

GMA 용접공정에서 용접부의 표면 및 이면의 온도분포

Temperature distribution of top and back surface in GMA welding process

김영선, 조형석

한국과학기술원 기계공학과(Tel: 042-869-3253; Fax: 042-869-3210; E-mail : yskim@lca.kaist.ac.kr)

한국과학기술원 기계공학과(Tel: 042-869-3213; Fax: 042-869-3210; E-mail: hscho@lca.kaist.ac.kr)

Abstracts : In arc welding processes, because of the complexity and nonlinearity of heat transfer phenomena, it is often difficult to design an effective control system based upon an exact mathematic model. In this paper, we simulated the welding process for various welding conditions and positions to investigate the variations of temperature distribution for those cases. Those will be used as a pre-information for developing quality control system for arc welding process.

Keywords: arc welding process, mathematic model, heat conduction, temperature distribution, deviation

1. 서론

GMA 용접공정은 소모성 전극과 모재사이에 고전류를 가할 때 발생하는 전기적인 아크를 열원으로 하여 모재와 전극을 녹여서 용접물을 결합하는 금속결합법의 하나이다. 최근 생산성 향상을 위하여 용접공정의 자동화가 실용분야 특히 GMA 용접 공정에서 활발히 진행되고 있는데, 그 이유는 소모성 전극의 공급을 자동화하기가 용이하기 때문이다. 그러나, 현수준의 용접자동화는 순간순간의 용접상황에 대처할 수 있는 완전한 자동화에는 이르지 못하고 단지 결정된 용접 조건하에서 주어진 경로의 용접을 실시하는 수준에 머물러 있는 실정이며, 이는 예기치 못한 상황의 변동의 대처를 위한 용접품질 감사가 이루어지지 못한 때문이다.

용접품질 관점에 따라 기계, 금속성질상 여러가지로 정의할 수 있으나, 용접부의 기계적인 강도를 보장한다는 면에서는 기본적으로 용융부의 크기로 나타낼 수 있다. 기존에는 용접품질을 평가하기위해서 다양한 비파괴방법들이 이용되어 왔으나, off-line 기법들이기 때문에 비용손실이 매우 컸다. 본 연구에서는 추후 용접품질을 제어하기위한 기초연구로서 용접부의 품질이 용접부의 표면 및 이면의 온도와 밀접한 관련이 있다는 가정하에 용접부의 여러위치의 온도분포를 구하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 Rosental[1] 에 의해서 제시된 점열원 온도분포 해석을 유한한 두께의 재료로 확장한 Boo[2]의 모델을 이용하여 용접토치 전후면의 표면 온도분포를 시뮬레이션하고, 분석한다. 얻어진 시뮬레이션 결과는 추후 용접부의 온도분포를 가정하는데 사용하여 실제제어시스템에 이용한다.

2. 용접부의 해석적 모델

용접공정에서 용접부는 아크발생시 생성되는 고열이 모재로 전도되어 발생한다. 이러한 열전도 현상에 근거하여, Boo[2]는 유한한 두께를 가지는 용접부의 해석적인 모델을 구하였다. 이 모델의 특징은 표면에서의 열 손실을 고려하고, 가우시안 열원분포를 가정하였으며, 이러한 열전도모델이 실제 아크용접시의 모재의 온도분포를 적절히 보여줌을 실험과 비교하여 증

명하였다. 모델의 전개과정은 다음과 같다. 용접부의 지배방정식은 아래와같이 선형화된 열전도 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] T, \quad \alpha = \frac{\kappa}{\rho c} \quad (1)$$

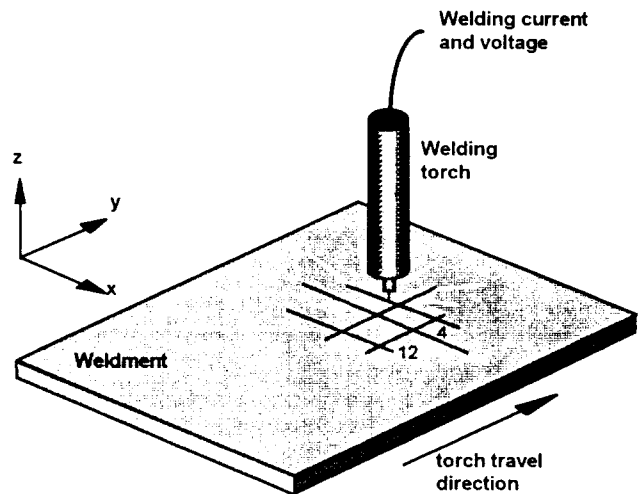


그림 1. 해석을 위한 용접공정의 좌표계

여기서, α 는 열확산 계수이며, κ 는 열전도율, ρ 와 c 는 각각 모재의 밀도와 비열을 나타낸다. 지배방정식의 좌표계를 그림 1에 나타내었다. 그림에서 X,Y,Z는 용접시편상의 한점에 고정된 좌표계이고, x,y,z는 아크의 중심($X_a, Y_a, 0$)를 원점으로 하는 이동 좌표계이다. 표면에서의 경계조건은 표면에서의 열손실을 고려하여 다음과 같이 주어진다.

$$-k \frac{\partial T(x, y, 0)}{\partial z} + h_1 [T(x, y, 0) - T_0] \quad (2)$$

$$k \frac{\partial T(x, y, d)}{\partial z} + h_2 [T(x, y, d) - T_1] \quad (3)$$

여기서, h_1, h_2 는 열대류 계수이고, d 는 재료의 두께이다. 위 (2)식 용접부 윗면에서의 경계조건으로서 보호가스의 영향으로 인한 강제 대류현상을 반영하며, (3)식은 모재의 아래면의 경계

조건으로서 자유대류현상을 반영하고 있다. 위의 지배 방정식과 경계조건을 점열원의 경우에 적용하여 변수분리법과 Green's function method를 사용하고, z방향에 대해서는 Eigen function method를 사용하여 아래의 해를 얻었다.

$$T(x,y,z,t) - T_0 = \frac{q}{2\pi kd(t-t_1)} \exp\left[-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{4\lambda(t-t_1)}\right] \times \sum_{n=0}^{\infty} A_n \exp\left[-\mu_n^2(t-t_1)\right] \left[\cos\left(\frac{\mu_n}{\sqrt{\alpha}}z\right) + \frac{\beta\sqrt{\alpha}}{\mu_n} \sin\left(\frac{\mu_n}{\sqrt{\alpha}}z\right) \right] \quad (4)$$

여기에서,

$$\tan\left(\frac{\mu_n}{\sqrt{\alpha}}d\right) = \frac{\sqrt{\alpha}(\beta_1 + \beta_2)}{\mu_n^2 - \beta_1\beta_2\alpha}, \quad \beta_1 = \frac{h_1}{k}, \quad \beta_2 = \frac{h_2}{k}$$

$$A_n = \frac{\mu_n^2}{\mu_n^2 + \alpha\beta_1^2 + 2\alpha\beta_1\beta_2/d} \quad (5)$$

이다. 이 경우는 점열원에 대해서 얻어진 결과이므로 열원분포를 실제 용접열원에 근사한 가우시안 열원으로 확장하여 x-y 평면에서 적분하여 풀면 아래와 같은 식이 얻어진다.

$$dT(x,y,z,t) = \frac{q(t_1)}{\pi\rho cd} \frac{1}{\sigma^2 + 2\alpha(t-t_1)} \exp\left[-\frac{(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2}{2(\sigma^2 + 2\alpha(t-t_1))}\right] \times \sum_{n=0}^{\infty} A_n \exp\left[-\mu_n^2(t-t_1)\right] \left[\cos\left(\frac{\mu_n}{\sqrt{\alpha}}z\right) + \frac{\beta\sqrt{\alpha}}{\mu_n} \sin\left(\frac{\mu_n}{\sqrt{\alpha}}z\right) \right] \quad (6)$$

여기에서 아크열원 q(t)의 분포는 아래와 같은 가우시안 분포를 가정하였다.

$$Q(x-x_s, y-y_s) = \frac{q(t_1)}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (7)$$

이때, σ 는 길이의 분포변수이고, 아크의 중간 폭을 나타낸다. (7)식은 용접중 특정시간 t_1 에서의 위치가 (x_s, y_s) 인 용접토치가 가한 입열량에 의한 값이므로, 현재시간 t 에서 토치중심으로부터 어느지점에 대한 전체 온도분포의 형태는 구간 $t_1=0$ 에서 $t_1=t$ 까지의 모든 가우시안 순간열원의 값을 적분함으로써 얻어진다. 그러므로, 시간 t 에서 이동 좌표계 (x,y,z) 에서의 온도분포는 다음과 같다.

$$T(x,y,z,t) = \int_0^t \frac{q(\tau)}{\pi\rho cd} \frac{1}{\sigma^2 + 2\alpha(t-\tau)} \exp\left[-\frac{(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2}{2(\sigma^2 + 2\alpha(t-\tau))}\right] \times \sum_{n=0}^{\infty} A_n \exp\left[-\mu_n^2(t-\tau)\right] \left[\cos\left(\frac{\mu_n}{\sqrt{\alpha}}z\right) + \frac{\beta\sqrt{\alpha}}{\mu_n} \sin\left(\frac{\mu_n}{\sqrt{\alpha}}z\right) \right] d\tau \quad (8)$$

3. 온도분포 시뮬레이션 및 결과고찰

3.1 온도분포 시뮬레이션

앞절에서 얻어진 식을 이용하여 각각의 용접조건에 대해 모델을 이용하여 용접부의 온도분포를 구하였다. 시뮬레이션에 사용된 상수들을 표 1에 정의하였다. 이 경우에 재료의 물성치는 용접조건과 온도에 따라 약간의 변동이 있지만, 해석을 위하여 본 연구에서는 평균적인 값을 갖는 700°C 온도값으로 고정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 토치의 바로 밑부분에서는 일반적으로 보호가스의 유동으로 인하여 강제대류가 발생하는 반면에 재료 뒷면에서는 자연대류가 일어난다고 볼 수 있으므로, 각각의 대류계수는 $h_1 = 50W/mk$, $h_2 = 18W/mk$ 로 두었다. 아

크효율은 실험치와 비교하여 53.3%로 하였으므로, 열분포 계수 σ 는 0.003으로 놓고 해석하였다.

용접변수	기호(단위)	수치
밀도	ρ (kg/m)	7860
비열	c (J/kgK)	752
열전도계수	k (W/mK)	30.3
강제대류계수	h_1 (W/mK)	50
자연대류계수	h_2 (W/mK)	18
아크효율	η'	0.525
아크열원분포	σ (m)	0.003

표 1. 시뮬레이션에 사용된 용접변수의 물성치

본 연구의 목적은 서론에서도 밝혔듯이 궁극적으로는 실험시 제어시 필요한 맞대기 용접부의 분포를 가정하기위한 예비 연구로써, 먼저 아크용접부에 대한 시뮬레이션을 통하여 용접부의 온도분포를 고찰하고 이를 응용하여 용접부의 온도분포 및 그 특성을 얻고자 하는 것이다. 이를 위해서 본 연구에서는 용접토치를 기준으로 용접진행방향에 대해서 전방의 표면 및 이면의 온도분포와 분산, 그리고, 용접이 끝나서 이미 용접부가 형성된 뒷쪽 윗면 및 아래면의 온도분포를 하고자 한다. 본 시뮬레이션에서는 이를 위해서 두께가 4mm인 시편에 대해서 그림 1의 좌표계를 기준으로 4점 $P_1(0,-12,0)$, $P_2(0,-12,-4)$, $P_3(0,4,0)$, $P_4(0,4,-4)$ 를 선정하고 각점의 x축방향으로 0mm에서 20mm까지의 온도분포를 구하였다. 이때, 입력파워는 각각 용접속도 4mm/s에 대해서는 2800W에서 4400W까지, 용접속도 6mm/s에 대해서는 3600W에서 6000W까지, 용접속도 8mm/s에 대해서는 4000W에서 8000W까지의 온도분포를 시뮬레이션으로 구하여, 4가지 경우에 대해서 26가지, 총 104가지 용접조건에 대한 온도분포를 구하였다.

3.2 결과 및 고찰

그림 2에 일정한 입력파워에 대해서 선정된 4점에서 얻어지는 최대온도의 변화를 보였다. 그림에서 알 수 있듯이 용접부의 뒷면에서는 정상상태까지 도달하는데 시간이 걸리는 반면에 높은 온도에서 정상상태에 도달함을 볼 수 있는 반면에 용접토치의 전면에서는 보다 빠르게 온도가 증가하지만 정상상태의 온도는 낮게 형성됨을 볼 수 있다. 이러한 이유는 용접토치 뒷면의 경우 용접이 진행됨에 따라 이전의 얻어진 열원이 작용하여 최대온도가 올라가지 때문이다. 따라서, 이로 인하여 실제 용접 공정에서의 최고온도점은 용접부 뒷면의 아래쪽에 형성된다.

그림 3에서부터 그림 10까지는 본 연구에서 선정된 4점에서 얻어진 온도분포 및 분산을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 시뮬레이션에서는 입력파워의 변동에 비례하여 용접부의 최대온도가 변동함을 볼 수 있었다. 또한, 동일한 입력파워에 대해서는 용접속도가 작을 수록 단위길이당 입열량이 많아져서 최대온도가 높아짐을 볼 수 있다. 그러나, 그림의 점선에 나타내었듯이 단위길이당 입열량이 같은 경우에는 용접속도가 빠를 수록 최대온도가 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 속도가 빠름으로 인해서 단위길이당 입열량은 같지만, 열원이 영향을 미치는 거리는 짧아지기 때문에 발생한 결과이다. 분산의 경우에는 용접토치 후방에서는 용접속도가 6mm/s일 때 단위길이당 입열량이 같은 경우에 가장 큰 분산을 보였다. 이는 온도분포의 형

태가 가장 퍼졌다는 것을 의미한다. 반면에 용접속도 전면에서의 온도분포에서는 용접속도가 작을수록 분산이 클 수 있으며, 이는 토치전면에서는 아크열원의 전도외에 다른 열전도가 없어서 열원의 온도분포를 그대로 반영하기 때문이다.

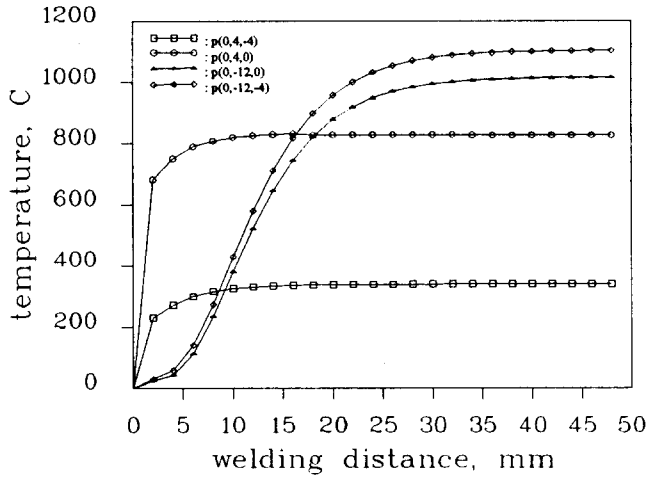


그림 2. 용접속도 전후 상하표면의 최대온도변화

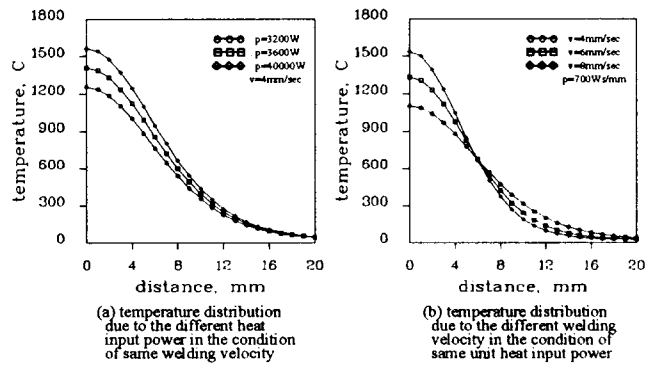


그림 3. P1 점에서의 용접부의 온도분포

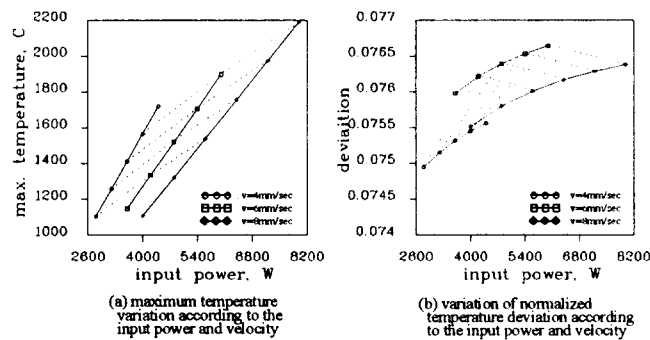


그림 4. 입력 파워에 따른 최대온도 및 분산(P1 점)

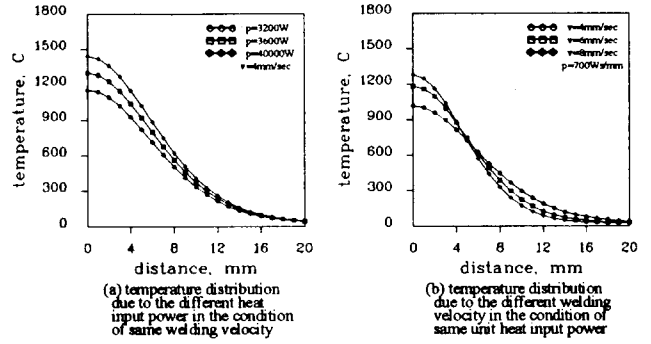


그림 5. P2 점에서의 용접부의 온도분포

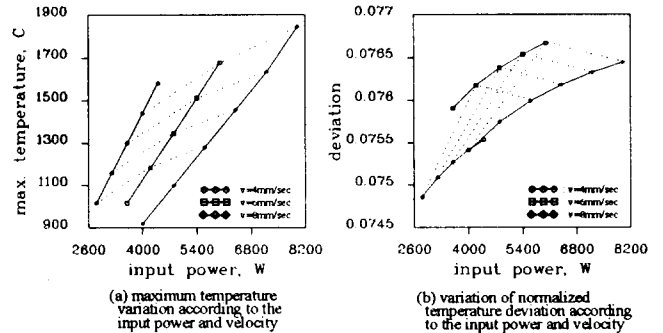


그림 6. 입력 파워에 따른 최대온도 및 분산(P2 점)

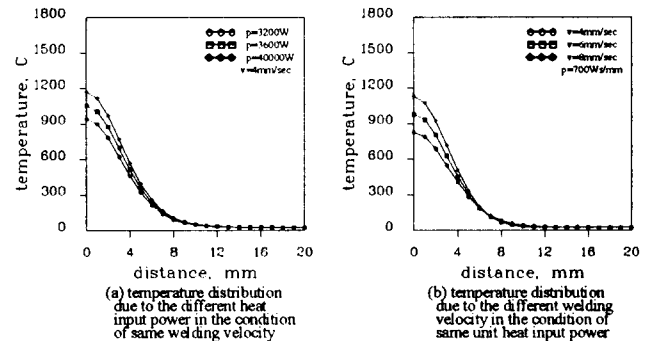


그림 7. P3 점에서의 용접부의 온도분포

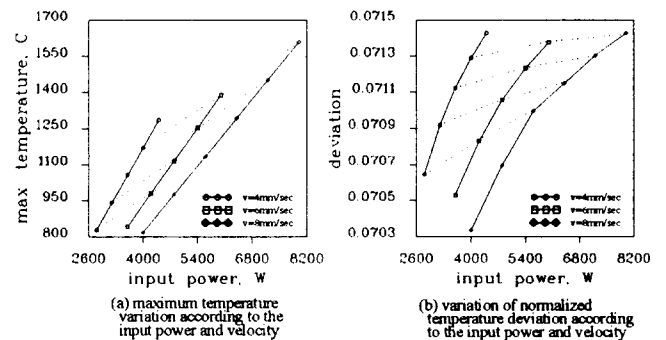


그림 8. 입력 파워에 따른 최대온도 및 분산(P3 점)

[7] A.M.Boldyrev, V.A.Birzhev and A.V.Chernykh, "Calculation of hydrodynamic parameters of liquid metal at the bottom of the molten pool in arc welding", Welding International, 7(6), 1993, pp.481-483

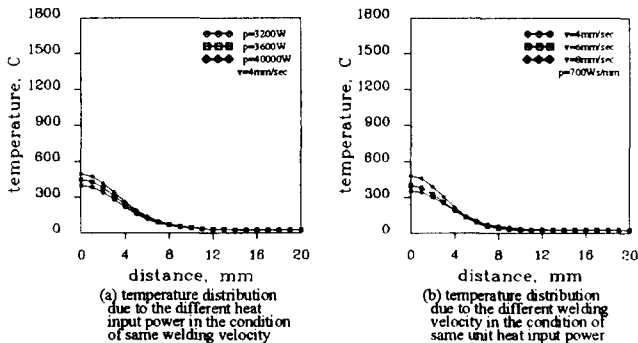


그림 9. P4 점에서의 용접부의 온도분포

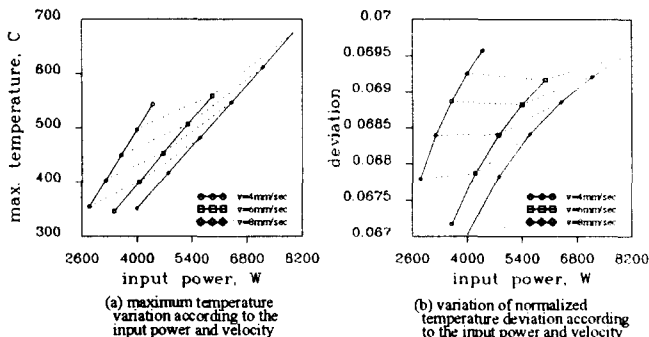


그림 10. 입력 파워에 따른 최대온도 및 분산(P4 점)

4. 결론

본 연구에서는 아크용접공정에서 용접토치 전후 상하면의 온도분포를 시뮬레이션으로 구하여 분석하였다. 시뮬레이션 결과 용접부의 온도분포가 가우시안 온도분포를 가짐을 알 수 있었으며, 추후 이를 용접부의 제어시 온도센서에 적용하여 사용할 예정이다. 또한, 시뮬레이션에서 입력파워에 따라 최대온도가 비례하여 증가하는 것을 알 수 있었으며, 분산의 경우에는 토치전방에서는 아크열원에 영향이 크지만, 후방으로 갈수록 지나온 열원의 영향이 크다는 것을 알 수 있었다.

REFERENCES

[1] Rosental, D., "Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting", Welding J. 20(5), 1941, pp.220-234
 [2] K.S.Boo and H.S.Cho, "Determination of a Temperature Sensor Location for Monitoring Weld Pool Sizes in GMAW", Welding J. WRS, Nov.1994, pp.265-271
 [3] T.Kasuya and N.Yurioka, "Prediction of Welding Thermal History by a Comprehensive Solution", Welding J. WRS, March 1993, pp.107-115
 [4] An Analytical and Experimental Study of the Effects of Welding Parameters on Fusion Welds", Welding J. WRS, Feb. 1993, pp.51-59
 [5] K.Mundra, T.Debroy, T.Zacharia and S.A.David, "Role of Thermophysical Properties in Weld Pool Modeling", Welding J. WRS, Sep.1992, pp.313-320
 [6] S.B.Brown and H.Song, "Implications of Three-Dimensional Numerical Simulations of Welding of Large Structures", Welding J. WRS, Feb.1992, pp.55-62