

파이프 GTA 원주용접에서 용접변수 최적화의 수학적 모델링에 관한 연구

盧泰正*, 羅錫柱**

(*:三星重工業(株) 機電研究所, **:韓國科學技術院 生産工學科)

1. 서론

용접공정에서 중요한 문제중의 하나는 최적의 용접공정 변수를 결정할수 있는 수학적 모델을 개발하는 것으로서, 일반적으로 직경이 작고 열전도성이 좋은 파이프를 전 원주에 대하여 일정한 입열량으로 원주용접을 하면 용접이 진행됨에 따라서 용접비드의 폭이 넓어지는 경향이 있으므로 균일한 비드를 얻기 위하여는 용접전류 및 속도등의 용접변수를 최적화할 필요성이 있다. 거의 실험에 의하여 제한된 조건하에서만 사용가능한 최적의 용접변수를 결정하여 왔으나, 이러한 문제를 해결하기 위하여 S. Kikushima등¹⁾은 원주용접에서 열전도 해석에 의하여 최적의 입열량을 결정하는 모델을 개발하였으나 수학적 최적화 기법이 사용되지 않았고, T. Ohji등^{2), 3)}은 평판 용접에서 최적의 입열량을 결정하는 알고리즘을 유도하여 컴퓨터 제어시스템을 개발하였다.

본 연구에서는 Gaussian 분포의 열원에 대한 비정상 3차원 열전도의 해석해가 유도되었으며, 선형보상문제(Linear Complementary Problem:LCP)⁴⁾ 및 SUMT(Sequential Unconstrained Minimization Method)⁵⁾를 적용한 Powell의 비구속탐색법(Unconstrained Search Method)^{6), 7)}이 최적의 용접전류 및 용접속도를 결정하는데 각각 사용되었다.

2. 용접변수의 최적화에 대한 수학적 모델링

Figure 1은 GTA 파이프 원주용접 공정을 나타낸것으로서 열원인 아크는 정지해 있고 파이프 모재를 용접속도 V_w 로 시계반대방향으로 회전시키면서 시계방향으로 원주용접이 진행된다. 여기에서 g , R_o 및 R_i 는 각각 모재의 두께, 외반경 및 내반경이다. Gaussian 분포의 아크열원으로 얇은 파이프를 원주용접할 때 용접방향으로의 열이동이 무한박판의 경우와 같고, 원주방향의 임의 위치에서의 온도는 그 위치 및 외경 원주길이 $2\pi R_o$ 의 주기를 갖는 각 위치에서의 온도들의 합이라고 가정할수 있다. 파이프 원주용접시 Gaussian 분포의 아크 열원의 입열으로 열전도에 의하여 유한두께의 파이프에 형성되는 비정상 3차원 온도분포 $T(r, \theta, z, t)$ 는 무한평판에서의 온도분포로부터 아래와 같이 유도된다.⁸⁾

$$T(r, \theta, z, t) = T_o + \frac{Q}{\pi \rho c g} \sum_{n=0}^{\infty} \left[A_n \left\{ \cos\left(\frac{u_n(R_o - r)}{g}\right) + \frac{ga}{u_n} \sin\left(\frac{u_n(R_o - r)}{g}\right) \right\} \cdot \sum_{j=-\infty}^{\infty} \int_0^t \frac{2}{(a^2/3) + 4k(t-\tau)} \exp\left\{ -\frac{(2j\pi R_o + R_o \theta - v_w \tau)^2 + z^2}{(a^2/3) + 4k(t-\tau)} - \frac{ku_n^2(t-\tau)}{g^2} \right\} d\tau \right] \quad (1)$$

where, u_n : positive eigenvalues of $\tan(u_n) = \frac{2ga u_n}{u_n^2 + (ga)^2}$, $A_n = \frac{u_n^2}{u_n^2 + (ga)^2 + 2ga}$, $a = \frac{h}{\lambda}$

ρ : 모재의 밀도, c : 모재의 비열, κ : 열확산율, t : 현재 시각, Q : 열원의 강도(= ηEI_w , η : 아크효율, I_w : 용접전류, E : 아아크 전압), a : 아크의 유효반경, T_o 는 모재의 초기온도이다.

전원주에 대하여 균일한 용접비드 형상을 얻기 위하여 파이프 원주를 n 등분하고 예열과 오버랩(overlap) 공정을 고려하여, 용접변수로서 각 구간에서의 용접전류 및 용접속도를 정하였다. Figure 2에서 보는바와 같이 아크열원이 원주구간 i 의 중심점 $\theta = \theta_{ci}$ 에 도달했을 때 모재의 외경표면에서 $\theta = \theta_{ci}$ 에서 형성된 용융부의 최대폭을 그 구간의 용접비드폭 W_{ci} 이라고 가정할수 있다.

본 연구에서의 목적함수 f 는 모재의 내, 외경 표면에서 z -방향으로 원하는 용접비드폭 W_{to} , W_{bo} 의 위치에서 각 구간의 온도 $T(R_o, \theta_{ci}, W_{ci}/2)$ 및 $T(R_i, \theta_{bi}, W_{bi}/2)$ 와 용융점 T_m 과의 차이로서 아래와 같이 표현된다.

$$f = \sum_{i=1}^n \left[(1 - T(R_o, \theta_{ci}, W_{ci}/2) / T_m)^2 + (1 - T(R_i, \theta_{bi}, W_{bi}/2) / T_m)^2 \right] \quad (2)$$

LCP에 의한 용접전류의 최적화

주어진 용접속도에 대하여 각 구간의 용접전류 I_w 를 용접변수로서 선정하면 아래와 같이 목적함수가 quadratic이고 선형의 구속조건을 갖는 Quadratic Programming(QP)⁽⁴⁾ 문제가 된다.

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & f(I_w) = \frac{1}{2} I_w^t H I_w + c^t I_w + b \\ \text{subject to} \quad & 0 < I_w \leq (I_w)_{max} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $I_w = [I_{w1}, I_{w2}, \dots, I_{wn}]^t$, $(I_w)_{max} = [(I_{w1})_{max}, (I_{w2})_{max}, \dots, (I_{wn})_{max}]^t$, H , c 및 b 는 식(1) 및 (2)로부터 결정된다. 식(3)에 Kuhn-Tucker 조건을 적용하면 LCP로 변환되며, 이는 Lemke의 피봇팅 알고리즘⁽⁴⁾으로서 효과적으로 최적해를 구할수 있으며 아주 계산시간이 적게 소요되는 장점이 있다.

SUMT를 적용한 Powell 방법에 의한 용접속도의 최적화

주어진 용접전류에 대하여 각 구간의 용접속도 V_w 를 용접변수로서 선정하면 목적함수가 비선형이고 변수의 상하한치의 구속조건을 갖는 비선형문제가 된다. 그리고 구속문제를 비구속문제로 전환하기 위하여 부등식의 구속에는 Barrier 함수가 본 연구에 채택되었으며, Powell의 Unconstrained Search Method와 Sequential Minimization Technique(SUMT)^(6), 7)에 의하여 최적화될 구속조건이 없는 목적함수 $f(V_w)$ 는 구속조건이 없는 $f(V_w)$ 로부터 아래와 같이 표현된다.

$$\tilde{f}(V_w) = f(V_w) - r_g^{l-k} \cdot \sum_{i=1}^{mg} \frac{1}{g_i(V_w)} \quad (4)$$

where, $V_w = [v_{w1}, v_{w2}, \dots, v_{wn}]^t$

$$g_i(V_w) = v_w - (v_w)_{max} \leq 0, \text{ for } i = 1, 2, \dots, \frac{mg}{2}$$

$$g_i(V_w) = -v_w + (v_w)_{min} \leq 0, \text{ for } i = \frac{mg}{2} + 1, \frac{mg}{2} + 2, \dots, mg$$

r_g 는 $g_i(V_w)$ 의 벌칙인자, k 는 순차수, mg 는 부등조건을 나타낸다.

3. 실험 및 결과검토

마이크로컴퓨터, 용접제어용 회로, 용접기 전원 및 이송장치로 구성되고 마이크로컴퓨터 내의 소프트웨어 프로그램의 수행으로 원주의 각 구간별 용접속도 및 용접전류가 제어되는 파이프 용접용 실험장치를 구성하였다.

직경 45mm, 두께 2mm의 6063 알루미늄 합금의 파이프를 모재로서 실험 및 시뮬레이션에 사용하였고, 용접 후에 용접비드의 단면을 관찰하기 위하여 그 단면을 연마하여 1× HF, 1.5× HCl, 2.5× HNO₃ 및 95% H₂O로 구성된 용액인 Keller 시약을 사용하였다. 본 연구에서 제안한 수학적 모델의 유용성을 검증하기 위하여 아래와 같은 시뮬레이션 및 실험결과를 비교, 검토한다.

Figure 3은 용접전류 $I_w = 60A$ 및 용접속도 $V_w = 120mm/min$ 의 일정한 조건으로서 파이프를 원주용접한 후의 $\theta = 22.5^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 및 180° 에서의 용접비드 단면에 대한 실험결과를 나타내었다. 이것은 파이프의 전원주에 대하여 균일한 비드폭을 얻기 위하여는 용접조건은 원주용접이 진행됨에 따라서 조절되고 최적화되어야 함을 알수 있다.

용접 초기에는 가속되고 끝에는 감속되는 용접속도로서 예열공정 ($I_{wp} = 30[A]$, 예열시간 $t_p = 5$ 초) 및 오버랩 공정을 고려한 경우에 대하여 시뮬레이션한 결과, 최적의 용접전류 및 계산된 비드폭을 Fig. 4에 나타내었다. Figure 4에 나타낸 최적의 용접조건으로 용접한 후에 $\theta = 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 및 360° 에서의 비드단면에 대한 실험결과를 Fig. 5에 나타내었다.

주어진 용접전류로서 상기와 같은 예열 및 오버랩 공정을 고려한 경우에 대하여 시뮬레이션한 결과, 최적의 용접속도 및 이에 따른 비드폭을 Fig. 6에 나타내었다. Figure 6에 나타낸 최적의 용접조건으로서 용접한 후 $\theta = 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 및 360° 에서의 용접비드 단면에 대한 실험결과를 Fig. 7에 나타내었다.

Figure 5 및 Fig. 7에서 보는바와 같이 $\theta = 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 및 360° 에서 균일한 용접비

드가 형성되며, 용접비드의 크기에 대한 실험 결과 및 시뮬레이션 결과가 서로 일치함을 알 수 있다. 그리고 이러한 용접조건은 실제로 유용하게 사용될 것이다.

4. 결 론

본 연구에서 개발한 최적화에 대한 수학적 모델은 GTA 파이프 원주용접에서 전원주에 균일한 용접비드폭을 얻기 위하여 최적의 용접조건을 결정하는데 사용될수 있으며, 온도분포를 계산하기 위하여 Gaussian 분포의 열원을 갖는 비정상 3차원 열전도 방정식의 해석해를 유도하였다. 그리고 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 선형보상문제 및 Lemke의 피봇팅 알고리즘은 주어진 용접속도에 대하여 최적의 용접전류를 결정하는데 유용하며, 이것은 계산시간이 매우 적게 소요된다.
- (2) SUMT를 적용한 Powell's Unconstrained Search Method는 주어진 용접전류에 대하여 최적의 용접속도를 결정하는 비선형 문제의 최적화에 적합하였다.
- (3) 비드형성에 대한 실험결과는 개발된 수학적 모델이 열 전도성이 좋고 직경이 작은 파이프를 원주용접할 경우에 최적의 용접조건을 구하는데 효과적으로 적용될수 있음을 알 수 있었다.

참고 문헌

- (1) S. Kikushima et al., "Development of a parameter generating system for arc welding based on heat conduction analysis", *Welding Int.*, No.9, 1987, pp.829-834.
- (2) T. Ohji et al., "An Algorithm for Optimal Heat Input Control", *Quarterly J. of JWS*, Vol.8, No.1, 1990, pp.48-52.
- (3) T. Ohji et al., "An Optimal Heat Input Control of Arc Welding", *Quarterly J. of JWS*, Vol:8, No.2, 1990, pp.167-178.
- (4) M.S. Bazaraa, 1979, "Nonlinear Programming(Theory & Algorithm)", John Wiley & Sons, pp.437-453.
- (5) D.G. Luenberger, 1984, "Linear and Nonlinear Programming(2nd ed.)", Addison-Wesley, pp.365-395.
- (6) M.J.D. Powell, 1964, "An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives", *The Computer Journal*, Vol.7, PP.155-162.
- (7) ditto., 1965, "A method for minimizing a sum of squares of non-linear functions without calculating derivatives", *The Computer Journal*, Vol.8, pp.303-307.
- (8) 노태정, 나석주, "파이프 TIG 원주용접에서 공정변수의 최적화에 관한 연구", *KSME '90 춘계학술대회 초록집(1)*, 1990, pp.144-147.

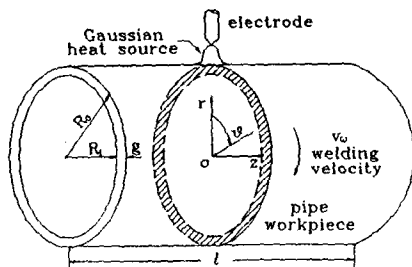


Fig.1 Schematic diagram of GTA circumferential pipe welding process

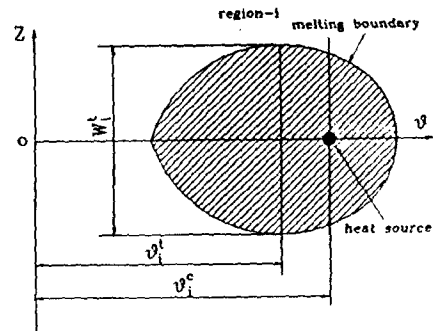


Fig.2 Relationship between melting zone and bead width of welds

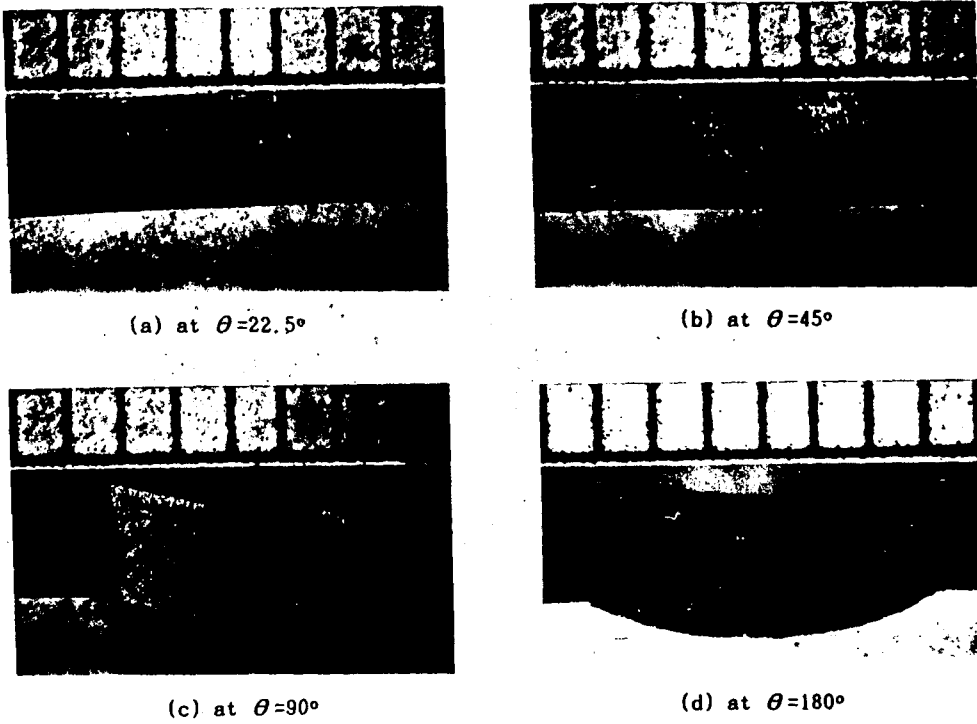


Fig.3 Experimentally observed cross-sections of 6063 Al-alloy welds
($I_w = 60A$, $V_w = 120mm/min.$)

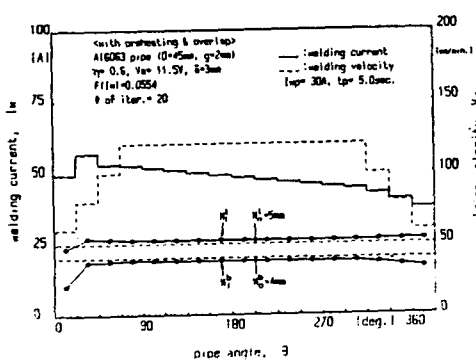


Fig.4
Calculated optimal current and
resultant bead widths

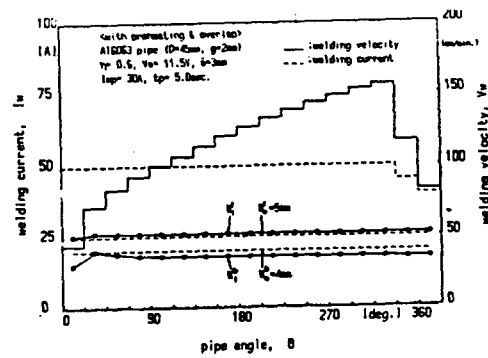


Fig.6
Calculated optimal velocity and
resultant bead widths

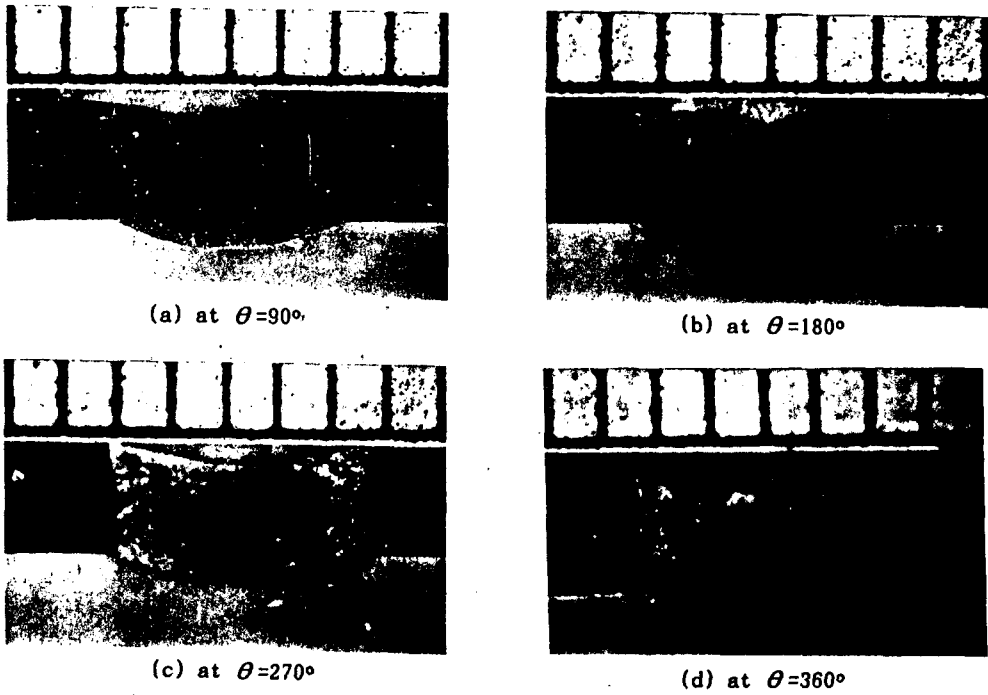


Fig. 5 Observed cross-sections of 6063 Al-alloy resultant welds for the welding condition shown Fig. 4

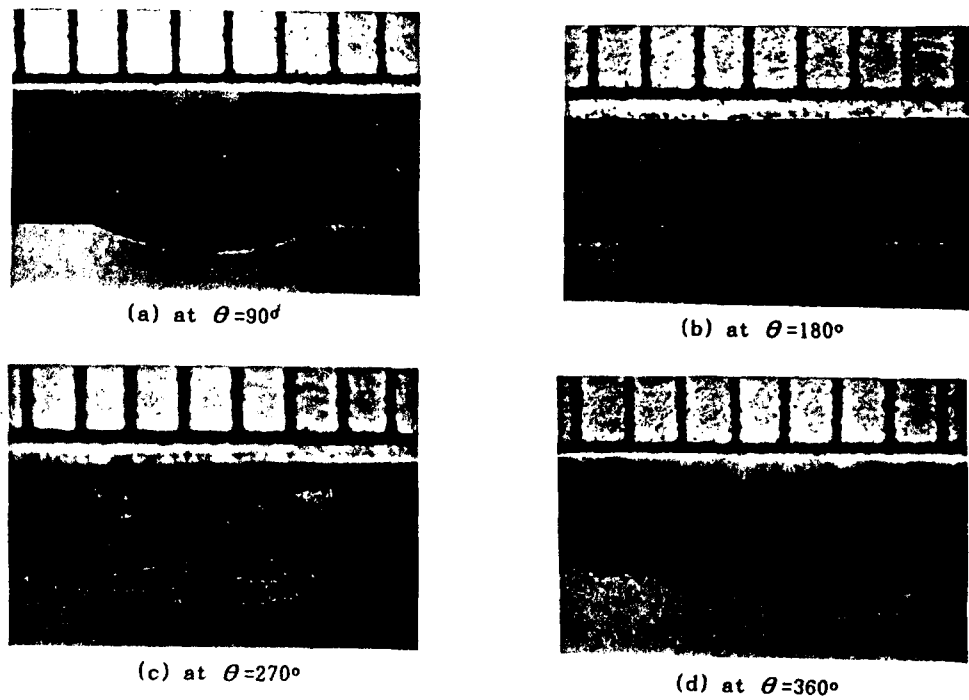


Fig. 7 Observed cross-sections of 6063 Al-alloy resultant welds for the welding condition shown Fig. 6