

研究論文

스패터 양을 이용한 아크 안정성 판별에 관한 연구

강성구* · 문형순** · 나석주***

A study on determining arc stability using weight of spatter

S. K. Kang*, H. S. Moon** and S. J. Na***

Keyword : Arc stability(아크 안정성), Weight of spatter(스패터 양), Peak current(최대 전류), Arcing time(아크 시간), Current at start of short circuit(단락 시작시 전류 크기), Current slope at start of short circuit(단락 시작시 전류 기울기), Short circuit time(단락 시간)

Abstract

For analyzing the characteristics of arc welding processes, an algorithm is necessary to determine the metal transfer mode, arc stability and weld quality. In this study, the weight of spatter during welding was selected for determining the arc stability, which is very relevant to the occurrence of spatter. Weld spatter occurs mainly at the moment when the short circuit is formed and also when it is broken causing the arc to restrike. Based on this fact, the arc stability can be determined by finding the suitable parameters of welding current and arc voltage which influence the weight of spatter. Through various welding experiments, the peak current, the arcing time, the short circuit time, the current and its slope at the start of short circuit were found mainly to influence the weight of spatter. For the convenient usage, an index was proposed by combining all these parameters. It was found that the index is very effective for determining the arc stability.

※ 1997년 3월 27접수

* 비회원, 한국과학기술원 기계공학과

** 정회원, 현대중공업(주) 현대중합연구소

*** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

1. 서 론

최근 들어 컴퓨터의 처리 속도 증가, 고속으로 데이터를 측정할 수 있는 장비들의 발달 그리고 다양한 주변기기 및 센서들의 개발로 인해 비선형적인 요소와 복잡한 현상을 동반하는 용접 공정을 해석하고자 하는 움직임이 활발히 진행되어 오고 있다. 이러한 용접공정 해석을 위한 접근 방법 중에서 우선적으로 결정해야 할 사항으로는 비선형적인 요소와 복잡한 물리현상들을 실제적으로 해석하기 위한 측정 변수의 선정과 이러한 변수를 사용하여 물리적인 현상을 적절히 표현할 수 있는 알고리즘의 개발 등을 들 수 있다. 최근까지의 연구 결과를 바탕으로 해서 측정 변수들의 예를 들면 용접 전류(welding current), 아크전압(arc voltage), 음향신호(acoustic signal), 아크 광(arc light), 그리고 온도(temperature) 등이 있다. 용접 공정을 분석하기 위한 알고리즘으로는 확률론적 접근(statistical approach), 다양한 실험치를 이용한 인공지능적 접근(artificial intelligence approach) 그리고 경험치를 바탕으로 인덱스(index)를 선정하여 이를 직접 사용하는 방법 및 인공 지능과 결합된 형태를 이용하는 방법 등이 있다. 또한 용접 공정의 특성을 분석하기 위해서는 크게 금속이행모드(metal transfer mode), 아크의 안정성(arc stability), 그리고 용접 품질(weld quality) 등을 판별할 수 있는 알고리즘의 개발이 필수적이라 할 수 있다. 지금까지 용접 공정의 특성을 분석하기 위해서 나온 알고리즘은 다음과 같다. 금속이행모드에서는 Adam은 용접 전류, 전압 신호를 측정하고 이를 주파수 분석 및 확률론적 파라메타를 통하여 이행 모드를 판별하였다¹⁾. Stroud등은 용접 전류, 아크 전압 그리고 음향신호를 측정한 후 이를 신경 회로망의 입력으로 사용하고 이것으로 금속이행모드를 선정하였다²⁾. Wang등은 변화하는 전압 값을 측정하여 전압의 변동치와 금속이행모드와의 관계를 설정하였다³⁾. Ogunbiyi등은 전압, 전류 파형에서 특징이 될 만한 변수를 선정하여 인덱스를 형성하고 이를 이용하여 금속이행모드 및 아크의 안정성을 판별하였다⁴⁾. 아크의 안정성에서 Mita등은 다양한 실험 조건 하에서 경험적으로 안정된 아크의 용접 조건을 선정 한 다음 이를 이용해서 아크의

안정성을 결정하기 위한 인덱스를 정의 하였다⁵⁾. Shinoda등은 단락 모드에서 측정된 전압, 전류 신호를 이용하여 아크의 안정성을 판별할 수 있는 인덱스를 제안하였다⁶⁾. Rehfeldt등은 아크 전압을 측정 변수로 선정하여 단락 모드에서의 안정성을 판별하였다⁷⁾. 측정된 전류와 전압을 이용하여 확률론적 접근을 통해서 아크의 거동과 규칙성을 기술하고자 하는 접근 방법도 있으며⁸⁾, 전류, 전압 그리고 와이어의 송급 속도를 측정 변수로 선정하여 확률함수, 오실로그램 그리고 히스토그램으로 아크의 안정성과 금속이행 특성을 분석하고자 하는 연구가 진행되어 오고 있다^{9,10)}. 용접 품질에서는 Matteson등은 음향신호와 용접 품질과의 관계를 표현하였다¹¹⁾. Reilly등은 용접부의 불연속점을 인식 하기 위해서 신경 회로망을 사용하였다¹²⁾. Matteson등은 보호 가스의 유량에 따른 용접 품질을 예측하였다¹³⁾. Na등은 단락 모드의 전류, 전압을 측정하고 이 크기와 용접 품질과의 관계를 규명하였다¹⁴⁾. Luksa등은 단락 모드의 음향신호와 용접 품질과의 관계를 표현하였다¹⁵⁾.

본 논문에서는 용접 공정을 해석하고자 하는 현재의 추세에 맞추어서 용접 공정에 가장 큰 영향을 미치는 아크 안정성에 관하여 논하였다. 이를 위해서 안정성을 판별하는 방법과 이와 관련된 실험 및 분석 결과를 설명하고자 하며, 부가적으로 실험 장치와 윈도우즈 프로그래밍(Windows programming)에 대해서도 설명하고자 한다.

2. 실험 장치

전체적인 시스템의 형태는 Fig. 1에 나타나 있다. XYZ 이송 장치(XYZ table), 제어기(Controller)와 용접기가 서로 인터페이스(interface)되어 있는데, XYZ 이송 장치는 상품으로 판매되고 있는 것을 사용하였고 제어기는 케이스(case)만을 구입하고 내부적인 장치와 회로는 설계 제작하였다. 위의 시스템으로 용접 현상의 특성을 분석하기 위해서 최고 샘플링 속도 330kHz를 갖는 측정보드(board)를 사용하였으며 저주파수 필터링(low pass filtering)을 통해 측정 신호의 신뢰도를 향상시키는 기능을 가진 회로를 설계 제작하였다. 또한 용접기 전원을 on/off할 수 있는 회로를 설계 제

작하였다.

제어기(Controllor)에서는 컴퓨터와 XYZ 이송 장치의 인터페이스 및 컴퓨터와 용접기와의 인터페이스가 이루어져 있다. 컴퓨터와 XYZ 이송 장치의 인터페이스를 통해 컴퓨터에서 실제 용접 현상을 수행 할 수 있도록 하였으며, 컴퓨터와 용접기 간의 인터페이스를 통해 컴퓨터에서 용접기의 전류 전압을 설정할 수 있도록 하였다.

아크 발생시 스패터를 포집하기 위해서 황동으로 포집기를 만들어 사용하였다. 310mm의 bead가 형성되는 동안의 스패터가 포집되도록 하였고, 아크 발생시와 용접이 끝날 순간의 불안정한 부분의 스패터는 포집되지 않도록 하였다. 본 실험은 SCR 용접기에서 단락 이행 모드가 잘 발생하는 저전류 영역에서 150A, 160A, 170A, 180A의 전류와 19V-24V사이의 전압의 조합으로 10 번씩 실험을 하였다. 용접 가스는 Ar 80% + CO₂ 20%이고 유량은 20l/min, 용접 토치의 속도는 6mm/sec, CTWD는 13mm이었다. 전류 전압을 7kHz의 주파수(sampling frequency)로 측정을 하여 데이터로 사용하였다.

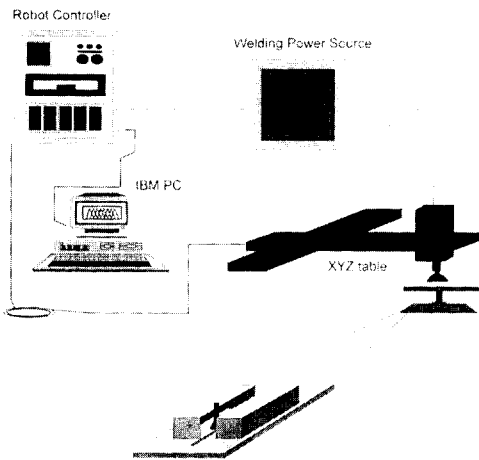


Fig 1. Overall system for experiments

3. 윈도우즈 프로그래밍 (windows programming)

측정 회로로부터 얻은 전류, 전압 혹은 부가적인 신호들을 사용자가 쉽게 알아 보고 각종 정보를 얻

을 수 있도록 하기 위해서 윈도우즈를 사용하여 프로그래밍하였다.

윈도우의 형태는 다중 문서 인터페이스(multi document interface) 형식으로 여러 개의 화면을 동시에 사용할 수 있도록 구성하였는데, 기본적인 윈도우 화면이 Fig. 2에 나타나 있다. 전류, 전압 파형을 한 화면에 각각 표시하고 평균과 표준편차를 보여 주는 오실로그래프 기능, 전류 전압 선도(V-I diagram)를 표시하는 기능, 오실로그래프 화면에서 부분 확대(zooming)하는 기능, 확률밀도함수(probability density distribution) 표시 기능, 전류와 전압 파형을 중첩하여 표시하는 기능, 여러 데이터를 읽고 각각의 평균과 표준편차를 그래프와 수치적으로 표시하는 기능, 용접기 전류 전압 설정 기능, 용접 전류 및 아크 전압 측정 기능이 개발되었다.

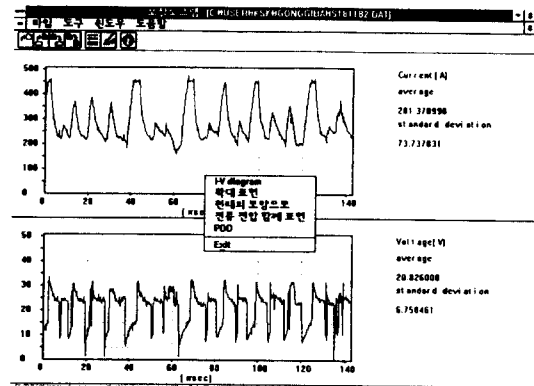


Fig 2. Current and voltage waveform display in windows

4. 아크 안정성 판별을 위한 접근 방법

본 논문에서는 아크 안정성을 판별하기 위해서 스패터를 이용하고자 한다. 스패터가 생기는 것은 아크가 꺼지고 단락 모드가 이루어지는 순간, 단락 모드가 끊어지고 아크가 다시 발생하는 순간 그리고 아크가 존재하는 시간 동안에 용접봉과 모재와의 순간적인 접촉으로 인한 순간 단락 모드가 생기는 때에 대부분 생긴다. 이것은 곧 스패터가 발생하는 것은 아크가 시작되는 때, 아크가 존재하는 시간 동안 및 아크가 꺼지는 때와 밀접한 관계성을

가지고 있다는 것을 나타낸다. 이것을 기초로하여 스패터 발생량이 아크 안정성과 곧바로 연결이 돼 있다고 말할 수 있다. 아크가 안정하면 스패터가 적게 나오게 되고 아크가 불안정하다면 스패터가 많이 나온다고 말할 수 있는 것이다. 그러므로 스패터의 양을 측정함으로써 아크 안정성을 판별할 수 있다고 사료된다. 스패터의 양에 가장 큰 영향을 주는 것은 전류와 전압이다. 그러므로 용접 전류 및 아크 전압의 파형을 분석하여 스패터 양에 영향을 주는 인자를 찾아낼 수 있으며, 인자들에 대한 수학적 분석을 통해서 아크 안정성을 수치적으로 나타낼 수 있는 하나의 인덱스를 만들 수 있다. Fig. 3은 사용된 인자를 표시하고 있다.

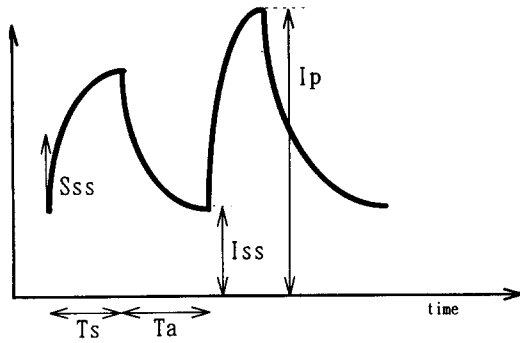


Fig 3. Definition of parameters
 I_p : Average peak current (A)
 T_a : Average arcing time (msec)
 S_{ss} : Average current slope at start of short circuit (A/msec)
 I_{ss} : Average current at start of short circuit (A)
 T_s : Average short circuit time (msec)

5. 결과 및 고찰

5. 1 인자 결정

용접 전류가 180A와 150A로 설정되었을 때 전압의 변화에 대한 스패터 양이 Fig. 4에 나타나 있는데 다른 전류에서도 비슷한 같은 경향이 있음을 알 수 있었다. 스패터 양은 와이어 100g당 발생하는 양으로 백분율(%)로 표시하였다. 180A 20V의 스패터 양이 없는데 이 조건에서는 용접이 제대로 수행이 되지 않았기 때문에 데이터로 사용하지 않았다. Fig. 4을 보면 21V 근처에서 가장 작은 양의 스패터가 생성되었고 전압이 증가 할수록 스패터 양이 증가함을 알 수 있다. 스패터의 양이 가장 적은 부분을 가장 안정한 아크가 이루어 지는 부분으로

패터가 생성되었고 전압이 증가 할수록 스패터 양이 증가함을 알 수 있다. 스패터의 양이 가장 적은 부분을 가장 안정한 아크가 이루어 지는 부분으로

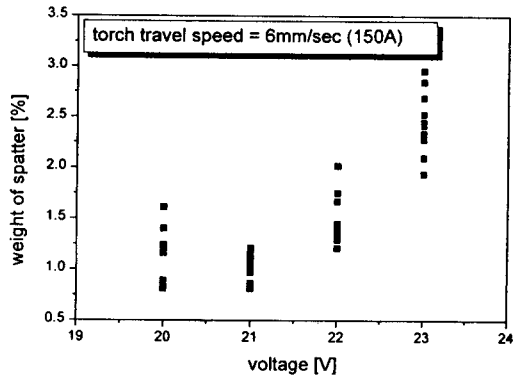
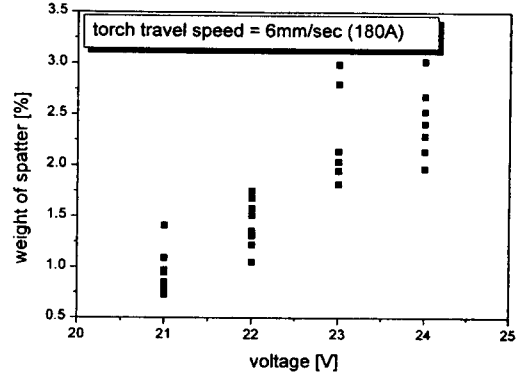


Fig 4. Relationship between spatter weight and arc voltage

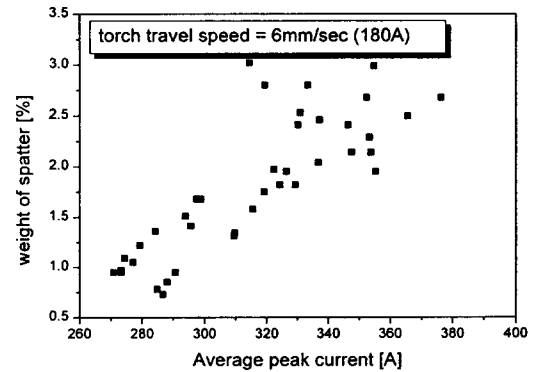


Fig 5. Relationship between average peak current and spatter weight

볼 수 있을 것이다.

Fig. 5는 180A로 설정된 용접 전류에 대한 스패터 양과 평균 최대 전류와의 관계를 나타내고 있다. 평균 최대 전류가 크면 단락 모드가 끊어져서 다시 아크가 생길 때 용융지(molten pool)와 용접봉 사이에 강한 충격파를 유발시켜 용융지의 일부와 이행이 되던 용가재를 밖으로 비산시켜 스패터를 만들게 된다고 사료된다. 스패터 양과 평균 최대 전류와의 상관관계(correlation parameter)는 150A에서 0.73, 160A에서 0.82, 170A에서 0.84, 180A에서는 0.83이었다.

Fig. 6는 180A로 설정된 용접 전류에 대한 평균 아크 시간과 스패터 양과의 관계를 나타낸 그래프이다. 평균 아크 시간이 길어지면 길어진 시간만큼 용접봉이 녹게 되어 용접봉 끝에 커다란 용적을 이루게 되고 이 용적 자체의 진동, 내부적인 폭발과 모재의 용융지(molten pool)의 진동으로 인해서 불안정한 단락(short circuit)이 일어나려고 하려는 경향이 많게 될 것이다. 평균 아크 시간과 스패터 양과의 상관관계(correlation parameter)는 150A에서 0.67, 160A에서 0.82, 170A에서 0.88, 180A에서 0.75이었다.

Fig. 7은 180A로 설정된 용접 전류에 대한 단락 시작시 평균 전류 기울기와 스패터 양과의 관계를 나타낸 그래프이다. 스패터를 줄이기 위한 파형 제어 방법중에 단락 시작할 때의 전류를 낮은 상태에서 몇 msec동안 증가하지 않도록 하여 안정한 단락 브리지(bridge)를 형성하도록 하는 방법이 있다. 실제 용접에서는 단락이 시작될 때 낮은 전류로 유지시키는 부분이 없기 때문에 단락 시작할 때의 전류 기울기로 그 부분의 영향을 보상하는 방법이 사용되어 진다. 평균 전류 기울기와 스패터 양과의 상관관계(correlation parameter)는 150A에서 0.56, 160A에서 0.60, 170A에서 0.67, 180A 0.61이었다.

Fig. 8은 180A로 설정된 용접 전류에 대한 단락 시작시 평균 전류 크기와 스패터 양과의 관계를 나타낸 것이다. 이 인자는 위에서 언급한 단락 시작시의 평균 전류 기울기와 밀접한 관계를 가지며 비슷한 효과를 가지고 있다고 사료된다. 평균 전류 크기와 스패터 양과의 상관관계는 150A에서 0.53, 160A에서 0.58, 170A에서 0.65, 180A에서 0.64이었다.

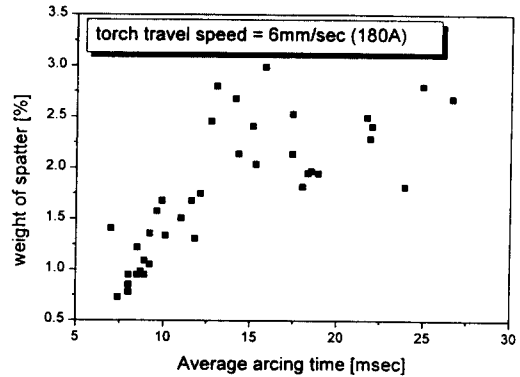


Fig 6. Relationship between average arcing time and spatter weight

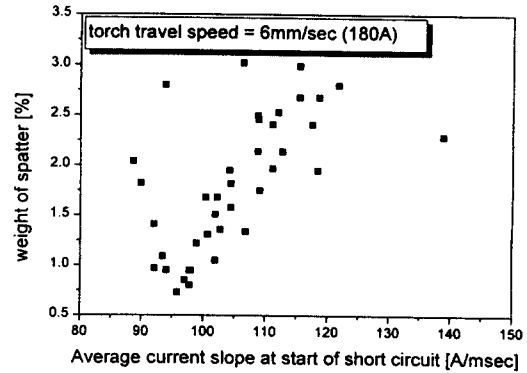


Fig 7. Relationship between average current slope at start of short circuit and spatter weight

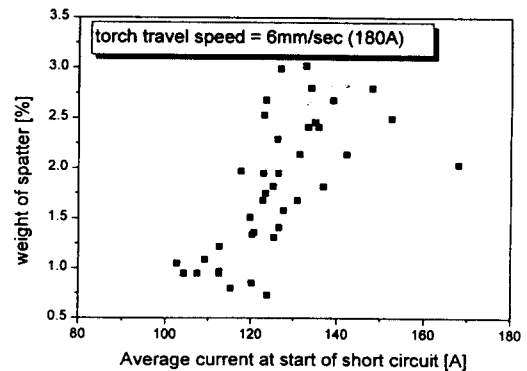


Fig 8. Relationship between average current at start of short circuit and spatter weight

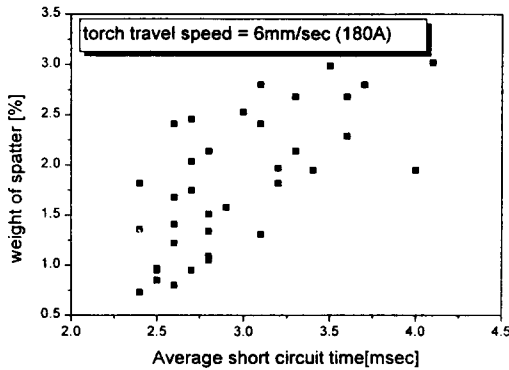


Fig 9. Relationship between average short circuit time and spatter weight

Fig. 9은 180A로 설정된 용접 전류에 대한 평균 단락 시간과 스패터 양과의 그래프를 나타내고 있다. 평균 단락 시간이 길어지면 용융지와 용적에 들어가는 입열량이 커지게 되어 접촉부가 급격하게 기화, 폭발하게 되면서 스패터가 발생하게 된다. 전류가 커짐에 따라 인자의 값이 증가하는데 이것은 전류의 값이 증가함에 따라 단위 시간당의 입열량이 증가하기 때문이다. 평균 단락 시간과 스패터 양과의 상관관계는 150A에서는 0.25, 160A에서는 0.48, 170A에서는 0.63, 180A에서는 0.68이었다. 전류의 값이 증가함에 따라서 상관관계로 비례하여 증가함을 알 수 있다.

위의 관계를 통해서 스패터 발생량과 단락횟수와의 관계를 알 수 있다. 스패터 발생량이 적을 때 아크 시간과 단락 시간이 짧고 스패터 발생량이 많을 때 아크 시간과 단락 시간이 길기 때문에 이것으로부터 단락 횟수가 많을수록 스패터 발생량이 적고 단락 횟수가 적을수록 스패터 발생량이 많음을 알 수 있다.

모든 전류에서의 각 인자들과 스패터 양과의 상관관계를 구해보면 평균 최대 전류는 0.79, 평균 아크 시간은 0.80, 단락이 시작할 순간의 평균 전류 기울기는 0.56, 단락이 시작할 순간의 평균 전류는 0.59, 평균 단락 시간은 0.59이었다.

5.2 인덱스 개발

위의 5개 인자들이 결합되어서 아크 안정성에 영향을 주기 때문에 인자들을 잘 조합하여 아크 안

정성을 수치적으로 나타낼 수 있는 인덱스의 개발이 필요하다. 본 논문에서 만들고자 하는 인덱스 형태로는 다음과 같은 3가지가 검토되었다.

$$Y = a \cdot I_p + b \cdot T_a + c \cdot S_{ss} + d \cdot I_{ss} + e \cdot T_s \quad (1)$$

$$Y = a \cdot \frac{(I_p - 256.6)}{119.7} + b \cdot \frac{(T_a - 6.0)}{20.6} + c \cdot \frac{(S_{ss} - 86.5)}{52.3} + d \cdot \frac{(I_{ss} - 100)}{67.9} + e \cdot \frac{(T_s - 2.2)}{1.9} \quad (2)$$

$$Y = I_p^a \cdot T_a^b \cdot S_{ss}^c \cdot I_{ss}^d \cdot T_s^e \quad (3)$$

(1)의 형태는 각 인자가 인덱스Y에 대해서 독립적으로 영향을 준다는 가정하에 세운 형태인데 a, b, c, d, e의 값은 각 인자가 인덱스Y에 대해 기여하는 정도를 나타내는 변수이다. (2)의 형태는 인자를 표준화한 형태인데 각 인자의 분포 값들은 그 인자의 최고 값(maximum value)와 최저 값(minimum value)의 차이 값이며 분자의 상수들은 그 인자의 최저 값이다. (2)형태도 인자가 독립적으로 아크 안정성에 영향을 준다는 가정하에 세운 형태이다. (3)의 곱하는 형태는 각 인자가 연관성을 가지고 인덱스의 값에 영향을 준다는 가정하에 세운 형태인데 a, b, c, d, e는 각 인자가 서로에 대해서 영향을 미치는 정도를 나타내는 값이다. 계수들을 정하는 근거는 실험에 사용한 용접기가 저전류에서 일관성이 있는 실험 결과를 보여주고 있기 때문에 계수들이 일정한 값을 가진다고 볼 수 있기 때문이다. 세 가지 형태를 상용 프로그램(SAS)을 이용하여서 구하였는데 그 결과는 다음과 같다.

$$Y = 0.0024224564 \cdot I_p + 0.0423768565 \cdot T_a - 0.0048138156 \cdot S_{ss} - 0.0019584840 \cdot I_{ss} - 0.0439960351 \cdot T_s \quad (1)'$$

$$Y = 0.3412428327 \cdot \frac{(I_p - 256.6)}{119.7} + 0.05046605655 \cdot \frac{(T_a - 6.0)}{20.6} + 0.0231501145 \cdot \frac{(S_{ss} - 86.5)}{52.3} + 0.1390302071 \cdot \frac{(I_{ss} - 100)}{67.9} + 0.1302515125 \cdot \frac{(T_s - 2.2)}{1.9} \quad (2)'$$

$$Y = I_p^{-0.747980422} \cdot T_a^{1265516153} \cdot S_{SS}^{-0.518077797} \cdot I_{SS}^{0.438425326} \cdot T_s^{0.462861984} \quad (3)'$$

세 가지 형태로 구한 값과 실제 스패터 양과의 상관관계를 구하여 비교 분석하였을 때, (1)'는 0.783404, (2)'는 0.770072이고 (3)'는 0.710222의 값을 가졌다. 상관관계 값으로 볼 때 (1)'과 (2)'가 보다 더 적절한 인덱스로 생각하게 되었는데, 용접 실험에서 I_p 와 T_a 가 스패터 양과 0.8정도의 상관관계를 갖는데 비해서 S_{SS} , I_{SS} , T_s 는 0.6정도의 상관관계 값을 나타내었기 때문에 (2)'를 인덱스로 사용하기로 하였다. (2)'는 아크가 안정할 수록 0에 가까운 값을 가지게 되고 불안할 수록 1에 가까운 값을 가지게 된다.

(2)'의 인덱스가 일반 용접 조건에서 적용 가능한지를 테스트해 보기 위해서 위에서 사용하지 않은 데이터들을 사용하여 예측한 인덱스 값과 실제 스패터로 구한 인덱스 값을 비교하여 Figure. 10에 나타내었다. 실제 스패터로 구한 인덱스는 스패터가 최소로 발생한 경우와 최대로 발생한 경우의 스패터 무게차로 실제 스패터에서 최소 스패터 무게를 뺀 것을 나눈 것이다. 예측한 값이 실제 값을 잘 나타내고 있음을 알 수 있었다. 인덱스 값이 가장 작을 때, 평균 최대 전류의 값이 250A근처의 안정한 값을 중심으로 분포하여 아크 발생이 안정되고, 평균 아크 시간과 평균 단락 회로 시간이 짧아서 적당한 입열이 되며, 단락 시작시 평균 전류 크

기 및 평균 전류 기울기가 작은 값을 가지고 있어서 안정한 브리지를 형성할 수 있었다. 인덱스 값이 가장 큰 경우는 평균 최대 전류 값이 350A 근처의 높은 값을 가지고 있어서 충격과 등으로 인해서 아크 재 발생시 불안하며, 평균 아크 시간이 길어 용접봉 끝단에 큰 용적을 형성하게 되고, 평균 단락 시간이 길어서 입열량이 많아 아크가 불안하게 된다. 또한 단락 시작시의 평균 전류 크기와 평균 기울기가 커서 안정한 단락을 형성하지 못하는 불안정한 요인을 가지고 있음도 알 수 있었다.

6. 결 론

저 전류 영역에서 전압이 커짐에 따라 스패터 양도 증가하는 것이 일반적인 경향인데 단락 이행 모드에서 이러한 스패터 양으로 아크 안정성을 나타내었다. 아크 안정성에 영향을 미치는 변수로는 평균 최대 전류(Average peak current), 평균 아크 시간(Average arcing time), 단락 시작 시의 평균 전류 기울기(Average current slope at start of short circuit), 단락 시작 시의 평균 전류 크기(Average current at start of short circuit), 평균 단락 시간(Average short circuit time) 등이 결정되었는데, 이러한 인자들로부터 아크 안정성을 표현하는 인덱스를 만들 수 있었다. 제안된 인덱스는 저 전류 영역에서 아크 안정성을 판단하는데 매우 효과적임을 알 수 있었다.

후 기

본 논문은 통상산업부에서 시행하는 공업기반기술사업 "용접 전류 및 전압 파형 분석을 위한 S/W개발" 연구의 일부를 정리한 것이다. 이에 관계자 여러분에게 감사드리며, 특히 참여 기업으로서 본 과제의 효과적인 수행에 큰 도움을 주신 LG산전(주), 민텍리서치, 신성기전(주), 조흥전기산업(주), 한국용접공업(주)의 담당자들에게 감사한다.

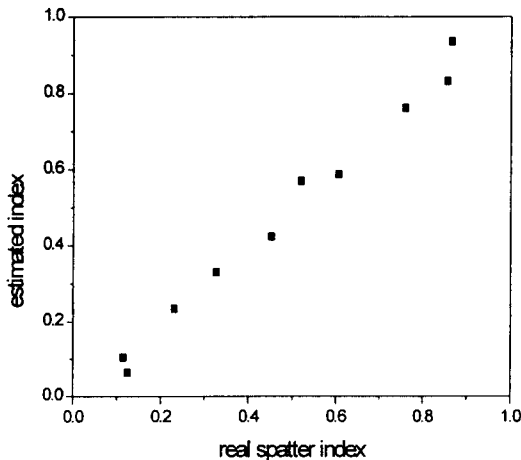


Fig 10. Test of selected index

Reference

1. G. Adam and T. Siewert : Sensing of GTAM droplet transfer modes using ER100S-1 electrode, *Welding Journal*, Vol. 69, No.3 (1990), pp103s-108s
2. Stroud, Vincent and McCardle : The application of neural networks to the classification of metal transfer mode in metal inert gas welding, *Proc. of the Int. Conf. on the Joining of Materials*, May 31 - June 2, (1995), pp. 459-468
3. W. Wang, S. Liu and J. E. Jones : Flux cored arc welding; Arc signals processing and metal transfer characterization, *Welding Journal*, Vol. 74, No.11, (1995), pp.369s-377s
4. B. Ogunbiyi and 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)
5. T. Mita, A. Sakabe and T. Yokoo : Quantitative estimate of arc stability for gas shielded arc welding, *Welding International*, No.2, (1988), pp.152-159
6. T. Shinoda and H. Nishikawa : 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*, May 31 - June 2, (1995), pp. 558-565
7. D. Rehfeldt and Th. Schmitz : Fuzzy Logic in Monitoring of Arc Welding, *Proceedings of the Int. Conf. on the Joining of Materials*, May 31-June 2, (1995), pp. 477-486
8. D. Fehfeldt, A. Bollmann, T. Korbe, N. Kost and W. Rostek : Computer-aided quality control by process analyzing monitoring and documentation, *Int. Conf. for the Joining of Material JOM-5*, 10-12th May, Helsingor, Denmark, (1991), pp.11-16
9. V. Ponomarev, B. Lindberg and O. Al-Erhayem : JOM-ARC analyser for arc welding process, *Proceedings of the Int. Conf. on the Joining of Materials*, May 31 - June 2, (1995), pp.612-615
10. S. J. Na, H. S. Moon : A Study on High Speed Measuring for Welding Process Signals and Signal Analysis, *KWS Autumn Conference*, October, Seoul, (1993), pp.37-40
11. A. Matteson, R. Morris and R. Tate : Real-time GMAW quality classification using an artificial neural network with airborne acoustic signal as inputs, *Int. Conf. on Computerization of Welding Information IV*, November 3 -6, Orlando, Florida, (1992), pp.189-197
12. R. Reilly, X. Xu and J. E. Jones : Neural network application to acoustic emission signal processing, *Proceedings of the Int. Conf. on the Joining of Materials*, May 31-June 2, (1995), pp.146-160
13. A. Matteson, R. Morris : Intelligent assessment of proper arc weld execution, *Int. Conf. Proc. on Modeling and Control of Joining Processes*, December 8-10, (1993), pp.353-360
14. S. J. Na, S. Sin and J. W. Kim : A Study on Seam Tracking and Arc Data Monitoring for Sheet Metal Welding, *Int. Conf. on Computerization of Welding Information IV*, November 3-6, Orlando, Florida, (1992), pp.240-250
15. K. Luksa and A. Klimpel : Using Arc Sound to GMA Welding Process Evaluation, *Proceedings of the Int. Conf. on the Material*, May 31 - June 2, 1995, pp.403-408