

熱傳導解析에 의한 熔融池形狀特性에 관한 研究

釜山水產大學校 李 東 郁
○ 釜山水產大學校 大學院 吳 德 均

1. 序 論

熔接時의 變形 및 殘留應力의 發生등은 熱履歷에 影響을 받아서 일어나므로 熔接現象에 대한 理論 및 實驗的으로 많은 研究가 進行되고 있다.

熔接에서 熔融池內의 熱의 흐름은 熔入形狀뿐만 아니라 熔接部의 溫度履歷에 커다란 影響을 미치므로 熔融池內의 熱輸送特性을 檢討하는 것은 熔接部의 機械的, 冶金的性質을 把握하기 위해서도 매우 중요하다. 最近에는 熔融池內의 溫度計測도 시도되고, 熔融池內의 熱輸送特性에 관한 情報가 점점 增加하여, 熔融池內의 熱의 흐름은 對流에 의해 影響을 받는다는 것 등이 밝혀지고 있다. 실제의 熔接에 있어서 熔融池內의 熱輸送은 熱對流, 熱傳導, Plasma 氣流등의 影響을 받으며, 母材 표면에서는 熱傳達, 熱放散등에 의한 熱損失이 일어난다.

本 研究에서는 母材의 熔入形狀, 熔入깊이, 熱影響部의 範圍등에 對하여 固體部分에 있어서 物性置의 溫度依存性和 非依存性, 入熱強度의 크기, 入熱時間등의 影響을 檢討하였다. 靜止狀態의 有限幅을 갖는 平面熱源에 대하여 有限要素法에 의한 二次元 熱傳導解析을 行하였다.

2. 熱傳導解析의 數值解法

2.1 基本 方程式

3次元 직교 좌표계에 의한 일반적인 非正常 熱傳導 方程式은 다음 식으로 표현된다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}) \quad \dots \dots (1)$$

여기서, $T = T(x, y, z, t)$: 온도, ρ : 밀도, C : 비열

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$: x, y, z 방향의 열전도율

열전도율이 等方性일때, $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda$ (상수)

따라서,
$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad \dots \dots (2)$$

또한, Fourier법칙 에 의해서 熱流速은 다음과 같이표현 된다.

$$q = - \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad \dots \dots (3)$$

3차원 熱傳導解析에 있어서 解析對象을 有限要素로 분할하면 다음과 같다.

$$T(x, y, z, t) = [N(x, y, z)] \{ \phi(t) \} \quad \dots \dots (4)$$

여기서, $[N]$ = 恒상함수 Matrix

$\{ \phi \}$ = 시각(t)에 있어서 요소의 절점온도 Vector

$[N]$ 을 重량함수(Weighting function)로 하여 Galerkin 有限要素法을 적용하면,

$$[k] \{ \phi \} + [c] \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right\} = \{ f \} \quad \dots \dots (5)$$

$$[k] = \int_{V_0} \lambda \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} \right) dV + \int_{S_0} a_c [N]^T [N] dS + \int_{S_0} a_r [N]^T [N] dS \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$[c] = \int_{V_0} \rho c [N]^T [N] dV \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\{f\} = - \int_{S_0} q_0 [N]^T dS + \int_{S_0} a_c T_c [N]^T dS + \int_{S_0} a_r T_r [N]^T dS \quad \dots (8)$$

([k] : 열전도 Matrix, [c] : 열용량 Matrix, { f } : 열유속 Matrix)

2.2 非正常 熱傳導 解析 手法

시간 $t \Rightarrow t + \Delta t$ 때의 溫度를 計算하기 위하여 식(5)의 $\{\Phi\}$, $\{\partial\Phi/\partial t\}$ 에 시간 $t + \alpha \Delta t$ 에 대한 식을 代入하고, $\Phi(t + \Delta t)$ 에 대하여 풀면 다음과 같다.

$$\left[\alpha [K] + \frac{1}{\Delta t} [C] \right] \{ \Phi(t + \Delta t) \} = \left[(\alpha - 1) [K] + \frac{1}{\Delta t} [C] \right] \{ \Phi(t) \} + \{ F \} \quad \dots\dots\dots (9)$$

여기서 $\Phi(t)$ 를 既知라고 하면 非正常 熱傳導 문제의 有限要素式은 (9)식을 이용해 풀수가 있다.

식(9)에서 $\alpha = 0$ 일때 양해법, $\alpha = 0.5$ 으로 계산할때 Crank - Nicolson법, $\alpha = 1$ 일때는 음해법으로 구분 된다.

3. 數值解析條件 및 計算結果

3.1 入熱強度의 影響

Fig.1의 (a), (b), (c)에 總入熱量이 같도록하여 각 入熱強度($Q=3000 \text{ cal/cm}^2 \text{ sec}$: $t=1.5 \text{ sec}$, $Q=1000 \text{ cal/cm}^2 \text{ sec}$: $t=4.5 \text{ sec}$, $Q=600 \text{ cal/cm}^2 \text{ sec}$: $t=7.5 \text{ sec}$)에 대한 解析結果를 나타낸다. 그림에서 용점(1530°C)은 實線, HAZ부의 境界(750°C)를 一點鎖線으로 나타내었다. 同一入熱量의 條件에서도 入熱強度가 작은 쪽의 熔融範圍 및 HAZ의 境界가 入熱強度가 큰 쪽 보다 넓게 나타났다.

Fig.2의 (a) 및 (b)는 $Q=1000 \text{ cal/cm}^2 \text{ sec}$, $t=0.5, 1.0 \dots 4.5 \text{ sec}$ 및 $Q=3000 \text{ cal/cm}^2 \text{ sec}$, $t=0.5, 1.0, 1.5 \text{ sec}$ 일때 表面에서의 거리(x)와 온도(T)분포의 關係를 각각 나타내며, 여기서 總入熱量은 同一하다. 그림에서 總入熱量이 同一할때 $x=4 \text{ mm}$ (熱源의 端部)에서 溫度傾斜가 급한 것을 알 수 있다. Fig.2의 (c)에는 入열강도가 각각 $Q=1000, 1500, 3000 \text{ cal/cm}^2 \text{ sec}$ 일때 最高溫度를 나타낸다. 그림에서 入熱強度가 크면 必수록 온도 T는 큰 쪽으로 增加하며, 總入熱量이 同一한 條件(a, b, c)에서 入熱強度가 큰 쪽을 생각하면, 熱源近方에서는 熱의 傳과속도가 상당히 빠른 것을 알 수 있다.

3.2 對流效果의 影響

熔融池와 未熔融狀態인 母材部分을 分離해서 취급하였고, 각각의 부분에 대한 熱의 흐름을 熱傳導論의으로 가정했다. 母材融點은 1530°C 이며, 融點보다 溫度가 높은 부분을 熔融池로 취급하였다. 熔融池에 대해서 對流效果를 熱傳

導係數로 置換하여 熱輸送의 速度가 母材熔融現象에 미치는 影響을 檢討하였다. 熔融池의 熱傳導係數를 K_L , 未熔融의 母材부분의 熱傳導係數를 K_S 로 나타낼 때, 이들의 比는 $R = K_L/K_S$ 이다. Fig.3(a) 및 (b)에 入熱強度 1000 cal/cm² sec, 3000 cal/cm² sec에 대하여 R(1, 5, 10, 20, 30, 50)을 變化시켜 4.5sec 동안 入熱시켰을 때의 表面에서의 溫度分布를 나타내었다. Fig.3(a) 및 (b)에서 R값이 커짐에 따라 熔融池內의 最高 溫度는 감소하며, 각각 2000 °C, 3400 °C 부근을 境界로 溫度 傾斜가 급격히 變化하여, 溫度의 上昇量이 아주 적음을 알수있다. 따라서 溫度 傾斜가 급격하게 變하는 境界溫度(온도가 급격히 떨어지는 變곡점의 온도)는 入熱強度가 커짐에 따라 다소 높아지나, 이 境界溫度 보다 높은 熔融池領域에서는 溫度變化가 거의 一定하다.

3.3 物性值가 溫度依存性일 때의 影響

熱傳導係數가 溫度依存性일 때 다음과 같은 近似式을 사용하였다.

熱傳導率 (cal/cm sec °C)

$$\lambda (T) = -1.111 \times 10^{-4} T + 0.165 \quad (0 \leq T \leq 900)$$

$$\lambda (T) = 0.065 \quad (900 < T \leq 1530)$$

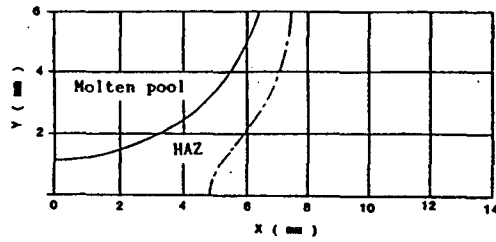
Fig.4(a) 및 (b)는 R= 20, 入熱強度 1000cal/cm² sec 및 3000cal/cm²sec일 때 熱傳導 係數의 溫度依存性을 考慮한 경우(實線)와 考慮하지 않은 경우(一點鎖線)를 각각 나타냈다. Fig.4(a) 및 (b)로부터 境界溫度보다 낮은 溫度分布를 하는 領域에서는 溫度依存性을 고려하지 않은 경우가 높게 나타났다가, 準熱影響部의 溫度(200-700 °C)가 分布하는 領域에서는 다시 溫度依存性을 고려한 경우가 높게 나타나는 變化樣相을 갖고있다. 入熱強度가 적을 때 溫度依存性 및 非依存性의 차이는 거의 없다. 한편, 入熱強度가 큰 경우 熱源중심에서 境界溫度까지의 領域에서는 溫度依存性에 대한 溫度가 높지만 境界溫度보다 낮은 溫度領域에서는 溫度非依存性에 대한 溫度가 높게 나타났다.

4. 結果 및 考察

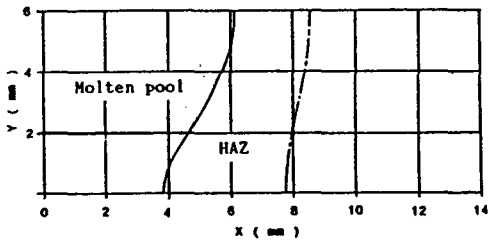
- 1) 總入熱量이 同一할 때 入熱強度가 큰 쪽이 熔融範圍가 좁고 HAZ에서 낮은 溫度分布를 나타낸다.
- 2) 對流效果에 대한 影響에서 總入熱量이 同一할 때 R이 크면 熔融池內의 平均 溫度와 最大 溫度는 拔激히 減少한다. 또한, 熔融池중심에서 境界溫度까지의 溫度分布는 거의 變化하지 않으며, 境界溫度의 領域도 넓어진다.
- 3) 物性值가 溫度依存性일 때, 入熱強度가 적을 경우 溫度依存性 및 非依存性의 차이는 거의 나타나지 않았다. 한편, 熱源중심에서 境界溫度까지는 溫度가 높게 나타났지만, 境界溫度보다 낮은 領域에서는 溫度依存性을 考慮하지 않은 경우가 높게 나타났다.

參考文獻

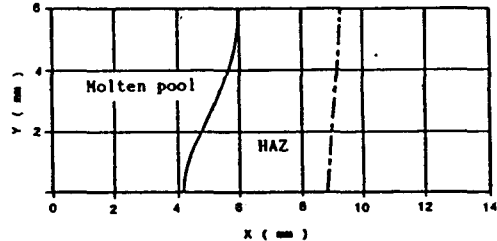
- 1) Patankar, S. V.: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill (1980).
- 2) Finlayson, B. A.: The Method of Weighted Residuals and Variational Principles, Academic Press (1972), p. 229.
- 3) Z. Palet, P. D. Hibbert: Computation of temperatures in actual weld designs, Weld. Jour., Vol.54, No.11, (1975), pp. 385-392s.
- 4) 西口, 黃地, 中田, 石橋: "ア - ク 溶接의 熔融池現象에 關する 界面張力論的 解析 (第 3 報)", 溶接學會誌, 2 (1984), No. 2, pp. 776-780



(a) 3000 cal/cm²sec

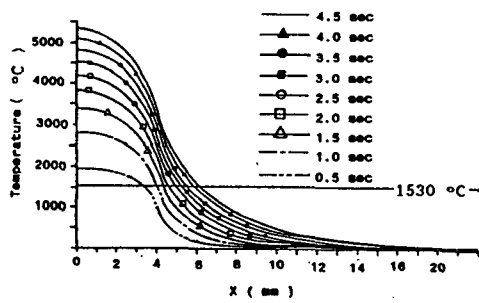


(b) 1000 cal/cm²sec

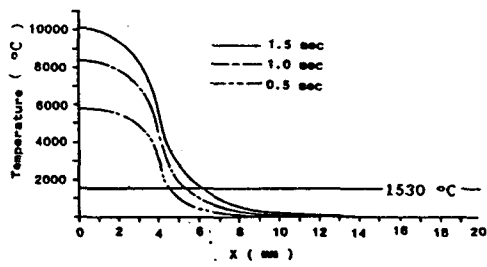


(c) 600 cal/cm²sec

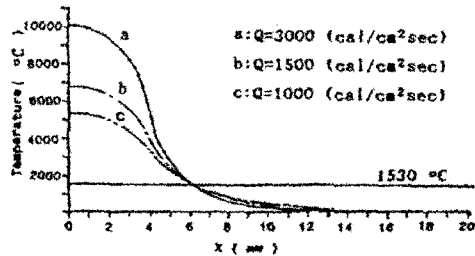
Fig.1 Molten pool and HAZ



(a) 1000 cal/cm²sec



(b) 3000 cal/cm²sec



(c) 1000, 1500, 3000 cal/cm²sec

Fig.2 Transient temperature distribution at the surface.

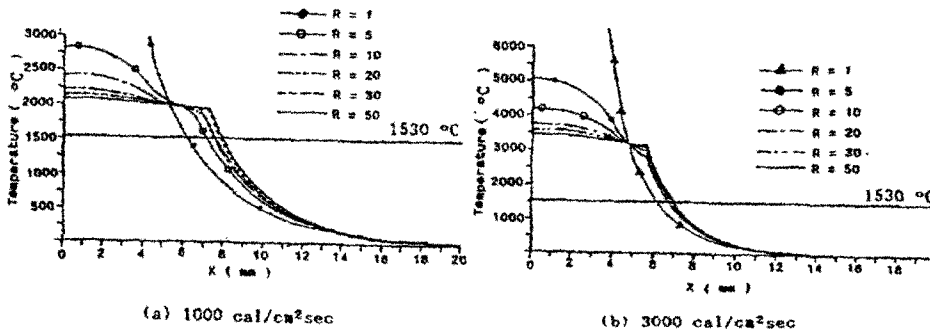


Fig.3 Temperature distribution at the surface in accordance to change of R.

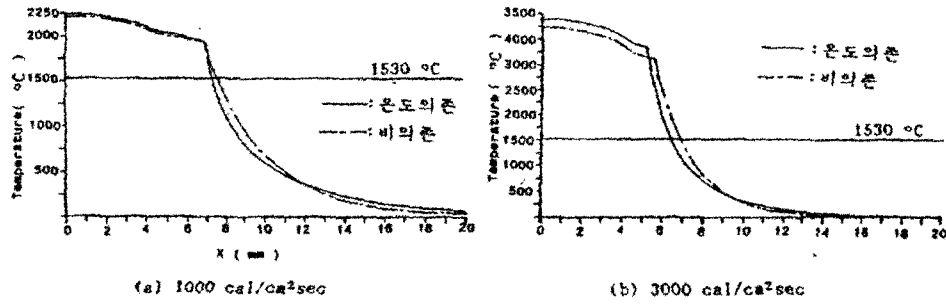


Fig.4 Temperature distribution at the surface when considered the temperature dependency of physical property.