아크 시간의 표준편차 (msec)

$s[T_s]$  : 단락시간의 표준편차 (msec)

\* 회원, 포항산업과학연구원 설비용접연구팀  
E-mail : moonjin@rist.re.kr  
TEL : (054)279-5454 FAX : (054)279-6879

\*\* 회원, 한양대학교 기계공학부

\*\*\* 대우기전 전자연구소

$s[I_p]$	: 단락 최고전류의 표준편차 (A)
$s[I_s]$	: 단락순간 전류의 표준편차 (A)
$s[\bar{I}]$	: 단락이행 평균전류의 표준편차 (A)
$N(V_{oc})$	: 아크 끊어짐 발생횟수 (counts)
$T(V_{oc})_{avg}$	: 평균 아크 끊어짐 시간 (msec)
$s[T(V_{oc})_{avg}]$	: 아크 끊어짐 평균시간의 표준편차 (msec)
$T(V_{oc})_{sum}$	: 총 아크 끊어짐 시간 (msec)

## 1. 서론

CO<sub>2</sub> 아크 용접은 용적 직하에 아크가 존재하기 때문에 용적에 작용하는 힘들(중력, 표면장력, 전자기력, 양력 등)의 균형과 방향이 순간적으로 불규칙적으로 변화하고, 따라서 용적이 가지고 있는 유동성 때문에 용적이행이 불규칙해져 많은 양의 스파터가 발생되곤 한다. 따라서 스파터는 아크가 불안정하거나 불규칙하게 작용할 때 발생하는 것으로써, 이것과 아크의 안정성과는 매우 밀접한 관계가 있다고 알려져 있다.

최근, 용적이행현상을 분석하여 아크 안정성을 평가하려는 연구들이 활발하게 진행되어 왔다. Ogunbiyi 등<sup>(1)</sup>은 용접 전압, 전류 파형에서 특징이 될 만한 변수를 선정하여 인덱스를 개발하였고, 이 값을 용적이행 모드를 판별하는데 사용하였다. Arai<sup>(2)</sup>는 CO<sub>2</sub> 아크 용접에 있어서 저 전류(140~210A) 영역의 단락이행모드에 대해 아크시간의 표준편차와 아크 안정성이 밀접한 상관성이 있음을 보였다. Lucas<sup>(3)</sup>는 아크의 안정성과 단락 최고 전류와 단락주기의 균일성과의 관계를 연구하였는데 단락최고전류와 단락시간 각각의 표준편차와 안정성간에 관계가 있음을 보였다. Mita<sup>(4)</sup>는 숙련된 용접사의 경험지식과 용접전압 및 전류파형에서 얻어지는 여러 인자를 고려하여 다중회귀분석에 의한 아크시간의 표준편차( $s[T_a]$ ), 단락시간의 표준편차( $s[T_s]$ ), 평균 단락전류의 표준편차( $s[\bar{I}_s]$ ), 평균 아크전류의 표준편차( $s[\bar{I}_a]$ )로 구성되는 아크 안정성 인덱스를 제시하였다. 이것은 지금까지 연구되었던 아크의 안정성을 정량적인 수준으로 판단할 수 있는 최초의 모델이 되었다. 그러나 제안된 인덱스는 작업자의 평가점수와 아크 파형인자의 상관관계에 의존하여 아크상태의 미세한 분석은 불가능하였다. Shinoda<sup>(5)</sup>는 단락이행 모드에서 측정된 용접 전류, 전압을 이용하여 아크의 안정성을 판별할 수 있는 인덱스를 제안하

였다. Rehfeldt 등<sup>(6)</sup>은 아크 전압을 측정변수로 선정하여 단락이행모드에서의 아크 안정성을 판별하였다. 원윤재 등<sup>(7)</sup>은 GMA 공정에서 아크 안정성을 실시간적으로 평가하기 위해서 용접회로의 모델링을 통한 수정 인덱스를 제안하였다. 이 수정된 지수는 아크기간의 표준편차와 단락기간의 표준편차를 곱한 값에 대해서 자연로그를 취한 형태이었다. 그는 이 인덱스를 실시간적으로 측정할 수 있도록 형태를 변화시켜 가중평균의 형태로 아크의 상태를 평가하였다. 그의 연구는 Mita의 연구결과와 더불어 아크 안정성을 실시간적으로 정량평가할 수 있는 기초를 형성하였으나, 동일한 용접전류에 있어서도 용접전압이 적정전압이상으로 증가하면 단락기간의 표준편차가 거의 포화하므로 인덱스가 아크기간의 표준편차에 의존하는 경향을 보일 수 있으며 또한 아크는 적정 용접조건 하에서도 어느 정도 불규칙적으로 나타나므로 적정용접조건에서도 인덱스의 변화량이 크게 나타나는 결과를 보이고 있다. 강성구 등<sup>(8)</sup>은 용접전류와 전압파형을 구성하는 인자들의 값과 스파터 발생량과의 상관관계를 분석하여 아크 안정성 판단 인덱스를 제안하였는데, 인덱스를 구성하는 인자들을 선정하는 과정에 있어서 각 인자들에 대한 선형상관계수의 높고 낮음에 따라 인자들을 결정하였다.

그런데 이들 연구들은 제안된 아크 안정성 모델을 구성하는 인자들의 적절한 선정과 아크 안정성을 정량적으로 평가할 수 있는 모델을 구성하는 방법 및 결정된 모델의 신뢰성 검증에 있어서 주관적으로 판단하거나 정량적이지 못하였다.

본 연구에서는 CO<sub>2</sub> 아크 용접시 아크의 불안정성으로 인하여 발생하는 스파터 양과 용접전류, 전압 파형을 형성하는 인자들의 상관관계가 분석되었고, 이들 파형인자들 중 스파터 발생에 상당한 영향을 미치는 인자들이 선정되었다. 선정된 인자들에는 저전압 영역에서의 아크 끊어짐을 고려한 인자들이 포함되었다. 선정된 인자들로 구성된 선형 모델과, 아크 끊어짐이 발생한 영역과 발생하지 않은 영역을 분리하여 각각의 선형 회귀 모델을 구성하여 병합한 모델과, 비선형 회귀 모델에 대한 다중회귀분석을 실시하였고 이들 모델들로 부터 스파터 양을 예측할 수 있는 각각의 수학적 인덱스 모델이 개발되었다. 또한 이들 인덱스 모델이 발생한 스파터 양을 얼마나 추종하는가를 비교하였다. 검토된 여러 인덱스 중 스파터의 발생을 가장 적합하게 묘사하는 아크 안정성 인덱스 모델을 개발하였다.

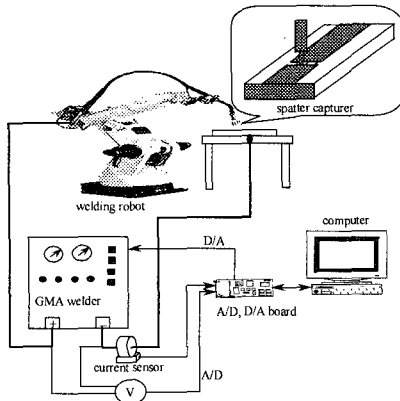


Fig. 1 Configuration of experimental set-up

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

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

용접변수로는 와이어 송급속도와 용접전압을 이용하였으며, 실제 용접전류의 계측은 용접기에서 용접소재를 연결하는 접지선에 설치한 홀 센서를 이용하였고, 용접 전압은 용접전원 출력 단자 사이의 전압이 계측되었다. 이렇게 얻은 용접변수 신호들은 200 kHz 급 A/D 변환장치를 거쳐 컴퓨터에 입력되고, 메모리에 저장된다. 이때 신호에 함께 실린 잡음신호는 200Hz 의 잡음 제거 주파수 (cut-off frequency)를 갖는 디지털 저주파 통과 필터(digital low pass filter)를 사용하여 제거하였다. 필터링된 데이터들은 컴퓨터 상에서 용접과형 해석을 위한 각 과형인자의 해석처리가 수행되었다. 한편 용접 공정은 용접전용 로봇과 350A 급 트랜지스터에 의한 인버터 제어형 정전압 용접기를 사용하여 수행하였고 스파터 포집장치는 황동을 사용하여 제작하였다.

### 2.2 실험방법

스파터 발생량 측정을 위한 용접실험에 있어서, 보호가스로서 유량 20 l/min 의 100% CO<sub>2</sub> 가스가 사용되었고, 용접재료로서 지름 1.2 mmØ 의 AWS ER70S-6 이 사용되었다. 사용된 소재는 두께 6mm 의 SS400 이었다. 용접속도로는 5mm/sec 가 설정되었다. 용접조건은 선정은 Table 1 과 같다. 용접방

Table 1 Welding conditions and number of experiments per setting condition

Wire feed rate (m/min)	CTWD (mm)	Welding voltage (V)	No. of welding experiment per setting condition
3.4	15	19V ~ 25V	6
	20	20V ~ 26V	6
6.0	20	21V ~ 27V	3
	25	21V ~ 27V	3
7.3	15	21V ~ 27V	3
	20	22V ~ 28V	4
	25	21V ~ 27V	3
8.6	20	23V ~ 27V	6

법은 비드 온 플레이트 용접이 실시되었다.

### 2.3 데이터의 처리

용접중 데이터 샘플링 속도는 초당 5000 개로 하였다. 총 데이터 샘플링 량은 용접 시작 후 10 초가 경과한 시점에서 20 초 동안 수집하였다. 수집된 신호는 디지털 저주파 통과 필터를 이용하여 필터링하였다. 다음, 아크기와 단락기를 구별하기 위한 영역분할을 실시하였고, 이에 의거해 단락의 현상을 묘사하는 용접 전압과 전류과형의 여러 특성치들의 값과 표준편차량을 추출하였고, 이렇게 추출된 값들의 평균치를 도출하였다.

## 3. 스파터 발생특성과 아크 안정성

### 평가 인덱스

#### 3.1 스파터 발생량의 거동

Fig. 2 는 와이어 송급속도를 3.4, 6.0, 7.3, 8.6 m/min 으로 각각 설정하였을 때 CTWD 와 용접전압의 변화에 대한 스파터 발생량의 거동을 나타낸 것이다. 와이어 송급속도 8.6m/min 의 경우 28V 이상의 용접전압조건에서 입상이행(globular transfer) 과 단락이행이 불규칙적으로 함께 나타났기 때문에 28V 이상의 전압조건에 결과는 과형인자들의 정보를 추출하는데에 오차가 있으므로 단락이행영역에서 이들 조건에 아크 안정성을 예측하는데에는 적용될 수 없었다. Fig. 2 에 따르면, 각각의 와이어 송급속도에 있어서 스파터 발생이 상대적으로 적게 발생하는 어떤 적정전압이 존재함을 알 수 있고, 이 전압을 중심으로 하여 전압이 증가하거나 감소됨에 따라 스파터 발생량이 증가됨을 알 수 있다.

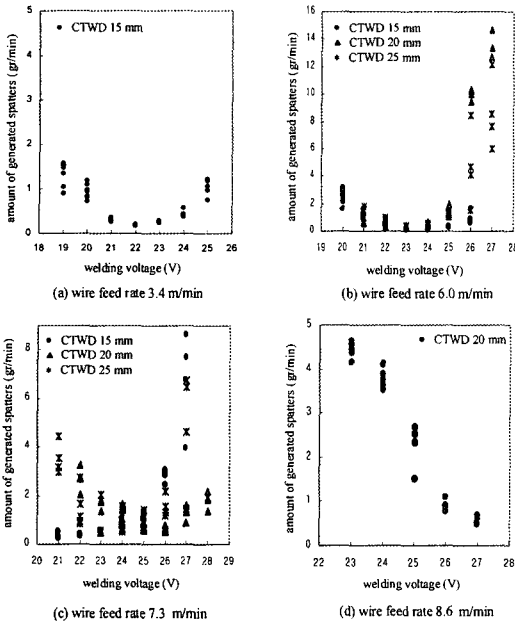


Fig. 2 The characteristics of spatter generation in terms of the arc voltage at various wire feed rate

3.2 스패터와 아크 상태와의 관계

단락이행 영역에 있어서 스패터가 발생하는 기구는, 잘 알려져 있듯이, 주로 단락의 순간이나 다시 아크가 발생하는 순간 또는 순간 단락이 일어나는 경우에 주로 발생한다. 이때 단락 기간 또는 아크 기간이 일정하지 않고 불규칙한 경우 규칙적으로 단락이 이루어지는 경우보다 스패터가 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 스패터를 발생시키기 때문이다. 따라서 스패터의 발생량과 아크의 안정성은 밀접한 관계가 있고 아크가 안정하면 스패터 발생량이 적으며, 아크가 불안정(불규칙)한 경우라면 발생량이 많게 된다. 이때 스패터 양에 가장 큰 영향을 미치는 것은 용적의 크기와 작용력의 크기를 결정하는 용접전류 및 전압파형의 구성인자들이다. 따라서 스패터 발생량에 영향을 주는 전류, 전압의 파형의 인자들을 통계적으로 분석하고, 이들 인자들의 조합과 스패터 발생량의 상관성을 검토하면 아크 상태를 정량적으로 평가할 수 있는 모델을 제시할 수 있다.

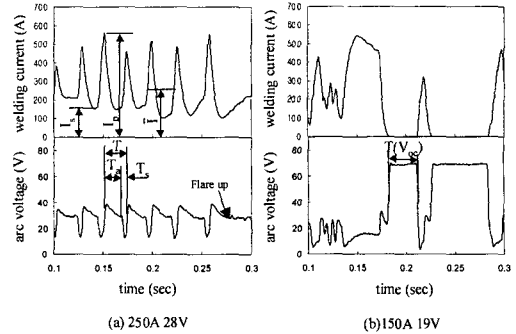


Fig. 3 Waveform of arc voltage and welding current at different welding condition

3.3 용접전압조건에 따른 용접전류와 아크전압 파형 특성

단락이행영역에 있어서 용접전압이 지나치게 낮으면 아크 끊어짐이 발생된다. 반면 지나치게 용접전압이 높으면 용적이 밀려 올라가는 현상이 발생된다. Fig. 3(a)와 같이 용접전압이 높은 경우의 아크 전압 및 용접전류의 파형은 연속적이고, 이때의 스패터 발생은 대체로 용적이 아크 중에서 날리는 형태로 발생된다. 반면 Fig. 3(b)와 같이 용적이행 중 아크 끊어짐이 발생한 경우에 있어서의 파형은 때때로 불연속적이다. 또한 아크가 끊어진 기간동안은 어떤 용적이행이나 스패터도 발생되지 않는다. 그렇지만 아크 끊어짐이 발생한 순간에 스패터가 발생할 가능성은 높다. Mita는 그의 아크 안정성 인덱스를 전개함에 있어서 아크 끊어짐과 용적의 flare up 을 추가 항으로 처리하였다. 본 연구에서는 용접전류와 아크 전압을 구성하는 파형 인자와 파형인자의 표준편차들 이외에 아크 끊어짐 횟수와 평균 아크 끊어짐 시간, 그리고 이 시간의 표준편차 및 총 아크 끊어짐 시간들을 인자로 사용하여 단락이행 영역에 있어서의 아크 안정성 평가 인덱스를 구성하였다.

3.4 아크 안정성 평가 인덱스의 구성인자 결정

Fig 3과 같이, 단락이행모드의 용접전류 및 아크 전압 파형으로부터 아크 안정성과 스패터 발생량에 영향을 미치는 것으로 일반적으로 알려진 인자들을 16 개 정하였고, Table 1 의 용접조건에 따라 용접이 실시되었을 때, 20 초 동안 수집된 용접전류와 아크 전압 파형으로부터 이들 인자들의 값을 추출하였다.

값이 추출된 인자들(factors)은 스패터 발생에 영향을 미칠 것으로 일반적으로 알려진 파형인자 5 개(아크 시간( $T_a$ ), 단락 시간( $T_s$ ), 단락 최고전류

( $I_p$ ), 단락순간 전류( $I_s$ ), 단락이행 평균전류( $\bar{I}$ )와 이들의 표준편차(아크 시간의 표준편차( $s[T_a]$ ), 단락시간의 표준편차( $s[T_s]$ ), 단락 최고전류의 표준편차( $s[I_p]$ ), 단락순간 전류의 표준편차( $s[I_s]$ ), 단락이행 평균 전류의 표준편차( $s[\bar{I}]$ )) 및 용적이행의 특성을 표현하는 인자(단락이행 주기( $T$ ))와 그 표준편차(단락 이행주기의 표준편차( $s[T]$ )), 그리고 아크 끊어짐을 묘사하는 4 개의 인자(아크 끊어짐 발생횟수( $N(V_{oc})$ ), 평균 아크 끊어짐 시간( $(T(V_{oc}))_{avg}$ ), 아크 끊어짐 평균시간의 표준편차( $s[T(V_{oc})_{avg}]$ ), 총 아크 끊어짐 시간( $T(V_{oc})_{sum}$ )) 등 16 개 이었다.

#### 4. 아크 안정성 평가 모델의 개발

##### 4.1 전 영역에 대한 선형 회귀 모델

추출된 인자들이 아크 안정성에 어느 정도 영향을 미치는 가를 분석하기 위해서, 이들 인자들과 스패터 발생량사이의 공상관분석(correlation analysis)을 실시하였다. Table 2 는 공상관분석을 실시한 결과, 각 인자들과 스패터 발생량 그리고 인자끼리의 상관계수를 정리하여 나타낸 것이다.

Table 2 에 따르면 스패터 발생량과 상관성이 높은 인자들로는  $T$ ,  $T_a$ ,  $s[T]$ ,  $s[T_a]$ ,  $s[I_p]$  등이었고 그 외의 파형인자들은 스패터와의 상관성이 다소 떨어지는 것으로 나타났다.

공상관분석에 있어서, 상관계수가 낮다는 의미

는 스패터와 관계없다는 것을 의미하는 것이 아니라, 단지 선형적 상관성이 부족하다는 것을 의미한다. 따라서 상관계수의 크기에 의한 아크 안정성 평가 인덱스의 인자결정은 바람직 하지 않다. 그러나 Table 2 에서 반드시 검증되어야 하는 것은 각 파형인자끼리의 상관관계의 검증이다. 즉  $T$  와  $T_a$ ,  $s[T]$ 와  $s[T_a]$ ,  $N(V_{oc})$ 와  $T(V_{oc})_{sum}$ 의 상관계수는 거의 1 에 가깝다. 따라서 이들 인자들은 스패터 발생량에 같은 효과를 나타내는 것으로 생각할 수 있다. 그러므로 올바른 스패터 발생량을 예측할 수 있는 회귀 모델을 개발하기 위해서 이들 인자들 중에서  $T$  와  $s[T]$  및  $T(V_{oc})_{sum}$ 을 제거하였다.

$T$  와  $s[T]$  및  $T(V_{oc})_{sum}$ 을 제외한 13 개의 인자들을 이용하여 식 (1)과 같이 아크 안정성 평가를 위한 선형 모델을 구성하였다.

$$Y = a + bT_a + cT_s + dI_p + eI_s + f\bar{I} + gs[T_a] + hs[T_s] + is[I_p] + js[I_s] + ks[\bar{I}] + lN(V_{oc}) + mT(V_{oc})_{avg} + ns[T(V_{oc})_{avg}] \quad (1)$$

상용 통계분석 프로그램인 SAS 를 이용하여 식 (1)에 대한 다중회귀분석(multiple regression analysis)을 실시하였고, 스패터 발생량에 대한 이 모델의 적합성과 구성 인자들이 회귀예측오차를 일으킬 가능성을 조사하였다. 식 (1)의 인자들을 모두 사용한 경우의 아크 안정성 평가 인덱스의 다중상관계수는 0.8811 이었다. 그러나 식 (1)의 구성인자들 중에서 일부의 인자들이 회귀 모델의 예측성능에

Table 2 Correlation coefficients between the components of welding current and arc voltage waveforms

factors	$T$	$T_a$	$T_s$	$I_p$	$I_s$	$\bar{I}$	$s[T]$	$s[T_a]$	$s[T_s]$	$s[I_p]$	$s[I_s]$	$s[\bar{I}]$	$N(V_{oc})$	$T(V_{oc})_{avg}$	$s[T(V_{oc})_{avg}]$	$T(V_{oc})_{sum}$	spatters
$T$	1																
$T_a$	0.9921	1															
$T_s$	-0.0528	-0.177	1														
$I_p$	0.4154	0.3573	0.4161	1													
$I_s$	0.37417	0.4283	-0.475	0.54561	1												
$\bar{I}$	-0.0524	-0.058	0.0475	0.6639	0.6528	1											
$s[T]$	0.94708	0.9367	-0.026	0.32129	0.2815	-0.191	1										
$s[T_a]$	0.95742	0.9542	-0.085	0.31803	0.3214	-0.183	0.9961	1									
$s[T_s]$	0.0752	-0.024	0.7847	0.33896	-0.311	-0.034	0.2389	0.1634	1								
$s[I_p]$	0.33501	0.286	0.3523	0.3620	0.1085	0.0822	0.5085	0.4574	0.7222	1							
$s[I_s]$	-0.091	-0.159	0.5543	0.2569	-0.155	-0.095	0.1171	0.0634	0.7805	0.7104	1						
$s[\bar{I}]$	-0.1568	-0.249	0.7528	0.4116	-0.219	0.089	-6E-06	-0.059	0.8464	0.6985	0.9231	1					
$N(V_{oc})$	-0.1363	-0.202	0.5374	0.1448	-0.257	-0.201	0.0666	0.015	0.7266	0.662	0.9517	0.8847	1				
$T(V_{oc})_{avg}$	-0.0437	-0.122	0.6315	0.1552	-0.419	-0.234	0.1459	0.0909	0.7855	0.6051	0.7762	0.8015	0.7569	1			
$s[T(V_{oc})_{avg}]$	-0.1628	-0.243	0.6564	0.1438	-0.432	-0.203	0.0271	-0.029	0.7865	0.5884	0.8186	0.8466	0.8121	0.9262	1		
$T(V_{oc})_{sum}$	-0.1405	-0.199	0.4815	0.1168	-0.241	-0.227	0.0649	0.0153	0.6896	0.655	0.9412	0.8598	0.9815	0.7535	0.804	1	
spatters	0.91983	0.723	-0.109	0.1746	0.2615	-0.163	0.7457	0.7361	0.1749	0.5019	0.1986	0.0423	0.1799	0.0893	0.0129	0.1797	1

오차를 일으키는 원인을 제공한다면 이러한 인자들은 제거되어야 한다. 따라서 식 (1)의 구성인자들에 대한 가설검정(hypothesis testing)을 실시하였다. 여기에서는 식 (1)의 각 구성인자가 스파터 발생량과 상관없다는 귀무가설(null hypothesis)에 대한 채택 및 기각 여부를 결정하기 위해, Table 3 과 같이 각 인자들의 t-분포(t-distribution)에 대한 유의확률(significance probability)이 조사되었다. 여기에서 유의수준(significance level)은 5%로 결정하였다. Table 3 을 살펴보면,  $I_p, \bar{I}, s[T_s], s[\bar{I}], N(V_{oc})$  및  $T(V_{oc})_{avg}, s[T(V_{oc})_{avg}]$ 의 유의확률이 각각 62.03 %, 74.83 %, 13.54 %, 17.55 %, 37.41 %, 80.71 %, 19.51 % 이었다. 이들 인자들의 유의확률이 유의수준 5 %에 비해서 커기 때문에 귀무가설을 채택하였다. 만일 이들 인자들이 식 (1)의 회귀 모델에 들어갈 경우 오히려 모델의 예측오차를 증가시키는 결과가 초래될 수 있다. 따라서  $I_p, \bar{I}, s[T_s], s[\bar{I}], N(V_{oc})$  및  $T(V_{oc})_{avg}, s[T(V_{oc})_{avg}]$ 을 제거한 수정 회귀모델 식 (2)를 구성하였다.

$$Y = a + bT_a + cT_s + dI_s + es[T_a] + fs[I_p] + gs[I_s] \quad (2)$$

식 (2)에 대해서 다중회귀분석이 다시 실시되었다. 식 (2)의 수정 선형회귀모델의 다중상관계수는 0.874 이었고, 식 (1)의 다중상관계수 0.8811 에 비해서 상관성이 약 0.0071 저하되는 정도로, 스파터 발생량의 예측에는 차이가 거의 보여지지 않는다. 식 (2)의 구성인자들에 대한 유의확률을 다시 평가하여 수정된 선형회귀모델 식 (2)의 정확성을 보증하였다. Table 4 는 식 (2)를 구성하는 인자들의 유의확률을 평가한 것이다.

구성인자가 유의확률을 모두 만족하는 선형 회귀모델 인자들의 계수를 회귀분석에 의하여 구하면 식 (3)과 같다. 따라서 식 (3)은 전 영역에 있어서의 아크 끊어짐이 고려된 아크 안정성 예측 선형 회귀모델이다.

**Table 3** Observed probability values of factors in linear regression model (1)

factors	$T_a$	$T_s$	$I_p$	$I_s$	$\bar{I}$	$s[T_a]$	$s[T_s]$	$s[I_p]$
P-value	5.8E-20	0.0009	0.6203	0.00522	0.7483	7.2E-13	0.1354	0.0029
factors	$s[I_s]$	$s[\bar{I}]$	$N(V_{oc})$	$T(V_{oc})_{avg}$	$s[T(V_{oc})_{avg}]$			
P-value	2E-05	0.1755	0.3741	0.80714	0.19516			

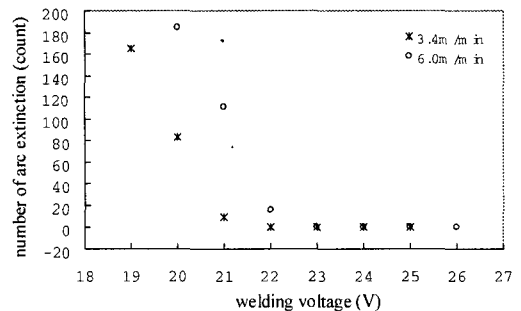
$$Y = 2.8768 + 0.8658T_a - 1.42T_s - 0.04I_s - 0.89s[T_a] + 0.0281s[I_p] + 0.052s[I_s] \quad (3)$$

4.2 영역분할에 의한 선형 회귀 모델

Fig. 4 는 CTWD가 15mm로 설정되고 와이어 송급속도가 각각 3.4, 6.0m/min 으로 설정되었을 때 용접전압에 따른 아크 끊어짐 횟수를 계측한 결과이다. 한편, Fig. 3 을 살펴보면, 적정전압에서 가장 스파터가 적게 발생되고, 용접전압이 적정전압보다 크거나 적어질수록 스파터가 많이 발생함을 알 수 있다. Fig. 4 에서는 적정전압보다 전압이 낮을수록 아크 끊어짐이 많이 발생되고 적정전압 이상의 조건에서는 아크 끊어짐이 전혀 발생하지 않음이 보여진다. 아크 끊어짐은 용접중 단락기간동안 아크가 소멸하고 용적이 bridge 를 형성하는 것을 의미하는 것이 아니라, Fig. 3(b)와 같이 용접와이어와 용융치사이에 어떤 전기적, 열적 에너지 교환이 없는 상태를 말한다. 즉 용접중 큰 스파터의 발생 등으로 인하여 용접와이어와 용융치사이에 전류도 흐르지 않고 아크가 완전히 소멸한 상태를 의미한다. 이때는 최초의 용접에서와 같이 무부하 전압이 용접와이어와 모재 사이에 걸리게 된다 (Fig. 3(b)). 따라서 적정전압보다 전압이 낮은 경우와 높은 경우의 스파터 발생 기구가 다를 수 있음이 암시된다. 그러므로 스파터 발생의 예측, 즉, 아크 안정성 예측 회귀 모델 역시 아크 끊어짐이 발생한 영역과 발생하지 않은 영역으로 구분하여 모델을 세울 필요가 있다. 이러한 경우에 있어서 회귀모델을 구성하는 인자들이 달라 질 수 있다.

**Table 4** Observed probability values of factors in linear regression model (2)

factors	Y-intercept	$T_a$	$T_s$	$I_s$	$s[T_a]$	$s[I_p]$	$s[I_s]$
P-value	0.001478	5E-26	2.1E-19	3E-14	1E-15	6.21E-07	3E-18



**Fig. 4** Number of the arc extinction with respect to the welding voltages

4.2.1 아크 끊어짐이 발생한 영역의 선형 회귀 모델

아크 끊어짐이 발생한 영역에 대한 선형회귀모델은 식 (1)과 같은 형태의 선형 모델을 사용하였다. 다만, 회귀식에 적용되는 데이터의 조건을 아크 끊어짐이 발생한 영역에 한정하였다. 아크 끊어짐이 발생한 영역에서, 인자들이 아크 안정성에 어느 정도 영향을 미치는 가를 분석하기 위해서 인자들과 스파터 발생량과의 공상관분석을 실시하였다. Table 5 는 아크 끊어짐이 발생한 영역에 있어서 인자들과 스파터 발생량 그리고 각각의 인자들의 상관계수를 정리하여 나타낸 것이다.

Table 5 에 있어서 스파터 발생량과 각 인자들의 상관계수는 Table 2 의 공상관분석의 결과와 매우 다른 거동을 나타내었다. Table 2 에서는  $T$ ,  $T_a$ ,  $s[T]$ ,  $s[T_a]$ , 등이 스파터 발생량과 매우 높은 선형상관계수를 가졌으나, Table 5 에서는 이들 인자들의 선형상관계수는 매우 낮고,  $s[I_p]$ ,  $s[I_s]$ ,  $s[\bar{I}]$ ,  $N(V_{oc})$  이 매우 높은 상관계수를 나타내었다. 이러한 현상은 Fig. 4 에서 아크 끊어짐이 적정 전압보다 낮은 저전압 영역에서 발생하고 이 저전압영역에서의 용접전류 및 아크 전압파형이 가지고 있는 특성, 예를 들면 Fig. 3(b)에서 볼 수 있듯이 평균  $I_p$  는 낮지만 표준편차가 크거나 또는 아크 기간이 짧지만 표준편차가 커지는 등과 같은 파형인자들의 특성이 아크 끊어짐이 발생한 영역과 아크 끊어짐이 발생하지 않은 영역을 종합한 전영역에서의 파형의 거동이 다르게 나타날 수 있

기 때문에 발생한 것으로 생각된다. 또한 Table 5 에 의하면 Table 2 와 마찬가지로  $T$  와  $T_a$ ,  $s[T]$  와  $s[T_a]$ , 그리고  $N(V_{oc})$  와  $T(V_{oc})_{sum}$  사이의 상관계수는 거의 1 에 가깝다. 따라서 올바른 스파터 발생량을 예측할 수 있는 회귀 모델을 개발하기 위해서  $T$  와  $s[T]$  및  $T(V_{oc})_{sum}$  를 제거하였다.

용접전류 및 아크전압을 구성하는 인자들 중  $T$ ,  $s[T]$ ,  $T(V_{oc})_{sum}$  을 제외한 13 개의 파형인자들을 이용하여 식(4)와 같이 선형 모델을 구성하였다.

$$Y = a + bT_a + cT_s + dI_p + eI_s + f\bar{I} + gs[T_a] + hs[T_s] + is[I_p] + js[I_s] + ks[\bar{I}] + lN(V_{oc}) + mT(V_{oc})_{avg} + ns[T(V_{oc})_{avg}] \quad (4)$$

아크 끊어짐이 발생한 영역에 있어서 스파터 발생량에 대한 이 모델의 적합성과 구성 인자들이 회귀예측오차를 일으킬 가능성을 조사하였다. 식 (4)의 인자들을 모두 사용한 경우의 아크 안정성 평가 인덱스의 다중상관계수는 0.946 이었고, 식 (3)의 경우보다 스파터 발생량을 정확하게 표현함을 알 수 있었다. 한편 식 (4)의 인자들에 대해서 t-분포에 대한 유의확률이 Table 6 에 정리하였다. Table 6 을 살펴보면  $T_a$ ,  $\bar{I}$ ,  $s[T_a]$ ,  $s[T_s]$ ,  $s[I_p]$ ,  $s[I_s]$ ,  $T(V_{oc})_{avg}$ ,  $s[T(V_{oc})_{avg}]$  의 유의확률이 각각 38.25 %, 2.3 %, 21.7 %, 59.9 %, 99.76 %, 7.97 %, 7.42 %, 40.015 % 이었다. 따라서 이들 인자들에 대해서 귀무가설을 채택하였다. 여기에서  $\bar{I}$  의 경우 유의확률이 2.3 %임에도 귀무가설을 채택한 이유

**Table 5** Correlation coefficients between each factor and the amount of the generated spatters, and between the factors with each other in arc extinction range of linear regression model

factors	$T$	$T_a$	$T_s$	$I_p$	$I_s$	$\bar{I}$	$s[T]$	$s[T_a]$	$s[T_s]$	$s[I_p]$	$s[I_s]$	$s[\bar{I}]$	$N(V_{oc})$	$T(V_{oc})_{avg}$	$s[T(V_{oc})_{avg}]$	$T(V_{oc})_{sum}$	spatters	
$T$	1																	
$T_a$	0.9908	1																
$T_s$	0.2789	0.1467	1															
$I_p$	0.7413	0.7452	0.1305	1														
$I_s$	0.5487	0.6039	-0.275	0.8581	1													
$\bar{I}$	0.3413	0.3686	-0.121	0.7605	0.773	1												
$s[T]$	0.828	0.8354	0.1245	0.5545	0.525	0.109	1											
$s[T_a]$	0.8642	0.8787	0.081	0.60002	0.558	0.149	0.9892	1										
$s[T_s]$	0.0752	0.0047	0.5177	0.0755	0.005	-0.114	0.3355	0.2180	1									
$s[I_p]$	-0.006	0.0021	-0.056	0.1650	0.337	0.166	0.3585	0.2928	0.6286	1								
$s[I_s]$	-0.095	-0.122	0.165	0.1158	0.21	-0.148	0.301	0.2354	0.6578	0.7282	1							
$s[\bar{I}]$	-0.033	-0.066	0.2289	0.244	0.267	0.04	0.3076	0.2437	0.7144	0.8285	0.9413	1						
$N(V_{oc})$	-0.156	-0.193	0.2249	-0.0329	0.012	-0.305	0.2313	0.1633	0.6397	0.6867	0.9266	0.8895	1					
$T(V_{oc})_{avg}$	-0.165	-0.158	-0.088	-0.2419	-0.122	-0.481	0.2142	0.1680	0.4045	0.5254	0.6345	0.5687	0.6528	1				
$s[T(V_{oc})_{avg}]$	-0.226	-0.245	0.0826	-0.2338	-0.197	-0.446	0.1091	0.0615	0.462	0.4971	0.652	0.6046	0.6873	0.8258	1			
$T(V_{oc})_{sum}$	-0.182	-0.208	0.1453	-0.0612	0.007	-0.342	0.2175	0.1514	0.6056	0.6847	0.9195	0.8722	0.973	0.7336	0.7335	1		
spatters	0.0593	0.0437	0.1235	0.230	0.351	-0.006	0.4312	0.3666	0.6504	0.7650	0.8886	0.8816	0.8436	0.4949	0.483	0.7945	1	

는 유의확률이 크게 나타난 인자들부터 하나씩 제거해나가는 과정에서  $\bar{I}$ 의 유의확률이 5% 이상으로 커지는 결과가 나타났기 때문이다.

따라서 식 (4)에서  $T_a, \bar{I}, s[T_a], s[T_s], s[I_p], s[I_s], T(V_{oc})_{avg}, s[T(V_{oc})_{avg}]$ 를 제거하였다. 남겨진 인자들로 구성된 회귀모델에 대해서 Table 7 과 같이 유의확률을 다시 평가하였고, 식 (5)와 같이 아크 끊어짐이 발생한 영역에 대한 아크 안정성 예측 회귀 모델을 수립되었다. 또한 식 (5)의 다중상관계수는 0.931 이었고, 식 (4)의 다중상관계수 0.946 에 비해서 상관성의 정확도는 약간 낮아졌으나 식 (3)의 다중상관계수 0.874 에 비해서 매우 높은 결과가 얻어졌다.

$$Y = -2.683 + 0.50103 T_s - 0.014 I_p + 0.04031 I_s + 0.01568 s[\bar{I}] + 0.0077 N(V_{oc}) \quad (5)$$

4.2.2 아크 끊어짐이 없는 영역의 선형회귀 모델

아크 끊어짐이 없는 영역에서는 16 개의 인자들 중에서  $N(V_{oc}), T(V_{oc})_{avg}, s[T(V_{oc})_{avg}], T(V_{oc})_{sum}$ 가 발생되지 않으므로 제거하였다. 따라서  $T,$

**Table 6** Observed probability values of factors in linear regression model (4)

factors	$T_a$	$T_s$	$I_p$	$I_s$	$\bar{I}$	$s[T_a]$	$s[T_s]$	$s[I_p]$
P-value	0.3825	0.0416	0.0144	1.6E-05	0.023	0.217	0.599	0.99755
factors	$s[I_s]$	$s[\bar{I}]$	$N(V_{oc})$	$T(V_{oc})_{avg}$	$s[T(V_{oc})_{avg}]$			
P-value	0.0797	0.00212	0.0287	0.074288	0.40015			

$T_a, T_s, I_p, I_s, \bar{I}, s[T], s[T_a], s[T_s], s[I_p], s[I_s], s[\bar{I}]$  등 12 개의 인자들로 구성된 회귀모델을 제안하였다. Table 8 은 아크 끊어짐이 발생하지 않은 영역에 있어서, 12 개의 인자들과 스패터 발생량의 상관계수와 각 인자상호간의 상관계수를 정리하여 나타낸 것이다.

Table 8 에 있어서 스패터 발생량과 인자들의 상관계수는 Table 5 의 아크 끊어짐이 발생한 영역의 공상관분석의 결과와 매우 다른 거동을 보이고 있다. 특히,  $T, T_a, s[T], s[T_a]$ 와 스패터 발생량의 상관계수는 Table 5 에서는 낮은 값을 나타내었지만, 아크 끊어짐이 없는 영역에서서는 Table 2 의 경우보다 더 큰 값을 나타내었다. 이에 따라서, 스패터 발생의 기구가 아크 끊어짐이 발생한 영역과 끊어짐이 없는 영역이 다르다는 것이 다시 한번 확인되었다. 또한 Table 8 에 의하면 Table 2 와 마찬가지로  $T$ 와  $T_a, s[T]$ 와  $s[T_a]$ 의 인자끼리의 상관계수는 거의 1 에 가깝기 때문에 제거하였다.

12 개의 인자들 중에서  $T$ 와  $s[T]$ 를 제외한 10 개의 인자들을 이용하여, 아크 끊어짐이 발생하지 않은 영역에 있어서, 식 (6)과 같이 아크 안정성 평가를 위한 선형모델을 구성하였다.

$$Y = a + bT_a + cT_s + dI_p + eI_s + f\bar{I} + gs[T_a] + hs[T_s] + is[I_p] + js[I_s] + ks[\bar{I}] \quad (6)$$

**Table 7** Observed probability values of factors in linear regression model (5)

factors	Y-intercept	$T_s$	$I_p$	$I_s$	$s[\bar{I}]$	$N(V_{oc})$
P-value	3.04E-05	0.0011	2E-05	1E-08	7E-04	5.97E-06

**Table 8** Correlation coefficients between each factor and the amount of the generated spatters, and between the factors with each other in non-arc extinction range of linear regression model

factors	$T$	$T_a$	$T_s$	$I_p$	$I_s$	$\bar{I}$	$s[T]$	$s[T_a]$	$s[T_s]$	$s[I_p]$	$s[I_s]$	$s[\bar{I}]$	spatters
$T$	1												
$T_a$	0.9967	1											
$T_s$	-0.067	-0.0883	1										
$I_p$	0.4034	0.3573	0.5449	1									
$I_s$	0.3370	0.3599	-0.2968	0.5803	1								
$\bar{I}$	-0.2311	-0.2625	0.3945	0.6572	0.5549	1							
$s[T]$	0.9780	0.9833	-0.1115	0.2751	0.2961	-0.3312	1						
$s[T_a]$	0.9770	0.9850	-0.1441	0.2674	0.3104	-0.3456	0.9984	1					
$s[T_s]$	0.3802	0.3303	0.5939	0.4269	-0.017	0.2392	0.3810	0.3397	1				
$s[I_p]$	0.7662	0.7565	0.0824	0.4199	0.4457	0.1025	0.7764	0.7553	0.6010	1			
$s[I_s]$	0.2885	0.2556	0.3892	0.4640	0.1832	0.3327	0.3062	0.2773	0.7753	0.4703	1		
$s[\bar{I}]$	-0.1439	-0.2177	0.9103	0.6724	-0.036	0.6457	-0.2470	-0.2760	0.5170	0.0975	0.4674	1	
spatters	0.8165	0.8267	-0.1644	0.1757	0.2592	-0.2729	0.7914	0.7376	0.2565	0.6562	0.1398	-0.3033	1



**Table 9** Observed probability values of factors in linear regression model (6)

factors	$T_a$	$T_s$	$I_p$	$I_s$	$\bar{I}$	$s[T_a]$
P-value	2.5E-12	0.624	0.0005	0.07091	0.0197	1E-14
factors	$s[T_s]$	$s[I_p]$	$s[I_s]$	$s[\bar{I}]$		
P-value	0.0346	2E-08	0.021548	3.8E-06		

**Table 10** Observed probability values of factors in linear regression model (7)

factors	Y-intercept	$T_a$	$I_p$	$\bar{I}$	$s[T_a]$
P-value	6.2E-05	2E-18	0.0191	3E-05	6.2E-16
factors	$s[T_s]$	$s[I_p]$	$s[\bar{I}]$		
P-value	4E-06	2E-06	3E-07		

아크 끊어짐이 없는 영역에 있어서 스패터 발생량에 대한 회귀모델, 식 (6),의 적합성과 구성 인자들이 회귀예측오차를 일으킬 가능성을 조사하였다. 식 (6)의 인자들을 모두 사용한 경우의 아크 안정성 평가 인덱스의 다중상관계수는 0.9251 이었고, 식 (3)의 선형 다중상관계수 0.874 보다 스패터 발생량을 매우 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다. 한편, 식 (6)의 인자들에 대해서 t-분포에 대한 유의확률이 Table 9 에 나타내었다. Table 9 을 살펴보면  $T_s$ ,  $I_s$  및  $s[I_s]$  의 유의확률이 각각 62.4%, 7.09%, 2.15%이었다. 따라서 이들 인자들에 대해서 귀무가설을 채택하였다. 여기에서  $s[I_s]$  의 경우 유의확률이 2.15 %임에도 귀무가설을 채택한 이유는 유의확률이 크게 나타난 인자들부터 하나씩 제거해나가는 과정에서  $s[I_s]$  의 유의확률이 5% 이상으로 커지는 결과가 나타났기 때문이다.

식 (6)에서  $T_s$ ,  $I_s$  및  $s[I_s]$ 가 제거된 회귀모델에 대해서, Table 10 과 같이 유의확률을 다시 평가하였고, 식 (7)과 같이 아크 끊어짐이 발생하지 않은 영역에 대한 아크 안정성 예측 회귀 모델이 수립되었다. 식 (7)의 회귀모델과 스패터 발생량의 다중상관계수는 0.9165 이었고, 식 (6)의 다중상관계수 0.9251 에 비해서 상관계수가 약 0.0086 낮으나, 식 (3)의 다중상관계수 0.874 에 비해서 매우 높았다.

$$Y = 5.697 + 1.0534 T_a + 0.0242 I_p - 0.065 \bar{I} - 1.5609 s[T_a] + 2.5924 s[T_s] + 0.0704 s[I_p] - 0.1496 s[\bar{I}] \quad (7)$$

4.3 전 영역에 대한 비선형 회귀 모델

Table 1 의 공상관 분석에 있어서, 스패터 발생량과 구성인자들 사이의 상관계수는 일반적으로 흔히 사용되는 선형상관계수이다. 많은 경우에 있어서 이 선형상관계수 만을 평가하여 아크 안정성 평가 인덱스를 구성하였는데, 사실 이들은 전술한 바와같이 상관계수가 낮다고 할지라도 이는 선형적 관계가 낮은 것으로써, 어떤 경우에는 비선형

적인 상관관계가 매우 높을 수도 있다. 이를 위하여 비선형 회귀모델이 식 (8)과 같이 구성되었다.

$$Y = a \cdot T^b \cdot T_a^c \cdot T_s^d \cdot I_p^e \cdot I_s^f \cdot \bar{I}^g \cdot s[T]^h \cdot s[T_a]^i \cdot s[T_s]^j \cdot s[I_p]^k \cdot s[I_s]^l \cdot s[\bar{I}]^m \cdot N(V_{oc})^n \cdot T(V_{oc})_{avg}^o \cdot s[T(V_{oc})_{avg}]^p \cdot T(V_{oc})_{sum}^q \quad (8)$$

식 (8)의 양변에 로그를 취하면 식 (8)은 식 (9)와 같이 된다.

$$\ln Y = a' + b \ln T + c \ln T_a + d \ln T_s + e \ln I_p + f \ln I_s + g \ln \bar{I} + h \ln s[T] + i \ln s[T_a] + j \ln s[T_s] + k \ln s[I_p] + l \ln s[I_s] + m \ln s[\bar{I}] + n \ln N(V_{oc}) + o \ln T(V_{oc})_{avg} + p \ln s[T(V_{oc})_{avg}] + q \ln T(V_{oc})_{sum} \quad (9)$$

식 (9)는 결국 식 (1)과 유사한 선형적 관계를 갖게 된다. 식 (9)가 선형화되기 때문에 공상관분석을 실시하여 Table 11 에 정리하였다.

Table 11 에 의하면 스패터 발생량과 상관성이 높은 인자들로는, Table 2 와 같이,  $\ln T$ ,  $\ln T_a$ ,  $\ln s[T]$ ,  $\ln s[T_a]$ ,  $\ln s[I_p]$  등이었다. 또한  $\ln T$  와  $\ln T_a$ ,  $\ln s[T]$  와  $\ln s[T_a]$  및  $\ln N(V_{oc})$  와  $\ln T(V_{oc})_{avg}$ ,  $\ln T(V_{oc})_{sum}$  가 상호 상관관계가 거의 1 에 가까우므로 자기상관관계에 있다고 할 수 있기 때문에 이들 중  $\ln T$  와  $\ln s[T]$  및  $\ln T(V_{oc})_{avg}$ ,  $\ln T(V_{oc})_{sum}$  를 제거하였다.

다중회귀분석을 통해서 회귀모델, 식 (10)의 적합성과 구성 인자들이 회귀예측오차를 일으킬 가능성을 조사하였다. 식 (10)의 인자들을 모두 사용한 경우의 아크 안정성 평가 인덱스의 다중상관

$$\ln Y = a' + c \ln T_a + d \ln T_s + e \ln I_p + f \ln I_s + g \ln \bar{I} + i \ln s[T_a] + j \ln s[T_s] + k \ln s[I_p] + l \ln s[I_s] + m \ln s[\bar{I}] + n \ln N(V_{oc}) + p \ln s[T(V_{oc})_{avg}] \quad (10)$$

**Table 11** Correlation coefficients between each factor and the amount of the generated spatters, and between the factors with each other in nonlinear regression model (9)

factors	$\ln T$	$\ln T_a$	$\ln T_s$	$\ln I_p$	$\ln I_s$	$\ln \bar{I}$	$\ln s[T]$	$\ln s[T_a]$	$\ln s[T_s]$	$\ln s[I_p]$	$\ln s[I_s]$	$\ln s[\bar{I}]$	$\ln N(V_{oc})$	$\ln T(V_{oc})_{avg}$	$\ln s[T(V_{oc})_{avg}]$	$\ln T(V_{oc})_{sum}$	$\ln spatters$
$\ln T$	1																
$\ln T_a$	0.9877	1															
$\ln T_s$	0.0855	-0.058	1														
$\ln I_p$	0.5512	0.5023	0.4651	1													
$\ln I_s$	0.3732	0.4591	-0.458	0.5174	1												
$\ln \bar{I}$	0.0024	0.0058	0.0509	0.6402	0.6605	1											
$\ln s[T]$	0.9043	0.8835	0.1381	0.4220	0.2124	-0.189	1										
$\ln s[T_a]$	0.9130	0.9062	0.0723	0.4185	0.2622	-0.189	0.9924	1									
$\ln s[T_s]$	0.1909	0.0954	0.8054	0.3830	-0.338	-0.033	0.009	0.3160	1								
$\ln s[I_p]$	0.4009	0.3362	0.3773	0.3982	0.0945	0.1002	0.6122	0.5542	0.7194	1							
$\ln s[I_s]$	0.0054	-0.091	0.6504	0.2915	-0.266	-0.092	0.2812	0.2264	0.8430	0.6954	1						
$\ln s[\bar{I}]$	-0.054	-0.166	0.8197	0.4519	-0.266	0.1106	0.1477	0.0904	0.8416	0.640	0.9113	1					
$\ln N(V_{oc})$	-0.019	-0.118	0.6522	0.1898	-0.436	-0.137	0.2075	0.1548	0.7408	0.4658	0.7394	0.7222	1				
$\ln T(V_{oc})_{avg}$	-0.014	-0.113	0.6442	0.1873	-0.433	-0.135	0.2078	0.1554	0.7311	0.4557	0.7221	0.7065	0.9995	1			
$\ln s[T(V_{oc})_{avg}]$	-0.031	-0.133	0.7078	0.2663	-0.416	-0.076	0.1991	0.1494	0.7655	0.4904	0.7827	0.7947	0.9074	0.9001	1		
$\ln T(V_{oc})_{sum}$	-0.018	-0.117	0.6541	0.1908	-0.437	-0.138	0.2097	0.1569	0.7435	0.4692	0.7426	0.7255	1	0.9994	0.9091	1	
$\ln spatters$	0.6736	0.6534	0.0906	0.3046	0.1907	-0.205	0.8264	0.8122	0.4203	0.7176	0.4593	0.278	0.1931	0.1841	0.1906	0.1962	1

**Table 12** Observed probability values of factors in nonlinear regression model (10)

factors	$\ln T_a$	$\ln T_s$	$\ln I_p$	$\ln I_s$	$\ln \bar{I}$	$\ln s[T_a]$	$\ln s[T_s]$
P-value	0.32901	0.27862	0.10607	0.63793	0.00721	0.11977	0.28928

factors	$\ln s[I_p]$	$\ln s[I_s]$	$\ln s[\bar{I}]$	$\ln N(V_{oc})$	$\ln s[T(V_{oc})_{avg}]$
P-value	2.55E-07	1.34E-06	0.310143	0.25443	0.032518

계수는 0.9204 이었고, 식 (3)의 선형 다중상관계수 0.874 보다 스패터 발생량을 매우 정확하게 예측할 수 있을 것으로 예상되었다. 식 (10)의 구성인자들에 대해서 t-분포에 대한 유의확률이 Table 12에 나타내었다. Table 12를 살펴보면,  $\ln T_a$ ,  $\ln T_s$ ,  $\ln I_p$ ,  $\ln I_s$ ,  $\ln s[T_s]$ ,  $\ln s[\bar{I}]$ ,  $\ln N(V_{oc})$ 의 유의확률이 각각 32.05%, 27.25%, 10.79%, 63.56%, 28.0%, 32.69%, 31.24%이었다. 따라서 이들 인자들에 대해서 귀무가설을 채택하였다.

식 (10)의 구성인자들에 있어서, 유의확률이 5% 이상되는 인자들을 제거한 후의 수정된 비선형 회귀모델에 대해서 다중회귀분석을 실시하였고 식 (11)과 같은 아크 안정성 예측 비선형회귀모델을 수립하였다. 식 (11)의 회귀모델과 스패터 발생량의 다중상관관계는 0.9109 이었고, 식 (10)의 다중상관계수 0.9204에 비해서 상관계수가 약 0.0095 낮아졌으나, 식 (3)의 다중상관계수 0.874에 비해서 매우 높은 결과가 얻어졌다. Table 13은 식 (11)의 구성인자들의 유의확률을 나타낸 것이다.

$$Y = 0.010451 \cdot \bar{I}^{-1.12761} \cdot s[T_a]^{1.214463} \cdot s[I_p]^{1.201309} \cdot s[I_s]^{0.644028} \cdot s[T(V_{oc})_{avg}]^{-0.02396} \quad (11)$$

**Table 13** Observed probability values of factors in nonlinear regression model (11)

factors	Y-intercept	$\ln \bar{I}$	$\ln s[T_a]$	$\ln s[I_p]$	$\ln s[I_s]$	$\ln s[T(V_{oc})_{avg}]$
P-value	0.03924	1.08E-38	5.83E-12	8.64E-10	7.73E-12	3.07E-12

4.4 영역분할에 의한 비선형 회귀 모델

4.4.1 아크 끊어짐이 발생한 영역의 비선형 회귀모델

아크 끊어짐이 발생한 영역에 대한 비선형회귀 모델로 식 (9)와 같은 모델을 사용하였다. 아크 끊어짐이 발생한 영역에서, 식 (9)의 구성인자들과 스패터 발생량과의 공상관분석을 실시하였다. Table 14는 아크 끊어짐이 발생한 영역에 있어서 인자들과 스패터 발생량 그리고 각각의 인자들의 상관계수를 정리하여 나타낸 것이다. Table 14에 있어서, 스패터 발생량에 대한 각 인자들의 상관계수는 Table 5의 공상관분석의 결과와 유사하고 Table 11의 결과와는 다른 거동을 나타내었다. 또한 Table 14에 의하면  $T$ 와  $T_a$ ,  $s[T]$ 와  $s[T_a]$ , 그리고  $N(V_{oc})$ 와  $T(V_{oc})_{sum}$  사이의 상관계수가 거의 1에 근접되어 자기상관관계에 있다고 할 수 있기 때문에 이들 중  $T$ 와  $s[T]$  및  $T(V_{oc})_{sum}$ 를 제거하였다.

이들 인자들이 제외된 13개의 파형인자들을 이용하여 식 (12)와 같은 비선형 모델을 구성하였다.

**Table 14** Correlation coefficients between each factor and the amount of the generated spatters, and between the factors with each other in arc extinction range of nonlinear regression model (9)

factors	$\ln T$	$\ln T_a$	$\ln T_s$	$\ln I_p$	$\ln I_s$	$\ln \bar{I}$	$\ln s[T]$	$\ln s[T_a]$	$\ln s[T_s]$	$\ln s[I_p]$	$\ln s[I_s]$	$\ln s[\bar{I}]$	$\ln N(V_{oc})$	$\ln T(V_{oc})_{avg}$	$\ln s[T(V_{oc})_{avg}]$	$\ln T(V_{oc})_{sum}$	$\ln s[T(V_{oc})_{sum}]$
$\ln T$	1																
$\ln T_a$	0.9917	1															
$\ln T_s$	0.3719	0.2548	1														
$\ln I_p$	0.7460	0.7513	0.1885	1													
$\ln I_s$	0.5164	0.5740	-0.247	0.8435	1												
$\ln \bar{I}$	0.3110	0.3310	-0.108	0.7456	0.7876	1											
$\ln s[T]$	0.8409	0.8551	0.2121	0.5568	0.4782	0.0766	1										
$\ln s[T_a]$	0.8615	0.8813	0.1788	0.5890	0.4996	0.0948	0.9883	1									
$\ln s[T_s]$	0.113	0.0613	0.5492	0.0763	-0.0167	-0.1208	0.3422	0.2469	1								
$\ln s[I_p]$	0.0009	0.0199	-0.0549	0.1684	0.3545	0.2087	0.3288	0.2813	0.5773	1							
$\ln s[I_s]$	-0.011	-0.0318	0.2889	0.1045	0.1117	-0.184	0.3541	0.3135	0.7313	0.7041	1						
$\ln s[\bar{I}]$	0.0416	0.0199	0.3013	0.2599	0.2389	0.0414	0.3514	0.3126	0.7398	0.7949	0.9462	1					
$\ln N(V_{oc})$	-0.0489	-0.0845	0.3709	-0.0242	-0.1155	-0.3117	0.2916	0.2626	0.7093	0.5981	0.9035	0.8591	1				
$\ln T(V_{oc})_{avg}$	-0.0726	-0.053	-0.0586	-0.2064	-0.115	-0.4571	0.3136	0.3106	0.6730	0.4693	0.6255	0.5420	0.6694	1			
$\ln s[T(V_{oc})_{avg}]$	0.0923	0.0795	0.1603	0.0665	-0.0341	-0.113	0.1905	0.2133	0.1399	0.0773	0.2719	0.2449	0.4589	0.3287	1		
$\ln T(V_{oc})_{sum}$	-0.0564	-0.0828	0.3052	-0.0621	-0.1217	-0.3581	0.3121	0.2867	0.6809	0.6052	0.8976	0.8429	0.9888	0.7726	0.4581	1	
$\ln s[T(V_{oc})_{sum}]$	0.2357	0.2205	0.3111	0.2661	0.2565	-0.0655	0.5557	0.5204	0.6949	0.7236	0.9025	0.9006	0.8342	0.5906	0.260	0.8313	1

$$\ln Y = a^* + c \ln T_a + d \ln T_s + e \ln I_p + f \ln I_s + g \ln \bar{I} + i \ln s[T_a] + j \ln s[T_s] + k \ln s[I_p] + l \ln s[I_s] + m \ln s[\bar{I}] + n \ln N(V_{oc}) + o \ln T(V_{oc})_{avg} + p \ln s[T(V_{oc})_{avg}] \quad (12)$$

아크 끊어짐이 발생한 영역에 있어서 식 (12)의 구성인자들에 대한 유의확률을 Table 15 와 같이 조사하였다. Table 15 를 살펴보면, Table 6 의 선형모델의 경우와는 달리,  $\ln \bar{I}$ ,  $\ln s[T_a]$ ,  $\ln s[I_p]$ ,  $\ln s[I_s]$ ,  $\ln T(V_{oc})_{avg}$  의 유의확률이 각각 28.92 %, 55.32 %, 76.42 %, 82.08 %, 64.51 %이었다. 따라서 이들 인자들에 대해서 귀무가설을 채택하였다.

식 (12)의 구성인자들 중에서  $\ln \bar{I}$ ,  $\ln s[T_a]$ ,  $\ln s[I_p]$ ,  $\ln s[I_s]$ ,  $\ln T(V_{oc})_{avg}$  를 제거한 회귀모델에 대해서 다중회귀분석을 실시하였고, 식 (13)과 같이, 아크 끊어짐이 발생한 영역에 있어서의 아크 안정성 예측 비선형 회귀모델을 수립하였다.

식 (13)의 회귀모델과 스파터 발생량의 다중상관계수는 0.9581 이었고, 아크 끊어짐이 발생한 영역에 있어서의 선형회귀모델 식 (5)의 다중상관계수 0.931, 또는 식 (11)의 전영역에 대한 비선형모델의 다중회귀계수 0.9109 보다 더 좋은 예측성을 나타내었다. Table 16 은 식 (13)의 구성인자들에 대한 유의확률을 조사한 결과이다.

$$Y = 0.33823 \cdot T_a^{1.1681} \cdot T_s^{1.5313} \cdot I_p^{-4.3293} \cdot I_s^{1.7668} \cdot s[T_s]^{-0.5712} \cdot s[\bar{I}]^{2.6431} \cdot N(V_{oc})^{0.2315} \cdot s[T(V_{oc})_{avg}]^{-0.0119} \quad (13)$$

**Table 15** Observed probability values of factors in arc extinction range of nonlinear regression model (12)

factors	$\ln T_a$	$\ln T_s$	$\ln I_p$	$\ln I_s$	$\ln \bar{I}$	$\ln s[T_a]$	$\ln s[T_s]$
P-value	0.04142	0.04054	0.00055	0.00013	0.2892	0.5532	0.02789

factors	$\ln s[I_p]$	$\ln s[I_s]$	$\ln s[\bar{I}]$	$\ln N(V_{oc})$	$\ln T(V_{oc})_{avg}$	$\ln s[T(V_{oc})_{avg}]$
P-value	0.7642	0.8208	0.00039	0.00028	0.6461	0.07276

**Table 16** Observed probability values of factors in arc extinction range of nonlinear regression model (13)

factors	Y-intercept	$\ln T_a$	$\ln T_s$	$\ln I_p$	$\ln I_s$
P-value	0.03616	1.9E-11	0.00403	3.4E-08	9.4E-06

factors	$\ln s[T_s]$	$\ln s[\bar{I}]$	$\ln N(V_{oc})$	$\ln s[T(V_{oc})_{avg}]$
P-value	0.01781	1.9E-08	1.3E-05	0.03961

#### 4.4.2 아크 끊어짐이 없는 영역의 비선형 회귀 모델

아크 끊어짐이 없는 영역에서는 16 개의 인자들 중에서  $N(V_{oc})$ ,  $T(V_{oc})_{avg}$ ,  $s[T(V_{oc})_{avg}]$ ,  $T(V_{oc})_{sum}$  가 발생되지 않으므로 제거하였다. Table 17 은 아크 끊어짐이 발생하지 않은 영역에 있어서, 12 개의 인자들과 스파터 발생량의 상관계수와 각 인자 상호간의 상관계수를 정리하여 나타낸 것이다.

Table 17 에 있어서 스파터 발생량과 인자들의 상관계수의 거동은 Table 8 의 아크 끊어짐이 발생하지 않은 영역의 공상관분석의 결과와 매우 흡사하였다. 또한 Table 17 에 의하면 Table 8 과 마찬가지로  $T$ 와  $T_a$ ,  $s[T]$ 와  $s[T_a]$ 의 인자끼리의 상관계수

**Table 17** Correlation coefficients between each factor and the amount of the generated spatters, and between the factors with each other in non-arc extinction range of nonlinear regression model (9)

factors	$\ln T$	$\ln T_a$	$\ln T_s$	$\ln I_p$	$\ln I_s$	$\ln \bar{I}$	$\ln s[T]$	$\ln s[T_a]$	$\ln s[T_s]$	$\ln s[I_p]$	$\ln s[I_s]$	$\ln s[\bar{I}]$	$\ln spatters$
$\ln T$	1												
$\ln T_a$	0.9930	1											
$\ln T_s$	0.1259	0.0198	1										
$\ln I_p$	0.5386	0.4906	0.5901	1									
$\ln I_s$	0.3841	0.4278	-0.2814	0.5616	1								
$\ln \bar{I}$	-0.1660	-0.2060	0.3676	0.6312	0.5465	1							
$\ln s[T]$	0.9539	0.9634	-0.0166	0.3659	0.3170	-0.3134	1						
$\ln s[T_a]$	0.9457	0.9654	-0.0761	0.3464	0.3443	-0.3409	0.9941	1					
$\ln s[T_s]$	0.4550	0.3733	0.6323	0.4896	-0.0408	0.2065	0.4456	0.3650	1				
$\ln s[I_p]$	0.7559	0.7369	0.1372	0.4645	0.4371	0.1202	0.7744	0.7280	0.6426	1			
$\ln s[I_s]$	0.3106	0.2586	0.3503	0.4335	0.1432	0.3039	0.3426	0.2854	0.7507	0.4853	1		
$\ln s[\bar{I}]$	-0.0010	-0.0892	0.9087	0.6933	-0.0373	0.6287	-0.1222	-0.1711	0.5582	0.1477	0.4110	1	
$\ln spatters$	0.8421	0.8674	-0.1981	0.2529	0.3850	-0.3120	0.8984	0.8963	0.3067	0.7427	0.2235	-0.270	1

는 거의 1 에 가깝기 때문에 귀무가설을 채택, 제거하였다.

12 개의 인자들 중에서  $T$  와  $s[T]$  를 제외한 10 개의 인자들을 이용하여, 아크 끊어짐이 발생하지 않은 영역에 있어서, 식 (14)와 같이 아크 안정성 평가를 위한 비선형모델을 구성하였다.

$$\ln Y = a + c \ln T_a + d \ln T_s + e \ln I_p + f \ln I_s + g \ln \bar{I} + i \ln s[T_a] + j \ln s[T_s] + k \ln s[I_p] + l \ln s[I_s] + m \ln s[\bar{I}] \quad (14)$$

아크 끊어짐이 없는 영역에 있어서, 회귀모델 (14)의 구성인자들에 대한 유의확률을 Table 18 과 같이 조사하였다. Table 18 을 살펴보면, 아크 끊어짐이 없는 영역에 있어서의 선형회귀모델의 결과 (Table 9)와는 달리,  $\ln T_a$ ,  $\ln T_s$ ,  $\ln I_s$ ,  $\ln \bar{I}$ ,  $\ln s[T_s]$ ,  $\ln s[I_p]$ ,  $\ln s[I_s]$  의 유의확률이 각각 8.99 %, 70.63 %, 49.56 %, 10.22 %, 75.86 %, 33.12 %이었다. 따라서 이들 인자들에 대해서 귀무가설을 채택하였다.

식 (14)의 구성인자들 중에서  $\ln T_a$ ,  $\ln T_s$ ,  $\ln I_s$ ,  $\ln \bar{I}$ ,  $\ln s[T_s]$ ,  $\ln s[I_p]$ ,  $\ln s[I_s]$  를 제거한 회귀모델에 대해서 다중회귀분석을 실시하였고, 식 (15)와 같이, 아크 끊어짐이 없는 영역에 있어서의 아크 안정성 예측 비선형 회귀모델을 수립하였다. 식 (15)의 회귀모델과 스패터 발생량과의 다중상관계수는 0.927 이었고, 아크 끊어짐이 없는 영역에 있어서의 선형회귀모델 식 (5)의 다중상관계수 0.9165 또는 식 (11)의 전영역에 대한 비선형 모델의 다중회귀계수 0.9109 보다 더 좋은 예측성능을 나타내었다. Table 19 는 식 (15)의 구성인자들에 대한 유의확률을 조사한 결과이다.

**Table 18** Observed probability values of factors in non-arc extinction range of nonlinear regression model (14)

factors	$\ln T_a$	$\ln T_s$	$\ln I_p$	$\ln I_s$	$\ln \bar{I}$
P-value	0.08993	0.7063	0.00187	0.49557	0.10224
factors	$\ln s[T_a]$	$\ln s[T_s]$	$\ln s[I_p]$	$\ln s[I_s]$	$\ln s[\bar{I}]$
P-value	0.041187	0.758605	3.7E-07	0.331216	0.025058

**Table 19** Observed probability values of factors in non-arc extinction range of nonlinear regression model (15)

factors	Y-intercept	$\ln I_p$	$\ln s[T_a]$	$\ln s[I_p]$	$\ln s[\bar{I}]$
P-value	0.04487	0.03028	2.24E-15	1.33E-07	8.7E-06

$$Y = 0.011628 \cdot I_p^{1.12975} \cdot s[T_a]^{1.1481} \cdot s[I_p]^{1.45698} \cdot s[\bar{I}]^{2.4543} \quad (15)$$

#### 4.5 아크 안정성 평가 인덱스의 예측 성능 평가

Fig. 5 는 식 (3)의 경우, 식 (5)와 (8)을 병합한 경우의 선형 아크 안정성 예측 모델, 그리고 식 (11)의 경우와, 식 (13)과 (15)를 병합한 경우의 비선형 아크 안정성 예측 모델들에 대해서 스패터 발생량의 예측성능을 평가한 것이다.

Fig. 5 에 따르면, 이들 모델들은 모두 스패터 발생량과 상당히 선형적인 관계를 나타내고 있다. 식 (5)의 선형모델의 경우(Fig. 5(a)), 스패터 발생량이 적은 영역에서 예측의 오차가 다른 모델들에 비해서 조금 크게 나타나고, 스패터 발생량이 많은 영역에서도 다소 예측성능이 떨어짐을 알 수 있었다.

한편 병합 선형회귀모델의 경우(Fig. 5(b)), 스패터 발생량이 많은 영역에서의 예측성능이 다른 모델들의 경우에 비해서 다소 우수하게 나타났다.

식 (11)의 비선형회귀모델의 경우(Fig. 5(c)) 스파터 발생량이 적은 영역에서는 예측성능이 선형회귀모델들보다 뛰어난 성능을 나타내지만

스�파터 발생량이 많은 영역에서는 오히려 선형회귀모델의 예측성능보다 저하됨을 알 수 있었다. 병합 비선형 회귀모델의 경우(Fig. 5(d)) 스파터 발생량이 적은 영역에서는 가장 우수한 예측성능을 나타내었다. 그러나 스파터 발생량이 많은 영역에서는 비선형회귀모델의 예측성능(Fig. 5(c))과 거의 비슷한 결과를 나타내었다.

이상과 같이 CO<sub>2</sub> 용접의 단락이행영역에서 제안된 4 개의 선형 또는 비선형 아크 안정성 평가 인덱스와 스파터 발생량의 다중상관계수는 식 (13)과 식 (15)를 병합한 비선형 회귀 모델이 가장 우수하였다. 특히, 스파터 발생량이 적은 영역에 있어서의 예측성능은 다른 어떤 예측모델보다 탁월한 예측성능을 나타내었다. 그러나 스파터 발생량이 많은 영역에서 현저히 예측성능이 떨어지는 점을 감안한다면 스파터의 발생량에 따라 예측 회귀모델을 병합된 선형 회귀 모델과 같이 이용되는 방법도 고려해 볼 필요가 있을 것으로 생각된다.

## 5. 결론

CO<sub>2</sub> 아크 용접의 단락이행영역에 있어서, 와이어 송급속도, CTWD의 변화와 용접전압이 변경되어가며 반복된 실험을 수행하였다. 이들 조건들로 용접한 각각의 경우에 있어서 용접전류와 아크 전압 파형을 수집하였고 스파터를 포집하였다. 수집

된 파형 데이터로부터 스파터 발생에 영향을 미칠 것으로 판단되는 16 개의 인자들을 추출하였고, 통계적 분석방법에 의해서 이들 인자들로 구성된 아크 안정성을 평가할 수 있는 4 개의 선형 또는 비선형 모델을 제안하였고, 이들을 비교하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 아크 끊어짐 현상이 발생한 영역에서 인자들의 공상관 분석결과, 적정전압보다 낮은 저전압 영역에서는 아크 끊어짐 현상이 스파터 발생량과 매우 밀접한 관계가 있다.

(2) 아크 끊어짐이 발생한 영역과 아크 끊어짐이 발생하지 않은 영역 각각에 있어서의 회귀모델이 조사되었으며, 이들 각각의 영역에 있어서의 선형 및 비선형 회귀모델이 전개되었다. 이들 각각의 영역에서 도출된 최적의 회귀모델을 병합한 선형 및 비선형 회귀모델은 모두 전영역에 있어서의 선형 및 비선형 회귀모델보다 우수한 성능을 나타내었다. 특히 병합된 비선형 아크안정성 평가 회귀모델은 스파터 발생량에 대한 다중상관계수가 다른 모델들에 비해서 높게 나타나서 최적의 아크 안정성 평가 모델로 평가되었다.

(3) 제안된 모델들에 대한 스파터 발생 예측성능 평가결과, 스파터 발생량이 적은 영역에서 스파터 발생량의 예측성능은 비선형 회귀 모델이 선형회귀모델보다 더욱 우수하였으나, 스파터 발생량이 많은 용접조건에는 오히려 선형회귀모델이 우수한 경향을 나타내었다.

## 참고문헌

- (1) Ogunbiyi, B. and Norrish, J., 1996, "GMAW Metal Transfer and Arc Stability Assessment Using Monitoring Indices," *Computer Technology in Welding, Six International Conference*, Lanaken, Belgium, 9-12 June.
- (2) Arai, T., Kobayashi, T., Yamada, T., Rokujo, M., Hirakoso, K. and Kaneko, T., 1983, "The Investigation for Arc Phenomena by Means of a Computer," *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, Vol. 1, No. 3, pp. 15~20.
- (3) Lucas, W., 1987, "Microcomputer System, Software and Expert System for Welding Engineering," *Welding Journal*, Vol. 66, No. 4, pp. 19~30.
- (4) Mita, T., Sakabe, A. and Yokoo, T., 1988, "Quantitative Estimates of Arc Stability for CO<sub>2</sub> Gas Shielded Arc Welding," *Welding International*, No.2, pp. 152~159.
- (5) Shinoda, T. and Nishikawa, H., 1995, "Monitoring and Signal Processing of Short Circuiting Metal Transfer of Metal Active Gas Welding Process," *Proceedings of the Int. Conf. On the Joining of Materials*, JOM-7, May 31-June 2, Helsingor,

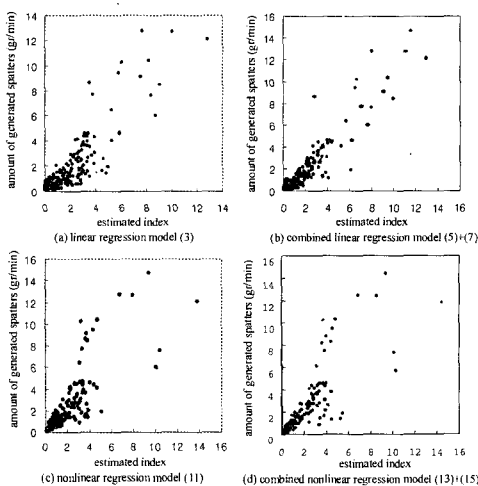


Fig. 5 Relationship between the estimated arc stability index and the weight of spatters with different regression models

- Denmark, pp. 558~565.
- (6) Rehfeldt, D., Bollmann, A., Korbe, T., Kost N. and Rostek, W., 1991, "Computer-Aided Quality Control by Process Analyzing Monitoring and Documentation," *Proceedings of the Int. Conf. On the Joining of Materials*, JOM-5, May 10-12, Helsingor, Denmark, pp.11~16.
- (7) 원윤재, 부광석, 조형석, 1990, "GMAW 공정에서 아크 안정성의 실시간 측정," 대한용접학회지, 제 8 권, 제 1 호, pp. 31~42.
- (8) 강성구, 무형순, 나석주, 1997, "스패터 양을 이용한 아크 안정성 판별에 관한 연구," 대한용접학회지, 제 15 권, 제 6 호, pp. 527~534.