

# - 아아크 용접시 입열 조건의 최적화에 관한 연구 -

Optimization of the Heat Input Condition in Arc Welding

한양대학원 정밀기계공학과  
한양대학교 정밀기계공학과  
한양대학교 기계공학과

박 일철\*  
엄 기원  
박 경진

## 1. 서론

용접 기술은 대체로 현재 까지는 경험적 이었다. 실험과 경험은 용접의 현재 기술적 수준에 많은 공헌을 해왔다. 그러나 Computer시대의 출현으로, 용접의 배후에 Computer를 Engineer가 실용적으로 이용할 수 있게 되었으며, 용접에 있어서 열유동(heat flow)과 잔류응력을 정량화하려는 시도는 1930년대에 Rosental<sup>(1)</sup>, Boulton과 Martin<sup>(2)</sup>이 용접의 이론에 대한 해석적 방법을 개발하기 시작하였고, 특히 유한 요소법의 개발에 의해서 복잡한 형상의 과도적 열전도 해석을 포함<sup>(3)</sup>하여 미분 방정식으로 지배되는 문제를 푸는 강력한 도구로서 개발 되어 졌다.<sup>(4,5,6)</sup>

그러나, 용접 자동화와 정력화의 관점에서, 각종 용접 시공 조건을 최적인 용접 조건으로 설정할 필요가 있게 되었다. 용접 최적화에 관한 보고서들은 대체로 용접 전류, 속도등을 제어 가능한 변수의 용접 결과(비이드 폭, 용입 깊이 등)에서의 영향을 실험식 또는 회귀식으로 표현하였고, 그 관계식을 사용하여 필요한 용접 변수를 산출하는 방법이 제안 검토되어 왔다. 상술한 방법<sup>(7-9)</sup>들은 간단 명료하고, 그 한정된 조건하에서는 잘 일치하겠지만, 범용성이 없다는 약점을 가지고 있었다.

최근에 黃地尙義 등은 Computer Simulation에 의한 용접 조건 추정을 최적화 기법을 이용한 방법으로 최적입열 조건의 추정에 관해서 발표하였다.<sup>(10-12)</sup> 그러나 이 보고서들은 온도에 따른 물성치(열전도도, 비열, 밀도)들이 불분명하고, Shielding Gas에 관한 대류를 고려하지 않았으며, 잠열을 고려하지 않았다.

그래서 본 연구에서는 계산 모델에 의한 용접 조건 추정을 최적화 기법을 이용한 방법으로, 온도에 따른 물성치 값, 잠열과 Shielding Gas에 관한 Convective Heat Loss를 고려한 최적화 기법을 이용하였다. 여기서는 최적 용접 조건의 비이드 폭(일정한 비이드 폭)을 만들기 위해 용접 변수(용접 전류, 아아크 전압)들을 설계 변수(Design Variable)로 하였고, Computer Simulation으로 최적 용접 조건을 얻었다.

여기서 사용한 Package는 ANSYS 4.4 A의 Thermal Analysis와 Optimal Module를 사용하였다.

## 2. 용접 열원의 해석 방법

### 2-1 해석 모델링

이 해석 모델은 ANSYS 4.4A의 Element 57의 Isoparametric Quadrilateral Thermal Shell 를 사용하였다. 모델링은 Fig.1 과 같다.

### 2-2. Thermal Analysis의 해석 방법

#### 2-2-1. 용접 과정 방법

용접 방법은 GMAW(Gas Metal Arc Welding)이고, 이 Process는 다음과 같은 사항으로 해석한다.

- 1) 열의 일부는 평판에 도달하기 전에 주위로 방출한다.
- 2) 공작물을 연결하는 용융금속과 아아크 열은 공작물에서 3차원 열유동을 일으킨다.
- 3) 열전달 과정에서 열의 대류를 고려하였지만, 복사는 고려하지 않았다.
- 4) Shielding gas(CO<sub>2</sub>)의 흐름은 표면의 일부로서 강제 대류 열손실을 일으킨다.
- 5) 재료의 온도 성질(열전도도, 비열)과 잠열<sup>(6)</sup>등을 고려하였다.
- 6) 용접 과정에서 금속의 증발은 무시한다.
- 7) 열원은 용접선에 대칭으로 한다.
- 8) 아아크 열원은 반경 방향의 대칭인 Gaussian 분포로 고려하였다.

이 Thermal analysis에 사용한 재료(Mild Steel, 두께는 2 mm)의 온도 정수는 Fig.2(a)와 Fig.2(b)를 참조<sup>(5,13)</sup>하였고, 주위 온도는 20 °C로 한다.

2-2-2. 열원의 에너지 방정식

1) 내부의 열발생이 없을때 에너지 방정식은

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla T) \quad (1)$$

$\rho$  = 금속의 밀도(kg/m<sup>3</sup>),  $C_p$  = 금속의 비열(J/kg°C),

$K$  = 금속의 열전도도(W/m°C),

$\nabla = \frac{\partial}{\partial t^2}$ ,  $T$  = 금속의 온도(°C)

2) 경계 조건은 Fourier Equation으로

$$q'' = -K \nabla T \quad (2)$$

3) 열유속  $q''$ 는 경계에 의존하는 다음의 열전달 mode로서 구성된다.

(1)  $h(T - T_a)$ , 대류 열손실,  $h$  = 열전달 계수(W/m<sup>2</sup> °C),

$T_a$  = 분위기 온도(°C)

(2)  $-q''_s$  만일 표면이 지정된 열유속을 받는다면,  $q''_s$

$y = 0$  평면에서는 대칭으로 인해  $q'' = 0$  이다. 모든 다른 표면들은 대류 열손실을 초래한다. 그리고, 용접 Gun과 접해있는 Top Plate( $z =$  두께)만이 아아크로부터 열유속을 받는다.

2-2-3. 아아크 열원의 모델

아아크에서 평판으로의 아아크 열원은 Smartt<sup>(15)</sup>등이 Gaussian Profile에 맞는 열유속에 대해 실험으로 구했고, Goldak<sup>(16)</sup>등은 Profile에 바탕을 둔 반경 방향의 대칭인 Gaussian 분포로 시간에 따라 이동하는 열원으로 하였다.

Gaussian 분포:  $q''(r) = q''_0 \cdot \exp(-3r^2/r_b^2) \quad (3-a)$

또는  $q''(x,y,t) = \frac{3 \eta_{off} V I}{\pi r_b^2} \exp(-3 * [(x-vt)^2 + y^2]/r_b^2) \quad (3-b)$

여기서  $q''(r)$  = 평판상의 위치  $r$ 에 용착된 단위 면적 단위 시간당의 열유속

$q''_0$  = 최대  $q''$ ( $r=0$  에서)

$r$  = 아아크 중심으로 부터의 거리

$r_b$  = 全熱의 95%가 평판상에 용착되어지는 영역을 묘사하는 아아크 Beam 반경( 본 연구에서는  $r_b = 3$  mm )

$V$  = Arc 전압

$I$  = 용접 전류

$\eta_{off} = 0.8$  ( 용접 효율 )<sup>(5)</sup>

2-2-4. 표면 열손실

자연 대류 열전달은 대칭면 ( $y = 0$ )을 제외한 평판의 모든 표면에서 발생한다. 그러나 토모치의 노즐 아래의 영역은 직접적으로 Shielding Gas( CO<sub>2</sub> )의 흐름으로 인하여 강제대류를 받는다. 자연 대류 Friedman<sup>(14)</sup>등의 보고서를참고하여  $h = 10$  W/m<sup>2</sup> °C 이 Shielding Gas에 의해 영향을 받지 않는 모든 표면에 적용하였다. 용접 노즐 아래의 Plate 표면 일부에 대해서 아래와 같이 강제 대류를 적용하였다.<sup>(5,6)</sup>

$$h = 13 * Re^{1/2} * Pr^{1/3} * k_{gas} / NPD \quad (4)$$

Reynolds No. (  $Re$  ) =  $v_{gas} * D * \rho_{gas} / \mu_{gas}$

Prandtl No. (  $Pr$  ) =  $v_{gas} / \alpha_{gas} = \mu_{gas} * C_{p,gas} / k_{gas}$

여기서  $v_{gas}$  = Shielding Gas( CO<sub>2</sub> )의 flow velocity ( 0.8514 m<sup>2</sup>/sec )

$D$  = 노즐 직경 (  $18 \times 10^{-3}$  m )

$\rho_{gas}$  = Shielding Gas( CO<sub>2</sub> )의 밀도 ( 1.773 kg/m<sup>3</sup> )

$\mu_{gas}$  = 동점성계수 (  $149 \times 10^{-7}$  kg/m-sec )

$\alpha_{gas}$  = Shielding Gas( CO<sub>2</sub> )의 열확산 ( m/sec )

$C_{p,gas}$  = Shielding Gas( CO<sub>2</sub> )의 비열 ( 851 J/kg °C )

$k_{gas}$  = Shielding Gas( CO<sub>2</sub> )의 열전도도 (  $16.55 \times 10^{-3}$  W/m °C )

$NPD$  = 노즐과 plate 사이의 거리 (  $18 \times 10^{-3}$  m )

일정한  $h$ 값이 노즐 아래의 모든 점에 대해서 사용되며,  $h$ 의 반경방향 변화(Radial Variation)는 없다.

### 3. 용접 열원의 최적화 방법

#### 3-1. 용접 열원의 최적화

식 (3-b)의 열량( $q''$ )의 식에서 용접변수(전압, 전류)를 설계 변수( Design Variables )로 하여, 목적 함수를 나타내면 다음과 같다.

$$\text{목적 함수: } f(I, V) = (T_m - T_o)^2 \quad (5)$$

여기서,  $T_m$  = 요구하는 온도 ( $T_m = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ )

$T_o$  = 최적화를 원하는 각 점의 온도 ( $^\circ\text{C}$ )

단, 용접 속도( $v_t$ )는  $2.5 \text{ mm/sec}$ , 용접 효율( $\eta_{eff}$ )은  $0.8$ , 아아크의 반경( $r_b=3\text{mm}$ )로 일정하게 놓고 용접 열원의 최적화를 하였고, 설계 변수의 조건은 아래와 조건에서 적용하도록 하였다.

용접 전류 ( $I$ ):  $30 \text{ A} < I < 150 \text{ A}$

아아크 전압 ( $V$ ):  $15 \text{ V} < V < 25 \text{ V}$

제약 조건 ( Constraint Conditions )은

최적화를 원하는 각 점의 온도 ( $T_p$ )는

$$1360 \text{ }^\circ\text{C} < T_p < 1420 \text{ }^\circ\text{C} \quad ( p = 1, 2, \dots, 17 )$$

로 하였다.

Fig.3 에는 최적화의 모델을 나타내고있으며, bead-on plate 용접 에 대한 것이다. 그림에서와 같이 용접의 초기 상태에서 정상 상태를 지나 용접 종료 상태까지를 일정한 비이드 폭(용접선 방향의 직각 방향으로  $3\text{mm}$ )을 만들기 위한 방법을 나타내고 있다.

본 연구에서는, 이것의 model과 비선형 최적화 방법을 이용하여 필요한 용접조건을 추정했다. 구체적으로는 비이드 폭을 요구값을 주고 그 확보에 필요한 입열조건(arc 전류  $I$ , 용접 전압  $V$ )을 역 추정하였다.

### 4. 해석 결과 및 고찰

Fig.4는 최적 입열 제어에 의한 전류와 전압을 나타내고 있다.

초기 상태에서 3초까지는 용접 아아크의 불안정으로 전압값이 차이가 크게 되는 경향을 보이고 있고, 3초 이후에는 아아크의 안정으로 거의 일정한 전압값과 전류값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 용접 종료시에는 아아크의 불안정으로 전압값과 전류값이 차이가 크게 되는 것을 알 수 있다.

Fig.5는 최적 입열 제어에 대한 초기 상태에는 Heat Input가 최고값을 나타내고 있으며, 약 3 초 이후에는 준정상 상태로 된다. 종료시에는 큰값을 나타내고 있다. 시편에서 용접선 방향에서 직각방향으로  $3 \text{ mm}$ 위치에서 열원이 이동하는 점들의 온도를 나타내고 있으며, 거의 요구하는  $1400 \text{ }^\circ\text{C}$  부근에서의 온도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 최적 입열 형식을 2차원 열전도를 나타내고 있지만, 여기에서 이용한 방법으로 3차원문제에서도 적용 할 수 있다. 추후 최적입열량을 실험적으로 검토 하여 발표 할 예정이다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 용접부의 열이동 문제를 열전달 방식의 해석과 비선형 최적 입열 형식의 방법을 이용하여 얻어진 용접부의 최적 입열제어 문제에 대해서 검토했다.

본 연구에서 얻어진 결과를 요약해서 아래와 같이 서술한다.

- 1) 용접부의 온도제어 문제를 열전도 방정식의 해석해를 이용해서 최적입열 문제로 표현하였다.
- 2) 본 연구의 방법으로 일반적인 문제에 관해서도 적용 할 수 있었고, 거의 만족할 만한 값을 얻었다.

## 참고 문헌

1. Rosental, D.; 1941. Welding Journal 20(5) : pp.220 S - 234 S
2. Boulton, N. S., and Lance Martin, H. E.; 1936. Proc. Inst. Mech. Engrs. 123 ; pp.295 - 347, London, England
3. Wilson, E.L, and Nickell, R.E ; 1966. Nuclear Engr. and Design 4 : pp.276 - 286
4. Segerlind, L.J.; 1976, Applied Finite Element Analysis. John Wiley Sons Ins.
5. Tekriwal, P., Stitt, M., and Mazumder, J.; 1987. Metal Construction
6. Tekriwal, and Mazumder, J.; 1988. " Finite Element Analysis of Three Dimension Transient Heat Transfer in GMA Welding", Welding Journal .pp.150s - 156s
7. 益本, 高野, 吉田, " CO<sub>2</sub> I형 맞대기 일층 용접 parameter 설정 program", 용접학회지 48, No.1, pp.17-21(1979)
8. Lauterwald, B., " Mathematische Ermittlung Optimaler Arbeitwerte fur die up-Band Verdindungschweibung" ZIS Mitteilungen, 12, H9, pp1249 - 1260 (1970)
9. Dubovetskii, S. V., Sergatskii, G. I., and Kasatkin, O. G., " Optimization of CO<sub>2</sub> Welding Conditions", Automatic Welding, 33, No.12, pp 22 -26, ( 1980 )
10. 黃地尙義, 近藤勝義, 西口公地, "최적 입열 조건 추정의 알고리즘", 용접학회 논문집 제 8 권, ( 1990 ), 제 1 호, pp 48 - 53
11. 黃地尙義, 近藤勝義, 西口公地, 森安雅治, 平本誠剛, "아아크 용접의 최적 입열 제어", 용접학회 논문집, 제 8 권, ( 1990 ), 제 2 호, pp 48 - 53
12. 黃地尙義, 米谷裕次, 吉田裕彦, 西口公地, 康 鐵 "계산 모델에 의한 용접 조건 추정과 탐색", 용접학회 논문집, 제 8 권, ( 1990 ), 제 2 호, pp 9 - 14
13. Krutz, G. W., and Segerlind, L. J.; 1978. Welding Journal 57(7), 221s - 216s
14. Friedman, E., and Glickstein, S. S., Welding Journal 55(12) : 408s - 420s
15. Smartt, H. B., Stewart, J. A., and Einerson, C. J.,; " GTA heat input distribution measurements ", American Weld Soc. 66th annual convection, Las Vegas USA May 1985.
16. Goldak, J., Chakravarti, A., and Bibby, M.,; 1984. Met. Trans. 15b(6) pp.299-305
17. Tekriwal, P., and Mazumder, J.,; 1988 , Metal Construction ( to be published )
18. Arora, J. S., " Introduction to Optimum Design " 1989. McGraw-Hill Company pp. 45-49.

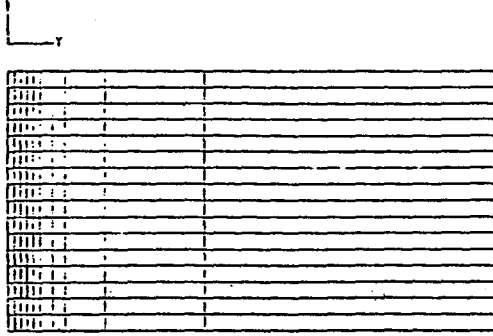


Fig. 1 Finite Element Model

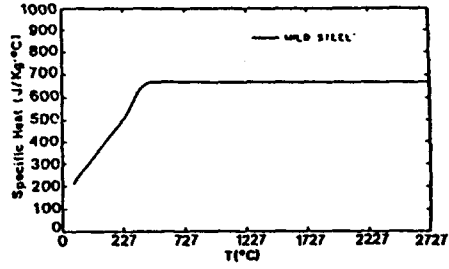


Fig. 2(a) Specific Heat versus Temperature for Mild Steel

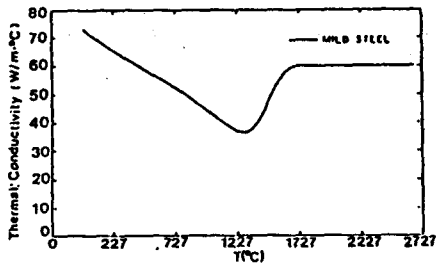


Fig. 2(b) Thermal Conductivity versus Temperature for Mild Steel

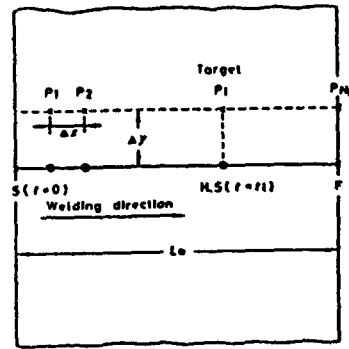


Fig. 3 Model of Optimal Heat Input ( $\Delta x = 2.5 \text{ mm}, \Delta y = 3 \text{ mm}, L_0 = 40 \text{ mm}$ )

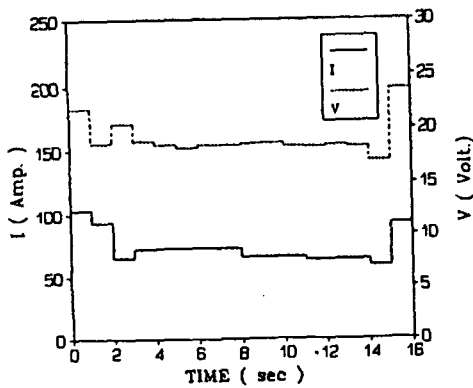


Fig. 4 Current and Voltage by Optimal Heat Input

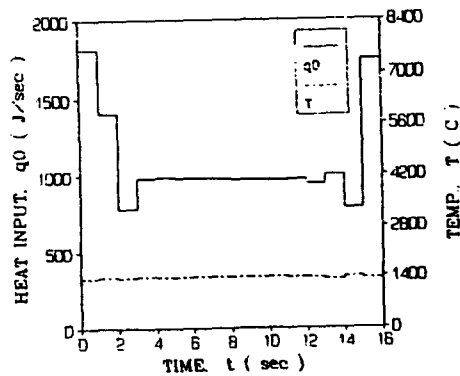


Fig. 5 Heat Flux and Temperature by Optimal Heat Input