

CO₂ 가스 용접에서 금속 이행의 특성Characteristics of Metal Transfer of GMAW shielded by CO₂ gas

최재호 · 김용석 · 김희진

J. H. Choi, Y. S. Kim and H. J. Kim



최재호/홍익대학교/
1971년생/알루미늄용
합금 용접



김용석/홍익대학교/
1957년생/GMAW 및
HF ERW 공정 해석



김희진/한국생산기
술연구원/1953년생/
용접재료개발 및 용
접 파형 연구

1. 서 론

GMAW에서 소모성 전극인 용접봉이 용융되어, 용융지로 이행되는 현상은 GMAW 용접부의 품질 및 공정의 생산성에 매우 중요한 영향을 미치기 때문에 많은 연구자들에 의하여 오랫동안 연구되어 왔다¹⁻⁹⁾. 특히 CO₂ 가스를 보호가스로 사용하는 GMAW법은 생산성이 높고, 침입 깊이가 깊으며, 아르곤과 같은 불활성 기체에 비하여 가격이 저렴하기 때문에 산업 현장에서 탄소강 구조물을 용접하는데 많이 사용되어왔다. 그러나 이 방법의 가장 큰 문제점은 용접시 발생하는 스파터이다. 이러한 스파터의 발생은 근본적으로 용융된 금속이 용접봉으로부터 이행되는 현상과 관련되어 있기 때문에, 스파터의 발생을 억제하기 위해서는 금속 이행 현상에 대한 이해가 필수적이라 하겠다.

GMAW에서 금속 이행은 크게 3가지 형태로 대별된다. 즉 단락 이행(short circuiting transfer), 입상 이행(globular transfer), 스프레이 이행(spray transfer) 등이다. 스프레이 이행은 다시 프로젝티드 이행(projected transfer), 스트리밍 이행(streaming transfer), 회전 이행(rotating transfer) 등으로 세분되

고 있다. 이들 금속 이행을 모식적으로 나타내면 Fig. 1과 같다. 이와 같은 금속 이행과정은 주로 용접 전류 및 전압, 보호 가스의 종류, 용접봉의 재질 및 지름 등에 의하여 결정된다¹⁰⁾. 아르곤 가스를 보호가스로 사용하는 경우, 용접 전압과 용접 전류가 금속의 이행 모드에 미치는 영향을 Fig. 2에 나타내

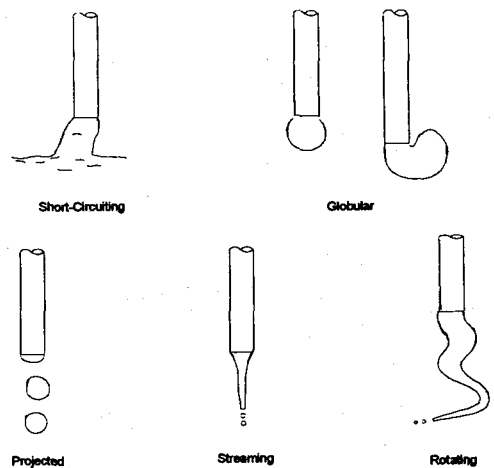


Fig. 1 금속 이행의 모식도.

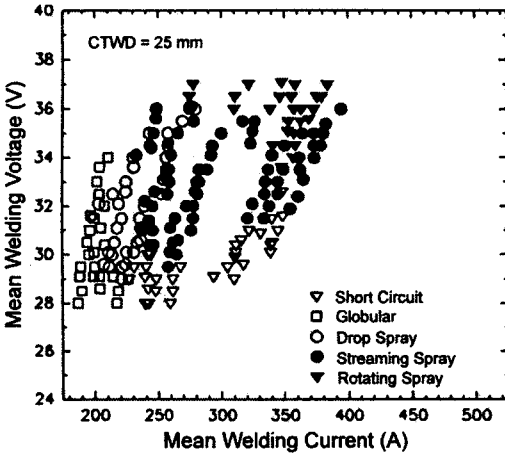


Fig. 2 용접 전압 및 전류에 따른 금속 이행 모드.

었다¹¹⁾. 그림에서 보면, 용접 전류가 일정한 조건에서 전압이 증가함에 따라서 단락 이행 모드에서 스프레이 모드로 천이 하는 것을 볼 수 있다. 또한 일정한 전압에서 용접 전류가 증가함에 따라서 입상 이행, 프로젝티드 이행, 스트리밍 이행 및 회전 이행으로 모드가 변화하는 것을 볼 수 있다.

이와 같이 금속 액적이 용접봉으로부터 탈착되는 현상은 크게 두 가지의 관점에서 이론적으로 설명되어왔다. 첫번째 이론은 정적 힘 균형 이론 (static force balance theory) 으로서, 액적을 탈착시키려는 힘이 액적을 용접봉에 부착시키려는 힘보다 클 때 금속 액적이 용접봉으로부터 탈착된다는 것이다³⁾. 금속 액적을 용접봉에 부착시키려는 힘은 표면 장력이다. 액적의 표면 장력은 액적이 용접봉으로부터 탈착되는 것을 방해하는 힘으로 작용한다. 이에 비하여 액적을 용접봉으로부터 이탈시키려는 힘은 세 가지가 주로 작용한다. 용적 자체의 중력, 용적 주위를 흐르고 있는 플라스마 및 보호 가스의 drag 힘, 마지막으로 전자기력이다. 용적 내에 작용하는 전자기력은 Fig. 3-a와 같이 나타낼 수 있는데¹²⁾, 용적내의 전류 밀도의 분포 특성에 따라서 이들이 용적을 이탈시키려는 힘 또는 용적을 용접봉에 부착시키는 부력으로 작용하게 된다. 이와 같은 전자기력은 용접 전류의 제곱에 비례한다. 따라서 용접 전류가 증가하면, 이 전자기력이 급격히 증가하게되어, 액적의 크기가 작아도 용접봉으로부터 이행된다. 한편 최근에는

이와 같은 이탈력 이외에도 액적내에 전자기력의 원주방향 성분에 의하여 유발되는 액체의 유동에 의한 운동 에너지도 이탈력의 중요한 요소인 것으로 논의되고 있다.

금속 액적의 이행과정을 이론적으로 설명하는 다른 하나의 모델은 pinch instability이론이다⁵⁾. 이것은 액상의 원기둥 형상이 구형 형상에 비하여 표면에너지가 상대적으로 높아, 액상 원기둥이 특정한 파장 이상의 기계적인 외란을 받음시 파단되어 표면 에너지가 낮은 상태의 구형으로 변화한다는 이론에 근거한 것이다. 이때 원기둥에서 구형으로 변화하는 속도 및 파장이 전자기장에 의한 radial pinch force에 의하여 촉진되는데, 이것을 이용하여 용접 전류가 증가함에 따라서 이행 액적의 직경이 감소하는 현상을 설명하고 있다. 이와 같은 이론은 스트리밍 이행 및 회전 이행 과정을 설명하는데 사용되고 있다.

CO₂ 용접의 보호가스로 사용되는 CO₂가스는 또한 금속 이행에 영향을 미치게된다. 현재 주로 사용되는 보호가스의 이온화에너지를 표1에 나타내었다¹³⁾. 여기서 헬륨은 이온화에너지가 가장 크기 때문에, 일정 온도에서 아크내의 해리된 이온 및 전자의 농도가 낮게된다. 따라서 아크의 전기 저항이 높게되어 아크의 길이가 짧게된다. 이러한 특성을 가진 아크는 금속 액적의 하부에 아크가 집중되는 경향을 보이게 된다. 이에 따라서 액적과 기지 사이에서 높은 온도의 아크가 형성되어, 이들이 부력으로 작용하기도하고, 전류의 흐름이 집중되는 경향을 보이게되어 (Fig. 3-b) 전자기력이 용적을 위로 들리게 하는 방향으로 작용하게 된다. 따라서 액적은 repelled 이행을 하게된다.

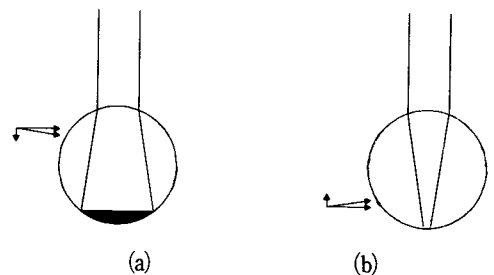
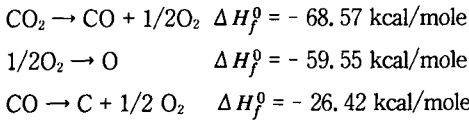


Fig. 3 용적내의 전류밀도의 변화에 따른 전자기력의 변화. (a) 이행시키려는 힘으로 작용, (b) 부력으로 작용

Table 1. 보호가스의 이온화 전위.

가스	이온화전위 (eV)
아르곤	15.76
헬륨	24.59
CO ₂	13.77

CO₂ 가스의 이온화에너지는 아르곤과 유사하다. 그러나 이 가스의 경우, 아크 내에서 온도가 상승하게되면 분자 또는 원자 형태로 해리의 과정을 거치게된다. 이중 대표적인 해리 반응은 아래의 식과 같다¹⁴⁾.



이러한 해리 과정은 반응열이 상당히 큰 흡열 반응이기 때문에 아크의 온도를 효과적으로 낮추는 역할을 하게된다. 즉 주어진 입열량에 대하여 CO₂에 의하여 형성된 아크의 온도는 아르곤 가스의 경우와 비교하여 낮게된다. 이러한 효과는 헬륨의 경우와 마찬가지로 아크내의 이온 및 전자의 농도를 낮추어, 아크의 길이가 짧게 나타나게 된다. Photo. 1은 보호가스의 종류에 따라서 나타나는 아크의 특성을 나타낸 것이다. 아르곤을 보호 가스로 사용하였을 경우에는 아크가 균일하게 분포하고 있고, 액적이 아크에 의하여 둘러싸여 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 앞에서 언급하였듯이, 아르곤의 이온화 에너지가 낮기 때문에 나타나는 특성이다. 이에 비하여 헬륨이나 CO₂가 보호가스로 사용된 경우에는, 아크가 용적의 하부에 집중

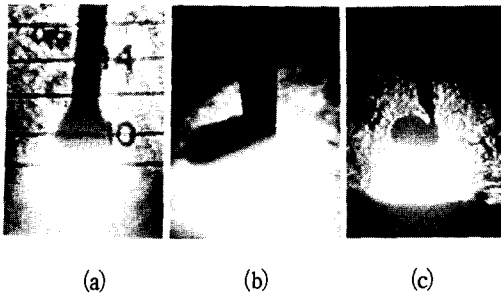


Photo. 1 보호가스의 종류에 따른 용접 아크의 특성 (a) 아르곤, (b) 헬륨, (c) CO₂

되는 것을 볼 수 있다.

이와 같은 CO₂ 가스의 특성 때문에, CO₂ 용접시의 금속 이행은 아르곤을 보호가스로 사용한 경우와 매우 상이하게 나타난다. 본 기술 해설에서는 이러한 금속 이행 과정을 관찰하는 수단과 이를 이용하여 관찰된 현상을 소개하게 될 것이다.

2. 금속 이행 과정의 실험적인 관찰법

2.1 Laser Back Lightening Method

용접봉으로부터 용융된 액적이 이행하는 현상을 가시화하기 위해서 가장 많이 사용되는 방법의 하나가 Laser Back Lightening (LBL) 법이다. 이 방법은 Allemando¹⁵⁾이 레이저를 이용하여 액적의 그림자를 형성시켜 관찰하는 방법으로 개발한 것으로, 이를 모식적으로 나타내면 Fig. 4와 같다. 레이저는 He-Ne 레이저로서, 출력은 0.5~2mW범위의 것이 주로 사용된다. 레이저는 빔의 출구측에 beam expander를 장착하여 직경이 25mm정도의 평행광으로 변화시킨다. 용접 아크를 통과한 레이저빔은 field 렌즈에 의하여 집중되게 되는데, 이때 아크광도 일부 집중된다. 레이저 빔은 평행광이기 때문에, 레이저빔의 거의 대부분이 field 렌즈의 초점에 집중되게된다. 이에 비하여 아크광은 평행광의 성분이 매우 적기 때문에 field 렌즈의 초점에 집중되는 분율이 매우 적게된다. 이때 field 렌즈의 초점에 0.5~2mm정도의 aperture를 설치하게되면, 초점에 집중된 빛들만이 통과되어 다음 렌즈들에 의하여 상을 형성하게 된다. 이때 aperture의 크기가 증가하게 되면, field 렌즈의 초점에 정확하게 집중되지 않았던 아크광의 통과량이 증가하게 되고, 이에 따라서 그림자 상에 아크광의 강도가 증가하게된다. 그러나 aperture의 크기가 감소하게 되면, 레이저광의 회절현상에 의하여 물결무늬가 증가하게되고, 상의 선명도도 떨어지게 된다.

이렇게 얻어진 상은 inverting 렌즈를 통하여 정립상을 얻고, 최종 렌즈를 통하여 적절한 배율의 상

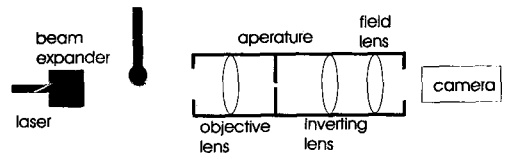


Fig. 4 Laser Back Lightening법의 모식도.

을 얻게된다. 이렇게 얻어진 상은 비디오 카메라, 고속 비디오 카메라, 고속 필름 카메라등을 이용하여 촬영 분석하게된다. Photo. 2는 LBL법에서 비디오 카메라를 이용하여 촬영한 금속 이행 과정을 나타낸 것으로, 적절한 아크광과 액적의 상을 동시에 관찰할 수 있음을 보여주고 있다. 이때 아크광은 주요 전류 이동 경로를 나타내는 것으로, 액적의 전자기력 특성에 중요한 정보를 제공할 수 있다.



Photo. 2 금속 이행 과정

2.2. 직접 조명법

본 방법은 앞절의 방법과는 달리, 아크 광원보다 강력한 외부 광원으로 액적을 조명하여, 반사광에 의하여 얻어지는 상을 촬영하여 금속 액적의 이행 과정을 관찰하는 방법이다. 본 방법을 모식적으로 나타내면 Fig. 5와 같다. 아크광이 매우 강력하기 때문에, 조명용 광원의 출력이 높아야 한다. 따라서 광원으로서 출력이 높은 제논 램프등이 많이 사용된다. 이 방법은 LBL법이 액적의 그림자를 관찰

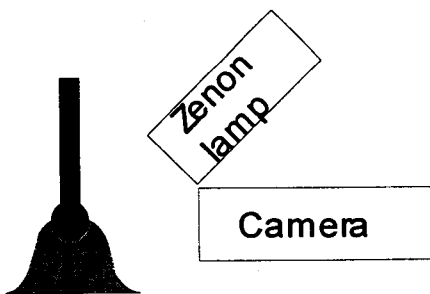


Fig. 5 제논 램프를 이용한 금속 이행의 관찰법. 하는데 비하여, 액적 형상을 직접 관찰하기 때문에

액적 형상의 미세한 변화도 관찰할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 본 방법은 조명 장비의 가격이 비싸고, 운영비용이 고가인 단점이 있다. 또한 아크 광보다 강력한 조명을 사용하기 때문에, 카메라에 진입되는 광량이 매우 높게되므로 적절한 필름의 노출을 얻기 위해서는 neutral density 필터 등을 사용하여야 하는 번거로움이 있다.

3. CO₂ 용접에서 전류에 따른 금속 이행 특성

앞절에서도 언급하였듯이, CO₂ 용접에서는 CO₂ 가스의 특성 때문에 특이한 금속 이행 거동을 나타낸다. Fig. 6은 CO₂ 용접에서 용접 전류에 따른 금속 이행 모드의 변화를 나타낸 것이다. 이때 용접봉은 직경 1.2mm급 CO₂ 용접용 와이어로서, AWS ER70-G규격의 제품이 사용되었다. 용접기는 350A급 SCR 제어형이 사용되었다. 그림에서 보면 용접 전류가 낮고 용접 전압이 낮은 조건에서는 단락 이행모드가 주로 발생하는 것을 볼 수 있고, 용접 전류가 증가하고, 용접 전압이 증가함에 따라서 천이 모드, 입상 모드로 변화하는 것을 볼 수 있다. 이러한 금속 액적의 이행 모드의 변화에 따라서 용접부의 특성 및 스패터의 발생 정도가 영향을 받게되는데, 이들 금속 이행 과정을 살펴보기로 한다.

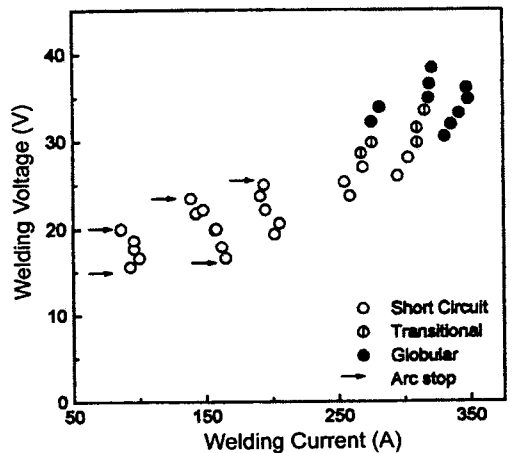


Fig. 6 CO₂ 용접에서 용접 전류에 따른 금속 이행 모드의 변화.

3. 1. 단락 이행

단락 이행은 용접 와이어의 송급 속도가 용접 와이어의 용융 속도보다 높게될 때 나타나는 현상인데, 용접 전류가 낮고, 용접 전압이 낮을 때 주로 관찰되는 이행 현상이다. Photo. 3은 단락 이행이 발생하는 과정을 순차적으로 보여주는 그림이다. 먼저 용접 와이어의 끝단에 용융된 액적이 매달려 있고, 기지 금속에 접근한다(Photo. 3-a). 이때 액적은 repelling 힘에 의하여 위로 약간 들리게된다. 용접봉이 지속적으로 접근됨에 따라서, 아크가 소멸되고 액적이 용융지의 표면과 접촉하게된다(Photo. 3-b). 접촉되어 단락을 형성한 액적에 작용하는 표면 장력, 중력 및 전자기력에 의하여, 용융 금속은 용융지 쪽으로 흘러 들어가게 되면서, 그의 직경이 빠른 속도로 줄어들게 된다(Photo. 3-c). 이때 직경이 줄어드는 속도는 용접 전류가 증가함에 따라 더욱 증가하게된다. 액상의 단락이 열리게되면, 높은 전류에 의하여 아크가 재 점화되어(Photo. 3-d) 단락 이행 과정의 한 사이클을

종료한다.

Photo. 3은 단락 이행의 전형적인 진행 과정을 보여주고 있으나, 실제 작업 조건에서는 단락 이행 과정이 매우 불규칙적으로 발생하고, 이 과정에서 많은 스패터를 발생시키게된다. Photo. 4는 이와 같은 단락 이행 과정에서 발생하는 불규칙적인 이행과정을 보여주고 있다. 먼저 Photo. 4-a는 금속 액적이 기지로 접근함에 따라서 액적이 위로 반발되어, Photo. 4-b와 같이 스패터를 발생시키게된다. 단락이 형성되어 있는 상태에서는 용접 와이어에 인가되는 전류가 증가하고, 단락이 개방되는 순간에 폭발적인 단락 개방이 Photo. 4-c와 같이 발생하게된다. 직경이 작은 단락을 통하여 매우 높은 전류 밀도가 흐르게되면, 저항열에 의하여 가열된 금속이 기화되어 폭발하거나, kink 또는 flute모드 pinch instability가 발생하여 스패터의 원인이 된다. Photo. 4-d는 kink 모드 pinch instability가 발생하는 현상을 보여주고 있는데, 대개의 경우 용접 와이어에 흐르는 전류밀도가 매우 높거나, 단락이 형성되어 있는 시간이 장시간일

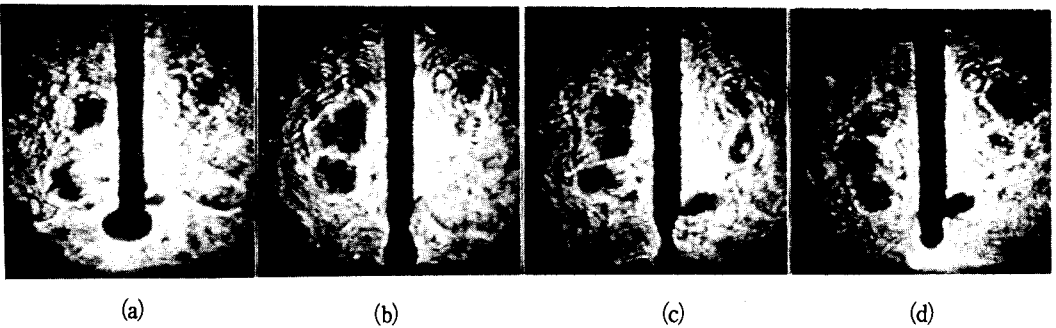


Photo. 3 단락 이행 과정

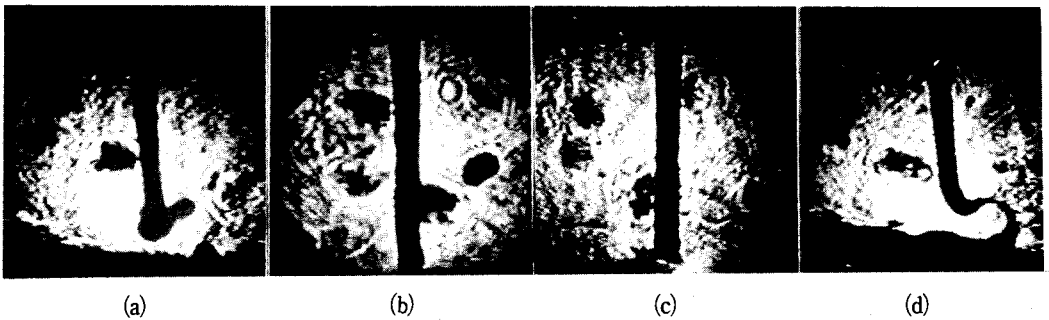


Photo. 4 단락 이행 과정에서 스패터의 발생 과정

때 주로 관찰되는 현상이다.

단락 이행 과정을 이와 같이 가시화 장치를 이용하여 평가하는 방법 이외에, 전류-전압 곡선을 이용하여 간접적으로 평가하는 방법이 사용되기도 한다. 단락 이행과정에서 전류-전압의 관계를 나타내면 Fig. 7과 같다. 즉 점 A는 정상적인 아크가 형성되어 있는 상태이고, 용접봉이 용융지로 접근함에 따라서 선분 AB를 따라서 이동하게 된다. 아크가 소멸되고, 용접봉과 용융지 간에 접촉하면, 저항이 감소하여 전류가 선분 BC를 따라서 급속하게 증가한다. 다음으로 단락이 개방되면 아크가 재 점화되고, 이에 따라서 전압이 선분 CD를 따라서 급속하게 증가한다. 마지막으로 아크가 안정화되고, 아크의 저항이 크기 때문에 전류가 DA를 따라서 감소하게되어 하나의 사이클을 완료하게 된다. 이 전류-전압 사각형이 동일 궤적을 따라서 이동하면, 이는 단락 이행과정이 동일한 이행 과정을 거쳐서 규칙적으로 발생하는 것을 나타내게 될 것이다. 따라서 이와같은 커브는 용접기의 특성, 용접 변수의 안정성을 평가하는데 사용하는 것이 가능하다. Fig. 8은 실제 CO₂ 용접에서 단락 이행 과정의 전류-전압 커브를 나타낸 것이다. 그림에서 보면, 전류-전압 사각형의 크기가 각 사이클마다 변화하는 것을 볼 수 있다. 즉 앞절에서 언급한 바와 같이 금속 액적의 용융지 접촉 과정이 매우 불규칙한 것을 볼 수 있다.

3.2. 입상 이행

Fig. 9는 지름이 1.6mm인 용접봉을 사용하였을 때, 용접 전류에 따른 금속 액적의 크기를 LBL법

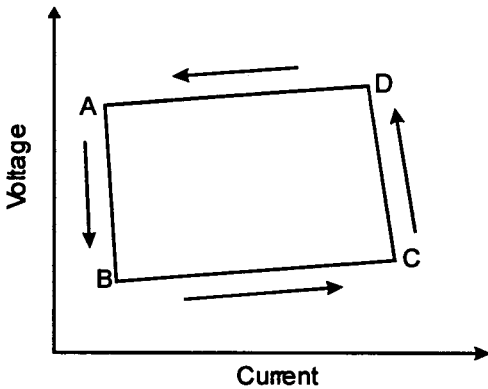


Fig. 7 단락 이행 과정의 전류-전압 커브의 모식도.

으로 관찰하여 측정된 결과이다. CO₂ 용접에서 용접 전류를 200A에서 400A까지 변화시킬 때, 액적

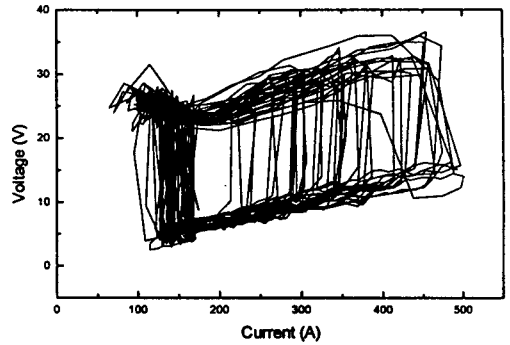
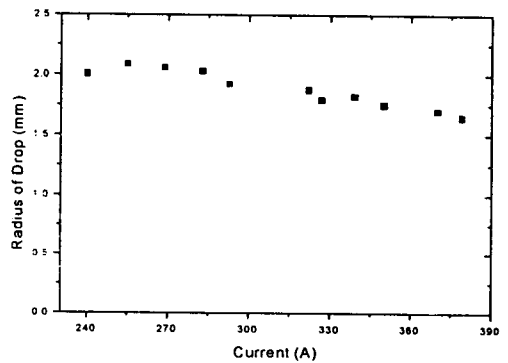
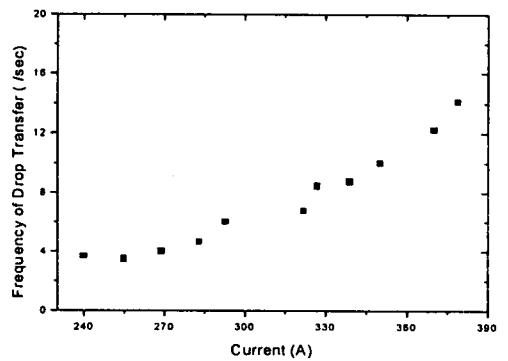


Fig. 8 실제 CO₂ 용접에서 단락 이행 과정의 전류-전압 커브.



(a)



(b)

Fig. 9 CO₂ 용접에서 용접 전류에 따른 금속 액적의 크기. (a)와 액적의 이행 빈도. (b)

크기가 용접봉의 약 2.5배 정도에서 2배 정도까지 변화하는 입상 이행을 하는 것을 볼 수 있다. 아르곤을 보호가스로 사용하였을 경우, 250A부근에서 입상 이행에서 스프레이 이행으로 변화하여 액적의 크기가 급속하게 감소한다. 이와 같이 CO₂ 용접에서 용접 전류가 증가하여도 입상 이행 모드를 계속 유지하는 이유는 Fig. 3과 Photo. 1의 현상으로부터 이해하는 것이 가능하다. 즉 CO₂ 용접에서는 전류의 경로가 액적의 하단부에 집중되어 아크 압력 및 전자기력이 용적을 용접봉으로부터 이탈시키려는 힘으로 작용하기보다는 부력으로 작용하게 된다. Photo. 5는 아크가 완전하게 제거된 금속 액적의 상을 보여주고 있다. 액적의 하부가 음의 곡률을 가지는 것을 볼 수 있는데, 이것은 액적에 부력



Photo. 5 CO₂ 용접에서 액적이 repelling되는 현상

이 작용하는 것을 보여주는 증거라 하겠다.

CO₂ 용접시 액적을 이탈시키는 힘으로 중력과 플라스마 가스의 drag 힘만이 작용하고, 아크의 부력과 전자기력이 표면 장력과 같이 액적을 용접봉에 부착시키려는 힘으로 작용하기 때문에 이탈되는 액적은 용융지를 향하여 이탈되기보다는 부착력과 이탈력의 힘의 상호 작용에 따라 불규칙한 방향으로 이탈된다. 이에 따라서 용접 비드의 형상이 불규칙하게 되고, 스패터의 발생량이 증가하는 것이다. Fig. 10은 이러한 금속 이행 현상을 모식적으로 나타낸 그림인데, 이와 같은 경우에는 액적이 회전하게 되면서, 용융지 밖으로 떨어져나가 스패터를 형성하게 된다. Photo. 6은 이와 같은 액적 이행 현상을 보여주는 것이다.

한편 액적이 용접봉으로부터 이탈되어 용융지로 이동하는 동안, 용접봉-액적-용융지 간에 액적을 매

개로 아크가 발생하기도 한다. 즉 액적의 전기 전도도가 높기 때문에 용접 아크를 통한 전류의 흐름보다도 액적을 매개로 전류 통로가 형성되는 경우가 있다. Photo. 7은 이와 같은 현상을 나타내는 것으로, 용접봉과 액적간의 아크 팽창력이 액적을 정상 패드로부터 벗어나게 하여 스패터로 발생시키게 한다. 또한 크기가 큰 액적이 용융지와 충돌하면,

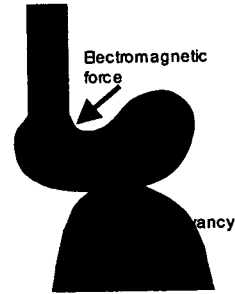


Fig. 10 CO₂ 용접에서 입상 이행의 모식도.

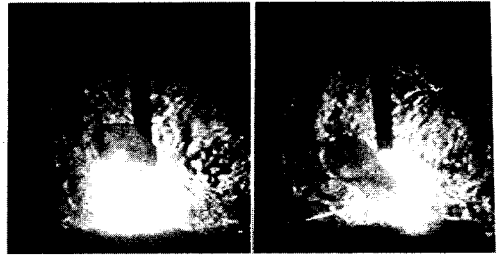


Photo. 6 CO₂ 용접에서 실제 입상 이행 과정



Photo. 7 CO₂ 용접에서 용접봉-액적-용융지간의 아크 현상

Photo. 8과 같이 용융지에 격렬한 요동을 유발하게 되어 스파터의 발생 원인으로 작용하기도 한다.

3.3. 천이 이행 모드

Fig. 6에 나타내었듯이 CO₂ 용접에서 단락 이행과 입상 이행과 중간 모드로 천이 이행 모드가 있다. 이 모드에서는 단락 이행 모드와 입상 이행 모드가 혼합되어 나타나는 전류, 전압의 구간이 존재하는 특징을 가진다. 이 모드는 금속 이행 모드가 혼합되어 있다는 특징 이외에 스파터의 발생량이 가장 많이 발생하는 이행 모드이다(Photo. 9). 이때 발생하는 스파터는 단락 이행시 발생하는 것과 입상 이행에서 발생하는 스파터의 특성을 혼합하여 가지게되는데, 스파터의 발생량이 가장 많이 발생하는 원인에 대해서는 구체적인 이유가 규명되지 않은 상태이다.



Photo. 8 용융지의 요동에 의한 스파터 발생

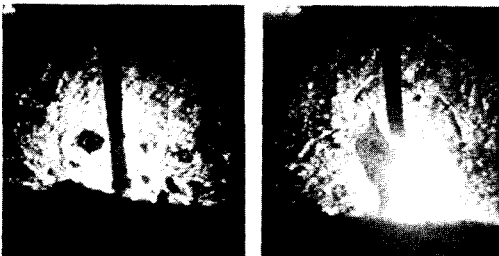


Photo. 9 천이 이행 모드에서의 스파터 발생. (a) 단락 이행시의 스파터 발생, (b) 입상 이행에서의 스파터 발생

4. 맺음 말

철강의 용접에서 가장 중요한 용접법 중의 하나인 CO₂ 용접에 있어서, 금속 이행 특성을 이해하는 것은 용접부의 특성 및 공정의 생산성을 향상시키는 데 있어서 기본적인 과제이다. CO₂ 용접의 특성을 좌우하는 것중 가장 큰 요인은 CO₂ 보호가스의 특성이다. CO₂ 보호가스는 이온화 에너지가 아르곤 가스와 유사한 값을 가지나, 아크 내에서 가열됨에 따라 원자 또는 분자상태로 분해되면서 분해열을 흡수하게된다. 이에 따라서 아크 갭이 작고, 아크가 액적의 하단에 집중되는 특성을 보이게 된다. 결국 전자기력이 액적을 이탈시키는 힘으로서 효과적인 작용을 하지 못하게되고, 이에 따라서 입상 이행을 유발시켜 스파터의 발생을 촉진시키게 된다. 또한 아크갭이 작음에 따라서 단락 이행이 저 전류, 저 전압에서 쉽게 발생하고, 이 역시 스파터의 발생을 촉진하게된다. 저 스파터 CO₂ 용접기를 개발하기 위해서는 이와 같은 스파터의 발생 기구를 고려하여 설계하여야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. A. Lesnewich : Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal-Arc Welding, Part II-Control of Metal Transfer, Welding J., Vol. 37, No. 9(1958), pp418s-425s.
2. J. C. Amson : An Analysis of the Gas-Shielded Consumable Metal Arc Welding System, British Weld. J., Vol. 41, No. 1(1962), pp232-249.
3. W. J. Greene : An Analysis of Transfer in Gas-Shielded Welding Arc, Trans. AIEE part 2, No. 7(1960), pp194-203.
4. J. H. Gratt and L. H. J. Graat : Experimental Investigation of the Forces Acting on a Drop of Weld Metal, Welding J., Vol. 62, No. 4(1983), pp109s-116s.
5. C. J. Allum : Metal Transfer in arc welding as a varicose stability : I. Varicose instability

- in a current-carrying liquid cylinder with surface charge, *J. Phys. D: Appl. Phys.* Vol 18(1985), pp1431-1446.
6. Y.S. Kim and T.W. Eagar : Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding, *Welding J.*, Vol. 72, No. 7(1993), pp169s-178s.
 7. S.K. Choi, C.D. Yoo and Y.S. Kim : Dynamic Simulation of Metal Transfer in GMAW, Part 1 : Globular and Spray Transfer Mode, *Welding J.*, Vol. 77, No. 1(1998), pp38s-44s.
 8. S.K. Choi, C.D. Yoo and Y.S. Kim : Dynamic Simulation of Metal Transfer in GMAW, Part 2 : Short-circuit Transfer Mode, *Welding J.*, Vol. 77, No. 1(1998), pp45s-51s.
 9. S. Liu and T.A. Siewert : Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding, *Welding J.*, Vol. 68, No. 2(1989), pp52s-58s.
 10. C.J. Cooksey and D.R. Milner : Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding, *Proceed Physics of the Welding Arc*, The Institute of Welding, London, UK, (1989), pp123-132
 11. P.R. Heald, R.B. Madigan, T.Á. Siewert and S. Liu : Mapping the Droplet Transfer Modes for an ER 100S01 GMAW Electrode, *Welding J.*, Vol. 73, No. 2(1994), pp38s-44s.
 12. *The Physics of Welding*, J.F. Lancaster editor, Pergamon Press(1986), p55.
 13. *Welding Handbook Vol. 1* 8th edition, AWS, (1987), p60.
 14. O. Kubaschewski, *Metallurgical Thermo-Chemistry*, 5th edition, (1979), p274.
 15. C.D. Allemand, R. Schoeder, D.E. Ries, and T.W. Eagar : A Method of Filming Metal Transfer in Welding Arc, *Welding J.*, Vol. 64, No. 1(1985), pp45-47.