

작은 그루브 각을 가지는 맞대기 P-GMA 용접에서의 용접전류에 관한 연구

김 룬 한* · 나 석 주**† · 김 철 희***

*LS전선 설비기술그룹

**한국과학기술원 기계공학과

***한국생산기술연구원 용접접합연구부

A Study on the Welding Current in Butt Joint P-GMA Welding with Acute Groove Angles

Ryoon-Han Kim*, Suck-Joo Na**† and Cheol-Hee Kim***

*Facility Technology Group, LS Cable Ltd, Anyang 431-080, Korea

**Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

***Advanced Welding & Joining Technology Research Team, Korea Institute of Industrial Technology
Incheon 406-840, Korea

†Corresponding author : sjna@kaist.ac.kr

(Received March 24, 2010 ; Revised April 14, 2010 ; Accepted May 7, 2010)

Abstract

The purpose of this paper is to propose a mathematical model of welding current for the P-GMAW by modifying the well known GMAW model. Welding power circuit is simply modeled as a RL electric circuit and solved as an ODE equation. The welding current depends on the joint shape, molten pool and welding parameters. To compare the molten pool effect to the welding current, CFD numerical simulation technique was adopted. Welding experiment is also conducted with the same welding parameters as used in numerical simulations to verify the proposed welding current model. The current model which is considered molten pool shape, is more fit to experiment result.

Key Words : P-GMAW, Groove angle, Dynamic arc behavior, Welding current modeling, Molten pool analysis

1. 서 론

자동용접에서 가장 많이 사용되는 아크센서는 용접신호를 실시간으로 측정하고 이를 이용하여 용접선을 추적한다¹⁾. 따라서 용접 중 발생하는 용접신호를 이해하고 아크센서를 설계하면 보다 높은 정확도를 가지는 자동용접 시스템을 구성할 수 있다. 이러한 아크센서를 사용할 수 있는 용접공정 중 최근에 널리 사용되고 있는 P-GMAW(Pulse-Gas Metal Arc Welding) 방식은 낮은 평균 용접전류로 양호한 용적이행을 하기 때문에 입열량이 적고 스패터가 적은 장점을 가지며 작은 그루브 각을 가지는 맞대기 용접은 용착 금속량이 적어

생산성이 높고 충격치와 피로파괴에 대한 수명이 늘어나는 장점이 있어 최근 적용 빈도가 높아지고 있다²⁻⁴⁾.

이에 따라 본 연구에서는 P-GMAW를 이용하여 작은 그루브 각을 가지는 맞대기 위빙용접에서 용접전원을 RL회로로 단순화하여 동적 아크 거동(Dynamic arc behavior)해석을 통해 아크센서에 사용되는 평균용접전류 신호를 모델링⁵⁻⁸⁾하는 연구를 수행하였다. 용접전류는 초기 용접부 형상과 용접공정 변수의 영향을 받을 뿐만 아니라 용접부의 용융과 용적에 의해 생성되는 용융풀의 거동에 의해서도 변화한다. 따라서 보다 정확히 용접 전류를 모델링하기 위해서는 실시간으로 변화하는 용융풀의 영향을 고려해야하며 본 연구에서는 CFD를 이용하여 용융풀 해석을 수행하였다. 이를 통해 초기

용접부 형상만을 고려했을 때와 실시간으로 변동하는 용접부 형상까지 고려한 경우의 용접전류 신호를 실제 용접 실험에서 구한 펄스전류와 비교하여 전류 모델링의 타당성을 비교검증 하였다.

2. 용접전류 모델링

2.1 동적아크 해석

먼저, P-GMAW에서의 동적 아크를 모델링하기 위해선 용접 전원 회로를 정의해야한다. 이를 위해 Fig. 1에 나타난 기존 GMAW의 모델링에 사용된 회로 구성을 이용하였다⁶⁾.

위 회로에서 변수들의 관계를 나타내기 위해 다음과 같은 실험 또는 이론적으로 얻어진 식들을 이용한다.

먼저, 와이어 용융 특성은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$V_m = aI_{av} + bl_e I_{av}^2 \quad (1)$$

여기서, I_{av} 는 평균전류, a , b 는 용접와이어에 대한 상수이며 l_e 는 와이어돌출 길이, V_m 은 와이어 용융속도이다. 아크의 평균 전압 식으로 나타나는 아크 특성 식은

$$V_{av} = V_{ao} + \alpha I_{av} + \beta l_a \quad (2)$$

이며 여기서, V_{av} 는 평균 아크 전압, l_a 는 아크길이, V_{ao} , α , β 는 전극 종류와 보호가스에 의해 결정되는 상수이다. 용접전원의 회로특성을 고려한 식은 다음과 같다.

$$V_{av} = V_{eo} + RI_{av} - L \frac{dI_{av}}{dt} \quad (3)$$

여기서, V_{eo} 는 open-circuit voltage, R 는 회로 저항, L 은 회로 인덕턴스를 뜻한다. 와이어 송급과 와이

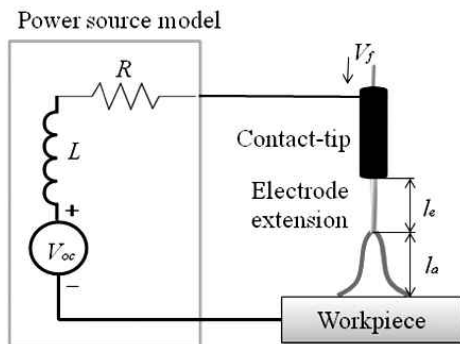


Fig. 1 P-GMAW welding system

어 용융에서의 관계로부터 다음의 관계식을 얻는다.

$$V_m = V_f - \frac{dl_c}{dt} \quad (4)$$

여기서, V_f 는 와이어 송급 속도를 의미한다. 팁-모재간 거리(CTWD)관계에 의해,

$$l_e = l_c - l_a \quad (5)$$

의 관계를 얻는데, 여기서 l_c 는 팁-모재간 거리를 뜻한다. 식(1)~(5)를 정리하여 미분방정식으로 표현하면 아래의 수식이 유도된다⁸⁾.

$$\frac{dI_{av}}{dt} = \frac{(v_f - dl_c/dt) - \{a + b(l_c - K_0 + K_1 I_{av})\} I_{av}}{K_1 + K_2 + bK_2 I_{av}^2} \quad (6)$$

$$\text{단, } (K_0 = \frac{V_{eo} - V_{ao}}{\beta}, K_1 = \frac{R + a}{\beta}, K_2 = \frac{L}{\beta})$$

위의 과정은 앞서 언급한 것과 같이 일반적인 GMAW에서의 동적 아크거동식이다. 따라서 P-GMAW에 적용하기 위해서는 식(1)에서 joule heating 효과를 나타낸 우변 두 번째 항의 평균전류를 유효전류로 바꿔 다음과 같이 표현해야 한다⁷⁾.

$$v_m = aI_{av} + bl_e I_{eff}^2 \quad (7)$$

여기서, I_{eff} 는 펄스 전류에서의 유효전류를 의미하며, 만약 식 (7)에서와 같이 평균전류를 유효전류로 대체할 수 있다면 GMAW에서 얻어진 동적 아크거동 식을 사용할 수 있게 된다. 유효전류와 평균전류 사이의 관계를 알아보려 팁-모재간 거리(CTWD)를 달리하여 실험을 수행하였다. 여기서 얻어진 펄스 전류를 이용하여 평균전류와 유효전류 그리고 이들의 비율 η 을 구해 Table 1에 정리하였다. 이로부터 평균전류와 유효전류의 비는 CTWD와는 무관하지만 와이어 송급 속도에 따라 달라짐을 알 수 있다. 따라서 와이어 송급 속도가 결정되면 평균전류에 비율 η 을 곱하여 유효전류를 구할 수 있으므로 식 (7)과 같이 평균전류를 유효전류로 대체할 수 있으며 기존 GMAW의 동적 거동 식을 사용할 수 있게 된다.

다음으로 토치의 위빙과 모재의 그루브 각을 고려하면, 식(6)에서 시간에 따른 팁-모재간 변화율은 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{dl_c}{dt} = \frac{dl_c}{dy} \frac{dy}{dt} = V_{weav} \times \tan((\pi - \theta)/2) \quad (8)$$

Table 1 Pulsed welding current parameters depending on the CTWD and wire feed rate

Wire feed rate : 6m/min						
CTWD (mm)	I_{av} (A)	I_p (A)	I_b (A)	t_b/t_p	I_{eff} (A)	I_{eff}/I_{av} (r)
14	227.73	392.47	114.60	1.46	265.51	1.17
16	218.61	381.79	110.49	1.51	255.80	1.17
18	217.51	379.54	109.88	1.51	254.46	1.16
20	210.45	369.43	107.29	1.54	246.35	1.17
22	205.47	363.60	105.34	1.58	240.94	1.17
24	199.94	354.75	102.73	1.59	234.58	1.17

Wire feed rate : 8m/min						
CTWD (mm)	I_{av} (A)	I_p (A)	I_b (A)	t_b/t_p	I_{eff} (A)	I_{eff}/I_{av} (r)
14	281.14	404.38	162.77	1.04	305.98	1.09
16	282.51	405.91	166.16	1.06	306.87	1.09
18	278.01	396.87	160.79	1.01	302.03	1.09
20	274.98	395.18	161.00	1.05	298.85	1.09
22	265.34	381.74	155.33	1.06	288.46	1.08
24	260.87	379.95	151.61	1.09	284.72	1.09

여기서, V_{weav} 는 토치 위빙속도를, θ 는 그루브 각도를 의미한다. 식 (7), (8)을 고려하여 식(6)을 P-GMAW에 맞도록 다시 유도하면 최종적으로 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dI_{av}}{dt} = \frac{(v_f - V_{weav} \tan((\pi - \theta)/2)) - \{a + br_1^2(I_c - K_0 + K_1 I_{av})\} I_{av}}{K_1 + K_2 + br_1^2 K_2 I_{av}^2} \quad (9)$$

위의 식 (9)로부터 와이어 송급속도, 위빙속도, 팁 모재간 거리, 그루브 각도를 알면 나머지 계수들은 상수이므로 시간에 대한 미분방정식을 풀어 용접전류를 모델링 할 수 있게 된다. 참고로 위 미분방정식을 풀기 위해 Runge-Kutta 4th order의 수치해석적 방법을 이용하였다.

2.2 전류모델과 실험결과 비교

Table 2와 같이 용접전원 특성변수와 용접공정변수를 설정하고 그루브 각과 루트간격을 달리하여 평균전류를 상미분 방정식을 풀어 수학적으로 구하였다. 단, 단순 수학모델에는 용접중의 용융풀의 형상을 알 수 없으므로 용접부의 변화는 무시하였고 용접부의 초기 형상이 계속 유지된다고 가정하였다.

비교실험에서는 synergic pulse 전원장치 및 와이어 송급장치를 이용하였고 용접전류신호 측정을 위해 100A/V

Table 2 Welding current modeling parameters

a	0.2308/wire area	R	0.008 Ω
b	5.96E-5/wire area	V_f	100mm/s
a	3.07E+2	V_{co}	63V
β	0.992+0.0012 I_{av}	V_{ao}	17.22V
V_{weav}	10mm/s	V_{wetf}	4mm/s

의 hall sensor를 사용하여 2kHz로 샘플링 하였다. 용접와이어는 YGW12규격을 사용하고 보호가스는 Ar10%CO₂의 혼합가스를 사용하였다. 용접부는 루트간격을 3, 7mm로, 그루브 각을 45, 60°로 각각 달리 하였다. 실험에서는 P-GMAW용접을 수행하였으므로, 평균 전류를 얻기 위해 10Hz 저대역 필터를 사용하여 평균전류를 구하고 이를 서로 비교하였다.

수치 모델링 결과와 실험결과를 Fig. 2부터 Fig. 5에 나타냈다. 이를 통해 루트간격이 7mm인 경우 간격이 충분히 넓어 실시간으로 변동하는 용융풀의 형상을 고려하지 않은 전류 모델링으로도 비교적 유사하게 예측되었다. 하지만, 간격이 3mm으로 상대적으로 작은 경우 실제 용접에서 용융풀이 좁고 높게 개선부에 형성되므로 평균전류의 최소값이 모델링과 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이로부터 용융풀의 변화가 심하지 않은 경우 기존 모델링 식으로도 P-GMA 위빙 용접에서의 평균전류 변화를 예측할 수 있지만, 간격이 좁아 용융풀의 변화가 심한 경우에는 용융풀의 형상을 고려하여야 함을 알 수 있다. 추가적으로 간격이 좁아지면 실제 실험에서의 평균전류 신호가 느려지고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 위빙 방향이 전환될 때 즉각적으로 방향전환이 이뤄지는 것이 아니라 짧은 시간 동안의 지연이 발생하고 그것이 누적되기 때문이다.

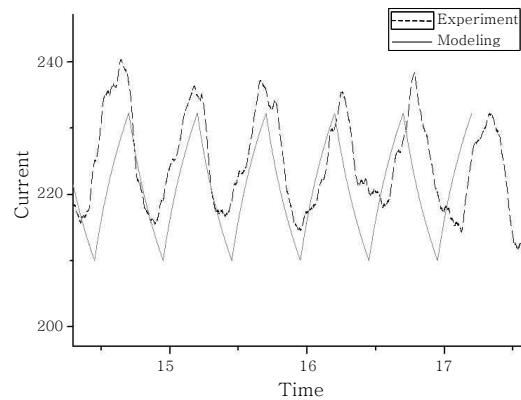


Fig. 2 Welding current waveform for 3mm root gap and 60° groove angle

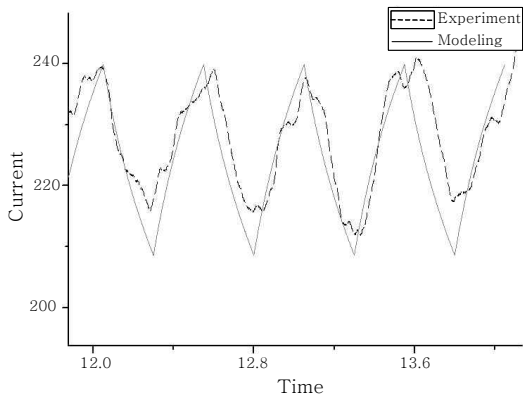


Fig. 3 Welding current waveform for 3mm root gap and 45° groove angle

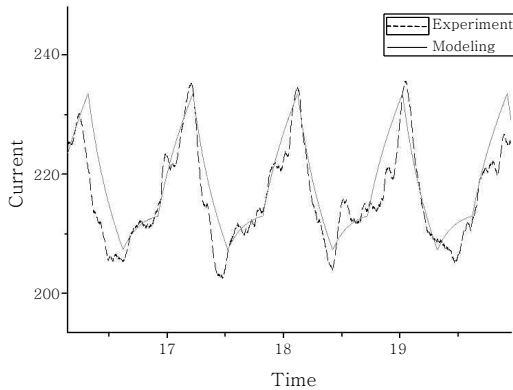


Fig. 4 Welding current waveform for 7mm root gap and 60° groove angle

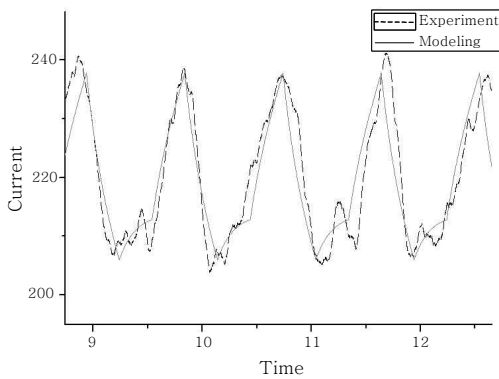


Fig. 5 Welding current waveform for 7mm root gap and 45° groove angle

3. 해석을 통한 용융풀 형상 고려

3.1 용융풀 해석

앞선 2.2장에서 전류모델링 결과와 실험 결과의 비교를 통해 용접진류 값이 용융풀 형상에 영향을 받음을

확인하였다. 따라서 용접진류를 정확하게 예측하기 위해선 실시간으로 변하는 용융풀 형상 정보를 알고 있어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 해석을 통해 용융풀 형상을 예측하였다. 해석에는 자유표면을 고려하는 전산유체역학 상용프로그램인 Flow3D를 사용했으며 포트란 유저서브루틴을 통해 아크열원, 전자기력, 아크압력과 같은 구동력과 경계조건을 고려했다. 고려된 구동력과 경계조건은 기존 알려진 GMAW 및 P-GMAW 유동해석에서 사용한 식을 적용하였다⁹⁻¹²⁾. 기타 해석 조건은 실제 용접선추적에 사용되는 공정변수를 그대로 적용하였다. 충분한 횟수의 위빙을 고려하기 위해 4초간 용접공정을 해석했으며 이때 계산시간으로 약 16시간이 소요되었다. Fig. 6~7은 3mm의 루트간격과 60° 그루브 각을 가지는 맞대기 용접에서의 위빙에 따른 용융풀의 해석결과를 나타내며 각각 용접토치가 왼쪽 및 오른쪽 끝단에 위치한 경우의 절단면을 나타내고 있다. Fig. 8은 해석과 동일한 조건으로 실제 용접 실험한 시편의 단면을 나타내며 용융부가 해석결과와 유사하게 형성되고 있음을 알 수 있다.

3.2 전류모델과 실험결과 비교

해석을 통해 계산된 실시간으로 변화하는 용융풀 형

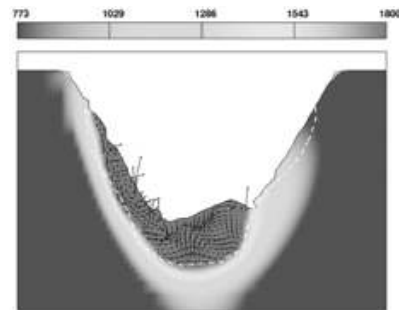


Fig. 6 Numerical welding simulation result- Welding torch is positioned left end of groove

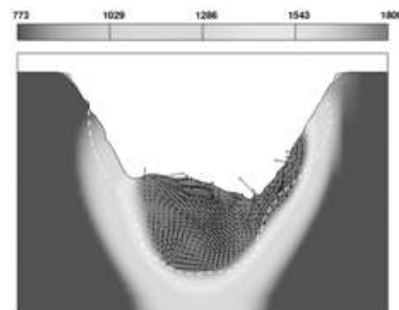


Fig. 7 Numerical welding simulation result- Welding torch is positioned right end of groove



Fig. 8 Welding experiment result

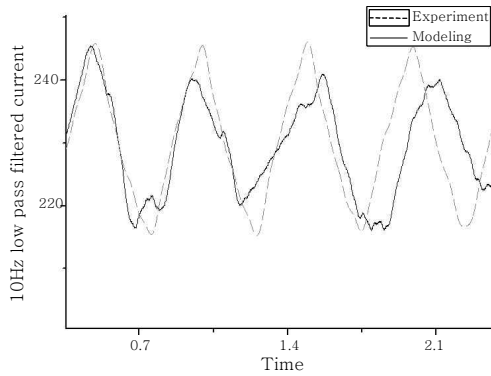


Fig. 9 Welding current waveform for 3mm root gap and 45° groove angle after model modification with weld pool

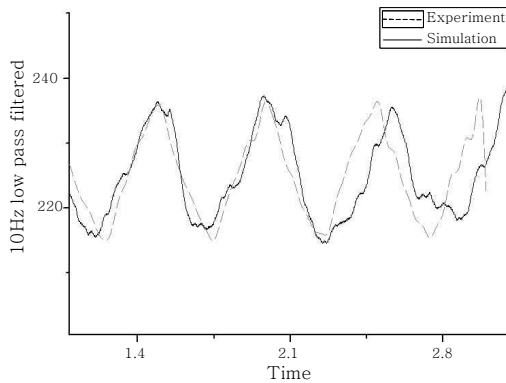


Fig. 10 Welding current waveform for 3mm root gap and 60° groove angle after model modification with weld pool

상을 고려하여 평균용접전류를 다시 계산하고 이를 Fig. 9~12에서 실험결과와 비교하였다. 결과적으로 루트간격이 큰 경우와 작은 경우 모두 비교적 정확히 파형을 예측하였다.

Fig. 2~5에서 용접부 초기형상이 변화 없이 계속 유지된다고 가정한 경우와 달리, Fig. 9~12에서와 같이 변동하는 용융풀의 형상을 고려했기 때문에 파형이

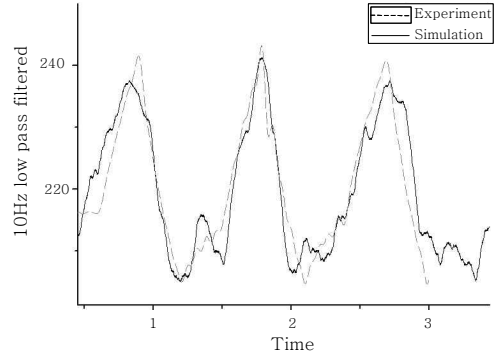


Fig. 11 Welding current waveform for 7mm root gap and 45° groove angle after model modification with weld pool

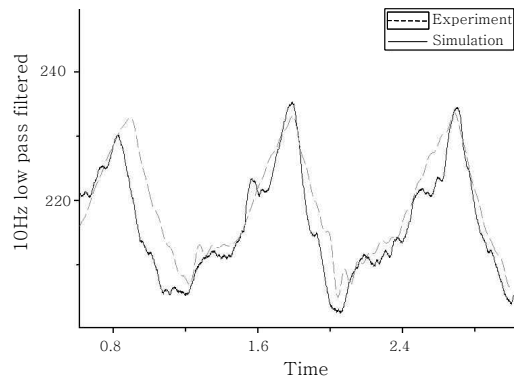


Fig. 12 Welding current waveform for 7mm root gap and 60° groove angle after model modification with weld pool

고르지 않고 용융풀의 형상에 따라 변하게 된다. 이로 인해 용접전류파형의 형상과 최대, 최소치의 예측에 있어서 용융풀을 고려한 해석모델이 실험치와 더 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

이 결과로부터 용접 공정조건에 따라 용융풀이 용접전류에 미치는 영향을 알 수 있고 용융풀의 영향이 클수록 아크센서의 민감도는 낮아지기 때문에 용융풀 해석을 통해 미리 예측된 용융풀 형상을 이용한다면 공정조건에 맞는 아크센서 개발에 도움이 될 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 P-GMAW를 이용한 작은 그루브 각을 가지는 맞대기 위빙용접에서의 용접전류 모델링하기 위해 기존 GMAW에서의 동적 아크 거동식을 이용했으며 모델링 결과를 실험과 비교하여 그 타당성을 검증하였다. 또한 보다 정확한 용접전류 예측을 위해 CFD를 이용한 해석을 통해 용융풀의 거동이 용접전류에 미치

는 영향을 규명하였다.

1) 맞대기 위빙용접에서 용접전류는 용접부 형상에 많은 영향을 받는다. 그루브 각이 작은 경우에는 용융 풀의 형상이 용접전류에 큰 영향을 미친다.

2) 루트간격이 작은 경우 용융풀의 영향을 더 크게 받고 루트간격이 큰 경우 용융풀이 얇게 형성되어 비교적 그 효과가 작다.

3) 용융풀 형상을 고려한 수학적 용접전류 모델은 동일조건 실험결과와 매우 유사하다. 제안된 용접전류 모델은 아크센서의 개발에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 예상되며 향후 용접속도, 위빙속도, 와이어 송급 속도 등을 달리한 해석 및 실험을 통해 제안된 모델을 보다 구체화할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 BK21, 지식경제부 기술개발 사업(생산기술연구원 위탁과제) 및 한국연구재단의 지원(No. 2009-0085047)을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. G. E. Cook : Robotic Arc Welding : Research in Sensory Feedback Control, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 30-3 (1983), 252-268
2. F. Matsuda, M. Ushio and Y. Tanaka : Metal Transfer Characteristics in Pulsed GMA Welding, Transactions of JWRI, 13-2 (1983), 9-17
3. S. W. Kang, C. S. Yang and Y. T. Shin : A Study on the Effect of Groove Type on the Strength of Butt Welded Joint, Proceedings of Korean Welding and Joining Society, 2 (1995), 242-247 (in Korean)
4. T. L. Teng, C. P. Fung and P. H. Chang : Effect of Weld Geometry and Residual Stresses on Fatigue in Butt-welded Joints, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 79-1 (2002), 467-482
5. C. H. Kim and S. J. Na : A Study of an Arc Sensor Model for Gas Metal Arc Welding with Rotating Arc Part 1: Dynamic Simulation of Wire Melting, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture, 215-9 (2001), 1271-1279
6. C. H. Kim and S. J. Na : A Study on an Arc Sensor Model for Gas Metal Arc Welding with Rotating Arc Part 2 : Simulation of an Arc Sensor in Mechanically Rotating Gas Metal Arc Welding, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture, 215-9 (2001), 1281-1288
7. W. S. Yoo : A Study on Sensors for Automatic Welding of 3-D Seam in Ship Hull Assembly, KAIST Doctoral Thesis (2004) (in Korean)
8. H. Nomura : Sensors and Control Systems in Arc Welding, Chapman and Hall, (1984), 216-222
9. M. H. Cho, Y. C. Lim and D. F. Farson : Simulation of Weld Pool Dynamics in the Stationary Pulsed Gas Metal Arc Welding Process and Final Weld Shape, Welding Journal, 85-12 (2006), 271-283
10. J. H. Cho : An Analysis of Three-dimensional Molten Pool in Laser-GMA Hybrid Welding, KAIST Doctoral Thesis (2007) (in Korean)
11. S. Kou and D. K. Sun : Fluid Flow and Weld Penetration in Stationary Arc Welds, Metallurgical and Materials Transaction A, 16-1 (1985), 203-213
12. A. Kumar and T. Debroy : Calculation of Three-dimensional Electromagnetic Force Field during Arc Welding, Journal of applied physics, 94-2 (2003), 1267-1277