연구논문

알루미늄의 펄스 전류 미그 용접

최 재 호* · 최 병 도** · 김 용 석*

*홍익대학교 금속 · 재료공학과
**성남기능대학 금속공학과

Metal Transfer Characteristics of Aluminium under Pulsed Current Metal Inert Gas Welding

Jae Ho Choi*, Boung Do Choi** and Yong-Seog Kim*

*Dept. of Materials Science and Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea
**Dept. of Materials Engineering, Seongnam Polytechnic College, Seongnam 461-711, Korea

Abstract

In this study, metal transfer characteristics in pulsed current metal inert gas (MIG) welding of aluminum was investigated. Based on the metal transfer characteristics from direct current electrode negative MIG welding, the one drop per one pulse(ODOP) condition was predicted and compared with experimental data. The results indicated that experimental pulse range for the ODOP condition is wider than that predicted from the DCEP MIG welding data. In addition, more stable metal trnasfer behavior was obtained at the higher end of the ODOP condition.

(Received June 18, 2002)

Key Words : Metal transfer characteristics, PC MIG welding, DCEP MIG welding, Welding variable, ODOP region

1. 서 론

알루미늄 합금은 비 강도가 상대적으로 높기 때문에, 자동차, 고속 전철, 선박 및 비행기와 같은 운송 기기의 구조물로 주로 사용되고 있다. 이러한 운송 기기의 구조물은 조립하는 과정에서 용접 공정이 일반적으로 사용되기 때문에 알루미늄의 용접성의 확보는 매우 중요한 과제중의 하나이다. 그러나 알루미늄은 열용접부 기공 발생 저항성, 용접부 강도 회복 능력, 용접부 균열의 발생 저항성등의 용접성이 강재 용접의 경우와 비교하여 상대적으로 우수하지 못하다[1]. 특히 알루미늄의 표면 장력이 철(Fe)에 비하여 작고, 용융 온도가 낮기 때문에 소모성 전극을 사용하는 metal inert gas (MIG) welding에서는 전극에서 이행되는 용적(droplet)의 거동의 조절이 용이하지 않은 문제점이 있다. 즉 용적 이행이 잘 조절되지 않을 경우, 아크의 불안정성을 가중시켜서 외부 공기 유입에 의한 기공 발생, 산화물 혼입, 스패터 발생등의 문제점이 발생한다. 따라서 최근 금속의 이행 현상에 대한 근본적인 이해를 확대하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다[2-7].

펄스 전류 MIG 용접(Pulsed Current Metal Inert Gas Welding, PC MIG welding)은 직류 역극성 불활성 가스 메탈 용접(Direct Current Electrode Positive Metal Inert Gas Welding, DCEP MIG welding)과 비교하여 용적 이행의 안정성 및 아크의 안정성을 기대할 수 있기 때문에 용접부의 용접성을 향상시키고 적절한 용접 조건을 설정하면 DCEP MIG welding와 비교하여 동일한 용접 전류에서도 용적 이행의 주파수를 자유로이 증가시킬 수 있기 때문에 용접 생산성 측면에서도 우수한 용접법이다[8-10]. 특히 이 용접법은 저전류 용접시 용접부의 용접성이 DCEP MIG welding와 비교하여 우수하므로 구조물 등의 경량화를 위한 박판 재료 용접에 적용하여 모재의 열변형과 고온 균열의 발생을 방지할 수 있는 장점이 있다[11].

이 용접법에 대한 연구는 고속도 비디오 카메라를 이용하여 하나의 펄스가 인가될 때 하나의 용적이 용접봉으로부터 용융지로 이행하는 용접 조건, 즉 기저 전류(base current)에서 용융된 용적이 피크 전류의 전자

기력에 의해 용접봉으로부터 탈착되는 조건이 가장 안정한 용적 이행을 이룬다[9,11].

PC MIG welding의 적정 용접 조건은 한 개의 펄스 파형에 대해 한 개의 용적이 용접봉으로부터 탈착되어 용융지로 이행하는 조건(One Drop per One Pulse)일 때 가장 안정적인 용적 이행을 나타낸다. ODOP 조건은 어느 일정 범위의 펄스 주파수 구간내에서 형성되는 것이 일반적인데 그 구간은 DCEP MIG welding의 용적 이행 주파수로부터 예측이 가능하다. 즉 Fig. 1와 같이 인가되는 펄스 주파수에 대해 (용적 이행 주파수 : Fd)/(펄스 주파수 : Fp)의 비는 크게 3구역으로 나뉘어진다. 첫째 Ⅰ구역은 DCEP MIG welding의 기저 전류에서 발생하는 용적 이행 주파수보다 작은 주파수를 인가하기 때문에 (용적 이행 주파수 : Fd)/(펄스 주파수 : Fp)의 비가 1보다 크다. 둘째 Ⅱ구역은 기저 전류에서 얻어지는 용적 이행 빈도수에 해당하는 주파수에서 PC MIG welding의 평균 용접 전류에서 얻어지는 용적 이행 주파수를 주파수로 인가하는 구역으로서 (용적 이행 주파수 : Fd)/(펄스 주파수 : Fp)의 비가 1이 되는 구간이다. 셋째 Ⅲ구역은 PC MIG welding의 평균 용접 전류에서 얻어지는 용적 이행 주파수보다 큰 펄스 주파수를 인가하기 때문에 (용적 이행 주파수 : Fd)/(펄스 주파수 : Fp)의 비가 1보다 작은 구역이다.

그러나 PC MIG welding 공정은 Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 인가되는 펄스 파형을 이루는 변수가 많고 이들간의 적절한 조합을 통해서만 용적 이행의 안정성

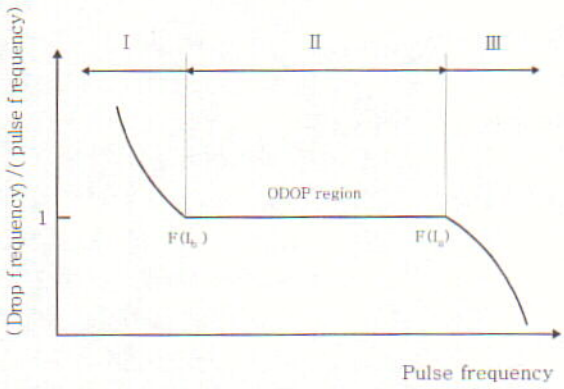


Fig. 1 Schematic of one drop per pulse region

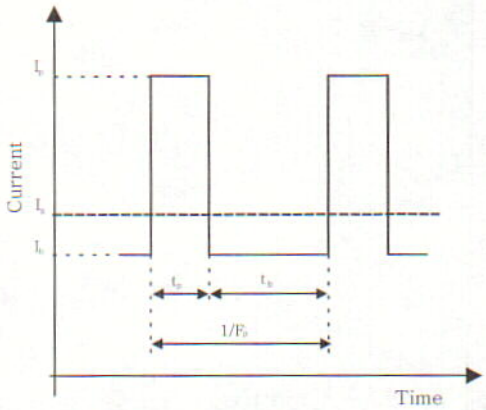


Fig. 2 Parameters of pulsed current waveform

을 얻을 수 있기 때문에 작업 현장에서 실용화가 곤란한 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 PC MIG welding의 적정 용접 조건을 설정하기 위해 용접 변수간의 상호 관계를 비교적 단순화하기 위한 연구를 수행하였다. 즉 하나의 펄스 파형에 대한 피크 전류의 유지 시간의 분율(Load duty Cycle : D(%))을 일정하게 하여 PC MIG welding의 조건을 단순화하기 위한 연구를 수행하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험 재료 및 장치

AA6061을 모재로 하여 평판 용접을 실시하였고 실험에 사용된 용접봉은 직경이 1.2Ø인 AA4043과 AA5356을 사용하였으며 Table 1에 용접봉의 화학 조성을 나타내었다. 용접부의 보호 가스는 아르곤 가스로 하였으며 유량은 25 ℓ/min으로 일정하게 유지하였다. 그리고 실험에 사용된 장치는 999Hz까지 펄스 파형의 용접 전류를 인가할 수 있는 용접기(L-tech사), 시편을 움직일 수 있는 이송 장치와 용적의 이행을 관찰할 수 있는 가시화 장치[9]로 이루어져 있다.

2.2 용접 조건의 설정

PC MIG welding는 용접 전류를 펄스 파형으로 인가하기 때문에 Fig. 2와 같이 피크 전류, 기저 전류,

Table 1 Chemical composition of electrodes

Element / Electrode	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Other	Al
AA4043	4.5~5.6	0.8	0.30	0.05	0.05	-	0.10	0.20	0.2	Rem.
Aa5356	0.25	0.40	0.10	0.05~0.20	4.5~5.5	0.05~0.20	0.10	0.06~0.20	0.2	Rem.

피크 전류 유지 시간, 펄스 주파수 등의 용접 변수가 있다. 본 연구에서는 먼저 DCEP MIG welding의 용적 이행 특성으로부터 실험적으로 기저 전류와 피크 전류를 결정하였다. 기저 전류는 펄스 전류가 인가되는 동안 용접봉이 충분히 용융되고 아크가 소멸되지 않도록 하기 위해 입상 이행 조건에 해당하는 용접 전류인 95A로 결정하였다. 피크 전류는 기저 전류 동안 용융된 용적에 강한 전자기적 핀치력을 인가시킴으로써 용접봉과 용적사이에 네킹을 형성시키게 하기 위해 스프레이 이행이 나타나는 용접 전류인 200A로 결정하였다. 피크 전류 유지 시간과 펄스 주파수는 식 (1)의 하나의 펄스 파형에 대한 피크 전류 유지 시간의 분율과 식 (2)의 펄스 주파수와 피크 전류 유지 시간의 관계를 이용하여 결정하였다.

$$D(\%)=\frac{t_p}{t_p+t_b}\times 100 \tag{1}$$

$$D(\%)=\frac{t_p}{t_p+t_b}\times 100=t_p\times F_p\times 100,$$

$$F_p=\frac{1}{t_p+t_b} \tag{2}$$

즉 LDC(D(%))를 일정하게 결정하면 피크 전류 유지 시간과 펄스 주파수를 동시에 결정할 수 있으며, 식 (3)과 같이 실제 용접을 가능하게 하는 용접 전류인 평균 용접 전류(Ia)를 일정하게 할 수 있으므로 동일한 용접 전류에서 피크 전류 유지 시간과 펄스 주파수가 용적 이행 특성에 미치는 영향을 비교할 수 있다.

$$I_a(A)=\frac{t_p I_p+t_b I_b}{t_p+t_b}=D\,I_p+(1-D)\,I_b \tag{3}$$

Table 2는 식 (1), (2), (3)을 이용하여 산출한 PC MIG welding의 용접 조건이다. Table 2에서 보면 용접 조건은 LDC(D(%))가 각각의 용접봉에 대해 10%와 30%의 경우에 대해 설정하였다. 그리고 용접봉의 송급 속도(Wire Feed Rate)는 LDC(D(%))가 증가하면 증가하는데 이는 DCEP MIG welding와 동일한 아크의 길이를 유지하면서 용적 이행의 특성을 비교하기 위해서이다.

3. 실험 결과

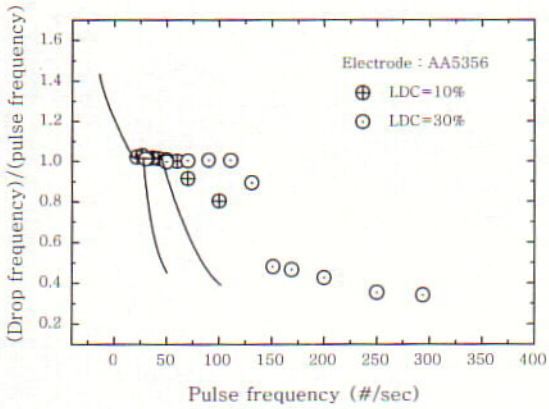
3.1 PC MIG welding의 적정 용접 조건

Fig. 3은 각각의 용접봉에 대해 DCEP MIG welding로부터 측정한 용적 이행 주파수로부터 ODOP 구역을 예측한 것과 PC MIG welding로 용접하면서 고속도 비디오 카메라로 촬영한 영상으로부터 측정된 결과를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 LDC가 10%에서 30%로 증가하면 DCEP MIG welding의 용적 이행 주파수로부터 예측한 ODOP 구역과 PC MIG welding로부터 측정한 ODOP 구역이 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 LDC가 증가하면 평균 용접 전류가 증가하여 용적 이행 주파수가 증가하기 때문이다. 그리고 PC MIG welding로부터 측정한 ODOP 구역이 DCEP MIG welding로부터 예측한 ODOP 구역보다 넓은 것을 볼 수 있는데 이는 DCEP MIG welding에서 용접봉이 용융되면서, 용접봉 끝단에 taper를 형성시키고 이것이 용접봉의 단면적을 감소시켜 이탈되는 용적의 크기가 감소하기 때문으로 생각된다[13].

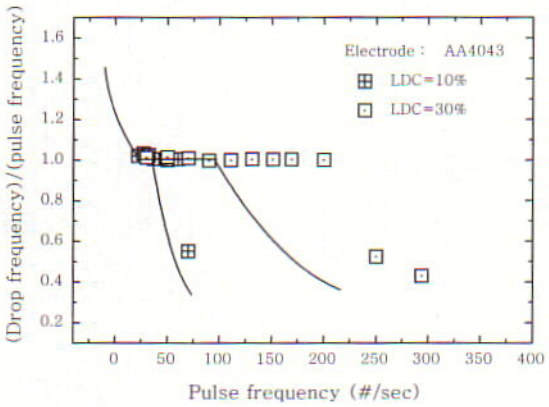
Fig. 4는 PC MIG welding 조건에서 이행되는 용적의 크기를 측정하여 나타낸 것이다. 그림에서 보면

Table 2 PC GMAW conditions

Electrode	LDC=10% (I_a=110A)										
AA4043 AA5356	F_p(#/sec)	22	27	32	37	42	50	60	70	100	
	t_p(msec)	4.5	3.7	3.1	2.7	2.4	2	1.7	1.4	1	
Wire feed rate	AA4043	197in/min (5m/min)									
	AA5356	248in/min (6.3m/min)									
용접봉	LDC=30% (I_a=130A)										
AA4043 AA5356	F_p(#/sec)	30	50	70	90	111	131	151	169	200	250	294
	t_p(msec)	10	6	4.3	3.3	2.7	2.3	2	1.8	1.5	1.2	1
Wire feed rate	AA4043	230in/min (5.84m/min)										
	AA5356	293in/min (7.44m/min)										

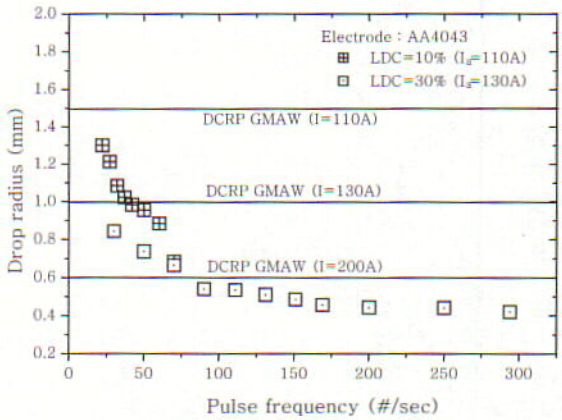


(a) AA4043 electrode

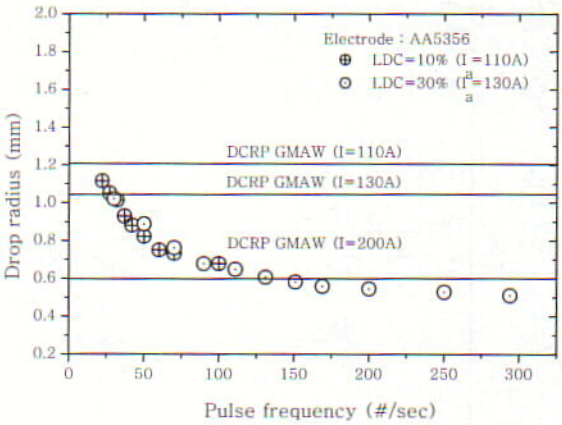


(b) AA5356 electrode

Fig. 3 Comparison of one drop per pulse region between DCEP GMAW and PC GMAW



(a) AA4043 electrode



(b) AA5356 electrode

Fig. 4 Drop sizes as a function of a pulse frequency

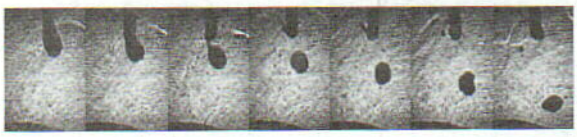
이행되는 용적의 크기가 전류에 인가한 펄스 주파수가 증가함에 따라서 감소하는 것을 볼 수 있다. 여기서 LDC가 10%일 경우에는 용적의 최소 크기가 DCEP MIG welding의 피크 전류값에 근접하는 것을 볼 수 있다. 그러나 LDC가 30%일 경우에는 DCEP MIG welding 조건의 전류값(200A)에서 얻어진 용적의 크기보다 PC MIG welding 조건에서 얻어진 용적의 크기가 작아지는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 AA4043 용접봉의 경우에 특히 두드러지게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 앞서도 언급한 것과 같은 용접봉 끝단의 taper 형성과 관련이 있는 것으로 판단된다.

3.2 용접 변수가 용적 이행의 특성에 미치는 영향

Photo 1은 AA4043 용접봉으로 용접할 때 용적 이행 특성을 고속도 비디오 카메라를 이용하여 관찰한 것이다. LDC가 10%, 30%일 때 같은 ODOP 구간에서도 펄스 주파수가 작을 경우에는 용적이 이행한 후 고상 용접봉 팁에 잔존하는 용융 금속이 요동하거나 비산되는 것을 관찰할 수 있다. 이에 비하여 펄스 주파수가 ODOP 구역의 최대 펄스 주파수 영역에서는 용적의 크기가 용접봉 직경과 유사한 스프레이 이행을 하여 안정한 용적 이행을 하는 것을 관찰할 수 있고 DCEP MIG welding에서 관찰되었던 혼합 이행 현상, 즉 큰 용적과 작은 용적이 혼합되어 이행되는 현상은 관찰되지 않았다. 즉 펄스 주파수가 ODOP 영역의 최대 값에 가까운 영역의 PC MIG welding 조건이 DCEP MIG welding보다 안정한 용적 이행 특성을 나타내고 있다. 그리고 펄스 주파수 작을 경우(Photo 1-(a), (c))에 LDC가 클 때 잔존하는 용융 금속의 요동이 더욱 현저한 것을 관찰할 수 있는데 이는 피크 전류가 유지되는 시간이 증가하여 용적의 크기가 증가하였기 때문이다.

Fig. 5는 PC MIG welding 조건에서 측정된 용접 전류의 실제 파형을 나타내고 있다. 이와 같이 용접 전류를 인가하였을 때, 용적 이행의 규칙성과 안정성을 간접적으로 판단할 수 있는 용접 전류-전압 곡선이다(Fig. 6). 동일한 LDC 조건(10%)에서 인가되는 펄스 주기가 22 Hz로 낮을 경우에는 전류- 전압 선도가 일

Photo 1 Metal transfer characteristics for AA4043 electrode



(a) LDC=10%, F_p=22/sec

(b) LDC=10%, F_p=60/sec

(c) LDC=30%, F_p=30/sec

(d) LDC=30%, F_p=200/sec

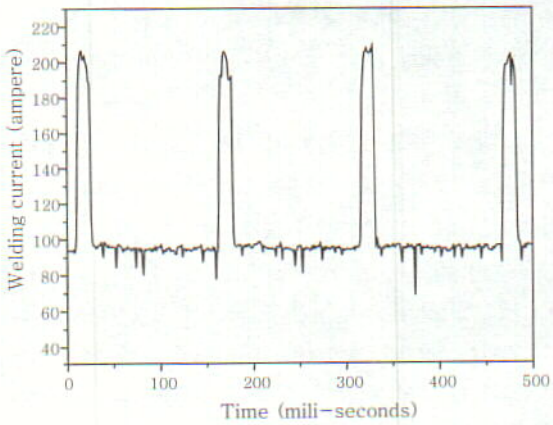
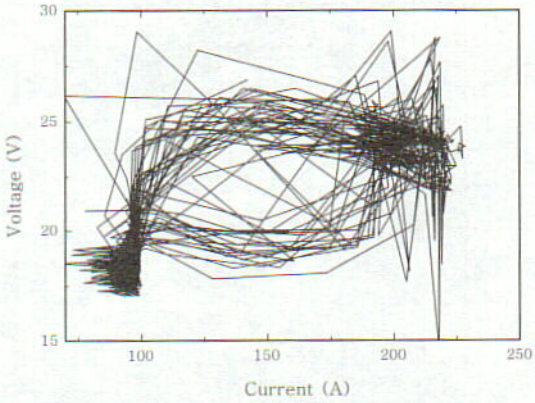


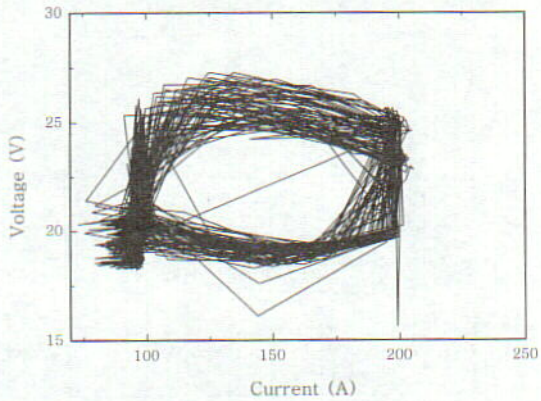
Fig. 5 A typical welding current profile measured during pulsed current GMAW

정한 괘적을 그리지 않고 상대적으로 불규칙한 형태를 보이는데에 비하여, 펄스 주기가 60Hz로 높을 경우에는 거의 일정한 괘적을 따라서 변화하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 현상은 앞의 고속 비디오 사진에서도 확인할 수 있듯이 ODOP 구역에서 최대 펄스 주파수에 해당하는 영역이 상대적으로 안정적인 금속 이행 현상을 나타내는 것을 알 수 있다.

Photo 2는 AA5356 용접봉으로 용접할 때 용적 이행 특성을 나타낸 것이다. AA4043 용접봉의 경우와 같이 펄스 주파수가 증가할수록 용적 이행의 안정성은 증가하고 LDC가 30%일 때 펄스 주파수를 111/sec로



(a) LDC=10%, F_p=22/sec (unstable metal transfer)



(b) LDC=10%, F_p=60/sec (stable metal transfer)

Fig. 6 Welding current-voltage curve for AA4043 electrode

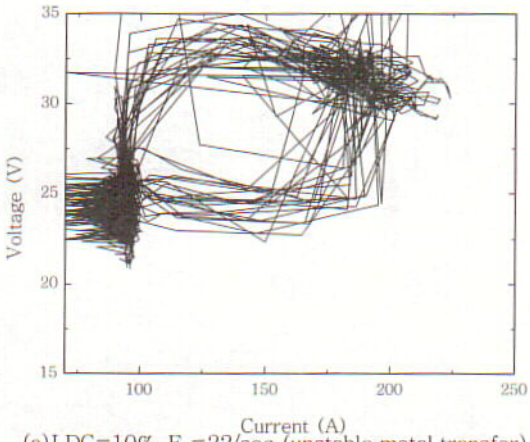
Photo 2 Metal transfer characteristics for AA5356 electrode

(a) LDC=10%, F_p=22/sec

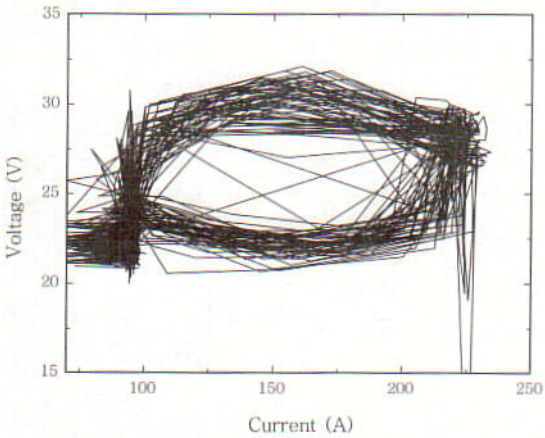
(b) LDC=10%, F_p=60/sec

(c) LDC=30%, F_p=30/sec

(d) LDC=30%, F_p=111/sec



(a)LDC=10%, F_p=22/sec (unstable metal transfer)



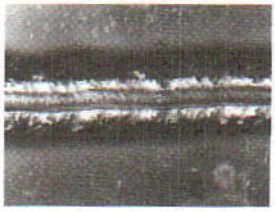
(b) LDC=10%, F_p=60/sec (stable metal transfer)

Fig. 7 Welding current-voltage curve for AA5356 electrode

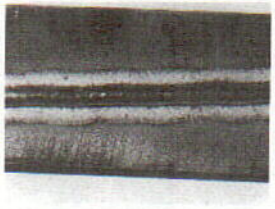
하면 이행하는 용적의 크기가 용접봉의 직경과 유사한 스프레이 이행을 하는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 7은 용접 전류-전압 곡선인데 AA4043 용접봉의 경우와 동일하게 안정한 용적 이행 조건에서는 그의 궤적이 규칙적인 것을 볼 수 있다. 이러한 결과를 종합해보면 PC MIG welding의 적정 용접 조건은 ODOP 영역 중 펄스 주파수가 가장 큰 부분이라고 할 수 있다.

Photo 3은 DCEP MIG welding와 PC MIG welding의 용접 전류가 동일할 때 용접부의 비드를 비교한 것이다. Photo 3에서 보는 바와 같이 PC MIG welding의 적정 용접 조건으로 용접하였을 때 비드의 모양이 균일하고, 용접부의 산화 정도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 PC MIG welding 조건이 안정적인 금속 이행을 유발하기 때문으로 생각된다. 특히 PC MIG welding로 용접하였을 때 AA5356 용접봉의 경우, 스패터의 발생이 상대적으로 많이 감소하는 것을 볼 수 있다.

Photo 3 Comparison of weld bead between DCEP MIG welding and PC MIG welding

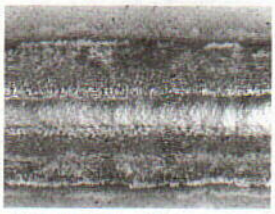


(a) DCEP GMAW (AA4043 electrode)



(b) PC MIG welding (AA4043 electrode)

(a) DCEP MIG welding (AA5356 electrode)



(b) PC MIG welding (AA5356 electrode)

4. 결 론

이상과 같이 적정 용접 조건의 설정 및 용적 이행 특성을 요약하면 다음과 같다.

1) PC MIG welding의 용접 조건은 DCEP MIG welding로부터 기저 전류와 피크 전류를 결정하고, LDC를 일정하게 하여 적정 용접 조건인 ODOP 영역을 결정할 수 있다.

2) ODOP 영역 중 펄스 주파수가 높은 부분에서 상대적으로 안정적인 용적 이행 특성이 얻어졌다. 따라서 안정적인 용접 조건을 얻기 위해서는 최대 ODOP 펄스 주파수를 전류에 인가하는 것이 필요하다.

3) PC MIG welding로 용접하여 AA4043 용접봉의 경우에는 DCEP MIG welding에서 아크의 안정성에 악영향을 미치는 혼합 이행을 제어할 수 있었으며, AA5356 용접봉의 경우에는 스패터의 발생을 감소시키는 것이 가능하였음.

참 고 문 헌

1. L. A. Guitterez, G. Neye and E. Zschech : Microstructure, hardness profile and tensile strength in welds of AA6013 T6 extrusion, Welding Journal, **Vol.O** (1996), 115s-121s.
2. J. H. Waszink and M. J. Piena : Experimental investigation of drop detachment and drop velocity in GMAW, Welding Journal, **65-11**(1986), 289s-298s
3. G. Adam and T. A. Siewert : Sensing of GMAW droplet transfer modes using an ER100S-1 electrode, Welding Journal, **69-3** (1990), 103s-108s
4. J. A. Johnson, N. M. Carlson, H. B. Smartt and D.

E. Clark : Process control of GMAW: Sensing of metal transfer mode, Welding Journal, **70-4** (1991) 91s-99s

5. S.-K. Choi, C.-D. Yoo, and Y.-S. Kim : Simulation of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding using the VOF Method, Journal of KWS, **15-6** (1997), 168-178 (in Korean)
6. J.H. Choi, Y.S. Kim, and H.J. Kim : Characterisitics of Metal Transfer of GMAW shielded by CO_2 gas, Journal of KWS, **16-3** (1998), 9-17 (in Korean)
7. D.I. Kang, J.H. Choi, Y.S. Jang, and Y.S. Kim : The effect of Current Pulsing Parameters on the Spatter generation rate during CO2 Shielded Gas Metal Arc Welding, Journal of KWS, **16-4** (1998), 63-72 (in Korean)
8. J. F. Lancaster : The physics of welding, 2nd edition, Pergamon Press, 1985
9. Y. S. Kim : Metal transfer in gas metal arc welding, Ph. D Thesis, M.I.T, 1989
10. J. H. Waszink and M. J. Piena : Experimental investigation of drop detachment and drop velocity in GMAW, Welding Journal, **65-11** (1986), .289s-298s
11. Welding Handbook, **Vol. 1**, 8th edition, AWS, 1987
12. S. K. Choi : Dynamic analysis of metal transfer in GMA welding, Ph. D Thesis, KAIST, 1998
13. S.-K. Choi, C.-D. Yoo, and Y.-S. Kim : The Dynamic Anslysis of Metal Transfer in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding, J. of Physics D : Applied Physics, **31-1** (1998), 207-215