

단락이행에서 스파터 저감을 위한 전류 파형제어 및 기계적 제어 기술 리뷰

김영삼 · 유희수 · 김희진 · 오성철

A Review of Welding Current Waveform Control and Mechanical Control Technique for Reduction of Spatter in Short Circuit Transfer

Young-Sam Kim, Hoi-Soo Ryoo, Hee-jin Kim and Sung-Chul Oh

1. 서 론

소모성 전극을 사용하는 GMA(gas metal arc) 용접은 높은 생산성과 자동화 효율로 널리 이용되고 있다. GMA 용접 공정의 개선은 스파터 저감(또는 전극 금속의 손실 저감), 용접 비드 외관 및 용접 금속과 열 영향부의 성질을 향상시키는 것이다. 최근 들어 에너지의 절약과 인건비의 상승 문제 그리고 고품질 용접 및 생산성 향상 등에 관심이 높아지고 있어, 위와 같은 용접공정의 개선의 노력은 매우 중요하다.

용접공정의 개선은 용접재료의 개발도 있지만, 단락이행에서 스파터 저감을 목적으로 전류 파형제어 기술을 바탕으로 하는 용접전원 장치의 개발도 활발하게 이루어지고 있다. 전류 파형제어 개념은 1980년에 Pinchuk 등¹⁾이 제안하였으나 실용화되지 못하였고, 인버터 용접전원의 개발로 1990년대 초에 미국 Lincoln 사의 STT(surface tension transfer)²⁻³⁾ 및 일본 고베사의 SENSARC⁴⁾의 용접기가 상용화되었다.

단락이행에서 전류 파형제어의 기본원리는 스파터가 발생하는 순간에 전류를 낮추어 스파터의 발생을 억제하는 것이다¹⁾. 그러나 이러한 전류 파형제어 기술은 단락 시 전류의 상승이 불가피하고, 이로 인하여 입열이 증가하므로 저 입열이 필요한 초 박판 용접에 적용이 어렵고, 외관이 있을 경우 정밀한 파형제어가 어려워져 스파터를 현저하게 줄이는 것이 어렵고 나아가 고속용접에 적용하는 것도 쉽지 않다.

전류 파형제어 기술의 단점을 극복할 수 있는 방법은 전류 파형제어와 동시에 기계적 제어를 행하는 것이다. 기계적 제어 기술은 와이어의 펄스화된 송급을 통하여 강제적으로 아크 및 단락 주기를 제어하는 것으로, 단락주기가 일정하여 아크와 단락의 시점을 예측할 수 있

으므로 전류 파형제어를 정확하게 할 수 있도록 도와줄 수 있다. 기계적 제어 기술은 1980년대 초 구소련에서 토치의 바이브레이션을 통하여 와이어의 송급 속도를 제어하였으나⁵⁾, 장치가 매우 복잡하고 자동화가 어려워 실용화되지 못하였다. 그러나 최근 소형화된 고풍력의 스텝모터(step motor) 및 서보모터(servo motor)를 이용하여 직접 와이어의 모션을 제어함으로써 2000년 초반에 Fronius사의 CMT(cold metal transfer)⁶⁻⁷⁾ 및 Jetline사의 CSC(controlled short circuit)⁸⁾ 기법이 실용화되었다. 이 기계적 제어 기술은 단락 시 최소한의 전류에서 금속이행이 가능하기 때문에 기존의 펄스용접에 비해 약 10~20% 더 얇은 박판의 용접이 가능한 것으로 보고되고 있다⁶⁾. 본 기술 보고에서는 전류파형 제어와 와이어 모션 제어 기법을, 용적에 미치는 힘을 바탕으로 고찰하고자 한다.

2. 용적에 작용하는 힘

2.1 아크기간 동안 용적에 작용하는 힘

GMA 용접에서 금속이행(metal transfer)은 연속적으로 공급되는 소모성 전극(consumable electrode)의 끝단에서 용융된 금속(용적)이 용융지(weld pool)로 이행하는 현상이다. 용적은 내력(internal force)인 표면장력(surface tension force, F_s)에 의하여 전극의 끝단에 부착되어 있으며, 용적의 이탈을 위해서는 용적에서 용융지 방향으로 표면장력보다 큰 외력(external force)이 작용하여야 한다. 용적에 작용하는 힘에는 일반적으로 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 중력(gravitational force, F_G), 전자기력(electromagnetic force, F_{em}) 및 항력(plasma drag force, F_d)의 외력과 표면장력의 내력, 4가지로 설명되어지고 있다⁹⁾. 작용하는 힘의

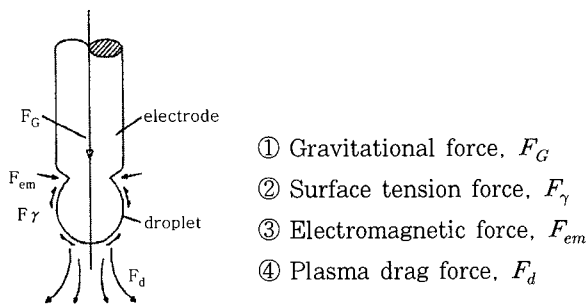


Fig. 1 The forces acting on the droplet⁹⁾

크기를 통해 용적의 이탈 조건을 식 (1)과 같이 힘 평형모델(static force balance model)로 나타낼 수 있으며¹⁰⁾, 전류변화에 따른 용적에 작용하는 각각의 힘들의 변화를 Fig. 2에 나타내었다⁹⁾.

$$F_d + F_G + F_{em} > F_\gamma \quad (1)$$

여기서, 표면장력은 용적과 전극이 접촉하는 넥(neck)에 작용하며, 식 (2)로 나타낼 수 있다¹⁰⁾.

$$F_\gamma = 2\pi R_e \gamma \quad (2)$$

위 식에서 γ 는 용적과 와이어에 대한 표면장력 계수이며, R_e 는 Fig. 3에 보인 바와 같이 전극의 반지름이다. 따라서 표면장력은 Fig. 2에 보인바와 같이 전류와 무관하며, 250A 이전까지는 매우 큰 힘으로 작용한다.

아크용접 시 와이어를 통해 흐르는 전류에 의해 자기장이 형성되기 때문에 전류의 방향에 상관없이 아크 기

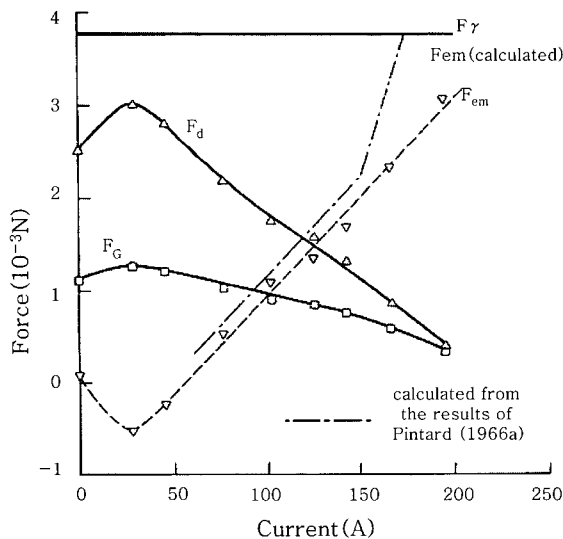


Fig. 2 The forces acting on the drop at the carbon steel⁹⁾

등의 내부로 조여지는 힘이 발생한다. 이와 같은 현상을 핀치효과(pinch effect)라 하며, 이 때 발생하는 전자기력을 핀치력(pinch force) 혹은 로렌쯔힘(Lorentz force)이라고도 한다¹⁰⁾. Amson¹¹⁾은 Fig. 3에 보인 바와 같이 전류가 전도되는 용적의 conducting zone (아크가 용적을 감싸고 있는 영역)에서 용융지 방향으로 작용하는 총 전자기력을 계산하였으며, 그 결과를 식 (3)에 나타내었다.

$$F_{em} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} F_2 \quad (3)$$

$$F_2 = \left[\ln \frac{r_d \sin \theta}{R_e} - \frac{1}{4} - \frac{1}{1 - \cos \theta} + \frac{2}{(1 - \cos \theta)^2} \ln \frac{2}{1 + \cos \theta} \right]$$

여기서 I 는 용접전류, μ_0 는 자유표면에서의 투자율이 다. 형상지수(geometry factor) F_2 는 Fig. 3에 보인 conducting zone의 각도 θ 와 용적의 반경 r_d 에 따른 함수이다. 전자기력은 전류의 제곱에 비례하므로 전류에 매우 민감하지만, 용접 전류가 클수록 용적의 크기는 작아지기 때문에¹⁰⁾ Fig. 4에 보인 바와 같이 용적이 작을수록 F_2 의 값이 작아지게 된다. 따라서 Fig. 2에 보인 바와 같이 전자기력은 전류의 제곱에 비례하지 않게 된다. 또한 conducting zone이 작을 경우, 예를 들면 아크가 용적 끝에 집중될 때(Fig. 5(a)), Fig. 4에 보인바와 같이 F_2 는 음의 값이 된다. 즉 이때의 전자기력은 반발력(repulsive force)으로 작용하여 용적

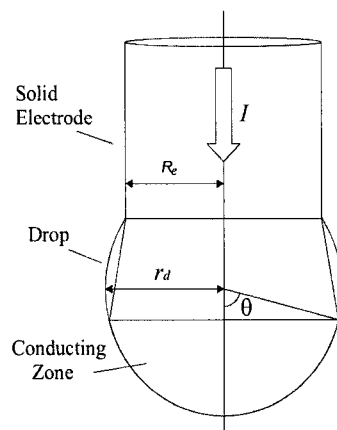


Fig. 3 Current flows through the conduction zone, but not through the rest of the drop surface. The conduction zone is described by the angle θ ¹¹⁾

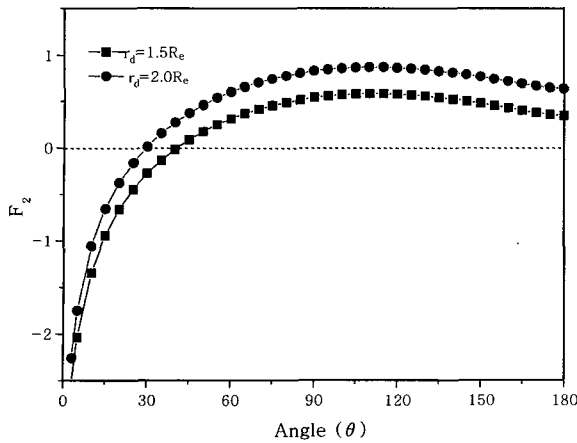


Fig. 4 Variation of F_2 as a function of Θ ¹¹⁾

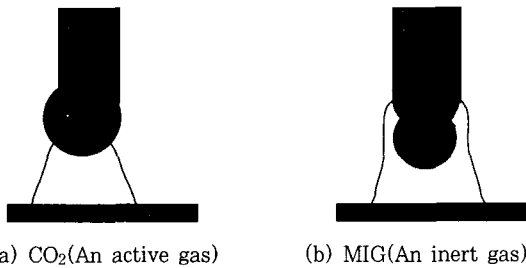


Fig 5 Difference of conducting zone as shielded gas

의 이탈을 방해하는 힘으로 작용하게 된다. 즉 보호가스가 CO₂인 경우 아크가 용적 끝단에 집중되고, 전자기력에 의한 반발력으로 인하여 고전류 영역에서는 반발이행(repelled transfer)이 나타나게 된다. 이와 반대로 아크가 용적을 감싸고 있을 때(Fig. 5(b)), conducting zone이 넓은 경우), F_2 는 Fig. 4에 보인 바와 같이 양의 값이 되어 전자기력은 용적의 이탈을 위한 힘으로 작용하게 된다. 따라서 MIG용접의 경우 중전류 이상에서는 전자기력에 의하여 용적의 이탈이 용이하므로 스프레이 이행(spray transfer)이 나타나게 된다.

항력은¹⁰⁾ 아크 기둥에서 발생하는 플라즈마 제트(plasma jet)로 인하여 발생하고, 항상 모재 방향으로 향하고 있으며, Fig. 2에 보인바와 같이 전류가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 항력은 주로 음극(cathode spot)에서 발생하는 플라즈마 제트의 영향을 받는다. 따라서 정극성(DCEN)을 사용하면 용적 표면 상에서 수시로 변하는 임의의 spot에서 제트가 발생하여 용적의 이탈을 불규칙하게 만들기 때문에 스패터가 발생하기 쉬우므로 역극성(DCEP)을 사용한다.

2.2 단락기간 동안 용적에 작용하는 힘

단락이행은 보호가스에 관계없이 저 전류, 저 전압의 조건에서 나타나는 이행 형태로 아크열에 의해 와이어 선단에서 성장한 용적이 Fig. 6의 (a)에 보인 바와 같이 용융지와 접촉하여 아크가 소멸된다. 이때 단락으로 인하여 저항이 작아지게 되고, 전압은 순간적으로 약 3V이하로 떨어지며, 전류는 급상승을 시작한다. 단락순간 용융지와 접촉된 용적에 작용하는 전자기력은 식 (4)와 같다¹²⁾.

$$F_{em} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} F_3 \tag{4}$$

$$F_3 = \left[\ln \frac{R_e}{a} - \frac{1}{4} \right]$$

여기서 a는 Fig. 6(a)에서 보인바와 같이 용적이 용융지와 접촉하는 면의 반경이다. 형상계수(geometry factor) F_3 는 Fig. 7¹²⁾에 보인 바와 같이 R_e/a 의 함

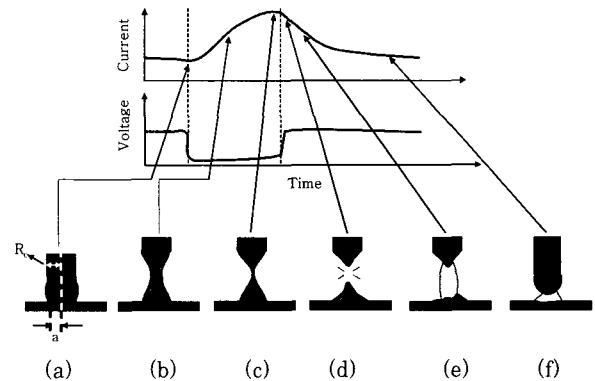


Fig. 6 Schematic illustration of welding waveform and transfer of the drop in short circuit transfer

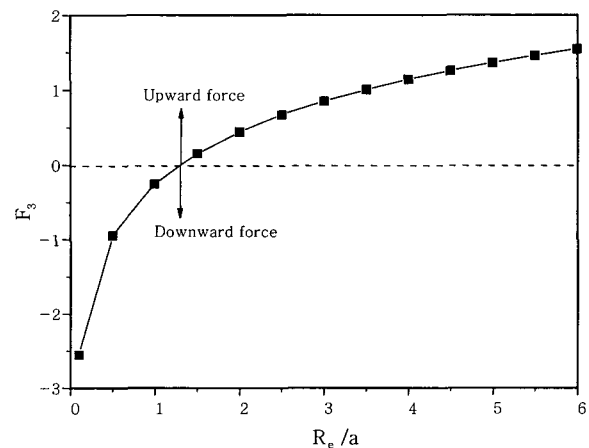


Fig. 7 Variation of F_3 with relative size of the droplet R_e/a ¹²⁾

수로 전자기력의 방향에 영향을 준다. 즉 용융지와 접촉하는 반경이 전극의 반경보다 상대적으로 작을 경우 ($R_e/a < 1$) 전자기력은 위로 작용하며, 반대로 크기가 클 경우 ($R_e/a > 1$) 아래로 작용하게 된다.

3. 단락이행에서 전류 파형제어

3.1 단락기간에서의 제어

3.1.1 순간단락억제 제어

단락 순간에 R_e/a 이 1보다 작은 경우 용적에는 전자기력이 용적을 위로 밀어 올리는 힘이 작용하며, 용적이 완전히 이행되지 못하고 오히려 핀치력에 의하여 용융지와 접착이 끊어지면서 아크를 재 발생시키는데, 이를 순간단락(*instantaneous short circuit, I.S.C.*)이라 한다. 이러한 순간단락 과정을 Fig. 8에 나타내었다. 순간단락은 스패터를 다량 발생시키는데, 이는 Fig. 9(a)와 같이 아크 재 발생 시 강한 폭발력으로 용적과 용융지를 강타하여 용적과 용융지의 일부가 비산되기 때문이다. 또한 Fig. 9(b)에서와 같이 아크 폭발로 인하여 표면장력으로 구형을 유지하던 용적은 매우 불규칙한 모양으로 바뀌고 용융지 유동도 매우 불규칙해짐으로써 아크의 방향이 불규칙하게 바뀌어 여러 방향으로 스패터를 발생시킨다.

순간단락에서 발생하는 스패터는 매우 조대하므로 용융상태로 모재에 부착될 확률이 높기 때문에 이를 제거하기 위한 추가적인 공정이 필요하다. 따라서 순간단락의 억제를 통한 스패터의 저감은 파형제어에서 가장 핵

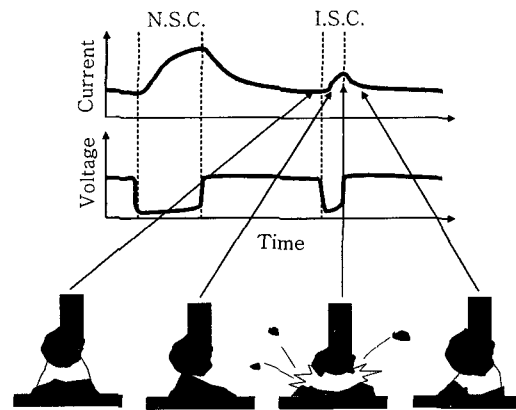


Fig. 8 Schematic illustration of the instantaneous short circuit

심이라 할 수 있다.

순간단락의 제어는 Pinchuk 등¹⁾이 제안하였으며, 용접전압이 8~12V 이하가 될 경우 단락이 되었다고 판단하여 전류를 2~10A로 0.7~1msec 시간동안 전류를 감소시켜 단락전류 상승을 지연시킨다. 즉 단락 시 전류상승을 지연시킴으로써 용적을 밀어 올리는 전자기력을 약화시켜 순간단락을 정상단락이 될 수 있도록 유도한다. 이와 같은 제어 개념을 Fig. 10(a)에 나타내었다. 또한 김희진¹³⁾ 등은 Fig. 11에 보인바와 같이 지연시간이 0.6msec 이상이 되어야 스패터를 현저하게 줄일 수 있다고 하였다. 그러나 일반 용접전원의 경우 리액터로 인하여 출력을 저하시켜도 전류가 급격히 감소되지 않기 때문에 Fig. 10(b)와 같이 전류 상승지연 제어를 한다.

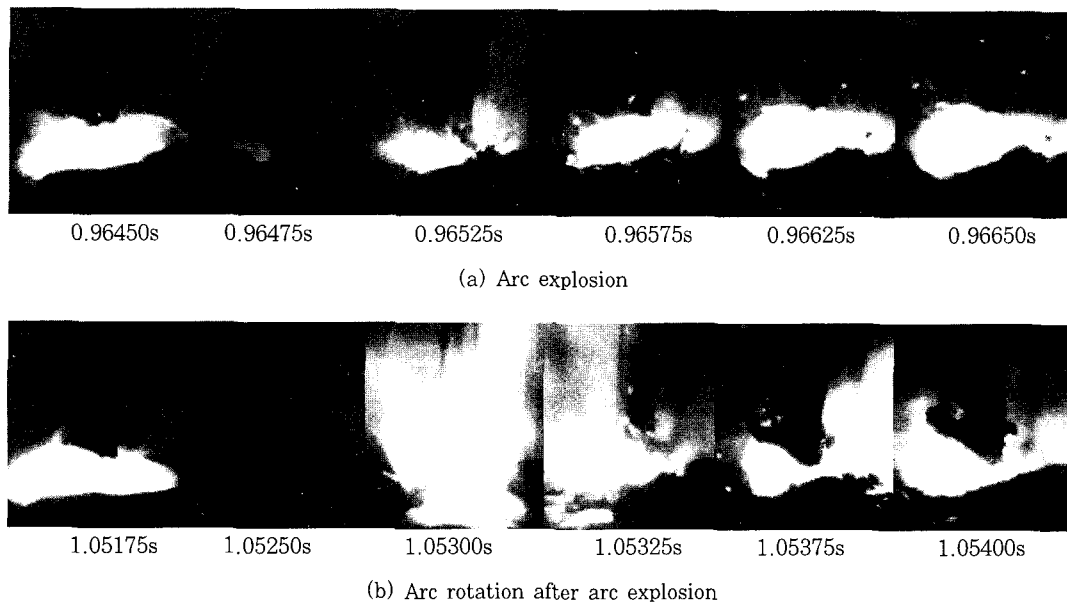
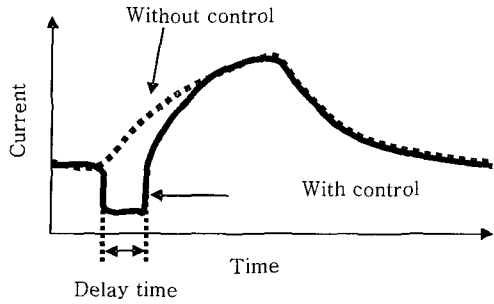
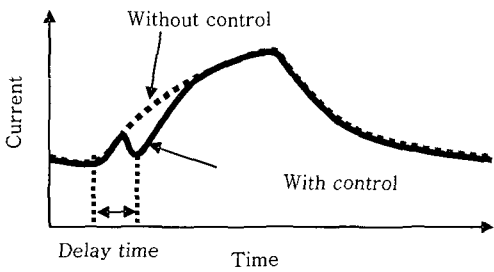


Fig. 9 High speed images of two types of spatter generation by instantaneous short circuit



(a) Current decrease control^{1,13-14)}



(b) Delay time control¹⁴⁾

Fig. 10 Waveform control for suppression of occurrence of instantaneous short circuit

3.1.2 단락전류 상승기울기 제어

정상단락(normal short circuit, N.S.C.)은 용융지와 용적이 충분히 접촉($R_e/a > 1$)하여 Fig. 6의 (b)와 같이 가교가 형성되면, 용적을 용융지로 이행시켜 가교를 파단시키려는 중력, 전자기력과 가교를 유지하려는 표면장력이 작용한다. 그러나 낮은 전류에서는 표면장력이 중력과 전자기력에 비해 매우 크기 때문에 가교가 파단되기 어렵다. 단락과 동시에 지속적인 전류의 상승으로 전자기적 핀치력이 점차적으로 강하게 작용하여 식 (5)의 조건을 만족하면 Fig. 6의 (d)와 같이 가교가 파단되고 아크가 재 발생하게 된다.

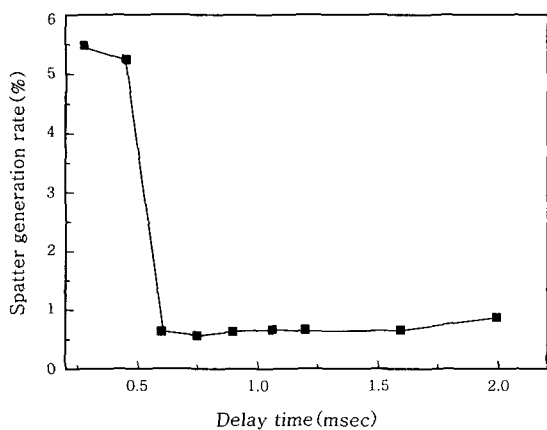
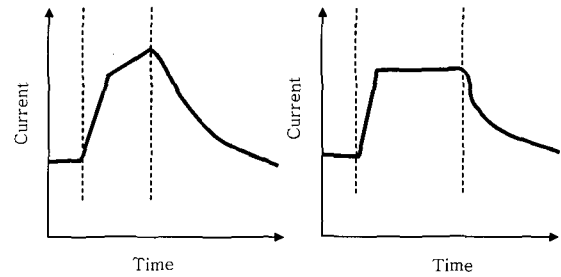


Fig. 11 Spatter generation rate on the delay time¹³⁾



(a) current rise rate control (b) Peak current control

Fig. 12 Schematic illustration of the current waveform control in short circuit period¹⁴⁾

$$|F_{em}| + F_g > F_\gamma \tag{5}$$

단락기간 중 전류가 최대치에 도달하였을 때 아크가 재생되며, 이 때 재생된 아크는 강한 폭발력(아크 반발력)으로 용융지를 쳐내면서 소립의 스파터를 발생시킨다. 따라서 아크 재생 시 발생하는 스파터를 억제하기 위해서는 가능한 낮은 전류를 유지한 상태에서 아크가 재생하도록 하여야 한다. 이러한 개념으로 여러 가지 파형이 제안되고 있는데, Fig. 12(a)와 같이 초기 전류 상승기울기를 크게 하고, 설정된 전류 이상에서는 전류 상승속도를 감소시켜 궁극적으로 아크재생 시의 전류를 낮게 유지하는 방법과 Fig. 12(b)와 같이 초기 전류 상승기울기를 크게 하고, 일정 전류 이상 상승을 제한하는 방법 등이 있다¹⁴⁾.

초기 단락전류 상승기울기에 따른 단락거동의 변화를 살펴보면 Fig. 13의 ②를 기준으로 Fig. 13 ①과 같이 전류 상승기울기가 너무 큰 경우에는 전자기력이 짧은 시간동안 가교에 강하게 가해져 가교의 파단시간이 짧아지고, 높은 피크전류에서 아크가 재생되기 때문에 다량의 스파터가 발생한다. 반면에 Fig. 13의 ③과 같이 너무 작은 경우에는 전자기력이 작으므로 가교가 파단되는 속도가 지연되어 장시간 단락이 해소되지 못하고, 와이어는 저항열에 의해 가열되고 결국 Fig. 14에서와

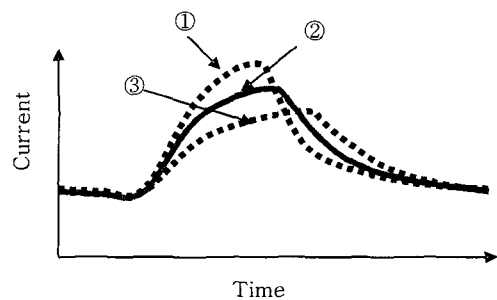


Fig. 13 Schematic illustration of current rise slope control at short circuit

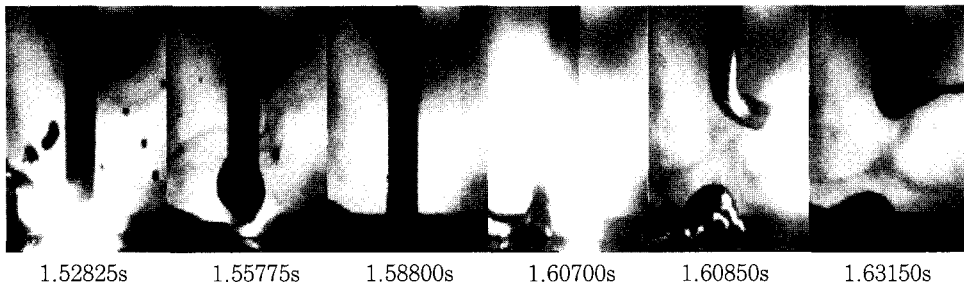


Fig. 14 High speed images of spatter generation during the long short circuit period

같이 와이어의 중간에서 파단되어 스파터화 된다. 또한 와이어가 중간에서 파단될 경우 아크가 끊기고, 이 후 아크가 재생될 때 대립의 스파터를 발생시킨다. 따라서 적절한 단락전류 상승기울기를 제어하여야 한다.

3.1.3 아크재생 전류제어

아크재생 전류제어는 아크가 재생되는 순간의 스파터를 줄이기 위한 제어로 Fig. 15에서 보는 바와 같이 아크가 재생되는 순간에 전류를 급격히 저하시켜 낮은 전류에서 아크가 재생되도록 하여 아크 폭발력을 최소화하는 것이다^{3,14)}.

3.1.4 장기단락 제어

Fig. 14에서 보인 바와 같이 단락전류 상승기울기가 매우 낮게 설정된 경우 단락이 해소되지 못하고 정상단락(약 10msec)에 비해 단락시간이 길어지는 장기단락 현상이 발생한다. 장기단락 발생 시 이를 해소하기 위하여 Fig. 16에 보이는 바와 같이 일정 단락시간을 초과할 경우 전류를 급격히 상승시켜 식 (5)의 조건을 만족하게 함으로써 단락을 강제적으로 해소시키는 것이다^{14-15,19)}.

3.2 아크기간 중의 제어

3.2.1 단락축진 제어(장기아크 제어)

CO₂ 용접에서 단락이 일어나기 위해서는 식 (6)과

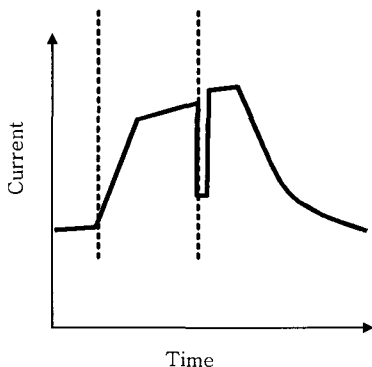


Fig. 15 Current waveform control of arc reignition⁴⁾

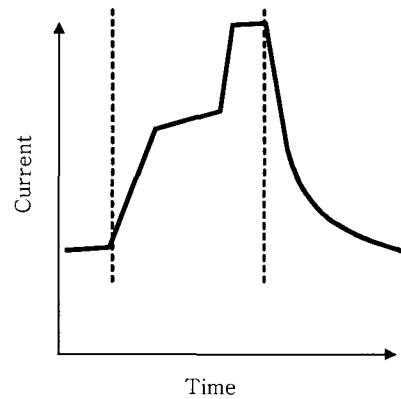


Fig. 16 DPC(Deposition preventive current) control to prohibit the long short circuit period¹⁴⁾

같은 조건이 만족되어야 하지만 실제로 용적에 작용하는 힘은 표면장력과 전자기력이 매우 크게 작용하므로 항력과 중력만으로는 단락이 형성될 수 없다. 즉, 다음 식 (6)의 조건을 만족시키기 어렵다.

$$F_d + F_g > F_\gamma + |F_{em}| \tag{6}$$

더욱이 Fig. 17(a)에 보는 바와 같이 아크의 플라즈마 제트에 의하여 용적을 계속 밀어내므로 더욱 단락을 어렵게 한다. 따라서 단락의 형성을 위해서는 Fig. 17(b)에서 보는 바와 같이 용융지가 유동에 의해 용적까지 치고 올라올 경우 $R_e/a > 1$ 의 조건을 만족하게 되

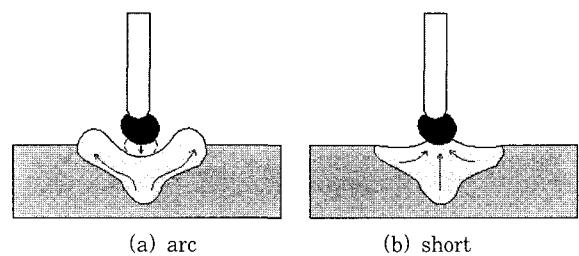


Fig. 17 Schematic diagram of short circuiting mechanism by the weld pool oscillation

어 정상단락이 순조롭게 이루어진다.

또한 순간단락이 발생하거나 아크기간이 길어져 용적이 더욱 성장하게 되면 식 (3)의 F_2 의 값이 매우 커져 용적을 더 강하게 밀어 올리게 되어 단락을 더욱 어렵게 만든다. 또한 장기아크로 인하여 용적이 커질 경우 Fig. 18의 파형과 고속영상에 보인 바와 같이 순간 단락이 발생하고, 순간적(약 1msec)으로 아크 전압을 4~5V 상승시켜 순간단락 후 아크재생 현상과 같이 아크의 방향이 불규칙하게 바뀌면서 여러 방향으로 스파터를 발생시킨다. 따라서 이러한 장기아크를 방지하기 위하여 Fig. 19에 보인 바와 같이 아크기간 중에 전압을 일정한 속도로 감소시킨다. 이로 인하여 아크 길이가 점차 감소되어 용융지와 접촉이 용이하도록 한다¹⁶⁾. 그리고 일정기간동안 단락이 발생하지 않아 장기 아크로 판단될 경우(즉 용적이 거대해지기 전에) 일정전류

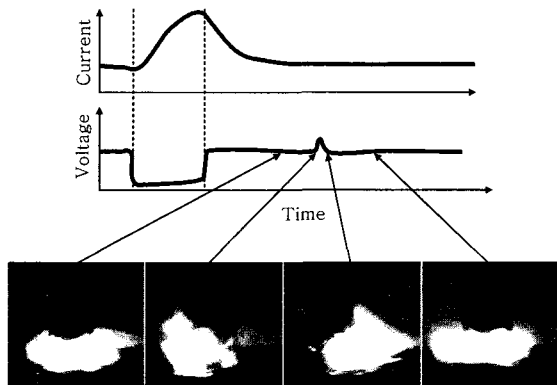


Fig. 18 Welding waveform and high speed images of spatter generation during the long arc period

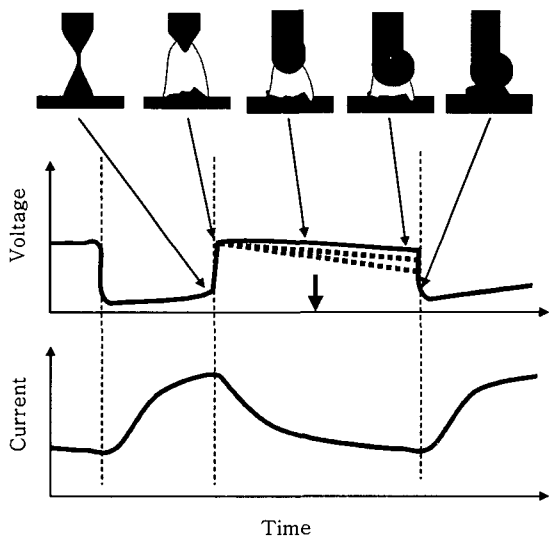


Fig. 19 Schematic illustration of short circuit induction control¹⁶⁾

로 낮추어 와이어의 용융 속도를 줄이고, 전자기력을 약화시켜 식 (6)의 조건을 만족하도록 하여 강제단락을 유도한다^{15,19)}.

3.2.2 펄스 제어(유동제어)

Fig. 20¹⁷⁾은 용융지의 유동 주파수에 따른 단락 횟수의 변화를 보여주는 것으로, 용융지의 유동 주파수 증가에 따라 단락 횟수가 증가함을 알 수 있다. 따라서 용융지의 유동 제어를 통해 용적과 접촉면적을 크게 하면($R_e/a \gg 1$) 순간단락이 억제되고 단락주기가 일정하게 된다. 용융지의 유동제어는 Fig. 21에 보인 바와 같이 단락해소 직후 전류 펄스를 일정동안 가하여 용융지를 강하게 밀어내고, 강하게 밀려난 용융지가 다시 밀려와 용적으로 솟아오르도록 하는 것이다. 즉 파도가

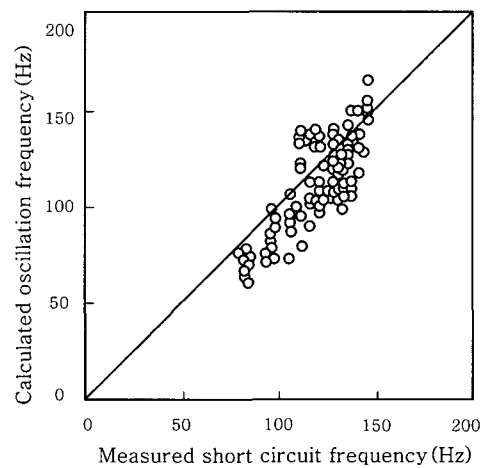


Fig. 20 The calculated oscillation frequency vs. the measured short circuit frequency for conditions of maximum process stability¹⁷⁾

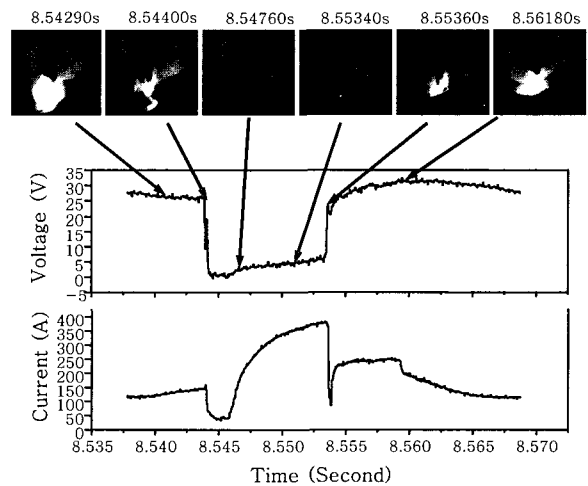


Fig. 21 Waveform and high speed images of weld pool oscillation on the current pulse control

제방에 부딪치면 위로 솟아오르는 원리와 같다.

4. 단락이행에서 전류 파형제어의 문제점

전류 파형제어는 단락이행 시 용적에 작용하는 힘을 전류로 제어함으로써 단락이행을 주기적으로 발생되도록 유도하기 위한 것으로, 현재 STT(surface tension transfer)²⁻³⁾ 및 SENSARC⁴⁾의 상표명으로 시판 중이며, 이 용접전원을 통하여 최소 0.5%까지 스패터의 저감이 가능하다. Fig. 22³⁾는 STT 용접전원의 파형제어 개념도이다. 그러나 앞서 밝힌 바와 같이 전류를 통해 능동적으로 제어할 수 있는 힘은 4가지 힘 중 전자기력에 불과하며, 용융지의 유동 및 그 외의 힘들은 외란에 의해 변화할 수 있기 때문에 완벽한 단락이행의 제어가 불가능하다. 즉 능동적으로 단락, 단락기간, 단락해소, 아크기간 등을 제어할 수 있는 것이 아니라 단락 또는 단락이 해소될 때까지 기다리는 수동적 제어이다. 따라서 전류 파형제어는 다음과 같은 한계점이 존재한다.

첫째, 무 스패터화가 불가능하다. Fig. 23은 단락 초기 전류 상승 지연 시간을 제어하여 순간단락을 제어

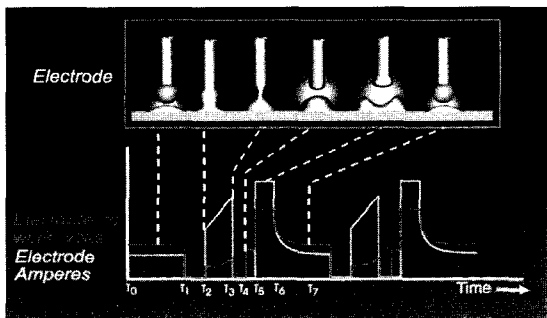


Fig. 22 A sample of welding current waveform of welding power source controlled by current waveform - STT³⁾

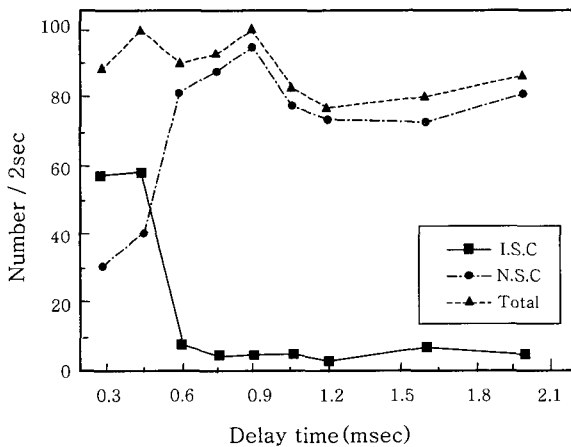


Fig. 23 Number of short circuit frequency on the delay time¹³⁾

하였음에도 불구하고 순간단락이 발생하고 있음을 보여주는 것이며¹³⁾, Fig. 24는 위의 파형제어 기능을 내장한 용접전원(inverter I ~ inverter IV)의 전류대별 스패터 발생량을 측정 한 것이다¹⁸⁾. 그림에서 보이는 바와 같이 완전한 스패터의 억제는 불가능하다.

둘째, 초 박판의 용접이 불가능하다. 용적과 용융시간에 단락이 형성되면 그 단락을 해소하고 아크를 재생하기 위하여 식 (5)의 조건을 만족하여야 한다. 그러기 위해서는 전류의 증가가 필수적이기 때문에 모재의 두께가 작아질수록 Fig. 25와 같은 용접변형 및 용락 등의 발생으로 초 박판용접에의 적용에는 한계가 있다.

5. 기계적 제어

5.1 기계적 제어의 기본 원리

무 스패터와 저입열의 박판 용접을 위해서는 단락 및

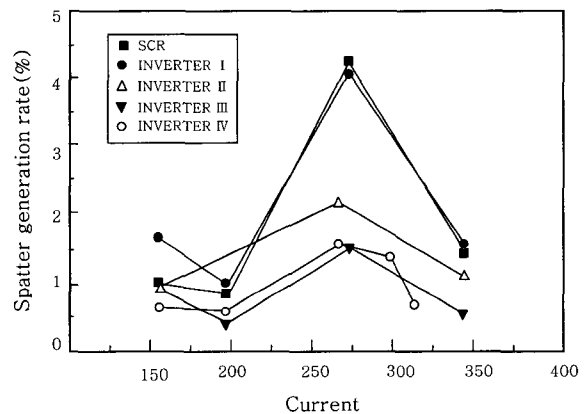


Fig. 24 Spatter generation rates of different power supplies¹⁸⁾

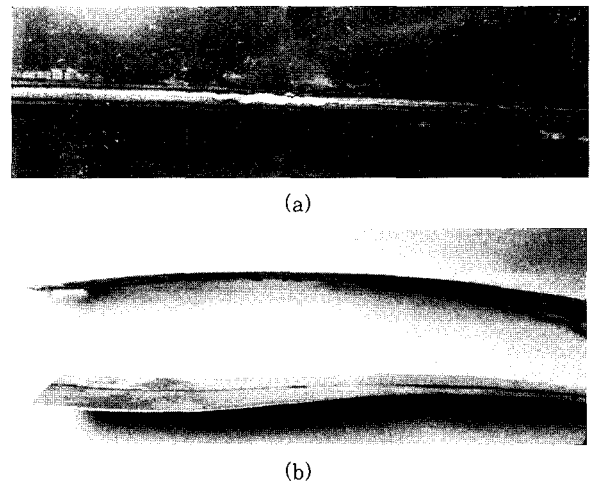


Fig. 25 Phenomena of burn through and distortion at thin plate welding

단락 해소 시 낮은 전류를 유지하여야 한다. 이를 위해서는 낮은 전류에서 외부의 힘을 통하여 강제적으로 단락 및 단락해소를 유도하면 된다. 즉 단락 시 와이어를 후진하면 0 전류에서도 단락을 해소시킬 수 있고, 아크 기간 중 와이어의 전진속도를 증가시키면 강제적으로 단락을 유도할 수 있다. 이를 와이어 진동(oscillation) 제어 또는 기계적 제어라고 한다. 결국 기계적 제어는 Fig. 1에 보인 4가지의 힘보다 매우 큰 기계적 힘, F_M (mechanical force)을 통하여 외란에 상관없이 단락 이행의 능동적 제어가 가능하다.

5.2 기계적 제어를 위한 시스템의 구성

기계적 제어를 위한 시스템은 와이어의 진동(와이어의 전·후진) 장치 및 와이어 버퍼(buffer)로 구성되어 있다. Fig. 26은 기계적 제어 시스템의 개략적인 구성을 나타내었다. 일반적으로 용적이 와이어 선단에서 분리되어 용융지로 이행하는 시간은 수 msec의 짧은 시간이기 때문에 이 시간동안 와이어의 진동을 수행할 수 있도록 고속 제어가 가능한 모터(서보 모터 혹은 스텝 모터)가 사용된다. 와이어를 전진 및 후진 할 때 평균 송급속도는 송급모터에서의 송급속도와 같지만, 와이어의 전, 후진 시 송급속도의 변화로 인하여 불협화음이 생기게 된다. 따라서 기계적 제어용 모터와 송급모터간에 와이어를 임시로 저장할 버퍼가 필요하다. 현재 상용화된 기계적 파형제어 시스템은 Fig. 27(a) Fronius 사의 CMT(cold metal transfer)⁶⁻⁷⁾ 및 Fig. 27(b) Jetline의 CSC(controlled short circuit)⁸⁾가 있다.

본 기술보고에서는 이 중 CMT 프로세스에 관하여 소개하고자 한다.

5.3 CMT 프로세스

CMT 프로세스는 0 전류로 단락해소를 한다는 의미

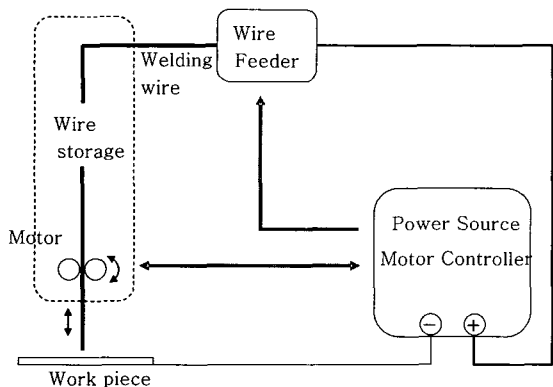
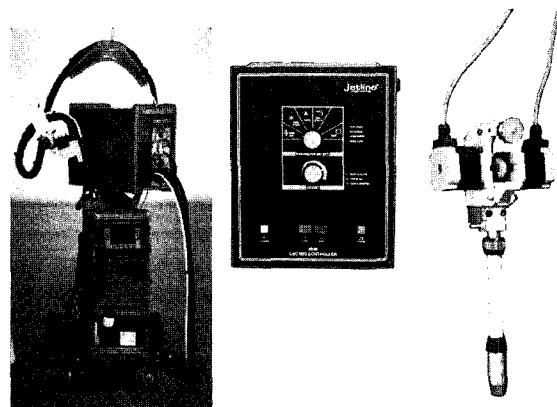


Fig. 26 Schematic illustration of mechanical control system



(a) Fronius - CMT (b) Jetline - CSC

Fig. 27 Mechanical control systems commercial used

이며, 전류 파형제어와 와이어의 진동제어를 동시에 수행한다. Fig. 28⁷⁾은 CMT 프로세스 중의 전압, 전류 파형과 와이어의 송급제어를 개략적으로 나타낸 것이다. Fig. 28의 ①에서와 같이 아크열에 의해 와이어 선단과 모재가 용융되어 용적, 용융지가 형성되면, ②와 같이 와이어는 용융지 방향으로 전진 송급된다. 단락 직전, 단락이 유지되는 동안 전류는 ③과 같이 0A에 맞추어, 단락 시 아크 반발력에 의한 순간단락의 발생을 억제하고 0A에서 단락이행이 될 수 있도록 한다. 그리고 ④에서와 같이 와이어가 모재 반대 방향으로 후진되어 강제적으로 단락을 해소시킨다. 이 때, 저전류에서 아크가 재생될 수 있으므로 아크 폭발력을 최소화할 수 있다. CMT 프로세스의 주기는 평균 63Hz, 최대 70Hz이고, 그 주기는 용접조건에 따라 다르게 제어된다. Fig. 29는 CMT 프로세스에 의해 실제 용접 시의 용접 파형과 고속영상이다. 그림에서 보듯이 스파터가 거의 발생하지 않음을 볼 수 있다.

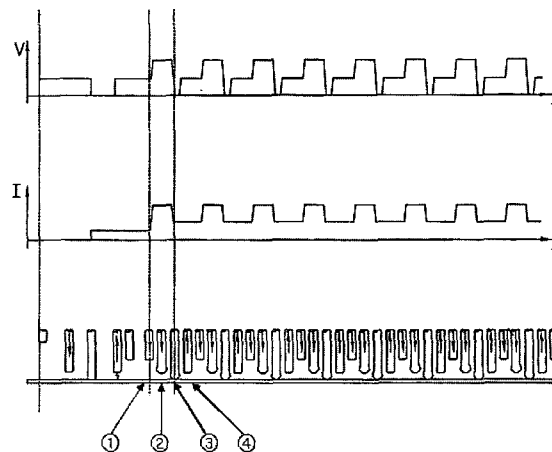


Fig. 28 A schematic illustration of welding waveform and wire feeding control of CMT process⁷⁾

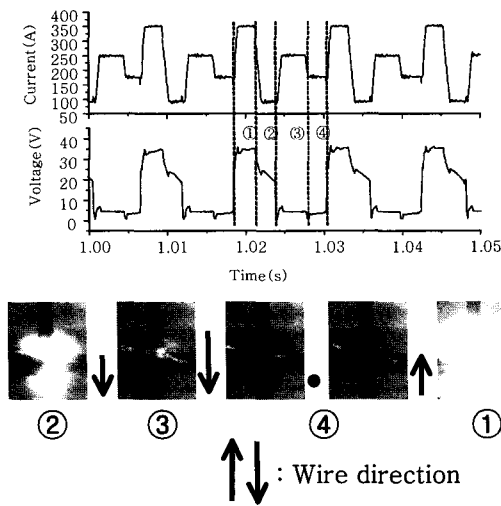


Fig. 29 Welding waveform and high speed images by CMT process

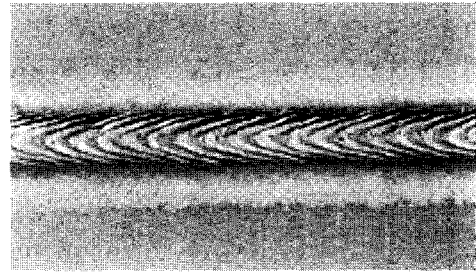
5.4 CMT 프로세스의 적용

CMT 프로세스는 기존의 GMA 용접 전원에 비하여 높은 용착 효율, 박판의 용접성, 고속 용접성, 다양한 용접 재료 간 접합 성능 등을 보이며, 이 때문에 다양한 분야에서의 적용이 가능하다.

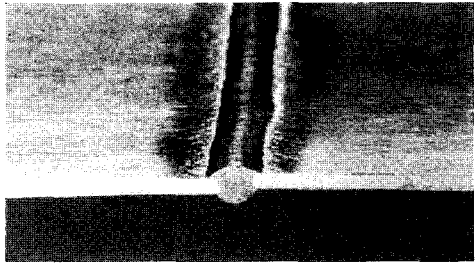
CMT 프로세스는 연강, 스테인레스 강, 알루미늄 등 다양한 용접 모재의 적용이 가능하며 앞서 언급한 바와 같이 모재에의 입열 제어를 통해 0.3mm의 초 박판까지도 용접이 가능하다. Fig. 30(a)는 용접 속도 2m/min에서 두께 1mm 알루미늄 박판의 모서리 이음(fillet) 용접 시의 비드 형상이며, Fig. 30(b)는 용접 속도 1.5m/min에서 백킹 재(backing sheet) 없이 두께 0.8mm의 알루미늄 박판을 맞대기 이음(butt) 용접 시의 비드 단면이다⁵⁾. Fig. 31은 100% CO₂ 보호가스로 용접 속도 3m/min에서 2.3mm의 연강판을 비드 온 플레이트(bead-on-plate) 용접 시 비드형상이다. 일반적으로 전류 파형제어에 의한 용접 시 순간 단락/장기 아크 및 스텐빙에 의한 장기 단락의 발생에 의해 최대 2m/min의 용접이 가능하나, CMT 프로세스의 적용 시 외란에 상관없이 용접이 이행되므로 Fig. 31과 같이 양호한 고속 용접이 가능하다.

5. 결 론

산업기계 및 가전제품에서의 경량화, 특히 수송기기의 경량화는 대체 연료의 개발과 더불어 고유가 시대에 맞서기 위한 당면 과제이다. 제품의 경량화를 위해서는 부품(판재)의 두께를 줄이거나, 제품이 요구하는 성능을 가지는 경량소재를 개발, 적용하는 것이 필요하며,



(a) Fillet weld on 1.0mm AlMg₃ sheet backing with welding speed of 2.0m/min



(b) Butt-weld, without weld-pool support, on 0.8mm AlMg₃ sheet

Fig. 30 CMT welding of Al alloy sheets⁶⁾

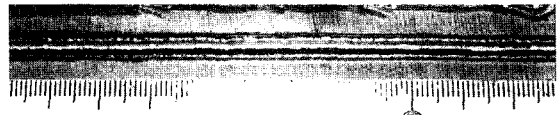


Fig. 31 High speed welding bead shape on steel by CMT process at welding speed of 3m/min using the 100% CO₂

이에 따라 약 0.3mm에 이르는 초 박판의 고강도 강, 스테인레스 강의 용접 및 알루미늄, 마그네슘 합금등과 같은 경량 소재의 용접이 점차적으로 늘어나고 있는 추세이다. 이와 같은 소재에 적용하여 용접자동화, 또는 박판 용접 시 생산성 향상의 효과를 극대화하기 위해서는 첫째, 용접전원 장치의 자동화 적용성이 높아야 하며, 둘째, 용접 후 스파터의 제거, 용접 결함의 보수와 같은 2차적인 공정이 발생되지 않아야 하고, 셋째, 고속용접을 가능하게 하여 생산성 향상을 통한 자동화 설비의 투자비용을 절감시킬 수 있고, 넷째, 용접 시 입열량을 작게 하여 용락의 발생과 용접 변형을 최소화할 수 있는 용접전원 장치가 요구된다. 하지만 이 같은 용접 산업에서의 요구에 부합하는 적절한 기능을 가진 용접전원이 장치가 필요한 시점에 새로운 제어 방식을 적용한 기계적 제어 시스템의 등장은 기존의 전류 파형제어의 단점을 극복한 획기적인 일이 아닐 수 없다. 해외에서는 이미 기계적 제어에 관한 연구가 다양하게 진행되고 있으나, 국내에서는 아직 이에 대한 연구가 이루어 지지 않고 있다. 따라서 본 기

술보고가 계기가 되어 국내의 기계적 제어에 관한 연구가 활발하게 이루어지길 바란다.

후 기

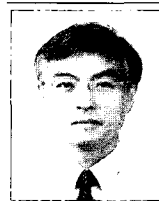
본 연구는 07년 한국생산기술연구원 생산기술연구사업의 주요목적사업으로 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. I. S. Pinchuk, et al. : Stablization of transfer and methods of reducing the spattering of metal in CO₂ welding with a short arc, *Welding Production*, **27-6** (1980), 9-14
2. E. K. Stava : The surface tension transfer power source, new, low-spatter arc welding machine, *Welding Journal*, **72-1**(1993), 25
3. Bruce D. DeRuntz : Assessing the benefits of surface tension transfer welding to industry, *Journal of Industrial Technology*, **19-4**(2003)
4. CO₂ MAG Power supply SENSARC LS350, KOBE Technical Guide, **37-330**, (1997), 8 (in Japanese)
5. Lebedev V. A. and Nikitenko V. P. : The clamps for pulsed feed of electrode wire, *Avt Svarka*, **10**(1984), 52-58
6. K Furukawa : New CMT arc welding process - welding of steel to aluminium dissimilar metals and welding of super-thin aluminium sheets, *Welding International*, **20-6**(2006), 440-445
7. Fronius International GmbH : Welding wire storage device, PCT Appl. No. AT2005000019(2005)
8. G. Huismann : Direct control of material transfer : The short-circuiting(CSC)-MIG process, *Proc. Gas Metal Arc Welding for 21st Century Conf.*, Dec. 2000, Orlando, FL, USA, 165
9. J. H. Waszink, L.H.J. Grat : Der Einflues der Sasstroemung auf die Tropfenablosung beim plasma-MIG Scheisseu, *Grosse Schweiss technische Tagung, DVS Verichte*, (1977), p.198
10. The physics of welding, IIW, ed. by J. F. Lancaster, Pergammon Press, (1984), 234-237
11. J. C. Amson : An analysis of the gas-shielded consumable metal arc welding system, *Brit. Welding J.*, **41-4**(1962), 232-249.
12. J. H. Hwang, H. S. Moon, S. J. Na and K.S. Han, A study on modeling of short-circuiting phenomena and selection of current waveform for reduction of spatter in GMAW, *Welding J. KWS*, **14**(1996), 57-63 (in Korean)
13. 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), 61-68 (in Korean)
14. H. J. Kim, Y. S. Kim : Concept of waveform control for the reduction of CO₂ welding spatter, *Welding J. KWS*, **16-3**(1998), 18-28 (in Korean)
15. T. Mita : Waveform control method in CO₂ gas shielded arc welding, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, **6-2**(1998), 209
16. DAIHEN Inc. : DP400/DP500/DM350 Digital controlled DC inverter arc welding machines, CAT. NO. A446A
17. M. J. M Hermans, G. Den Ouden : Process behavior and stability in short circuit gas metal arc welding, **78-4**(1999), p. 8
18. H. J. Kim, C. H. Lee : The Characteristics of power sources on the spatter generation rate in CO₂ arc welding process, *Journal of KWS*, **17-4**(1999), 16-21 (in Korean)
19. T. Mita : Spatter reduction-power source considerations, *Welding International*, **5-11**(1991), 847-850



- 김영삼(金永三)
- 1979년생
- 한국생산기술연구원 금속소재신뢰성 평가센터
- 용접전원 파형제어
- e-mail : ysys032@kitech.re.kr



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



- 유희수(柳會洙)
- 1965년생
- 한국생산기술연구원, 정밀접합팀
- 디지털용접전원개발, 자동제어, 집합조직
- e-mail : hsryoo@kitech.re.kr



- 오성철(吳成哲)
- 1958년생
- 한국기술교육대학교 정보기술공학부 부교수
- 전동차용 전력변환장치 개발, 자기부상 열차, 전기자동차, Power Supply 개발, 회로 Simulation
- e-mail : scoh@kut.ac.kr