

解 說

大韓熔接學會誌
第10卷 第1號 1992年 3月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol. 10. No. 1, Mar., 1992

아크 용접에 있어서의 아크의 특성과 응용

이 세 현*

Arc Characteristic and Application of the Arc Welding

S. H. Rhee*

1. 서 론

최근 인건비의 급격한 상승과 용접 숙련공의 절대 부족 현상은 용접에 있어서 자동화를 절실히 요구하게 되었다. 용접 자동화에 가장 많이 이용되고 있는 용접방법으로 크게 아크 용접과 스폿용접으로 대별할 수 있는데 이는 작동이 간단하고 가격이 저렴하여 대량 생산이 가능하기 때문이다.

아크 용접은 아크를 열원으로 사용하는 용접법으로 아크 온도는 지구상에 존재하는 모든 금속을 용융 시키기에 충분하지만 아크의 독특하고 복잡한 성질 때문에 오랫동안 연구가 되어 왔다. 용접자동화, 특히 무인용접 자동화설계를 위해서는 아크의 물리적 현상에 대한 특성해석을 하여야 하며, 후관용접에 주로 이용되는 GMAW에서는 금속이행 현상을 중점 연구함으로써 아크안정성 및 양질의 비이드 형상을 생성할 수 있다. 따라서 기본적인 아크의 전기적 특성을 알고, 용접 가공시 아크의 온도, Arc force 등의 기계적 성질을 이해하는 것이 필요하다.

2. 아크의 전기적 특성

아크란 두개의 전극(아노드, 케소드) 사이에 존재하는 기체가 전압 강하에 의하여 전기적으로 방전

되어 있어서 전류가 흐르는 것을 나타내며, 여기에서 나오는 열에너지에 의하여 금속을 용융시키는 것을 아크 용접이라 한다. 따라서 전기에너지를 열에너지로 바꾸는 기체 전도체로 생각할 수 있다. 때때로 아크는 빛원(Light source) 혹은 Radiation energy로도 이용이 가능하다. 케소드와 아노드 사이에 존재하는 기체는 전기적으로 전도되기에 충분한 온도를 유지하며, 분자들은 아크 내에서 전체적으로 혹은 부분적으로 해리가 되고, 원자들은 다시 이온화가 된다. 아크기둥에는 이온화 혹은 해리된 원자들과 금속의 Vapor가 존재하며, 전기적으로 중성을 나타낸다. 즉 일정한 부피내의 전자수와 양이온의 수가 같이 존재하게 된다. 그러나 양이온의 무게는 전자의 무게에 비하여 수천배에 달하므로 결국 대부분의 전류는 전자의 흐름에 영향을 받는다. 아크는 전자가 케소드로부터 방출되어 높은 온도의 이온화된 기체를 통과하여 아노드로 흘러가는 Mechanism을 나타내며 다섯부분의 영역으로 분리할 수 있다.

- 1) Cathode spot - 전자가 방출되는 음극 일렉트로드 부분
- 2) Cathode drop zone - 전압 강하가 급속히 일어나는 케소드 근방의 기체 영역
- 3) Arc column - 높은 온도와 낮은 Potential gradient의 기체영역
- 4) Anode drop zone - 전압 강하가 급속히 일어나는 아노드 근방의 기체영역

* 정회원, 생산기술연구원 생산기반기술센터

5) Anode spot - 전자가 흡수되는 양극 일렉트로드의 부분

Potential gradient는 케소드 근방에서 가장 크며 아크 기둥에서는 케소드 혹은 아노드 근방에 비해서 거의 무시할 수 있다. 아크는 보호가스의 종류, 금속의 종류, 또는 전류, 전압의 크기에 따라 온도와 기하학적 특성이 변하며 이는 실제로 이온화 에너지, 해리에너지, Work function 등의 전기적 특성과 표면장력, 점도, 전기전도도 등의 금속 성질이 변하기 때문이다. 특히 GMAW에서 보호가스로서 Helium을 사용할 경우 이온화 에너지가 크기 때문에 아크는 일렉트로드의 밑부분에 존재하므로 스프레이 금속이행 현상이 일어나기 어렵다.

Table 1 Ionization potential

Material	Ionization potential
Aluminium	5.9
Argon	15.7
Carbon	11.3
Helium	24.6
Hydrogen	13.6
Iron	7.9
Nitrogen	14.5
Oxygen	13.6
Potassium	4.3
Sodium	5.1
Tungsten	7.9

Table 2. Work function

Material	Work function
Aluminium	4.3
Barium	2.7
Copper	4.6
Iron	4.5
Titanium	3.8

GTAW에서 전압-전류 관계식을 보면 낮은 전류 영역에서는 (대체로 -100A이하) 전류가 증가할수록 전압은 줄어들며 임계 전류를 지나면 다시 전압은 증가하게 된다. 따라서 일반 오음의 범칙에 따르지 않는다. 이 관계식은 실제로 케소드 크기와 금속종류, 아노드 크기, 온도, 보호가스, 아크길이 등에 따라 달라진다. 즉, 아크길이를 줄이거나 Thorium이나 Barium 등 Activate 금속을 표면에 첨가하면 아크전압을 낮출 수 있다. 이와 같이 아크에 의한 전압과 전류와의 관계식을 아크 특성식(Arc characteristic)이라 하며 Power supply 내에서의 전류-전압 관계를 Machine

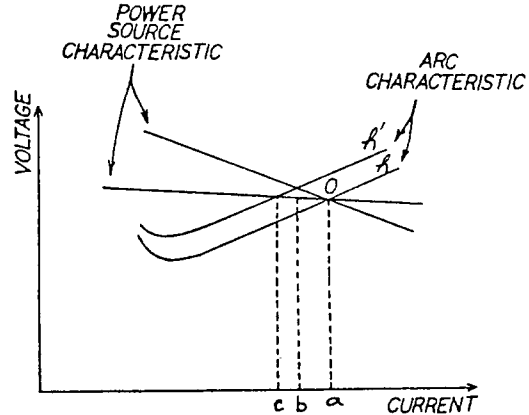


Fig. 1 Arc and power source characteristic on the self-regulation process

characteristic 또는 Power source characteristic이라 한다. 그러나, GMAW에서 실제로 용접가공중에 케소드 스폿과 아노드 스폿 사이의 전압을 측정하기는 대단히 어렵다. 이는 측정된 전압에 일렉트로드의 전압 강하가 포함되기 때문에 일렉트로드의 온도 분포 방정식을 구한 후 전압강하를 이론적 계산에 의하여 감하는 작용이 필요하다. 온도 분포 방정식을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) - C_s(T) \rho V_w \frac{dT}{dx} + \frac{I^2 \rho_r(T)}{S^2} = 0$$

일반적으로 응용끝단 부분에서 온도가 급격히 증가하며, 이 부분을 제외하고는 전도효과가 무시된다.

3. 아크의 열원 및 아크압력

열에너지로 변형된 아크의 온도는 GTAW의 경우 전류와 가스 종류에 따라 다르지만 대략 10,000~30,000°K 까지의 범위이며 Mild steel을 일렉트로드로 이용하는 GMAW에서는 대략 10,000°K이하의 아크 온도가 측정된다. GTAW에서 대상물상의 아크온도 분포를 보면 중앙에서 가장 높고 아크의 바깥반경 방향으로 갈수록 낮아진다. Heat intensity와 Current density분포는 Nestor(1962)에 의하여 중점적으로 연구가 수행되었는데, 아크길이와 전류 그리고 케소드의 형태에 따른 변화를 Fig. 2, 3에 보여주고 있다.

순수 아르곤 기체를 이용할 경우 높은 아크온도가 가능하지만 Sodium이나 Potassium과 같이 쉽게 이

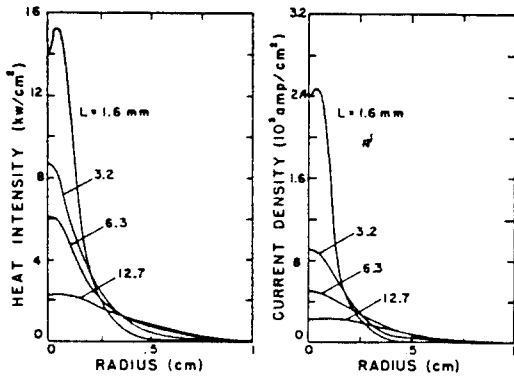


Fig. 2 Heat and current distribution for different arc length

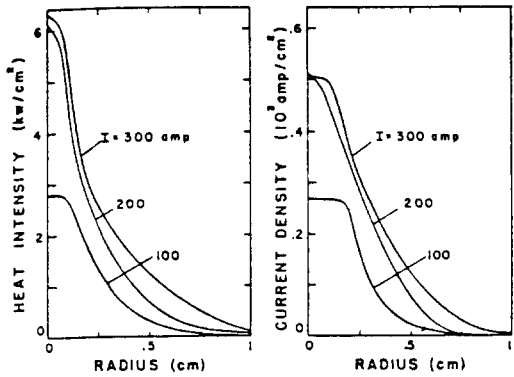


Fig. 3 Heat and current distribution for different current

온화되는 금속을 많이 포함하고 있거나, 와이어에 코팅을 할 경우 아크의 온도는 낮아지게 된다. 일렉트로드 혹은 대상물에서의 열효과를 해석하기 위하여 먼저 케소드 스폿에서의 에너지 평형식을 보면

$$q_r = V_a I - \left(\phi + \frac{36T}{2e} \right) I$$

여기서, ϕ 는 Work function으로서 전자가 금속표면으로부터 주위로 튀어나올때 요구되는 에너지를 나타내며, q_r 는 케소드 발열에너지를 나타낸다. 아노드에서의 발열 에너지는

$$q_a = \left(\phi + \frac{36T}{2e} + V_a \right) I$$

로 나타내지는데, V_a 와 V_c 는 각각 아노드 전압강하, 케소드 전압강하를 나타내며, DCSP의 GTAW는 DCRP의 GMAW에 비하여 낮은 효율을 갖게 되며 SAW인 경우에는 입자 혹은 용융금속에 의한 절연 효과로 효율이 가장 높게 된다.

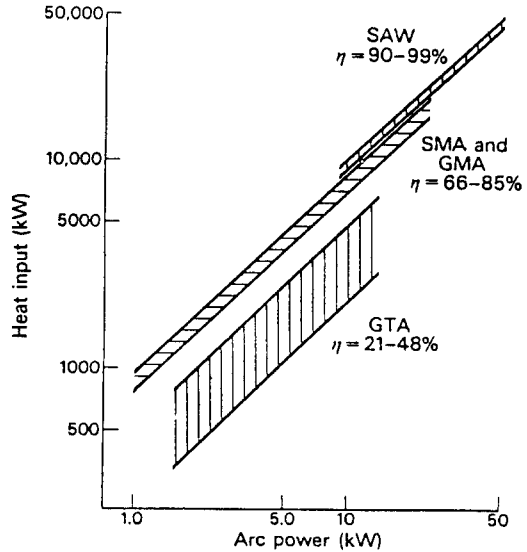


Fig. 4 Measured arc efficiency

아크 용접에서는 Electromagnetic효과에 의하여 대상물에 압력이 가해지며 이 힘에 의하여 용융 풀의 형상과 Penetration이 변하게 된다. 전류와 Magnetic flux density를 포함한 Momentum 방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$0 = -\nabla P + J \times B$$

따라서 대상물에 가해지는 아크에 의한 힘은 Pressure force와 축방향의 Momentum force에 의한 두 방향으로 나타내진다.

$$F = \frac{\mu I^2}{8\pi} \left(1 + 2\ell n \frac{R_2}{R_1} \right)$$

GTAW에서 Arc force는 텅스텐 일렉트로드의 Cone angle에 영향을 받는데, Cone angle이 클수록 Arc force는 감소하게 된다. 보호가스로서 Argon을 이용하게 되면 Helium이나 혹은 Helium-Argon 혼합기체를 이용할 경우에 비해서 Arc force가 크게 된다. Hollow tungsten 일렉트로드를 사용하게 될 경우에는 역시 일반 텅스텐 일렉트로드를 사용할 경우에 비하여 Arc

force가 감소하게 된다. 아크의 형성과 특성은 주위 분위기에 따라 또한 변하게 되는데 이는 수중용 접법에 응용이 된다. 즉 압력을 증가시키면 따라 Current density가 증가하며 아크전압이 증가하고 아크는 좁아져서 Penetration은 증가하지만 GMAW의 경우 스프레이 금속이행을 위해서는 전류를 증가시켜야 한다.

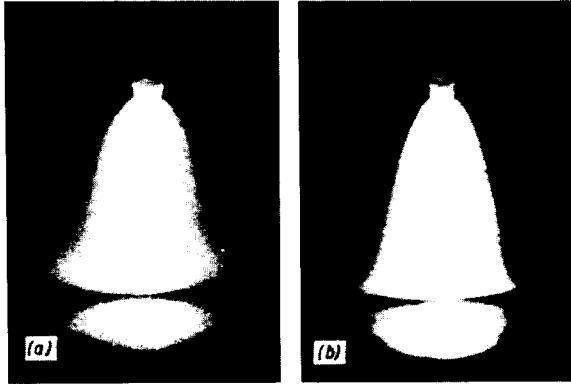


Fig. 5 Pressure effect on shapes of TIG arc

(a) 0.1MN/m-m (b) 0.7 MN/m-m

4. GMAW에서의 아크의 특성 및 응용

GMAW와 같은 소모 전극을 갖는 용접법에 있어서는 아크의 온도가 GTAW에 비하여 낮은 값을 갖지만, 실제 대상물을 녹이면서 새로운 용융금속이 투입되기 때문에 아크에너지와 더불어 용융드륄의 온도와 크기 그리고 속도가 중요한 역할을 하게 된다. 드륄의 형상을 측정하기 위하여 아크의 강한 빛을 제거할 필요가 있다. 주로 10~20kW급의 Xenon, Arc램프 등을 Back light source로 이용하여 왔으나, 최근에는 2~10mW의 레이저를 이용하여 레이저의 고유 Wavelength와 직진성을 통해 정밀한 측정이 가능하게 되었다. GMAW에서는 와이어가 용융되기 때문에 용융속도(Melting rate)의 해석이 필요하며 대략 다음의 식으로 나타내진다.

$$\dot{m} = C_1 I + C_2 I^2$$

이는 용융속도가 전류에 대하여 2차함수이며 일렉트로드 길이에 따라 크게 변함을 나타낸다. 그러나 실제로 보호가스도 용융속도에 영향을 주며 실험적 데이터에 의하면 보호가스를 변화시키므로써 10~15

% 정도의 용융속도를 증가시킬 수 있다.

대체로 낮은 전류에서는 용융드륄이 크고 글로불러 형태를 취하게 되는데 보호가스로서 아르곤을 이용할 경우 전류를 증가시키면 스프레이 형태로 변하게 되어 고운 비이드와 깊은 Penetration을 얻을 수 있다. 보호가스로서 Helium이나 탄산가스를 이용하게 되면 아크는 드륄의 밑부분에 존재하기 때문에 스프레이는 일어나지 않는다. 스프레이 형태의 금속이행은 Pinch instability이론을 이용하여 해석이 가능하며 그 고유치 방정식을 유도하여 구하게 되는데, 실험적으로 해석된것과 비교해 보면 낮은 전류때보다 높은 전류에서 이 방법이 훨씬 적절한 것을 알 수 있다. 한편 드륄의 온도는 Penetration과 Pool geometry에 직접적인 영향을 주는데 주로 Calorimeter(Ando, Pokhodnya) 혹은 Thermocouple(Jelmorini)에 의하여 측정이 되며 간접적인 방법으로 Ma에 의하여 열평형 방정식으로부터 드륄의 온도를 유추하기도 한다.

5. 결 론

전언한 바와 같이 아크는 아크 용접에 있어서 고열의 열원으로서 충분한 효과를 기대할 수 있다. 아크를 용접에 이용하기 시작한 것은 오래전의 일이지만 아크에 대한 물리적 혹은 전기적 사전 지식없이 용접을 수행할 경우 정밀한 용접이 불가능하며 자동화 하는데 커다란 어려움이 있을 것으로 본다. 아크는 이온화된 기체내에서의 전자의 흐름을 유도하기 때문에 용접가공시 불안정한 요소를 많이 갖고 있다. GTAW에서는 아크의 형성과 Penetration 및 용접비이드 형상의 관계를 예측하고 제어함으로써 자동화시킬 수 있고 GMAW에서는 Wire 용융속도와 금속이행 현상의 추가로 아크길이 제어의 어려움이 있으나 아크의 물리적 형상을 연구함으로써 임의의 형상에 대한 용접 가공이 가능하다. 실제로 용접자동화시스템 설계에 있어서 로봇제어 보다는 용접제어의 어려움이 크게 나타나고 있다. 아크는 케소드 스폿에서 출발된 전자가 아노드 스폿으로 흐르는 과정에서 일어나는 열원이므로 스폿의 운동에 의하여 아크의 불안정이 발생되지만 보호가스의 영향을 해석하여 아크 안정도를 증가시키게 된다. 분위기 압력을 변경하여 아크 형상을 바꾸며 또한 텅스텐 케소드 형상의 연구도 지속적으로 되어야 한다. GMAW에서는 특히 아크특성을 위한 와이어 용융속

도, 일렉트로드 길이 아크길이 및 전압, 전류 관계식을 토대로 정밀 용접이 가능하다. 앞으로의 연구방향은 역시 외부변수(아크길이 혹은 전류, 전압 변화)와

특히 GMAW에서는 Torch gap의 변화에 따른 아크 안정도 및 비이드 형상 혹은 Penetration의 해석이 최근 연구에 초점이 되고 있다.