

GMA 용접에서 비드형상을 고려한 수평필릿용접부의 온도해석에 관한 연구

조시훈*, 김재웅**

A Study of the Thermal Analysis of Horizontal Fillet Joints by Considering the Bead Shape in GMA Welding

Si Hoon Cho*, Jae Woong Kim**

ABSTRACT

In GMA(Gas Metal Arc)Welding, the weld size that is a locally melted area of a workpiece is one of the most important considerations in determining the strength of a welded structure. Variations in the weld power and the welding heat flux may affect the weld pool formation and ultimately the size of the weld. Therefore, an accurate prediction of the weld size requires a precise analysis of the weld thermal cycle. In this study, a model which can estimate the weld bead geometry and a method for thermal analysis, including the model, are suggested. In order to analyze the weld bead geometry, a mathematical model was developed with transformed coordinates to apply to the horizontal fillet joints. A heat flow analysis was performed with a two dimensional finite element model that was adopted for computing the base metal melting zone. The reliability of the proposed model and the thermal analysis was evaluated through experiments, and the results showed that the proposed model was very effective for predicting the weld bead shape and good correspondence in melting zone of the base metal.

Key Words : GMA Welding(가스메탈아크용접), Weld Pool(용융지), Horizontal Fillet Joint(수평필릿연결부), F. D. M. (유한차분법), F. E. M. (유한요소법)

기호설명

σ = surface tension of the molten metal (N/m)
 ρ = density (kg/m^3)
 θ = rotation angle of the coordinates ($^\circ$)
 P_a = arc pressure (N/m^2)⁴
 r_w = radius of the welding wire (m)
 v_w = welding velocity (m/sec),
 f_r = feedrate of the welding wire (m/sec).
 λ = lagrange multiplier
 $q(r)$ = heat flux density at the weld surface (W/m^2)

Q = arc power (W),
 r_b = effective arc radius (m)
 r = distance from the arc center(m),

1. 서론

GMA(가스메탈아크)용접은 연속적으로 공급되는 전극과 모재사이에 아크를 발생시켜 금속을 용융, 접합시키는 용접법으로써 중공업과 조선산업에서 가장 많이 쓰이고 있는 용접방법중의 하나이다. 아크열은 매우 짧은 시간에 많은 양이 용접부

2001년 1월 26일 접수

* 영남대학교 대학원 기계공학과

** 영남대학교 공과대학 기계공학부

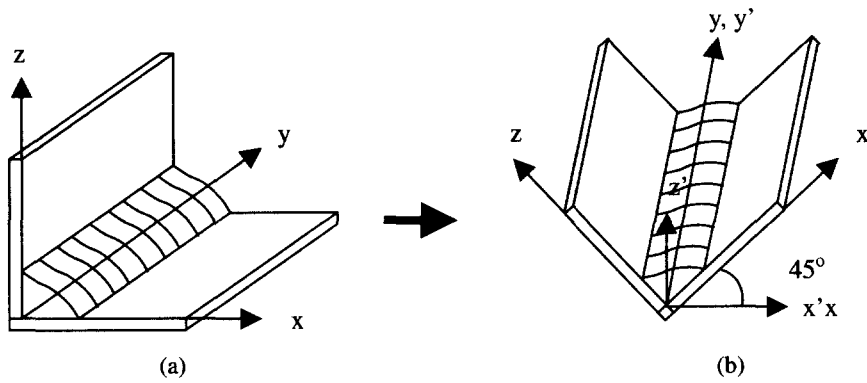


Fig. 1 Horizontal fillet weld and coordinate systems

에 공급되기 때문에 금속은 국부적으로 용융된다. 이렇게 용융된 영역의 크기를 용접부의 크기로 하며, 용접부의 크기는 용접구조물의 강도를 결정하는 매우 중요한 인자 가운데 하나이다. 따라서 정확한 용접부 크기를 예측하기 위해서는 용접 열이력(thermal cycle)에 대한 엄밀한 해석이 요구된다. 용접열원을 포함한 용접 열이력을 해석하기 위한 모델의 중요성은 다른 많은 연구자들에 의해 강조되어 왔다. 그러나 GMA 용접에서는 소모성 전극이 아크열에 의해 용융되어 용융지로의 전달현상이 일어나며 이것은 냉각후 용접비드를 형성한다. 이러한 용접비드는 용접부의 열이력을 해석하는데 있어 많은 장애를 초래한다.^{1,3} 용접중에는 아크압력에 의해 용융지에서의 표면형상이 변형을 하게 되며, 용접비드 최종 형상은 중력, 표면장력, 아크압력, 용접부의 기하학적 형상에 따라 결정된다.

본 연구에서는 용접비드의 형상을 예측할 수 있는 모델과 용접비드를 고려한 열해석을 수행할 수 있는 방법을 제시하였다. 용접비드형상을 해석하기 위해서 수평필릿용접부에 대한 수학적 모델을 개발하였다. 또한 열해석은 2 차원의 유한요소 해석을 통해 수행하였다. 제안된 모델과 열해석의 신뢰성은 실험을 통해 평가하였다.

2. 용융지 표면변형

용접 비드형상을 예측하기 위해서는 용융지에 작용하는 힘들을 고려하여야 하며, 이를 위한 수학적 모델이 요구된다. 용융지의 표면변형에 영향을 미치는 요소로는 중력, 표면장력 그리고 아크압력

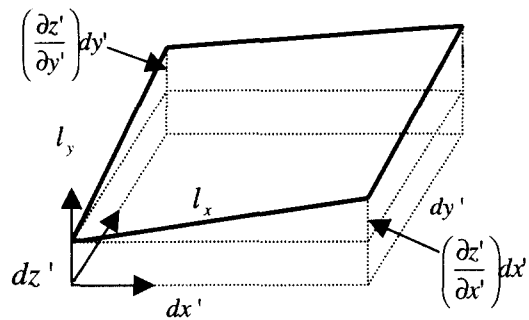


Fig. 2 Surface variations in the weld pool

등이 있다. Fig. 1(a) 에는 일반적인 수평필릿용접부와 좌표계를 나타내었다. 그러나 필릿용접부 수평판의 오버랩, 수직판에서의 언더컷과 같은 과도한 변형이 나타나면 수학적인 모델을 통해서 용접비드형상을 구하기가 어려워진다. 따라서 Fig. 1(b)와 같이 해석 영역을 반시계방향으로 45 도 회전하여 새로운 좌표계를 정의하였다. 아크압력이 작용하는 미소 변형된 용융지 표면(A_s)을 Fig. 2 와 같이 Eqn. (3)으로 근사화 하였다.

$$l_x = \sqrt{(dx')^2 + \left\{ \left(\frac{\partial z'}{\partial x'} \right) dx' \right\}^2} \quad (1)$$

$$l_y = \sqrt{(dy')^2 + \left\{ \left(\frac{\partial z'}{\partial y'} \right) dy' \right\}^2} \quad (2)$$

$$A_s = \iint \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z'}{\partial x'} \right)^2 + \left(\frac{\partial z'}{\partial y'} \right)^2 + \left(\frac{\partial z'}{\partial x'} \frac{\partial z'}{\partial y'} \right)^2} dx' dy' \quad (3)$$

$$\cong \iint \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z'}{\partial x'} \right)^2 + \left(\frac{\partial z'}{\partial y'} \right)^2} dx' dy'$$

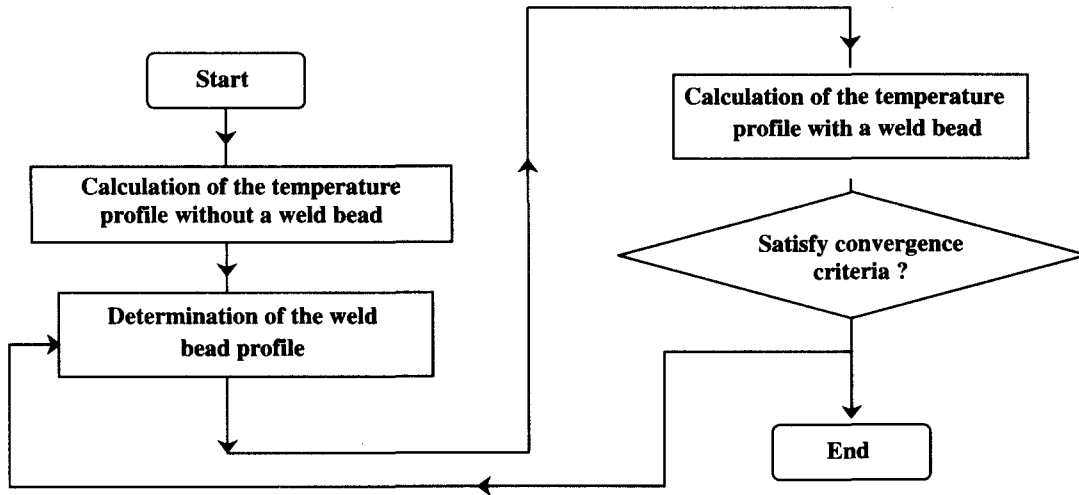


Fig. 3 Flow chart for the calculation of temperature and the weld bead shape

Table 1. Material properties of liquid steel used in mathematical modeling of weld bead geometry

Notation	Density (ρ)	gravity (g)	Surface tension (σ)
Value	7200(kg/m ³)	9.8(m/sec ²)	1.2(N/m)

미소면적 A_s 에 작용하는 표면장력 에너지는 다음과 같이 표시된다.

$$E_s = \sigma \left(\iint \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z'}{\partial x'}\right)^2 + \left(\frac{\partial z'}{\partial y'}\right)^2} dx' dy' \right) \quad (4)$$

중력장에서의 위치에너지(E_g), 아크압력이 용접부 표면을 변형시키는 데 기여한 일(E_a) 은 다음식들로 표현된다.

$$\begin{aligned}
 E_g &= \iiint \rho g z dx' dy' dz' \\
 &= \iiint \rho g [z' \sin \theta - x' \cos \theta] dx' dy' dz' \\
 &= \iint \rho g \left[\frac{1}{2} z'^2 \sin \theta - x' z' \cos \theta \right] dx' dy' \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$E_a = \iint P_a z' dx' dy' \quad (6)$$

여기서 아크압력은 다음식으로 표시된다.⁴

$$P_a = P_{\max} \exp\left(\frac{-r}{2r_b}\right)^2 \quad (7)$$

$$P_{\max} = 7.33I \quad (\text{N/m}^2) \quad (8)$$

아크압력이 작용하는 용융지 표면은 중력장에서의 에너지 평형조건이 만족되어야 하며, 용융지표면에 작용하는 전체에너지는 Eqn. (4), (5), (6) 의 에너지를 모두 합한 것으로, 이를 E 로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 E &= \iint \left[\sigma \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z'}{\partial x'}\right)^2 + \left(\frac{\partial z'}{\partial y'}\right)^2} \right) \right. \\
 &\quad \left. + \rho g \left(\frac{1}{2} z'^2 \sin \theta - x' z' \cos \theta \right) + P_a z' \right] dx' dy' \\
 &\equiv \iint F dx' dy' \quad (9)
 \end{aligned}$$

용융지에 공급된 용융금속의 양은 구속조건으로 사용되며 이는 GMA 용접에서 공급된 와이어 양과 같으므로 다음의 식으로 표현된다.^{5,6}

$$\iint z dx dy \equiv \iint G dx' dy' = \frac{\pi r_w^2 f_r}{v_w} \equiv V_w \quad (10)$$

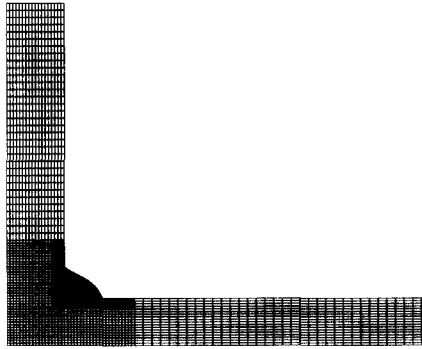


Fig. 4 Finite element model

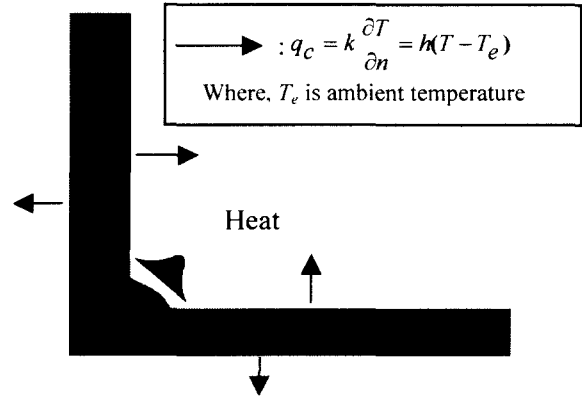


Fig. 5 Boundary conditions for thermal analysis

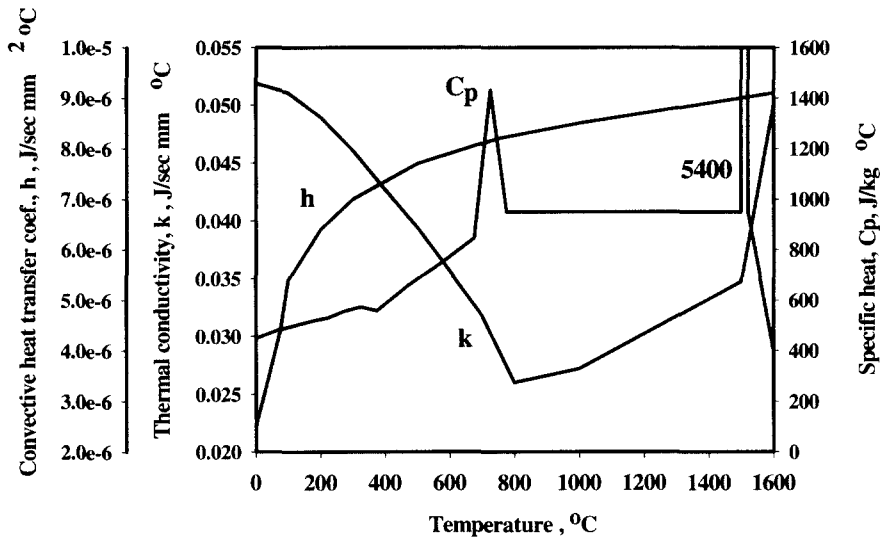


Fig. 6 Material properties used in thermal analysis

Eqn. (10)의 구속조건을 만족하면서 Eqn. (9)의 에너지가 최소화 되는 해가 표면형상을 결정하게 되므로 이 해를 구하기 위해 오일러(Euler) 방정식을 적용하면 다음과 같은 복잡한 형태의 방정식을 얻을 수가 있다.⁷

$$\alpha \left\{ \frac{(1+z_{y'}^2)z'_{x'x'} - 2z'_{x'}z'_{y'}z'_{x'y'} + (1+z_{x'}^2)z'_{y'y'}}{(1+z_{x'}^2+z_{y'}^2)^{3/2}} \right\} = \rho g [z' \sin \theta - x' \cos \theta] - P_a - \lambda \quad (11)$$

비선형 방정식인 Eqn. (11)을 풀기 위해 유한차분법을 이용하였으며, 계산후 계산결과를 Eqn. (8)의 구속조건에 적용하였다. 이 때, 계산결과가 구속조건을 만족하지 못하면 Eqn. (11)의 라그랑지 승수(Lagrange multiplier)를 수정한 후에 계산을 반복하였다. 라그랑지 승수값 λ는 황금분할법(golden section method)을 이용해서 수정하였다.⁸ Eqn. (11)의 해, z'(x',y')는 변환된 좌표계에서 구한 값이기 때문에 이것은 실제 용접비드 현상을 나타내는 z(x,y)로 변환시켜야 한다. 용접비드의 모델링에 사용된 재료의 물성치를 Table 1에 나타내었으며, 2차

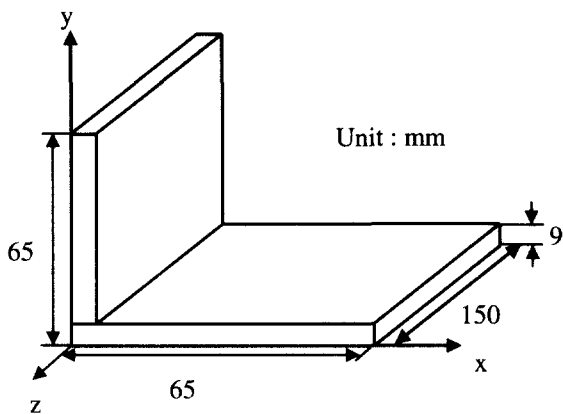


Fig. 7 Specimen size for the experiment

Table 2 Welding conditions for the experiment and the analysis

Current(A)	Voltage (V)	Velocity (mm/sec)
210	26	5
230	27	6
250	29	7

* Base metal : mild steel

* Shielding gas : Ar 80%, CO₂ 20%

* Filler wire diameter : 1.2 mm

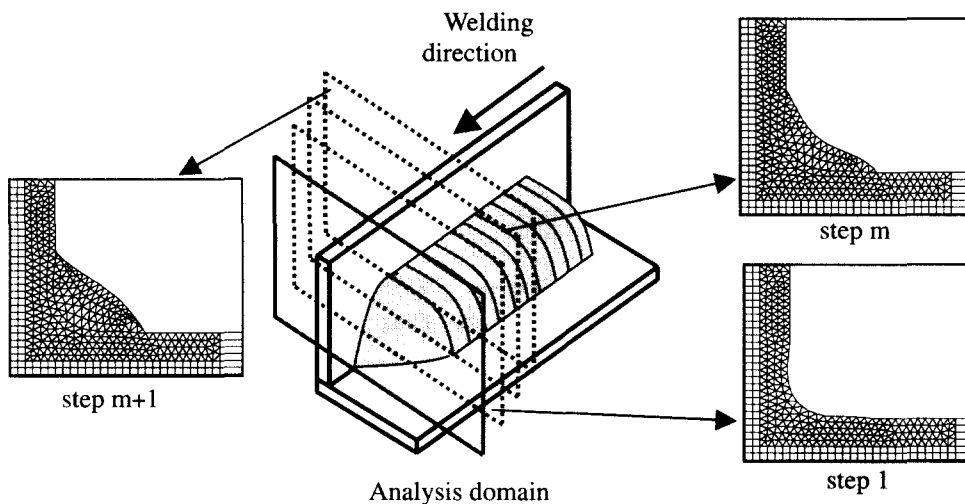


Fig. 8 Two dimensional thermal analysis method considering the weld bead shape

원 열해석과 연관된 용접비드 계산과정을 Fig. 3에 나타내었다.

3. 열해석

3차원으로 계산한 용접비드 형상을 이용해서 2차원 열해석을 수행하였다. 이를 위해 상용 유한요소해석 코드인 'ABAQUS'를 이용하였다. Fig. 4, 5, 6에 해석에 사용된 유한요소모델, 경계조건, 재료의 물성치를 나타내었다. 또한 상변화에 따른

잠열효과도 해석시 고려하였다. 용접중 발생하는 아크열은 Eqn. (12)와 같이 가우시안분포를 갖는 것으로 가정하였다.⁹

$$q(r) = \left(\frac{3Q}{\pi r_b^2}\right) \exp\left\{-3\left(\frac{r}{r_b}\right)^2\right\} \quad (12)$$

제안한 모델과 열해석결과의 검증을 위해 실험을 수행하였으며, 실험에 이용한 시편의 크기 및 용

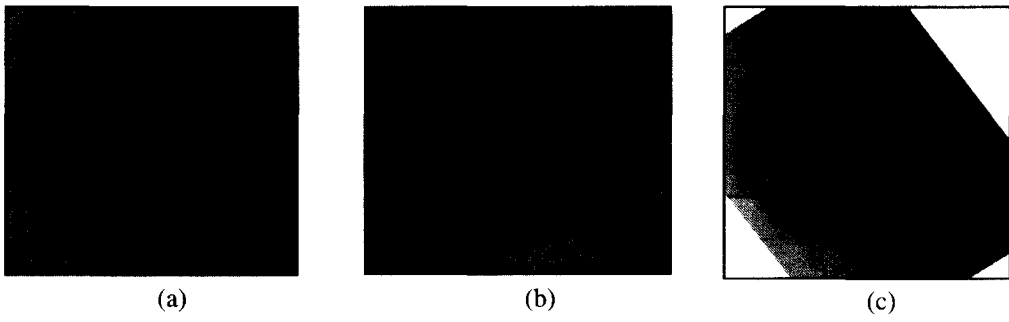


Photo 1 Photographs of weld section

(a) 210A, 26V, 5mm/sec

(b) 230A, 27V, 6mm/sec

(c) 250A, 29V, 7mm/sec

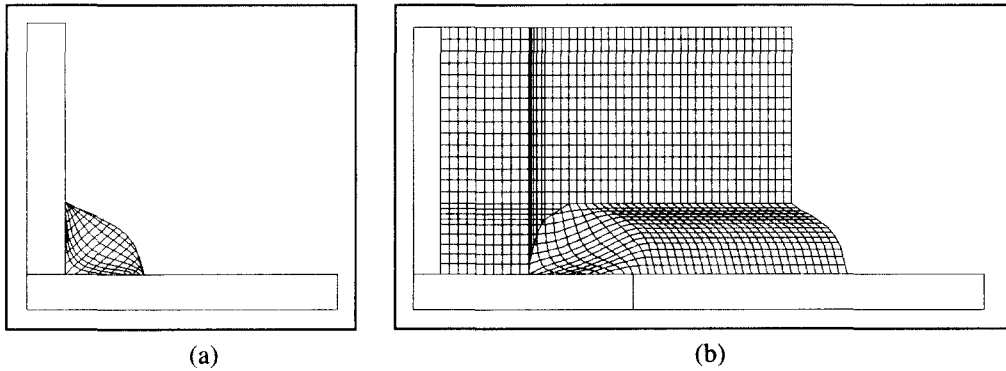


Fig. 9 Calculated weld bead (250A, 29V, 7mm/sec)

(a) Front view (b) Oblique view

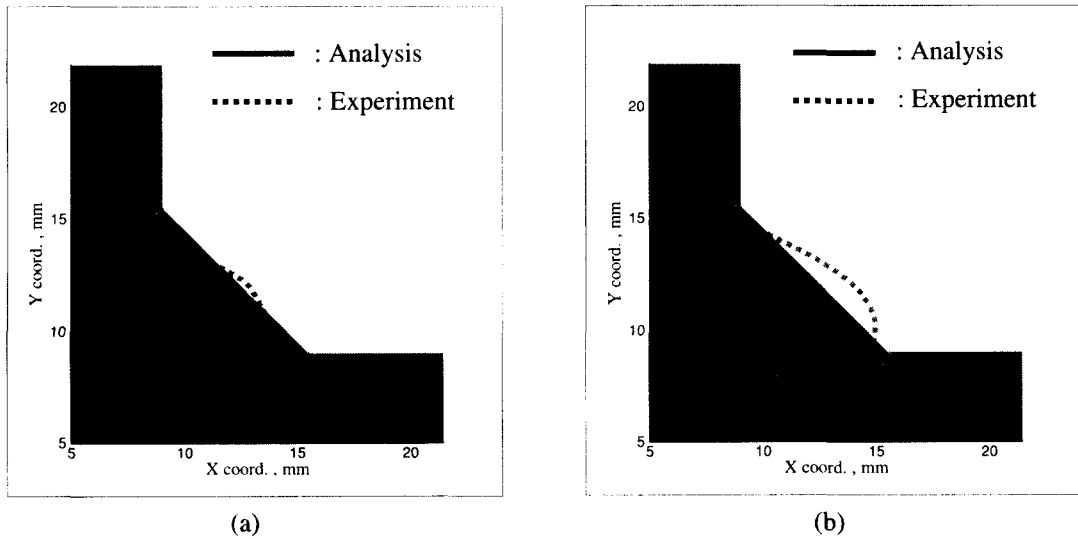


Fig. 10 Comparison of the bead shape and the fusion boundary with analysis using the flat weld bead

(a) 210A, 26V, 5mm/sec

(b) 250A, 29V, 7mm/sec

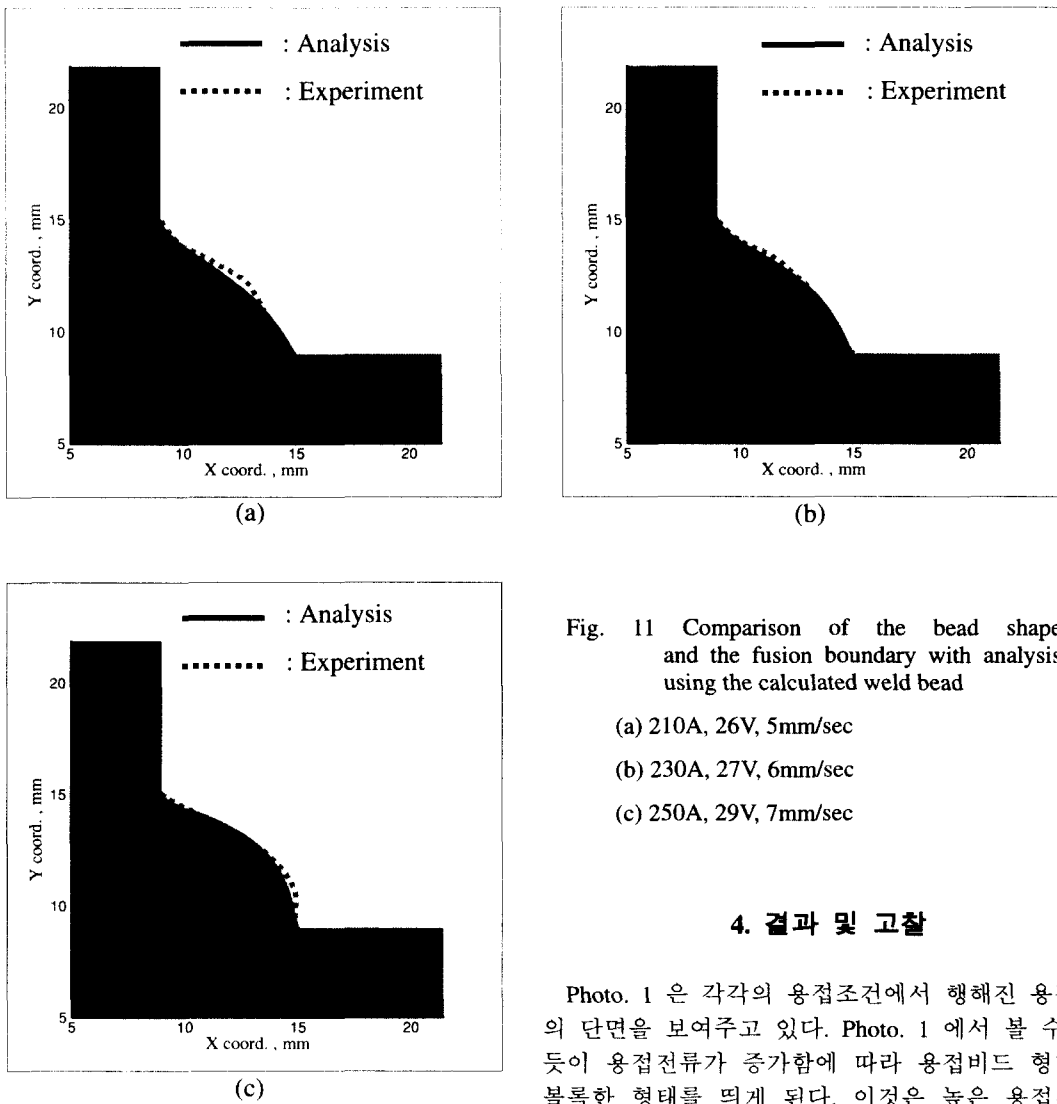


Fig. 11 Comparison of the bead shape and the fusion boundary with analysis using the calculated weld bead

- (a) 210A, 26V, 5mm/sec
- (b) 230A, 27V, 6mm/sec
- (c) 250A, 29V, 7mm/sec

4. 결과 및 고찰

Photo. 1 은 각각의 용접조건에서 행해진 용접부의 단면을 보여주고 있다. Photo. 1 에서 볼 수 있듯이 용접전류가 증가함에 따라 용접비드 형태는 볼록한 형태를 띄게 된다. 이것은 높은 용접전류로 인해 용융지에 많은 양의 용융금속이 전달되기 때문이다. 용융지로 전달된 용융금속은 중력에 의해 필릿용접부의 수직 각장(vertical leg)으로부터 수평 각장(horizontal leg)으로의 유동이 발생하며, 흘러 내려온 용융금속은 모재와 용융지 표면사이의 거리를 증가시키게 된다. 이렇게 증가된 모재와 용융지 표면사이의 거리는 아크열원이 용융지 표면에 가해질 때 모재로의 열전달을 어렵게 한다. 이러한 현상은 필릿용접부 수평판과 수직판에서의 용융깊이가 각각 다르게 나타나는 원인이 되기도 한다. Fig. 9 는 계산에 의해 얻은 비드 형상을 나타낸 것으로 전체적인 용접비드 형상은 실험결과

접조건을 Fig. 7 및 Table 1 에 각각 나타내었다. Fig. 8 은 3 차원 용접비드 형상을 2 차원 열해석에 이용하는 방법을 나타낸 것으로 용접이 진행됨에 따라 용접비드는 고정 해석면을 지나가게 된다. 이것은 용접진행 반대방향으로 해석면이 지나가는 것과 같은 현상이다. 따라서, 본 연구에서는 시간경과에 따라 2 차원 필릿용접부에 요소가 추가되는 방식으로 열해석을 수행하였다.

와 비슷한 양상을 보여준다. Fig 10 은 많은 연구자들이 GMA 용접에서의 열해석 수행시 일반적으로 채택하는 3 각형 형태의 평면 용접비드를 적용해서 열해석을 수행한 결과인데 실험결과와 비교해 보았을 때, 비드형상과 더불어 용융부의 크기에 있어서 많은 차이를 보이고 있다.^{10, 11} 그러나 Fig. 11 에서 보듯이 본 연구에서 제안한 모델과 방법을 이용해서 해석을 수행한 결과 용접비드 형상과 용융부가 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 비록 Fig. 11(c) 경우 해석결과와 실험결과에 오차가 있으나 앞서 평면비드를 적용한 경우와 비교해 보았을 때, 오차가 상당히 감소했음을 알 수 있다. 특히, GMA 용접공정의 열해석시 용접비드 형태를 고려한다면 필릿용접부의 수평판과 수직판에서 용융깊이의 차이를 확인할 수가 있다.

5. 결론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 수평필릿용접부의 용접비드의 형상 및 용융부의 크기를 예측하기 위한 수학적 모델과 해석 방법을 제시하였다.
- (2) 제안한 모델과 방법을 이용하여 해석한 결과 용접비드의 형상과 용융부의 크기를 효과적으로 예측할 수 있었다.
- (3) 이상의 연구결과로 보아 GMA 용접공정에서 용접비드형성은 용접부의 열이력에 중요한 역할을 함을 알 수 있었고, 제시된 모델을 이용해서 열해석을 수행하였을 때, 실험결과와 유사한 결과를 얻을 수가 있었다.

참고문헌

1. J. Goldak, A. Chakravarti and M. Bibby: Metallurgical Transactions B, Vol. 15B, pp. 299-305, 1984.
2. E. Pardo and D. C. Weckman: Metallurgical Transactions B, Vol. 20B, pp. 937-947, 1989.
3. S. Kumar and S. C. Bhaduri: Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 25B, pp. 435-441, 1994.
4. M. Lin and T. W. Eagar: Metallurgical Transactions B, Vol. 17B, pp. 601-607, 1986.
5. 문형순, 나석주, "수평필릿용접의 용접부 형상을 예측하기 위한 수학적 모델링 및 열전달 해석에

- 관한 연구," 대한용접학회지, Vol. 14, No. 6, pp. 393-402, 1996.
6. J. W. Kim and S. J. Na: Welding Journal, Vol. 74, No. 5, pp. 141s-152s, 1995.
7. D. E. John: 'Mathematical Methods in Physics and Engineering', McGraw-Hill, 1969.
8. S. Jasbir and J. S. Arora: 'Introduction to Optimum Design', McGraw-Hill Book, Co., Singapore, 1994.
9. V. Pavelic, R. Tanbakuch, O. A. Uyehara, and P. S. Myers: Welding Journal, Vol. 48, No. 7, pp. 295s-305s, 1969.
10. P. Michaleris and X. Sun: Welding Journal, Vol. 76, No. 11, pp. 451s-457s, 1997.
11. P. Tekriwal and J. Mazumder: Welding Journal, Vol. 67, No. 7, pp. 150s-156s, 1988.