

우주 환경에서 GHTAW 아크 특성과 용융지 해석에 관한 연구

이상훈* · 나석주*†

*한국과학기술원 기계공학과

A Study on the Arc Characteristics and Weld Pool Analysis of GHTAW under the Space Environment

Sang-Hoon Lee* and Suck-Joo Na*,†

*Dept. of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

†Corresponding author : sjna@kaist.ac.kr

(Received April 5, 2010 ; Revised April 30, 2010 ; Accepted May 4, 2010)

Abstract

The purpose of this paper is to understand the behavior of GHTAW process under the space environment with the experimental and numerical analysis. Gas Hollow Tungsten Arc Welding (GHTAW) using a hollow tungsten electrode was adopted, since the ignition and discharge of a conventional GTAW process is not appropriate to the space environment due to low pressure in space. In order to clarify the phenomena of GHTAW under space environment, an investigation of thermal and physical properties of the GHTAW arc plasma was experimentally performed under low pressure conditions. Furthermore, the molten pool behavior and weldment of GHTAW were understood by CFD-based numerical analysis, based on the models of GHTA heat source, arc pressure and electromagnetic force induced by arc plasma, the characteristics of which were obtained by the captured images of a CCD camera.

Key Words : GHTAW, Arc plasma, Numerical simulation, Heat source, Modeling, Space welding, Molten pool

1. 서 론

GHTAW(Gas Hollow Tungsten Arc Welding)은 일반적인 GTAW 전극봉을 중공관 형태로 제작하여 내부로 가스를 분사시켜 아크 플라즈마를 생성 및 유지시키는 용접 공정이다. 특히 133Pa(1torr) 보다 낮은 진공에서는 일반적인 GTAW 공정으로는 아크를 생성, 안정적으로 유지시킬 수 없다는 연구가 발표되어 GHTAW 공정에 대한 연구가 시작되었다^{1,2)}.

기존의 GHTAW에 관한 논문을 살펴보면 가스 유량 및 아크 길이 등의 용접 변수에 따른 아크 플라즈마의 특성을 파악하고 실제 용접을 통해 용접 비드의 모양을 분석하는데 그치고 있어 해석적인 방법으로 용접부의

특성에 대한 이해가 필요한 시점이다^{3,4)}. 수치해석적인 방법으로 용융지의 거동을 구현하기 위해서는 용접의 열원 및 용융지에 작용하는 구동력에 대한 모델링 및 타당성을 검증하는 과정이 필요하다.

본 연구에서는 GHTA 점용접 공정을 이용하여 저기압(low pressure)에서의 아크의 특성을 규명하고 이를 이용하여 저기압-무중력 상태에서 용융지의 거동을 해석하고자한다. 먼저, 우주에서의 아크 특성을 규명하기 위해 진공 챔버를 제작하여 실험을 실시하고 아크 플라즈마 특성을 분석했다. 다음으로 실험을 통해 아크 플라즈마의 열원 및 구동력을 고속 CCD 카메라를 이용하여 측정 후 모델링하였다. 이를 바탕으로 CFD에 근거한 수치해석을 통해 저기압-무중력 상태에서 용접 비드 및 용융지의 거동을 예측하였다.

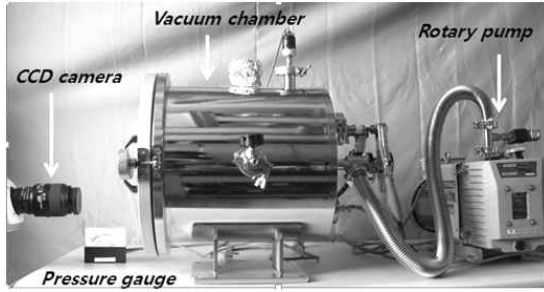


Fig. 1 Experimental apparatus for GHTAW

2. GHTA 점용접 실험

2.1 실험 장치 구성

저기압 아크 플라즈마를 관찰하기 위해서 진공 챔버를 설계, 제작했다. 내경 350mm, 길이 350mm 크기의 약 33 리터 용량을 가지는 실린더 형으로 스테인레스강 재질의 챔버 내부에 용접 토치 및 수냉 구리 동판을 제작했다. 챔버는 408L/min의 펌핑 속도를 가지는 로터리 펌프(rotary pump)를 이용하여 용접 시작과 중간에 챔버 내부 압력을 일정하게 유지시켰다. Fig. 1은 실험 장치의 구성을 나타내며, 챔버, 로터리 펌프, CCD 고속 카메라로 구성되어 있다. 또한 저기압에서 사용할 수 있는 중공관 형태의 전극봉(hollow electrode)을 제작하였다. 중공관 전극봉의 재질은 GTA 용접봉과 같은 2% 산화 토륨(thorium)을 포함하는 텅스텐 용접봉(thoriated tungsten, ThW)을 사용하였으며 크기는 외경/내경, 3.2mm/1mm 이다.

2.2 과도 아크(transient arc) 플라즈마 분석

저기압에서의 GHTAW 아크 플라즈마 분석을 위해 용접 실험을 Table 1의 조건에서 실시하면서 CCD 고속 카메라를 이용하여 아크 플라즈마 이미지를 실시간으로 획득하고 또한 전압 및 전류를 측정했다. Fig. 2에서와 같이 초기 아크 점화 후 불안정한 아크 방전(transient arc discharge) 구간을 거쳐 안정된 아크 방전(stable arc discharge) 구간에 도달하게 된다. 불안정한 아크 구간은 최초 Y. Suita 등이 발견하고

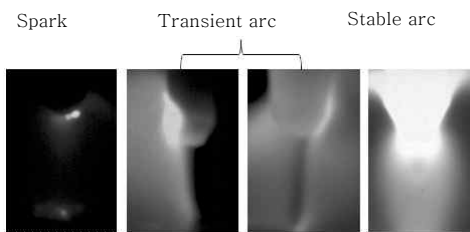


Fig. 2 Arc discharge process

Table 1 Welding parameters(SUS304)

Current	150A
Arc length	3,5,7mm
Argon gas flow rate	0.1, 1, 2, 5L/min
Time duration of weld	5s
Electrode tip angle	60°
Ambient pressure	1.3kPa(10torr)

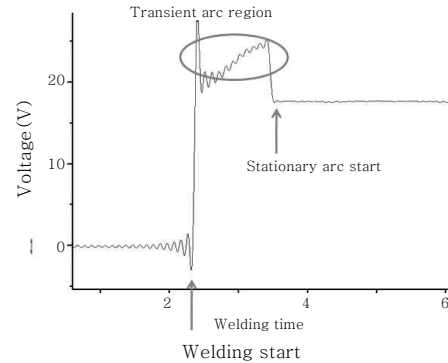


Fig. 3 Arc voltage of GHTAW under low pressure

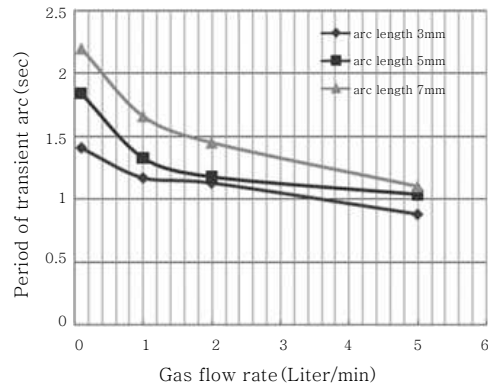


Fig. 4 Effect of gas flow rate on period of transient arc

과도 아크(transient arc) 라고 명명했다¹⁾. 과도 아크 구간의 특징을 살펴보면, 아크 점화가 일어난 후 아크가 전극봉을 타고 올라가서 콜렉트 바디와 전극 그리고 모재 사이에서 매우 불규칙적인 아크 방전을 보이며 Fig. 3에서와 같이 전압은 정적 아크 구간에서 보다 높은 값을 가지게 된다. Fig. 4는 가스 유량과 아크 길이에 따른 과도 아크 구간의 시간을 나타내는 그래프이다. 아크 길이가 길어지면 과도 아크 구간이 늘어나며 가스 유량이 늘어날수록 과도 아크 구간이 줄어드는 현상이 나타난다. 이는 아크 길이가 길어지게 되면 전극봉에서 나온 가스가 이온화되어 양극 사이에서 머물기가 힘들어져 음극으로의 열 전달이 작아지게 되어 과도

아크 구간이 길어지게 된다. 한편, 가스 유량이 많아지게 되면 고온의 가스가 팁 주위에 보다 쉽게 머물게 되어 빠른 시간 안에 열 전자 방출에 이르게 된다.

2.3 용융부 분석

GHTAW 공정을 이용하여 저기압에서의 아크 점용 접을 Table 1의 조건으로 실시하였다. Fig. 5은 아크 길이 5mm의 조건에서 가스 유량에 따른 비드 형상의 단면을 보여주고 있는 사진이며 가스 유량이 증가함에 따라 용입이 증가 하는 경향을 보였다. 이는 Fig. 6에서처럼 가스 유량이 증가 할 때 아크 플라즈마가 집중되는 효과를 나타내어 깊은 용입을 가져 오게 되며 아크 유효 반경이 작아져 모재로 전달되는 에너지밀도가 커지게 된다. 또한 가스 유량이 증가함에 따라 과도 아크 시간이 짧아져 보다 긴 시간 동안 안정된 아크 플라즈마의 열이 모재로 전달되게 된다. 가스 유량 2L/min 일 때 가장 깊은 용입을 보였으며, 반대로 가스 유량이 0.1L/min 일 때는 용융부위가 평평함을 보였다. 가스 유량과 아크 길이에 따른 용입을 Fig. 7에 나타내었다. 가스 유량이 증가할수록 용입이 깊어지는 것을 확인 했지만, 가스 유량의 증가가 항상 깊은 용입을 가져 오는 것은 아니다. Fig. 8에서처럼 가스 유량이 3L/min 일 때 용접 중에 용융된 금속이 용융지를 이탈하는 현상을

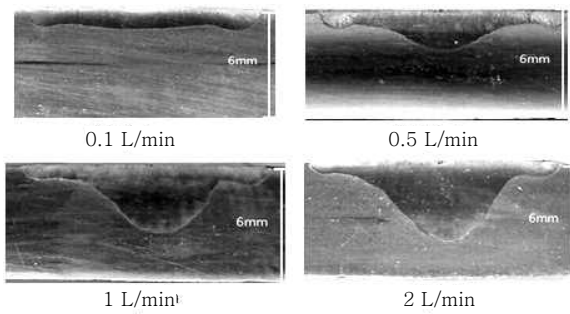


Fig. 5 Effect of gas flow rate on bead shape

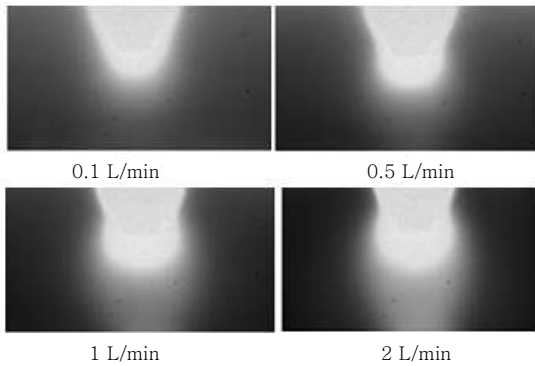


Fig. 6 Effect of gas flow rate on arc plasma

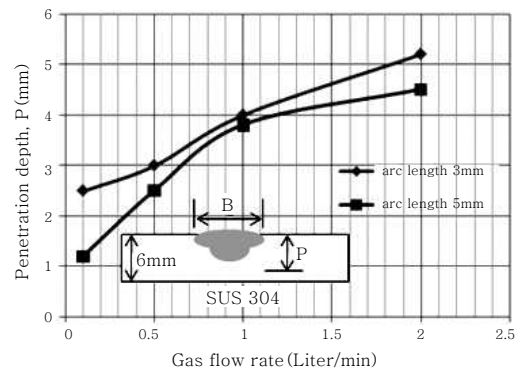


Fig. 7 Effect of gas flow rate on penetration depth

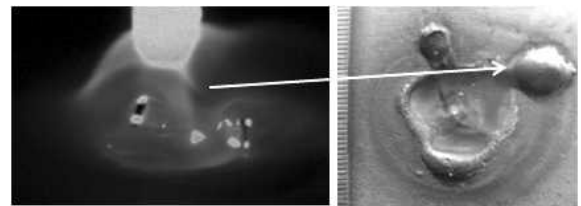


Fig. 8 Effect of gas flow rate(3L/min) on molten pool

보였으며 아크 플라즈마 또한 불안정하게 거동하였다. 본 연구에서는 2L/min의 가스 유량에서 용적(molten drop) 형태로 용융지를 이탈되는 현상 없이 가장 깊은 용입을 가져왔다.

3. GHTA 점용접 열원 모델링

열원의 모델링을 위해서는 아크 플라즈마로부터 모재로 전달되는 에너지 평형을 알아야 한다. 실제 아크에서 양극(anode)으로 전달되는 에너지(Q_a)는 전자의 유동에 의한 에너지(Q_e), 플라즈마에서 전달되는 전도 및 대류 에너지(Q_c) 그리고 플라즈마의 복사에너지(Q_r)로 크게 세 가지로 나누어지며 그 관계는 다음의 식 (1)과 같다.

$$Q_a(r) = Q_e(r) + Q_c(r) + Q_r \tag{1}$$

선행 연구에 따르면 전자의 유동에 의해서 전달되는 에너지가 전체 에너지의 약 70% 를 가지고 전도 및 대류로 전달되는 에너지는 25%이며 복사에 의해 모재로 전달되는 에너지는 5% 미만 이라고 보고되고 있으며 무시되기도 한다⁵⁾. 따라서 본 연구에서는 복사에 의해서 모재로 전달되는 에너지를 무시하고 나머지 전자 유동과 전도 및 대류에 의해 전달되는 에너지만을 고려

하면 다음의 식 (2)와 같다^{6,7)}.

$$Q_a(r) = J_a(2.76 + \phi_a) + k_g \frac{T_{a,g} - T_{an}}{\delta} \quad (2)$$

위의 식에서 J_a 는 전류 밀도 ϕ_a 는 일함수 $T_{a,g}$ 는 모재로부터 0.1mm 떨어진 곳의 온도 T_{an} 는 모재의 온도 k_g 는 열전도도 δ 는 anode fall 구역의 거리를 각각 나타낸다. 식을 살펴보면 전자의 유동에 의한 열전달은 전류 밀도 분포를 따르며 전도 및 대류의 열전달은 모재로부터 0.1mm 떨어진 곳의 온도와 모재의 온도 차이의 함수로 이루어져 있음을 알 수 있다. 따라서 CCD 카메라로부터 얻는 광 방출량의 분포가 전류 밀도 및 온도 분포에 비례한다면 광 방출량으로부터 열원의 분포를 획득할 수 있다. 선행 연구에 따르면 특정 파장대의 선 스펙트럼의 강도와 전자 분포와의 관계는 다음의 식 (3)으로 표현할 수 있다⁸⁾.

$$\Delta I_\lambda \approx \text{constant} \Delta \phi_e (\Delta X) \quad (3)$$

위의 식은 특정 파장대의 빛의 강도가 전류 밀도와 비례함을 알려준다. 따라서 모재로부터 0.1mm 떨어진 아크 플라즈마의 광 방출량을 안다면 전자에 의해 전달되는 에너지의 분포를 예측할 수 있다. 전도 및 대류에 의해 전달되는 열에너지의 경우도 광 방출량의 분포로부터 예측가능하다. 강한 빛을 내는 아크 플라즈마의 온도는 아크를 구성하는 입자들이 여기 되었다가 바닥 상태로 전이 되면서 방출하는 복사에너지의 크기에 비례하므로 CCD 카메라로 획득한 이미지의 빛의 강도는 온도 분포와 비례한다고 가정할 수 있다⁹⁾. 그러므로 우리가 획득하는 광 방출량의 분포로부터 복사에 의해 전달되는 에너지를 제외한 전자, 전도 및 대류에 의한 열원의 분포를 획득할 수 있게 된다.

아크 플라즈마의 이미지로부터 광 방출량을 획득하는 방법에는 아벨 역산이 이용되었다. 아벨 역산의 방법은 선행연구를 참고 했다⁹⁾.

아크 이미지로부터 아벨 역산을 이용하여 광 방출량을 구하는 과정은 Fig. 9와 같다. 먼저 CCD 카메라로 이미지 데이터를 획득하고 아벨역산을 위해 필요한 영역을 설정한 뒤 데이터를 정규화 시켜 그레이 레벨로 나타내고 모재에서부터 0.1mm 위의 그레이 레벨의 데이터를 획득하여 아벨역산 과정을 거쳐 광 방출량을 구하게 된다. 이는 곧 열원의 분포와 비례하게 된다.

선행 연구에 의해 측정된 GHTAW 아크 플라즈마의 열원이 가우시안 분포를 따른다는 연구로부터, 획득한 광방출량의 분포를 이용하여 유효 반경을 측정할 후 다

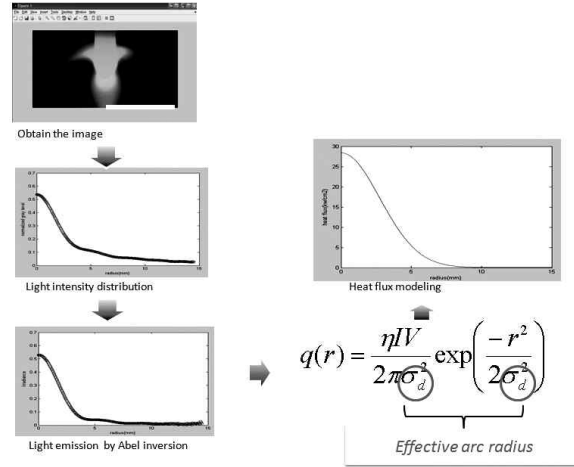


Fig. 9 Flow chart of heat source modeling

음의 식 (4)와 같은 가우시안 열원모델을 수립할 수 있었다⁹⁾.

$$q(r) = \frac{Q}{2\pi\sigma_a^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_a^2}\right) \quad (4)$$

식 (4)에서 Q는 ηIV 이며, η 는 효율을 뜻한다. 저기압 GHTAW의 효율은 0.7-0.86으로 보고되고 있으며 본 연구에서는 0.8을 택하여 모델링을 실시했다¹⁰⁾. σ_a 으로 표시되는 아크 유효 반경은 광 방출량의 분포를 면 적분 실시하여 39% 가 되는 지점으로 결정 할 수 있었다. 가스 유량에 0.1, 0.5, 1, 2L/min에 따른 유효반경을 측정할 결과는 Table 2와 같으며 이로부터 계산된 열원의 분포는 Fig. 10과 같다.

Table 2 Effective arc radius(I: 150A, Arc length: 5mm)

Gas flow rate(L/min)	0.1	0.5	1	2
Effective arc radius(mm)	5.45	3.55	2.70	2.30

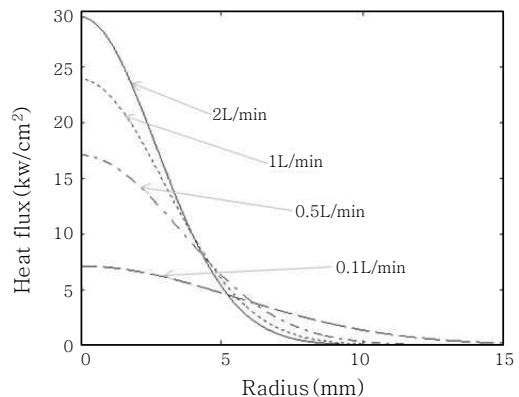


Fig. 10 Effect of gas flow rate on heat flux

4. GHTA 점용접 공정의 용융풀 해석

용융지 해석의 지배 방정식은 질량 보존 방정식, 운동량 보존 방정식과 에너지 방정식이며, 이와 더불어 VOF방법을 이용하여 자유 표면을 표현한다. 아크에 의한 모재의 용융을 모사하기 위해서는 본 논문에서 모델링한 열원과 더불어 용융지의 거동에 영향을 주는 구동력인 전자기력, 아크 압력 그리고 표면 장력을 모델링하여야한다. 지배방정식과 구동력들은 널리 알려진 GTAW 모델을 따른다고 가정하고 선행 연구의 방법을 따랐다¹¹⁾.

열원 및 구동력의 모델링의 타당성을 검증하기 위해 용접 실험과 동일한 조건으로 해석을 실시했다. 저기압 GHTAW의 특징인 과도 아크 구간에 대한 고려가 해석 시 필요하게 된다. 과도 아크 구간에는 아크의 안정적이지 못하고 모재, 전극봉, 콜렉트 바디에서 아크 플라즈마 생겨 모재에 직접적으로 열을 전달하지 못한다. 그러므로 본 연구에서는 5초 동안의 아크 점용접 중 과도아크 구간에 대한 시간을 뺀 시간으로 해석을 실시했다. Table 3은 GHTAW 용접 실험 시 측정된 전압과 과도 아크 시간을 보여 주며 Table 4는 해석에 사용한 용접 변수 및 물성치를 나타낸다.

Fig. 11은 용접 단면과 시뮬레이션 결과를 비교하여 나타낸 사진이다. 0.1L/min의 경우 아크의 유효 반경이 5.45mm로 가장 크고 과도 아크 구간 또한 1.43 sec로 가장 길기 때문에 아크의 용융 효율이 떨어지게 되고 따라서 용융부가 가장 작게 형성된다. 또한 큰 아크 유효 반경으로 인해 상대적으로 용입에 영향을 주는 구동력인 아크 압력 및 전자기력이 표면 장력에 비해 작아져 용입이 얇게 형성된다. 용융지의 거동을 분석해 보면 전자기력 및 아크 압력이 표면 장력에 비해 작으므로 용융지 표면의 중심에서 밖으로 퍼지는 유동 패턴을 가지게 된다. 반면 가스 유량이 늘어남에 따라 아크 반경이 작아지게 되어 결과적으로 전자기력, 아크 압력이 커지게 되어 용입을 깊게 하는 위에서 밑으로 향하

Table 3 Arc voltage and period of transient arc during GHTAW

Length (mm)	Gas (L/min)	Vol (V)	Per (sec)
5	0.1	12.4	1.43
	0.5	11.7	1.25
	1	11.7	0.78
	2	12.2	0.6

*Length: Arc length, Gas: Gas flow rate, Vol: Arc voltage, Per: Period of transient arc

Table 4 Welding condition and thermo-physical properties of material for GHTAW(SUS 304)

Names	Values
Current(A)	150
Voltage(V)	Measured value(Table 3)
Welding time(sec)	Measured value(Table 3)
Thermal expansion(T-1)	4.2e-5
Density(Kg/m ³)	7170
Specific heat(J/kgK)	730
Latent heat of fusion(kJ/kg)	290
Thermal conductivity(W/mk)	22
Liquidus temperature(K)	1727
Solidus temperature(K)	1672
Dynamic viscosity(kg/ms)	0.005
Magnetic permeability(H/m)	1.26e-6
Surface tension(N/m)	1.8
Surface tension gradient(N/mk)	-0.43e-3
Arc length(mm)	5
Gaussian heat distribution parameter(mm)	Measured value(Table 3)
Gaussian pressure distribution parameter(mm)	Measured value(Table 3)
Gaussian current density distribution parameter(mm)	Measured value(Table 3)

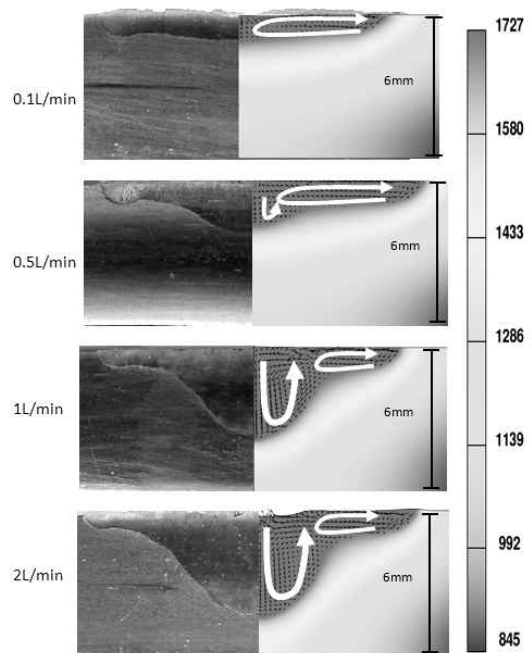


Fig. 11 Comparison of the simulated molten pool to experimental cross section

는 유동이 나타나게 된다. 1L/min 와 2L/min일 때 살펴보면 중심부에서 아래방향으로 향하는 유동이 점점 더 활발해 짐을 확인할 수 있으며 결과적으로 finger penetration의 형태를 가지게 된다. 전체적으로 가스 유량에 대한 용입 및 비드 폭을 실험과 시뮬레이션을 비교 했을 때, 비드의 모양이 비슷함을 보였고, 이는 본 연구에서 제안한 광 방출량으로부터 열원 모델링에 대한 검증을 확인 시켜 주는 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 우주에서의 용접을 위한 기반적인 연구를 위해 저기압 GHTWA 용접을 통해 발생하는 아크 플라즈마의 특성을 이해하고, 열원 모델링의 방법을 제시하여 열원 및 구동력을 모델링 했다. CFD 에 근거한 용융지의 거동 해석을 실시하고 실제 진공에서 용접 실험 시편의 단면과 비교 분석 하여 열원 및 구동력 모델링의 타당성을 검증했다.

1) 저기압 GHTAW 아크 플라즈마의 경우 과도 아크 구간이 나타났으며 이 때 아크가 모재로 집중되지 못하고 불안정함을 보였다. 가스 유량의 증가 시 과도 아크 구간이 줄어들음을 보였다.

2) 가스 유량이 증가할수록 모재의 용입 비드 폭이 넓어지는 효과를 가져왔다. 특히 가스 유량이 2L/min 일 때 용입 및 비드 폭이 가장 컸으며 이 이유로는 아크 플라즈마가 중심부로 보다 집중되기 때문에 아크 압력 및 열원이 모재로 집중되는 효과를 가져 오기 때문이다. 가스유량의 조절을 통해 우주 용접 시 용접 비드 모양을 결정 할 수 있다.

3) CCD 카메라로부터 획득한 이미지를 아벨역산을 통해 광 방출량의 분포로부터 열원을 모델링 하였고 실제 용접 실험과 비교를 통해 본 연구에서 제안한 열원 모델링의 타당성을 검증했다.

후 기

본 연구는 BK21 및 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2009-0085047)을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Y. Suita, Y. Tsukuda, T. Takagi, T. Ohji and K. Masubuchi : Study of Gas Tungsten Arc Welding in Space(1st report), Weld International, 8-4 (1994), 269-273
2. Y. Suita, K. Matsushita, N. Terajima, Y. Tsukuda and K. Masubuchi : Arc Initiation Phenomena by Space GHTA Welding Process Using Touch Start Technique in a Vacuum, Welding International, 20-9 (2006), 707-712
3. Y. Suita, H. Nagai, S. Shinike, Y. Tsukuda, N. Terajima, S. Fujisawa, K. Masubuchi, K. Imagawa and M. Yamashita : GHTA Welding Phenomena of an Aluminum Alloy in a Vacuum, Weld International, 19-4 (2005), 257-261
4. T. Ohji : Characteristics of Hollow Cathode Arc as Welding Heat Source, Welding International, 20-5 (2006), 355-360
5. C. S. Wu and J. Q. Gao : Analysis of the Heat Flux Distribution at the Anode of a TIG Welding Arc, Computational Materials, 24 (2002), 323-327
6. G. Jonsson, T. W. Eagar and J. Szekely : Heat and Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding Using Argon and Helium, Metallurgical and Materials Transactions B, 26 (1995), 383-395
7. M. B. C. Quigley, P. H. Richards, D. T. Swift-hook and A. E. F Gick : Heat Flow to the Workpiece from a TIG Welding Arc, Journal of Physics D: Applied Physics, 6-18 (1973), 2250-2259
8. Z. Wronski, J. Sielanko and J.L. Sullivan : Studies of Light Emission from Cathode Material in the Plasma Phase of a Glow discharge, Journal of Physics D: Applied Physics, 29-6 (1996), 1509-1514
9. Y. T. Cho : A Study on the Analysis and Monitoring of Plasma in Laser Arc Hybrid Welding, KAIST Doctoral Thesis, 2005 (in Korean)
10. V. M. Nerovnyi and A. D. Khakhalev : Hollow Cathode Arc Discharge as an Effective Energy Source for Welding Processes in Vacuum, Journal of Physics D: Applied Physics, 41-3 (2008), 1-8
11. J. H. Cho : An analysis of three-dimensional molten pool in laser-GMA hybrid welding, KAIST Doctoral Thesis, 2007 (in Korean)