

GMA 용접에 있어서 아크 안정화를 위한 퍼지제어기 개발에 관한 연구

강문진* 이세현**

Development of Fuzzy Controller for Stabilizing the Arc State in Gas Metal Arc Welding

Moon Jin Kang* and Se Hun Rhee**

ABSTRACT

The weld quality of CO₂ arc welding is closely related to the arc stability. As the characteristics of the arc are excessively complex and nonlinear, it is not easy to make the arc model as mathematical form and to control the arc state to be stabilized. This paper was aimed to estimate the arc stability and to control for stabilizing the arc state in short circuit metal transfer mode of CO₂ arc welding. For these purposes, the behaviors of arc stability was investigated at different welding conditions using Mita's arc stability index, and the fuzzy control algorithm which uses the arc stability index as control input and the arc voltage as control output was developed. In the control of the arc stability, the experiments of two cases were performed; the case of setting an initial welding voltage arbitrarily, the case of the step change in workpiece shape. Obtained results were as follows; Mita's arc stability index was able to be estimated qualitatively in the case of using the inverter type welding power source and the control performance for stabilizing the arc status was excellent in the case of existing step change disturbance.

Key Words : Short-circuit transfer mode(단락이행 모드), CO₂ arc welding(CO₂ 아크 용접)
Arc stability(아크 안정성), Mita's index(Mita 인덱스),
Fuzzy control algorithm(퍼지제어 알고리즘)

1. 서론

용접 공정의 자동화는 열악한 작업환경에서의 작업자를 대체한다든지, 생산성을 향상시킨다든지 또는 용접품질을 향상시킬 목적으로 최근 많은 연구가 행해져 왔다. 특히 우수한 용접부 품질은 용접자동화에 있어서 가장 기본적으로 요구되는 사항이다. 수동 용접에서는 숙련된 용접사가 용접과정중에 일어나는 상황을 다양한 감각 기관을 통하

여 직접 감지하고, 용접품질에 대한 주관적인 평가를 한 후, 적절한 조작을 시도하므로써 우수한 용접품질을 얻는다. 따라서 자동 용접에서도 균일한 품질의 용접부를 얻기 위해서는 용접품질에 영향을 미치는 인자들을 감지하고 이것에 대처하는 제어 시스템이 구성되어야 한다.

CO₂ 아크 용접에 있어서 아크 안정성은 용접 와이어의 용융현상과 밀접한 관계를 가지고 있고, 용접 품질에 크게 영향을 미친다. 따라서 자동 용

* 포항산업과학연구원 설비용접연구팀

** 한양대학교 정밀기계공학과

접에 있어서 용접하는 동안 아크의 상태를 평가하는 기준을 잘 선정해야 하고, 아크를 안정하게 유지하기 위한 제어수단이 필요하다.

최근 개인용 컴퓨터의 급속한 발전과 더불어 아크 상태를 정량적으로 평가하고자 하는 연구가 활발하게 진행되었다. Arai¹⁾는 CO₂ 아크 용접에 있어서 저 진류 영역의 단락이행모드에서 인간의 경험지식을 토대로 아크 안정성과 아크시간의 표준편차 사이에 밀접한 관계가 있음을 보였다. Lucas²⁾는 단락최고진류와 단락시간 각각의 표준편차와 아크 안정성간에 관계가 있음을 보였고, 다양한 용접전원과 전압에서 이들의 표준편차 분포를 구하였다. Liu³⁾는 용적이행 시간과 아크 안정성과의 관계를 밝혔고, 용접전압에 따른 이행시간의 분포를 구하였다. Shin 등⁴⁾은 토치측 와이어의 송급 속도의 변화에 따른 아크 안정성과의 관계를 밝혔다. Mita⁵⁾는 아크상태를 정량적인 값으로 평가할 수 있는 인덱스를 제안하였다. 그는 숙련된 용접사의 평가결과와 용접전압 및 진류파형에서 얻어지는 여러 인자를 고려하여 다중회귀분석에 의한 아크시간, 단락시간, 평균단락진류 및 평균아크전류의 표준편차로 구성되는 아크 안정성 지수를 제시하였다.

이러한 아크의 상태를 정량적으로 평가하고자 시도된 여러가지 지수를 이용하여 용접과정중에 아크의 상태를 정량적으로 평가하고 용접중에 발생하는 여러가지 외란들에 대하여 아크를 지속적으로 안정화시킴으로써 용접품질을 향상시키는 연구도 진행되었다. 최근 Won⁶⁾은 Mita가 제안한 아크 안정성 인덱스를 사용하여 아크 상태가 안정한 진류/전압 조건을 찾는 제어를 수행하였다. 그러나 그의 연구는 임의의 전압에서 용접을 시작하였을 때 안정화된 아크 상태에 도달하는데 약 15 회의 탐색시도(약 90 초)이 소요되었고 360mm 용접길이 가 요구되었다.

한편, 동일한 용접조건에서조차 아크의 상태는 어떤 범위내에서 무질서하게 변화한다. 이는 매우 긴 시간동안 살펴보면 어떤 통계적인 거동이 나타나지만 짧은 시간내에서는 매우 한정된 통계 거동을 나타내며 이 거동이 순간적인 용접파형의 변화로 쉽게 변화하곤 한다. 그러나 실시간에서 아크의 상태를 안정화시킨다는 것은 이러한 짧은 시간내에서 용접 전류/전압 파형의 변동을 최소화 되도록 제어를 하는 것을 의미한다.

본 연구는 아크의 상태가 어떤 외란적인 요소 하에서도 안정된 상태가 되도록 실시간 퍼지제어 알고리즘의 개발에 관한 것이다. 이를 위하여 아크 안정성의 평가를 위한 기준으로는 현재까지 발표된 아크 안정성에 관한 논문들 중에서 아크 안정성을 수치적으로 평가하는데 가장 적합한 Mita의 인덱스를 채택하였으며, 제어의 입력변수로는 이 인덱스와 인덱스의 변화량을 사용하였고, 제어 출력변수는 용접전압의 증분량을 사용하였다. 또한 퍼지 룰-베이스는 짧은 시간 내에서의 아크상태의 변동에 따른 인덱스가 무질서하게 변화하여도 이를 추적하여 감소시키는 제어를 수행하도록 구성되었다. 기초실험을 통하여 퍼지입력변수와 출력변수의 소속함수의 파라미터가 적절하게 결정되었다. 실제 용접의 제어성능에 대한 평가에 있어서 동일한 용접진류하에서 초기용접전압을 임의로 설정하였을 때 아크가 안정화되도록 적정전압을 찾아가는 제어가 수행되었고 소재의 형상이 계단변화를 일으키는 경우에 있어서 아크 안정성 제어가 수행되었다.

2. 아크 안정성에 대한 Mita 인덱스

2.1 안정성 회귀식

Mita는 각기 다른 제어성능을 갖고 있는 3종류의 사이리스터(thyristor) 제어형 용접기를 사용하여, 숙련된 용접사의 경험지식을 토대로 Fig.1과 같은 진류, 전압의 파형이 아크의 안정성에

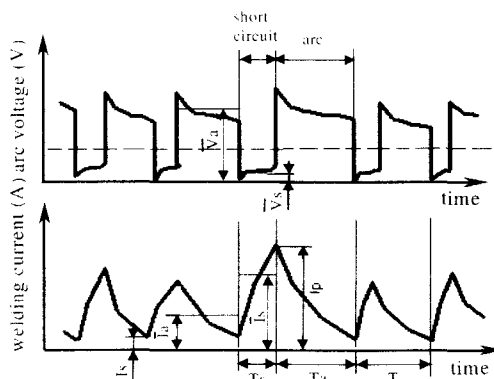


Fig. 1 Waveforms of arc voltage and of welding current in short circuit transfer mode

미치는 영향을 정량적으로 평가하고자 하였다. 이를 위하여 Mita는 용접도중 용접진류와 아크전압

의 과정을 수집하였고, 아크 안정성에 영향을 미칠 것으로 예상되는 여러 인자들을 추출하였고, 실험과 분석을 통해서 이들 인자들로 구성된 몇 개의 인덱스 모델들을 제안하였다. Mita 는 이들 모델들과 숙련된 용접사의 평가점수사이의 상관관계에 대해서 다중회귀분석(multiple regression analysis)을 실시하여 식(1)과 같이 이들 변수들의 조합이 곱의 형식이고, 동시에 로그를 취하는 경우 더 상관계수가 높아진다는 결과를 도출함에 따라 다음과 같이 인덱스에 대한 회귀공식을 제안하였다.

$$Y = \ln\left(\frac{s[T_s]}{1.3} \times \frac{s[T_a]}{3.8} \times \frac{s[\bar{I}_s]}{24} \times \frac{s[\bar{I}_a]}{23.6}\right) \quad (1)$$

여기에서 Y : 아크 안정성 평가 인덱스

s[T_s]: 단락기간의 표준편차 (msec)

s[T_a]: 아크기간의 표준편차 (msec)

s[I_s]: 평균단락전류의 표준편차 (Amp)

s[I_a]: 평균아크전류의 표준편차 (Amp)

1.3, 3.8, 24, 23.6: 각각 용접전류가 130A 이고 설정전압이 19V 인 조건(아크가 안정한 조건)하에서 각 인자의 표준편차들이다.

2.2 회귀식의 보정

Mita 는 식(1)에 의한 값이 아크 안정성과 잘 일치하지만 어떤 특수한 경우의 저전류와 고전류 부분에서는 일치하지 않는다는 사실을 발견하였고, 이러한 경우에 대한 보정항을 추가하여 아크 안정성을 평가하였다. 저전류 영역의 경우, 고전압부분에서는 아크 안정성과 Y 값이 잘 일치하지만 저전압부분에서는 일치하지 않게 된다. 즉 Y 값이 작게 되는 것이 아크 전압이 낮아져서 아크 소멸이 발생하게 되어 나타나는 결과가 되기 때문에 실제의 안정성은 떨어지는 상반된 결과를 얻게 된다. 이러한 경우에 대하여 Mita 는 식(2)와 같이 최적조건하에서의 아크 기간동안의 저항의 평균값 R_i 를 구하고, 식(3)과 같은 아크기간동안 관측된 평균저항 R_a 를 구해서 아크 소멸에 관한 ln(R_a/R_i) 항을 더해서 새로운 Y' 값을 얻도록 하였다.

$$R_i = 5.55 \times 10^{-6} I^2 - 3.13 \times 10^{-3} I + 0.553 \quad (2)$$

$$Y' = Y + 2 \ln(R_a/R_i) \quad (3)$$

식(2)에서 I 는 용접전류이고 식(3)에서 Y' 는 아크 끊어짐이 고려된 수정 아크 안정성 인덱스이다.

반면, 고전류에서는 저전류에서와는 달리 저전압부분에서는 Y 값과 안정성이 잘 일치하지만 고전압부분에서는 입상이행(globular transfer)현상으로 용적이행모드가 바뀌게 되므로 비정상적인 용적의 성장이 발생하여 Y 값은 낮으나 안정성은 떨어진 다. 이것은 입열량과 관련이 있으므로 Mita 는 식(4)와 같이 회귀 공식에 의한 최적조건하에서의 파워 P_i 를 구하고, 식(5)와 같은 아크 기간동안에 관측된 P_a 값과의 항을 추가하는 보정값 Y'' 를 제안하였다.

$$P_i = 1.79 \exp(0.018I) \quad (4)$$

$$Y'' = Y' + \ln(\bar{P}_a/P_i) \quad (5)$$

식(4)에서 I 는 용접전류이고 식(5)에서 Y'' 는 입상이행이 고려된 수정 아크 안정성 인덱스이다

2.3 아크 안정성 인덱스

아크 소멸과 입상이행 현상의 발생에 대한 보정항이 추가된 아크 안정성 평가 Mita 인덱스, W 는 다음과 같다.

$$W = \ln\left(\frac{s[T_s]}{1.3} \times \frac{s[T_a]}{3.8} \times \frac{s[\bar{I}_s]}{24} \times \frac{s[\bar{I}_a]}{23.6}\right) + 2 \ln(\bar{R}_a/R_i) + \ln(\bar{P}_a/P_i) \quad (6)$$

Mita 는 이 아크 안정성 인덱스가 실험에 사용된 세 종류의 싸이리스터 타입의 용접전원에 모두 잘 적용되는 것을 보였고 제안된 인덱스의 값이 작을수록 아크가 안정함을 입증하였다.

2.4 용접조건과 Mita 인덱스

Fig.2 는 Mita 의 실험결과 중 하나로써, 용접전류가 각각 130A 와 250A 에 있어서 용접전압과 인덱스의 상관관계를 나타낸 것이다. 그림에 의하면, 각 전류에 있어서 인덱스 값이 최저가 되는(아크

안정성이 가장 좋은) 전압이 존재하고, 용접전압과 아크 안정성 인덱스의 관계가 대략 2차함수적인 관계가 됨을 보여주고 있다.

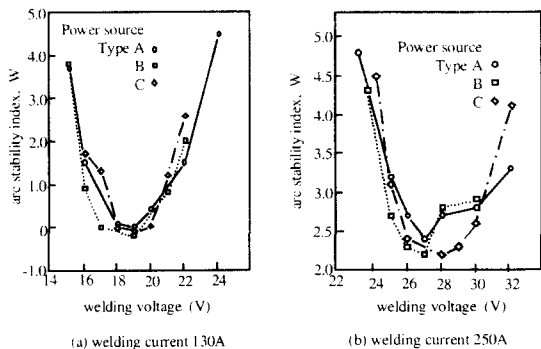


Fig. 2 Correlation between Mita's arc stability index 'W' and arc voltage

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치의 구성도를 Fig. 3에 나타내었는데, 용접변수 계측부와 A/D 변환부, 그리고 D/A 변환부 및 용접변수 제어부로 구성되어 있다

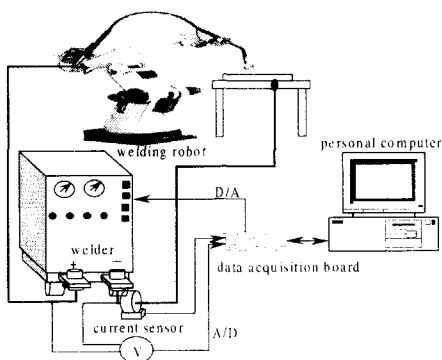


Fig. 3 Configuration of experimental set-up

용접중에 아크의 상태를 평가하기위해서, 홀센서에 의해서 용접 케이블을 통하여 흐르는 용접전류가 계측되었고, 용접기 단자사이의 전압이 계측되었다. 얻어진 용접전류와 전압 신호들은 200

kHz 급 A/D 변환부를 거쳐 컴퓨터에 입력되고 메모리에 저장하였다. 이때 신호에 함께 실려있던 잡음신호는 200Hz의 잡음제거주파수를 갖는 디지털 저역주파수 통과필터(digital low pass filter)를 사용하여 제거되었다. 필터링된 데이터들로부터 제어부인 컴퓨터 상에서 Mita가 제안한 인덱스의 파형인자가 계산되었고, 인덱스 값이 추출되었다. 추출된 값은 퍼지제어 알고리즘에 의해 제어처리가 수행되었고, 제어 출력이 되는 용접전압이 D/A 변환부를 통해 용접기에 인가되었다. 한편 용접공정은 용접용 로봇과 350A 급 인버터형의 정전압 제어 용접기에 의해 수행되었다

3.2 실험방법

실험방법은 보호가스로서 유량 20 l/min의 100% CO₂ 가스가 사용되었고, 용접재료로서 지름 1.2 mmØ의 ER70-S가 사용되었다. 사용된 소재는 두께 6~9 mm를 가진 SS41이었다. 용접속도는 5 mm/sec로 설정하였다. 전극 팁-모재간 거리(contact tip-to-work distance, 이하 CTWD)는 15~25 mm 사이에서 설정되었고, 용접전류는 130, 150, 200 A로 설정하여 실험하였다. 용접방법은 비드 온 플레이트 용접이 실시되었고, 용접 중 데이터 샘플링 속도는 초당 5000 개로 하였다.

3.3 신호 처리

와이어 송급속도와 용접전압의 설정조건에 따른 Mita 인덱스의 분포를 조사하기 위한 실험에 있어서, 데이터의 처리는 아크 스타트 부분과 종료 부분을 제외한 20초 동안의 용접전류와 아크 전압의 신호를 수집하였고, 이 기간동안의 단락기간의 표준편차, 아크기간의 표준편차, 평균 단락전류 및 아크 전류의 표준편차와 저항값 및 파워를 구하였다. 이 값들은 식(6)에 대입되어져 Mita 인덱스가 얻어졌다.

한편, on-line 아크 안정화 제어에 있어서는 매 0.2초동안의 용접전류와 아크 전압의 신호를 수집하였다. 수집된 데이터로부터 노이즈 필터링을 거친 후, 단락기간의 표준편차, 아크기간의 표준편차, 평균 단락전류 및 아크 전류의 표준편차와 저항값 및 파워를 구하였다. 구해진 값들을 식(6)에 대입해서 Mita 인덱스를 계산하였다. 계산된 인덱스 및 인덱스의 변화량을 퍼지입력변수로 하고 용접전압의 증분량을 퍼지출력변수로 하는 퍼지논리제

이치를 구성하였고, 이 증분량과 진 스텝의 용접 전압을 더하여 새로운 용접전압조건을 용접기에 인가하였다. 인가된 용접전압에 의해서 새로운 아크 상태가 되기까지의 시간간연을 두었다. 따라서 아크 안정화 제어에 소요되는 매 싸이클 타임은 약 1 초정도로 하였다.

4. 실험결과

4.1 용접조건과 Mita 인덱스

Fig. 4 는 본 연구를 위해 개발한 용접전류, 전압파형과 Mita 인덱스를 실시간으로 계산하여 그 결과를 나타내주는 프로그램 윈도우 화면을 나타낸 것이다. 이 프로그램을 이용하여 여러 용접조건하에서의 용접전류 및 전압파형을 계측하고 Mita 인덱스 값을 계산하여 그 거동을 조사하였다.

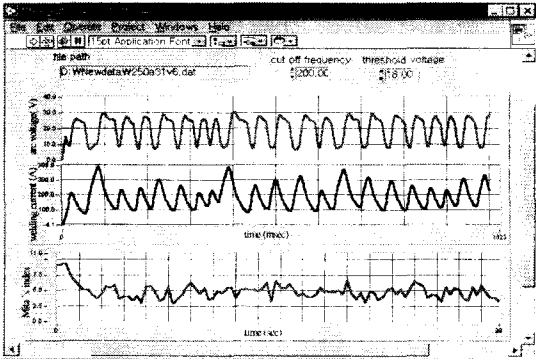


Fig. 4 Behavior of welding voltage, current and Mita's arc stability index

Fig. 5 는 본 연구에서 수행한 실험결과로서, 용접전류 200A, 용접전압 22V, 24V, 26V, 28V 로 설정한 조건에서 각각 용접하였을 때 계측된 인덱스 변수를 이용하여 계산된 0.2 초 마다의 인덱스 값의 거동을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 같은 용접조건하에서도 매 순간의 아크 상태가 변화되기 때문에 인덱스 역시 변화함을 알 수 있다. 또한, 긴 시간동안의 평균 인덱스 값은 식(6)에서 알 수 있듯이, 아크와 단락의 발생주기 및 그 전류파형의 형태가 불규칙적이고 불안정한 경우(표준편차값들이 크게 됨)에는 높게, 규칙적이고 안정한 경우에는 낮게 나타남을 알 수 있다. 그리고 용접전압의 설정 값에 따라, 전체 평균 인덱스 값이 어떤 값을 중심으로 진동하고 있음을 알 수 있

는데, 본 실험의 경우 24V 와 26V 사이에서 Mita 인덱스 값이 가장 낮게 되고 따라서 전술한 바와 같이 아크 안정성이 좋게 됨을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이 Mita 인덱스 값을 제어입력으로 하고, 인덱스 값을 최저로 낮추는 적당한 용접전압 값을 제어출력으로 할 경우 어떤 외란이 발생하여 아크의 안정성이 흐트러지는 경우라도 곧 안정된 아크를 유지할 수 있도록 하였다.

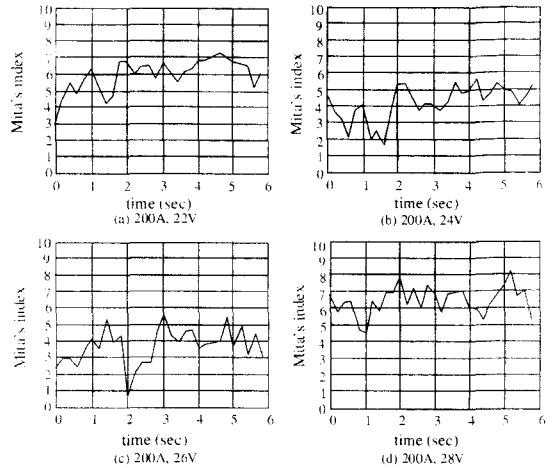


Fig. 5 Arc stability index for 200Amps and different arc voltage (22V, 24V, 26V, 28V)

4.2 퍼지 알고리즘을 이용한 아크 안정성 제어

아크는 매순간 비선형적으로 변화된다는 것을 Fig. 5 를 통하여 확인하였다. 종래의 제어기(PI 또는 PID)를 사용하여 이러한 아크의 거동을 안정화시키려 한다면 매 순간의 아크(플랜트)의 특성이 비선형적으로 변화되기 때문에 쉽지 않다. 즉 종래의 제어기에서는 플랜트가 하나의 극소점을 가지고 (아크가 가장 안정함), 또한 미분가능한 경우에 대해서 좋은 제어성능을 가질 수 있지만 아크와 같이 비선형적 거동을 가지는 경우에 있어서는 좋은 제어성능을 기대하기가 어렵다.

한 편, 퍼지제어기는 제어대상(플랜트)에 대한 작업자의 경험이나 전문가의 언어적인 표현 (linguistic representation)을 쉽게 제어기와 결합시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 그리고 종래의 제어기에 비해 플랜트(plant)의 파라미터 변화나 외란에 대해서 퍼지제어기는 크게 영향을 받지 않는

강인한 제어기로 알려져 있다.

인덱스 값을 제어 입력으로 하고, 용접전압을 제어 출력으로 할 경우, 이에 적합한 제어 알고리즘이 필요하다. 즉 안정성이 낮다고 했을 때 용접전압의 출력 값을 높여주어야 할지 또는 낮추어야 할지와 그 증분량을 얼마나 적합하게 설정하는가를 결정해야 한다.

이를 위하여 Fig. 6 와 같이, 퍼지 입력변수로 인덱스 값과 인덱스의 변화량을 사용하고 전압의 증분량을 제어출력으로 하여 퍼지 제어시스템을 구성하였다. 여기에서 인덱스에 대한 subset의 개수는 small, middle, large의 3개로 구성하였고, 인덱스 변화량에 대한 subset의 개수도 negative, zero, positive 3개로 하였다. 퍼지출력 변수인 용접전압의 변화량에 대한 subset의 개수는 negative big(NB), negative(N), zero(Zero), positive(P), positive big(PB)의 5개로 하였다. 입력변수의 개수를 상기와 같이 설정한 것은 Fig. 5에서 알 수 있듯이 아크 상태가 떨어지는 용접전압의 조건에서의 평균 인덱스의 값과 아크 상태가 안정한 용접전압의 조건에서의 인덱스의 값을 고려하여, 기초 실험에서 이들 사이의 subset의 개수를 증가시켜 보았지만 제어의 결과가 크게 달라지지 않았다. 따라서 이들의 개수를 3개로 정하였다. 또한 이들 subset의 파라미터는 제어 성능에 영향을 미치므로, 이들의 값을 결정하는 것은 중요하다. Fig. 5와 같은 예비 실험을 통하여 Fig. 6과 같이 파라미터를 설정한 경우가 제어성능이 다소 우수하게 나타났다. 또한 입,출력 변수들의 멤버쉽 함수들의 형상은 계산을 단순화시키기 위해서 삼각형으로 하였다.

퍼지 룰 베이스는 Table 1과 같이 2가지 경우로 구분하여 구성하였다. 여기에서 상기 2차함수의 극소점을 중심으로 좌측의 상태에서는 용접전압을 증가시킬수록 아크의 전체 거동은 안정하게 된다. 그러나 우측의 상태가 되면 오히려 용접전압을 감소시켜야만 아크가 안정하게 된다. 그런데 아크를 안정화시키기 위해서 용접전압을 적절하게 증감시킬지라도 인덱스의 거동은 무질서하므로 인덱스의 변화량이 경우에 따라서 negative가 되기도 하고 positive가 되기도 한다. 이 인덱스 변화량에 따라 용접전압의 증분량을 결정하면 인덱스가 발산될 수도 있고, 또는 아크가 안정화되는데 수렴시간이 매우 길어질 수 있다. 따라서 직전 스텝의 용접전압의 증분량의 부호에 따라 무질서한 인덱

스의 거동을 통제하는 수단이 필요하다. 따라서 때 순간 용접전압의 변화량, ΔV_k 의 부호에 따라 아크를 안정화하도록 룰 베이스를 구성한 것이다.

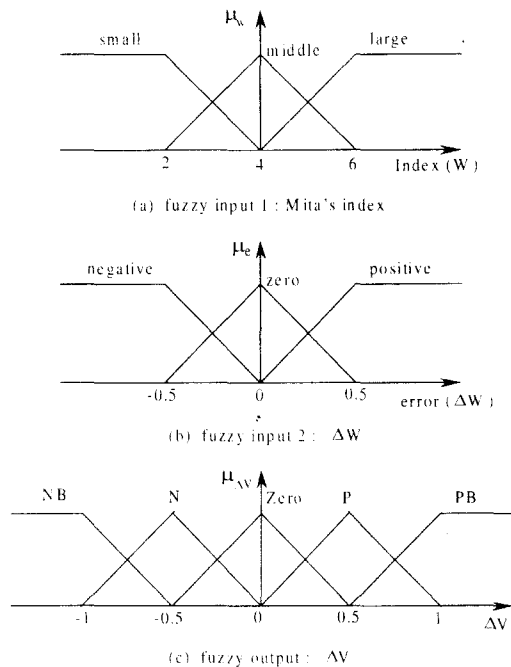


Fig. 6 Membership functions for fuzzy control inputs and Output

Table 1 Fuzzy control rule base

(a) case of $\Delta W_k \leq 0$			
ΔW \ W	Small	Middle	Big
Negative	Z	P	PB
Zero	Z	P	P
Positive	Z	N	NB

(b) case of $\Delta W_k > 0$			
ΔW \ W	Small	Middle	Big
Negative	Z	N	NB
Zero	Z	N	N
Positive	Z	P	PB

한 편, 이때 Fig. 7과 같이, 주어진 입력에 의해 하나의 결론을 이끌어 내는 퍼지 추론(fuzzy

inference)은 Mamdani 의 min 연산을 사용하였다. 또한 퍼지 추론 결과를 실제 시스템에 적용하기 위하여 물리량으로 변환시키는 비퍼지화(defuzzification)는 식(7)과 같이 면적중심(center of area)법을 사용하였다.

$$Z' = \frac{\sum \mu_c(\bar{Z}) \cdot \bar{Z}}{\sum \mu_c(\bar{Z})} \quad (7)$$

4.3 전압을 이용한 안정성 제어 실험결과

4.3.1 임의 전압설정에 따른 아크 안정성 제어 성능

퍼지 알고리즘을 이용하여 아크 안정성 제어를 실시하였다. 이때 재현성 확보를 위해서 동일한 용접조건에서 각 3 회의 제어실험이 실시되었다. Fig. 8 은 용접전류를 150A 로 설정하고 17V 와 27V 의 초기 용접전압을 출력하여 용접을 하였을 때, 인덱스가 안정화되도록 하는 용접전압의 제어 출력의 변화와 아크 안정성 인덱스의 변화거동을

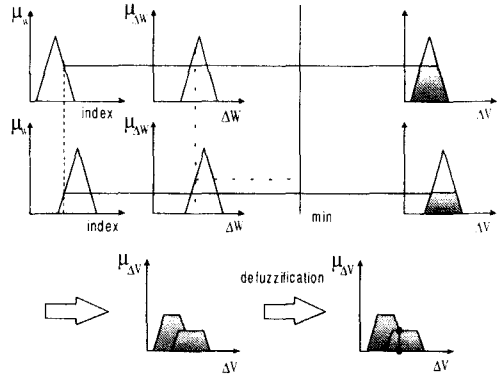


Fig. 7 Fuzzy inference and defuzzification

각각 나타낸 것이다. 그림에서 살펴보면 출력전압의 증가제어는 21V 와 22V 사이에서, 출력전압의 감소제어의 경우에는 22V 와 23V 사이에서 안정된 아크를 유지하도록 제어가 되고 있음을 알 수 있다. 이때의 인덱스 값들은 2 에서 6 사이에서 진동하고 있다. 이러한 현상은 퍼지 제어기의 성능에 의해서 6 이하의 보다 낮은 값으로 접근하도록 제어될 수는 있지만 CO₂ 아크 용접의 불안정 특성

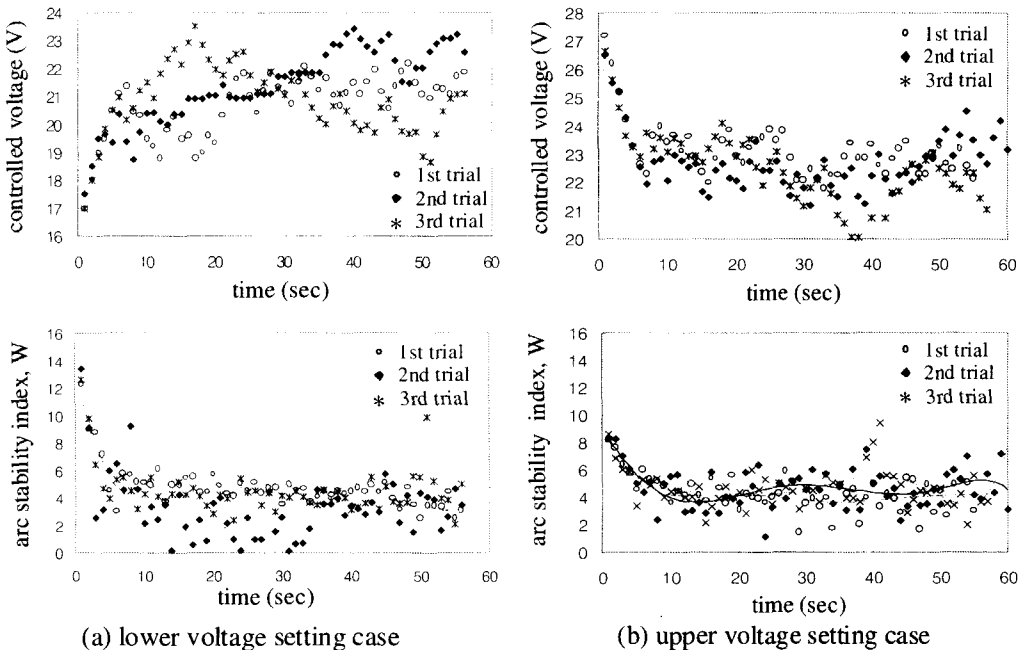


Fig. 8 Behaviors of up and down controlled output voltage and arc stability index using fuzzy controller

때문에 인덱스가 낮은 상태에서도 쉽게 불안정한 상태로 변화되어 인덱스가 높은 상태가 나타나게 된다. 이러한 상태는 다시 퍼지 제어에 의해 인덱스가 낮아지도록 계속하여 제어가 이루어져 전반적으로 안정한 아크상태를 유지하게 된다.

한 편 퍼지 제어에 의한 수렴성능을 살펴보면 인덱스 값이 평균 5 가 되기까지 걸린 시간이 약 5.5 초 정도가 됨을 알 수 있었다. 수렴성능이 이 정도 걸린 이유는 초기 용접 시작시의 아크의 불규칙함과, 한번의 인덱스를 계산하기 위한 파형의 최소 수집시간이 0.2 초 인 점, 그리고 인덱스를 추출하고 퍼지 알고리즘에 의해 제어출력을 계산하는데 걸린 시간 및 D/A 출력에 걸린 시간과, 다시 파형을 계측하기 위해서 대기하는데 걸린 시간을 고려하여 하나의 제어 출력의 주기를 약 1 초로 하였기 때문이다.

또한 상기 실험에서 보면 동일한 용접조건하에서도 반복된 제어결과에의 차이를 보이며 인덱스 값이 달라지는 것은 용접시 아크 현상의 순간적인 변동으로 인하여 이 인덱스와 입력전압과의 2 차 함수적인 관계(Fig. 2)가 고정되어 있는 것이 아니라 항상 변화하고 있음을 나타내 주고 또한 그 극소점(2 차함수의 최소점)의 위치도 달라질 수 있음을 말해준다. 그러나 이러한 순간 상황의 변동에도 불구하고 Mita 인덱스에 입각한 퍼지 알고리즘을 이용한 아크 안정성 제어는 극소점을 추적하는데 우수한 성능을 나타내며 어느 일정한 값으로 수렴되어 제어성능을 유지함을 알 수 있다.

4.3.2 CTWD의 계단변화에 대한 아크 안정성 제어 성능

Fig. 9와 같이, CTWD가 계단적(step)으로 변화하는 경우에 있어서 아크의 안정성 제어가 실시되었다. Fig. 9에 있어서, 초기 CTWD는 15mm 이었고, 용접 시작 위치로부터 계단까지의 거리는 60mm, 총 용접길이는 300mm 이었고, 용접전류는 130A, 초기 용접전압은 20V로 설정되었다. Fig. 10은 이 용접 조건하에서, 제어가 수행되지 않은 경우의 인덱스의 거동을 나타낸 것이다.

Fig. 10에 따르면, 초기 인덱스 값의 거동은 3에서 6 사이에서 안정하지만, CTWD의 계단변화 후의 인덱스의 거동은 5에서 10사이로 높은 값을 가지고, 그 변동폭도 커짐이 보여진다.

한편 퍼지 제어기를 이용하여 CTWD가 계단

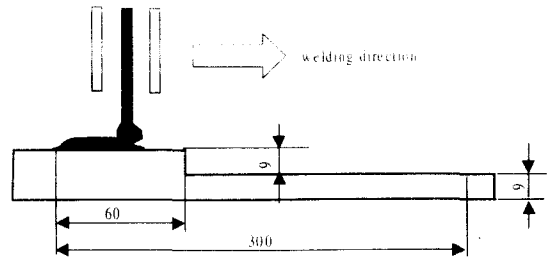


Fig. 9 Step change test configuration

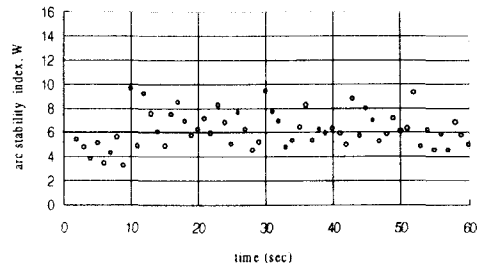


Fig. 10 Behaviors of non-controlled arc stability index in the case of step change

변화를 갖는 경우에 있어서 아크의 안정성 제어가 실시되었다. 여기에서 재현성 확보를 위해서 3회의 반복된 실험이 실시되었다. Fig. 11은 그 결과를 나타낸 것이다. 용접 초기의 인덱스의 거동은 Fig. 10의 초기단계의 거동과 거의 유사하였는데, 약 10초 경과 후, CTWD의 계단변화가 발생하였을 때 인덱스 값이 크게 증가되었다. 이때 아크를 안정화시키기 위해서 퍼지 제어가 수행됨에 따라 제어 출력전압은 증가되었으며, 아크가 다시 안정화되고 난 뒤, 인덱스는 CTWD의 계단변화 이전의 인덱스와 거의 비슷한 정도를 나타내었다. 한편 CTWD의 계단 변화에 따른 수렴시간은 Fig. 8의 아크 안정성 제어의 경우와 비슷한 약 5sec 정도 소요되었다. 따라서 CTWD가 계단 변화를 갖는 경우에 있어서 퍼지 알고리즘을 이용한 아크 안정성 제어는 우수한 성능을 나타내었다.

5. 결론

GMA 용접의 단락이행 모드에 있어서 아크의 불규칙적인 거동으로 인하여 발생하는 불균질 용접을 방지하기 위해서 아크의 상태를 정량적으로 평가할 수 있는 Mita 인덱스를 사용하여 와이어

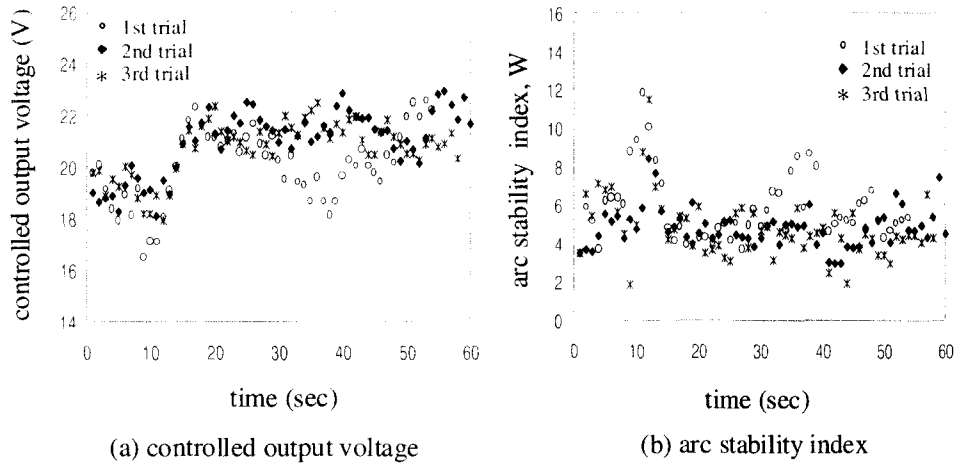


Fig. 11 Behaviors of the controlled output voltage and arc stability index using fuzzy controller in the case of step change

송급속도(전류)와 용접전압에 따른 인덱스의 거동에 대한 평가를 실시하였고 이를 바탕으로 하여 아크를 안정화시킬 수 있는 퍼지제어기가 개발되었다. 개발된 퍼지제어기를 실 용접시험에 적용하여 제어성능을 평가하였한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 같은 용접조건하에서 짧은 시간동안의 아크 안정성 인덱스는 어떤 범위내에서 매우 불규칙적으로 변동되었다. 또한, 긴 시간동안의 평균 인덱스가 가장 적은 전압구간이 존재하였고, 이것은 적정 용접조건에서 조차 아크 상태의 변동이 순시적으로 발생되고, 따라서 짧은 순간에서의 아크상태의 제어가 요구됨을 시사하였다
2. 아크 안정성 평가를 위한 인덱스 값을 실시간으로 얻을 수 있었고 용접공정의 안정성을 실시간으로 판단할 수 있었다.
3. Mita 인덱스를 제어입력으로 하고 용접전압을 제어 출력으로 하는 아크 안정성 제어를 위한 퍼지 알고리즘을 개발하였고 이를 실시간 제어에 적용하였다.
4. 퍼지 알고리즘을 이용한 아크 안정성 제어 결과, 임의의 전압에서 용접을 시작하여도 아크가 안정한 상태로 신속한 제어가 구현될 수 있었으며, 소재의 형상이 계단적 변화를 일으키는 경우에도 안정한 제어품질을 유지할 수 있었다.

참고문헌

1. Arai T., et al., "The investigation for Arc Phenomena by means of a computer," Quarterly Journal of the Japan Welding Society, Vol1, No3, pp. 15-20, 1983.
2. Lucas W., "Microcomputer system, Software and Expert system for Welding Engineering," Welding Journal, Vol. 66, No. 4, pp. 19s-30s, 1987.
3. Liu S. and Siewert T. A., "Metal transfer in gas metal arc welding," Welding Journal, Vol.68, No.2, pp.52s-58s, 1989.
4. Shin H.W., et al., "Effects of Wire Speed Fluctuation on Arc Stability in GMA Welding," Journal of KWS, Vol. 13, No4, pp. 340-357, 1995
5. Mita T., et al., "Quantitative estimates of arc stability for CO2 gas shielded arc welding," Welding International, No.2, pp. 152-159, 1988.
6. Won Y. J. and Cho H.S., "A fuzzy rule-based method for seeking stable arc condition under short-circuiting mode of GMA welding process," Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 206, pp. 117-125, 1992.