

TIG 용접에서 열유속이 용융효율과 용입형상에 미치는 영향

오 동 수*† · 조 상 명**

*한국폴리텍VII대학 창원캠퍼스 산업설비자동화과

**부경대학교 신소재공학부 소재프로세스공학전공

Effect of Heat Flux on the Melting Efficiency and Penetration Shape in TIG Welding

Dong-Soo Oh*† and Sang-Myung Cho**

*Dept. of Industrial Facility Automation, Korea Polytechnic VII College, Changwon 641-772, Korea

**Course of Materials Processing Eng., Div. of Materials Science & Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

†Corresponding author : dongsoh@kopo.ac.kr

(Received November 3, 2008 ; Revised December 22, 2008 ; Accepted March 6, 2009)

Abstract

The characteristics of arc pressure, current density and heat flux distribution are important factors in understanding physical arc phenomena, which will have a marked effect on the penetration, size and shape of a weld in TIG welding. The purpose of this study is to find out the effect of the heat flux on the melting efficiency and penetration shape in TIG welding using the results of the previous investigators. The conclusions obtained permit to draw a proper method which derived the heat flux distributions by arc pressure distribution measurements, but previous researchers calculated heat flux and current distribution with the heat intensity measurements by the calorimetry. Heat flux of Ar gas arc was concentrated at the central part and distributed low from the arc axis to the radial direction, that of He mixing arc was lower than that of Ar gas, and it was wide distributed to radial direction. That showed a similar characteristic with the Nestor's by calorimetry calculated values. Throughout heat flux drawn in this study was discussed melting efficiency and penetration shape on Ar gas and He mixing gas arc.

Key Words : TIG welding, Arc pressure, Current density, Heat flux distribution, Penetration shape, Finger bead, Dish pattern bead, Melting efficiency, Molten pool convection, Lorentz force

1. 서 론

TIG 용접에서 용입, 용접부의 크기와 형상이 형성되는 아크 물리학적 현상을 이해함에 있어서 아크압력¹⁻³⁾, 전류밀도와 열유속⁴⁻⁶⁾은 매우 중요한 인자이다. 어떤 용접조건에서 양극인 모재위에 작용하는 아크 압력이 높다는 것은 그 만큼 전류밀도가 높다는 것을 의미하고 있기 때문이다^{2,7)}.

많은 연구자들은 저전류나 중전류 영역의 TIG 용접에서 텅스텐 전극의 선단각과 용입 형태와의 관계를 플라즈마 기류 등에 의해 고찰하였고^{1,8)}, 텅스텐 전극형상과 아크압력의 특성^{2,7,9)}이나 열분포(Heat distribution)

특성⁴⁻⁶⁾등을 연구하였다. 아크 내에서 발생된 에너지는 일부분만이 모재로 전달되며, 이 에너지는 양극인 모재의 판위에 분포되어 모재를 용융시키는 역할을 한다¹⁰⁾.

기존의 연구자들은 에너지 분포 특성을 규명함에 있어서 열량측정법에 의해 열전달 세기(Heat transfer intensity)를 측정하여 아크 중심에서 반경방향으로의 양극인 모재위의 열분포(Heat intensity distribution)와 전류밀도 분포(Current density distribution)를 계산하였다^{5,6)}.

용접부에 작용하는 아크압력의 분포는 결국 운동 에너지의 분포라는 것을 이전의 많은 연구자^{9,11)}들도 논하고 있지만, 측정된 아크 압력이나 아크력은 주로 대

전류 영역에서 용융지 표면의 압입깊이나 표면 변형 등을 설명하는데 적용하였다. 그러나, 대전류 영역에서 실드 가스 종류에 따라 핑거비드나 접시형 비드가 발생되는데, 아크 압력특성으로 용입 형상을 논함에 있어서 한계성을 가지고 있다. 따라서 측정된 아크 압력과 그것으로부터 유도된 전류밀도에 의해 용융풀의 형상과 크기를 예측할 수 있는 에너지 분포특성에 대한 연구가 필요하다.

본 연구의 목적은 TIG 용접에서 He 혼합에 따라 측정된 아크압력 분포⁸⁾와 기존 연구자들의 아크 물리학적 결과들^{1-3,8,12-13)}을 활용하여 TIG 용접에서 열유속(heat flux)이 용융효율과 용입 형상에 미치는 영향을 규명하는 것이다.

그것을 위하여 He 혼합비에 따른 TIG 용접의 아크 압력 분포특성과 측정된 아크압력⁸⁾으로부터 유도된 전류밀도¹³⁾와의 관계에 의해 열유속을 유도하였다. 또한 STS 304 판재에 He 혼합에 따른 TIG 용접을 실시하여 얻어진 용접비드 형상과 용입 형상에 대하여 아크 물리학적 관점에서 고찰하였고, 그것의 타당성에 대하여 논하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에서는 용가 와이어의 사용 없이 자동 용융주행에 의한 아래보기 자세의 TIG 용접을 실시하였고, 사용한 모재는 STS304 판재이다. Table 1은 STS304 판재에 대전류 고속 TIG 용접을 실시한 용접조건을 나타낸 것이다.

전극은 2% Th-W(직경 3.2mm)을 이용하여 텅스텐 전극이 마이너스(-)인 DCEN(직류 정극성)을 사용하였고, 전극선단 원추 각은 45°로 가공된 sharp tip을 사용하였다. 실드 가스는 공업용 100%Ar가스(이하 Ar가스)와 Ar가스에 He가스를 혼합한 Ar+33%He(이하 He33), 그리고 Ar+67%He(이하 He67)인 He혼합가스를 사용하였다. 실드 가스의 유량은 20 l/min로 하였다.

Table 1 Welding condition for melt run TIG welding (STS304)

Material	Current	Arc length	Gas	Speed(cm/min)
STS 304 6tx50x200	300A	3 mm	Ar	20, 30, 40, 50, 60,
			He33	70, 80, 90, 100
			He67	

2.2 실험방법

용접속도는 자동 이송대차를 사용하여 조정하였고, 토치의 작업각과 진행각은 0°로 하였다. 용접기는 300A 용량의 인버터 형을 사용하였다.

TIG 용접에서 열유속이 용융효율과 용입 형상에 미치는 영향을 규명함에 있어서 아크 개시와 동시에 TIG 용접 모니터링 시스템을 사용하여 용접전류와 전압의 파형을 측정하였다. 용접속도는 20~100cm/min의 범위로 변화시켰다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 측정된 아크 압력분포에 의한 열유속 분포의 유도

본 저자는 이전의 연구^{8,13,14)}를 통하여 TIG 용접에서의 실드가스 혼합비에 따른 아크 압력분포 특성과 측정된 아크 압력으로부터 전류밀도 분포를 유도하였고, 대전류 고속 TIG 용접특성에 미치는 He 혼합비의 영향을 보고 하였다. 이전의 많은 연구자들은 열량측정법에 의해 열유속을 측정하여 열 분포와 전류밀도를 계산^{5,6)}하였지만, 본 저자의 연구에 의한 다음의 과정을 통하여 측정된 아크 압력분포로부터 열유속 분포를 유도할 수 있다.

Fig. 1은 TIG 용접부에 작용하는 아크 전압 V_a 와 전류밀도 J 분포의 개요도를 나타낸 것이다. 아크 전압 V_a 와 전류밀도 J 의 분포는 식 (1)과 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

즉 아크는 식 (1)과 같이 수많은 전류가 흐르는 통로로 구성되어 있는 전류밀도 J 의 다발로 된 병렬회로이

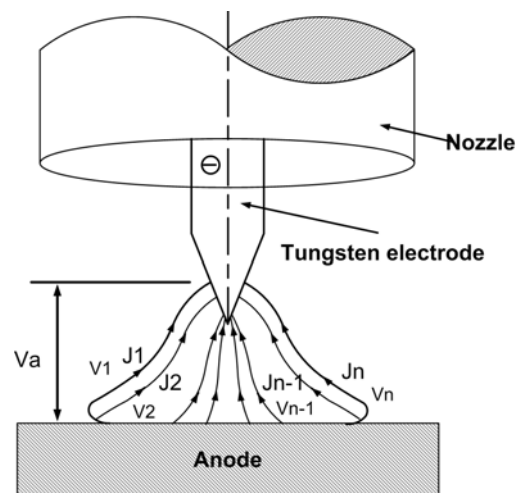


Fig. 1 Schematic diagram of arc voltage and current density distribution

Table 2 Measured arc voltage at 5mm arc length for a 300A

Shield gas	Ar	He33	He67
Arc voltage(V)	17.50	18.50	21.0

며, 연속된 플라즈마 형태를 갖는 집합체로 가정할 수 있다. 또한 TIG 용접에서 아크 중심에서 반경방향으로 5.0mm까지 아크 압력을 측정하였을 때⁸⁾, 아크 압력을 측정한 각 위치에서 아크 길이가 일정하였기 때문에 식 (2)와 같이 아크 전압 V_a 은 일정하다고 가정할 수 있다. Table 2는 용접전류 300A에서 He 혼합비에 따른 아크 전압을 측정한 자료이다. 따라서 실드 가스의 동일한 조성의 아크 압력을 측정한 각 점의 위치에 대한 아크 전압이 Table 2와 같이 일정함으로 식 (1)과 (2)를 이용하여 식 (3)과 같이 열유속(Heat flux)을 유도할 수 있다.

$$I = J_1 + J_2 + J_3 + \dots + J_n \quad (1)$$

$$V_a = V_1 = V_2 = V_3 \dots = V_n \quad (2)$$

여기서,

I : Welding current (A)

J_1 : the 1st current density in the arc (A/mm^2)

J_2 : the 2nd current density in the arc (A/mm^2)

J_n : the n-th current density in the arc (A/mm^2)

V_a : Arc voltage (V)

V_1 : the 1st arc voltage in the arc (V)

V_2 : the 2nd arc voltage in the arc (V)

V_n : the n-th arc voltage in the arc (V)

$$H = J \times V_a \quad (W/mm^2) \quad (3)$$

여기서,

H : Heat flux (W/mm^2)

J : Current density (A/mm^2)

V_a : Arc voltage (V)

따라서 본 연구에서 측정된 아크 압력에 의해 열유속을 유도한 과정은 이전 연구자들의 열량측정법에 비해 매우 간편한 방법이다. 본 연구에서 측정된 아크 압력으로부터 열유속을 유도한 것은 향후 용입, 용접부의 크기와 형상이 형성되는 용접 아크 물리학을 이해함에 있어서 매우 중요한 과학적인 방법이 될 것으로 기대된다.

Fig. 2는 대전류 영역인 용접전류 300A에서 측정된 아크 압력 분포⁸⁾를 나타낸 것이고, Fig. 3은 측정된

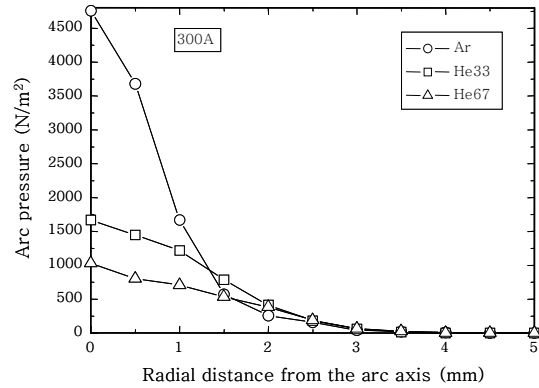


Fig. 2 Arc pressure distribution with the mixing ratio of shield gases

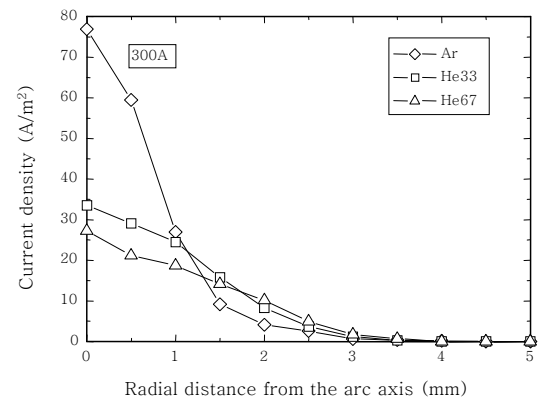


Fig. 3 Current density distribution with the mixing ratio of shield gases

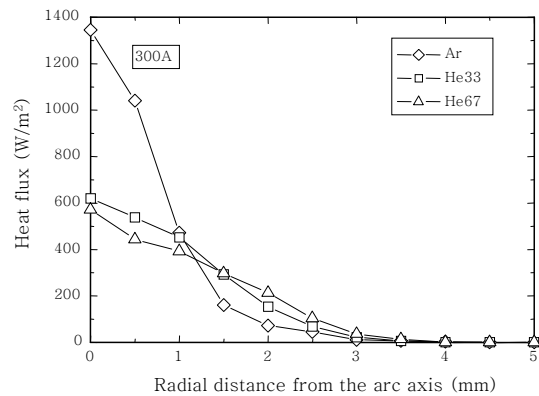


Fig. 4 Heat flux distribution with the mixing ratio of shield gases

아크 압력으로 유도된 전류밀도 분포¹³⁾를 나타낸 것이고, Fig. 4는 본 연구에서 유도된 열유속의 분포를 나타낸 것이다.

Fig. 3과 Fig. 4의 Ar가스 아크와 He혼합가스 아크의 전류밀도 분포와 열유속 분포의 관계를 비교하면 다음과 같다. Ar가스 아크의 경우 He혼합가스 아크에 비

해 최대 전류밀도와 열유속은 매우 큰 값을 보이며, He혼합가스 아크의 최대 전류밀도와 열유속은 Ar가스 아크에 비해 현저하게 낮은 값을 보이고 있다. 즉 아크 중심부에 작용하는 최대 전류밀도는 Ar가스 아크가 He67 아크에 비해 약 2.82배 큰 값을 보이지만, 열유속은 2.35배 정도만 크게 작용하고 있다. Ar가스 아크와 He67 아크의 최대 전류밀도와 열유속 값의 차이를 보인 것은 Table 2와 같이 Ar가스 아크와 He혼합가스 아크의 전압 차이에 의한 He혼합가스 아크의 아크 전압의 증가에 의한 열유속의 값이 증가되었기 때문이다.

또한 Ar가스 아크의 전류밀도와 열유속의 분포는 아크 직경 2.0mm 이내에 집중하여 작용하고 있고 반경 방향으로 급격하게 감소하는 경향을 보이지만, He혼합가스 아크의 전류밀도와 열유속의 분포는 아크 중심에서 반경 방향으로 넓게 분포하고 균일하게 작용하고 있음을 알 수 있다. 이것은 Nestor⁴⁾가 열량 측정법에 의해 계산한 값과 유사한 특징을 보였다.

이러한 Ar가스 아크와 He혼합가스 아크의 전류밀도 분포와 열유속 분포의 차이는 결국 용입 형상에 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다.

3.2 용융효율에 미치는 He 혼합의 영향

Photo 1은 용접전류 300A와 용접속도 30cm/min인 동일 용접조건에서 He 혼합비에 따른 용입 형상을 나타낸 것이다. Photo 1 (a)의 Ar가스 아크에서는 비드 폭에 비해 용입 깊이가 깊은, 즉 He혼합가스 아크에 비해 형상비가 큰 전형적인 핑거비드 형태¹⁴⁾의 용입 형상을 보이고 있다. He 혼합비가 증가될수록 용입 깊이는 감소하고 비드 폭은 넓어지는 접시형 비드 형태(dish pattern)¹⁴⁾의 용입 형상을 보이고 있다.

Photo 1과 같이 He 혼합에 따라 용입 형태의 변화만 나타내는 것이 아니라 Ar가스 아크에 비해 He혼합가스 아크는 용융 단면적이 증가하였다. 이와 같은 용융 단면적의 차이는 실드 가스 종류에 따른 용접 입열의 차이에 의한 결과라고 생각된다. He가스는 Ar가스에 비해 더 높은 이온화 전위를 가지며, 열전도도 또한 높기 때문에 강한 열적 핀치효과⁹⁾에 의해 안정된 아크를 유지하기 위해 더 높은 아크 전압이 필요하게 된다. 용접전류 300A 영역에서 He 혼합비에 따라 측정된 아크 전압은 3.1절에서 설명한 것과 같이 Table 2와 같다. 따라서 Fig. 5와 같이 He혼합가스가 Ar가스에 비해 용접 입열이 증가하게 되며 용융 온도도 더 높게 된다^{1,9)}. 용융 온도가 높게 되면 모재의 용융특성이 증가¹⁵⁾되어 He혼합가스의 용융 단면적이 증가한 것으로 판단된다.

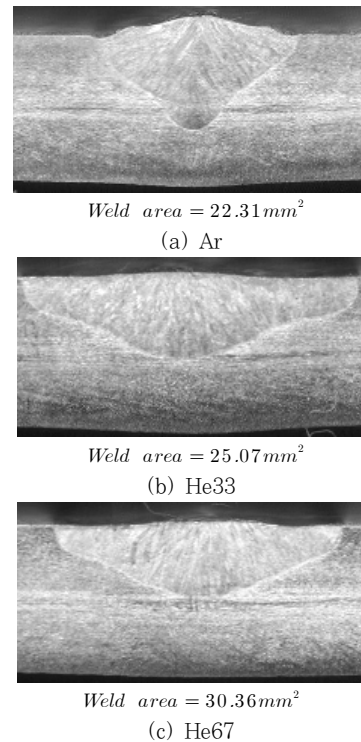


Photo 1 Illustration of weld bead shape and weld area under the same welding condition (300A, 30cm/min)

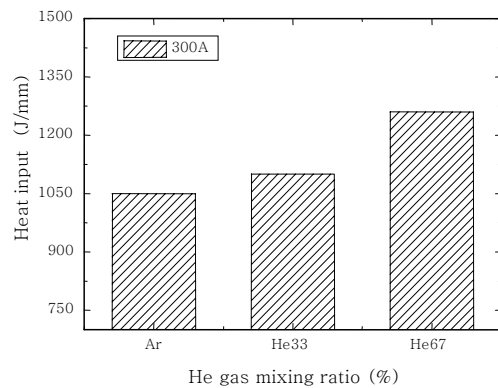


Fig. 5 Effect of He mixing ratio and welding current on heat input

Photo 1과 같은 He 혼합에 따른 용입 형상과 용융 단면적의 차이를 Fig. 5와 같은 용접 입열의 관점에서만 설명하기에는 이론적 배경이 부족하다고 생각된다. 따라서 본 연구에서는 용융효율이라는 개념을 도입하여 아크 물리학적 현상을 설명하고자 한다. 많은 연구에서 텅스텐 전극의 형상^{1,2,9)}, 미량원소의 첨가¹⁶⁾, 그리고 실드 가스의 종류^{7,16)}에 따라 용접부의 용융효율(melting efficiency)에 대해 정성적으로 언급하고 있다.

용융효율은 모재로 투입된 에너지에 대한 용접 금속을 녹이는데 사용되는 에너지의 비이며, 본 연구에서는

J. Tušek의 식¹⁷⁾을 이용하였다. 그 것은 식 (4)와 같다.

$$\eta = \frac{ME}{\int_0^t IV_a dt} 100s \tag{4}$$

여기서,

η : 용융효율(%)

M : 단위시간 당 용융된 용접금속의 질량(g/s)

E : 용접금속 1 g을 녹이기 위해 이론적으로 요구되는 에너지(J/g)

t : Welding time(s)

I : 용접전류(A)

V_a : 아크 전압(V)

식 (4)에서 M 은 식 (5)와 같이 계산된다.

$$M = A_{um} \times v \times \rho \tag{5}$$

여기서 A_{um} 은 용융 단면적(mm²), v 는 용접속도(mm/s), 그리고 ρ 는 밀도(g/mm³)이다.

Fig. 6은 용접전류 300A에서 He 혼합에 따른 모재의 용융효율의 효과를 나타낸 것이다. 용융효율이 높다는 것은 단위비드 길이 당 더 낮은 용접 입열로도 더 많이 모재를 용융시킬 수 있다는 것을 의미한다.

그러나 Ar가스 아크에 비해 He혼합가스 아크는 용접 단면적이 증가하였는데 이러한 용접 단면적의 증가가 용접 입열(heat input)만의 효과에 의한다면 용융효율(melting efficiency)은 동일해야 할 것으로 판단된다. 그러나 Fig. 6에서와 같이 Ar가스 아크에 비해 He혼합가스 아크는 용융효율이 거의 직선적으로 증가하며, He67 혼합가스 아크의 용융효율은 Ar가스 아크에 비

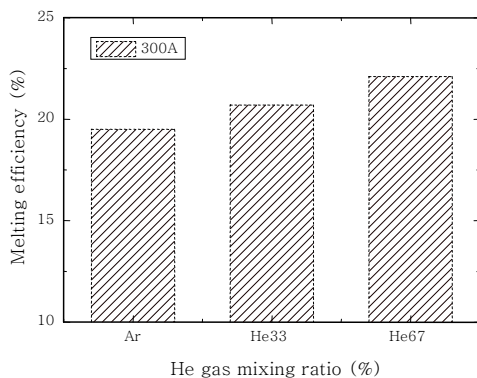


Fig. 6 Effect of He mixing ratio on melting efficiency

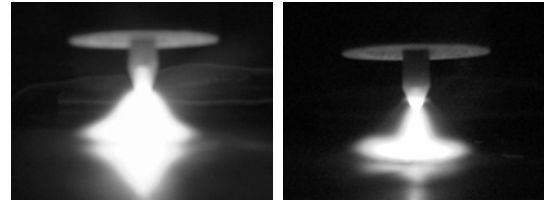


Photo 2 Arc shape of Ar(left) and He gas arc (right) of the 300A current

해 약 1.14배 증가하였다.

He혼합가스 아크가 Ar가스 아크에 비해 용접 단면적이 크게 증가되었고, 그 용융효율도 Ar가스 아크에 비해 약 1.14배로 증가되었는데, 그 이유로는 다음 두 가지를 들 수 있을 것이다. 첫째, Photo 2와 같이 He 혼합가스 아크 상부는 열적핀치 효과⁹⁾에 의해 긴축되어 대기로의 복사 열손실이 적어 모재로의 입열 효율이 증가되었기 때문이다. 둘째, Ar가스 아크에서는 아크 중심부의 열유속 집중도가 높아 그곳의 용융금속 표면온도가 현저히 상승하여 전체용융금속의 체적이 그다지 증가하지 못하지만, He혼합가스 아크에서는 그 중심부의 열유속 집중도가 낮아서 용융금속의 최고온도도 그다지 높지 않게 되어 용융금속의 체적은 오히려 증가하기 때문이라고 할 수 있다. He혼합가스 아크는 Ar가스 아크에 비해 낮은 열유속(Critical heat flux)으로도 모재의 중심에서 주변부까지 용융이 가능하다고 생각된다. 따라서 He혼합가스 아크는 Ar가스 아크에 비해 더 낮은 열원을 가지고도 모재를 용융시킬 수 있으므로 대전류 TIG 용접의 고속화가 가능할 것으로 생각된다.

3.3 용입 형상에 미치는 열유속과 용융지 유동의 영향

아크 용접에서 비드 폭과 용입에 영향을 주는 유동은 전자기력, 부력, 표면장력 구배(surface tension gradient)에 의한 Marangoni 유동 및 플라스마에 의한 Drag force 등의 다양한 요소에 의해 결정된다^{4,18)}.

본 연구의 용융지 유동에 관한 고찰은 양극인 용융지 표면의 전류밀도 분포에 의해 유도되는 Lorentz force의 관점에서만 용융지 대류가 작용하는 구동력에 대하여 기술하며, Fig. 7과 같이 설명할 수 있다.

대전류 영역에서 Ar가스 아크의 경우 3.1절에서 고찰한 Fig. 3과 4에서와 같이 전류 밀도와 열유속 분포는 아크 중심부의 직경 2.0mm 이내에 집중적으로 작용한다. 전류 밀도와 열유속의 분포가 양극인 모재의 용접부 중심에 크게 집중하고, Fig. 2와 같이 아크 압력 또한 아크 중심부에 집중하여 작용하므로, 전류에 의해 유도되는 Lorentz력(F)에 의해 용융지 아래쪽으

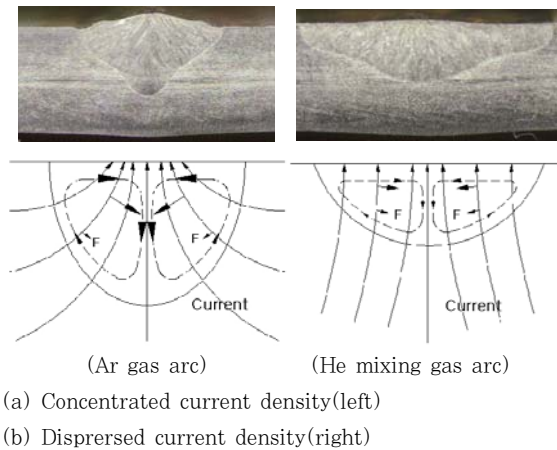


Fig. 7 Lorentz force induced by current density and driving force of molten pool convection

로 작용하는 유체의 유동이 발생하게 된다.

또한 아크 중심부에 매우 집중적으로 작용하고 있는 전류 밀도에 의해 유도되는 Lorentz력(F) 또한 아크 중심부에 아주 크게 작용한다. 용융지가 양극인 모재위에서 아래쪽으로 작용하는 유동이 강하고 Lorentz력(F) 또한 강하게 되어, 용융지 유동은 모재 중심부의 깊이 방향으로 크게 작용하게 된다. 용융지 깊이 방향으로 작용한 유동은 모재의 밑 부분에 작용하는 Lorentz력(F)에 의해 아주 작으므로 모재의 깊이 방향으로 작용하는 유동과 Lorentz력(F)이 거의 상쇄되지 않은 채 모재 위쪽으로 상승하게 된다. 이것이 전류밀도의 집중분포와 아크 압력의 집중적인 분포에 의해 아크 중심부에서 다시 가속되어 유동은 양극 모재의 위쪽에서 아래쪽으로 작용하게 된다. 이러한 유동은 계속적으로 반복되어 양극 모재위에서 작용하게 된다.

그 결과 Ar가스 아크의 경우 동일한 용접 입열이 작용 하더라도 비드 폭이 좁고, 깊은 용입을 형성하게 되어 핑거비드 형상을 갖게 된다.

그에 비해 He혼합가스 아크의 경우 Fig. 3과 4에서와 같이 최대 전류 밀도와 열유속은 Ar가스에 비해 현저하게 작은 값을 가지며, 아크 중심부에서부터 반경 방향으로 넓게 분포하여 거의 일정하게 작용하게 된다. 따라서 전류밀도와 열유속이 아크 중심부에 집중하지 않고 주변부로 분산되어 작용하지만, 전류밀도에 의해 유도되는 Lorentz력(F)에 의해 용융지가 양극인 모재위에서 아래쪽으로 작용하게 된다.

그러나 Ar가스 아크에 비해 크게 낮은 아크 압력과 분산되어 작용하는 전류밀도에 의해 유도되는 Lorentz

력(F)에 의해 용융지 아래쪽으로 작용하는 유동은 처음부터 작은 구동력을 갖고 작용하게 된다. 용융지 깊이 방향으로 작용한 유동은 모재의 밑 부분에서 작용하는 Lorentz력(F)에 의해 거의 상쇄되기 때문에 위쪽으로 향하는 유동은 아주 작게 된다. 양극 모재위의 용융지는 전류밀도에 의해 유도되는 Lorentz력(F)에 의해 다시 아래쪽으로 유동이 발생되며, 앞에서 설명한 것과 같은 유동이 반복적으로 작용하게 된다.

그 결과 He혼합가스 아크는 Ar가스 아크에서 보이고 있는 핑거비드 형상은 나타내지 않고 넓고 얇은 용입을 형성하는 접시형 형태의(dish pattern)의 용입 형상을 갖게 된다고 생각 된다.

4. 결 론

TIG 용접에서 열유속이 용융효율과 용입 형상에 미치는 영향을 규명하기 위하여 STS304 판재에 고속 용접하여 얻은 비드형상과 용입 형상에 대하여 아크 물리학적 관점에서 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 기존의 연구자들은 열량측정법에 의해 열전달 세기를 측정하여 열유속 분포와 전류밀도 분포를 계산하였지만, 본 연구에서는 아크 압력분포를 측정하여 열유속 분포를 유도하는 간단하면서도 타당한 방법을 도출하였다.

2) Ar가스 아크는 아크 중심부의 열유속이 현저히 높고 주변부로 갈수록 낮은 분포를 하며, He혼합가스 아크는 Ar가스 아크에 비해 아크 중심부의 열유속은 낮았으나 아크 중심부에서 주변부까지 고루 분포하는 특징을 갖는다. 이는 Nestor⁴⁾가 열량측정법에 의해 계산한 값과 유사한 특징을 보였다.

3) He혼합가스 아크가 Ar가스 아크에 비해 용접 단면적이 크게 증가되었고, 그 용융효율도 Ar가스 아크에 비해 약 1.14배로 증가되었는데, 그 이유로는 다음 두 가지를 들 수 있을 것이다. 첫째, He혼합가스 아크 상부는 열적핀치 효과에 의해 긴축되어 대기로의 복사 열 손실이 적어 모재로의 입열 효율이 증가되었기 때문이다. 둘째, Ar가스 아크에서는 아크 중심부의 열유속 집중도가 높아 그곳의 용융금속 표면온도가 현저히 상승하여 전체용융금속의 체적이 그다지 증가하지 못하지만, He혼합가스 아크에서는 그 중심부의 열유속 집중도가 낮아서 용융금속의 최고온도도 그다지 높지 않게 되어 용융금속의 체적은 오히려 증가하기 때문이라고 할 수 있다.

4) Ar가스 아크는 핑거(finger) 비드 형상을 He혼합가스 아크는 접시형(dish pattern) 비드 형상을 보였다. 이것은 Ar가스 아크는 아크 중심부 2.0mm 이내에 전류밀도 J가 집중하고 있어 전류에 의해 유도되는 Lorentz력 F에 의한 용융지 유동이 모재 중심부 깊이 방향으로 강하게 작용하기 때문이며, He혼합가스 아크의 경우 전류밀도 J가 아크 중심부에 집중하지 않고 주변부로 분산 작용하게 되어 Lorentz력 F에 의한 용융지 유동이 모재 중심부의 깊이 방향으로 처음부터 작은 구동력을 갖게 되었기 때문이다.

참 고 문 헌

1. M. L. LIN and T. W. Eagar : Pressures Produced by Gas Tungsten Arcs, Metallurgical Transactions B, 17B(1986), 601~607
2. K. Hiraoka, A. Okada and M. Inagaki : Effect of Electrode Geometry on Maximum Arc Pressure in Gas Tungsten Arc Welding, Journal of JWS, 3-2(1985), 10-16(in Japanese)
3. Sang-Myung Cho and Sang-Goun Seo : The Effect of Configuration and Surface Polishing in Tungsten Electrode Tip for Gas Tungsten Arc Welding on the Arc Characteristics, Journal of KWS, 19-1(2001), 33~39(in Korean)
4. Nestor, O. H. : Heat intensity and current density distributions at the anode of high current, inert gas arcs, J. Appl. Physics, 33-5(1962), 1638~1648
5. N. S. Tsai and T. W. Eagar : Distribution of the Heat and Current Fluxes in Gas Tungsten Arcs, Metallurgical Transactions B, 16B(1985), 841~846
6. Peter A. Schoeck : An Investigation of the Anode Energy Balance of High Intensity Arcs in Argon, Modern Developments in Heat Transfer (IBELE, W. ED) Academic press New York, (1963), 353~400
7. K. Hiraoka, A. Okada and M. Inagaki : Effect of Helium Gas on Arc Characteristic in Gas Tungsten Arc Welding, Journal of JWS, 3-2(1985), 241~246(in Japanese)
8. Dong-Soo Oh, Yeong-Sik Kim, and Sang-Myung Cho : The characteristics of Arc Pressure Distribution by Shield Gas Mixing Ratio in TIG Welding, Journal of KWS, 23-1(2005), 50~56 (in Korean)
9. J. F. Lancaster : The Physics of Welding, Pergamon Press, England, (1984)
10. N. S. Tsai, : Heat Distribution and Weld Geometry in Arc Welding, Doctor of Philosophy, MIT, (1983).
11. G. R. Cannell and R. P. Ruth : Closing Spent Nuclear Fuel Canisters with GTAW, welding Journal, 82-12(2003), 28~32
12. A. C. Guu and S. I. Rokhlin : Technique for Simultaneous Real-Time Measurements of Weld Pool Surface Geometry and Arc Force, Welding Journal, 71-12(1992), 473s~482s
13. Dong-Soo Oh, Yeong-Sik Kim, and Sang-Myung Cho : Derivation of Current Density Distribution by Arc Pressure Measurement in TIG Welding, Journal of Science and Technology of Welding and Joining, 10-4(2005), 442~446
14. Dong-Soo Oh, Yeong-Sik Kim, and Sang-Myung Cho : Effect of He Mixing Ratio on the Characteristics in TIG Welding with High Current and Speed, Journal of KWS, 23-3(2005), 52~58 (in Korean)
15. T. Hinata, K. Yasuda, H. Kasuga and T. Onzawa : Study on Penetration Form Using Stationary TIG Arc(Study on Low Speed DC-TIG Welding Method(Report 1), Journal of JWS, 10-3(1992), 352~359(in Japanese)
16. A. Okada and H. Nakamura : Anode Behavior in GTA Welding and Its Effect on Melting Thin Plate, JWS 12-1(1994), 94~100 (in Japanese)
17. J. Tušek, M. Suban : Experimental research of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas in arc welding of high-alloy stainless steel, International Journal of Hydrogen Energy 25 (2000), 369~376
18. A. Katsaounis, Heat Flow and Arc Efficiency at High Pressures in Argon and Helium Tungsten Arcs, Welding Journal 72-9(1993), 447s~454s