

CO₂ 아크 용접의 단락이행 모드에 있어서 다중회귀분석을 통한 아크 안정성 평가

A study on the Estimation of arc stability using multiple regression analysis in short-circuit transfer mode of CO₂ arc welding

강문진*, 우재진**, 이세현***, 임기원***

* 포항산업과학연구원 접합가공연구팀

** 대우기전 기술연구소

*** 한양대학교 정밀기계과

1. 서론

소모성 전극을 사용하는 가스 메탈 아크 용접(Gas Metal Arc Welding, GMAW)은 용접재료의 용융현상에 관계된 복잡하고 비선형적인 힘과 에너지의 작용에 의해 용적이행이 매 순간마다 비선형적으로 변화하는 공정의 특성을 가지고 있다. 특히 CO₂ 아크 용접은 분위기 가스로 활성 가스인 CO₂ 가스를 사용하므로써, 아크 기둥에서의 변동이 더욱 심해져 용접중의 전류변동이 더욱 심해지거나, 용적이행이 매우 불규칙해져 많은 양의 스파터를 유발시킨다. 즉 스파터란 아크가 불안정하거나 불규칙적인 거동에 의해 발생한다는 의미를 내포하는 것으로 아크의 안정성을 예측하는 것은 용접품질의 고급화와 자동화를 위해서 매우 중요한 의미를 가진다.

본 연구에서는 인버터 타입의 용접기를 사용하여 CO₂ 아크 용접 시 발생된 스파터 양을 측정하고, 이 스파터 양과 용접전류, 전압 파형을 형성하는 인자들의 상관관계를 분석하고 이들 파형인자들 중 스파터 발생에 상당한 영향을 미치는 인자들을 선정하여 여러 경우의 모델을 수립, 다중회귀분석을 실시하여 이들 모델들로 부터 스파터 양을 예측할 수 있는 인덱스를 추출하였다. 또한 이들 인덱스가 각 전류, 전압의 영역에 있어서 발생한 스파터 양을 얼마나 추종하는가를 비교하여 검토된 여러 인덱스 중 스파터의 발생을 가장 적합하게 묘사하는 아크 안정성 인덱스 모델을 제안하였다.

2. 실험장치 및 방법

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 용접전류와 전압을 이용하였으며, 용접전류의 계측은 홀 센서를 이용하였고, 용접 전압은 용접전원 출력 단자전압에 저항을 이용한 간단한 회로를 구성하여 데이터 수집장치의 입력조건에 알맞게 강압시켰다. 이렇게 얻은 용접변수 신호들은 200 kHz 급 데이터 수집장치에 입력되어 A/D 변환되고, 이때 신호에 함께 실린 노이즈는 200Hz 의 제거 주파수(cut-off frequency)를 갖는 디지털 로우 패스 필터(digital low pass filter)를 사용하여 제거하였다. 이렇게 필터링된 데이터들은 제어부인 컴퓨터 상에서 제어처리가 수행되었고, 이런 과정을 거쳐서 제어 출력이 되는 용접전압은 D/A 변환부를 통해 용접기로 인가된다. 한편 용접 공정은 Nachi 사의 용접전용 로봇과 350A 급 정전압 제어형 인버터(inverter) 타입의 용접기를 사용하여 수행하였고 스파터 포집장치는 황동을 사용하여 Fig. 1의 상세도면과 같이 제작하였다.

스파터 발생량 측정을 위한 용접실험은 단락이행 현상이 잘 발생하는 용접조건으로써, 용접전류는 150, 200, 225, 250A 로 하였고, 용접전압은 19V-27V 까지 적절하게 변화시켰으며 한 조건에서 6 번씩 용접을 실시하였다. 사용된 용접소재는 SS41, 두께는 6mm 를 사용하였다. 용접재료는 지름이 1.2mm 인 ER70-S 이었으며, 스파터 발생량을 포집하기 위해서 비드 온 플레이트(bead-on-plate)용접을 실시하였으며, 용접길이는 320mm 로 하였다. 이때 용접속도는 5mm/sec 로 하였으며 팁-모재간 거리(contact tube to workpiece distance, CTWD)는 200 A 이하에서는 15mm, 200 A 이상에서는 20mm 로 하였다. 보호가스로는 100% CO₂ 가스를 사용하였으며 가스유량은 20 liter/min 으로 하였다 데이터 샘플링 속도는 초당 5000 개이었으며, 총 샘플링 량은 용접 시작 후 10 초가 경과한 시점에서 20 초 동안 수집하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 아아크 전압에 따른 스페터 발생특성

Fig. 2 는 용접전류를 각각 150, 200, 225, 250 A 로 설정하였을 때 용접전압 변화에 따른 스페터 발생량의 거동을 나타낸 것이다. 그림에 의하면 각각의 전류에 있어서 스페터 발생이 상대적으로 적게 발생하는 어떤 적정전압이 존재함을 알 수 있는데, 이 전압을 중심으로 하여 전압이 증가하거나 감소할수록 스페터의 발생량이 증가함을 알 수 있다. 이때 스페터의 양이 가장 적은 부분을 아아크의 상태가 가장 안정하다고 가정할 수 있다.

3.2 아크 안정성 평가 인덱스의 구성요소 결정

단락이행 mode 에 있어서 전형적으로 나타나는 전류전압 파형을 Fig 3 에 나타내었다. 본 연구에서는 아크 안정성과 스페터 발생량에 영향을 미칠 것으로 일반적으로 알려진 파형요소들을 먼저 13 개 정하고, 용접 시험방법에 따라 용접조건별로 용접할 때 저장시킨 용접전류와 전압 파형으로부터 이들 파형요소들의 값을 추출하였다.

값이 추출된 파형요소들은 단락이행 주기(T), 아크 시간(Ta), 단락 시간(Ts), 단락 최고전류(Ip), 단락순간 전류(Is), 단락이행 평균전류(I), 단락 이행주기의 표준편차(s[T]), 아크 시간의 표준편차(s[Ta]), 단락시간의 표준편차(s[Ts]), 평균 아크전류의 표준편차(s[I_a]), 단락순간 전류의 표준편차(s[Is]), 전체 전류값의 표준편차(s[I]), 단락 최고전류의 표준편차(s[Ip]), 이었다.

이들 파형요소들이 아크 안정성에 어느 정도 영향을 미치는 가를 분석하기 위해서 이들 파형요소들과 스페터 발생량과의 공상관분석(correlation analysis)을 실시하였다. Table 1 은 이때의 공상관분석을 실시한 결과 각 파형요소들과 스페터 발생량 그리고 각 파형요소끼리의 상관성을 정리하여 나타낸 것이다.

Table 1 에 의하면 스페터 발생량과 각 파형요소들의 상관계수가 나타나 있는데, 이 값이 낮다고 상관성이 없어지는 것이 아니라 단지 선형적 상관성이 없을 뿐이므로 상관계수에 의한 아크 안정성 평가 인덱스의 인자결정은 바람직 하지 않다. 그러나 Table 1 에서 반드시 검증되어야 하는 것은 각 파형요소끼리의 상호상관관계의 검증이다. 즉 T와 Ta 그리고 s[T]와 s[Ta]의 상호상관성은 거의 1 에 가깝고 따라서 이들은 스페터 발생량에 같은 효과를 나타내고 있다고 생각할 수 있다. 따라서 이들 파형요소 중에서 Ta와 s[Ta]를 제거하는 것이 필요하다.

3.3 선형 회귀 모델에 의한 아크 안정성 평가 인덱스의 개발

용접전류 및 전압 파형요소들 중 Ta와 s[Ta]를 제외한 11 개의 파형요소들을 이용하여 식(1)과 같이 아크 안정성 평가를 위한 선형적인 모델을 구성하였다.

$$Y = a + bT + cT_s + dI_p + eI_s + fI + g s[T] + h s[T_s] + i s[I_a] + j s[I_p] + k s[I] \quad (1)$$

상용 통계분석 프로그램인 SAS 를 이용한 다중회귀분석을 실시하여 스페터 발생량에 대한 이 모델의 적합성과 구성 인자들의 신뢰범위를 조사하였다. 식(1)의 인자들을 모두 사용한 경우의 아크 안정성 평가 인덱스의 다중상관계수는 0.9684 이었고, 이 값은 스페터 발생량을 매우 정확하게 표현할 수 있다. 그러나 이들 식(1)의 구성인자들 각각이 식(1)의 회귀 모델에 어느정도 신뢰가 높게 기여하는 가를 확인하여 일부의 구성인자가 오히려 회귀 모델의 높은 상관성에 오차를 일으키면 이러한 인자들은 제거하여야 한다. 따라서 식(1)의 구성인자들이 신뢰될 수 있는 범위를 알기 위해, 다시말해서 유의하지 않을 확률을 알기 위해서 유의확률을 평가하였다. 대부분의 인자들은 식(1)과 스페터의 상관계수를 유지하는데 유의하지 않을 확률이 상당히 낮으나, s[T]와 s[I_a], s[I_s], s[I]는 각각 75.29%, 88.44%, 79.62% 및 46.41%로 유의 확률이 매우 높고, 따라서 이들 인자들이 식(1)의 회귀 모델에 들어감으로써 오히려 모델의 정확도를 저하시키는 결과를 초래한다.

따라서 s[T]와 s[I_a], s[I_s], s[I]를 제거한 수정 회귀모델 식(2)를 구성하였다.

$$Y = a + bT + cT_s + dI_p + eI_s + fI + h s[T_s] \quad (2)$$

식(2)를 이용하여 회귀 모델과 스페터 발생량의 다중상관관계를 SAS 를 이용하여 다시 분석하였다. 수정 모델의 다중상관계수는 0.9682 로 식(1)의 다중상관계수 0.9684 에 비해서 상관성의 정확도를 0.02% 저하되는 정도일 뿐, 스페터 발생량의 예측에는 거의 차이가 없다. 이 경우에

있어서도 식(2)의 구성인자들의 유의확률을 다시 검증하여 식(2)의 회귀 모델의 정확성을 보증하였다. 따라서 식(2)의 인자들의구해진 계수들을 적용하면 식(2)는 식(2)'로 표현될 수 있다.

$$Y = -0.450906 + 0.17055 T - 1.053853 T_s - 0.003596 I_p - 0.0494 I_s + 0.0469128 I - 0.691385 s[T_s] \quad \text{---(2)'}$$

3.4 비선형 회귀 모델에 의한 아크 안정성 평가 인덱스의 개발

전술한 바와 같이 상관계수가 낮다고 할지라도 이는 선형적 관계가 낮은 것으로서, 어떤 경우에는 비선형적인 관계가 매우 높을 수도 있다. 이를 위하여 비선형 회귀모델을 식(4)와 같이 구성하였다.

$$Y = a \cdot T^b \cdot T_s^c \cdot I_p^d \cdot I_s^e \cdot I^f \cdot s[T]^g \cdot s[T_s]^h \cdot s[I_a]^i \cdot s[I_s]^j \cdot s[I_p]^k \cdot s[I]^l \quad \text{---(3)}$$

식(3)의 선형다중분석을 SAS 를 이용하여 실시하였다. 식(3)의 다중상관계수는 0.9551 로써 식(1)의 상관계수보다 다소 낮은 값을 나타내었다. 그러나 이 값의 차는 매우 낮은 것으로서 스파터 발생량의 추정에는 큰 영향을 미칠 것으로는 생각되지 않고, 후에 인덱스 적합성의 검증에서 선형 회귀 모델과의 성능평가를 실시하였다. 또한 식(3)을 구성하는 인자들의 유의확률을 검증하였다. I_s , $s[I_s]$, $s[I_p]$ 및 $s[I_p]$ 가 유의확률이 다소 높아 스파터 예측의 정확성에 오차를 유발시킬 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 이러한 인자들을 제외한 수정 비선형 회귀 모델을 식(3)'와 같이 제안하였다.

$$Y = 4.379 \times 10^{-6} \cdot T^{1.076} \cdot T_s^{-2.074} \cdot I_p^{-5.38} \cdot I^{3.4622} \cdot s[T]^{1.3084} \cdot s[T_s]^{-1.4628} \cdot s[I]^{4.8505} \quad \text{---(3)'}$$

3.5 스파터 발생량에 대한 아크 안정성 평가 인덱스의 예측 성능

Fig. 4 는 앞서 서술한 두개의 선형 아크 안정성 평가 인덱스와 한 개의 비선형 아크 안정성 평가 인덱스 각각에 대한 스파터 발생량 예측성능을 평가한 것이다.

그림에서 보던 이들 모델들은 스파터 발생량과 매우 선형적 관계를 나타내고 있는데, 선형모델의 경우 거의 차이를 나타내지 않았음을 확인할 수 있다. 한편 선형 인덱스 모델은 비선형 인덱스 모델에 비해 잔차도가 비교적 좁게 분포하는 특성을 나타냄으로써 전체적으로 스파터 발생량을 예측하는 데에는 보다 좋은 성능을 보이고 있으나 예측값이 1 이하의 낮은 값에서는 비선형 인덱스 모델의 경우가 실제 스파터 발생량을 매우 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 스파터 발생량(아크 안정성)의 잘못된 예측을 발생시킬 수 있음을 알 수 있다.

3.6 최적 아크 안정성 평가 인덱스의 선정

이상과 같이 CO₂ 용접의 단락이행영역에서 제안된 선형 및 비선형 아크 안정성 평가 인덱스와 스파터 발생량의 다중상관계수는 선형 회귀 인덱스 모델이 0.9682 로 가장 우수하였으며 또한 이들 인덱스의 성능평가 결과, 실제 스파터 발생량을 예측함에 있어서도 선형 인덱스 모델의 예측성능이 비선형 인덱스 모델의 예측성능보다 전반적으로 우수함을 확인할 수 있었다. 특히 스파터 발생량을 예측함에 있어서 비선형 인덱스 모델은 선형 인덱스 모델에 비해서 계산시간이 길어지는 단점이 있으므로 동일한 예측성능 결과에 비추어 선형 인덱스 모델이 최적의 아크 안정성 평가 인덱스 모델로 적합할 것으로 생각된다.

4. 결 론

CO₂ 아크 용접의 단락이행영역에 있어서, 용접전류와 전압 파형과 스패터 발생량에 입각하여 아크 안정성을 평가하고자 시도하였다. 이를 위하여 이들 파형을 구성하는 요소들과 스패터 발생량사이의 상관성을 다중회귀분석에 의해서 선형 회귀 모델과 비선형 회귀 모델을 제안하였고, 이들의 성능평가를 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 아크의 안정성과 스패터의 발생량을 매우 정확하게 예측할 수 있는 새로운 아크 안정성 평가 인덱스를 제안하였다.
2. 아크 안정성 평가 인덱스를 구성하는 모델로는 선형 회귀모델이 비선형 회귀모델보다 다소 우수하였다.
3. 최적 아크 안정성 평가 인덱스를 구성하는 파형 인자들은 단락이행주기, 단락시간, 단락최고전류, 단락이행 한 주기의 평균전류 및 단락시간의 표준 편차이었다.

Reference

1. Arai, et al., " The investigation for 아크 Phenomena by means of a computer ", Quarterly Journal of the Japan Welding Society , Vol1, No3, 1983, pp 15-20.
2. W. Lucas , " Microcomputer system, Software and Expert system for Welding Engineering " , Welding Journal, 1987(4), pp 19-30
3. T.mita, et al., " Quantitative estimates of 아크 stability for CO2 gas shielded 아크 welding ", Welding International, No.2, 1988 , pp152-159.
4. S.Liu, et al., " Metal transfer in Gas Metal 아크 Welding : Droplet rate " , Welding Journal(supplement), 1989(2), pp 52-58
5. 신현욱 외, " GMAW 에서 와이어 송급속도의 변동이 아크 안정성에 미치는 영향에 관한 연구 ", Journal of KWS, Vol 13, No4, 1995(12), pp 340-357
6. T yamada, et al., " Fluctuation of the wire feedrate in Gas Metal 아크 Welding " , Welding Journal, 1987(9), pp 35-42.
7. Sotoshi Yomane, et al., " Fuzzy control of wire feed rate in robot welding " , Fuzzy logic Technology and Applications, 1994, pp 312-316
8. 강봉용 외, " CO2 용접의 스패터 발생에 미치는 용적이행 모드의 영향 ", Journal of KWS, Vol15, No ,1997(4) , pp 140- 148

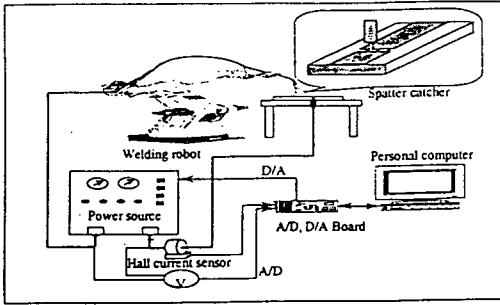


Fig. 1 Configuration of experimental set up

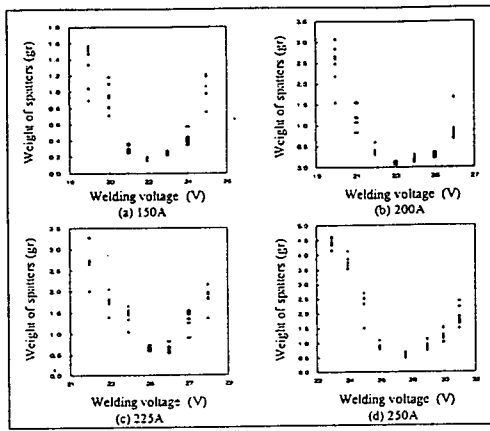


Fig. 2 The characteristics of spatter generation in change of the arc voltage at different welding current

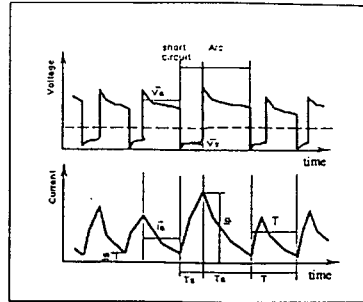


Fig. 3 Waveforms of welding voltage and current in short-circuiting mode

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

	s(T)	s(T _a)	s(T _b)	s(I _a)	s(I _b)	s(I _c)	s(I _d)	T	T _a	T _b	I _a	I _b	I _c	I _d	Spatter
s(T)	1														
s(T _a)	0.9987	1													
s(T _b)	0.6839	0.6522	1												
s(I _a)	0.7168	0.7031	0.7990	1											
s(I _b)	0.6165	0.6094	0.6799	0.9174	1										
s(I _c)	0.7288	0.7090	0.8267	0.6467	0.6093	1									
s(I _d)	0.7327	0.7196	0.8296	0.9564	0.8426	0.6362	1								
T	0.8383	0.8760	0.3536	0.4254	0.4279	0.5417	0.4733	1							
T _a	0.8260	0.8464	0.2653	0.3481	0.3607	0.4983	0.3791	0.9920	1						
T _b	0.5663	0.5548	0.7609	0.7131	0.6428	0.5203	0.8516	0.4514	0.3349	1					
I _a	0.5790	0.5963	0.3306	0.6289	0.6305	0.3293	0.6983	0.6971	0.6393	0.6813	1				
I _b	-0.504	-0.475	-0.791	-0.785	-0.615	-0.468	-0.798	-0.052	0.0320	-0.612	-0.157	1			
I _c	-0.158	-0.133	-0.248	-0.068	0.0486	-0.121	-1E-04	0.2023	0.1920	0.1525	0.5780	0.5256	1		
I _d	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	

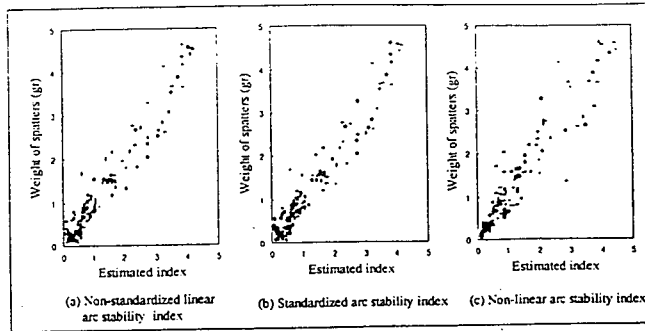


Fig. 4 Relationship between the estimated arc stability index and the weight of spatters with different regression models