

**研究論文**

## CO<sub>2</sub> 용접의 스파터 발생에 미치는 용적이행 모드의 영향

강 봉 용\* · 김 희 진\*

### Effect of Metal Transfer Mode on Spatter Generation of CO<sub>2</sub> Welding

B. Y. Kang\* and H. J. Kim\*

**Key Words** : CO<sub>2</sub> welding, Metal transfer, Spatter generation rate, Wire feeding rate

#### Abstract

The spatter generation rate of GMA welding with CO<sub>2</sub> gas shielding was measured with the change of welding conditions such as wire feeding rate and welding voltage and then the results were analyzed with the accompanying changes in metal transfer mode and in bead geometry. The spatter generation rate (SGR) was relatively low not only with the short circuit transfer but with the truly globular transfer mode. However, the SGR resulted with the mixed mode were consistantly high. The resultant wave patten of mixed mode was due to the coexistence of short-circuit and globular transfer and characterized by the frequent appearance of instantaneous short circuit. Considering the result of SGR and that of bead geometry, it could be concluded that when the wire feeding rate (or welding current) was either low or high, the optimum bead shape could be obtained along with the low spatter generation. However, in the middle range of wire feeding rate, the optimum bead shape was only obtained in the mixed mode condition resulting in the high spatter generation.

#### 1. 서 론

GMA 용접 기법은 와이어를 사용하는 용접법으

로써 용접현장에서는 사용하는 보호가스의 종류에 따라 여러가지 용접법으로 구분되고 있다. 즉 CO<sub>2</sub> 가스를 사용하는 CO<sub>2</sub> 용접, Ar과 CO<sub>2</sub> 또는 O<sub>2</sub>의 혼합가스를 사용하는 MAG (metal active gas)

\* 정회원, 생산기술연구원

용접, Ar 또는 He 가스를 사용하는 MIG (metal inert gas) 용접, 4원 혼합가스를 사용하는 TIME 프로세스 등이 있다.

국내에서는 CO<sub>2</sub> 용접이 가장 광범위하게 사용되고 있는데, 이는 CO<sub>2</sub> 용접가스의 가격이 다른 가스에 비해 무척 저렴하기 때문이다. 최근에는 용접 자동화에 대한 관심이 증가함에 따라 CO<sub>2</sub> 용접이 더욱 확대 적용되고 있는 것이 세계적인 추세이다. 그러나 CO<sub>2</sub> 용접을 적용함에 있어 스패터 발생량이 많다는 것이 항상 문제점으로 지적되어 왔다. 따라서 CO<sub>2</sub> 용접의 확대적용에 보다 적절히 대응하기 위해서는 스패터 발생을 절감시킬 수 있는 방안이 수립되어야 하는데, 이에 대한 대응의 하나가 바로 1980년대 초 상품화 되어 최근까지도 개발이 활발하게 진행되고 있는 인버터 (inverter) 용접전원이다<sup>1)</sup>.

인버터 용접전원의 특징 중의 하나는 파형제어를 순시적으로 할 수 있어서 용접 스패터가 발생하는 순간순간에 용접전류 파형을 제어하여 스패터 발생을 억제시키는 것으로 알려져 있다<sup>2)</sup>. 그러나 국내에서는 이와같은 제어현상이 어떻게 이루어지고 있는지에 대해서 깊이 있게 연구된 바 없을 뿐만 아니라, 각기 서로 다른 파형제어 특성을 가지고 상품화 되어 있는 인버터 전원에 대한 비교 평가조차도 이루어져 있지 않은 상태이다. 따라서 본 연구에서는 기존의 SCR형 용접기와 현재까지도 다양하게 개발되고 있는 인버터 용접기를 상호 비교 평가하는 최종 목표를 가지고, 본 논문에서는 일차적으로 SCR용접기의 스패터 발생량에 미치는 용접조건의 영향에 대하여 보고하게 되었다.

지금까지 GMA 용접, 특히 CO<sub>2</sub> 용접의 스패터 발생량에 대해서는 국내외적으로 자주 보고되어 왔고<sup>3-8)</sup>, 특히 인버터 용접기의 우수한 성능을 홍보하는 차원에서 SCR 용접기와 비교한 결과가 많이 보고 되었다. 그러나 이들 보고는 대부분 좁은 범위의 용접조건에서 시험한 결과만을 보여 주고 있어, 용접조건이 (특히 용접전압이) 스패터 발생량에 미치는 영향을 이해하는데 어려움이 있다는 것을 발견할 수 있었다. 본 연구에서는 이러한 점을 보강하기 위하여 보다 넓은 범위의 조건에서 스패터 발생량을 측정하고 그 결과를 용적이행 현상 및 용접 비드형상 측면에서 해석함으로써, 용접조건과 스패터 발생량의 상관관계를 보다 쉽게 설명

할 수 있도록 하고자 수행하였다. 그리고 본 결과는 추후 최적 용접조건을 설정하거나 파형제어 성능을 평가하는데 필요한 기본 데이터의 일부로 사용코자 하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 실험재료 및 실험방법

실험용 용접재료는 직경 1.2mm의 CO<sub>2</sub> 용접용 와이어 (KS규격 YGW12) 로써, 화학조성은 Table 1에서 보는 바와 같다. 용접 모재는 100(W) × 540(L) × 15mm(t) 크기의 연강을 사용하였는데, 강판표면은 기계가공하여 녹을 완전히 제거하였다. 용접은 준비된 모재를 스패터 포집장치 내부에 설치하고 약 400~500mm 정도의 비드 언 프레임 (bead-on-plate) 용접을 길이방향으로 실시하였다. 용접이 진행되는 동안 용접 전류·전압 파형을 각각 측정하였으며, 용접이 완료된 후에는 용접중 발생된 스패터를 (노즐 및 팁에 부착된 스패터까지도) 모두 포집하고, 이를 슬래그 잔사등으로 부터 분리한 다음, 일정크기 (140mesh) 이상의 스패터만 취하여 무게를 측정하였다. 측정된 스패터 무게는 용접재료 100g 당으로 환산하여 스패터 발생율 (spatter generation rate, SGR, %) 을 측정 하였다.

$$\text{스패터발생율 (\%)} = \frac{\text{스패터무게 (g)}}{\text{용접재료소모량 (g)}} \times 100$$

본실험에 사용된 용접전원은 350A급 SCR 제어형으로써 국내 S사에서 제작된 것이었으며, 보호가스는 용접용 CO<sub>2</sub> 가스이며 유량은 25 l/min 이었다.

Table 1. Chemical composition (wt. %) of welding wire

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ti
0.07	0.78	1.37	0.014	0.009	0.26	not detected

### 2.2 용접조건 및 파형측정 장치

용접조건은 먼저 와이어 송급속도(wire feeding rate, WFR)를 2.0~14.0m/min 범위에서 5가지 단계로 설정한 다음, 각각의 단계에서 콘택트 팁(contact tip)과 모재간의 거리(CTWD) 및 용접속도는 일정하게 하고, 단지 용접전압만을 변수로 하여 실험을 실시하였다. Table 2는 실험 변수로 사용된 송급속도 및 용접 전압의 시험범위를 보여주고 있다. 용접이 진행되는 동안 용접전압과 전류는 아크 모니터링 시스템(Arc Monitoring System)을 통하여 2초 간격으로 측정하여 평균 하였으며, 각각에 대한 순간적인 변화는 자체 제작한 용접 전류·전압 파형측정 장치를 이용하여 각각 20kHz의 샘플링속도로 3초 동안 측정하였다. 용접전압 신호는 용접전원의 단자로부터 입력되도록 하였으며, 용접전류 신호는 용접전원 케이블에 설치된 홀 센서(hall sensor)에서 감지되도록 하였다. 그 밖에 본장치에 대한 세부내용은 참고문헌(9)에 보고된 바 있다.

Table 2. Welding condition

WFR* (m/min)	CTWD** (mm)	Travel speed (mm/min)	Voltage range (V)
2.0	14	250	14.7~20.0
3.6	14	250	16.6~23.4
5.5	14	250	19.4~27.3
9.0	16	300	23.7~33.9
12.0	20	300	26.0~38.4
14.0	20	300	30.5~36.1

\* WFR : Wire feeding rate

\*\* CTWD : Contact tube to work distance

### 3. 시험결과 및 검토

#### 3.1 용적이행 형태의 변화

CO<sub>2</sub> 용접에 있어서 용적이행 형태는 단락이행(저전류영역)과 입상(globular)이행(고전류영역)의 두가지로 나타나고 있음은 잘 알려져 있는데<sup>10)</sup>, 이들은 용적이행 과정에 있어서 커다란 차이를 보여주고 있기 때문에, Fig.1의 (a) 및 (b)에서 보여

주는 바와 같이, 용접전압·전류 파형에 있어서도 뚜렷한 차이를 보여지게 된다. 그런데 단락이행에서 입상이행으로 천이가 일어나는 조건에서는 상기한 두가지 파형이 혼재되어 Fig.1의 (c)와 같이 나타나게 된다.

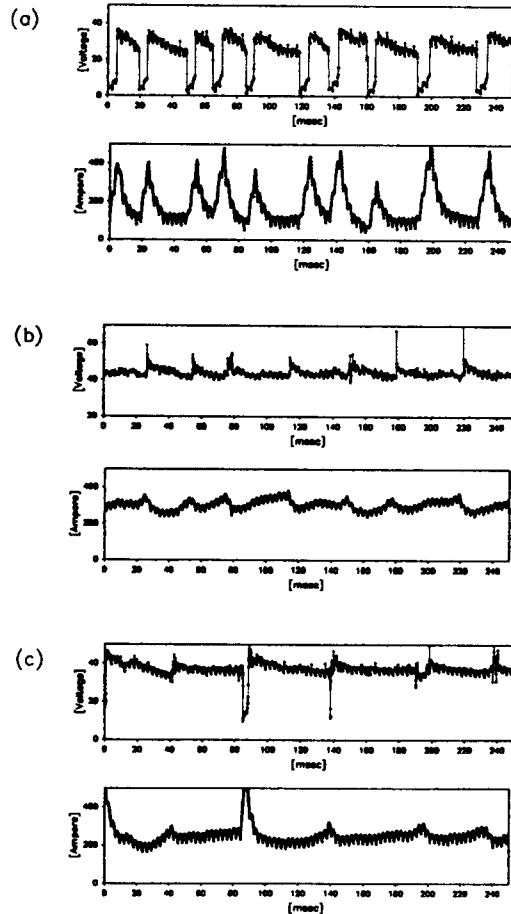


Fig. 1 Typical arc voltage and current variations of three different transfer modes : (a) short circuit, (b) globular and (c) transitional mode.

따라서 본 연구에서는 CO<sub>2</sub> 용접의 용적이행 형태를 3가지로 구분하였는데, 먼저 평균 단락 횟수가 5회/sec 이하인 경우는 입상이행으로 정의하였고, 6~15회/sec인 경우는 천이(transitional)이행이라고 하였으며, 16회/sec 이상인 경우는 단락이행

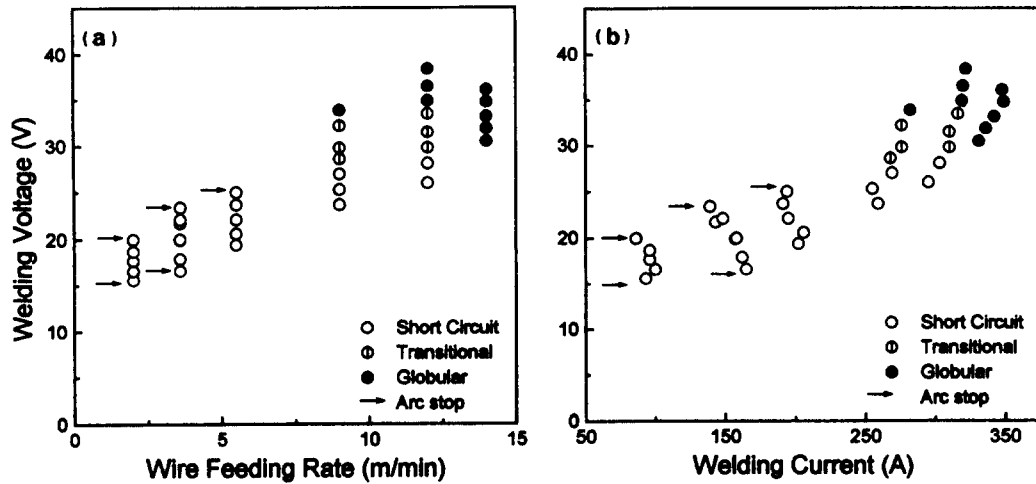


Fig. 2 Metal transfer mode map.

으로 정의 하였다.

이상과 같은 기준을 가지고 본 실험에서 실시한 모든 조건에 대해 용적이행 형태를 판정한 결과, Fig. 2와 같은 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 2(a)는 용적이행 형태를 와이어 송급속도(x축) 및 용접전압(y축)을 변수로 하여 보여 주고 있는 것이고, Fig. 2(b)는 와이어 송급속도를 용접전류(x축)로 바꾸어 재구성 한 것이다. 본 그림에서 알 수 있듯이 용적이행 형태는 상기 변수의 변화에 따라 차이가 있음을 보여주고 있는데, 이러한 차이를 와이어 송급속도에 따라 구분하여 보면 다음과 같다.

먼저 와이어 송급 속도(WFS)가 5.5m/min 이하(용접전류 200A 이하)인 범위에서는 용접전압에 관계없이 모두 단락이행 현상만을 보여 주고 있다. 단락횟수는 전압이 증가함에 따라 증가하다가 감소하는 경향을 보여 주었는데,<sup>11-12)</sup> 최대 단락횟수는 와이어 송급속도가 3.6m/min, 용접 전압이 20V인 110회/sec 이었으며, 최소단락 횟수는 약 20회/sec 이었다. 따라서 이 경우는 모두 단락이행 조건이라고 판정하였다. 그리고 본 실험에서 적용한 최소전압 및 최대전압에서는 용접아크가 끊기는 현상이 발생하였다.

한편 와이어 송급속도가 최대가 되는 14m/min인 경우(용접 전류 315A 이상)에서는 30V 이상의

범위에서만 시험이 수행되었는데, 용접전압에 관계없이 모두 입상이행만이 나타나고 있음을 보여 주었다. 그러나 실제로 3초 동안 기록된 전체 파형을 분석하여 본 결과, 단락현상이 일부 나타나고 있음을 확인할 수 있었는데 그 횟수가 모두 5회/sec 이하이었기 때문에(Fig. 3) 이들 모두를 입상이행이라고 판정하였다. 입상이행에 있어서의 특징은 Fig. 1의 (b)에서 보여주는 바와 같이 입상이행할때마다 전압파형상에 불연속점을 준다는 것인데<sup>13)</sup>, 이를 근거로 단위 시간당 입상 이행 횟수를 계산하여 본 결과 약 30~40회/sec 정도이었다.

한편 와이어 송급속도가 중간범위인 9m/min, 12m/min인 경우에는(용접전류 220~310A 범위) 앞에서 언급한 3가지 용적이행 형태가 모두 나타나고 있었다. 즉 저 전압측에서는 단락이행을 보이다가 용접전압이 증가하게 되면 입상이행으로 완전히 천이하였는데, 그렇게 천이되는 과정에서 단락이행과 입상이행이 혼재 되어 나타나는 천이 이행 영역이 존재하였다. 이는 결국 용접 전압이 증가함에 따라 단락횟수가 감소함을 의미하는 것인데, Fig. 3은 와이어 송급 속도가 12m/min인 경우에 있어서의 용접전압 증가에 따른 단락횟수의 변화를 보여주고 있다. 이 경우 26V에서는 단락횟수가 30회로써 단락이행을 하지만, 전압이 증가하면서 횟수는 점차 감소하여 천이이행이 되고, 전

압이 36V 이상이 되면 단락회수가 0이 되어 완전히 입상이행으로 천이하였다.

이상의 결과에서 알 수 있듯이, CO<sub>2</sub> 용접의 용적이행 형태는 와이어 송급속도(용접전류)에 따라 상이하게 나타나고 있음을 알 수 있는데, 본 연구에서는 와이어 송급속도를 기준으로 하여 다음과 같이 구분하여 보았다. 즉 용접전압 변화에 관계없이 단락이행만을 보여주는 구간, 입상이행만 보여주는 구간(이들을 각각 단락이행 구간, 입상이행구간이라고 명명함) 그리고 천이현상을 보여 주어 2가지 이행 형태가 모두 나타나는 구간(이를 혼합이행 구간이라고 칭함)으로 구분한 것이다.

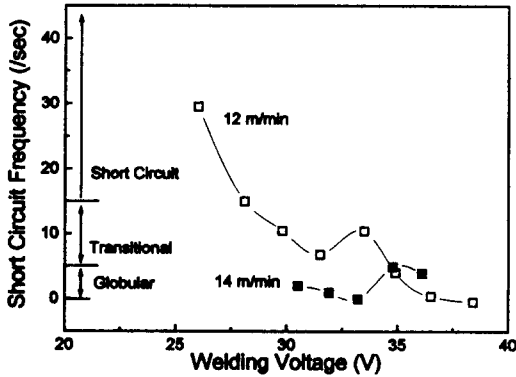


Fig. 3 Short circuit frequency as a function of welding voltage

### 3. 2 스패터 발생량

#### 3. 1. 1 단락이행 구간

와이어 송급속도가 2.0, 3.6, 5.5m/min 인 경우에 있어서 급속이행은 용접전압 변화에 관계 없이 단락이행만을 보여주었다(Fig. 2). 이와 같은 단락이행 구간에서의 스패터 발생량은 Fig. 4에서 보여주고 있다. 본 그림에서 알 수 있듯이 스패터 발생율은 용접전압이 증가함에 따라 서서히 감소하다가 증가하는 경향을 보여 주고 있다. 다시 말하면 이 구간에서는 스패터 발생율이 최소가 되는 용접전압이 존재 한다는 것을 의미 하는데, 그 조건에서의 스패터 발생율은 모두 1% 미만으로 매우 적은 수치를 보여 주었다.

한편 용접전압 증가에 따른 스패터 발생율의 변화와 단락이행 횟수의 변화를 함께 검토하여 본 결과 이들 사이에는 어느 정도 상관관계가 있음을 알 수 있었는데, Fig. 5에서 보듯이 단락이행 횟수가 최대가 되는 조건과 스패터 발생율이 최소가 되는 조건이 매우 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

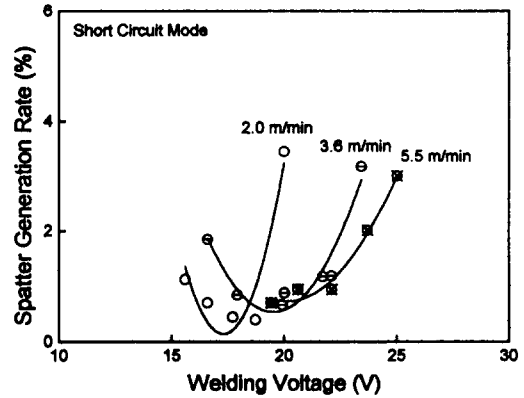


Fig. 4 Spatter generation rate as a function of welding voltage in the condition of short circuit transfer (WFR=2.0, 3.6 and 5.5m/min)

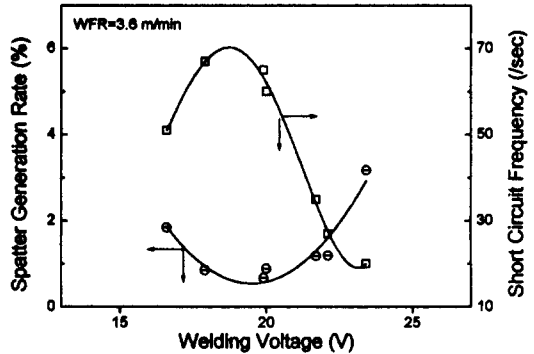


Fig. 5 Effect of welding voltage on spatter generation rate and short circuit frequency

#### 3. 1. 2 혼합이행 구간

본 구간은 앞서도 언급하였듯이 와이어 송급속도가 9, 12m/min 이 되는 경우로써, 저 전압측에서는 단락이행이, 고전압측에서는 입상이행이

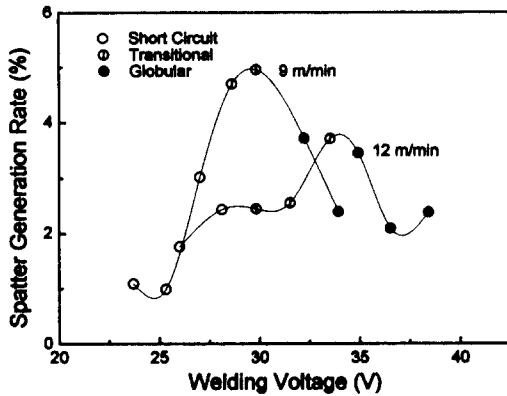


Fig. 6 Spatter generation rate as a function of welding voltage in the condition of mixed transfer (WFR=9.0 and 12.0m/min)

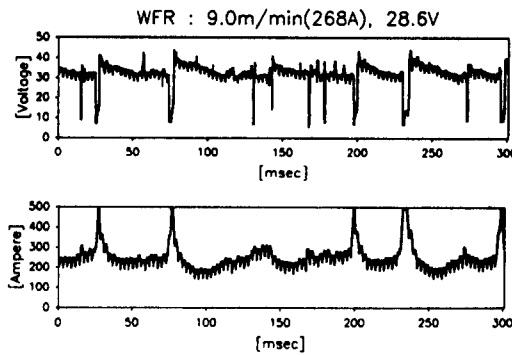


Fig. 7 Typical wave pattern showing the frequent appearance of instantaneous shot circuit in the transitional transfer mode.

나타나는 구간이다. Fig. 6은 이 구간에서의 스패터 발생률과 용접전압의 관계를 보여 주고 있는데, 단락이행 구간에서의 경향(Fig. 4)과는 정 반대가 되는 현상을 보여주고 있다. 즉 이 구간에서는 용접전압이 증가함에 따라 스패터 발생률이 증가하다가 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 Yamamoto<sup>8)</sup>가 용접전류 250A에서 시험한 결과와 일치하고 있다. 결국 이 경우에는 스패터 발생률이 최대가 되는 조건이 존재 하게 되는데, 최대치는 각각 4.96% 및 3.71% 이었다. 이러한 현상을 용적이행 현상과 비교하여 살펴 보면, 단락이행을 하는 저전압측에서는 1~2% 정도이지

만, 용접전압이 증가하여 천이이행 형태가 되면서 스패터 발생률은 최대가 되고, 용접전압이 더욱 증가하여 입상이행이 되면 스패터 발생률은 다시 감소하는 경향을 보여주고 있다. 천이이행 구간에서 스패터 발생률이 최대가 되는 원인을 규명하기 위하여, 용접파형을 보다 자세히 분석하여 본 결과 천이이행에서는 단락시간이 2msec 이하인 순간 단락(instantaneous short circuit)이 자주 발생하고 있음을 확인할 수 있었다(Fig. 7). 이러한 사실은 순간단락이 스패터 발생과 어떤 상관관계가 있을 수 있음을 의미하는데, Shuyian 등<sup>14)</sup>은 이들간의 관계를 실험적으로 보여준바 있다.

### 3.1.3 입상 이행 구간

본 연구에서 수행한 최대 와이어 송급속도인 14m/min의 조건은(용접전류 315A 이상) 입상 이행 구간에 위치한다고 할 수 있다. Fig. 8은 이 조건에서의 스패터 발생률 시험결과를 보여 주고 있는데, 용접전압이 증가함에 따라 계속 증가하는 경향을 보여 주고 있다. 그런데 앞절의 혼합이행 구간에서 나타난 이행은 스패터 발생률이 2~2.5% 수준이었던데 반하여 이구간에서의 발생률은 0.88~2.21% 정도로써 상대적으로 낮은 수치를 보여주었다. 이는 결국 같은 입상 이행이라고 하더라도 이 구간에서 나타나는 입상 이행이 보다 안정적으로 이루어 지고 있음을 의미하는 것으로써

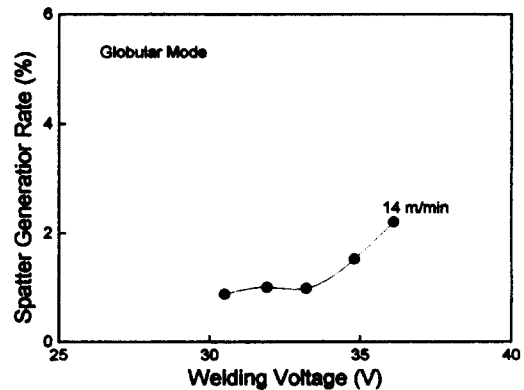


Fig. 8 Spatter generation rate as a function of welding voltage in the condition of globular transfer (WFR=14.0m/min)

적정 용접전압 범위가 존재함을 보여주고 있다.

### 3.3 용접시공 조건과 스패터 발생량

지금까지는 용접조건 변화에 따른 스패터 발생량의 변화에 대해서 살펴 보았는데, 결론적으로 용접조건을 적절히 선택하면 스패터 발생을 최소화 시킬 수 있음을 알 수 있었다. 그리고 용접전압을 선정하되 스패터 발생이 최소화 되는 조건으로 선정하게 되면 스패터 발생율은 SCR용접기에서도 약 2% 이하로 유지할 수 있음을 보여 주었다. 그러나 실제 용접시공에 있어서는 스패터 발생 정도보다는 용접비드 형상을 우선적으로 고려하여 용접조건을 설정하고 있다<sup>14)</sup>. 즉 필요한 용접전류(와이어 송급속도)가 선정되면 다음으로 양호한 비드 형상을 얻을 수 있도록 용접전압 범위가 설정된다는 것이다. 그리고 그러한 조건 범위가 결정되면 후차적으로 고려 되는 것이 스패터 발생량 또는 아크 안정성등인 것이다.

따라서 본 연구에서는 양호한 용접 비드(bead)가 생성되는 조건을 설정하기 위하여 bead-on-plate 용접된 시편을 모두 절단하여 용접비드의 높이(a), 비드의 폭(b) 그리고 용입깊이(c)를 측정하고, 비드의 높이와 폭은 다시 a/b 값으로 정리하여 볼록비드 정도(bead convexity)를 평가 할 수 있는 지수로 사용하였다.

Fig. 9는 와이어 송급속도가 12m/min의 조건에서 용접된 시편의 단면사진인데, 용접전압 변화에 따라 비드형상에 커다란 차이가 있음을 보여주고 있다. 즉 용접전압이 낮은 경우에는 볼록 비드형상을 하게 되고, 전압이 증가하면 비드 퍼짐성은 좋아지나 용입깊이가 낮아지게 됨을 보여주고 있

다. Fig. 10은 이와 같은 상관 관계를 보다 정량적으로 자세히 보여주는 한가지 예이다. 이 그림은 와이어 송급속도가 12m/min인 경우의 결과로써, 볼록비드성의 지수가 되는 a/b 값과 용입깊이(c)를 용접전압에 따라 도표화한 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 (그리고 이미 잘 알려져 있듯이) 용접전압이 증가함에 따라 a/b 값은 증가하여 비드 퍼짐성은 좋아지나, 용입깊이는 어느정도 증가하다가 감소하게 된다. 따라서 용접비드 측면에서 용접 조건을 선정한다면 우선적으로 비드의외관 측면에서 볼록비드가 아니면서 용입이 보다 깊은 조건이 최적조건이 된다고 하겠다. 본 연구에서는 이러한 검토를 거쳐 a/b 값이 약 4.0에 가까울수록 비드 형상이 양호한 것으로 판단하였다. Fig. 9(b)에서 보여주는 비드 단면이 바로 a/b=4.0인 비드의 것이다.

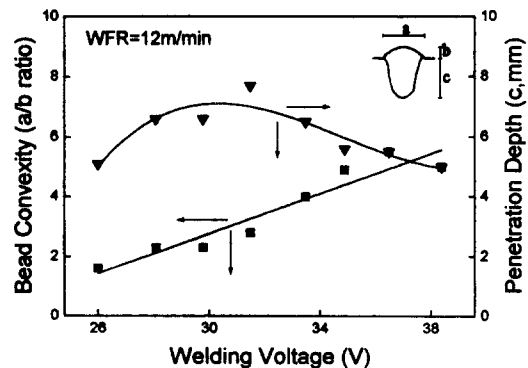


Fig. 10 The effect of welding voltage on bead convexity and penetration depth.

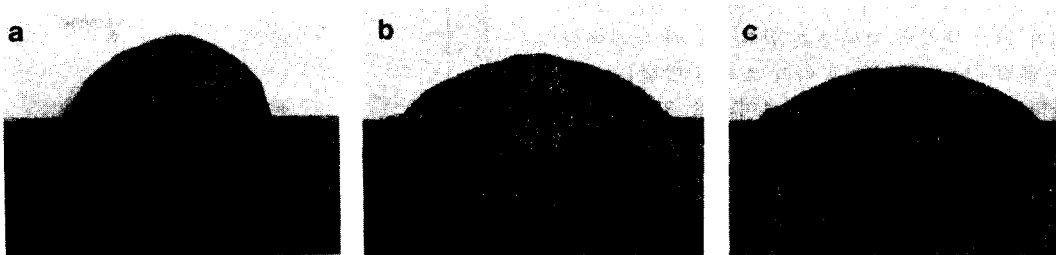


Fig. 9 Cross-section of weld beads made with different welding voltages of (a) 28.1V, (b) 33.5V, (c) 38.4V

이러한 판단을 기초로하여 최적 비드형상 전압 조건에서의 스패터 발생율을 와이어 송급속도 및 용접전류에 대해 도표화 한 것이 Fig. 11이다. 와이어 송급속도가 낮은 경우에는 스패터 발생량의 절대치가 상대적으로 작았기 때문에 용접 가능한 범위(아크 끊김 현상이 없는 조건)에서 얻어진 모든 데이터를 사용하여, 최대치 및 최소치로 표시하였다. 이렇게 만들어진 Fig. 11의 결과가 의미하는 것은 와이어 송급속도(또는 용접전류)에 따라 스패터 발생량의 변화는 매우 크며, 와이어 송급속도 9m/min(용접전류 270~280A) 부근에서 최대를 기록한다는 것이다. 다시 말하면, 스패터 발생이 최소가 되는 용접전압에서는 와이어 송급속도에 관계없이 2% 이하로 그 차이가 크지 않지만, 양호한 비드가 형성되는 용접 전압에서는 와이어 송급 속도(또는 용접전류)에 따라 그 차이는 매우 크게 나타나게 된다는 것이다.

그리고 그렇게 차이가 크게 되는 원인을 용적이행 형태와의 관계에서 찾아보면, 송급속도가 낮은 경우는 안정적인 단락이행을 하는 구간으로써 스패터 발생량이 매우 적은 반면, 와이어 송급속도가 9.0~12.0m/min 이 되는 구간에서는 비드 형상이 양호하게 되는 조건이 천이이행 모드를 하는 조건과 일치하여 발생률이 높을수 밖에 없고, 송급속도가 더욱 증가하게 되면 입상 이행이 나타나는

조건이 되기 때문에 스패터 발생량은 다시 감소한다고 할 수 있다.

결국 적정용접 조건을 선정함에 있어 가장 문제가 되는 구간은 혼합 이행 구간이라고 할 수 있는데, 이 구간에서는 스패터 발생량을 줄이고자 하면 비드 모양이 나빠지고, 비드 모양이 양호한 조건을 취하게 되면 스패터가 다량 발생하는 결과를 초래하게 되는 것이다. 그런데 실제 용접시공에 있어서는, 앞에서 언급한 바와 같이, 비드 모양을 우선적으로 고려하기 때문에 다량의 스패터 발생은 감수할 수 밖에 없는 실정이다. 따라서 향후 스패터 발생량과 관련하여 인버터 용접기의 기능을 평가함에 있어 천이이행 모드 조건에서 파형제어 기능의 역할을 보다 깊이 있게 평가하는 것이 매우 중요하다고 하겠다.

#### 4. 결 론

사이리스터(SCR) 제어 방식의 용접기와 보호가스로써 CO<sub>2</sub> 가스를 사용하여 용접조건 변화에 따른 스패터 발생량을 측정하고, 측정된 결과를 급속이행 모드와 관련하여 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 와이어 송급속도가 느려서 (5.5m/min 이하)

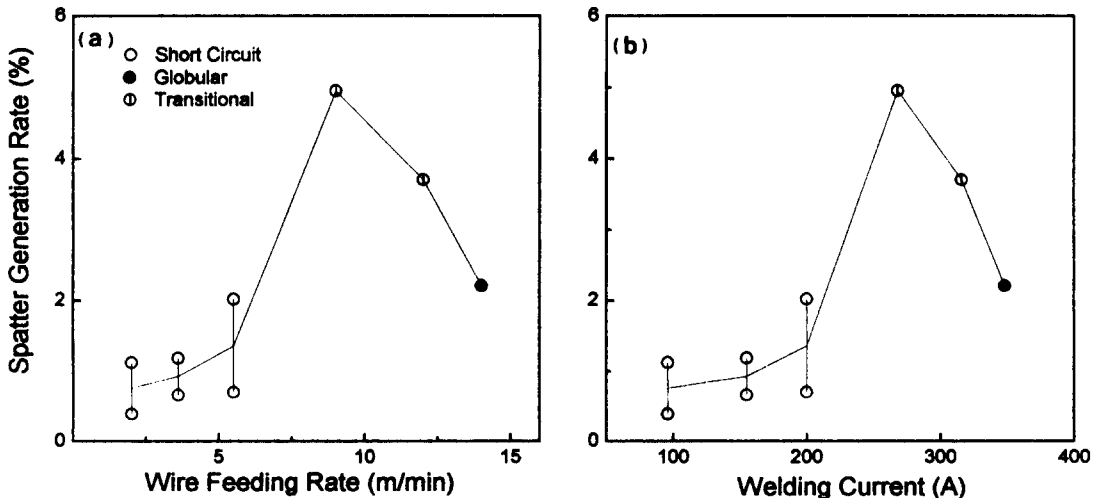


Fig. 11 Spatter generation rate as a function of (a) wire feeding rate and (b) welding current in the condition of optimum bead geometry



용접전류가 낮은 경우에는(200A 이하), 금속이행 형태는 용접전압에 관계 없이 단락 이행만을 보여 주며, 스파터 발생율은 용접전압이 증가함에 따라 감소하다가 증가하는 경향을 보여준다.

(2) 와이어 송급속도가 증가하여 9~12m/min 수준이 되면(용접전류:250~270A), 금속이행 형태는 용접전압이 증가함에 따라 단락이행에서 입상이행으로 점차적으로 바뀌게 되며, 스파터 발생량을 증가하다가 감소하는데, 천이 구간에서 스파터 발생량은 최대가 된다.

(3) 와이어 송급속도가 14m/min(용접전류:270A 이상)이 되면, 입상 이행만을 보여 주는데, 이 경우의 스파터 발생량은 용접전압이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보여준다.

(4) 최적의 용접비드가 만들어 지는 조건에서의 스파터 발생량은 와이어 송급속도(또는 용접전류)가 증가함에 따라 서서히 증가하다가 9m/min 정도(260A)에서 약 5%로 최대치에 도달하는데, 최대가 되는 조건에서의 용적이행 형태는 천이이행(단락이행+입상이행) 모드로써 순간단락이 자주 발생하는 모드이다.

## 참 고 문 헌

1. 김기철, 강문진, 조시훈 : GMA/GTA 용접전원 system 및 제어기술, 대한용접학회지, Vol. 14, No. 3, p. 1(1996)
2. T. Mita : Waveform control method in CO<sub>2</sub> gas shielded arc welding, Quarterly J. of Japan Weld. Soc., Vol. 6, No. 2, p. 209(1988)
3. 안영호 외 : CO<sub>2</sub> 용접 spatter 발생에 미치는 미량원소의 영향, 대한용접학회 추계 학술 발표 개요집, p. 14(1990)
4. H. Matsui and H. Suzuki : Restraint of spatters scattered in high speed gas shielded arc welding with solid steel wire, Toyota Technology, Vol. 37, No. 2, p. 190(1987)
5. 안영호 : GMA 용적이행 현상에 미치는 제인자의 영향, 신기술 신상품 용접기술세미나, 생산기술연구원(1996)
6. H. Yamamoto : Recent advances in welding power systems for automated welding, J. of Japan Weld. Soc., Vol. 64, No. 6, p. 457(1995)
7. E. K. Stava : Low spatter welding, Australasian Welding Journal, 4th Quarter, p. 21(1995)
8. H. Yamamoto : Recent advances in inverter controlled arc welding power sources and their application, J. of Japan Weld. Soc., Vol. 58, No. 4, p. 273(1989)
9. Gas metal arc welding의 용착속도 향상 기술 개발에 관한연구, 공기반 과제 최종보고서, 통상산업부(1996)
10. 안영호, 방국수, 이종봉, 장래용 : GMAW 용적이행 현상에 미치는 Ca의 영향, 대한용접학회지 Vol. 12, No. 4, p. 424(1994)
11. A. A. Smith : Characteristics of the short circuiting CO<sub>2</sub> shielded arc, British Welding Journal, Vol. 10, No. 11, p. 571(1963)
12. S. Liu and T. A. Siewert : Metal transfer in gas metal arc welding : Droplet rate, Welding Journal, Vol. 68, No. 2, p. 52-s(1989)
13. J. A. Johnson, N. M. Carlson, H. B. Smartt and D. E. Clark : Process control of GMAW : Sensing of metal transfer mode, Welding Journal, Vol. 70, No. 5, p. 91-s(1991)
14. Y. Shuyian and G. Zheng : Effect of arc physics on developing CO<sub>2</sub> arc welding, China Welding, Vol. 3, No. 1, p. 1(1994)
15. Private communication