

GMA용접에서 파형제어 기술의 적용

김희진·유희수·강봉용

Application of Waveform Control Technology in GMA Welding

Hee Jin Kim, Hoi Soo Ryoo and Bong Young Kang

1. 서론

1970년 이후 용접생산성 향상을 목적으로 용접자동화 및 기계화가 적극 추진되면서 피복아크용접(SMAW)이 가스메탈아크용접(GMAW)과 플럭스코어드아크용접(FCAW)으로 대체되면서 용접재료 시장에도 커다란 변화를 가져 왔다¹⁾. 즉 피복아크용접봉의 사용량이 전체 사용량의 10%수준으로 저하하고, 솔리드와이어 및 플럭스코어드와이어의 사용량이 70% 수준에 육박하게 되었던 것이다. 이러한 추세는 최근까지도 지속되고 있는데, 특히 GMA용접은 슬래그가 생성되지 않는다는 장점이 있어서 용접자동화 추세에 가장 적합한 기법으로 정착되어 가고 있다. 최근에는 국내에서도 로봇용접 및 기계화용접이 확산되면서 반자동 FCA용접이 GMA용접으로 대체되는 추세에 있다.

그러나 GMA용접, 특히 CO₂가스를 보호가스로 사용하는 CO₂솔리드용접에서는 용접스패터가 항시 문제점으로 지적되어 왔다. Fig. 1은 일본용접협회에서 GMA용접재료의 개발요망 사항에 대해 설문조사를 실시한

결과인데, 스패터 저감에 대한 요구가 40.5%로써 가장 높게 나타나고 있다. 이와 같이 스패터 저감에 대한 요구가 가장 높은 이유는 스패터 제거작업에 소요되는 시간과 노력이 용접생산성을 저해하는 가장 큰 요인으로 작용하고 있음을 인식하게 되어 있기 때문이다. 이러한 스패터 문제를 해결하기 위하여 과거 10여 년 동안에 용접재료 뿐만 아니라 용접전원 측면에서 다양한 연구 성과를 보여 주었는데, 용접재료 측면에서의 개발 동향은 안 등^{2,3)}에 의해 보고된 바 있다.

용접전원 측면에서 스패터를 저감시키고자 하는 연구는 스패터 발생 현상을 기초로 하고 있다. 용적이 용융지로 이행하는 전 과정을 고속촬영하여 스패터 발생과정을 이미지화 하고, 이를 용접전압 및 전류의 순간적인 변화와 연계하여 분석함으로써 스패터 발생 순간과 발생 원인을 명확히 규명한 것이었다. 이들의 결과를 기초로 하여 스패터 저감기술이 개발되었는데, 스패터가 발생하는 순간마다 용접전압 및 전류를 인위적으로 제어하여 스패터가 발생하지 않도록 하는 것이었다. 이렇게 용접전압 및 전류를 인위적으로 제어하는 기술을 파형제어기술(waveform control technology)라고 하는데, 스패터 저감 외에도 아크스타트성 향상 등에도 적용되고 있는 기술이다⁴⁾. 파형제어에 의해 용접스패터를 저감시킬 수 있다는 사실은 1974년에 Boughton 등⁵⁾에 의해 최초로 소개되었지만, 이러한 기술이 실제 구현할 수 있게 된 것은 인버터제어형 용접전원이 상용화되기 시작한 1980년대 후반이다⁶⁾. 이후 마이콤제어 기술이 발전함에 따라 제어기법도 다양하게 발전하게 되었고, 보다 고성능의 용접전원이 순차적으로 상품화되었다.

저자들은 과거 10여 년 동안에 전개된 파형제어기술의 발전단계에 대해서는 본 학회지를 통하여 이미 보고한바^{7,8)} 있기 때문에 본 보고에서는 최신의 파형제어기술의 특징만을 소개하고 향후 파형제어기술의 발전 방

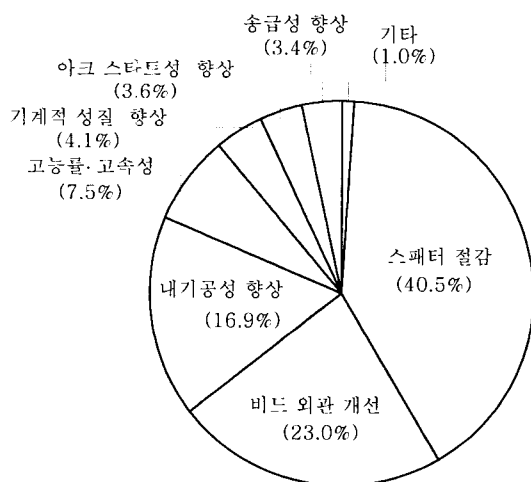


Fig. 1 Fabricators' needs for GMAW process

향에 대해서 언급하고자 한다.

2. GMA용접에서의 스파터 발생현상

GMA용접에 있어서 금속이행 모드는 용접전류가 증가함에 따라 단락이행(short circuiting)에서 자유(free flight)이행 또는 입상용적(globular)이행으로 천이한다. 고전류 CO₂용접에서는 반발이행(repelled transfer)이라고 하는 이행모드로 천이하게 되는데, 이러한 천이 과정에서 스파터 발생량은 Fig. 2와 같이 변화한다. 이러한 결과로부터 스파터 발생량은 금속이행 모드와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있으며, 천이이행 조건에서 최대가 됨을 알 수 있었다. 그러나 지금까지 상용화되어 있는 파형제어기술은 단락이행 조건에서만 적용 가능한 것이다.

단락이행은 단락상태(short circuiting)와 아크상태(arc)가 연속적으로 교차되면서 와이어 선단에 생성된 용적이 용융지(weld pool)로 이동되는 금속이행 현상이다. 단락이행과정을 보다 세분화하면 아크소멸(extinction)-단락상태(short circuiting period)-아크재생(reignition-아크상태(arc) period)의 4단계로 구분되어지는데, Fig. 3은 단락 기간이 상이한 2회의 단락이 연속되어 나타나고 있는 파형이다. 첫 번째 단락은 단락기간이 비교적 긴 단락으로써 '정상단락'이라고 불리는 단락이다. 정상단락에서는 한 개의 용적이 이동하는 과정에서 상기한 4단계가 순차적으로 진행되는데, 그러한 과정은 다음과 같다.

먼저 아크기간동안 와이어 선단에서 성장한 용적이 용융풀과 접촉하게 되면, 접촉되는 순간 아크는 소멸(extinction)되고, 용접 전압은 순간적으로 감소한다. 접촉이 이루어진 후에는 용적이 와이어와 용융지 사이에 가교(bridge)를 형성하게 되는데, 가교가 형성되어 있는 기간을 단락(short circuiting)상태라고 한다. 단락상태에서 용적의 용융 금속은 표면장력과 중력에 의해 용융지로 이동하게 된다. 용융 금속이 이행하는 동

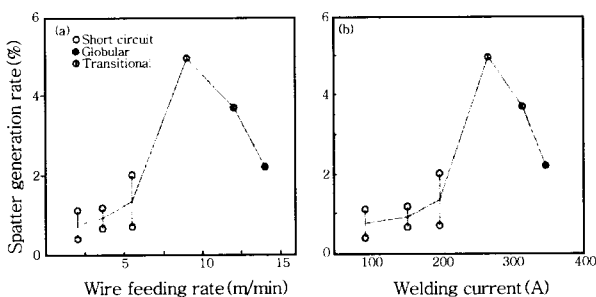


Fig. 2 Variation of spatter generation rate with (a) wire feeding rate and (b) welding current

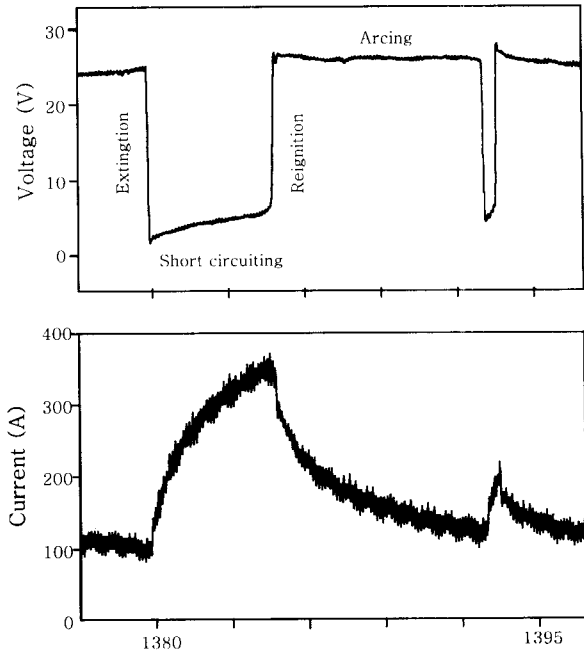


Fig. 3 Typical voltage and current waveforms of short circuiting transfer mode.

안 용접전류는 로그 함수적으로 증가하여 단락상태가 끝나는 시점에서 최대치에 도달하게 된다. 단락상태가 끝나는 시점이란 용적이 완전히 이행하여 가교가 끊기는 순간으로써, 가교가 끊기게 되면 아크가 순간적으로 재생(reignition)되면서 전압이 급격히 상승하게 된다. 이후에는 아크(arc)상태가 유지되면서 새로운 용적이 와이어 선단에서 발달하게 된다. GMA용접전원은 정전압 특성을 가지고 있기 때문에 전압은 일정치를 유지하지만 전류는 급격히 감소하다가 서서히 감소한다.

Fig. 3에서 보여주는 두 번째 단락은 단락기간이 매우 짧은 경우로써, 와이어 선단의 용적과 용융지가 순간적으로 접촉하였다가 바로 분리되는 경우이다. 이 경우에 나타나는 전압파형도 상기한 4가지 단계로 구분할 수는 있지만, 단락상태에 머무르는 기간이 극히 짧아서 용융금속의 실질적인 이행은 일어나지 못한다. 이러한 단락을 순간단락(instantaneous short circuit, ISC)이라고 하며, 일반적으로 단락기간이 2msec 이하인 경우가 이에 속한다.

단락이행이 진행되는 과정에서 발생하는 스파터는 상기한 단락특성에 따라 (i)정상단락 과정에서 발생하는 스파터와 (ii)순간단락과정에서 발생하는 스파터로 구분된다. 이들 각각이 발생하는 순간을 고속촬영 결과를 토대로 하여 도식화한 것이 Fig. 4이다. 먼저 Fig. 4(a)는 정상단락 과정에서 발생하는 스파터를 도식화한 것인데, 스파터는 아크가 재생되는 순간에 가교(bridge) 부위가 폭발하면서 발생한다. 이 순간 가교의

단면적은 최소화된 상태임으로 여기서 발생하는 스파터는 주로 소립의 스파터이다. 다음으로 Fig. 4(b)는 순간단락에 의해 발생하는 스파터를 도식화한 것이다. 순간단락에서는 단락초기의 급격한 전류 상승에 의해 아크가 용적 하단부에서 바로 재생되고, 이러한 아크가 상부의 용적을 파괴시켜 대립의 스파터를 발생시킨다. 이러한 순간단락이 발생하는 빈도수는 용접전류가 증가함에 따라 증가하여 단락이행과 입상용적이행이 혼재되어 나타나는 천이이행 영역에서 최대가 된다^{9,10)}.

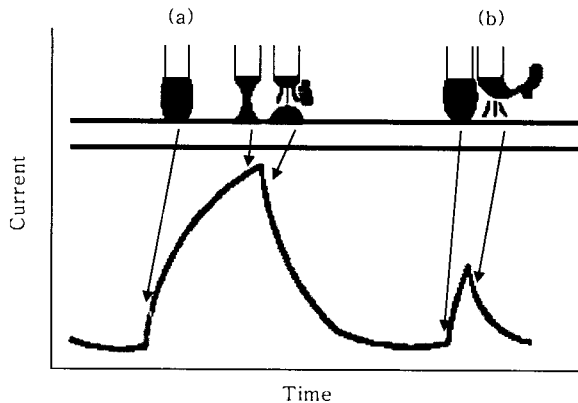


Fig. 4 Two different modes of spattering generated (a) at arc reignition stage and (b) by instantaneous short circuit

3. 스파터 저감을 위한 파형제어 기법

앞에서 설명한 바와 같이, 단락이행 과정에서 스파터가 발생하는 원인은 단락 초기의 급격한 전류상승과 재아크가 발생하는 순간의 높은 전류치에 있다. 따라서 스파터 발생을 억제하기 위해서는 스파터 발생순간에 용접전류를 제어하여 스파터가 발생하지 않도록 하는 것이다. 이러한 기본 개념을 바탕으로 지금까지 다양한 파형 제어기법이 제안되거나 실용화되어 왔는데, 가장 최근에 개발된 제어기법에 있어서는 스파터가 발생할 가능성이 높은 순간을 미리 감지하여, 이 순간에 용접전류를 강하시켜 저전류 상태가 일정시간 유지되도록 하고 있는데, Fig. 5는 이렇게 제어된 파형을 기존의 파형과 비교하여 도식적으로 보여주고 있다. 여기에는 두 가지 제어기법(I, II)이 동시에 적용되고 있는데, 이들 각각이 의도하는 제어효과는 다음과 같다.

3.1 단락 개시순간의 전류제어

Fig. 4의 (a), (b)에서 정상단락과 순간단락의 차이를 도식적으로 보여 주었다. 여기서 순간단락은 와이어 선단에서 성장한 용적 하단부와 용융풀이 순간적으로

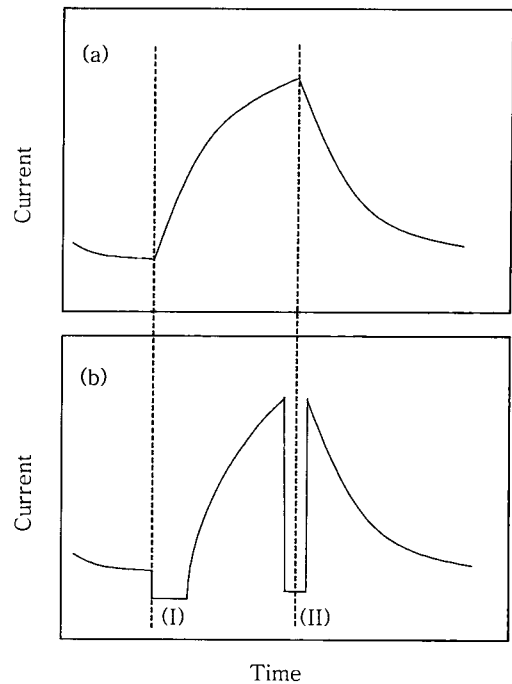


Fig. 5 Schematic illustration of current waveforms : (a) before control (b) after control.

접촉하였다가 분리되는 현상이라고 하였다. 이러한 현상은 단락 직후에 전류가 급격히 상승하는 단계에서 아크가 재생되기 때문이다. 이러한 순간단락이 발생하는 현상을 고속카메라로 관찰하여 보면, Fig. 6에서 보여주는 바와 같이, 접촉부에서 아크가 재생되고 있음을 알 수 있다. 그리고 아크 상부에 위치하는 용적은 아크 힘에 의해 파괴되면서 대립의 스파터를 발생시킨다. 결국 스파터는 단락순간에 전류가 급격히 상승하는데 기인하므로 이를 억제하기 위해서는 인위적으로 전류가 증가하지 못하도록 제어할 필요가 있다. 이러한 제어개념을 구현하기 위하여 Fig. 5(b)의 (I)과 같은 제어기법을 적용하고 있다. 즉 단락순간에 전류를 급격히 저하시키고 저하된 전류 상태를 일정시간 유지되도록 하는 것이다. 이렇게 하면 용적과 용융풀의 접촉면적이 증가하여 순간단락이 억제되고 정상단락이 되는 것이다. 순간단락이 정상단락화 되면 대립의 스파터가 발생

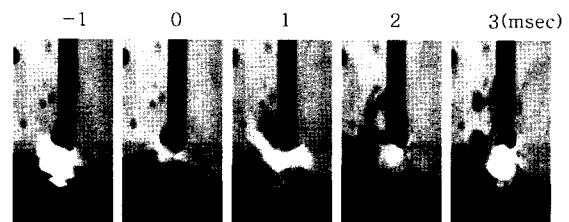


Fig. 6 High speed photographs showing spatter generation by instantaneous short circuit

하지 않기 때문에(비록 소립의 스패터는 발생할 지라도) 전체적으로 스패터발생량을 저하시키는 효과가 있는 것이다.

3.2 아크 재생 순간의 전류치 제어

‘단락 개시순간의 전류제어’에 의하여 순간단락이 억제되면 금속이행은 모두 정상단락에 의해 이행된다고 할 수 있다. 정상단락에서는 Fig. 4의 (a)와 같이 용융 금속이 용적과 용융풀 사이에 형성된 가교를 통해 이행되는데, 마지막 단계에 이르면 용접전류는 최대치로 상승한 상태에서 가교의 단면적이 급격히 작아지기 때문에 가교의 전류밀도는 급격히 상승할 것이다. 이러한 상태에서 가교는 휴즈가 터지듯이 스패터화 하면서 아크가 재생되는데, Fig. 7은 재생 순간을 고속카메라로 찍은 연속사진들이다. 이들 사진에서 보듯이 아크재생 위치는 가교 부위에 국한되어 있고, 아크력은 전류치에 비례한다고 할 수 있으므로 아크재생 시점에서의 전류를 Fig. 5(b)의 (II)와 같이 제어할 필요가 있다. 즉 아크재생 직전의 순간을 감지하고, 감지된 순간에 용접전류를 급격히 저하시켜 아크가 저전류 상태에서 재생되도록 한 다음, 아크 재생이 확인되면 본 전류로 회복시키는 것이다. 이렇게 함으로써 아크 재생시점에서의 폭발력을 최소화하고자 하는 것이다.

상기한 두 가지 제어기법을 동시에 적용하게 되면, 단락 초기상태를 제어하여 순간단락을 정상단락화 함으로써 대립의 스패터를 억제하고, 단락 말기상태를 제어하여 소립의 스패터를 억제함으로써 스패터발생량을 최소화하게 되는 것이다.

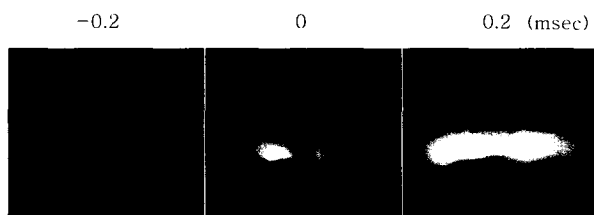


Fig. 7 High speed photographs taken at the moment of arc reignition.

4. 파형제어 기법의 구현

상기한 파형제어 기법을 최초로 적용하여 상품화된 것이 미국 링컨사의 STT(surface tension transfer) 용접전원이다¹¹⁾. 이후 일본 및 국내 회사들도 상품화하였는데, 일본의 고베사는 SENSARC라는 모델명으로 시판하고 있다¹²⁾. 저자들은 이들 두 회사 제품을 구매하여 파형을 측정하여 보았는데, Fig. 8은 이들의 파형

을 보여주고 있다. 이들은 Fig. 5(b)에서 제시한 두 가지 제어기법(I,II)을 모두 채용하고 있는데, 이렇게 함으로써 스패터발생량은 기존 용접전원에 비해 1/3~1/4 수준으로 저하하였다. 그런데 상기한 두 회사의 파형을 자세히 분석하여 보면, 단락기간 동안에도 파형을 제어하고 있음을 알 수 있는데 Fig. 8에서 보듯이 제어된 전류파형에 있어서는 커다란 차이를 보여 주고 있다. STT파형에서는 전류상승 속도를 2단계로 제어하고 있는데 반하여, SENSARC 파형에서는 전류가 일정수준에서 유지되도록 제어하고 있다. 이러한 차이는 아크 재생 직전의 순간을 감지하는 방법의 차이에서 기인한다. STT파형에서는 전류상승 속도를 일정하게 하여 아크재생 직전에 나타나는 전압 순간변화율(dV/dt)을 감지하도록 하였으며, SENSARC 파형에서는 전류가 일정하게 유지되도록 하여 아크재생 직전에 나타나는 전압상승치(ΔV)를 감지토록 한 것이다.

또한 아크 재 발생 직후에는 와이어와 용융풀이 근접되어 있어 용융풀 유동에 의해서 양자가 접촉하기 쉽고 이로 인하여 순간단락이 발생하고 결과적으로 스패터가 발생할 위험성이 있다. 이를 방지하기 위하여 상기한 두 회사 모두 아크 재생 직후에는 펄스 전류를 부가함으로써 강한 아크 힘으로 용융풀을 밀어내도록 하였다. 이럼으로써 와이어와 용융풀의 간격을 크게 하여 불필요한 순간단락으로 스패터가 발생하는 것을 억제코자 하였다.

5. 파형제어 기법의 응용

상기한 파형제어 기법은 모두 단락이행에 있어서 스패터 저감을 위한 파형제어 기법에 대하여 기술하였다. 그런데 상기한 파형제어 기법을 적용하게 되면 GMA용

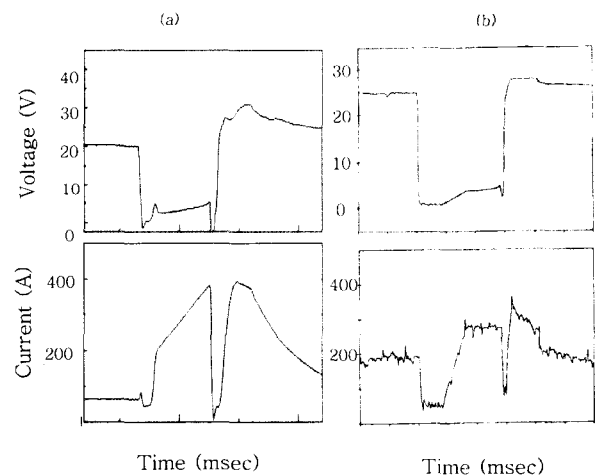


Fig. 8 Waveforms employed in commercial power supplies; (a) STT and (b) SENSARC

접으로 파이프 초층용접이 가능하게 된다. 이를 STT용접전원이 최초로 보여 주었는데, 이는 STT용접전원이 가지는 펄스제어에 기인한 것으로 생각된다. Fig. 8과 같이 아크재생 직후에 펄스 파형을 부가하게 되면 아크력이 증가하여 온전한 이면 비드를 만들 수 있게 되는 것이다.

한편 단락이행에 적용된 파형제어 개념을 입상용적이행에도 적용하려는 연구가 수행되고 있는데, 이는 용적이탈과정에서 스파터가 발생한다는 연구결과를 기초로 하여 새로운 제어기법을 개발한 것이다¹³⁾. 여기에서는 Fig. 9와 같이 용적이행 직전의 상태를 감지하고, 감지된 순간에 용접전류를 급격히 저하시켜 일정시간 유지시키는 방법이 적용되고 있다. 이러한 기법이 기 개발된 단락이행제어기법과 동시에 적용될 수 만 있다면 전전류범위에서 스파터 저감이 가능한 용접전원이 개발될 수 있을 것으로 기대된다.

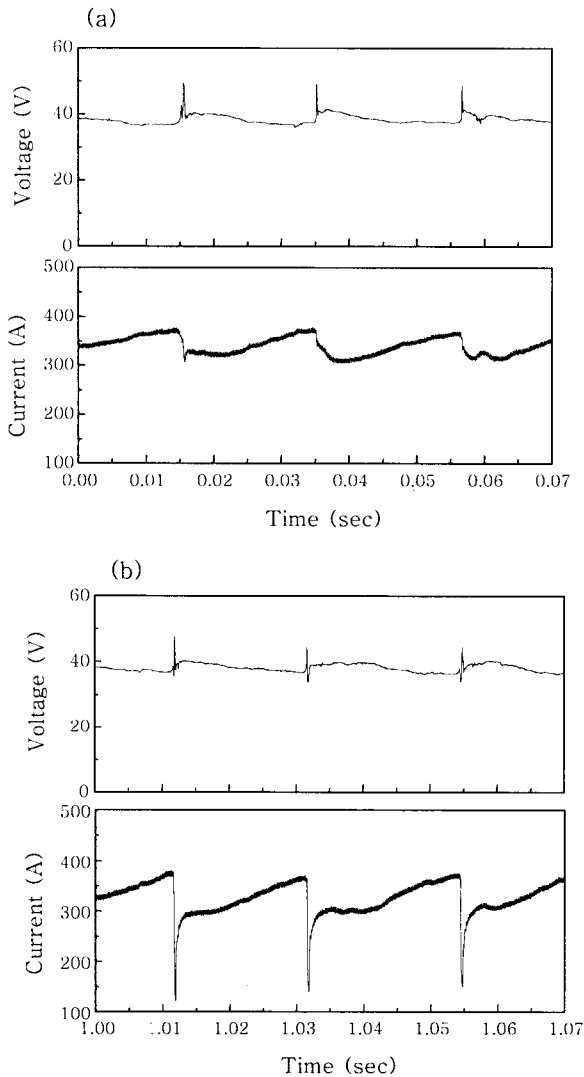


Fig. 9 Waveforms made (a) by conventional repelled transfer and (b) by controlled transfer

상기한 바와 같이, 지금까지 수행된 파형제어 관련 연구개발은 모두 와이어 송급속도(wire feeding rate)를 일정하게 하고, 단지 출력전류만을 제어하여 단락이행 과정을 제어하고자 하는 것이었다. 이렇게 제어된 단락이행을 Norrish¹⁴⁾는 'current controlled dip transfer'라고 명명하여, 기존의 단락이행과 차별화 하였다. 그런데 최근에는 출력전류 대신 와이어 송급속도를 제어하여 단락이행 과정을 제어하고자 하는 연구가 Huismann¹⁵⁾에 의해 소개되었다. 그의 보고에 의하면, 단락이 시작되는 시점에서 송급속도를 역방향으로 하여 와이어를 용융지로부터 들어 올림으로써 단락기간에 형성된 가교가 원활히 단절되도록 한다는 것이다. 즉 단락해지를 전기적으로 하지 않고 기계적으로 한다는 것이다. 단락이 해지되면 와이어를 정방향으로 송급하여 지속적인 용접이 이루어지도록 하는 것이다. 비록 직경 1.6mm인 와이어를 사용하여 저전류(150A)에서 실험한 결과이기 때문에 와이어 송급속도가 극히 낮은 수준에서 수행된 시험결과이지만, 보다 고속에서도 송급속도를 역방향으로 제어할 수 만 있다면 고전류 CO₂용접 아크현상을 제어하는데도 적용할 수 있을 것으로 생각된다. 이와 같이 와이어 송급속도를 제어하여 제어된 단락이행을 Norrish¹⁴⁾는 'controlled wire feed short circuit'라고 명명하였다.

6. 맺 음 말

파형제어기술은 기본적으로 아크현상을 전기적으로 제어하고자 하는 기술이다. 이를 위해서는 아크현상에 대한 이해, 용접전원의 응답성, 제어의 신속성 등이 필수적으로 필요하였다. 이러한 주변여건이 갖추어지면서, 특히 인버터제어형 용접전원이 상용화되면서 실용화되기 시작한 파형제어기법은 수요자들의 요구에 따라 CO₂용접에 있어서 스파터 저감을 목적으로 출발하였다. 그에 따라 최근 상품화된 파형제어형 인버터 용접전원을 사용하게 되면 기존 용접전원에 비해 스파터발생량을 1/3~1/4 수준으로 낮출 수 있을 정도로 발전하였으며, 향후에는 무 스파터(splatter-free)용접도 가능할 것으로 기대된다. 그리고 파형제어기법을 원활히 적용하면 GMA용접으로 파이프 초층용접도 할 수 있다는 부수적인 효과도 얻을 수 있어서 파형제어기술의 적용 범위가 스파터 저감에 한정되어 있지 않다는 사실도 인식하게 되었다. 최근에는 단락이행 뿐만 아니라 반발이행까지도 파형제어에 의해 제어하고 자하는 연구가 수행되고 있고, 와이어 송급속도를 기계적으로 제어함으로써 전기적 제어 방법을 대체하고자 하는 연구도

수행되고 있다. 이와 같이 아크현상을 임의적으로 제어하고자 하는 연구가 꾸준히 지속되면서 교과서적으로 알고만 있던 금속이행현상에 대한 분류마저도 적절치 않게 되었다. 향후에도 아크현상을 제어할 수 있는 기술은 계속 경쟁적으로 개발될 것으로 기대되며, 그에 대응하여 파형제어기술은 보다 세분화되면서 적용 범위를 확대해 나갈 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. Y. Kambe: Some aspects on welding consumable development, Journal of JWS, **67-2**(1998), 109 (in Japanese)
2. Y. H. An, J. B. Lee and D. S. Um : Effect of various factors on deplet transfer phenomena in GMA welding, Journal of KWS, **16-1**(1998), 17 (in Korean)
3. Y. H. An, J. B. Lee and D. S. Um : Effect of Si on arc stability of MAG welding, Journal of KWS, **16-6**(1998), 503 (in Korean).
4. T. Ogasuwar et al. : A power source for gas shielded arc welding with new current waveform, Welding Journal, **66-3**(1987), 57
5. P. Boughton and G. J. MacGregor : Control of short circuiting in MIG welding, Welding Research International, **4-2**(1974), 31
6. T. Mita : Waveform control method in CO₂ gas shielded arc welding, Quarterly Journal of JWS, **6-2**(1988), 209 (in Japanese)
7. 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)
8. 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)
9. B. Y. Kang and H. J. Kim : Effect of metal transfer mode on spatter generation of CO₂ welding, Journal of KWS, **15-2**(1997), 140 (in Korean)
10. 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)
11. E. K. Stava : The surface tension transfer power source: A new, low-spatter arc welding machine, Welding Journal, **72-1**(1993), 25
12. CO₂ MAG Power Supply SENSARC LS350, KOBE Technical Guide, vol. 37, no. 330(1997), 8 (in Japanese)
13. H. J. Kim and B. Y. Kang : Development of waveform control for suppressing the spatter generation in high current CO₂ welding, Journal of KWS, **19-6**(2001), 643 (in Korean)
14. J. Norrish and D. Cuiuri : Metal transfer modes and recent developments in their control in the GMAW process, Proc. of IWC-Korea 2002, Oct. 2002, Gyungju, Korea, 737
15. G. Huisman : Direct control of material transfer: The short-circuiting (CSC)-MIG process, Proc. Gas Metal Arc Welding for the 21st Century Conf., Dec. 2000, Orlando, FL, USA, 165



- 김희진(金喜珍)
- 1953년생
- 한국생산기술연구원, 정밀집합용접팀
- 용접전원파형제어, 용접재료개발
- e-mail: kimhj@kitech.re.kr



- 강봉용(姜奉龍)
- 1960년생
- 한국생산기술연구원, 정밀집합용접팀
- 용접전원파형제어, 용접재료개발
- e-mail: kanbo@kitech.re.kr



- 유희수(柳會洙)
- 1965년
- 한국생산기술연구원, 정밀집합용접
- 용접전원파형제어, Monte Carlo Simulation
- e-mail: hsryoo@kitech.re.kr