

고전류 CO₂용접에서의 금속이행 및 스패터 발생 현상에 관한 연구

김남훈* · 유희수* · 김희진* · 고진현**

*한국생산기술연구원

**한국기술교육대학교

A Study on the Metal Transfer and Spatter Generation in High Current CO₂ Welding

Nam-Hoon Kim*, Hoi-Soo Ryoo*, Hee-Jin Kim* and Jin-Hyun Koh**

*Advanced Welding & Joining Technology Team, KITECH, Chonan 330-820, Korea

**Dept. of Advanced Material Engineer, Korea University Technology, Chonan 330-708, Korea

Abstract

The metal transfer in CO₂ welding shows the transition of transfer mode from short-circuiting to repelled transfer with the increase of welding current. While the short-circuiting mode in CO₂ welding has been studied very extensively relating with droplet formation and spatter generation, the repelled transfer has little been understood. In this study, high current CO₂ welding has been performed with bead-on-plate welds along with the waveform analyzer and high speed camera. The image of high speed camera was synchronized with its waveform so that the moment of spatter generation could be realized during drop detachment. As a results of this study, it was found that welding arc changes its location either once or three times and thus single or double pulse signals were developed in the voltage waveform. Whenever the arc moved its location, new arc was developed in a explosive way and thus it caused spatter generation. Specially severe spattering took place when the waveform showed a double-peak pattern. As a consequence of these results, new waveform control techniques could be suggested for suppressing the spatter generation in the high-current CO₂ welding.

(Received December 13, 2003)

Key Words : CO₂ welding, Repelled transfer, Spatter generation, High current, Waveform

1. 서 론

가스메탈아크용접(GMAW)은 솔리드(solid) 와이어를 소모전극으로 사용하는 용접기법으로, CO₂가스를 보호가스로 사용하는 용접기법을 'CO₂ 솔리드용접'(이하 CO₂용접이라고 함)이라고 한다. CO₂용접은 다른 용접기법에 비해 와이어와 보호가스의 가격이 저렴하기 때문에 재료비 측면에서 매우 경제적이라는 장점이 있다. 그러나 본 용접기법은 타 용접방법에 비해 스패터 발생량이 많다고 하는 것이 항상 문제점으로 지적되어 왔고¹⁾, 이러한 문제점 때문에 자동화 용접라인에서는 아르곤가스와 CO₂가스를 혼합하여 사용하는 MAG용접 등이 선호되고 있다. 따라서 CO₂용접에서는 우선적으로

스패터 발생량을 저감하여야 한다는 필요성이 제시되었는데, 이러한 수요가의 요구에 부응하여 인버터용접전원에 파형제어 기법이 도입되었다^{2,3)}. 그러나 현재까지 개발된 파형제어기법은 단락이행 조건에 한정되어 있기 때문에 제어효과가 저 전류 영역에 국한되어 있다^{4,5)}.

CO₂용접에서는 용접전류가 증가함에 따라 단락(short-circuiting)이행으로부터 입상용적(globular)이행으로 천이하는데, 단락이행에서는 용적과 용융풀이 주기적으로 접촉되는 전기적 단락상태가 반복되어 나타나기 때문에 금속이행과정과 용적과형을 연관시켜 이해하는데 어려움이 없었다. 더구나 금속이행과정을 영상화할 수 있는 고속 촬영장비와 촬영기술이 진보함에 따라 이들간의 관계를 보다 명확히 입증하여 줄 수 있었을 뿐만 아니라⁶⁾, 최근에는 이론적으로도 이들간의 상관관계를

보여 줄 수 있게 되었다^{7,8)}. 그리고 많은 연구자들이 고속사진 촬영과 파형분석을 활용하여 스파터 발생순간 및 발생원인 등을 명확히 규명함에 따라, 이들의 결과를 활용하여 효과적인 파형제어기법이 개발될 수 있었던 것이다^{3,9-11)}.

그러나 고전류 영역에서 나타나는 입상용적이행에 대해서는 상대적으로 많은 부분이 불분명한 상태로 남아 있다. CO₂용접에서 나타나는 입상용적이행은 반발이행(repelled transfer)이라고 하는데, 이는 보호가스의 특성상 용적에 작용하는 전자기력이 중력의 반대방향으로 작용하여, 용적이 중력방향으로 자유로운 이행을 하지 못하기 때문에 붙여진 이름이다¹²⁾. 그런데 지금까지 반발이행에 대해서 보고된 내용을 살펴보면 극히 기본적인 사항, 즉 와이어 선단에서 용적이 성장하는 과정과 와이어 선단으로부터 용적이 이탈하는 과정 정도만이 간단히 보고되어 있을 뿐이다^{13,14)}. 그리고 스파터 저감 등을 위해 필요한 사항, 즉 용적의 성장·이탈 과정과 그에 따른 파형변화 그리고 스파터가 언제 어떻게 발생하는지 등에 대해서는 극히 단편적인 내용만이 보고되고 있다^{15,16)}. 이에 본 연구에서는 CO₂용접의 반발이행과정을 보다 체계적으로 연구하여 용적이행과정과 파형과의 상관관계, 스파터 발생 순간 및 발생과정을 명확히 규명하고자 하였다.

2. 실험방법

본 실험에 사용된 용접전원은 정격전류 500A급의 인버터 용접기로서 파형 제어기능이 전혀 제공되어 있지 않은 용접전원이다. 그리고 용접 실험에 사용된 용접재료는 전기도금법에 의해 Cu도금된 직경 1.2mm의 CO₂용접용 와이어(KS 규격: YGW11)로써, 와이어의 화학조성은 Table 1과 같다.

용접은 13mm 두께의 연강 판재 위에 비드농기(bead-on-plate) 용접을 실시하였으며, 와이어 송급속도(WFR = 15m/min), 모재와 팁 사이의 거리(CTWD = 20mm), 용접속도(250mm/min), 보호가스 유량(20 l/min) 등을 일정하게 하고, 용접전압만을 변수로 하여 기초실험을 실시하였다. 기초실험 결과 용접전압이 38V 이상이 되면 단락현상이 거의 발생하지 않음을 확인하고 용접전압을 38.5V로 설정하였다.

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

C	Si	Mn	P	S	Ti
0.05	0.82	1.53	0.018	0.010	0.2

이러한 용접조건에서 용접전류는 약 360A 이었다. 용접전류 및 전압의 순간적인 변화는 자체 제작한 파형측정장치를 이용하여 20kHz의 샘플링 속도로 3초 동안 측정하고 컴퓨터에 저장하였다. 한편 금속이행 현상, 용적의 성장 과정, 스파터 발생현상 등을 관찰하기 위하여 롤필름(roll film)을 장착한 고속카메라를 사용하였는데, 촬영속도는 6000 frame/sec로 하였다. 용적의 3차원적인 형상, 아크 생성위치 등에 대한 영상 이미지를 보다 선명하게 얻기 위하여 용접 아크부를 할로겐 광원으로 직접 조명하였으며, 이에 300W급 광원 3개를 동시에 사용하였다. 본 시험방법에 대한 자세한 사항은 기 보고한 바 있다¹⁷⁾. 롤필름 영상은 색상과 영상이 선명하고, 고속(6000 frame/sec) 촬영이 가능한 반면, 파형과 동기화 시킬 수 없다는 단점이 있다. 이러한 이유로 동기화 작업은 디지털 고속카메라를 채용하여 Fig. 1과 같은 장치를 구성하였다. 용접 전류와 전압 파형은 A/D 변환기를 통해 받고, 동시에 디지털 고속카메라에 트리거(trigger)신호를 보내서 고속촬영 영상과 전압·전류파형이 동기화되도록 하였다. 디지털 카메라의 촬영속도는 2,000 frame/sec이었으며, 셔터속도는 1/20,000 sec이었다. 그리고 동기화 된 파형과 영상 자료는 자체 개발한 프로그램에 입력하여 동영상으로 구현될 수 있도록 하였다. 측정된 이미지와 파형은 하드웨어간의 작동 시간차가 존재함으로 이를 보정하기 위해서 초기 아크 발생 시점에서의 파형과 촬영된 영상의 시간차이를 분석하여 보정하였다. 동기화를 위한 용접시험은 용적의 형상을 보다 명확히 관찰할 필요가 있어서 용접전압을 40.5V로 하여 아크 길이(arc length)를 증가시켰다.

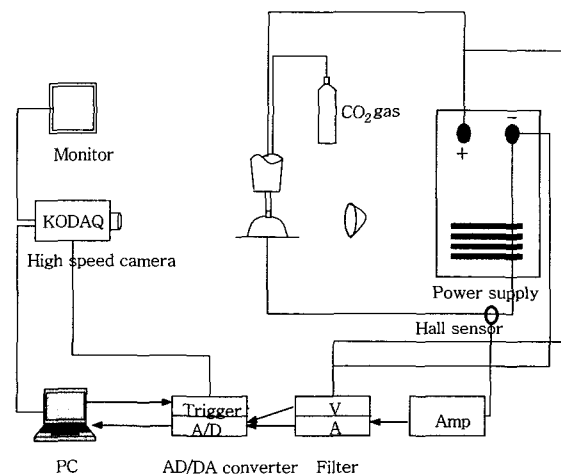


Fig. 1 Experimental set-up for capturing high speed image and waveform

3. 시험결과 및 고찰

3.1 용접 전압 및 전류 파형 분석

Fig. 2는 용접전압 38.5V, 용접전류 360A의 조건에서 0.1sec 동안에 입력된 전압 및 전류의 파형인데, 이러한 파형은 반발이행 조건에서 나타나는 전형적인 파형이다. 3초 동안 입력된 전체 파형을 살펴보면, 초당 약 2회 정도의 순간단락이 혼재되어 나타나고 있기는 하지만, 연속적인 아크상태에서 금속이행이 이루어

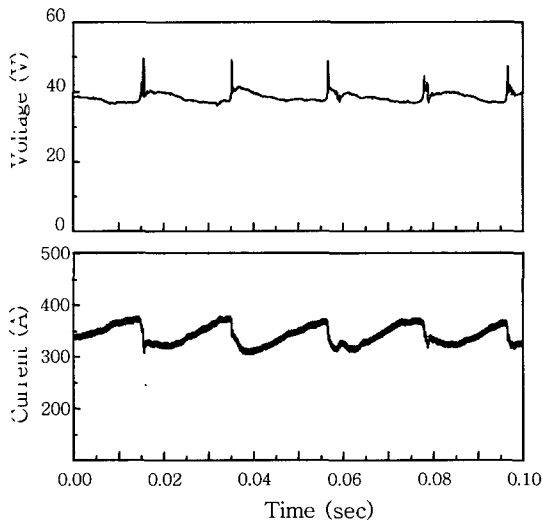


Fig. 2 Typical waveforms developed by repelled transfer in CO₂ welding

지고 있음을 확인할 수 있었다. 입상용적이행에서는 용적이 와이어 직경보다 크기 때문에 와이어 선단으로부터 용적이 이탈하게 되면 아크길이(arc length)가 급격히 변화하여 용접전압과 전류에 어떠한 형태로든 변화를 보여 주게 된다. CO₂용접에서는 그러한 변화가 Fig. 2와 같이 나타나고 있는 것이다. Fig. 2의 파형에서 알 수 있듯이, 용적이 성장하는 기간에는 아크전압과 전류가 서서히 감소하거나 증가하지만, 용적이 이탈하는 시점에 이르러서는 급격한 변화를 보여 준다. 즉 용접전압은 급격히 상승하였다가 감소하여 피크신호가 나타나며, 용접전류는 급격히 감소하여 계단모양의 단차를 보여준다. 그러므로 용접전압 파형에 나타나는 피크신호의 개수로부터 용적이행 횟수를 측정할 수 있게 되는데, 본 시험결과는 0.1sec 동안에 5회의 이행이 있었음을 보여주고 있다.

용적 이탈 순간에 나타나는 용접전압 파형을 보다 자세히 분석해 본 결과, 전압 피크 발생 횟수에 따라 두 가지 형상의 파형으로 분류할 수 있었다. Fig. 3은 이들의 전형적인 파형 형상을 보여주고 있다. 피크 횟수에 따라 type I, type II 등으로 명명하였는데 각각의 파형특성은 다음과 같다.

Type I은 용적이탈 순간에 Fig. 3(a)와 같이 한 개의 전압피크가 나타나는 파형이다. 여기서 용접전류는 용접전압이 최대가 되는 피크에서 감소하기 시작한다. 용접전압은 아크길이에 비례하기 때문에 전압이 최대가

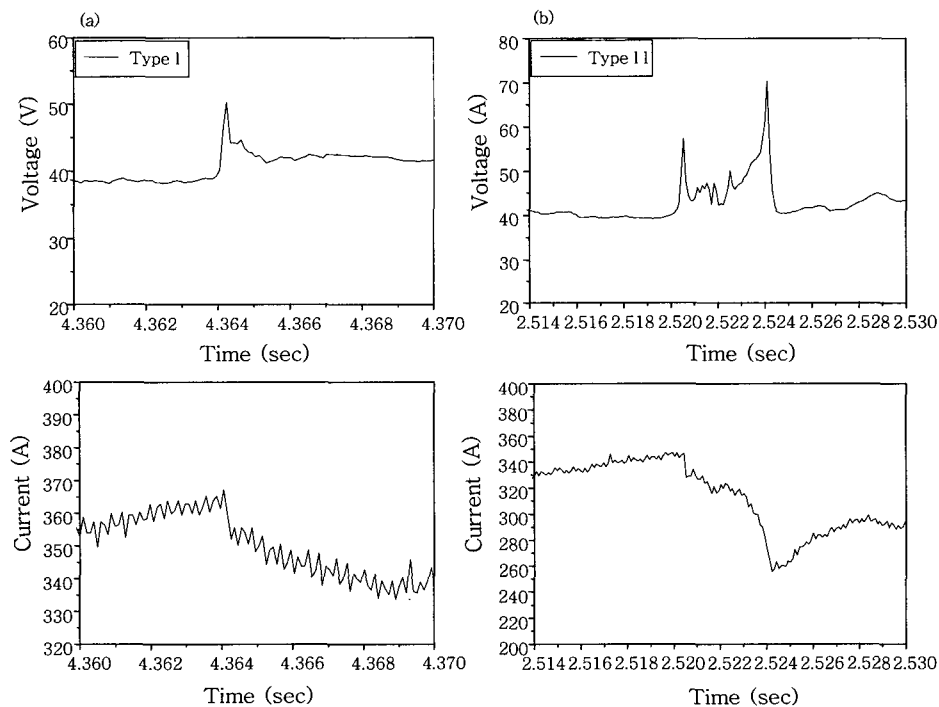


Fig. 3 Two types of voltage waveform associated with drop detachment.

되는 시점은 아크길이가 최대가 되는 시점과 대응된다고 할 수 있고, 이는 결국 용적이 와이어 선단으로부터 이탈하는 순간이라고 할 수 있다. 용적이 와이어 선단으로부터 이탈하게 되면 아크길이는 순간적으로 상승하게 되는데, Fig. 3(a)에서 보듯이 용접전압의 순간 상승치는 약 10~20V이며 최대치에 도달하는데 소요되는 시간은 약 0.5msec 정도이다.

3초 동안에 입력된 전압 피크파형을 모두 분석하여 보면, type I이 대부분을 차지하기는 하지만, 피크가 중복되어 연속적으로 나타나는 파형이 다수 관찰되었다. 본 연구에서는 피크 수가 두 개인 파형을 type II라고 명명하였는데, Fig. 3(b)는 그러한 파형의 전형적인 예를 보여 주고 있다. type II에서도 용접전류는 항상 첫 번째 피크가 나타나는 시점에서 급격히 저하하였다. Type II에서도 Type I과 같이 첫 번째 피크에서, 용적이 이탈한 것으로 보면, type II는 용적 이탈 직후에 용접전압에 급격한 변화를 줄 수 있는 어떠한 현상이 연속적으로 진행되어 나타나고 있음을 의미한다. 이러한 일련의 현상에 대해서는 다음절의 고속카메라 영상과 용접파형을 동기화 시킨 시험결과로부터 확인할 수 있었다.

Table 2는 3초 동안 입력된 모든 파형을 분석하여 각각의 발생빈도수를 도표화 한 것이다. 전체 126회 이행 중에서 싱글 피크가 나타나는 type I의 빈도수가 107회로써 전체의 85%를 차지하고 있으며, 나머지는 type II이다. 와이어 송급속도가 15m/min임으로 3초 동안에는 0.75m가 송급되었고, 송급된 와이어는 126회의 용적으로 나뉘어 용융풀로 이동하였다고 할 수 있다. 여기서 용적을 구형이라고 가정하고 평균크기를 계산하여 보면 용적의 직경은 약 2.6mm가 되는데, 이는 와이어 직경(1.2 mm)의 2배 이상이다.

3.2 용적이행 과정의 관찰

고전류 CO₂용접에서는 용접아크가 용적 하단부에 위치하고, 용접진행 반대편에 집중된다. 이러한 아크특성으로 유발된 전자기적 반발력이 용적의 이행을 방해하기 때문에 용적은 와이어 직경보다도 크게 성장할 뿐만 아니라, 이행 직전에는 얇은 가교(bridge)에 의해 Fig. 4와 같이 와이어 선단에 매달려 있게 된다. Fig. 4는

Table 2 Number of drops counted from voltage waveform

Type of waveform	Number of drops for 3sec
Type I	107
Type II	19
Total	126

용적이 와이어 선단으로부터 이탈되기 직전의 상태를 보여 주는 톨필름 사진인데, 이 시점에서 용적은 표주박 모양의 형상을 하고 있으며 와이어와는 가느다란 가교에 의해 연결되어 용접진행 방향의 반대편에 위치하고 있다. 이러한 형상의 용적들은 궁극적으로 가교가 절단되면서 용융풀로 이동하게 되는데, 이 과정에서 용접아크의 위치가 순간적으로 이동하게 되고 그러한 과정에서 용접 스패터가 발생함을 확인할 수 있었다. Fig. 5와 Fig. 6은 이러한 관계를 보여주는 톨필름 고속카메라 사진들이다.

Fig. 5는 용적이탈로 인하여 아크위치가 용적 하단부에서 와이어 선단부로 이동하는 과정을 보여 주고 있다. 용적이탈 시점까지는 아크가 용적 하단부에 위치하고 있는데(Fig. 5의 a~d), 연신된 가교가 절단되어 용적이 분리되면 와이어 선단부에서 새로운 아크가 발생한다. 그림 5의 (e)는 이 순간을 보여 주는 사진이다. 이렇게 아크가 한번 이동하면서 용적이 용융풀로 이동하는 이행을 본 연구에서는 A형(type A)이행이라고 하였다. A형 이행에서 새로 생성되는 아크는 와이어 선단과 용융풀 사이에서 매우 폭발적으로 발생하며, 이러한 폭발력으로 인하여 가교부위가 스패터화 되어 주위로 분산된다. Fig. 5의 (f)는 가교의 일부가 스패터화 되는 광경을 보여주는 사진이다. 이렇게 발생하는 스패터는 얇은 가교가 파열되면서 발생되기 때문에 대

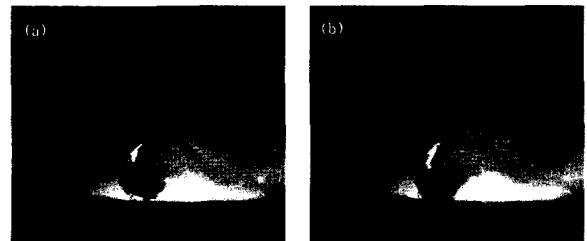


Fig. 4 Typical shapes of pendant drop developed by repelled transfer; (a) just before detachment, and (b) near at the moment of drop detachment.

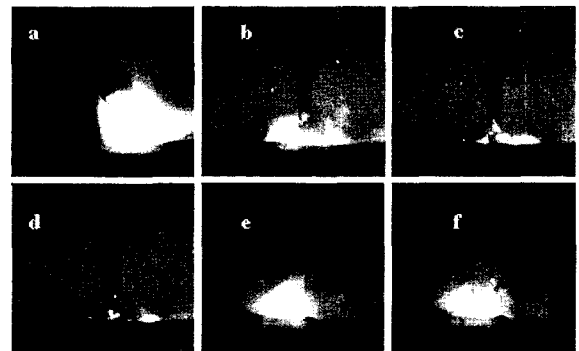


Fig. 5 High speed camera images showing the metal transfer of Type A drop

부분 미세한 스파터이다. 가교가 스파터로 분산되면 아크길이(arc length)가 길어지기 때문에 용접전압이 상승할 것으로 예상할 수 있다. 이러한 현상이 매우 짧은 시간동안에 일어나기 때문에 결국 Fig. 3의 Type I과 같은 피크 파형이 나타나는 것으로 본 연구에서는 유추하고, 이를 입증하기 위하여 파형과 영상을 동기화 시키는 실험을 실시하였던 것이다.

한편, Fig. 6에서는 아크 위치가 세 번에 걸쳐 연속적으로 변화하는 상황을 보여 주고 있다. 먼저 용적이 이탈하는 순간에 용적 하단부에 위치하고 있던 아크가 와이어 선단으로 1차 이동함에 따라 와이어 선단과 용융풀 사이에서 새로운 아크가 생성되는데(Fig. 6의 a, b), 여기까지는 위에서 기술한 A형 이행과 동일하다. 그런데 Fig. 6(b)에서는 이탈된 용적이 와이어 우측에 위치하고 있음을 보여 주는데, 이로 인하여 추가적인 아크 이동현상을 보여 준다. 즉 와이어 선단과 용융풀 사이에 형성되어 있던 아크(Fig. 6의 (b))가 순간적으로 소멸되면서 와이어 선단과 이탈된 용적의 상단부 사이에서 Fig. 6의 (c)와 같이 새로운 아크가 생성하고 있는 것이다. 이와 같이 용접아크가 2차로 이동하는 현상은 다음과 같이 설명할 수 있다. 연신된 가교 끝에 매달린 용적이 와이어 선단으로부터 이탈하게 되면 용적은 허공에 떠 있는 상태가 되고, 이러한 상태에서 용접전류는 계속 흘러야 하기 때문에 와이어 선단과 용융풀 사이에서 Fig. 6의 (b)와 같이 새로운 아크가 발생되는 것이다. 아크가 재 발생될 때 와이어 선단이 샤프하기 때문에 전류가 집중되어 아크의 순간 폭발이 강하게 일어나면서 스파터화 되고, 와이어 선단은 Fig. 6의 (c)에서 보는 바와 같이 몽뚝한 형상을 가지게 된다. 이렇게 되면 와이어 선단과 용융풀과의 거리는 멀어지게 된다. 결국에는 와이어 선단과 용융풀 사이의 거리보다 와이어 선단과 용적 사이의 거리가 보다 가깝게

된다. 이 시점에서 표주박 형상의 용적이 낙하하여 용적 하단부가 용융풀과 접촉하게 되면 용접전류는 전기 저항이 적어지는 경로를 선택하게 되고, 결국에는 와이어 선단과 용적의 상단부 사이에서 새로운 아크가 생성되어 두 번째 아크이동이 발생하는 것이다. 아크가 새로운 위치에서 발생할 때마다 모두 폭발적으로 생성되기 때문에 주위의 용융금속으로부터 스파터가 발생한다. 첫 번째 이동에서는 가교로부터 스파터가 발생되기 때문에 스파터의 크기도 작고 발생량도 적어 보이지만, 두 번째로 생성되는 아크, 즉 와이어 선단과 용적의 상층부 사이에서 발생하는 아크는 Fig. 6의 (d)에서 보듯이 대단한 폭발력을 가지고 있어서 와이어 선단에 남아 있던 용융금속 뿐만 아니라 용적까지도 날려보내서 다량의 스파터를 발생시킨다. 그리고 이 과정에서 발생하는 스파터는 대부분이 대립의 스파터이다. 스파터화 과정이 끝나고 나면 용접아크는 다시 와이어 선단과 용융풀 사이로 이동하게 되는데(Fig. 6의 (e), (f)), 이것이 3차 이동이다. 이렇게 3차에 걸쳐 아크가 이동하면서 용적이 이행하는 현상을 본 연구에서는 'B형(type B)이행'이라고 하였다. 이러한 B형 이행에서는 용적이 탈 과정에서 아크위치가 수차례 걸쳐 이동하기 때문에 전압파형에는 Fig. 3(b)와 같이 2개 이상의 피크가 나타날 수 있을 것으로 예상되었다. 이를 실험적으로 입증하여 보여주기 위해서도 동기화 시험이 필요하였던 것이다.

3.3 파형과 영상의 동기화

지금까지는 전압파형과 고속카메라 영상을 분리하여 고찰하였는데, 그 과정에서 두 가지 유형의 파형과 각각에 대응되는 이행현상이 제시되었다. 이러한 예측을 입증하기 위하여 파형과 영상을 동기화 하는 작업을 실시하였는데, 그 결과를 Fig. 7과 Fig. 8에서 보여 주고 있다. Fig. 7은 단일 피크(type I) 전압파형이 나타나는 경우에 있어서 용적 이행과정을 순차적으로 보여 주는 결과이며, Fig. 8은 이중 피크(type II)가 나

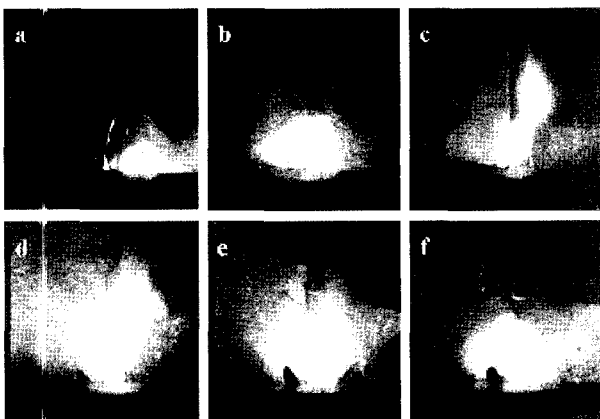


Fig. 6 High speed camera image showing the metal transfer of Type B drop

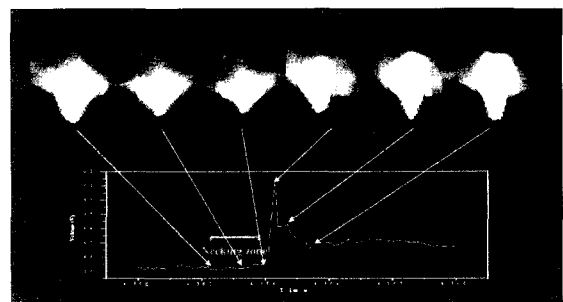


Fig. 7 Synchronized image with voltage Waveform of Type I

타나는 경우이다. Type I에서는 예상했던 바와 같이 가교가 형성되는 과정에서 용접전압은 급격히 증가하기 시작하여, 용적이 이탈하는 순간에 이르면 아크의 위치는 용적 하단부에서 와이어 선단으로 이동하고 용접전압은 피크치에 도달하고 있다.

한편 type II 파형을 보여주는 Fig. 8의 고속촬영 이미지는 아크 위치가 3차에 걸쳐 이동하는 'B형이행' 현상임을 명확히 보여주고 있다. 동기화 된 파형과 영상의 결과를 분석하여 보면 다음의 결과와 같다. 먼저 용적 이탈 시점(1차 아크 이동시점)에서 첫 번째 피크가 나타나고 있으며, 아크가 와이어 선단과 용적상단부 사이로 이동하는 이차이동 시점은 두 피크의 중간위치에 존재하고 있으며, 아크가 3차 이동하여 와이어 선단과 용융풀 사이에서 재생되는 순간에 두 번째 피크가 나타난다. 즉 용접전압의 피크치는 아크길이가 순간적으로 급격히 증가하는 1차와 3차 이동의 결과로 나타나는 현상이라고 할 수 있다. 용접전원이 정전압 특성을 가지고는 있지만 응답속도의 한계 때문에 순간적인 아크길이 변화가 피크신호로써 나타나고 있는 것이다.

3.4 스패터 저감을 위한 파형제어

이상에서 설명한 바와 같이 반발이행 모드에서의 스패터는 주로 용적이 이탈되어 용융풀로 이행하는 과정에서 발생되는데, 발생원인은 아크생성 위치의 이동에 따라 새로운 위치에서 발생하는 아크가 폭발력을 가지고 있기 때문이다. 용접전류가 매우 높은 상태에서 용적이행의 전 과정이 이루어지기 때문에 새로운 위치에서 아크가 생성될 때마다 용융금속부는 국부적인 폭발을 수반한다. 이와 유사한 현상은 단락이행에서도 나타나고 있음을 많은 연구자들이 보여 주었는데, 이 경우에 있어서는 단락이 시작 또는 종료되는 시점에서 아크가 폭발적으로 재생되면서 스패터가 발생한다고 하였다. 따라서 최근에 제안된 파형제어기법에서는 단락개

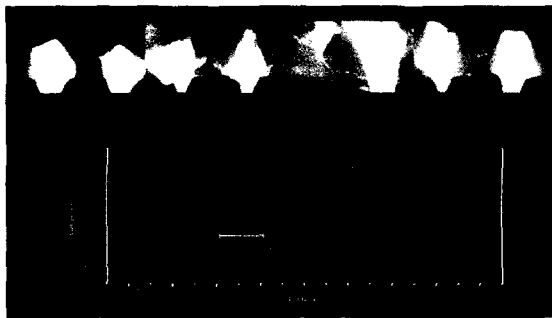


Fig. 8 Synchronized image with voltage Waveform of Type II

시 시점에 그리고 아크재생 직전에 용접전류를 저하시킴으로써 아크력을 최소화하여 스패터 발생을 최소화하였던 것이다⁵⁾. 따라서 반발이행의 경우에도 이와 유사한 기법을 사용하게 되면 스패터 발생량을 저감시킬 수 있을 것이다. 먼저 가교가 끊어지기 직전의 상태를 미리 감지하고, 감지한 순간에 용접전류를 저하시켜 일정시간 유지한 다음 정상상태의 용접전류로 복귀시키는 것이다. 이렇게 되면 용접아크의 위치가 바뀌더라도 저전류상태에서 아크가 생성됨으로 아크의 폭발력이 크게 감소할 것으로 예상되기 때문이다. 더구나 저전류 상태에서는 전자기력에 의한 반발력이 감소하여 중력에 의한 용적이행을 조장할 것으로 예상된다. 그렇게 되면 Type II의 발생 빈도수도 줄어들 것으로 예상되는 바, 스패터 발생을 억제하는데 커다란 효과가 있을 것으로 예상된다. 이러한 방법은 이미 저자들이 그 유효성을 확인하고 본 학회지에 보고한 바 있다¹⁹⁾. 그런데 그러한 파형제어를 적용하면 낮은 전류상태가 유지되는 동안에 순간단락이 자주 발생하여 스패터 저감 효과가 크지 못하였다. 따라서 보다 효과적인 스패터 저감을 위해서는 순간단락이 발생하지 않도록 하던지, 아니면 순간단락이 발생하더라도 이를 정상단락화 할 수 있는 새로운 개념의 제어기법이 개발되어야 할 것이다.

4. 결 론

고전류 CO₂용접에서 나타나는 반발이행은 용적이탈 과정에서 아크위치가 바뀌게 되는데, 이러한 위치변경과 위치변경 횟수에 따라 용접전압 파형이 구분되고 스패터 발생정도에 있어서도 커다란 차이를 보여 주었다. 이들간의 상관 관계는 다음과 같다.

1) 와이어 선단에 형성된 용적이 이탈하면 용적하단부에 위치해 있던 아크가 와이어 선단부로 이동하게 되고 이탈된 용적은 용융풀로 자유 낙하한다. 이렇게 되면 아크 위치는 한번만 바뀌게 되고 용접전압 파형에는 하나의 피크가 나타난다. 이 과정에서 스패터는 주로 가교의 파열에 의해 발생함으로 입자가 작고 양도 적은 편이다.

2) 용적이 이탈된 후에도 와이어 선단 가까이 존재하면 아크 발생위치는 3차에 걸쳐 연속적으로 바뀌게 되고 용접전압파형에는 2개의 피크가 나타나게 된다. 2차 이동 단계에서 발생하는 아크는 와이어 선단과 용적상단부 사이에서 폭발적으로 생성되기 때문에 커다란 용적이 파괴되어 스패터화 되면서 대립의 스패터를 발생시킨다.

감사의 글

본 연구는 산업기반기술 조성사업의 일환으로 수행되었기에 산업자원부 및 산업기술평가원 관계자들에게 감사하며, 고속카메라 영상의 편집을 도맡아 하여 주신 이창한님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. G. R. Rothchild : Carbon-dioxide-shielded consumable electrode arc welding, *Welding Journal*, **35-1**(1956), 19
2. T. Mita : Waveform control method in CO₂ gas shielded arc welding, *Quarterly Journal of Japan Welding Society*, **6-2** (1988), 209 (in Japanese)
3. T. Maruyama, M. Sato, Y. Hida : Waveform control in gas shielded arc welding, *Quarterly Journal of Japan Welding Society*, **57-7** (1988), 509 (in Japanese)
4. H. J. Kim and C. H. Lee : Analysis of Waveform Control Technique Applied for GMA Welding Power Supplies, *Journal of KWS*, **16-5** (1998), 39 (in Korean)
5. H. J. Kim and C. H. Lee : Analysis of Recent Waveform Control Technique Applied for GMA Welding Power Supplies, *Journal of KWS*, **16-6** (1998), 26 (in Korean)
6. V. A. Bukarov, S. S. Ermakov : Dynamics of energy characteristics of the arc in consumable electrode short-circuiting welding, *Welding International*, **7-2** (1993), 129
7. P. Zhu, S. W. Simpson : Theoretical Study of a consumable anode in a gas metal welding arc, *Proc. of 4th Int. Conf. on Trends in Welding Research, Gatlinburg, TN*, 5-8 June, (1995), 371
8. J. Y. Lee, J. H. Choi, J. H. Lee and C. D. Yoo : Analysis of Dynamic Behavior in GMAW System, *Journal of KWS*, **18-5** (2000), 581 (in Korean)
9. I. S. Pinchuk : Reducing spatter in short-circuiting welding by limiting the energy of explosion of bridges, *Weld Production*, No 11, (1976), 52
10. Y. Shuyian, G. Zheng : Effect of Arc Physics on developing CO₂ arc welding, *China Welding*, **3-1**, (1994), 1
11. B. Y. Kang, C. H. Lee, H. J. Kim and H. S. Chang : Relationship between Spatter Generation and Waveform Factors in Transitional Condition of CO₂ Welding, *Journal of KWS*, **16-4** (1998), 295 (in Korean)
12. 용접·접합 편람, 대한용접학회, (1998), 547 (in Korean)
13. C. D. Allemand, r. Schoeder, D. E. Ries, T. W. Eager : A method of filming metal transfer in welding arc, *Welding Journal*, **66-1**(1985), 45
14. S. Rhee, E. Kannatey-Ashibu : Observation of metal transfer during gas metal arc welding, *Welding Journal*, **71-10** (1992), 381-s
15. Y. Shuyian, G. Zheng : Effect of Arc Physics on developing CO₂ arc welding, *China Welding*, **3-1** (1994), 1
16. Y. H. Ahn, K. S. Bang, J. B. Lee and R. W. Chang : Effect of Ca on droplet transfer phenomena in GMA welding, *Journal of KWS*, **12-4** (1994), 422 (in Korean)
17. C. H. Lee, H. J. Kim, B. Y. Kang : Effect of Delay Time Control on the Spatter Generation in CO₂ Welding, *Journal of KWS*, **17-5** (1999), 61 (in Korean)
18. H. J. Kim and B. Y. Kang : Development of Waveform Control for Suppressing the Spatter Generation, *Journal of KWS*, **19-6** (2001), 75 (in Korean)