

표면온도 측정에 의한 아크용접공정의 부최적제어
Suboptimal Control of Arc Welding Process Using
Surface Temperature Measurement

부 광 석, 조 형 석

한국과학기술원 생산공학과
(Kaist Dept. of Production Eng.)

This paper describes design procedure of suboptimal control to minimize a performance index which is represented as sum of square output error and the heat input power in arc welding process. Heat input and temperature of a fixed point on the surface of the material are concerned as input and output of the process, respectively. The suboptimal control law considered herein is a proportional plus integral type and is implemented by using only the output variables available from sensor which is also optimally located in a fixed point w.r.t. a moving weld touch.

1. 서론

아크용접은 전극과 용접물의 사이에 강한 전류를 흘릴 때 발생하는 전기적인 아크를 이용하여 녹여 접합하는 제조공정으로서 구조물 제조 및 여러 조립공정에서 널리 사용되는 공정 중의 하나이다. 최근, 생산성의 향상과 작업환경의 개선 등을 위하여 로봇이 용접작업의 자동화에 대해서 많은 연구가 이루어지고 있다. [1-5] 아크용접을 비롯한 많은 제조공정의 제어를 위해서는 아크용접의 특성능을 대변하는 변수들을 측정하거나 공정의 아크용접 특성능을 제어함으로써 제품의 품질을 유지한다. 아크용접에 있어서는 아크를 발생시키는 용접토치와 용접부의 위치 오차를 줄이는 용접선 추적이나 용접부의 품질을 대변하는 용접부의 크기를 측정하여 여러 공정한 환경에서 동일한 용접부의 크기를 유지하기 위하여 공정제어가 이루어지고 있다. [3,4,5] 용접부의 크기는 비드폭, 용입깊이 또는 이면비드폭 등으로 나타내어진다. 일반적으로 비드폭의 측정은 CCD 카메라를 이용한 영상처리 [3]와 광선추적을 이용 [4]하여 이루어지고 이면비드의 측정은 용접부 이면에서의 측정을 이용하여 이루어진다. [5] 이면 용입깊이의 경우는 외란으로 측정이 불가능하기 때문에 초음파 센서 [6] 또는 표면온도 측정기를 이용 [7]으로 이루어지고 있다. Gas Metal Arc Welding (GMAW) 과 같이 소모성 전극을 사용하는 아크용접의 경우에는 전극이 용융되어 용접부에 녹아 들어가기 때문에 표면에서의 비드폭의 측정은 많은 어려움이 있다. 따라서, 본 논문에서는 용접부의 모니터링하는 방법으로서 용접부의 표면온도를 사용하여 용접부의 일정한 용접비드폭을 유지하기 위한 용접부의 표면온도를 용접비드의 크기와 깊은 관련이 있을 수 있으며 [8] 적외선 온도 센서를 이용하여 용접부의 온도 측정할 수 있기 때문에 본 논문에서는 용접부의 온도 측정할 수 있는 표면온도 측정기를 이용하여 공정의 외란에서 표면온도를 유지함으로써 그 공정의 외란에 대한 보상을 하고자 한다. 아크용접에 의해 용접부에 형성되는 열은 모재를 통하여 열전도 현상에서 표면온도의 변화에 대해 표현되므로 측정되는 온도 신호를 이용하여 기준값과의 오차를 비례적분제어기를 이용하여 최소화하였다. 비례적분제어기의 선형성은 오차의 제곱과 용접열입력의 크기의 제곱을 합으로 하는 성능지수를 최소화하도록 최적화되었다.

귀환하여 기준값과의 오차를 비례적분제어기를 이용하여 최소화하였다. 비례적분제어기의 선형성은 오차의 제곱과 용접열입력의 크기의 제곱을 합으로 하는 성능지수를 최소화하도록 최적화되었다.

2. 용접공정의 수학적 모델

아크용접은 용접선을 따라서 이동하는 용접토치와 모재와의 사이에 발생하는 전기적인 아크에 의해 용접부를 녹이고 녹은 용접부가 급속표면에 작용할 때 급속내부의 온도분포는 열전도 현상에 따라 변하지 않는다고 가정하면 열전도 방정식은

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{q}{\rho c} \quad (1)$$

이다. 여기서 $T=T(x, y, z, t)$ 는 시간 t 에서 Fig.1의 급속내부의 (x, y, z) 위치에서의 온도이며, α 는 열확산도, k 는 열전도도, ρ 와 c 는 각각 밀도와 비열을 나타내며, q 는 단위시간 단위부피에서의 발생열을 나타낸다. 용접공정이 이루어지는 동안, 용접부의 표면에서는 보호가스의 흐름에 의해 대류 및 대기와의 방사현상에 의해 열의 손실이 발생한다. 따라서, 용접부의 표면에서의 경계조건은 뒷면에서는

$$k \frac{\partial T(x, y, d)}{\partial z} + h(T(x, y, 0) - T_0) = 0 \quad (2)$$

이고, 앞면에서는

$$-k \frac{\partial T(x, y, 0)}{\partial z} + h(T(x, y, 0) - T_0) = 0 \quad (3)$$

이다. 여기서 h 는 대류 계수이고, T_0 는 상온, d 는 재료의 두께이다. 그리고, 열원에서 무한대에 위치한 지점에서의 온도는

$$\lim_{r \rightarrow \infty} T(x, y, z, t) = T_0 \quad (4)$$

로 가정한다. 여기서 $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 은 열원에서부터의 거리이다. 실제 용접작업시 발생하는 아크에 의한 열원은 본포면 열원의 모양을 나타내므로 그 열원의

본포를 다음과 같이 Gaussian본포로 가정한다.

$$Q(x, y, t) = \frac{q(t)}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right] \quad (5)$$

여기서, σ 는 길이 자원을 갖는 본포변수로서 아크의 최대크기의 반을 갖는 거리이다. $q(t) = pVI(t)$ 로서 p 는 아크효율, $VI(t)$ 는 전기적인 열입력을 나타낸다. Fig. 1에서와 같이 열원이 $(x', y', 0)$ 에 위치하였을 때 점 (x, y, z) 에서의 온도분포 식(1), (2), (3), (4)를 풀어서 구하고, 그 해를 열원의 이동과 본포에 따라 적분하면 다음과 같은 해를 얻을 수 있다. [9]

$$T(x, y, z, k) - T_0 = \sum_{i=1}^k f(i) \times g_i(x, y, z, k) \quad (6)$$

여기서,

$$f(i) = \eta VI(i) / 2\rho c d x \quad (7)$$

로서 i 번째의 샘플순간에서의 열입력을 나타내고,

$$g_i(x, y, z, k) = \frac{t_s}{\sigma^2 + \alpha t_s(k-i)} \exp\left\{-\frac{(x + X_i(k) - X_i(i))^2 + (y + Y_i(k) - Y_i(i))^2}{2\sigma^2 + 4\alpha t_s(k-i)}\right\} \times \sum_{n=0}^{\infty} A_n \exp(-\mu_n^2(t-l)) \left(\cos\left(\frac{\mu_n}{\sqrt{\alpha}} z\right) + \frac{\beta\sqrt{\alpha}}{\mu_n} \sin\left(\frac{\mu_n}{\sqrt{\alpha}} z\right)\right) \quad (8)$$

이다. 여기서 t_s 는 샘플구간이고, $X_i(k), Y_i(k)$ 는 각각 k 순간에서의 용접토치의 위치를 나타낸다. 식(6)은 본포열원이 용접선을 따라서 이동할 때의 유한크기의 두께를 갖는 용접부에서의 온도본포를 나타낸다. 식(6)에 의해서 열입력 $q(i)$ 의 변화에 따른 용접부의 온도본포에 대한 동적변화를 구할 수 있다.

3. 측정점의 선정

아크용접 공정제의 제어에 있어서 입력변수는 용접 열입력이고 출력변수는 용접부의 표면온도이다. 아크용접 공정제어의 목적은 용접부의 크기를 여러 공정외란 하에서도 균일하게 유지하는 것으로서 용접변수 및 공정외란에 따른 용접부 크기의 변화는 표면온도와 깊은 관련이 있기 때문에 여러 공정외란의 존재하에서 표면온도를 균일하게 유지하므로써 용접부의 크기를 유지하고자 한다. Fig. 3은 용접열 입력이 4860W에서 용접속도가 5mm/sec일 때의 용접비드 폭의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 3은 식(6)을 전산기모사에 의해 나타낸 것으로서 용접열 입력이 가해된 후 2초의 경과 후부터 용접부 비드가 형성되기 시작한다. 이는 용접부가 용접점에 도달할 때까지의 온도상승에 필요한 시간이 요구되기 때문이다. Fig. 4에서 비드폭의 성장은 단조증가 형태이며 이면비드의 성장이 비드의 성장보다 느린 것은 시편두께를 통하여 열의 전도에 시간이 요구되기 때문이다. Fig. 4는 그때의 측정위치에 따른 표면온도의 변화를 나타낸 것이다. 용접부의 표면에서부터 측정이 이루어지기 때문에 $z=0$ 이고, 가능한 한 열원이 가까이에서의 온도가 열원의 변화에 가장 민감하므로써 측정이 허용되는 가장 가까운 위치인 $y=10\text{mm}$ 를 고정시켜 두고 x 위치만의 변화에 대한 표면온도만을 나타내었다. Fig. 4(a)에서 알 수 있듯이 이 동열원에 의해서 토치 뒷쪽 부분의 열의 누적이 시간이 지남에 따라 증가함을 알 수 있다.

Fig. 4(b)에서 측정 위치가 $x=4\text{mm}$ 인 점, 즉 용접진행방향으로 용접토치보다 앞서 있는 위치이지만 용접속도가 매우 작아 측정점을 잡음에 민감하여 $x=20$ 인 점, 즉 용접은 진행 방향에서 용접토치보다 낮은 온도값을 나타내지만 열입력의 변화 후 많은 시간지연 후에 그 응답특성이 나타난다. 따라서, 온도응답성을 보이며면서 비교적 큰 크기의 값이 나타나지는 점이 선정되어야 한다. 따라서, 본분에서는 온도응답곡선의 시간특성 지수를 선정한 온도응답 곡선의 시간특성 지수는

$$J = \frac{1}{v} \frac{dT}{dt} \quad (9)$$

이다. 여기서 v 는 용접속도, t 는 온도응답 곡선의 시정수이고 α 는 열확산도이다. 열입력 변화에 대한 온도크기 변화지수는 식(10)으로 나타내었다.

$$J_i = \frac{1}{v} \frac{dT_i}{dt} \quad (10)$$

여기서, T_i 는 온도응답 곡선의 정상상태에서의 온도값이다. 용접열 입력이 4860이고 용접속도가 5mm/sec일 때의 J_i 와 J_q 의 온도측정 위치에 따른 변화는 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 온도측정 위치가 용접진행 방향에서 용접토치보다 뒷쪽에 위치할수록 J_i 는 단조증가하고 J_q 는 단조감소한다. 이는 Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 용접토치의 용접진행 방향으로의 선단부에 비해 후단부가 이동열원에 의해 열의 누적이 많았기 때문이다. 따라서 가능한 한 빠른 응답특성을 가지면서 입열량에 대해서 큰 온도값을 나타내어 온도를 식(9)와 식(10)의 합을 최소화하는 것으로 나타낼 수 있으며, 즉

$$J_i = J_t + J_q \quad (11)$$

이 가장 최소의 값을 갖는 위치이다. Fig. 6은 여러 용접속도와 용접열 입력 그리고 용접시편의 두께에 대한 J_i 의 변화를 나타내었다. 용접속도, 용접열 입력, 용접두께의 변화에 대해서 식(11)로 표현되며 측정위치 결정지수 J_i 는 크게 변화하지 않으며 $x=0\text{mm}$ 에서 $y=5\text{mm}$ 사이에 대개 최적값을 갖는다. 따라서 Fig. 1에서 연강의 용접시 온도측정 위치는 용접진행 방향에서 용접토치보다 뒷쪽에 위치할 $x=2\text{mm}$ 인 점으로 선정되었다.

4. 부 최적제어기

용접열 입력을 입력변수로 하고 용접부의 표면온도를 출력변수로 하는 제어 시스템의 블록선도를 Fig. 9에 나타내었다. 아크용접 공정에서의 제어목적은 균일한 용접비드의 크기를 유지하는 것이기 때문에 Fig. 9에서의 원하는 용접부의 비드폭 크기와 정상입력 u_0 에 대한 측정점에서의 표면온도가 계산되면 그 값을 유지하도록 측정된 출력온도를 유지시켜주는 것이 아크용접에서의 온도제어의 목적이다. 제어기의 구조는 비례적분제어의 구조를 가지며 식(12)과 같다.

$$u = u_0 + K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (12)$$

여기서, $u(t)$ 는 시간 t 에서의 제어입력인 열입력을 나타내고, u_0 는 정상상태의 입력, $e(t) = T_d - T(t)$ 이며 K_p 와 K_i 는 각각 비례 및 적분이득이다. 식(12)의 K_p 와 K_i 는 성능지수 J 를 나타내는 식(13)을 최소화하므로써 얻어진다.

$$J = \int_0^{\infty} (e^{-\lambda t} + \rho) \dot{z}^2 dt \quad (13)$$

여기서, ρ 는 가중치(weighting factor)이다. 식(6)과 식(11)는 제한조건을 가지며 성능지수(13)을 최소화하는 제어변수 K_p 와 K_i 는 수치계산으로 구하였으며, 계산방법은 Powell의 Gradient Method를 사용하였다.

5. 결과 및 검토

Fig.10은 성능지수(13)을 최소화하는 Fig.9의 제어변수에 의한 제어결과를 나타낸 것이다. 전산기 모사에 사용된 재료는 연강의 경우로서 그 화학적 성분 및 열적 성질은 table1과 table2에 나타내었다. 전산기 모사에서 사용된 용접조건은 열입력 4860W이고, 용접속도 5mm/sec, 그리고 시편두께가 3mm인 경우이다. 이때의 정상상태의 측정점($x=-2, y=10, z=0$ mm)에서의 온도값은 400C이므로 기준온도를 400C로 하여 최적이득값을 구하였다. 계산결과 비례이득은 8.072이고 적분이득은 0.015로서 적분이득이 매우 작은 값을 나타내었다. 이는 제어계의 특성이 열확산기에 의해 전달지연이 있는 시스템이므로 큰 적분이득은 과도한 overshoot을 발생하기 때문이다. 최적화된 적분이득에 의한 온도 응답특성과 열입력을 제어하지 않은 경우의 응답과 비교하여 Fig.10에 나타내었다. Fig.10에서 알 수 있듯이 최적제어에 의한 온도 응답은 약 3초에서 정상상태에 도달하나 제어하지 않은 경우는 6초의 시간과 후에 정상상태에 도달하였다. 이때의 비드폭의 유지정도를 비교하면 Fig.11과 같다. Fig.11에서 최적제어의 경우 비드폭은 제어하지 않은 경우에 비해 보다 빠르게 성장하며 약간의 과도 응답을 보여준다. 이면비드의 경우보다 마찬가지로 경향을 보여준다. 초기오차의 크기를 보상하기 위한 Fig.10의 초기의 과도한 열입력에 의해서 비드폭의 성장과 거의 유사한 성향을 보여주고 있다.

6. 결론

본 연구에서는 아크용접의 수학적 모델링을 이용하여 표면온도를 이용한 용접공정의 제어시에 필요한 온도센서의 측정위치의 선정과 열정온도 유지를 위한 부최적제어를 설계하였다. 이상의 연구결과 다음과 같은 결론이 가능하였다.

1. 센서위치의 선정은 열입력의 변화에 대한 민감도와 속응도를 고려하여 이루어졌으며 그 결과 연강의 경우에는 용접토치가 진행되는 방향에는 뒷쪽으로 약 2mm지점이 가장 최적의 측정위치로 선정되었다.
2. 측정된 표면온도를 귀환하여 일정한 온도로 유지하는 비례적분제어의 이득은 성능지수를 최소화하는 최적화 기법으로 구하였으며 그 결과 빠른 응답을 갖는 온도특성을 나타내고 보다 넓은 구간에 걸쳐 용접비드가 유지됨을 알 수 있었다.

참고문헌

1. J.E. Agapakis, J.M. Katz, et. als., "Joint tracking and adaptive robotic welding using vision sensing of the weld joint geometry", Welding Journal, pp.33-41, November, 1986.

2. J.P. Boillot, P. Cielo, et. als., "Adaptive welding by fiber optic thermographic sensing: an analysis of thermal and instrumental considerations", Welding Journal, pp.209-217, July, 1985.
3. P.W. Richardson, A.A. Gutow and S.H. Rao, "A vision based system for arc welding pool size control", Measurement and Control for Batch Manufacturing, ASME Booklet, pp.65-75, Nov., 1982.
4. M. Nomura, Y. Sato, and Y. Satoh, "Arc light intensity controls current in SA welding system", Welding and Metal Fabrication, pp.457-465, September, 1980.
5. M. Zacksenhouse and D.E. Mardt, "Weld pool impedance identification for size measurement and control", ASME J. of Dyn. Sys. Mea. and Control, vol.105, pp.179-184, September, 1983.
6. J.M. Katz and D.E. Hardt, "Ultrasonic measurement of weld penetration", Control of Manufacturing Processes and Robotic Systems, ASME, pp.79-95, Nov., 1983.
7. B.E. Bates and D.E. Hardt, "Areal-time calibrated thermal model for closed loop weld bead geometry control", ASME J. of Dyn. Sys. Mea. and Control, vol.107, pp.25-33, March, 1985.
8. P.W. Ramsey, "J.J. Chyle, et. als., "Infrared temperature sensing systems for automatic fusion welding", Welding Research Supplement, pp.337-346, August, 1963.
9. K.S. Boo and H.S. Cho, "A study on the analysis of the transient temperature distribution in arc welding of finite thick plates", to be presented.

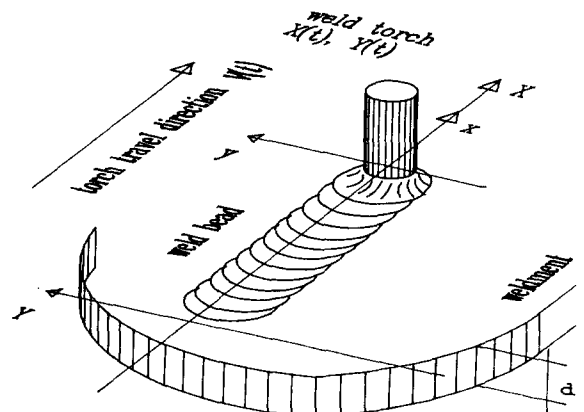


그림1 아크용접의 해석에 필요한 좌표계

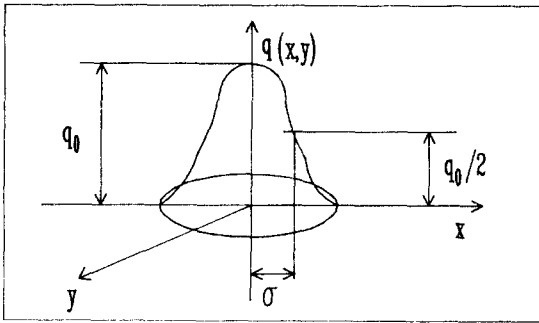


그림2 아크열원의 분포도

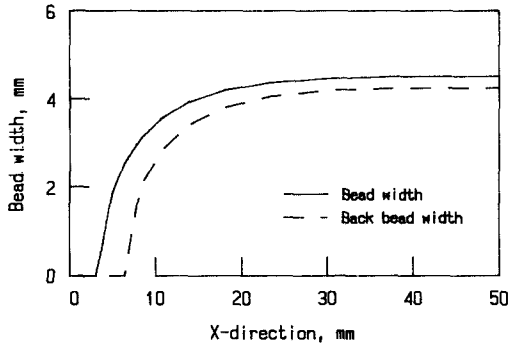
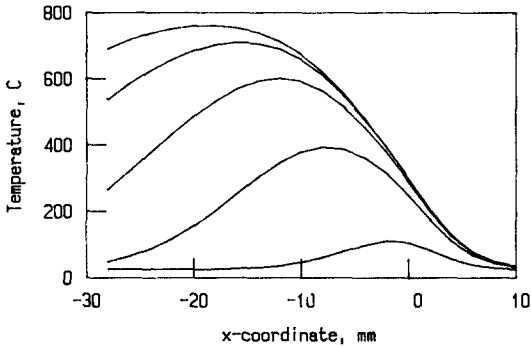
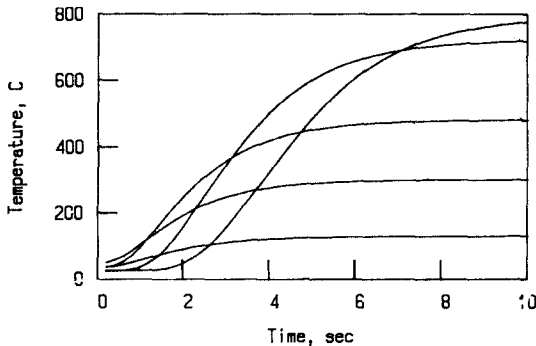


그림3 비드폭과 이면비드폭의 시간에 따른 변화 ; 열입력4860W, 용접속도5mm/sec, 두께3mm



(a)



(b)

그림4 용접열입력 4860W, 용접속도 5mm/sec의 (a)시간경과에 따른 온도분포의 변화 (b)여러 측정점의 시간에 따른 온도변화

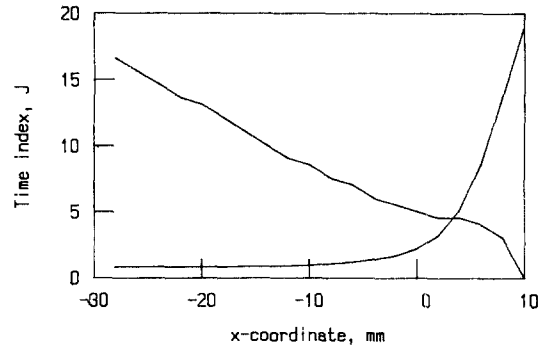


그림5 측정위치에 따른 시간지수Jt와 크기지수Jq의 변화; 용접열입력 4860W, 용접속도 5mm/sec, 두께 3mm

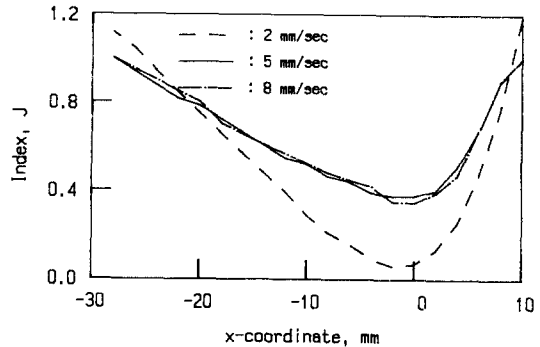


그림6 용접속도변화에 대한 측정지수J의 변화 ; 용접열입력 4860W, 두께 3mm

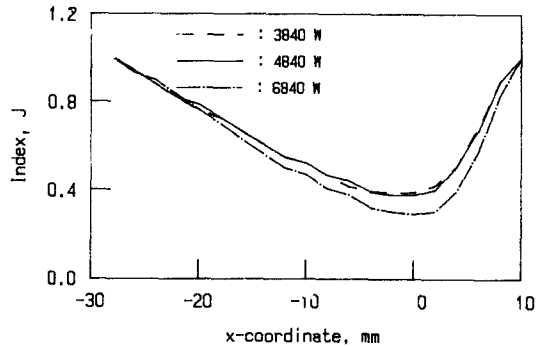


그림7 용접열입력에 따른 측정지수J의 변화 ; 용접속도 5mm/sec, 두께 3mm

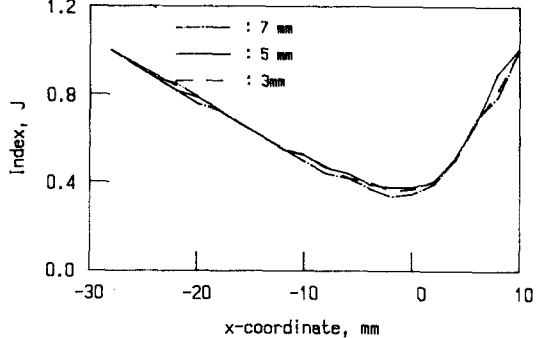


그림8 시편두께에 따른 측정지수의 변화 ; 용접열입력 4860W, 용접속도 5mm/sec

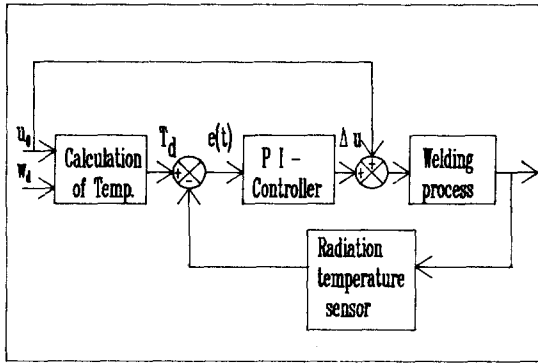
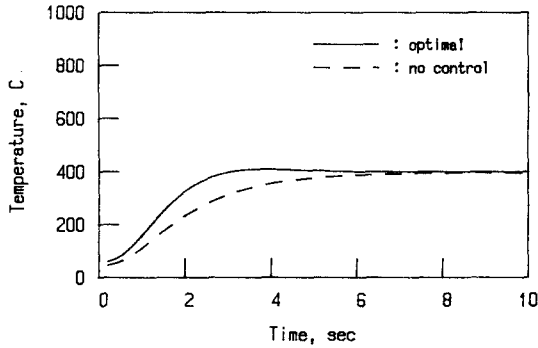
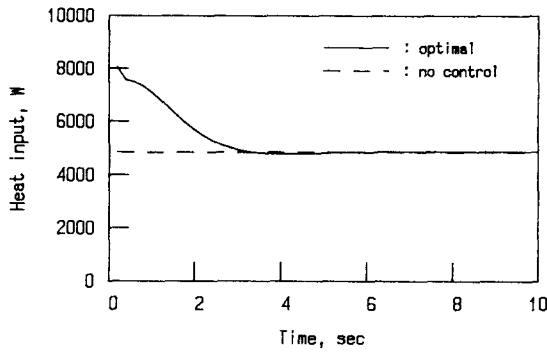


그림9 아크용접공정의 제어시스템에 대한 블록선도

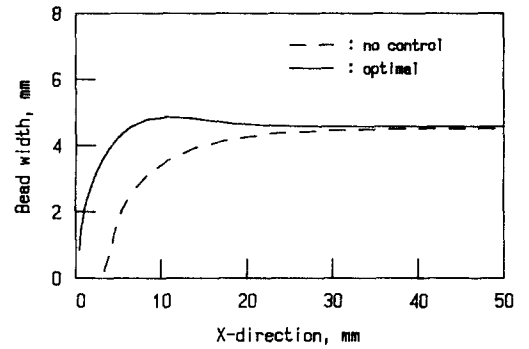


(a) temperature response

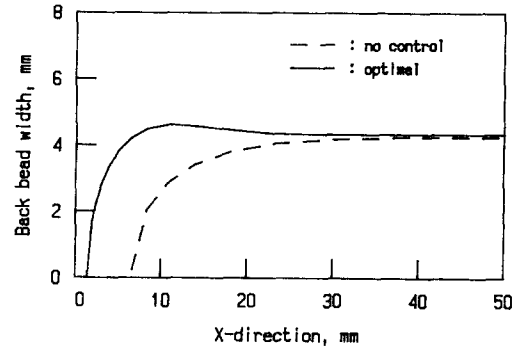


(b) heat input

그림10 열입력제어에 의한 온도응답과 열입력의 변화



(a) bead width



(b) Back bead width

그림11 열입력제어에 의한 비드폭 및 이면비드폭의 변화