

# 高溫鋼材의 담금질傳熱에 관한 研究

—相變態熱과 冷却曲線—

尹 錫 勳

釜山水產大學校

(1991년 10월 1일 접수)

## A Study on the Heat Transfer of the High Temperature Metals in Quenching —The Latent Heat of Phase Transformation and Cooling Curves—

Suck-Hun YOON

National Fisheries University of Pusan

(Received October 1, 1991)

Experiments of quenching were made with cylindrical specimens of carbon steel S45C of diameters from 12 to 30mm were performed. The specimens were heated by electric furnace and quenched by immersion method. In order to analyze the temperature profile(cooling curves) of carbon steel including the latent heat of phase transformation, nonlinear heat conduction problem was calculated by the numerical method of inverse heat conduction problem using the apparent heat capacity method. The difference between the calculated and the experimented cooling curves was caused by the latent heat of phase transformation, and the effects of the latent heat were especially manifest at the cooling curves of center of specimens. The temperature and the quantity of the latent heat of phase transformation depend on the cooling speed at  $A_1$  transformation point, and the region for cooling speed to become zero was caused by the latent heat of phase transformation.

### 記號說明

$c_p$ : 定壓比熱	$kcal/kg^{\circ}C$	$T_w$ : 冷却水 溫度	$^{\circ}C$
$D$ : 試片의 外徑	$mm$	$T_b$ : 相變態熱의 發生 始作溫度	$^{\circ}C$
$L$ : 試片의 길이	$mm$	$T_e$ : 相變態熱의 發生 終了溫度	$^{\circ}C$
$k$ : 熱傳導係數	$kcal/hr m^{\circ}C$	$t_b$ : 相變態熱의 發生 始作 時刻	$sec$
$Q$ : 熱量	$kcal/hr$	$t_e$ : 相變態熱의 發生 終了 時刻	$sec$
$q$ : 熱流束	$kcal/hr m^2$	$V$ : 冷却速度	$^{\circ}C/sec$
$R$ : 試片의 半徑	$mm$	$W$ : 體積	$m^3$
$s$ : 時間	$sec$	$\rho$ : 密度	$kg/m^3$
$T$ : 溫度	$^{\circ}C$	$\theta$ : 角度	$deg$
$T_h$ : 試片의 加熱溫度	$^{\circ}C$	$A$ : Austenite	
		$M$ : Martensite	
		$P$ : Pearlite	

$T$  : Troostite  
 $Ar'$  :  $Ar'$  transformation  
 $Ar''$  :  $Ar''$  transformation

緒 論

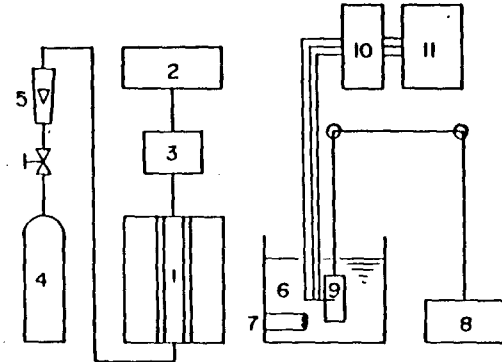
담금질(quenching)은 鋼의 相變態를 利用하여 硬도와 기타 機械의 性質의 向上을 目的으로 하는 工業的으로 매우 중요한 熱處理法으로서, 鋼의 相變態는 冷却速度가 빠를 수록 遲延되며 相變態熱 또한 冷却速度에 따라 그 發生 形態가 달라 진다. 또한 前報<sup>1)</sup>에서 言及한 바와 같이 相變態熱은 冷却曲線의 形象에 큰 影響을 미치며 따라서 이러한 相變態熱의 究明은 담금질效果를 豫測하고, 또한 그 效果를 向上시키는데 있어서 매우 重要한 事項이다. 그럼에도 不拘하고 鋼의 담금질에 관한 研究文獻들은 多數 發表되어 있으나<sup>2)</sup> 相變態熱이 冷却曲線에 미치는 影響이나 이의 定量的인 究明을 위한 研究는 그렇게 活潑하지 못한 實情이다.

이에 本 研究에서는 金屬熱處理를 위한 高溫面의 膜沸騰 急冷却에 관한 研究의 일환으로서 圓筒形 試片의 中心部와 內部點에서 測定한 冷却曲線을 利用하여 傳熱工學的인 側面에서 冷却速度에 따른 相變態의 諸般 現象과 相變態熱이 冷却曲線에 미치는 影響을 究明하였다.

實驗裝置 및 方法

1. 實驗裝置

本 實驗裝置는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 試片을 加熱하기 위한 電氣爐<sup>①</sup>, 電氣爐內의 溫度와 試片의 加熱時間 및 維持時間 등을 調節할 수 있는 PID溫度調節器<sup>②</sup>, 電氣爐內에서 試片을 加熱할 때 高溫에 의하여 試片이 急激하게 酸化하는 것을 防止하기 위하여 電氣爐內에 供給되는 不活性가스인 알곤가스<sup>④</sup>, 加熱된 試片을 冷却시키기 위한 冷却탱크<sup>⑥</sup>와 冷却水의 溫度를 調節하기 위한 電氣히터<sup>⑦</sup>, 加熱된 試片을 移送하기 위한 試片移送裝置<sup>⑧</sup> 등으로 構成되었다. 試片은 構造用 鋼材로서 많이 利用되는 S45C炭素鋼을 使用하였고, 그 化學的 組成은 Table 1과 같다. 그리고 試편의 온도는 C-A sheathed thermocouple을 試片에 插入하여 測定하였으며 이 結果를 ice



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

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1. Chemical composition of S45C (wt %)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
S45C	0.44	0.22	0.70	0.014	0.15	0.016	0.08	0.08

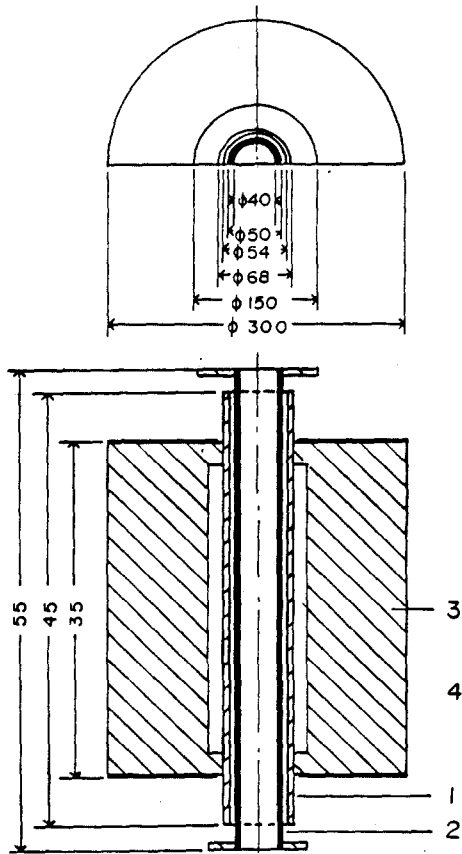
junction<sup>⑩</sup>을 거쳐 溫度記錄計로 記錄하였다. 또한 冷却液으로는 溶存가스가 沸騰에 미치는 影響을 減少시키기 위하여 一般 水道水를 끓여서 使用하였다.

Fig. 2는 試片加熱用 電氣爐의 構造를 나타낸 것으로 ①은 Siliconit抵抗發熱體(直徑 54mm, 길이 450mm, 抵抗 1.4 Ω, 出力 5.2kw)이며 ②는 燃燒管(Mullite, 直徑 50mm, 길이 700mm), ③은 斷熱벽들, ④는 電氣爐의 外筒을 나타낸다.

2. 實驗方法

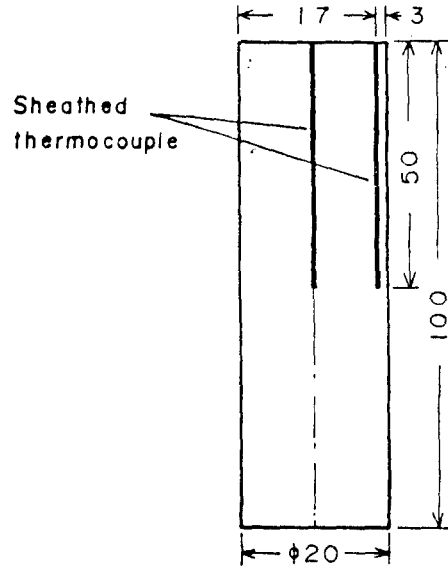
實驗에 使用된 試片은 直徑이 30, 25, 20, 16, 12mm 이고 그 길이는 모두 100mm로, 이러한 5種類를 使用 하였으며 Fig. 3은 直徑 20mm 試片의 크기와 熱傳對의 插入形態를 나타낸 것이다.

熱傳對는 試片의 길이방향으로 直徑 1.1mm, 길이 50mm의 구멍을 뚫어 C-A sheathed thermocouple(外徑 1.0mm, 素線徑 50μm)을 插



1. Siliconit heating element  
 2. Combustion tube  
 3. Insulating brick  
 4. Furnace shell  
**Fig. 2.** Electric furnace

入 하였으며 熱傳對를 試片의 길이방향의 中心部에 挿入한 것은 試片의 直徑에 비하여 길이가 매우 길므로 길이방향으로의 溫度句配 및 傳熱의 斷面積이 半徑方向의 값들에 비하여 작기 때문에 길이方向의 열의 흐름은 半徑方向으로의 열의 흐름량에 비하여 無視할 수 있다고 看做<sup>6)</sup>하고 半徑方向으로 1次元 數值解析을 하기 위함이다. 試片의 구멍과 熱傳對 接點사이의 接觸을 確實하게 하기 위하여 液狀點이 1100°C 인 Cu Brazing材料를 이용하여 接合을 하였으며 구멍과 熱傳對 사이의 틈으로 冷却水가 스며들어 測定誤差가 생기는 것을 防止하기 위하여 熱傳對를 挿入하여 接合한 후 試片表面의 구멍部位와 熱傳對의 틈 사이를 高溫에 견딜 수 있는 세라믹接着材로 完全하



**Fig. 3.** Dimensions and positions of thermocouples

게 密封 시켰다.

Table 2는 試片의 種類에 따른 溫度의 測定位置를 나타낸 것이며 Table 3는 試片의 加熱溫度, 加熱 및 爐內 維持時間을 나타낸 것으로 相變態熱의 影響을 알아보기 위하여  $A_1$ 變態點 以下の 溫度인 700°C와  $A_1$ 變態點 以上の 溫度인 820°C로 加熱하여 實驗을 行하였으며 試片의 크기에 따라 一定時間을 維持한

**Table 2.** The measuring points of temperature

試片의 直徑	溫度의 測定位置
$\phi 30mm$	$r=0, 5, 12mm$
$\phi 25mm$	$r=0, 9, 5mm$
$\phi 20mm$	$r=0, 7mm$
	$r=0, 8mm$
$\phi 16mm$	$r=0, 5mm$
$\phi 12mm$	$r=0, 3mm$

**Table 3.** The heating and the holding times of the specimens

直徑	時間	可 熱 時 間		維持時間
		最高溫度 700°C	最高溫度 820°C	
$\phi 30, 25mm$		25 min.	30 min.	30 min.
$\phi 20, 16mm$		25 min.	30 min.	25 min.
$\phi 12mm$		25 min.	30 min.	20 min.

후, 試片移送裝置에 의하여 試片의 最上部가 水面下 100mm地點에 位置하도록 急速히 冷却탱크에 投入하여 各地點의 溫度를 測定하였다. 이때 冷却水의 溫度는 5°C-95°C 사이에서 調整 하였다.

### 數值計算

#### 1. 冷却曲線의 計算

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과 中心部の 溫度 및 熱傳達率을 구하기 위해 Patankar의 TDMA (TriDiagonal - Matrix Algorithm)法<sup>7)</sup>을 使用하여 數值計算을 하였다.

發熱하지 않는 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.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

中心의 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.

(1)식을 任意의 節點 i에서 制御體積을 取하여 重積分을 하면

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

1) 熱傳對가 設置되어 있는 地點 (i=1)에서의 離散化方程式

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\rho c_p \Delta W_1}{\Delta t} + \frac{\Delta \theta k_1 r_{1+1/2}}{\delta r_1} \right) T_1^1 = \frac{\Delta \theta k_1 r_{1+1/2}}{\delta r_1} T_2^1 \\ &+ \frac{\rho c_p \Delta W_1}{\Delta t} T_1^0 - \frac{\Delta \theta k_1 r_{1-1/2}}{\delta r_0} (T_1^1 - T_0^1) \end{aligned} \quad (3)$$

2) 外表面 (i=n)에서의 離散化方程式

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\rho c_p \Delta W_n}{\Delta t} + \frac{\Delta \theta k_n r_{n-1/2}}{\delta r_{n-1}} \right) T_n^1 \\ &= \frac{\Delta \theta k_{n-1/2} r_{n-1/2}}{\delta r_{n-1}} T_{n-1}^1 + \frac{\rho c_p \Delta W_n}{\Delta t} T_n^0 \\ &+ \frac{\Delta \theta k_n r_{n+1/2}}{\delta r_n} (T_{n+1}^1 - T_n^1) \end{aligned} \quad (4)$$

一般的으로 금속의 熱傳導係數와 比熱은 溫度에 따라 變化하므로 本 計算에서는 前報에서와 같은 方法으로 구한 다음과 같은 溫度의 函數式을 利用하여 計算하였으며 密度는 溫度에 따라 크게 變하지 않으므로 標準값을 採하여 모든 溫度範圍에서 使用하였다.

$$k = 35.68 - 0.015(T + 273) \quad (5)$$

$$c_p = 0.1075 + 0.000088(T + 273) \quad (6)$$

#### 2. 相變態熱의 計算

相變態熱量의 計算은 Fig. 4와 같은 모델<sup>8)</sup>을 만들어 實驗에 의한 冷却曲線을 利用하여 이를 定量的으로 計算하였다. 本 그림의 冷却速度曲線 모델에서 相變態의 시작점은 2曲線이 分離되는 b점이며 終了地點은 2曲線이 合하여 지는 e점이다. 따라서 相變態가 일어나고 있는 時間은  $t_e - t_b$ 이며 相變態는 n점에서 集中的으로 일어난다고 假定하여 이 점에서의 比熱과 冷却速度의 값을 利用하였다. 또한 溫度  $T_b$ 로부터  $T_e$ 까지의 顯熱은 n점에서의 冷却速度로 一定하게 放出된다고 생각하여 다음과 같은 식으로 相變態熱을 計算하였다.

相變態熱과 顯熱의 合은

$$q_1 = \frac{Q_1}{\rho W} = \frac{\Delta T_n}{\Delta t} (t_e - t_b) \quad (7)$$

식 (7)에 包含된 顯熱은

$$q_2 = \frac{Q_2}{\rho W} = c_n (T_b - T_e) = c_n (T_b - T_e) \quad (8)$$

따라서 相變態熱은

$$q = q_1 - q_2 = c_n \left[ t_e - t_b \right] \frac{\Delta T_n}{\Delta t} - (T_b - T_e) \quad (9)$$

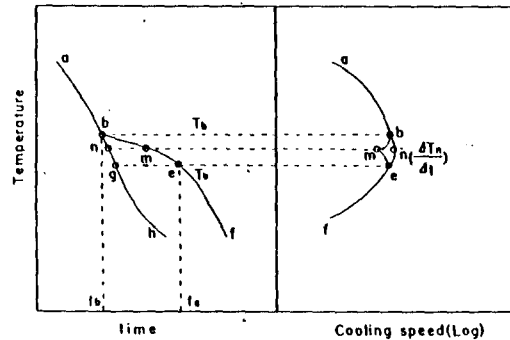


Fig. 4. A modelling of cooling curves and cooling speeds.

實驗結果 및 考察

1. 加熱溫度에 따른 冷却曲線의 形象

Fig. 5는 여러 直徑의 試片을 A<sub>1</sub>變態溫度 以下인 700°C로 加熱하여 T<sub>w</sub>=20°C의 冷却水로 冷却하는 경우의 冷却曲線이며 Fig. 6은 가로축을 冷却速度로 하여 Fig. 5를 冷却速度曲線으로 變形시킨 것이다. Fig. 5를 보면 實驗에 의한 冷却曲線과 數值計算에 의한 冷却曲線에 큰 차이가 없으며 冷却曲線의 形態를 보더라도 相變態熱의 發生이 전혀 없음을 알 수 있

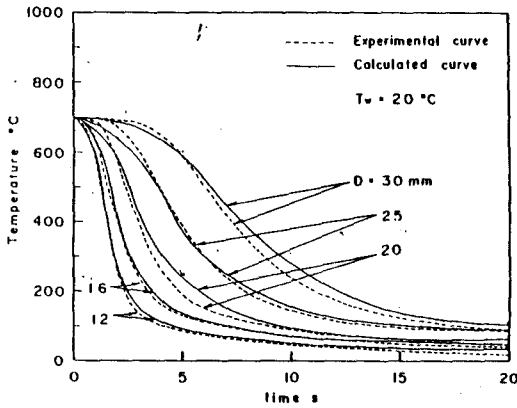


Fig. 5. The calculated and the experimental cooling curves at the centers of various diameters in case of T<sub>h</sub>=700°C

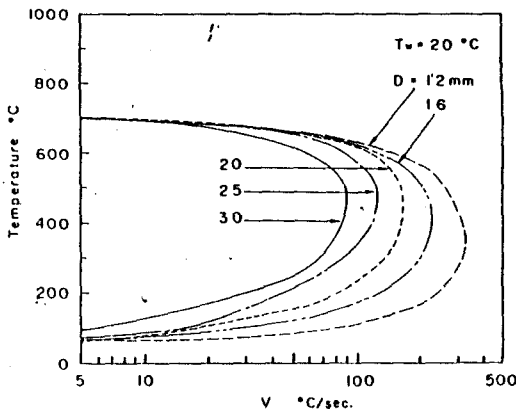


Fig. 6. The cooling speeds at the centers of various diameters of specimens in case of T<sub>h</sub>=700°C

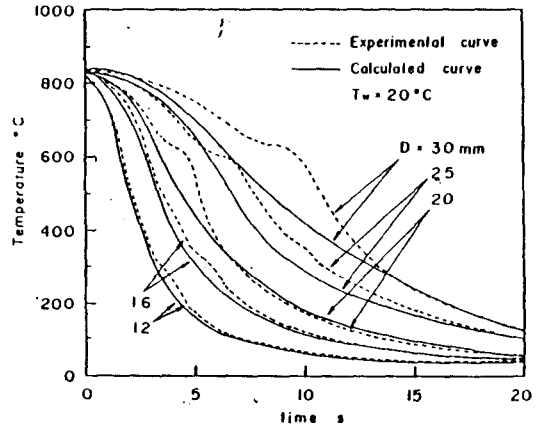


Fig. 7. The calculated and the experimental cooling curves at the center of various diameters in case of T<sub>h</sub>=820°C

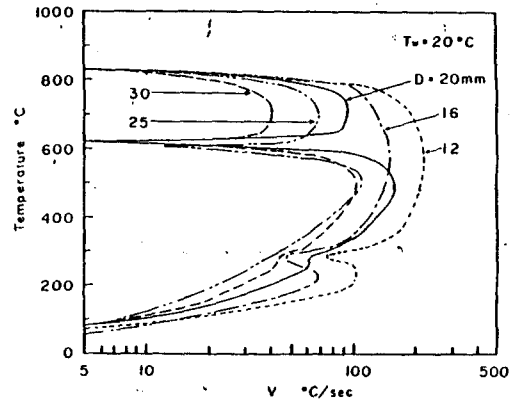


Fig. 8. The cooling speeds at the centers of various diameters of specimens in case of T<sub>h</sub>=820°C

다. Fig. 7은 Fig. 5와 同一한 試片을 A<sub>1</sub>變態溫度 以上의 溫度인 820°C로 加熱하여 冷却曲線을 測定한 것으로 Fig. 5와 달리 實驗에 의한 冷却曲線과 數值計算에 의한 冷却曲線이 큰 차이를 보이고 있는데 이러한 차이는 冷却過程에서 相變態熱이 發生하기 때문인 것으로 생각된다. 또한 Fig. 8은 Fig. 7을 冷却速度曲線으로 變形시킨 것으로 相變態熱이 發生하는 부분에서 冷却速度가 급격히 低下하는 것을 알 수 있다.

2. 相變態熱

Fig. 9는 冷却速度에 따른 冷却曲線의 形象을 究明

하기 위하여 直徑 20mm의 試片을 使用하여 冷却水 溫度를 變化시키면서 中心部 冷却曲線을 測定한 그림으로 가로축은 冷却時間이며 세로축은 試片의 溫度이다. 본 그림을 考察하여 보면 試片의  $A_1$ 變態點 前後의 冷却速度인  $A_1$ 冷却速度가 매우 느린 경우, 즉 冷却水 溫度가 80, 60°C인 경우의 冷却曲線은 試片溫度 600-650°C부근에서 相變態熱이 集中的으로 發生하고 있으며  $A_1$ 冷却速度가 커질수록 이 溫度領域에서 發生하는 相變態熱의 發生量이 減少하면서 同時に 試片溫度 300°C附近에서 적은량의 相變態熱이 發生한다. 이는  $A_1$ 冷却速度가 증가함에 따라  $Ar'$ 變態가 抑制됨과 同時に  $Ar''$ 變態가 活發하게 이루어 짐을 알 수 있다. 또한 冷却水 溫度가 낮을 수록, 즉  $A_1$ 冷却速度가 커질 수록  $Ar'$ 變態가 일어나는 溫度域이 下降함을 알 수 있다.

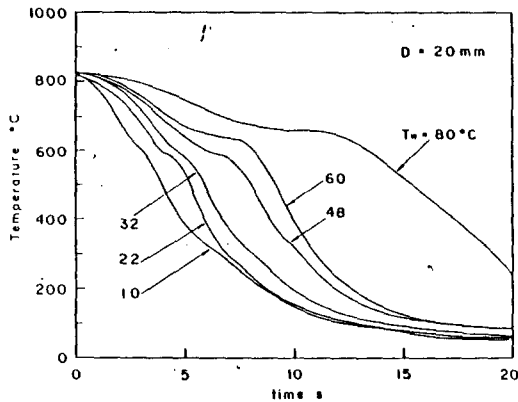


Fig. 9. The experimental cooling curves at the center of specimens in case of  $D=20mm$

Fig. 10은 0.96%炭素鋼의 담금질 狀態圖<sup>9)</sup>위에 本實驗에서 구한  $Ar'$ 變態點과  $Ar''$ 變態點을 plotting한 것이다. 본 그림은 Fig. 9의 傾向을 더욱더 뚜렷하게 나타내고 있는데  $A_1$ 冷却速度가 느린 때에는 650°C부근에서  $Ar'$ 變態만 일어나 金屬組織은 퍼얼라이트가 되고 冷却速度가 빨라질 수록  $Ar'$ 變態點이 下降하며 金屬組織은 트루스타이트로 변한다. 冷却速度가 아주 빠른 경우에는  $Ar''$ 變態만 일어나 組織은 마르텐사이트로 변하며 이것이 硬度가 가장 높은 熱處理組織이다.

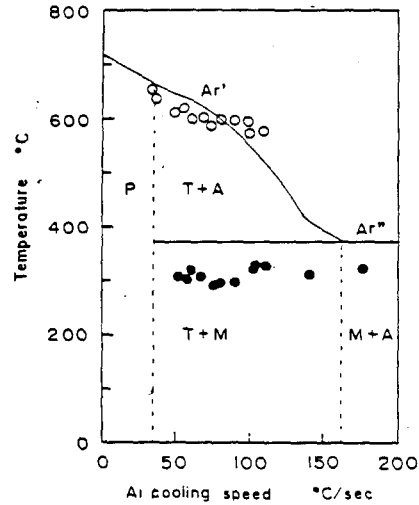


Fig. 10. The relations between the temperature of phase transformation and the  $A_1$  cooling speeds.

Fig. 11은 相變態熱의 값과  $A_1$ 冷却速度와의 關係를 나타낸 것이다. 본 그림을 考察하여 보면  $A_1$ 冷却速度가 50°C/sec以下에서는  $Ar'$ 變態熱만이 發生하는 퍼얼라이트變態가 되고  $A_1$ 冷却速度가 50-110°C/sec에서는  $Ar'$ 變態와  $Ar''$ 變態가 同時に 일어나며  $A_1$ 冷却

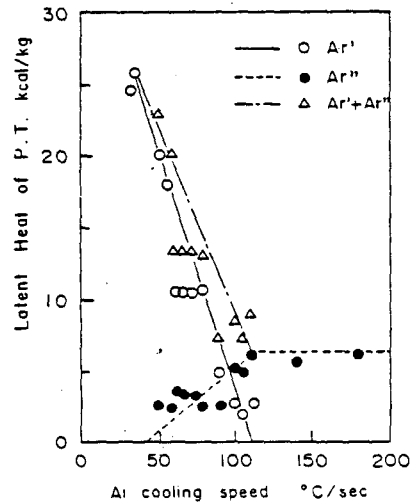


Fig. 11. The relations between the  $A_1$  cooling speeds and the latent heats of phase transformation

速度가 더욱 더 증가하면  $Ar'$ 變態만이 발생하여 마르텐사이트組織이 된다. 相變態熱量을 구하기 위한 實驗에서는 直徑 20mm의 試片을 浸漬冷却하는 方式을 택하였으며, 冷却液으로서는 一般 水道水를 사용하였는데 冷却水의 온도를  $0^{\circ}C$ 以下로 낮추는 것이 不可能함으로 인하여  $A_1$ 冷却速度가 아주 빠른 경우에 관한 實驗데이터가 充分하지 못하였다.

### 結 論

一般 構造用 鋼材로서 많이 使用되고 있는 S45C炭素鋼을 高溫 電氣爐를 利用하여  $A_1$ 變態溫度 以上인  $820^{\circ}C$ 로 加熱한 後 急冷시키는 方法에 依하여 試片의 冷却曲線을 구하고 이 冷却曲線을 利用하여 冷却速度에 따른 相變態熱量을 計算하였으며 이러한 相變態熱이 冷却曲線에 미치는 影響을 究明하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

1.  $A_1$ 冷却速度의 크기에 따라 相變態熱의 發生 樣相이 크게 변하며 S45C炭素鋼의 경우  $A_1$ 冷却速度가  $50^{\circ}C/sec$ 以下에서는  $Ar'$ 變態만이 일어 난다.
2.  $A_1$ 變態溫度 以下로 가열한 경우는 內部發熱이 없는 1차원 非定常熱傳導問題로 취급하여 數值計算을 한 값과 實測한 冷却曲線의 값이 거의 一致하지만  $A_1$ 變態溫度 以上으로 加熱한 경우에는 相變態熱을 고려한 計算을 해야 한다.
3.  $A_1$ 冷却速度가 增加할 수록  $Ar'$ 變態溫度는 서서히 低下하지만  $Ar'$ 變態溫度는  $300^{\circ}C$ 附近에서 一定한 값을 가진다.

### 參考文獻

1) 尹錫勳, 洪永杓, 金京根, 鄭大仁(1991): 金屬熱

處理를 위한 高溫面의 膜沸騰 急冷却에 관한 研究(第1報, 炭素鋼 퀸칭過程의 冷却曲線과 過渡沸騰熱傳達). 韓國舶用機關學會誌, 15(3), 57-65

- 2) 三塚正志, 福田敬彌(1974): 高溫金屬을 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, 60(14), 2079-2083
- 3) 橋藤雄, 鹽治震太郎(1972): 焼入れの熱傳達に関する 研究. 日本機械學會論文集, 38(309), 1056-1064
- 4) M.E. Irving and J.W. Westwater(1986): Limitations for obtaining Boiling Curves by the Quenching Method with Spheres. 8th Int. Heat Transfer Conf., San Francisco, U.S.A., 2061-2066.
- 5) A.M. Osman and J. V. Beck(1990): Investigation of Transient Heat Transfer Coefficients in Quenching Experiments. Trans. of the ASME, Journal of Heat Transfer, Vol. 112 November, 843-848.
- 6) S.B. van der Molen and F. W. B. M. Galjée (1978): The boiling mechanism during burnout phenomena in subcooled two-phase water flow. 6th Int. Heat Transfer Conf., Toronto, 381-385.
- 7) Patankar, S.V.(1980): Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere.
- 8) 田島 守, 牧 忠, 片山功藏(1984): 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, 3033-3040
- 9) 日本鐵鋼協會編 (1974): 鋼の熱處理. 52-53