

研 究 論 文
---------

大韓熔接學會誌  
第8卷第3號 1990年 9月  
Journal of the Korean  
Welding Society  
Vol.8, No.3, Sep., 1990

## 후판 용접부 온도 분포 해석(I)<sup>+</sup>

崔 光\* · 張來雄\* · 嚴基元\*\*

### Temperature Analysis of Thick Plate during Welding(I)<sup>+</sup>

K. Choi\*, R.W. Chang\*, G.W. Eom\*\*

**Key Words** : Temperature Distribution(온도분포), Thick Plate(후판), Analytical Solution(해석해), Numerical Solution(수치해), Temperature Measurement(온도 측정)

#### Abstract

Temperature distribution of thick plate during welding was investigated. Applied welding process was shielded metal arc welding which was known as one of the most utilized processes in fabrication fields. Heating and cooling cycles were recorded by employing high fidelity recorded and K-type thermocouple of 0.3mm in diameter.

Both analytical and numerical calculations were preformed so as to verify the thermal cycle measurement. Results showed that the temperature of a welded points at given time could be predicted by the theoretical calculations. It was considered that methods could be applied to real structural components with slight modification.

#### 1. 서 론

철강 구조물을 접합할 때 용접공정이 대부분을 차지하고 있으며 용접 공정은 주로 아크 용접으로

이루어 지고 있다. 이러한 아크 용접은 순간적인 급열, 급냉에 의하여 접합이 되므로 다른 접합 과정보다 경제적이다.

그러나 아크 용접을 실시하는 경우 고열에 의해

+ 1988년 4월 29일 춘계학술대회 발표.

\* 정희원, 산업 과학 기술 연구소

\*\* 정희원, 한양 대학교 공과 대학

강구조물의 접합부 근처는 열영향을 받게 되며 이러한 열이력에 의해 용접열영향부(Heat affected zone)의 금속조직 및 기계적 성질의 변화가<sup>1)</sup> 일어나며 잔류응력 및 변형이<sup>2)</sup> 발생하며 이와 같은 변화로 인하여 용접구조물의 취성파괴 및 좌굴에도 영향을 미친다<sup>3)</sup>.

용접 열영향부의 특성은 용접 구조물이 대형화 되고 사용조건이 가혹화 됨에 따라 안전성 문제와 밀접한 관계가 있으며 또한 용접 자동화의 활발한<sup>11),15)</sup> 추세에 대응하기 위하여 용접시 온도분포는 기초적인 자료로서도 중요하다.

그러므로 용접부의 안전성과 효율성의 향상을 위해서 우선적으로 용접부의 온도분포를 정확하게 해석하는 것이 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 일반적으로 용접구조물에 사용되는 후판강재의 피복아크용접시 승온과정에 대한 해석을 수행하였으며, 실험을 통하여 이론의 타당성을 검토함으로써 효율적인 용접시공에 기여하고자 한다.

## 2. 온도분포의 이론적 고찰

### 2.1. 해석해를 이용하는 방법

후판을 용접하는 경우 온도는 용접선 방향, 판 폭 및 판두께방향으로 분포되므로 3차원 온도분포 해석을 하여야 한다.

田中<sup>8)</sup>은 이동열원에 의한 온도분포를 3차원으로 해석하였는데 Rosenthal의 방법<sup>4,5)</sup>과는 달리 후판에 점열원이 가하여 질 때 용접시 대류에 의한 열손실을 고려하여 온도분포를 구하고 이를 용접진행 방향으로 용접을 수행한 시간동안 적분하여서 온도분포를 구하였다.

후판에 용접을 할 경우 Fig. 1과 같은 직교좌표계에서의 임의의 점열원이 가해질 때 후판의 온도분포는 다음과 같이 편미분 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

식(1)에 있어서

점열원이 가해지는 경우의 경계조건은

$$x=0 \text{ 일 때 } \frac{\partial(T-T_0)}{\partial x} = d(T-T_0)$$

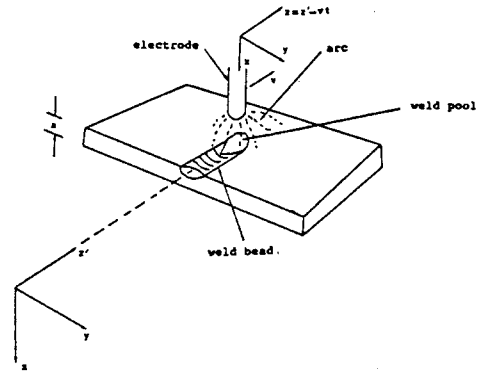


Fig. 1 Coordinate system for moving heat

$$x=a \text{ 일 때 } \frac{\partial(T-T_0)}{\partial x} = -d(T-T_0)$$

이 된다.

여기서  $a$  = 판두께 (cm)

$x, y, z'$  : 직교 좌표계

$z = z' - vt$  이동좌표계

$r = \sqrt{y^2 + z^2}$  (cm)

$t$  : 시간 (sec)

$T$  : 온도 (°C)

$T_0$  : 용접시 주위 온도 (°C)

$c$  : 판의 비열 (cal/cm°C)

$\lambda$  : 판의 열전도율 (cal/cm°C sec)

$h$  : 열전달율 (cal/cm²°C sec)

$k = \lambda / c \cdot \rho$  : 온도 전도율 (cm²/sec)

$d = a / \lambda$  : 방열계수 (1/cm)

$B = ah$  : Biot number

田中의 해석<sup>8)</sup>에 의하면 입열량  $Q$ 의 점 열원에 의한 후판에서의 온도 분포는 다음과 같다.

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi\lambda at} \sum_0^{\infty} A_s \left[ \cos \frac{x}{a} u_s + \frac{ad}{u_s} \sin \frac{x}{a} u_s \right] \times e^{-\frac{k}{a^2} u_s^2 t - \frac{y^2 + z'^2}{4kt}} \quad (2)$$

$Q$  : 공급열량 (cal)

여기서

$$\tan u_s = \frac{2Bu_s}{-B^2 + u_s^2}$$

$u_s$ 는 0을 제외한 크기순으로  $S+1$ 번째근

$$A_s = \frac{u_s^2}{u_s^2 + B^2 + 2B}$$

임의의 시간  $t$  동안  $z$ 방향으로 용접을 수행한

경우의 온도 분포는 (2)식을 시간에 대하여 적분한 형태로 표시될 수 있다.

$$T - T_o = \frac{q}{2\pi a \lambda} \sum_0^{\infty} A_s \left[ \cos \frac{x}{a} u_s + \frac{ad}{u_s} \sin \frac{x}{a} u_s \right] \times \int_0^{\tau} \frac{e^{-\frac{k}{a^2} u_s^2 (t'-t)} - \frac{y^2 + (z+v(t'-t))^2}{4k(t'-t)}}{t'-t} dt' \quad (3)$$

q : 공급 열량(cal/sec)

t'-t = τ로 두면,

용접이 진행되어 준정상 상태에서의 온도 분포는

$$T - T_o = \frac{q}{2\pi a \lambda} \sum_0^{\infty} A_s \left[ \cos \frac{x}{a} u_s + \frac{ad}{u_s} \sin \frac{x}{a} u_s \right] \times e^{-\frac{vz}{2k}} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\left(\frac{k}{a^2} u_s^2 + \frac{v^2}{4k}\right)\tau} - \frac{r^2}{4k\tau}}{\tau} d\tau \quad (4)$$

로 나타낼 수 있게 된다.

$$\int_0^{\infty} \frac{e^{-\left(\frac{k}{a^2} u_s^2 + \frac{v^2}{4k}\right)\tau} - \frac{r^2}{4k\tau}}{\tau} d\tau = 2K_o \left( \frac{r}{a} \sqrt{u_s^2 + \frac{a^2 v^2}{4k^2}} \right) \quad (5)$$

K<sub>o</sub> : 변형 2종 0차 Bessel 함수

의 관계를 이용하여 변환하면 다음과 같다.

$$T - T_o = \frac{q}{\pi a \lambda} e^{-\frac{vz}{2k}} \sum_0^{\infty} A_s \left[ \cos \frac{x}{a} u_s + \frac{ad}{u_s} \sin \frac{x}{a} u_s \right] \times K_o \left\{ \frac{r}{a} \sqrt{u_s^2 + \frac{a^2 v^2}{4k^2}} \right\} \quad (6)$$

식(6)은 준정상 상태에 있어서 대류열손실을 고려한 후판의 온도분포이다.

### 2.2. 수치 해석을 이용하는 경우

해석하는 용접부의 온도변화에 대하여 경향을 파악하는 데 있어서는 유용한 방법이나 철강재는 용접과정에서 열전달 상수들이 Fig. 2와 같이 온도에 따라 변화하거나 경계조건이 불균일, 용접형상의 변화와 같은 경우에 있어서는 정확한 온도 분포를 구하는 것이 곤란하거나 불가능하다.

이러한 난점을 해결하기 위하여는 수치해석 방법중 유한요소법<sup>9)</sup>을 이용하면 용접시의 온도 분포를 복잡한 형상이나 열전달 상수의 변화, 용접

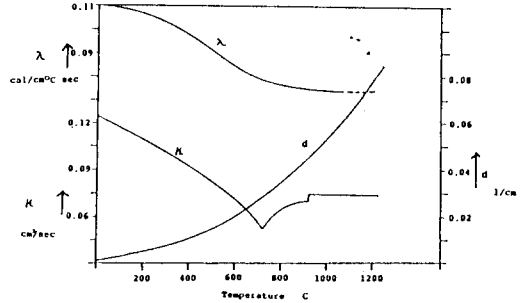


Fig. 2 Variation of heat transfer coefficient with temperature

시 경계조건<sup>13)</sup>의 변화를 고려하여 해석함으로써 용접 과정을 보다 정확하게 해석할 수 있다.

### 3. 후판의 온도 분포 측정

후판의 온도분포 측정은 인장강도 50kg/mm<sup>2</sup>급의 저합금 고장력압연 강재를 사용하였으며 시험편 치수는 두께 20mm, 폭 100mm 및 길이는 200mm로 하였다.

용접시의 준정상 상태에서의 온도분포를 측정하기 위하여 용접이 시작되는 점에서 용접진행 방향으로 85mm되는 지점에서 온도측정을 실시하였다<sup>7),10)</sup>.

온도측정은 직경 0.3mm의 Chromel-Alumel 열전대를 이용하였으며 측정하고자하는 위치에 열전대를 부착하기 위하여 직경 3mm의 drill을 이용하여 시편의 두께방향으로 구멍을 뚫고 열전대를 Alumina tube에 넣어 percussion-용접으로 부착하였다.

측정은 Fig. 3과 용융지와 표면에서 2mm떨어지고 bond부에서 1, 2, 4mm 떨어진 점에서 실시하였다.

용접봉은 직경 4mm의 50kg/mm<sup>2</sup>급을 사용하였으며 용접시 전류 170A, 전압 28V, 속도 17cm/min으로 하였으며, 판폭의 중간부분에 bead on plate-용접을 1분 동안 실시하였다. 용접진행에 따른 온도의 기록은 X-T 정밀기록장치를 이용하였다.

시편은 폭의 양단을 예리한 끝으로 지지하여 용접을 실시하였다. Fig. 4는 용접시 4지점들에서의 온도 분포를 측정한 결과이다.

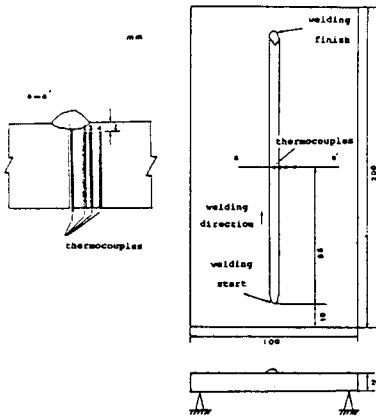


Fig. 3 Arrangement for temperature measurement in bead on plate

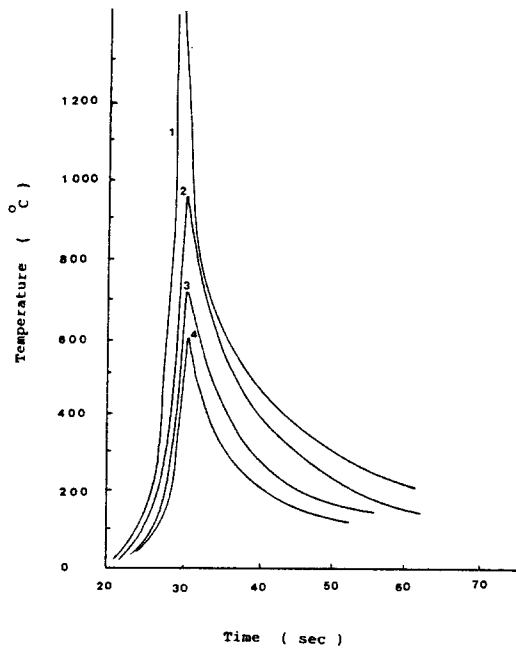


Fig. 4 Temperature history at each location

#### 4. 후판의 온도 분포 계산

##### 4. 1. 해석해

후판의 온도 분포해석은 일반적으로 용접이 시작된 후 약간의 시간이 경과하면 준정상 상태가 되므로<sup>4,5,7)</sup> 본 연구에서는 田中의 해중 준정상 상

태의 해인 식(6)을 이용하였다.

계산에서  $u_s$ 의 값은 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 하여 bisection방법으로 8번째 항까지 계산을 수행하였다.

그리고 변형 2종 Bessel함수  $K_0(x)$ 의 정확한 값을 얻기 위하여 Watson<sup>12)</sup>의 Table을 이용하였다.

계산은  $X=0\sim 20\text{mm}$

$Y=0\sim 20\text{mm}$

$Z=-8\sim -20\text{mm}$

의 범위에 대하여 2mm간격으로 수행하였다.

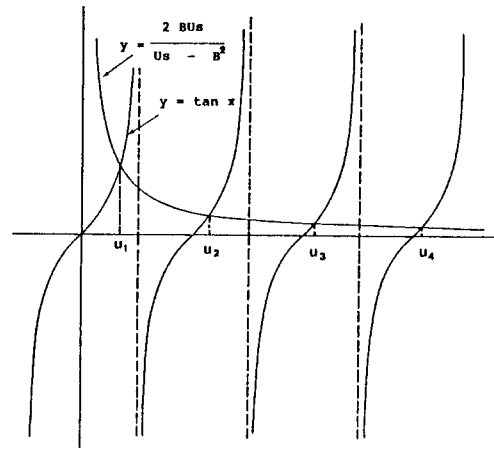


Fig. 5 Determination of  $u_s$

그리고 피복 아크용접시 용접열효율은 65%로 가정하였으며 용접 입열량은

$$q = 0.24\eta I^2 R \text{이므로}$$

$$q = 0.24 \times 0.65 \times 170 \times 28 = 742.56 \text{ cal/sec}$$

열전달 상수는 적분 평균치인

$$\lambda = 0.085 \text{ cal/cm}^\circ\text{C sec}$$

$$k = 0.07 \text{ cm}^2/\text{sec}$$

로 하였다.

공기중에서 대류에 의한 열손실을

$$h = 0.008 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$$

로 하여 계산을 수행한 결과를 X-Y 평면( $Z=0$ )에 대하여 Fig. 6 및 Fig. 7에 나타내었다.

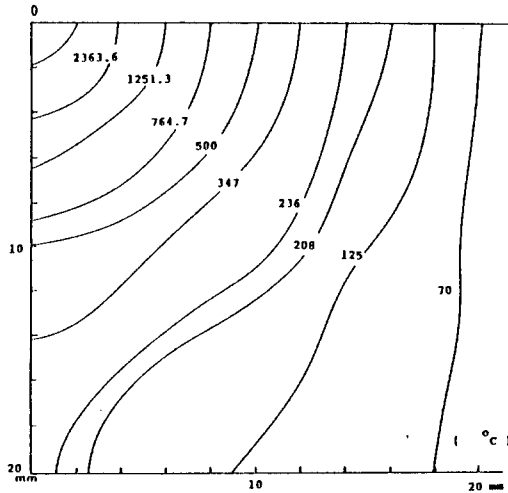


Fig. 6 Temperature distribution(x-y plane, z=0)

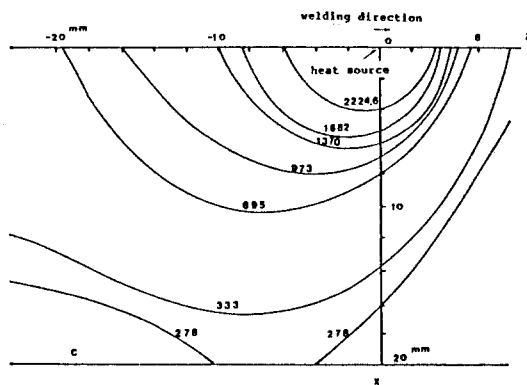


Fig. 7 Temperature distribution(x-z plane, y=0)

#### 4.2. 유한요소법에 의한 해석

유한요소해석은 본 연구에서는 평면 및 축대칭 열전도도문제에 대하여 해석이 가능한 Huebner<sup>9)</sup>의 program을 수정하여 사용하였다.

용접이 진행되고 일정시간이 지나면 용접은 전체적으로 준정상 상태가 되므로 해석은 정상상태에 대하여 실시하였는데, Z=0에서 X-Y면은 중심선을 기준으로 좌우 대칭이므로 대칭축의 1/2면에 대하여 계산을 하였다.

요소는 Fig. 8과 같은 삼각형요소를 사용하였으며 용착금속 부근의 급격한 온도경사가 예상되는 부위에서는 요소를 세분하였다. 본 연구에서는 192 요소, 117절점을 사용하였다.

온도 상승지점을 알기위하여 佐藤<sup>10)</sup>의 이동열원

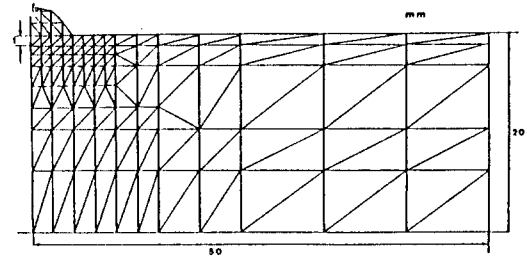


Fig. 8 Finite element model of bead on plate welding

에 대한 해석과 같이 전방은 용착부를 중심으로 축대칭 형상으로 해석하였으며 폭의 1/2을 반경으로 하여 계산 모델은 평면과 동일하게 하였다.

저합금강인 시험재의 열전달상수들은 Fig. 2와 같이 온도에 따른 변화를 고려하였고, 용입 형상은 용접 완료 후 용접선에 직각인 단면을 절단하여 nital 4%용액으로 부식시켜서 관찰하였다.

용접시의 온도분포 계산에는 경계면에 일정온도로 두는 방법<sup>15,17)</sup>과 heat flux를 주는 방법<sup>13,14)</sup>이 있는데 본 연구에서는 전자를 취하였다.

모재와 용착금속의 접합부 온도를 1350°C로 하였으며<sup>1,15,16)</sup>, 대류에 의한 열손실도 고려하였다. 앞에서 언급한 경계조건들을 고려하여 계산한 결과의 등온선을 Fig. 9 나타내었다.

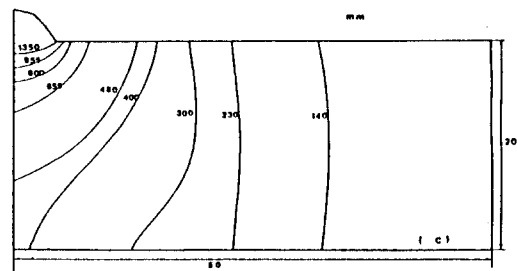


Fig. 9 Temperature distribution calculated by finite element method

#### 4.3. 해석 및 실험에 대한 고찰

해석해와 유한요소법을 이용한 수치해 모두 용접부부근에서 급격한 온도경사를 나타내는 경향은 일치함을 알 수 있었다. 따라서, 해석해 및 수치해를 이용하면 용접부의 온도분포 특성을 이해하는데 유용하다고 사료된다.

Fig. 10은 실험치와 해석해, 수치해의 승온과정을 비교한 것이다.

해석해의 경우는 4점에서 측정된 온도보다 높았으며 용융부와 가까울수록 측정값보다 크게 나타났는데, 이는 열전달 상수를 일정하게 두고 계산을 수행하였기 때문이다.

유한요소법을 이용한 경우에 있어서는 승온과정을 전방에 대하여 측대칭 해석을 하여 얻어진 온도분포와 평면 온도분포 해석에 의하여 얻어진 값을 연결한 것이다. 유한요소법을 이용하여 계산을 수행한 결과는 4점에서 측정된 실험치와 거의 일치함을 알 수 있었는데 이는 온도에 따른 강재의 열전달 상수 변화를 수치해에서는 고려하였기 때문이다. 따라서 용접시 야금학적으로 중요한 용접부부근의 정확한 온도분포 해석을 할 경우는 수치해를 이용하여 온도에 따른 열전도 상수의 변화를 고려하면 실제와 근사한 해석을 할 수 있으며 또한 온도의 승온과정은 전방부분을 측대칭문제로 해석하는 것이 타당성이 있다고 사료된다. 그러나 용접부에서 거리가 떨어진 부분의 승온과정은 3차원 해석을 통한 검증이 필요하다고 사료된다.

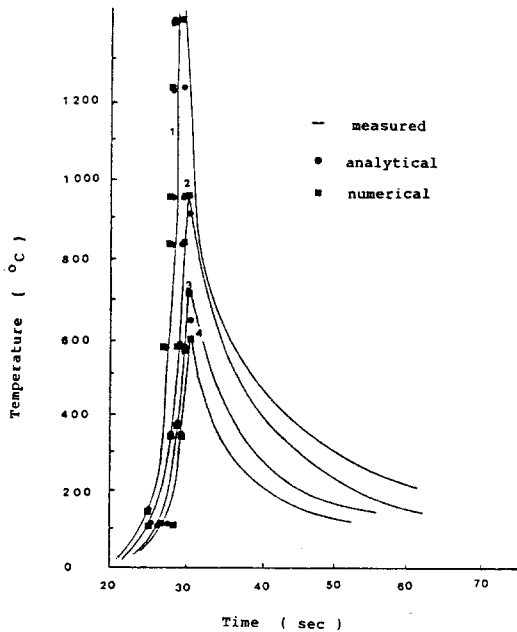


Fig. 10 Comparison of experiments and calculations

## 5. 결 론

본 연구에서 용접시의 온도분포를 해석을 후판에 대해 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 용접부의 해석해 및 수치해에 의한 온도분포는 용접시에 있어서 열원부근에서 급격한 온도 상승 및 급격한 온도 편차를 예측할 수 있었으며 이를 통하여 보다 합리적으로 용접부의 온도 분포를 해석할 수 있음을 알 수 있었다.

2) 해석해를 이용하는 경우에 있어서는 용접부부근의 최고온도분포는 실험치보다 높게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

3) 그러나 유한 요소법을 후판의 용접시 온도분포를 구하는데 적용할 경우 용접부 부근에서 보다 정확한 온도분포를 구할 수 있음을 알았으며 용접방법, 용접시공조건 및 재질이 변화하는 경우에도 용접부 부근의 온도분포 해석에 효과적으로 적용할 수 있어 적절한 용접시공에 기여할 수 있다고 사료된다.

4) 본 연구과정에서 언급되지 않은 용접부의 냉각 및 야금학적인 변화에 대하여서도 계속적인 연구를 수행하고자한다.

## 참고문헌

- 1) 稻垣 道夫: HT60 高張力鋼의 熔接用連續冷却 相態圖, 日本 熔接 學會誌, 第31卷, 第2號, (1962), pp.317-322.
- 2) 藤田 讓, 吉識 雅夫, 川井 忠彦: 殘留應力이 板의 座堀強度에 미치는 影響, 日本 造船 學會論文集, 第107號, (1960), pp.187-194.
- 3) 長谷川, 高橋, 鈴木: 高張力鋼 熔接繼手의 破壞靱性, 日本 熔接 學會誌, 第44卷, 第4號, (1975), pp.317-322.
- 4) Rosenthal, D: The mathematical theory of heat distribution during welding and cutting, Welding Journal, Vol.20, No.5, (1941), pp.220s-234s
- 5) Resenthal, D: The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments, A.S.M.E., 1946, Nov., pp.849-866.
- 6) Rosh, J.R. and Trabant, E.A.: Arc welding

- temperature, *Welding Journal*, 1956, August, pp.396s-400s.
- 7) 仲 威雄, 増淵 興一: 熔接된 板의 溫度 分布에 關한 研究(第1報), *日本 熔接學會誌*, 第13卷, 第7號, (1947), pp.1-11.
  - 8) 田中 正三: 移動 熱源에 熱傳道에 대하여 *日本 熔接學會誌*, 第13卷, 第9號, (1943), pp.347-359.
  - 9) Huebner, K.H.: *Finite element method for engineers*, Wiely and Sons, 1975.
  - 10) 渡邊 正紀, 佐藤 邦彦: 熔接力學과 그 應用, 朝倉書店(1969).
  - 11) 松山 準也: Submerged 아크 熔接의 高速化에 關한 基礎的 研究, *東京 大學 學位 論文* (1981).
  - 12) Watson, G.N.: *Theory of Bessel Functions*, Cambridge University Press(1944).
  - 13) Moshaiov, A., Latorre. R.: Temperature distribution during plate bending by torch flame, *Journal of Ship Research*, Vol.29, No. 1,(1988), pp.810-821.
  - 14) 홍 준표, 백 운형: 박판 용접에 있어서 열 전달 해석, *대한 금속 학회지*, Vol. 29, No, 8, (1988), pp. 810-821.
  - 15) Glickstein, S.S. and Friedman: Effect of weld pool configuration on heat affected zone shape, *Welding Journal*, Vol.60, (1981), pp. 110s-112s.
  - 16) Thaulow C., A.J. Paauw: The heat affected zone toughness of low carbon microalloyed steels, *Welding Journal*, Vol.68, (1987), pp. 266s-279s.
  - 17) 森 幸雄: 低炭素鋼의 炭酸가스아크 熔接部의 梨形溶込 비드에 있어서 凝固龜裂現象과 그 防止에 關한 研究, *名古屋 大學 博士學位 論文*(1981).