

용적 내부의 유동에 의한 모멘텀을 고려한 GMA 용접의 입상용적 이행에 대한 해석

Nabeel Arif* · 이승현* · 강문진** · 유중돈*

*한국과학기술원 기계공학과

**한국생산기술연구원 정밀접합용접팀

Analysis of Globular Transfer Considering Momentum Induced by Flow Within Molten Drop in GMAW

Nabeel Arif*, Seung H. Lee* Moon J. Kang** and Choong D. Yoo*

*Dept. of Mech. Eng., KAIST, Daejeon 305-701, Korea

**Advanced Welding & Joining Team, KITECH, Incheon 406-130, Korea

*Corresponding author ; cdyoo@kaist.ac.kr

(Received March 17, 2008 ; Revised May 13, 2008 ; Accepted August 5, 2008)

Abstract

The static force balance model (SFBM) has been used to analyze drop transfer in gas metal arc welding. Although the SFBM is capable of predicting the detaching drop size in the globular mode with reasonable accuracy, discrepancy between the calculated and experimental results increases with current. In order to reduce discrepancy, the SFBM is modified by considering the momentum of the molten metal flow, which is generated by the pinch pressure. The momentum increases with smaller drop size and becomes compatible to the electromagnetic force. The modified force balance model (MFBM) predicts the experimental results more accurately, and extends its application to the projected mode.

Key Words : Globular transfer mode, Momentum, Flow, MFBM(Modified Force Balance Model)

1. 서 론

GMA(Gas Metal Arc) 용접에서 발생하는 용적이행은 전극 와이어가 용융되면서 형성된 용적이 모재로 이행하는 현상으로서, 용접품질과 아크 안정성에 큰 영향을 준다. 용적이행은 입상용적(globular), 스프레이(spray), 단락이행(short-circuit) 등의 모드로 분류하며, 용접전류와 전압 및 분위기 가스 등의 용접변수에 의해 결정된다. 용적이행을 해석하기 위하여 해석적인 방법과 수치적인 방법이 사용되고 있으며, 대표적인 해석적인 방법으로 입상용적과 스프레이 모드에 적용되는 정적 힘평형 모델(Static Force Balance Model, SFBM)과 핀치 이론(Pinch Instability Theory, PIT)

을 들 수 있다¹⁻³⁾. 최근 수치해석 기법을 적용하여 용적 내부의 유동을 포함한 용적의 이탈을 보다 정확하게 계산하고 있지만^{4,5)}, 수치해석 방법에 사용되는 기법은 매우 복잡하고 계산시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 해석적인 모델은 단순한 식으로 표현되기 때문에 쉽게 사용할 수 있지만, 계산 결과와 실험 결과 사이의 오차를 큰 단점이 있다.

SFBM은 천이전류보다 낮은 전류 영역에서 발생하는 입상용적 모드를 해석하는데 사용되며, 이때 이탈 용적의 직경은 와이어 직경보다 크다. SFBM과 연관된 힘은 표면장력, 중력, 항력(drag force), 전자기력(electromagnetic force)이며, 이 중에서 표면장력은 부착력, 중력과 항력은 이탈력으로 작용한다. 전자기력은 아크가 용적을 덮는 면적에 따라 이탈력 또는 부착력으로

작용하며, 이는 전류와 분위기 가스에 의해 결정된다. SFBM은 전류가 증가하면 실험 결과와의 오차가 증가하는 단점이 있다. 이와 같은 오차를 감소시키기 위하여 용적의 이탈 과정에서 형성되는 테이퍼(taper)를 고려한 해석이 제안되었지만⁶⁾, 이 경우에는 실험을 통하여 감소된 테이퍼의 형상을 측정해야 한다. 용적의 움직임을 고려한 동적 해석도 시도되었지만⁷⁾, 실험 결과와의 오차를 크게 감소시키지 못하였다.

수치해석의 결과로 용적 내부에 발생하는 유동이 용적의 이탈에 영향을 주는 현상을 확인할 수 있지만, SFBM에 유동의 영향을 정량적으로 고려하지 못하고 있다. 본 연구에서는 기존의 SFBM의 오차를 감소시키기 위하여 용적 내부의 유동에 의해 발생하는 모멘텀(momentum)을 고려한 힘평형 모델을 제안하고 이를 검증하였다. 모멘텀은 용적내부의 핀치 압력에 의해 발생한 유동에 의한 힘으로서, 모멘텀을 포함한 수정된 힘 평형 모델 (Modified Force Balance Model, MFBM)을 이용하여 입상용적 모드에서 이탈하는 용적의 크기를 계산하고 실험 결과와 비교하였다^{6,8)}.

2. 유동에 의한 모멘텀의 모델링

SFBM에서 이탈력이 부착력보다 크면 와이어로부터 용적이 이탈하며, 용적의 형상을 구로 가정하면 SFBM은 다음과 같다.

$$F_y = F_g + F_d + F_{em} \tag{1}$$

위의 SFBM과 관련된 힘의 성분들은 다음과 같다.

$$F_y = \pi D_w \gamma \tag{2}$$

$$F_g = \rho g V_a$$

$$F_d = \frac{1}{2} C_D A_p \rho_g u_p^2$$

$$F_{em} = \frac{\mu_o I^2}{4\pi} \left(\ln(\alpha \sin \theta) - \frac{1}{4} - \frac{1}{1 - \cos \theta} + \frac{2}{(1 - \cos \theta)^2} \ln \frac{2}{1 + \cos \theta} \right), \quad \alpha = \frac{D_a}{D_w}$$

이때, D_w 는 와이어 직경, V_a 와 D_a 는 와이어 끝에 부착된 용적의 부피와 직경, γ 는 표면장력 계수, ρ_g 는 가스 밀도 (mass density of Gas), μ_o 는 투자율(permeability), C_D 는 항력계수(drag coefficient), A_p 는 투영 면적 (projection area), u_p 는 플라즈마 가스의 속도, I 는 전류, θ 는 아크가 용적 표면을 덮은 각도를 나타낸다.

Fig. 1에 보인 바와 같이 용적에 전류가 흐르면 축방

향과 반경 방향으로 전자기력이 발생하며, 식(2)의 F_{em} 은 축방향 전자기력을 나타낸다. 반경 방향의 전자기력은 용적의 내부로 향하는 핀치 압력으로서, 압력의 방향이 대칭이므로 서로 상쇄되어 용적의 이탈에 영향을 주지 못한다. 그러나 수치해석으로 계산한 결과를 참고하면 반경 방향의 핀치 압력은 상당히 크고, 이에 의해 축방향으로 유동이 발생한다^{4,5)}. 이와 같은 축방향 유동은 용적 이탈에 영향을 주기 때문에 유동에 의해 발생하는 모멘텀을 고려하여 해석하면 SFBM에 비해 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

Fig. 1에서 반경 방향으로 핀치 압력이 작용하면 용적 내부에 축방향의 유동이 발생한다. 아크가 용적을 덮는 경계인 단면(1)의 유속이 단면(2)의 유속에 비해 무시할 정도로 작다고 가정하면, 단면(1)과 (2)에서 발생하는 압력과 유동의 관계를 Bernoulli 식을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$P_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho u_2^2 \tag{3}$$

위의 식에서 P_1 과 P_2 는 각각 구의 단면(1)과 (2)에서 전자기력과 표면장력에 의한 평균 핀치 압력을 나타내며, 이때 단면(2)의 직경은 와이어 직경과 동일하다. 평균 압력은 다음과 같다.

$$P_1 = \frac{\mu_o I^2}{8\pi^2 R_a^2} + \frac{2\gamma}{R_a}, \quad P_2 = \frac{\mu_o I_2^2}{8\pi^2 R_w^2} + \frac{2\gamma}{R_a} \tag{4}$$

위의 식에서 전류 I_2 는 단면(2)에 흐르는 전류로 다음과 같다.

$$I_2 = \int_{A_{2c}} J_o dA \tag{5}$$

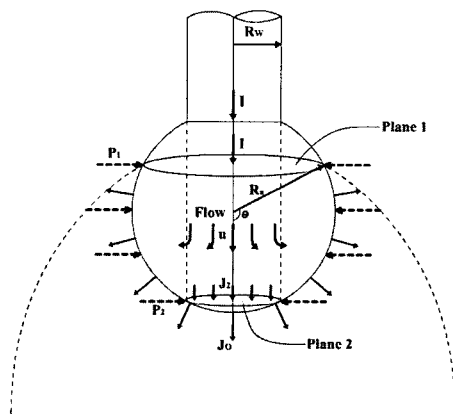


Fig. 1 Schematic of momentum due to flow within molten drop

이때, A_{2c} 는 단면(2)의 아래에 있는 구의 표면적을 나타내고, J_0 는 용적 표면에서 방출되는 평균 전류밀도를 나타낸다. 위의 식(3)~(5)로부터 단면(2)에서 발생하는 유속과 모멘텀을 구하면 다음과 같다.

$$\rho u_2^2 = \frac{\mu_o}{4\pi^2} \left(\frac{I^2}{R_a^2} - \frac{I_2^2}{R_w^2} \right) \quad (6)$$

$$F_{mf} = \dot{m} u_2 = \rho u_2^2 A_w = \frac{\mu_o}{4\pi} \left(\left(\frac{I}{\alpha} \right)^2 - I_2^2 \right) \quad (7)$$

그러므로 SFBM에 모멘텀을 포함시킨 MFBM은 다음과 같다.

$$F_\gamma = F_g + F_d + F_{em} + F_{mf} \quad (8)$$

3. 결과 및 고찰

강과 알루미늄 와이어를 사용하는 경우에 Table 1의 물성치를 이용하여 용적 내부의 유동에 의해 발생한 모멘텀을 계산하였다. 강 와이어에서 아크가 덮인 면적을 나타내는 각도(θ)에 의해 변화하는 모멘텀과 축방향 전자기력과 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 아크의 덮인 각도가 작은 경우에는 전자기력과 모멘텀이 음의 값을

갖는데, 이 조건에서 전자기력과 모멘텀은 부착력으로 작용한다. 그러나 각도가 증가하면 전자기력과 모멘텀이 증가하여 양의 값으로 변화하여 이탈력으로 작용한다. 와이어에 부착된 용적 직경과 와이어 직경의 비가 3로 용적이 큰 경우($D_a/D_w=3$), 전자기력은 모멘텀보다 크고 80도 이상의 각도에서는 일정한 값을 갖는다. 모멘텀은 각도 140도까지 일정한 값을 유지하지만, 각도가 140도 보다 커지면 모멘텀이 증가하여 전자기력과 유사하게 된다. 용적의 크기가 감소하여 용적 직경과 와이어 직경의 비가 1.5인 경우($D_a/D_w=1.5$), 전자기력은 감소하여 모멘텀과 비슷하지만 120도 이상의 각도에서는 모멘텀이 전자기력보다 커진다. 이와 같은 결과로부터 용적의 직경이 크면 모멘텀이 용적의 이탈에 주는 영향은 작지만, 용적의 크기가 감소하거나 아크가 용적을 완전히 덮으면 전자기력과 유사한 정도의 힘으로 용적 이탈에 영향을 준다. 일반적으로 GMA 용접에서 아르곤 또는 아르곤 혼합 가스를 사용하면 아크는 용적의 상당 부분을 덮고 각도 60~120도의 범위에서 전자기력과 모멘텀이 일정한 값을 갖기 때문에 이후의 계산에서는 아크의 덮인 각도를 90도로 고정하였다.

직경 1.2mm의 강 와이어에서 각도를 90도로 고정시킨 조건에서 전류와 용적의 크기가 용적에 작용하는 힘에 미치는 영향을 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 F_t 는 이탈력의 합으로서 표면장력에 의한 부착력과 동일하면 용적이 이탈한다. 전류가 증가함에 따라 전자기력과 모멘텀이 증가하며, 용적의 크기도 이탈력에 영향을 준다. 용적 직경이 1.8mm로 작은 경우(Fig. 3a), 전류가 증가함에 따라 전자기력과 모멘텀이 증가하며, 중력과 항력의 영향은 매우 작다. 용적 직경이 3.6mm로 증가하는 경우(Fig. 3b), 저전류 영역에서는 중력과 항력이 전자기력에 비해 크지만, 전류가 증가함에 따라 전자기력이 가장 크게 된다. 용적이 큰 경우에 전류의 크기와 무관하게 모멘텀은 작은 값을 갖는다. 그러므로 모멘텀은 용적의 크기가 작은 경우에 용적의 이탈에 큰 영향을 준다.

직경 1.2mm의 강 와이어에서 전류를 150A, 아크의 덮인 각도를 90도로 고정시킨 조건에서 용적의 크기가 이탈력에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. 용적 직경이 1.6mm 이하로 작은 경우에는 모멘텀이 전자기력보다 크지만, 용적의 크기가 증가하면 모멘텀은 감소하고 중력과 항력 및 전자기력은 증가하여 용적 직경 3mm에서 용적이 이탈한다.

Fig. 5는 직경 1.2mm인 강 와이어에서 용적이 이

Table 1 Material properties and constants used for calculation

Mass density, steel	$7.86 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$
Al	$2.68 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$
Surface tension coefficient, steel	1.2 N/m
Al	0.6 N/m
Permeability in space, μ_o	$4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$
Drag coefficient, C_D	0.44
Density of argon gas, ρ_g	1.784 Kg/m^3

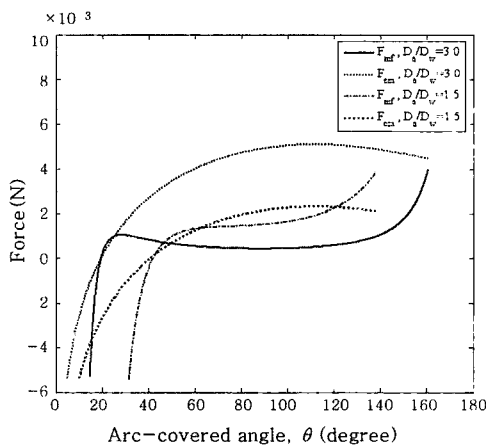
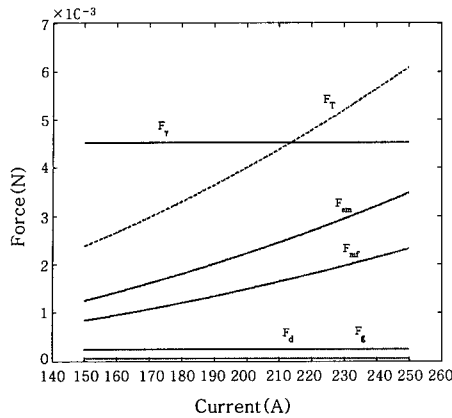
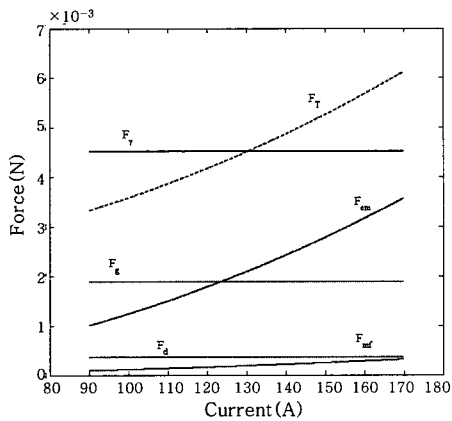


Fig. 2 Effects of arc-covered angle on the momentum and electromagnetic force for different drop diameter ratios



(a) Drop diameter of 1.8mm



(b) Drop diameter of 3.6mm

Fig. 3 Effects of current on force components for fixed drop diameter

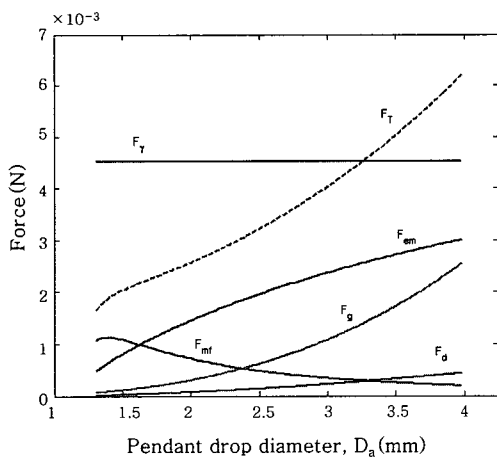


Fig. 4 Effects of drop size on force components at 150A

탈하는 전류값에서 용적에 작용하는 힘의 성분을 비교한 결과이다. 저전류 영역에서는 중력과 항력이 용적의 이탈에 큰 영향을 주지만, 전류가 증가하면서 이탈 용적의 크기가 작아지므로 중력과 항력은 감소한다. 전류가 증가하면 이탈 용적의 크기가 감소하기 때문에 전류

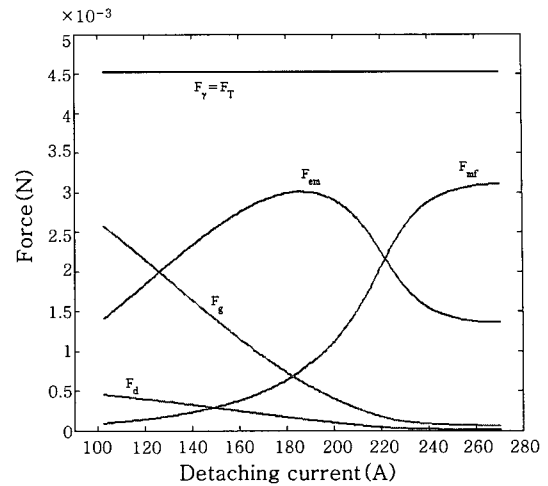
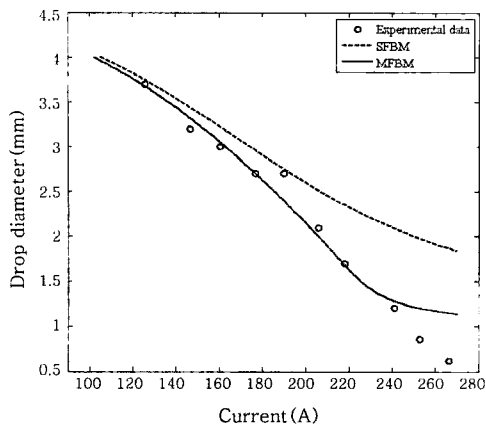


Fig. 5 Effect of current on forces for 1.2mm steel wire

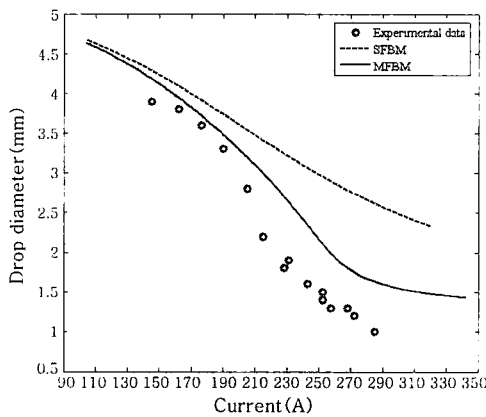
증가에 의한 전자기력은 증가하지만 용적 크기의 감소에 따른 전자기력이 감소한다. 전류가 190A 이상으로 증가하면 전류 증가에 의한 전자기력의 증가보다 이탈 용적 크기의 감소에 따른 전자기력의 감소가 더 커져서 전자기력은 감소하게 된다. 전류의 증가에 따라 모멘텀은 증가하여 180A 부근에서 중력보다 커지고 220A 이상에서는 전자기력보다 커진다.

이와 같은 결과로부터 모멘텀을 추가하여 용적이행을 해석하면, 이탈 용적의 크기가 증가하는 저전류 영역에서는 모멘텀이 감소하므로 MFBM의 결과는 기존의 SFBM과 큰 차이가 없다. 그러나 고전류 영역에서 용적의 크기가 감소하면 모멘텀이 증가하므로 고전류 영역에서 발생하는 SFBM의 오차를 감소시킬 수 있을 것으로 판단한다. 모멘텀은 전류가 천이 전류와 유사한 값으로 증가하면 전자기력과 유사할 정도로 증가하여 용적의 이탈에 큰 영향을 준다. 이와 같은 추세는 직경 1.6mm 인 강 와이어에서도 유사하다.

Fig. 6은 직경 1.2mm와 1.6mm인 강 와이어에서 SFBM과 MFBM를 이용하여 계산한 이탈 용적의 직경(D_d)과 실험값과 비교한 결과이다. MFBM이 SFBM보다 이탈 용적의 직경을 정확하게 예측하였으며, 특히 고전류 영역에서 모멘텀이 증가하여 SFBM의 오차를 감소시킨다. 직경 1.2mm와 1.6mm인 강 와이어의 천이 전류(transition current)가 220A와 270A 부근인 것을 고려하면, MFBM를 이용하면 천이 전류 부근의 용적 직경을 비교적 정확하게 예측할 수 있고 프로젝트드 모드(projected mode)까지 적용할 수 있을 것으로 판단한다. Fig. 7은 직경 1.2mm인 알루미늄 와이어에 대한 결과로서, 100A 이하의 저전류 영역에서



(a) Wire diameter of 1.2mmv



(b) Wire diameter of 1.6mm

Fig. 6 Comparison of predicted drop diameter with experimental data of steel wire

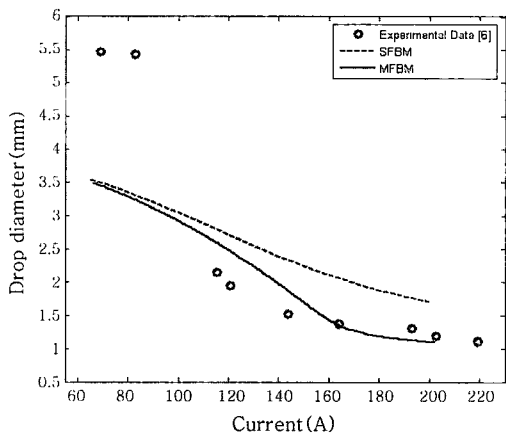


Fig. 7 Comparison of predicted drop diameter with experimental data of Al wire with 1.2mm diameter

큰 용적이 이탈하는 것은 아크가 용적의 밑면에 집중되어 반발이행 모드(repelled mode)가 발생하기 때문이다. 알루미늄 와이어의 경우에도 강 와이어와 유사하게 MFBM은 SFBM에 비해 이탈 용적의 직경을 정확하게 예측하였다.

4. 결 론

기존의 SFBM의 정확성을 향상시키기 위하여 용적 내부의 유동에 의해 발생한 모멘텀을 고려한 MFBM을 제안하였으며, 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 모멘텀을 고려한 MFBM을 이용하여 이탈 용적의 크기를 예측하였으며, 축방향 핀치 압력과 유동에 의해 발생하는 모멘텀을 전류와 아크의 덮인 각도 및 용적 직경의 함수로 유도하였다.

2) 아크가 덮인 각도가 증가하거나 용적의 크기가 감소하면 모멘텀이 증가한다. 이탈 용적의 크기가 증가하는 저전류 영역에서 모멘텀의 영향이 감소하여 용적 이행에 큰 영향을 주지 않는다. 그러나 이탈 용적의 크기가 작은 고전류 영역에서 모멘텀은 전자기력과 유사할 정도로 증가하여 용적 이탈에 큰 영향을 준다.

3) 모멘텀을 고려한 MFBM은 SFBM에 비해 실험 결과를 정확하게 예측할 수 있으며, 특히 프로젝티드 모드와 같은 고전류 영역에서 유용하다.

후 기

본 연구는 한국생산기술연구원의 지원을 받아 수행하였으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Lancaster J. F.: The physics of welding, Oxford: Pergamon (1984)
2. Amson C. J.: An analysis of the gas-shielded consumable metal arc welding system, British Welding J., 41-4 (1962), 232-249
3. Allum C. J.: Metal transfer in arc welding as a varicose instability, J. of Phys. D: Appl. Phys., 18 (1985), 1431 - 1446
4. Choi S. K., Yoo C. D., Kim Y.-S.: Dynamic analysis of metal transfer using VOF method in GMAW, J. of KWS, 15-3 (1997), 168-178 (in Korean)
5. Fan H. G., Kovacevic R.: Droplet formation, detachment, and impingement on the molten pool in gas metal arc welding, Metall. Mater. Trans. B, 30B (1999), 791-801
6. Kim Y.-S., Eagar T.W.: Analysis of metal transfer in gas metal arc welding, Welding J., 72 (1993), 269s-278s
7. Choi J. H., Lee J., Yoo C. D.: Analysis of metal transfer using dynamic force balance model in GMAW, J. of KWS, 19-4 (2001), 399-404 (in Korean)
8. Choi J. H.: A study on metal transfer in gas metal arc welding MS Thesis Hongik Univ. (1998)