

단락시간비를 이용한 GMAW의 비드 높이 제어에 관한 연구

감병오* · 조상명** · 김상봉***

*부경대학교 대학원 학연기계공학

**부경부경대학교 재료공학부

***부경부경대학교 기계공학부

A Study on Bead Height Control of GMAW by Short Circuit Time Ratio

BYOUNG-OH KAM*, SANG-MYUNG CHO** AND SANG-BONG KIM***

*University Research Interdisciplinary Program of Mechanical Eng., Pukyong National University, Busan, Korea

**School of Material Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

***School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: GMAW(Gas Metal Arc Welding) 가스금속 아크용접, Short Circuit Time Ratio 단락시간비, Short Circuit Frequency 단락주파수, Backing Stripe 이면받침, Burn Through 용락, Moving Average 이동평균, Standard Deviation 표준 편차, Variation Factor 변동계수

ABSTRACT: This paper shows the experimental results controlling the height of surface and back bead in GMAW by analyzing the unexpected gaps between base metals produced in welding and by controlling welding velocity due to the variation of the gap between base metals in thin-plate welding. The back bead behavior and burn-through in I-type butt joint CO₂ welding of thin mild steel are analyzed in the views of short circuit time ratio and short circuit frequency. It is shown through experimental consideration that the short circuit time ratio method is more reasonable than the short circuit frequency method in analyzing the formulation of back bead under changing the gap between base metals. Based on these results, welding manipulator is designed so as to satisfy the bead height control in real time by measuring the short circuit time ratio. To show the effectiveness of the developed bead formulation control system, the experiment is implemented under two welding conditions such as increasing gap from 0mm to 0.8mm and gradually increasing gap from 0mm to 1.2mm. The experimental results show that the bead formulation can be controlled uniformly in spite of the variation of the gap between base metals.

1. 서 론

용접 중 예기치 않게 발생하는 모재간격의 변동을 측정하는 방법은 접촉식과 비접촉식으로 대별할 수 있다. 전자의 경우는 접촉식 변위센서를 이용하여 모재간격의 변동량을 측정하는 방법이며, 후자는 모재와 센서가 비접촉 상태에서 모재간격 및 용접선을 추적하는 방법으로 비전 센서를 이용하는 방법과 용접 전압, 용접 전류를 센싱하여 모재간격의 변화를 판단하는 아크 센서가 있으며 최근에는 이중 전자기 센서(신준호와 김재웅, 2000)를 이용한 방법이 보고되었다.

아크 용접 중 발생하는 단락 현상을 이용하여 Kitazawa (Kitazawa et al., 1986)는 모재간격의 변화를 단락주파수로 해석하는 방법과 단락주파수를 계측하여 용융지 선단과 전극간 거리에 대한 함수관계를 연구 보고하였다. 용접조건은 이면 받침(backing stripe)를 사용하고 판 두께 16mm의 후판재 초층 용접이었으며, 실제 비드 제어는 행하지 않았다.

본 논문에서는 박판 용접에 있어 표면비드 및 이면비드 높이를 제어하기 위해 용접 중 발생하는 모재간격의 변화를 실시간적으로 판단하고, 모재간격의 변동에 따라 용접 속도를 제어하여 표면비드 및 이면비드 높이를 제어한 결과를 보인다. 용접조건에 민감한 연강 박판 모재를 I형 맞대기 CO₂ 용접을 할 때, 모재간격의 변화에 따른 이면 비드의 거동과 용락 현상을 단위 시간당 단락된 시간의 비인 단락시간비(Short circuit time ratio)와 단위 시간당 단락된 횟수인 단락주파수(Short circuit frequency)와의 관계로 고찰하였다. 그 결과, 모재간격 변화에 따른 이면비드 형성 과정을 실시간적으로 판단함에 있어서 단락주파수보다는 단락시간비가 합리적인 판단 기준이라는 결과를 얻었다. 이러한 결과를 기초로하여 실시간적으로 단락시간비를 측정하고 표면비드 및 이면비드 높이 제어를 위해 용접 속도를 제어할 수 있는 용접 매니플레이터를 개발하였으며, 제어장치는 원칩 마이크로프로세서(intel 80C196KC)를 기반으로 개발하였다. 모든 용접 공정을 운영자가 실시간적으로 PC를 통해 모니터링할 수 있도록 직렬 통신(RS-232C)을 이용한 모니터링 시스템을 개발하였으며, 모니터링을 위한 PC측 프로그램은 비주얼 베이직(ver 5.0)을 이용해 개발하였다.

개발한 비드 높이 제어 시스템의 제어 성능시험을 위해 모

제1저자 감병오 연락처: 부산광역시 남구 용당동 부경대학교 기계공학과 9공학관 414호 제어공학연구소
051-620-1606 weldkam@hanmail.net

재간격이 없는 조건에서 급격하게 모재간격이 증가하는 모재 조건(0mm~0.8mm)과 모재간격이 1.2mm까지 점진적으로 증가하는 조건에서 용접 시험한 결과, 모재간격의 변화에도 비드 형성이 균일하게 제어된 결과를 얻었다.

2. 비드 제어 시스템의 구성

Fig. 1은 비드 높이 제어 시스템의 구성을 나타낸 것이다. 시스템은 크게 MCU(Micro Controller Unit), 사용자 컴퓨터, 용접 시스템으로 구성된다. MCU는 아크 전압을 계측하기 위한 데이터 획득부, 사용자가 용접속도 조건을 입력하기 위한 키패드부, 설정된 조건들을 확인할 수 있는 LCD 디스플레이부, 용접 매니플레이터(Manipulator) 제어부, 단락시간비와 단락주파수의 계측 및 연산부, 사용자 PC와의 통신을 위한 직렬통신부(RS232)로 구성된다. 매니플레이터는 본 논문을 위해 자체 제작하였으며, 구동 모터는 스텝핑 모터(Stepping motor)를 사용하였고 구동 방식은 토크가 높은 바이폴라(Bipolar)방식을 이용하였다(Makabe, 1992). 사용자 컴퓨터는 MCU로부터 전송 받은 데이터를 보관, 검색, 그래프 출력 및 사용자 인터페이스를 담당한다. 용접 시스템은 파워소스, 와이어 피더, 용접 매니플레이터로 구성된다.

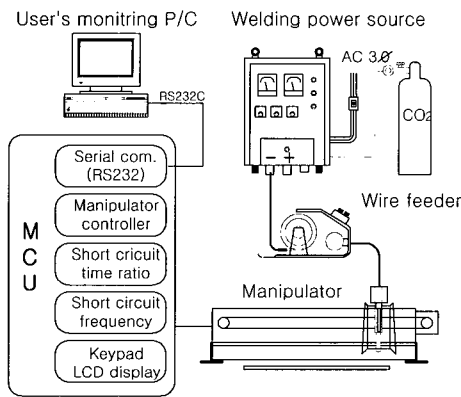


Fig. 1 Composition of bead height control system

3. 모재간격 변화에 따른 단락시간비와 단락주파수 고찰

3.1 용접조건

모재간격 변화에 따른 단락시간비와 단락주파수의 관계 고찰을 위해 모재는 세 가지 조건으로 가공하였다. 첫째 모재간격이 없는 표준조건과, 둘째 표면비드의 함몰 및 이면비드 높이가 증가, 용락 현상을 고찰하기 위해 모재간격이 넓어지는 조건, 마지막으로 모재간격이 없는 조건과 모재간격이 급격하게 증가하는 조건에서 이면비드 형성 과정을 고찰하기 위한 조건으로 모재를 가공하였다.

모재간격 변화에 따른 단락시간비와 단락주파수와의 관계를

고찰하기 위해서는 먼저 기준이 되는 용접조건 선정이 필요하다. 기준 용접조건 선정은 모재간격이 없는 상태에서 표면비드의 높이가 1mm~3mm이고, 이면 비드의 높이가 0.2mm~1mm로 형성되는 용접 조건을 실험을 통해 선정하였으며 그 용접 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Welding condition

Welding current (A)	150 A	
Arc voltage (V)	23 V	
Contact tip to workpiece distance	13mm	
Welding speed	4.5mm/sec	
Root gap	0mm	
	Step up type(0.4~2.0mm)	
	Pulse type(0~2.0mm)	
Shielding gas	CO ₂ gas	
Power source type	Inverter type	
Electrode wire	Φ1.2mm Flux cored wire	
Joint type	I type butt joint	
Base metal	Material	Mild steel
	Thickness	3.2 mm
	Size	150 mm×100mm

3.2 단락시간비와 단락주파수 계측

단락이란 아크열에 의해 용융된 와이어와 용융지가 접촉하는 현상인데, 단락시 아크 전압은 급격하게 감소하고 아크 전류는 급격하게 상승하게 된다. 따라서, 아크 전압을 계속하면 용접 와이어의 용적과 용융된 모재와 접촉되었는지를 판단할 수 있다(Ueyama, 1998; Ito and Nagaya, 1980). 그러나, 단락으로 판단할 수 있는 기준 전압은 용접기, 용접재료, 용접 조건에 따라 상당한 차이가 있다. 본 논문에서는 Table 1의 조건으로 용접할 때, 얻어진 Fig. 2의 용접 접압 파형을 근거로 DC +10V를 단락 판단 기준 전압으로 선정하였다. 용접 중 단락을 판단하기 위해 아크 전압이 10V 이하이면 비고기 회로는 Off 신호를 출력하고 그 이상이면 On 신호를 출력한다. 이 때 Off 신호는 단락된 것을 의미하고 On 신호는 아크 시간을 뜻한다. 이와 같이 Off 신호와 On 신호로 표현되는 단락 신호는 0.1초마다 발생하는 마이크로프로세서의 소프트웨어 타이머 인터럽트에 의해 단락시간비와 단락주파수를 계측한다. 단락시간비는 0.1초 동안 단락된 총 시간을 합산된 것이고, 단락 주파수는 0.1초 동안 On에서 Off로 변화된 적이 횟수를 카운트한 것이다.

용접 시스템에 따라 다소 차이는 있으나, 일반적으로 저전류 영역의 CO₂ 용접의 경우 단락시간비는 약 26% 전후이고 단락주파수는 110Hz 전후이다(안영호 등, 1994).

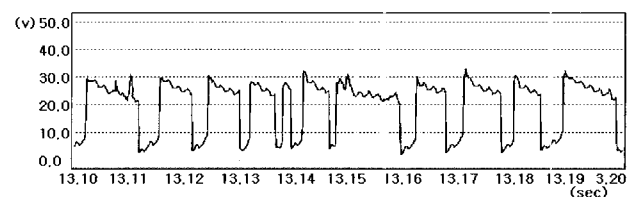


Fig. 2 Short circuit property in arc voltage waveform

3.3 모재간격이 없는 조건에 있어 단락시간비, 단락주파수 고찰

Fig. 3의 (a), (b)는 모재간격이 없는 조건에서 Table 1의 용접조건으로 용접할 때, 계측된 단락시간비와 단락주파수를 나타낸 것이다. 점선은 0.1초 단위로 계측된 데이터이고, 실선은 최소 자승법(LSM, least square method)으로 처리하여 나타낸 것인데, (a)의 단락시간비와 (b)의 단락주파수를 서로 비교하면 단락시간비의 계측 결과가 단락주파수의 계측 결과보다 선형임을 확인할 수 있는데, 그 원인은 다음과 같다.

첫째, 단락시간비와 단락주파수를 측정하기 위해서는 비교기 회로로부터 출력되는 신호를 0.1초 단위로 측정하게 된다. 이때 나누어진 시간 구간의 시작 부분이나 종료 부분 또는 양쪽 부분 모두에 단락이 연속적으로 이루어지는 경우, 단위시간 당 단락 횟수를 측정한다는 것은 상당히 곤란한 문제이며, 그 기준 또한 모호하여 정량적으로 해석하기에는 많은 무리가 따른다. 이에 반하여 단락시간비는 0.1초 단위로 나누어진 시간의 경계에 단락이 연속될지라도 이에 상관없이 0.1초 동안에 단락된 시간만을 고려하여 계산하므로, 단락 현상을 평가함에 있어서, 단락주파수를 이용하는 경우보다 정량적이고 합리적이며 연속적인 용접 상태 평가 방법이라 할 수 있다.

둘째, 단락 현상을 나타내는 용접 조건에 있어서 비드는 용융된 와이어의 용적이 용융지와 접촉하는 단락 현상에 의해서 형성된다. 즉 용융된 용적이 단락을 통해서 비드로 형성되는 것이다. 하지만, 순간단락의 경우는 비록 단락은 되었지만 비드 형성에 영향을 주지 못함에도 불구하고 단락주파수 계측의 경우에는 이 순간단락까지 단락주파수로 계측된다. 그러나, 단락시간비 계측의 경우는 비드 형성에 영향을 못 미치는 순간 단락은 단락된 시간이 짧기 때문에 단락시간비 계측에서는 그만큼 적게 반영된다. Table 2는 단락시간비와 단락주파수의 표준 편차(Standard deviation) 및 변동계수(Variation factor)를 나타낸 것이다. 먼저 단락시간비와 단락주파수의 표준 편차를 비교하여 보면 단락시간비의 경우 2.19이고 단락주파수인 경우는 13.89로 단락시간비가 단락주파수에 비해 표준 편차가 작은 것을 알 수 있다. 또한 변동계수 역시 단락시간비인 경우 7.73이고 단락주파수의 경우 13.72로 이 역시 단락시간비가 단락주파수에 비해 작은 것을 알 수 있다. 결과적으로 단락시간비는 단락주파수보다 비드 형성 과정을 합리적으로 판단할 수 있는 방법이다. Photo 1의 (a)는 모재간격이 없는 상태에서 Table 1의 용접조건으로 용접한 표면비드의 사진이며, (b)는 이면비드

의 사진이다. 용접 방향은 좌에서 우로 용접하였으며, 표면비드와 이면비드는 균일하고 미려한 것을 볼 수 있다. 또한, 스패터의 발생이 거의 없는 것으로 보아 용접 중 아크가 상당히 안정된 상태였다는 것을 알 수 있다.

Table 2 Result of statistic analysis for arc voltage

	Short circuit time ratio	Short circuit frequency
Average	28.32(%)	101.26(Hz)
Standard deviation	2.19	13.89
Variation factor	7.73	13.72

3.4 모재간격이 증가하는 조건에서 단락시간비의 고찰

Fig. 4는 모재간격이 0.4mm, 0.8mm, 1.2mm, 1.6mm, 2.0mm로 점차 증가되는 조건에서 단락시간비를 고찰한 결과이다. 용접조건은 Table 1과 같다. (a)는 모재간격 변화를 나타낸 것이고, (b)는 계측한 단락시간비를, (c)는 표면비드와 이면비드의 높이를 나타낸다. 최초 모재간격이 0.4mm인 구간에서는 모재간격이 없는 경우와 거의 동일한 표면비드와 이면비드를 형성하지만 단락시간비는 전체적으로 감소하는 특성을 나타내고 있다. 모재간격이 0.8mm인 구간부터는 표면비드의 함몰과 함께 이면비드가 1mm이상 계속 성장한다. 모재간격이 1.2mm인 구간에서 단락시간비는 아주 불규칙하게 변동하고 아크가 불안하기 때문에 스패터의 발생량도 많아진다. 표면비드는 계속해서 낮아지고 동시에 이면비드는 계속 높아지며, 표면비드의 높이가 거의 0mm에 가까워진다. 모재간격이 1.6mm인 구간에서는 단락시간비가 0%까지 극단적으로 감소하는 아크 꺼짐 현상을 관찰할 수 있다. 또한 이면비드의 높이는 3mm이상 과도하게 형성되고 표면비드는 모재의 표면 이하로 함몰한다. 모재간격이 2.0mm인 구간에서는 용접이 거의 이루어지지 않고 심한 아크 불안정 현상에 의해 단락시간비는 매우 심하게 변동하며 용락이 발생한다. 이 구간에서 단락시간비는 약 38%까지 상승하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 용적이행을 위한 단락이 아닌 와이어와 용융 금속이 단락된 것이다. Photo 2의 (a)는 위의 용접조건에서 얻어진 표면비드의 사진이며, (b)는 이면비드의 사진이다.

3.5 모재간격이 증감하는 조건에서 단락시간비의 고찰

Fig. 5는 모재간격이 없는 조건에서 모재간격이 2.0mm로 급격

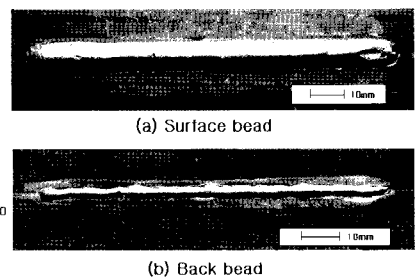
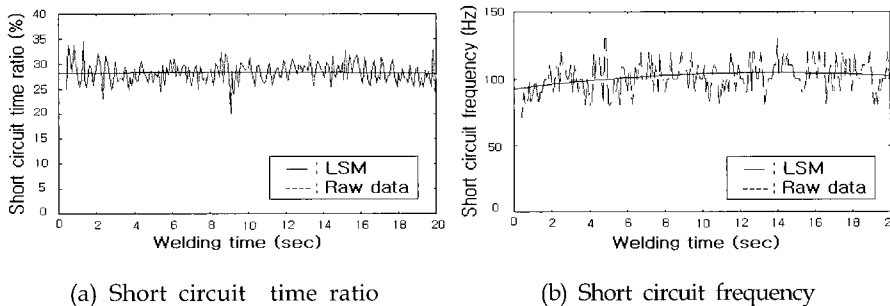


Photo 1 Bead in the specimen with no root gap

Fig. 3 Short circuit property in normal welding state (Root gap =0)

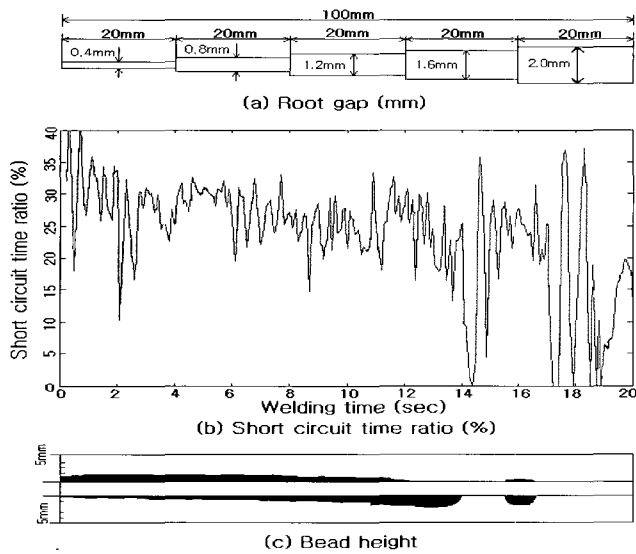


Fig. 4 Variation of short circuit time ratio in the specimen with increased root gap

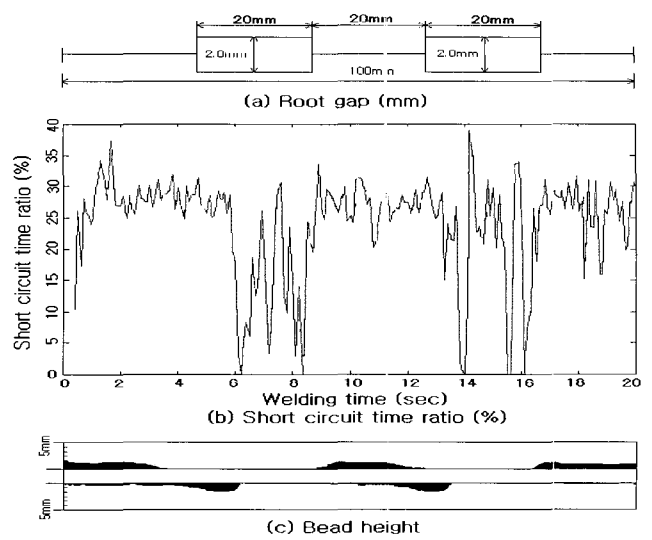


Fig. 5 Variation short circuit time ratio in the specimen with pulse type of root gap

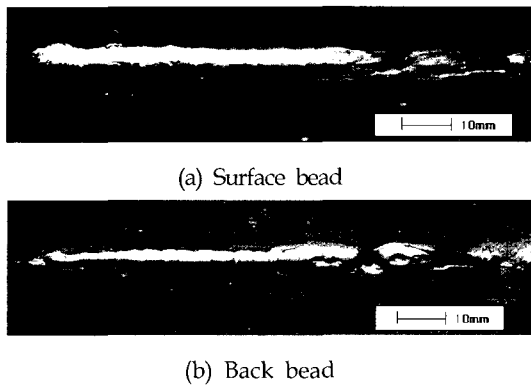


Photo 2 Bead in the specimen with increased root gap

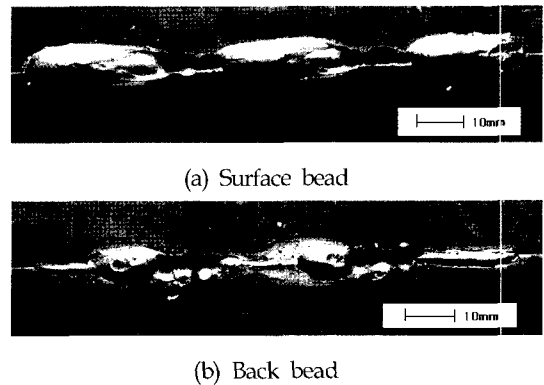


Photo 3 Bead in the specimen with pulse type of root gap

하게 증가하고 다시 모재간격이 없는 조건을 번갈아 가며 용접하는 경우에 있어, 비드 형성 과정과 단락시간비의 계측 결과를 나타낸 것이다. (a)는 모재간격 변화를 나타내고, (b)는 계측한 단락시간비를 그리고, (c)는 표면비드와 이면비드의 높이를 나타낸다. 모재간격이 감소함에 따라 단락시간비는 현저하게 감소함으로 용락의 조짐을 예측할 수 있다.

Photo 3의 (a)는 표면비드의 사진이며 (b)는 이면비드의 사진이다.

4. 모재간격 변화에 따른 최적 용접속도의 함수 관계

4.1 단락시간비와 최적 용접 속도의 수식 모델

Fig. 6은 모재간격이 0mm, 0.4mm, 0.8mm, 1.2mm인 조건에서 용접 속도를 변화시키면서 단락시간비를 측정하여 나타낸 것인데, 용접 조건은 Table 1과 같다. Table 3은 각 모재간격 조건에 대한 용접 속도와 관계에서 용접 품질의 양부를 불

용입(No full penetration), 양호(Good), 용락(Burn through)으로 구분하여 나타낸 것이다. 각 모재간격 조건에서 Good으로 나타낸 구간은 적정 용접 속도 구간으로 표면비드의 높이가 1mm~3mm이고 이면비드의 높이가 0.2mm~1mm인 용접 속도 구간이다. 불용입으로 나타낸 구간은 적정 용접 속도 구간보다 빠른 용접 속도 구간으로서 불용입 용접 속도 구간이다. 용락으로 나타낸 구간은 적정 용접 속도 구간보다 느린 용접 속도 구간으로서 이면비드 높이가 1.5mm이상이고 용락이 발생하는 용접 속도 구간이다. 모재간격에 따른 최적 용접 속도와 관계를 나타낸 Fig. 6과 Fig. 7의 관계를 이용하여 단락시간비와 적정 용접 속도와 관계를 Fig. 8과 같이 구하였다. 식 (1)은 이들 관계를 1차 방정식으로 근사화한 수식 모델이다. 여기서, x 는 단락시간비이며 y 는 단락시간비에 의해 연산된 적정 용접 속도이다.

$$y = \frac{-(10.5 - 3)}{14.4} \times x + 18.4 \quad (1)$$

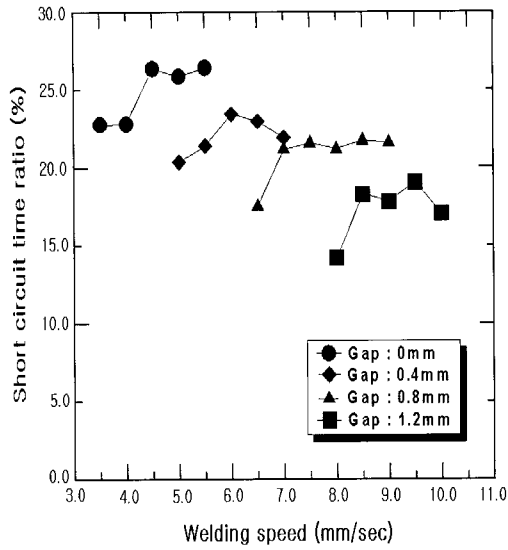


Fig. 6 Short circuit time ratio versus welding speed at various root gaps

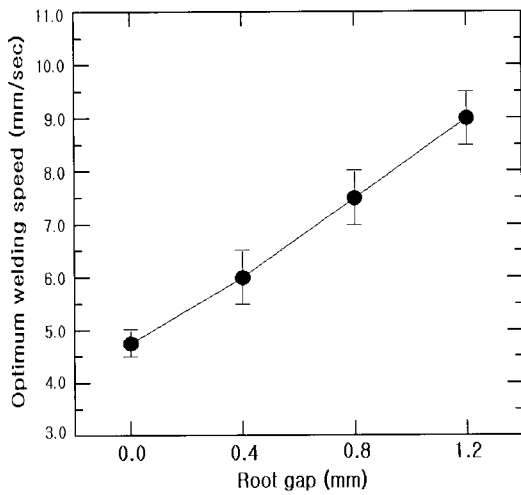


Fig. 7 Optimum welding speed at various root gaps

4.2 제어 시스템

Fig. 9는 표면비드 및 이면비드의 높이 제어 시스템의 블록 선도를 나타낸 것이다. 단락시간비를 계측한 후, 모재간격을 판단하고, 식(1)를 이용하여 적정 용접속도를 연산하여 매니퓰레이터의 용접속도를 제어하게 된다. 이 때 MCU는 직렬 통신을 이용하여 사용자 PC측으로 용접조건, 용접속도, 단락시간비를 전송하며 전송된 데이터는 사용자 PC측에서 데이터 보관, 검색, 정렬, 프린터 출력을 한다.

아크 용접 공정은 아크의 자체 특성으로 인해 제어장치는 많은 노이즈를 받게 된다. 본 논문에서는 하드웨어적인 로패스 필터뿐만 아니라 평균 이동법을 사용하여 소프트웨어 필터를 구성하였다. 식(2)는 사용된 이동평균법 수식을 나타낸 것이다.

$$D(n) = \frac{\sum_{i=n-(m-1)}^n f(i)}{m} \quad (2)$$

Table 3 Estimation of bead under various welding conditions

Root gap (mm) \ Welding speed(mm/sec)	0	0.4	0.8	1.2
3.5	▼			
4.0	▼			
4.5	○	▼		
5.0	○	▼		
5.5	□	○		
6.0	□	○	▼	
6.5		○	▼	
7.0		□	○	
7.5		□	○	▼
8.0			○	▼
8.5			□	○
9.0			□	○
9.5				○
10.0				□
10.5				□

○ : Good, ▼ : Burn through, □ : No full penetration

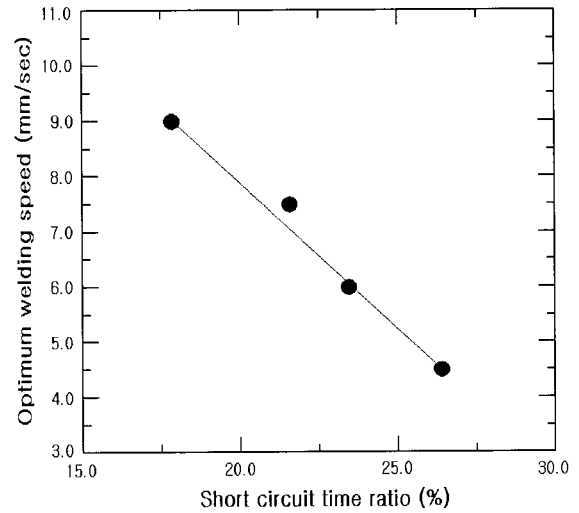


Fig. 8 Relationship between welding speed and short circuit time ratio for good quality of bead

- $D(n)$: 이동 평균한 값
- $f(i)$: 이동 평균할 데이터의 마지막 값
- m : 이동 평균할 데이터의 수
- n : 데이터 순번

5. 비드 높이 제어 실험 결과

5.1 모재간격이 0mm와 0.4mm로 변화하는 조건

Fig. 10은 용접선 길이 100mm를 각각 20mm씩 5구간으로 나누어 초기 모재간격이 0mm인 구간을 20mm 용접하고, 모재간격이 0.4mm인 구간을 20mm씩 번갈아 가며 용접할 때, 계측된 단락시간비를 나타낸 것이다. 점선은 계측된 단락시간비를 나타낸 것이고 실선은 단락시간비를 5구간으로 이동 평균한 데이터이다.

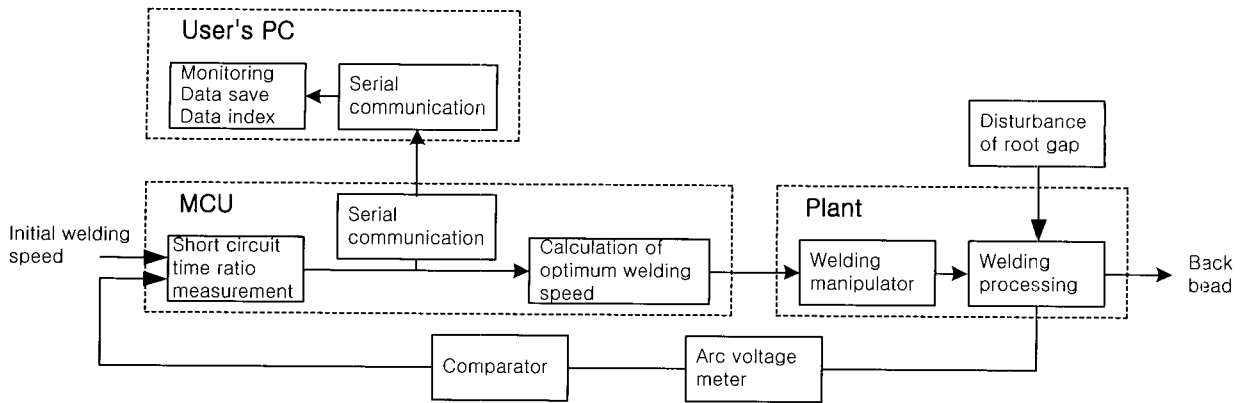


Fig. 9 Block diagram of bead control system

Fig. 11은 제어된 용접 속도를 나타낸 것이다.

Photo 4는 모재간격이 0mm와 0.4mm로 변갈아 가며 변화하는 모재간격 조건에서 용접한 모재의 표면비드와 이면비드의 외관 사진이다. 용접 방향은 좌에서 우로 용접하였으며, 비드 높이가 균일하게 제어된 것을 볼 수 있다.

5.2 모재간격이 0mm와 0.8mm로 변화하는 조건

Fig. 12는 용접선 길이 100mm를 각각 20mm씩 5구간으로 나누어 초기 모재간격이 0mm인 구간을 20mm 용접하고 모재간격이 0.8mm인 구간을 20mm씩 변갈아 가며 용접할 때 측정한 단락시간비를 나타낸 것이다. 점선은 단락시간비를 나타낸 것이고 실선은 단락시간비를 5구간으로 이동평균한 데이터이다.

Fig. 13는 제어된 용접 속도를 나타낸 것이다.

Photo 5는 모재간격이 0mm와 0.8mm로 변갈아 가며 변화하는 모재간격 조건에서 용접한 모재의 표면비드와 이면비드의 외관 사진이다. 표면비드는 모재간격이 0mm인 구간과 0.8mm인 구간에서 서로 다른 용접 속도에 의해 비드 폭이 다소 차이를 보이지만, 표면비드 높이 및 이면비드 폭, 높이는 일정하게 제어되었다.

5.3 모재간격이 단계적으로 증가하는 조건

Fig. 14는 모재간격이 0mm에서 0.4mm, 0.8mm, 1.2mm로 단계적으로 증가하는 경우에 측정한 단락시간비를 나타낸 것이다. 그림에서 점선은 측정한 단락시간비를 나타낸 것이고 실선은 단락시간비를 5구간으로 이동 평균한 데이터이다.

Fig. 15는 제어된 용접 속도를 나타낸 것이다. 모재간격이 넓어짐에 따라 단락시간비는 감소하고 용접 속도는 점차 증가하는 것을 볼 수 있다. Photo 7은 모재간격이 0mm에서 0.4mm, 0.8mm, 1.2mm로 단계적으로 증가하는 모재간격 조건에서 용접한 모재의 표면비드와 이면비드의 외관 사진이다. 표면비드는 모재간격이 단계적으로 증가함에 따라 용접 속도는 증가되고 증가된 용접 속도로 인해 표면 비드 폭은 좁아지는 것을 볼 수 있다. 이에 반해 표면 비드 높이 및 이면비드 폭, 높이는 일정하게 제어된 결과를 얻었다. Fig. 16은 실제 용접 중 사용자가 모니터링한 화면을 나타낸 것이다.

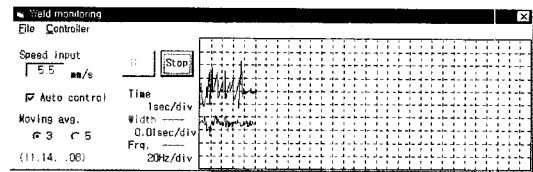


Fig. 16 The monitoring screen

6. 결 론

연강 판관 모재를 I형 맞대기 CO2용접을 행할 때, 모재간격의 변화에 따른 비드 형성과 용락 현상을 단위 시간당 단락된 시간의 비인 단락시간비와 단위 시간당 단락된 횟수인 단락주파수와 관계로 고찰한 결과 모재간격 변화에 따른 비드 형성 과정을 실시간적으로 판단함에 있어서 단락주파수보다는 단락시간비가 합리적인 판단 방법이라는 결과를 얻었다. 이러한 결과를 토대로 비드 높이 제어 시스템을 개발하여 모재간격이 없는 조건에서 급격하게 모재간격이 증가하는 모재 조건(0mm~0.8mm)과 모재간격이 1.2mm까지 점진적으로 증가하는 조건에서 용접 시험한 결과, 모재간격의 변화에도 비드 형성이 균일하게 제어된 결과를 얻었다.

참 고 문 헌

신준호, 김재웅 (2000). "용접선 자동추적을 위한 이중 전자기 센서의 개발에 관한 연구", 대한용접학회지, 제18권, 제4호, pp 330-339.

안영호, 방국수, 이종봉, 장래웅 (1994). "GMAW용접 이행 현상에 미치는 Ca의 영향", 대한용접학회지, 제12권, 제3호, pp 76-84.

Ito, H. and Nagaya, K. (1980). Development of Welding, Sanbo Publishing Co.

Kitazawa Y., Nagai Y. and Watanabe T. (1986). "Through the Arc Sensing System for GMA One Side Welding", IIW Doc. XII-931-86.

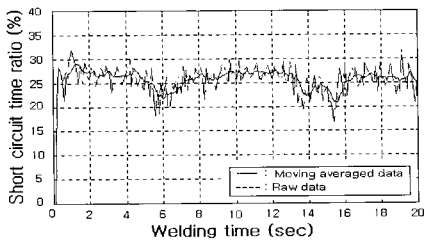


Fig. 10 Short circuit ratio data
(From no gap to 0.4mm gap)

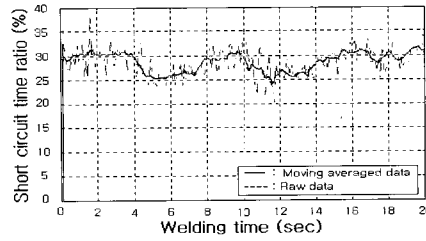


Fig. 12 Short circuit ratio data
(From no gap to 0.8mm gap)

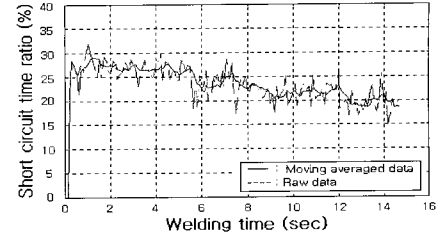


Fig. 14 Short circuit time ratio
(0mm ~ 1.2mm gap)



Fig. 11 Controlled welding speed
(From no gap to 0.4mm gap)

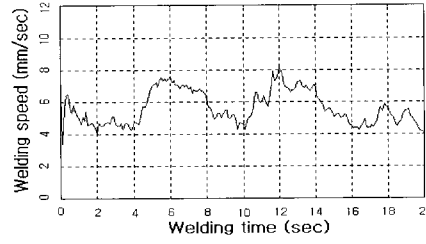


Fig. 13 Controlled welding speed
(From no gap to 0.8mm gap)

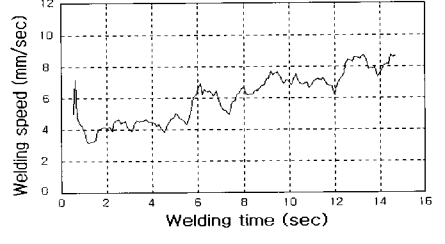


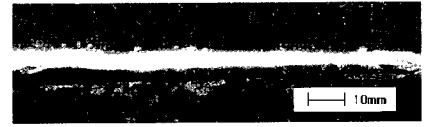
Fig. 15 Controlled welding speed
(0mm ~ 1.2mm gap)



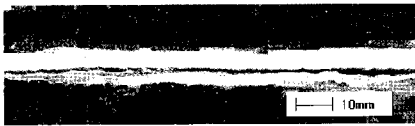
(a) Surface bead



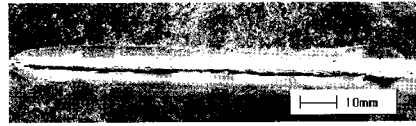
(a) Surface bead



(a) Surface bead



(b) Back bead



(b) Back bead



(b) Back bead

Photo 4 Controlled bead in pulse type
of root gap (no gap to 0.4mm)

Photo 5 Controlled bead in pulse
type root gap(no gap to 0.8mm)

Photo 6 Controlled bead in set up
root gap (0mm to 1.2mm)

Makabe, K. (1992). 스테핑 모터의 제어회로 설계, 도서출판 세움 21-28.

Ueyama, C. (1998). "고속 촬영에 의한 GMA용접 공정에서의
용적 이해 현상 해석", 대한용접학회지, 제16권 제2호, pp

2002년 1월 10일 원고 접수

2002년 3월 15일 수정본 채택