

金屬熱處理를 위한 高溫面の 膜沸騰 急冷却에 관한 研究

(第 1 報, 炭素鋼 쿨칭 過程의 冷却曲線과 過渡沸騰熱傳達)

尹錫勳* · 洪永杓** · 金京根*** · 鄭大仁****

A Study on the Film Boiling-Quenching Process of the Hot Surface for the Heat Treatment of Metals

(1st Report, Cooling Curves and Transient Boiling Heat Transfer
during the Quenching Process of Carbon Steel)

S. H. Yoon, Y. P. Hong, K. K. Kim, D. I. Jung

Abstract

The quenching of steels by water is one of the important problems in engineering for the applications of heat treatment or continuous casting process, but the fundamental researches by the theoretical approaches have not been satisfactorily improved yet. The very rapid cooling problems by the thermal conduction including the latent heat of phase transformation in steel and the transient boiling heat transfer of water on the surface of the steel covering from 850°C to 20°C are the key problems of heat treatment. The present quenching experiments are performed for the cylindrical specimens of carbon steel, S45C of diameters (12-30). Nonlinear transient heat conduction and transient boiling heat transfer problem of water on the surface of specimens is analyzed by the numerical method of inverse heat conduction problem. The conditions for the calculation are that the initial temperature of specimens is 820°C and the cooling water in bath are 20°C, 40°C, 60°C, 80°C, 95°C with no agitation.

	使用記號		l	: 距離	m
			R	: 試片의 半徑	mm
D	: 試片의 外經	mm	T_h	: 試片의 加熱溫度	°C
L	: 試片의 길이	mm	T_w	: 冷却水 溫度	°C

* 正會員, 韓國海洋大學 大學院

** 正會員, 東義大學校 工科大學

*** 正會員, 韓國海洋大學

**** 正會員, 東明專門大學

ΔT_{sat}	: 過熱度	°C
ΔT_{sub}	: 冷却水の 過冷度	°C
V	: 試片의 冷却速度	°C/sec.
c_p	: 定壓比熱	kcal/kg · °C
h	: 熱傳達率	kcal/hr · m ² · °C
k	: 熱傳導係數	kcal/hr · m · °C
q	: 熱流束	kcal/hr · m ²
q_{crit}	: 限界熱流束	kcal/hr · m ²
q_{min}	: 極小熱流束	kcal/hr · m ²
s	: 時間	sec.
α	: 熱擴散率	m ² /hr
ρ	: 密度	kg/m ³
$\Delta \tau$: 無次元 時間間隔	dimensionless
θ	: 角度	deg.

1. 緒 論

물을 사용한 鋼材의 強制冷却은 製鋼工程에서 없어서는 안될 중요한 過程으로 이에 관한 研究는 製鋼工程 自體를 위해서 뿐만 아니라 省에너지 次元에서도 매우 重要한 研究分野라 할 수 있다. 이 冷却過程에서의 熱的現象에 관한 研究는 鋼材 內部의 非定常 熱傳導에 관한 研究와 鋼材로부터 冷却液으로의 過渡沸騰熱傳達에 관한 研究로 크게 나눌 수 있는데, 鋼材內部의 非定常熱傳導에 관한 研究는 現場에서의 應用을 위하여 주로 金屬工學者들에 의하여 活潑하게 이루어져 왔으며 1~4) 金屬 表面과 冷却液 사이의 過渡沸騰熱傳達에 관한 研究는 傳熱工學者들에 의하여 많이 行하여져 왔으나 5~8) 實際 熱處理工程에서 接하게 되는 過冷度가 큰 冷却液과 高溫表面사이의 過渡沸騰熱傳達에 관하여는 研究結果가 微微한 實情이다. 더구나 靚칭의 效果는 熱處理後 얻어진 硬度에 의하여 判別되어지며 이것은 冷却條件, 즉 冷却液의 種類, 過冷度, 冷却方法 등에 의하여 決定되어지는데 여기에는 鋼材內部의 組織變化에 의하여 發生되는 相變態熱이 미치는 影響도 매우 크며 이러한 現象을 考慮한 研究는 더욱더 드물다.

製鋼工程에서 가장 重要한 溫度範圍는 鋼材 表面溫度가 200°C-1300°C의 범위이며, 이 중 200°C

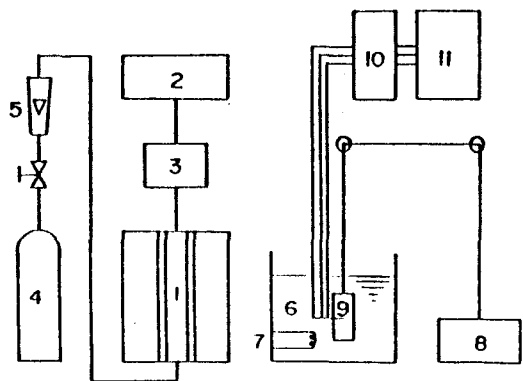
-800°C程度의 範圍에서는 傳熱工學的으로 불려 膜沸騰, 遷移沸騰, 核沸騰 등의 複合的인 沸騰現象이 연속적으로 일어나는 領域으로서 金屬面과 冷却液 사이에서 가장 複雜한 傳熱現象이 發生는 範圍이다. 또한 이 領域은 鐵의 A₁ 變態溫度를 基準으로 하여 鋼材의 相變態에 의한 相變態熱이 發生하여 冷却曲線을 變化시키는 領域이기도 하다.

본 研究는 金屬熱處理를 위한 高溫面의 膜沸騰 急冷却에 관한 1차 研究로서 鋼材를 A₁ 變態溫度 以上으로 加熱한 후 冷却方法 중 가장 많이 使用되는 浸漬冷却法을 利用하여 冷却水 溫度와 鋼材의 크기를 變化시키며 實驗을 수행하여 過渡沸騰熱傳達에 관한 諸般 現象과 實驗條件에 따른 冷却曲線의 形態에 대하여 考察하고자 한다.

2. 實驗裝置 및 實驗方法

2.1 實驗裝置

本 實驗裝置는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 試驗片을 加熱하기 위한 電氣爐, 電氣爐內의 溫度과 試片의 加熱時間 및 維持時間 등을 調節할 수 있는 PID 溫度調節器, 電氣爐내에서 試片을 加熱할 때 高溫에 의하여 試片이 急激하게 酸化⁹⁾하는 것을

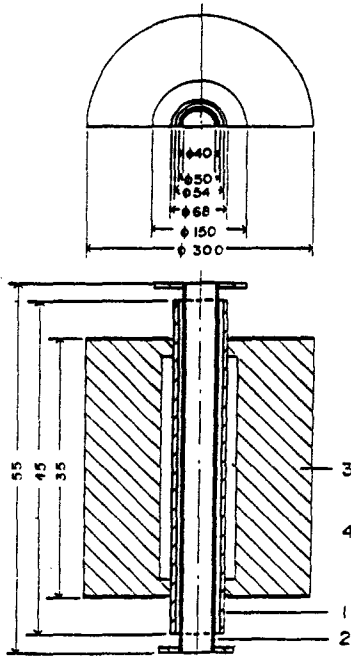


- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| 1. Electric furnace | 7. Electric heater |
| 2. Temperature controller | 8. Transporting apparatus |
| 3. Transformer | 9. Specimen |
| 4. Argon gas | 10. Ice junction |
| 5. Flowmeter | 11. Recorder |
| 6. Water bath | |

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

防止하기 위하여 電氣爐內에 供給되는 不活性가스인 알곤가스, 加熱된 試片을 冷却하기 위한 冷却탱크와 冷却水の 溫度를 調節하기 위한 電氣히터 등으로 構成되어 있다. 冷却液으로는 溶存가스가 沸騰에 미치는 影響을 減少시키기 위하여 一般 수도물을 끓여서 使用하였다.

또한 加熱된 試片은 低速모터에 의하여 구동되는 試片 移送裝置를 이용하여 冷却탱크에 投入하였으며 試片은 熱處理 材料로서 많이 쓰이는 S45C炭素鋼을 使用하였고, C-A sheathed thermocouple을 試片에 挿入하여 溫度를 測定하였으



1. Siliconit heating element 3. Insulating brick
2. Combustion tube 4. Furnace shell

Fig. 2 Electric furnace

며, ice junction을 거쳐 溫度記錄計로 記錄하였다.

Fig. 2는 試片加熱用 電氣爐의 構造로서 ①이 siliconit 抵抗發熱體(直徑 54mm, 길이 450mm, 5.2kW)이며 ②는 燃燒管(Mullite, 直徑 50mm, 길이 700mm), ③은 斷熱벽돌, ④는 爐의 外筒이다.

2.2 實驗方法

實驗方法是 電氣爐內에서 820°C까지 加熱시킨 후 金屬熱處理便覽을 參考하여 Table 1과 같이 試片의 直徑에 따라 一定時間을 維持한 후, 試片移送裝置에 의하여 試片을 移送하여 試片의 最上部가 水面下 100mm지점에 位置하도록 急速히 冷却탱크에 投入하여 각 지점의 溫度를 測定하였다. 이 때 冷却水の 溫度는 20, 40, 60, 80, 95°C로 하였고 試片 投入前과 投入後의 冷却水 溫度는 약 4°C정도 差異가 있었으나 初期溫度를 基準으로 하여 計算하였다. 試片의 加熱溫度를 820°C로 決定한 것은 S45C 炭素鋼의 A₃ 變態點이 약 770°C로서 淬火 溫度는 亞共析鋼의 경우 A₃ 變態點 보다 약 50°C以上¹⁰⁾으로 하는 것이 一般的이므로 이와 같이 決定하였다. 實驗에 使用된 試片은 直徑이 30, 25, 20, 16, 12mm의 5種類를 使用하였으며 길이는 모두 100mm로 製作하였다.

Table 2는 試片의 直徑에 따른 熱電對의 挿入位置를 나타낸 것으로 試片의 길이 방향으로 直徑 1.1mm, 길이 50mm의 구멍을 뚫어 C-A sheathed thermocouple(外徑 1.0mm, 素線徑 50 μ m)을 挿入하였다. 熱電對를 試片의 길이방향의 中心部에 挿入한 것은 試片의 直徑에 비하여 길이가 매우 길므로 길이방향으로의 溫度勾配 및 傳熱의 斷面積이 半徑方向의 값들에 비하여 작기 때문에 길이 방향의 열의 흐름은 半徑方向으로의 열의 흐름량에 비하여 無視할 수 있다고 看做¹¹⁾하고 半徑方向으로 1次元 數值解析을 하기 위함이다. 또한 熱傳導逆問題의 數值解析을 함에 있어서 表面과 熱電對의 位置가 可能한 한 가까워야 正確한 解析이 됨에도 不拘하고 모든 직경의 試片에 表面으로부터 3mm지점에 熱電對를 심은 것은 구멍加工上の 문제점과 淬火 實驗시 急激한 溫度變化에 의하여 구멍 加工部位가 龜裂할 경우 正確한 溫度의 測定이 어려우므로 이와 같이 決定하였다.

Fig. 3은 直徑 20mm의 試片에 挿入된 熱電對의 位置를 나타내고 있으며 구멍과 熱電對 사이의 틈으로 冷却水가 스며들어 測定誤差가 생기는 것을 防止하기 위하여 熱電對를 挿入한 후 高溫에 견딜 수 있는 세라믹 接着材로 完全하게 接着 시켰다.

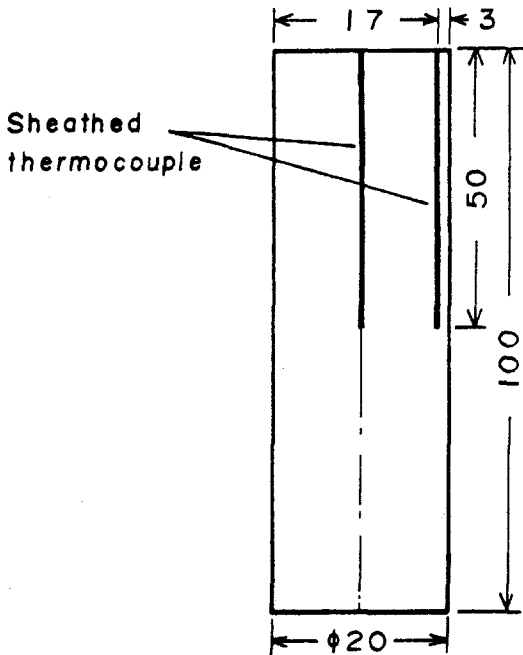


Fig. 3 Dimensions and measuring points of cylindrical specimens

Table 1. The Heating and Holding Times of the specimens

直徑 \ 時間	加熱時間	維持時間
φ30, 25mm	30min.	30min.
φ20, 16mm	30min.	25min.
φ12mm	30min.	20min.

Table 2. The Positions of Thermocouples

試片의 直徑	熱電對의 位置
φ30mm	r=0, 5, 12mm
φ25mm	r=0, 9.5mm
φ20mm	r=0, 7mm
φ16mm	r=0, 5mm
φ12mm	r=0, 3mm

3. 實驗結果 및 考察

3.1 表面溫度, 表面熱流束 및 熱傳達率의 計算

傳熱面의 內側溫度로부터 傳熱面 表面의 溫度와

熱流束을 計算하는 問題를 熱傳導 逆問題라고 한다. 一般의 非定常狀態의 傳熱實驗에 있어서, 傳熱面 表面溫度를 測定하기 위하여 表面에 直接 熱電對를 부착하는 것은 表面에서의 流動 및 傳熱 狀態에 影響을 미치게 되어, 큰 測定誤差를 招來 하기 때문에 不可能하므로 內部에서 測定한 溫度로부터 表面의 溫度 및 熱流束을 計算하는 熱傳導 逆問題(Inverse Heat Conduction Problem) 數值計算을 해야 한다.

本 研究에서는 試片 中心으로부터 一定 距離 떨어진 지점에서 測定한 溫度의 時間的 變化로부터 試片表面의 溫度, 表面 熱流束 및 熱傳達率을 구하기 위해 Patankar의 TDMA方法¹²⁾을 使用하여 數值解析을 하였다.

發熱하지 않은 경우 圓筒座標系의 半徑方向 非定常 1次元 熱傳導方程式은 다음과 같다.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3.1)$$

境界條件으로는 試片의 中心을 基準으로 하여 溫度分布가 對稱을 이루므로 中心部는 斷熱이라고 看做하며, 初期條件으로는 外表面의 表面熱流束과 各 節點의 初期溫度를 任意로 假定한다.

즉, 境界條件은

$$r=0 : \frac{\partial T}{\partial r} = 0$$

初期條件은

$$q_{(r,0)} = 0.0$$

$$T_{(r,0)} = T_i^0(0)$$

(3.1)식을 任意의 절점 i에서 制御體積을 取하여 重積分을 하면

$$\iint \rho c_p \Delta \theta r \frac{\partial T}{\partial t} \delta r \delta t = \iint \Delta \theta r \frac{k_i}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \delta r \delta t \quad (3.2)$$

上式을 積分하여 整理하면

$$\left(\frac{\rho c_p \Delta V_i}{\Delta t} + \frac{\Delta \theta k_i r_{i-1/2}}{\delta r_{i-1}} + \frac{\Delta \theta k_i r_{i+1/2}}{\delta r_i} \right) T_i^1 = \frac{\Delta \theta k_i r_{i+1/2}}{\delta r_i} T_{i+1}^1 + \frac{\Delta \theta k_i r_{i-1/2}}{\delta r_{i-1}} T_{i-1}^1 + \frac{\rho c_p \Delta V_i}{\Delta t} T_i^0 \quad (3.3)$$

1) 熱電對가 設置되어 있는 地點(i=1)에서의 離散化方程式

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\rho c_{p1} \Delta V_1}{\Delta t} + \frac{\Delta \theta k_1 r_{1+1/2}}{\delta r_1} \right) T_1^1 = \frac{\Delta \theta k_1 r_{1+1/2}}{\delta r_1} T_2^1 \\ & + \frac{\rho c_{p1} \Delta V_1}{\Delta t} T_1^0 - \frac{\Delta \theta k_1 r_{1-1/2}}{\delta r_0} (T_1^1 - T_0^1) \end{aligned} \quad (3.4)$$

2) 外表面(i=n)에서의 離散化方程式

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\rho c_{pn} \Delta V_n}{\Delta t} + \frac{\Delta \theta k_n r_{n-1/2}}{\delta r_{n-1}} \right) T_n^1 \\ & = \frac{\Delta \theta k_{n-1} r_{n-1/2}}{\delta r_{n-1}} T_{n-1}^1 \\ & + \frac{\rho c_{pn} \Delta V_n}{\Delta t} T_n^0 + \frac{\Delta \theta k_n r_{n+1/2}}{\delta r_n} (T_{n+1}^1 - T_n^1) \end{aligned} \quad (3.5)$$

TDMA方法에 의하여,

$$T_i^1 = P_i T_{i-1}^1 + Q_i \quad (3.6)$$

$$T_{i+1}^1 = P_{i+1} T_i^1 + Q_{i+1} \quad (3.7)$$

따라서

$$T_i^1 = \frac{c_i}{a_i - b_i P_{i+1}} T_{i-1}^1 + \frac{d_i + b_i Q_{i+1}}{a_i - b_i P_{i+1}} \quad (3.8)$$

$$P_i = \frac{c_i}{a_i - b_i P_{i+1}}, \quad Q_i = \frac{d_i + b_i Q_{i+1}}{a_i - b_i P_{i+1}} \quad (3.9)$$

熱電對가 設置되어 있는 地點에서는 $c_1=0$ 이므로

$$\begin{aligned} T_1^1 &= \frac{c_1}{a_1} T_0^1 + \frac{d_1}{a_1} \\ P_1 &= 0, \quad Q_1 = T_1^1 \end{aligned} \quad (3.10)$$

外表面에서는

$$\begin{aligned} T_n^1 &= \frac{c_n}{a_n} T_{n-1}^1 + \frac{d_n}{a_n} \\ P_n &= \frac{c_n}{a_n}, \quad Q_n = \frac{d_n}{a_n} \end{aligned} \quad (3.11)$$

위 式들은 冷却時間中の Δt 時間동안 흐르는 表面熱流束을 假定하여 內部點溫度를 구하고 이 값이 測定한 內部點溫度 T_1^1 과 一致될 때까지 反復計算하여 表面熱流束과 外壁面溫度를 구하였다.

一般的으로 熱傳導係數와 比熱은 溫度가 變化함에 따라 매우 다른 값을 갖게 되므로 溫度差異가

매우 큰 경우의 計算에서는 該當溫度에 對應한 熱傳導係數와 比熱값을 택하여 計算하여야 하므로 本 計算에서는 各種文獻¹³⁻¹⁴⁾에 나와 있는 熱傳導係數와 比熱값을 最少自乘法으로 處理하여 다음식과 같은 溫度의 函數式으로 만들어 計算에 使用하였으며 密度는 溫度에 따라 그 값이 크게 변하지 않으므로 標準값을 택하여 모든 溫度範圍에서 使用하였다.

$$k = 35.68 - 0.015(T + 273) \quad (3.12)$$

$$c_p = 0.1075 + 0.000088(T + 273) \quad (3.13)$$

熱傳導逆問題에 있어서 보다 正確한 解를 얻거나 計算過程에 不安定性이 나타나지 않기 위해서는 샘플링 時間間隔을 一定值 以上으로 택하여야 한다. 庄司¹⁵⁾는 均一한 溫度로 加熱한 平板을 周圍의 溫度가 一定한 流體中으로 갑자기 露出시켰을 때의 嚴密解와 라플라스變換法을 利用한 解析解를 比較 檢討함으로써 無次元時間間隔

$$\Delta \tau = \alpha \Delta t / l^2 \quad (3.14)$$

이 0.1以上이어야 比較的 滿足할 만한 表面熱流束과 表面溫度값을 얻을 수 있다고 하는 研究結果를 얻고 있다. 式(3.14)에서 α 는 熱擴散率, l 은 熱電對로부터 傳熱面 表面까지의 距離를 나타낸다.

Fig. 4는 $\Delta T_{sub} = 5^\circ\text{C}$, 즉 冷却水溫度 95°C 인 境遇로서 飽和沸騰에 가까운 沸騰曲線의 形상을 나타내고 있으며 $T_h = 820^\circ\text{C}$ 로 加熱된 시편을 冷却水속에 投入하면 比較的 熱傳達이 良好한 遷移沸騰이 짧은 時間동안 일어나다가 膜沸騰狀態가 되며 이 極小熱流束點을 지나면 다시 遷移沸騰이 서서히 일어나기 시작하여 熱流束이 增加하며 試片의 表面溫度가 더욱더 低下하면 核沸騰이 일어나기 시작하여 $\Delta T_{sat} = 150^\circ\text{C}$ 附近에서 q_{crit} 값을 갖게 된다. 試片直徑 30mm, $\Delta T_{sub} = 5^\circ\text{C}$ 에서 q_{min} 값은 약 $8 \times 10^6 \text{ kcal/hr m}^2$, q_{crit} 값은 10^6 kcal/hr m^2 정도이다.

Fig. 5는 $\Delta T_{sub} = 20^\circ\text{C}$ 의 경우로서 Fig. 4와 유사한 形態의 沸騰曲線을 나타내고 있는데 ΔT_{sub} 가 增加함에 따라 q_{min} 와 熱傳達率 h 값도 增加하고 있으며, $\Delta T_{sub} = 60^\circ\text{C}$ 인 Fig. 6의 경우는 膜沸騰現

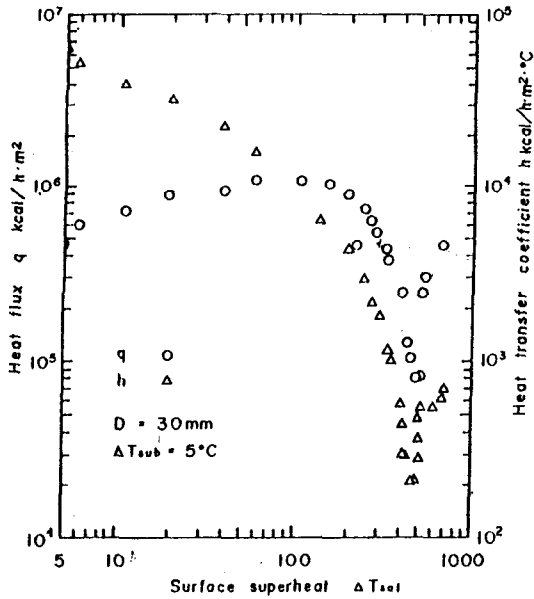


Fig. 4 Surface Heat Fluxes and Heat Transfer Coefficients at a $\Delta T_{sub} = 5^\circ\text{C}$

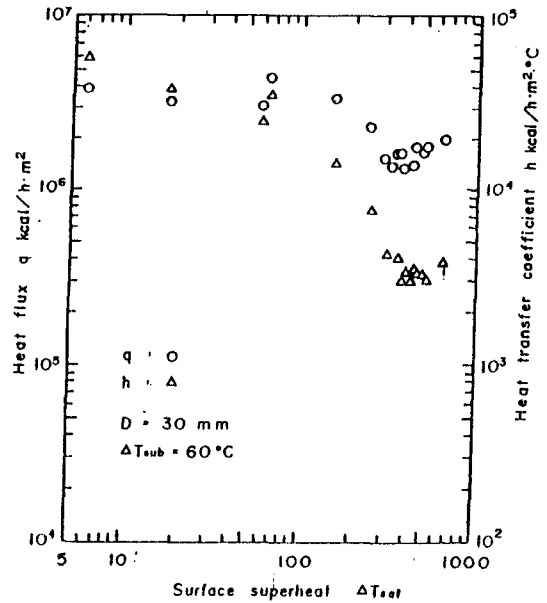


Fig. 6 Surface Heat Fluxes and Heat Transfer Coefficients at $\Delta T_{sub} = 60^\circ\text{C}$

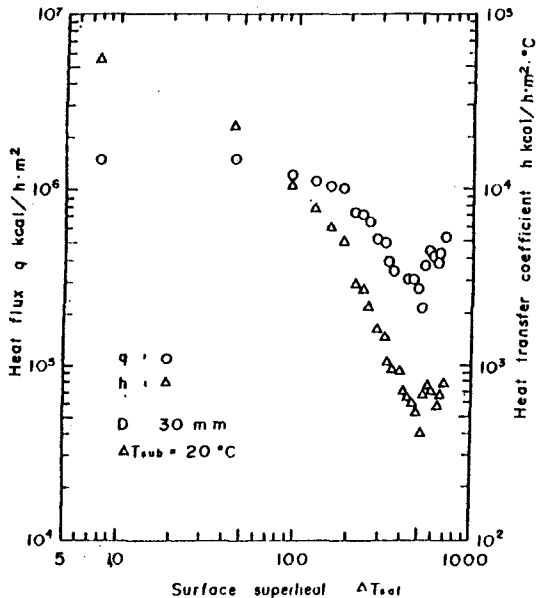


Fig. 5 Surface Heat Fluxes and Heat Transfer Coefficients at $\Delta T_{sub} = 20^\circ\text{C}$

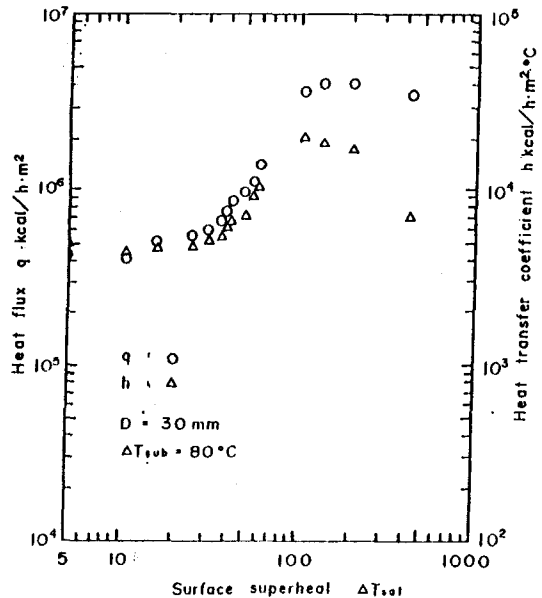


Fig. 7 Surface Heat Fluxes and Heat Transfer Coefficients at $\Delta T_{sub} = 80^\circ\text{C}$

象이 매우 微微하게 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 7은 $\Delta T_{sub} = 80^\circ\text{C}$ 의 경우로서 實際 熱處理現場에서 가장 많이 適用할 수 있는 實驗條件이다. 이 그림의 경우는 $\Delta T_{sub} = 5, 20, 60^\circ\text{C}$ 의 경우와는 달리 전형적인 沸騰曲線의 形象을 하고 있지 않

며 加熱된 試片을 冷却水속으로 投入하면 膜沸騰狀態를 거쳐지 않고 짧은 遷移沸騰狀態를 지나 活潑한 核沸騰狀態로 옮겨 감을 알 수 있다. 이 그림의 data를 最小自乘法으로 處理하여 核沸騰領域에서 表面熱流束에 관한 實驗式을 計算하여 보면

다음과 같다.

$$q = 30 \Delta T_{sat}^{0.95} \quad < \text{kcal/hr m}^2 > \quad (3.15)$$

이상의 結果를 綜合하여 보면 ΔT_{sub} 가 클수록 膜沸騰現象은 微微하여져서 짧은 遷移沸騰期間을 지나 核沸騰으로 變化하며 q_{min} , q_{crit} 값도 커짐을 알 수 있다.

Fig. 8은 여러 경우의 冷却水溫度에 대하여 試片의 表面溫度를 計算한 것으로, $T_w = 20, 40^\circ\text{C}$ 의 경우와는 달리 $T_w = 60^\circ\text{C}$ 이상에서는 매우 緩慢한 冷却曲線이 되어 熱處理 工程에서 바라는 效果는 거의 얻을 수 없다는 것을 알 수 있다.

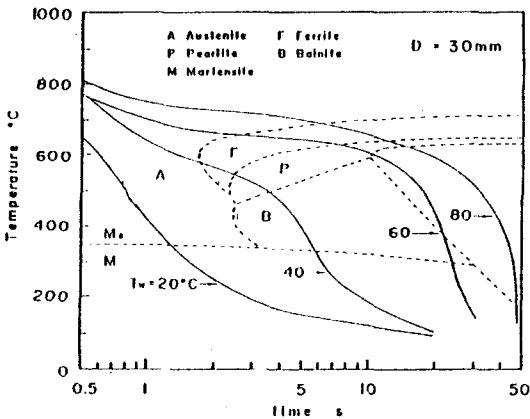


Fig. 8 Calculated Surface Cooling Curves of Various Coolant Temperatures

3.2 試片의 冷却曲線

Fig. 9은 冷却水溫度 $T_w = 20^\circ\text{C}$ 인 경우, 試片의 각 直徑에 대한 中心部 冷却曲線의 實驗値와 計算値를 나타낸 것으로 試片의 直徑이 클수록 冷却曲線의 기울기가 緩慢하여 지며 實驗値와 計算値의 曲線에 差異가 나타나는 것은 炭素鋼의 靚칭時 相變態가 일어나는데 이때 發生하는 相變態熱의 영향 때문이며 이러한 傾向은 試片의 直徑이 클수록 더욱 顯著하게 나타나고 있다.

Fig. 10는 가로축을 冷却時間의 log scale로 表示한 連續冷却變態曲線(C.C.T. Curve)위에 冷却曲線의 實驗値를 나타낸 것으로서, 本 그림을 考察하여 보면 試片의 中心部보다 表面에 가까울수록 보다 바람직한 靚칭 效果가 나타나는 것을 알

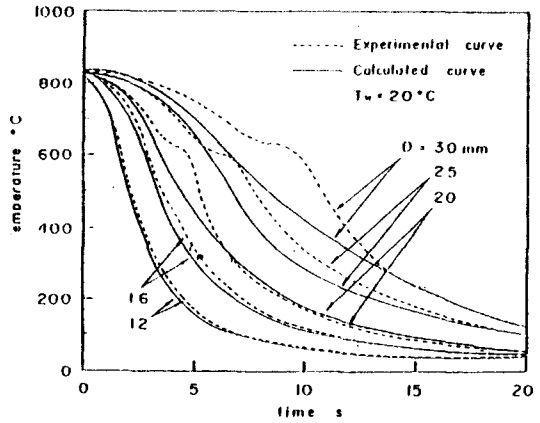


Fig. 9 A Comparison between the Calculated and the Experimental Cooling Curves at the center of Various Diameters

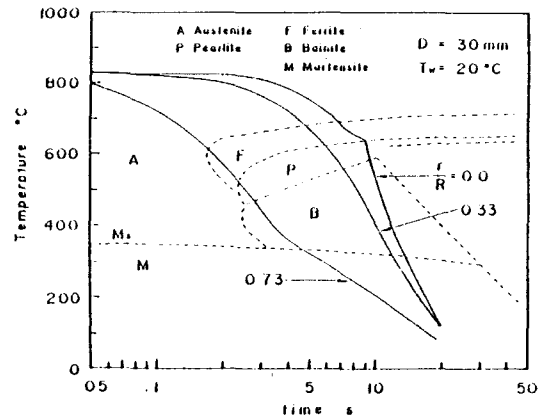


Fig. 10 Experimental Cooling Curves of Various Diameters Ratios

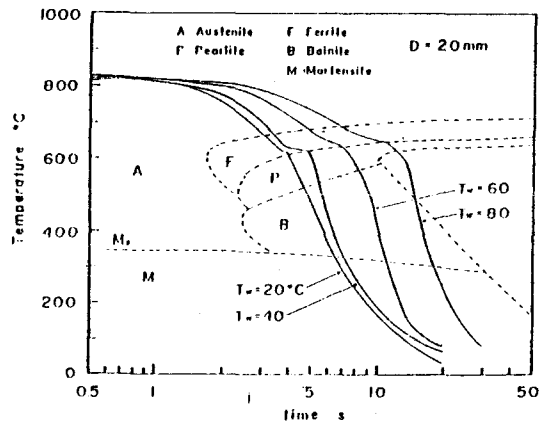


Fig. 11 Experimental Cooling Curves of Various Coolant Temperatures at the Center of D=20 mm Specimen

수 있다.

Fig. 11는 直徑이 20mm의 경우, 冷却水の 溫度에 따른 中心部の 冷却曲線을 나타낸 것으로 直徑이 클수록, 그리고 試片의 中心部에 가까울수록 冷却曲線의 傾斜가 緩慢하여 짐을 알 수 있다.

3.3 試片의 冷却速度

Fig. 12은 直徑 30mm, $T_w=20^\circ\text{C}$ 의 境遇, 試片의 各位置에서의 冷却速度를 나타낸 것으로 試片의 中心部 附近에서는 試片溫度가 約 630°C 일 때 冷却速度가 급격히 低下하며 이는 A_r' 變態에 의하여 發生하는 相變態熱에 의한 영향이다.

Fig. 13는 直徑 30mm의 境遇, 冷却水溫度에 따

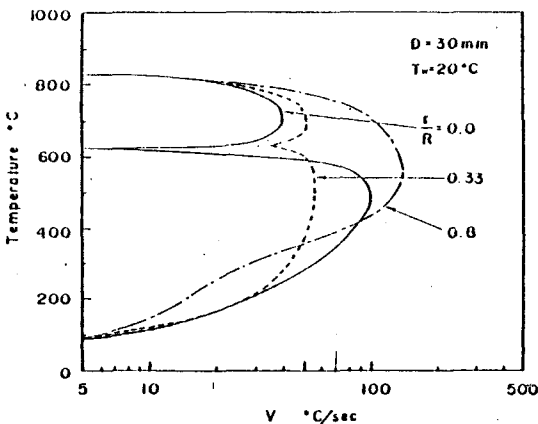


Fig. 12 Cooling Speeds of Various Diameter Ratios

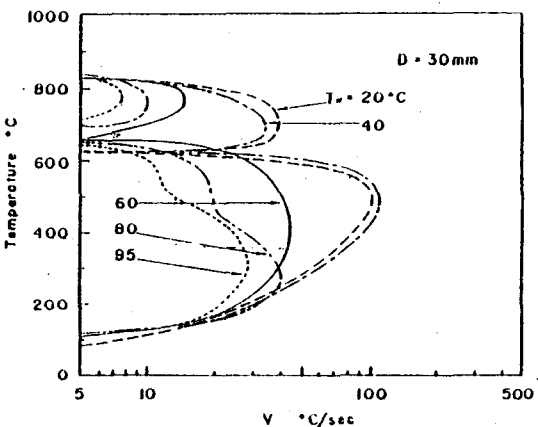


Fig. 13 Cooling Speeds of Various Coolant Temperatures at the Center of D=30mm Specimen

른 試片의 中心部 冷却曲線을 나타낸 것으로 冷却水の 溫度 T_w 가 작을수록 相變態가 일어나는 溫度域이 下降하는데 이는 試片이 급격하게 冷却되어 Martensite 變態가 일어나기 때문이다.

4. 結 論

金屬熱處理를 위한 高溫面의 膜沸騰 急冷却에 관한 1차 研究로서, 熱處理에 많이 使用되는 S45C 炭素鋼을 A_3 變態點 以上으로 加熱한 後, 試片의 直徑과 冷却水の 溫度를 變化시키면서 浸漬冷却法에 의한 冷却實驗을 행하였으며, 試片의 表面溫度, 表面熱流束, 熱傳達率, 試片 各部의 冷却曲線 및 冷却速度등을 計算하여 考察한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) ΔT_{sub} 가 작은 境遇에는, 試片을 冷却水속에 投入 即時 瞬間적으로 遷移沸騰이 일어나다가 膜沸騰狀態를 지나 다시 遷移沸騰域을 거쳐 核沸騰狀態로 變化한다. 또한 ΔT_{sub} 가 큰 境遇 ($\Delta T_{sub}=80^\circ\text{C}$)에는 膜沸騰狀態가 存在하지 않으며 짧은 遷移沸騰域을 거쳐 核沸騰域으로 變化한다.

2) 熱處理에서 가장 많이 使用되는 $\Delta T_{sub}=80^\circ\text{C}$ 의 境遇, 核沸騰域에서의 表面熱流束에 관한 實驗式은 다음과 같다.

$$q = 30 \Delta T_{sat}^{0.95} < \text{kcal/hr m}^2 >$$

3) ΔT_{sub} 가 클수록 q_{min} 과 q_{crit} 도 커진다.

4) 試片의 冷却速度는 相變態熱에 의하여 0에 가까운 領域이 存在하며 冷却水の 溫度가 낮을수록, 試片의 直徑이 작을수록 相變態가 일어나는 溫度域이 下降한다.

參考文獻

- 1) 岸野孝信, 長岐 滋, 井上達雄: 鋼の焼入れにおける相變態, 熱傳導および彈塑性應力, 材料, 第28卷 312號, pp. 861-867(1979)
- 2) 三塚正志, 福田敬爾: 高溫金屬を水冷するときの冷却曲線における遷移沸騰および特性溫度に関する研究, 鐵と鋼, 第60年 14號, pp. 2079-2083

- 3) 時弘義雄, 田村今男: 焼入試片の中心冷却曲線の一般化, 鐵と鋼, 第60卷 6號, pp. 661-670(1974)
- 4) 時弘義雄, 田村今男: 焼入試片の冷却曲線の導出方法, 鐵と鋼, 第60卷 6號, pp. 671-681(1974)
- 5) 三塚正志, 福田敬爾: 高温鋼板の浸漬冷却過程における沸騰現象および熱傳達に及ぼす水温の効果, 鐵と鋼, 第63年 6號, pp. 1008-1015(1977)
- 6) M. E. Irving and J. W. Westwater: *Limitations for obtaining boiling curves by the quenching method with sphere*, 8th Int. Heat Transfer Conf., San Francisco, pp. 2061-2066 (1986)
- 7) David Y. T. Lin and J. W. Westwater: *Effect of metal thermal properties on boiling curves obtained by the quenching method*, 7th Int. Heat Transfer Conf., Germany, pp. 155-160 (1982)
- 8) A. M. Osman and J. V. Beck: *Investigation of transient heat transfer coefficients in quenching experiments*, Trans. of the ASME, J. of Heat Transfer, Vol. 112. Nov. pp. 843-848.
- 9) 田島 守, 牧 忠, 片山功藏: 鋼焼入れの傳熱現象の研究(相變態熱について), 日本機械學會論文集, 第50卷 460號, pp. 3033-3040(1984)
- 10) 金屬熱處理技術編覽 編輯委員會: 金屬熱處理技術編覽, 機電研究社, pp. 144-164(1987)
- 11) S. B. Var der Molen and F. W. B. M. Galjice: *The boiling mechanism during burnout phenomena in subcooled two-phase water flow*, 6th Int. Heat Transfer Conf., Toronto, pp. 381-385 (1978)
- 12) Patankar, S. V.: *Numerical heat transfer and fluid flow*, Hemisphere (1980)
- 13) 日本金屬學會編: 金屬データブック, 丸善株式會社, pp. 105
- 14) ASM編: *Metals handbook*, Vol. 1, 9th ed. ASM, pp. 145-151 (1978)
- 15) 庄司正弘: 非定常熱傳導の逆問題に関する研究, 日本機械學會 論文集, 第44卷 381號, pp. 1633-1643(1978)