

冷却水の流動速度와 温度가 담금效果에 미치는 影響
**The Influence of Flow Rate and Temperature on the Quenching
 Effect of Cooling Water**

閔壽泓* · 金相烈**
 S. H. Min · S. Y. Kim

Abstract

It has already been known that quenching effect is influenced greatly by stirring and changing coolant's temperature on quenching.

But according to the past investigations its effect has not been taken into consideration quantitatively in the cooling process.

The purpose of this study is that the influence of flow rate and temperature on the quenching effect of cooling water as quenching medium is quantitatively examined by using the open channel.

The stream of water in this study is turbulent flow. The temperature of the specimen made of pure copper is measured by CA thermocouple in the vicinity of the surface and recorded by an automatic recorder during the quenching process in city water.

The results obtained are as follows;

1. The quenching effect of cooling water generally increases with Reynolds Number (characteristic length: specimen diameter) as shown in the experimental formula; $H-H_{50} = 1.7 \times 10^{-8} (Re_D) (Pr)^{1.77} D^{-1}$.

But at the realm of Reynolds Number from 1.2×10^4 to 9.2×10^4 , the increasing rate of quenching effect shows little increase.

2. The increasing rate of quenching effect was increased under the flow rate of 221 cm/sec.

On the other hand, it was decreased below this flow rate.

3. The quenching effect was influenced by the water temperature and the flow rate. But it was rather dependent upon the former than the latter.
4. Although the quenching effect appeared loosely in the water temperature of 50°C , it was shown that the quenching effect increased in the low flow rate of 31 cm/sec. comparing with the still water.
5. It is desirable to design the quenching system to be over 1.2×10^4 in Reynolds Number or over, 3000cm^{-1} in V/ν in order to increase the quenching effect of the system using open channel.

* 正會員：仁荷大學校 機械工學科

** 韓國機械研究所

Nomenclature

- ν : Kinematic Viscosity
- Re_{DH} : Reynolds Number (Characteristic Length: Hydraulic Diameter)
- Re_D : Reynolds Number (Characteristic Length : Specimen Diameter)
- D_H : Hydraulic Diameter
- D : Specimen Diameter
- V : Mean Flow Rate
- K : Thermal Conductivity
- C_{pw} : Specific Heat at Constant Pressure in Water
- Pr : Prandtl Number = $\frac{C_p \mu}{K} = \frac{\nu}{\alpha}$
- T_w : Water Temperature
- h : Heat Transfer Coefficient
- H : Severity of Quench
- Fr : Froude Number
- UCT : Upper Characteristic Temperature
- LCT : Lower Characteristic Temperature
- bp : Boiling Point
- L_p : Leidenfrost Point
- ρ : Density
- H_{50} : Severity of Quench in the State of $V_w=0, T_w=50^\circ C$
- C_{pc} : Specific Heat at Constant Pressure in Copper
- S : Surface Area of Specimen
- g : Acceleration of Gravity

1. 序 論

鋼을 再結晶 溫度까지 加熱한 後, 急冷에 의해 變態의 일부를 抑制함으로써 炭素가 過飽和된 Martensite 組織을 얻는 담금處理(quenching)는 鋼의 化學的 成分과 冷却劑의 狀態에 따라 담금效果에 미치는 層의 깊이가 限定된다.

여기서 담금處理된 鋼의 組織을 Martensite 라 하는데 이 由來는 Sorby 의 初期 研究를 크게 擴張시킨 獨逸의 金屬學의 開拓者 A. Martens 의 이름을 딴 것이다.

鋼이 γ -Fe(Austenite) 의 範圍로 부터 冷却速度를 달리함으로써 A, 및 A₁ 變態를 지나約 600°C에서 Troostite(Ar' 變態)를 일으키고, 더욱 冷却速度를 빨리하면 約 300°C~400°C 附近에서 Martensite(Ar'' 變態)로 變하게 된다. Ar' 의 後階段이 시작되는 同時에 Ar''가 나오기 시작하는 冷却速度를 下部臨界冷却速度(lower critical cooling rate), Ar'' 만이 나타나는 冷却速度를 上部臨界冷却速度(upper critical rate)로 定義한다.

이 臨界冷却速度는 鋼의 成分(C, Mn, Cr, Mo 등)과 Austenite 의 粒度에 따라 달라지므로 鋼의 種類가 定하여지면, 담금效果가 試片中心部까지 미칠 수 있는 臨界直徑은 冷却劑의 冷却能에 따라 左右된다.

各種 冷却劑의 冷却特性에 관하여는 H. J. French¹⁾, M. A. Grossmann²⁾, I. Tamura³⁻¹¹⁾, Shell¹⁰⁾ 등이 獨立的으로 研究하여 그 結果를 發表한 바 있다. 特히 I. Tamura 등은 理論 및 實驗의 由로 冷却曲線의 導出方法을 研究하였으며, 銀 試驗片을 使用하여 閉水路(pipe flow)에서의 流速과 冷却能을 定量的으로 解析하려는 試圖를 行하였다. 이 以外에도 冷却劑에 관한 實驗을 土台로, 實際 常用하는 鋼에 대한 冷却特性과 比較 檢討하는 實驗도^{12, 17, 18)} 行하여지고 있고, 各種 熱處理에 의하여 發生하는 殘留應力을 有限要素法과 數值解析으로 그 分布와 傾向을 分析하여 發表¹⁹⁾ 하고 있다.

한편 冷却曲線에 대한 熱傳達論의 解析에 있어서도 沸點下에 있는 遷移沸騰을 追加하여, 第 2章에서 담금冷却過程의 理論的 背景에 대하여 敘述하는 바와 같이, 初期溫度降下, 膜沸騰, 遷移沸騰, 核沸騰 및 對流段階의 5段階說로서 冷却曲線을 解析^{24, 26)} 하고 있다.

液體의 冷却曲線이 流動 또는 攪拌과 溫度에 의해 크게 變化한다고 했으나 攪拌의 程度 또는 溫度를 定量的으로 表現하지 않고 지극히 抽象的으로 다루었다. 이것에 대하여 熱交換器 등의 沸騰을 同伴하지 않는 正常狀態에 있는 液體의 傳熱에 관해서는 定量的으로 取扱되어 왔다.

沸騰現象이 있는 鋼의 담금의 경우에는 M.

Tagaya 및 I. Tamura^{26, 27)}에 의해 閉水路 에서의 流速과 冷却能을 定量的으로 解析하려는 試圖을 했으나 實際 system 에서는 大氣壓下에서 攪拌하므로 相似法則(low of similarity)에 어긋나므로 本 研究에서는 銅試片을 가지고 流速 및 水溫을 달리하는 開水路(open channel)에서 담금질을 行하여 流速과 水溫의 相違에 따른 冷却能의 關係를 定量的으로 檢討 함으로써 熱處理 裝置를 設計하는데 올바른 基礎를 提供하기 위하여 研究하였다.

여러 冷却劑들에 대해 많은 研究^{8-10), 14, 15, 28-30)}가 行하여졌으나, 特히 本 實驗은 一般的인 上水道水(city water)를 使用하여 다른 冷却劑에 대한 實驗에 基準을 삼기 위해 行했으며 一般的으로 試片의 材質은 KS M2172³⁰⁾에 規定하고 있는 바와 같이 銀을 使用하고 있다. 이와 같이 銀으로써 冷却實驗을 하는 理由는 銀이 變態點이 없고, 그 結果 時間的 遲延없이 冷却 曲線을 記錄하여 올바른 冷却效果를 感知할 수 있기 때문에 使用하며 이 data를 土台로 鋼에 適用함으로써 比較 評價를 내릴 수 있다. 그러나 銀보다 熱起電力이 높고 變態點이 없으며 鑄造가 容易하고 또한 熔融點이 높고 低廉한 銅을 使用함으로써 試片의 材質을 代替하려고 試圖했다.

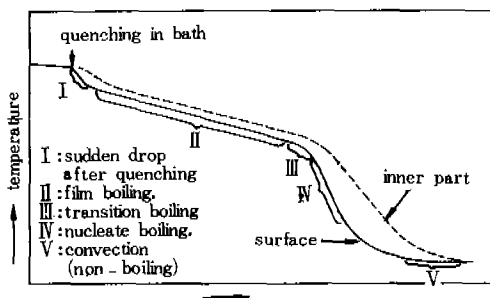


Fig. 1. Schematic illustration of the usual cooling curve.

2.1 冷却의 1段階(初期溫度 降下)

第1段階는 加熱한 試片을 液體中에 投入했을 때 그 試片周邊의 液體가 沸騰點에 達할 때

까지의 冷却인 것이다.

이때 急熱때문에 沸騰點은 어느 정도 過熱이 되었다고 할 수 있다. 第1段階의 冷却에 影響을 미치는 要因으로서 液體의 性質은 沸騰點과 液溫과의 溫度差와 粘度가 가장 큰 要因이다.

2.2 冷却의 2段階(膜沸騰)

A. 第2段階解析

第2段階에서는 試片 表面에 蒸氣膜이 生成되고 그의 外側에서 對流가 일어난다.

蒸氣膜은 熱의 不良傳導體이기 때문에 熱傳導가 極度로 低下되어 冷却은 대단히 늦다. 蒸氣膜을 生成해도 점차로 試片의 溫度는 내려가고 液體에 주는 熱量은 減少하여 液體의 單位面積當의 最大 氣化量을 氣化시키는 熱量에 致達했을 때에 蒸氣膜은 崩壞하여 다음의 沸騰段階로 들어간다.

즉 液體의 單位 面積當의 最大 氣化量의 大小 및 最大 氣化量에 到達하기 쉬운 정도에 의해 蒸氣膜段階의 有無, 長短이 決定된다.

B. 氣化의 形態

液體가 氣化할 때 생기는 氣泡의 形態에는 Fig 2와 같은 여러가지 形式이 있다. (1)은 固體 表面上一點에서 氣泡이 생길 때 氣體와 固體와의 接觸面積은 가장 적고, 氣泡도 가장 적어서 氣泡이 表面에서 떨어지기 쉽다. (5)에서 蒸氣相은 固體表面을 넓게 舐워 그의 一部에 突起가 생겨 水泡는 떨어지나 固體表面에 덮인 氣泡은 대단히 떨어지기 힘들다. 물론 氣泡의 크기 및 接觸面積은 모두 다 가장 크다. (1)~(5) 사이에 固體面積과 그것들의 中間의 여러形態의 水泡가 存在하여 그것의 順에 따라 氣泡의 크기와 接觸面積이 크게 된다.

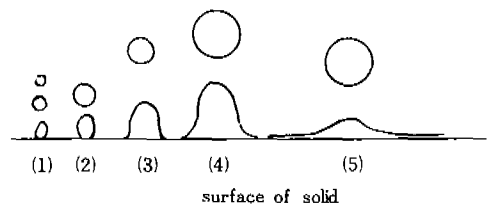


Fig. 2. type of bubble.

C. 界面張力

이와 같이 固體面積에 氣泡가 생길 때 固體와 液體, 液體와 氣體 및 氣體와 固體와의 界面張力을 각각 T_{sl} , T_{lg} 및 T_{gs} 로 表示하면 Fig. 3과 같이 되며, T_{sl} 과 T_{gs} 는 固體 表面上에 一直線이고 T_{lg} 는 $T_{sl} - T_{gs}$ 의 張力에 대하여 $T_{lg} \cos \alpha$ 로서 作用한다. 그리고 $|\cos \alpha| \leq 1$ 이므로 세가지의 界面張力의 크기의 關係에서 Table 1과 같은 여러가지의 경우가 存在한다. T_{sl} 즉 固體와 液體間의 表面張力이 적은만큼 크기 및 接觸面積이 적으므로 떨어지기

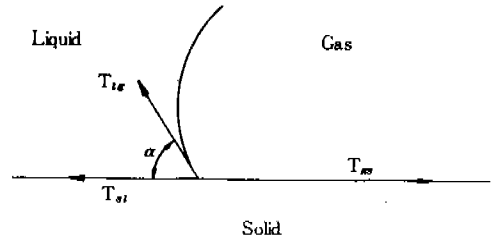


Fig. 3. Boundary tensions

쉬운 氣泡를 生成하여 單位 面積當 最大 氣化量은 增加된다.

D. 第2段階를 決定하는 液體의 性質

第2段階의 有無, 長短에 關係하는 液體의 分子構造, 특히 分子의 極性和 形狀, 蒸氣壓 및 氣化潛熱이 가장 큰 要因이다.

Table 1. Relation between Shape of bubble and boundary tensions.

Relation of T_{sl} , T_{lg} and T_{gs}	Angle of contact	Circumstance of Bubble	Type of Bubble Shown in Fig. 3-2
(1) $ T_{sl} - T_{gs} > T_{lg}$ (a) $T_{sl} > T_{gs}$ (b) $T_{sl} = T_{gs}$ (c) $T_{sl} < T_{gs}$	180° - 0°	Surface of contact between solid and gas-phases enlarges until it covers all over the surface of solid. It does not happen because T_{lg} can not be negative. Surface of contact between solid and gas-phases reduce and bubble is produced at one point of surface of solid.	(5) - (1)
(2) $ T_{sl} - T_{gs} = T_{lg}$ (a) $T_{sl} > T_{gs}$ (b) $T_{sl} = T_{gs}$	180° 90°	Bubble is produced keeping the balance with its angle of contact. "	Between (4) and (5) (3) Between (1) and (2)
(3) $ T_{sl} - T_{gs} < T_{lg}$ (a) $T_{sl} > T_{gs}$ (b) $T_{sl} = T_{gs}$ (c) $T_{sl} < T_{gs}$	90~180° 90° 0~90°	" " "	(4) (3) (2)

2.3 冷却의 3段階(遷移沸騰)

三塚의 論文³⁾에 의하면 初期 水温이 約 55℃ 以上일 때는 表面의 冷却曲線으로 부터 安定된 膜沸騰域과 核沸騰域과의 사이에 不完全한 沸騰域의 存在를 認定하고 初期水温이 50℃ 以下일 때는 試片의 初期温度가 800℃로 되기 때문에 上記 現象은 認定될 수 없게 된다고 했다. 그러나 高速寫眞機에 의해 膜沸騰과 核沸騰의 사이에 存在하는 不完全한 沸騰域이 存在하는 것을 觀察했는데 이것을 遷移沸騰域이라고 볼 수 있다. 따라서 從來의 特性温度를 分割하여 安定된 膜沸騰의 終了温度를 上部特性温度 (upper characteristic temperature), 激甚한 核沸騰의 開始温度를 下部特性温度 (lower characteristic temperature) 라고 부르고 있다. 沸騰을 理解하기 위하여 抜山⁴⁾이 發表한 Fig. 4에서 白金線에 電氣를 통해서 얻은 沸騰曲線의 一例를 나타낸다. 熱負荷 q 및 熱傳達率 h 는 加熱面과 液體의 温度差 ΔT 의 變化에 대하여 表示되고 있다. 여기서 AB의 部分은 沸騰하지 않은 普通의 自然對流의 傳熱狀態이지만 白金線은 液體의 沸騰温度와 거의 같은 温度에 達하면, 氣泡를 發生하기 始作한다. 白金線 温度가 더욱 上昇하면 氣泡를 發生하는 點의 數는 많아지고 傳熱係數는 심하게 커지며, 熱負荷는 Fig. 4의 BC線과 같이 急上昇이 連續되지만, 이것의 傾向은

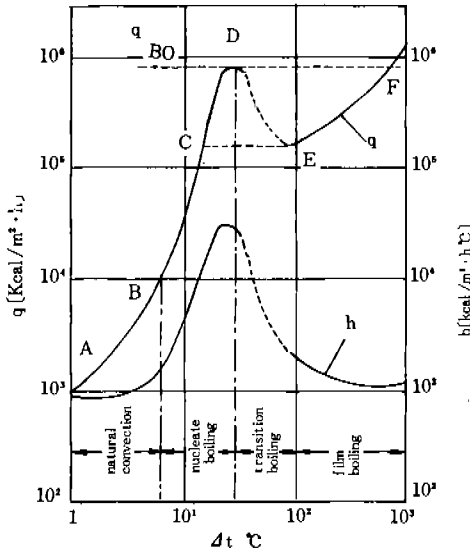


Fig. 4. Typical boiling curves for a wire in a pool of water

D點까지 連續된다. BD의 領域은 氣泡 發生이 固體 表面上的 點으로서 存在하는 核에서 發生 하기에 核沸騰이라고 한다. 위와 같은 傾向은 D點에서 갑자기 變化한다. 즉, 白金線의 電氣量을 올려서 熱負荷를 크게하면 傳熱面은 蒸氣膜으로 덮어지므로 熱이 傳達되기 어렵게 되는 結果로, 白金線은 赤熱되고 만다. Fig. 4에서는 D點에서 F點으로 移動된다. F點에 相當하는 溫度는 加熱面을 形成하는 物質의 融點 以上이면 加熱面은 熔融 破壞되고 만다. 즉 D點은 熱負荷의 最大點을 주는 點, 즉 Burnout點이다. 특히 通常 boiler의 單位面積當 熱發生率이 1,000 倍 以上인 原子炉 設計에서는 極히 重要한 問題로 된다. 傳熱面이 膜으로 덮어지는 沸騰을 膜沸騰이라 하며, 傳熱係數는 自然對流 때와 같은 정도이다. F點부터 熱負荷(電氣量)를 低下시키면 E點까지 膜沸騰은 繼續된다. E點에서 갑자기 沸騰狀態는 變하고 熱이 傳達되기 쉬운 核沸騰으로 되기 때문에 白金線 溫度는 내려가고 C點으로 된다. 더욱 電氣量을 내리면 CB의 經路를 따라 進行한다. Fig. 4에서는 C點과 E點은 水平이지만 C點의 쪽이 熱負荷가 클 때에 있는데 그의 하나는 鋼材의 담금질 할 때이다. 赤熱된 鋼材를 冷却하여 E點의 溫度가 되면 核

沸騰이 일어나고 熱負荷는 크게 되어 뛰어올라 D, C, B의 經路를 따라서 進行한다. E點은 熱負荷의 極小值를 주는 點, 즉 最小點(Leidenfrost point)이다. Fig. 4의 實驗에서는 일어나지 않았으나 條件의 選定에 따라서는 DE間의 狀態도 일어날 수 있다.

이것은 核沸騰과 膜沸騰이 部分的으로 일어나는 遷移沸騰이라고 불려진다. AD 및 EF間의 現象은 可逆의인테 比하여 一般의으로 DE間은 非可逆의이다. 또한 三塚, 福田¹¹⁾은 沸騰狀態를 Fig. 5와 같이 冷却曲線과 沸騰曲線, 蒸發曲線으로 對應시키고 있다. 또한 Table 2는 3 曲線의 類似點과 相異點을 나타낸다.

冷却曲線이나 沸騰曲線의 液溫을 飽和 溫度에 가깝게 하면 3 曲線의 條件은 大略 같게 된다.

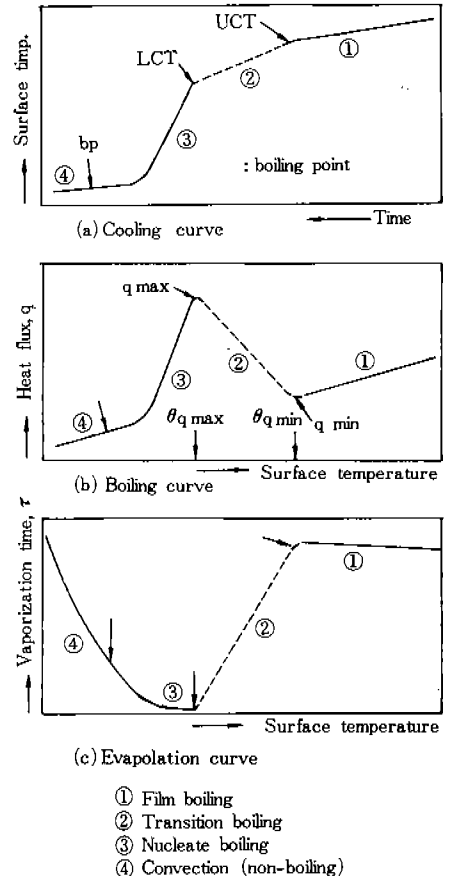


Fig. 5. Schematic illustration of cooling and evaporation curves.

Table 2. Resemblance and the difference of cooling, boiling evaporating curves.

名稱	固液接觸狀	液體의 狀態	熱容量	液溫
冷却曲線	全 面	靜止와 流動	金屬 < 液體	任意溫度
沸騰曲線	"	"	"	"
蒸發曲線	局 部	거의 靜止	金屬 > 液體	飽和溫度

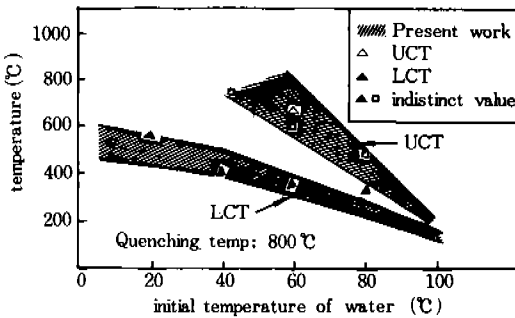


Fig. 6. Comparison of the characteristic temp. with others.

즉, Fig. 6에서 보는 것과 같이 水温(T_w)이 약 100°C (沸點)까지 到達할 때, LCT 및 UCT는 각기 130°C~140°C와 170°C~180°C로 된다. 이에 대하여 水滴의 蒸發實驗에 의하면 水滴壽命 τ 의 極小值 τ_{min} 에 對應하는 表面溫度 $T_{\tau_{min}}$ 와 Leidenfrost 溫度 LP는 각각 133°C~168°C와 140°C~180°C이다. 兩曲線의 特性溫度는 거의 一致한다고 볼 수 있다. 여기서 3曲線의 對應關係를 試片 表面溫度 T_s 에 比較해 보면 Table 3과 같다.

Table 3. Corresponding relation of cooling, boiling, evaporation curves.

沸騰形態	冷却曲線	沸騰曲線	蒸發曲線
膜沸騰域	$UCT < T_s$	$T_{q_{min}} < T_s$	$LP < T_s$
膜沸騰終了溫度	UCT	$T_{q_{min}}$	LP
遷移沸騰域	$LCT < T < UG$	$T_{q_{max}} < T_s < T_q$	$T_{r_{min}} < T_s < LP$
核沸騰開始溫度	LCT	$T_{q_{max}}$	$T_{r_{min}}$
核沸騰域	$T_s < LCT$	$T_s < T_{q_{max}}$	$T_s < T_{r_{min}}$

2.4 冷却의 第4段階(核沸騰)

이 段階는 蒸氣膜 崩壞後 液體가 直接 試片에 接觸하여 심한 沸騰이 일어나고 가장 冷却이 빠른 段階이다. 蒸氣膜이 崩壞된 瞬間은 單位面積當의 氣化量이 最大로 되나 試片溫度가 降下하게 됨에 따라 적어지며 冷却速度도 늦어진다. 이 段階에 있어서 冷却速度는 特性溫度가 高温일수록 크며, 沸點이 낮아지는 정도로 冷却速度는 빨라진다.

2.5 冷却의 第5段階(對流)

4段階부터 5段階에 들어가는 遷移溫度가 沸點에 의해 規定되어지는 것은 當然하다. 5段階는 주로 對流에 의해 冷却되는 最後의 가장 늦은 段階로서 이 段階의 冷却速度는 冷却劑 溫도와 沸點의 溫度差와 粘度가 가장 큰 因子이다. 그러나 어느 만큼 늦은 段階이기 때문에 粘度는 多少 變해도 差異가 없다.

以上을 要約하면 蒸氣壓은 낮고, 氣化潛熱은 크고, 固體分子는 固體表面에 吸着되기 쉬운 만큼 特性溫度는 높아지고, 液體의 冷却作用도 特性溫度가 높고 沸點이 낮은 만큼 크다.

3. 實驗

3.1 實驗裝置

內徑 50mm, 두께 4mm, 길이 300mm의 alumina tube에 石綿 tape를 감고 Ni-Cr線이 熱膨脹에 의해 短絡(short circuit)이 發生하는 것을 防止하기 위하여 그 위에 가늘게 끈 石綿 tape를 螺旋形으로 감고 直徑 1.2mm, 길이 26mm의 Ni-Cr線을 coil spring으로 만들었다. 使用電源은 單相 220 volt로서 可變電壓 調整器에 의하여 炉內溫度가 規定된 溫度에 到達한 후에는 一定 溫度를 維持하도록 電壓을 調整하였다. 이 電氣炉의 發熱量은 電壓 220 volt에서 1.42 kw이며, 最大到達溫度는 1,100°C이고 220 volt로 調整하였을 때, 炉內溫度가 820°C로 維持된다.

담금질用 水路는 全長 4m, 幅 70.6mm, 높이

350mm이고, Honey cell 과 矩形weir을 갖는開水路(open channel)를 使用하였으며, 흐름을 觀察하기 위해 幅 350mm, 길이 975mm의 유리를 兩側에 附着하여 等流(uniform flow) 區間을 設定하여 이 區間에서 답급을 하기 위해 炉를 移動할 수 있도록 만들어 놓았다. 9.13m의 水頭(head)에 攪拌器와 6kw heater 가 3個 달린 804ℓ 容量의 탱크를 設置하고 附着된 3" 밸브를 通

해서 3" P.V.C. 호오스로 開水路와 連結하였으며, 開水路 밑에는 920ℓ 容量 탱크를 만들어 冷却水를 받아 2HP와 1HP을 直列連結한 2台의 centrifugal pump로 다시 위 탱크에 送 出시키는 液體循環 담금裝置를 만들었다. Fig. 7, Fig.8 및 Fig.9는 이 裝置의 配置圖 및 詳細圖를 나타낸 것이다.

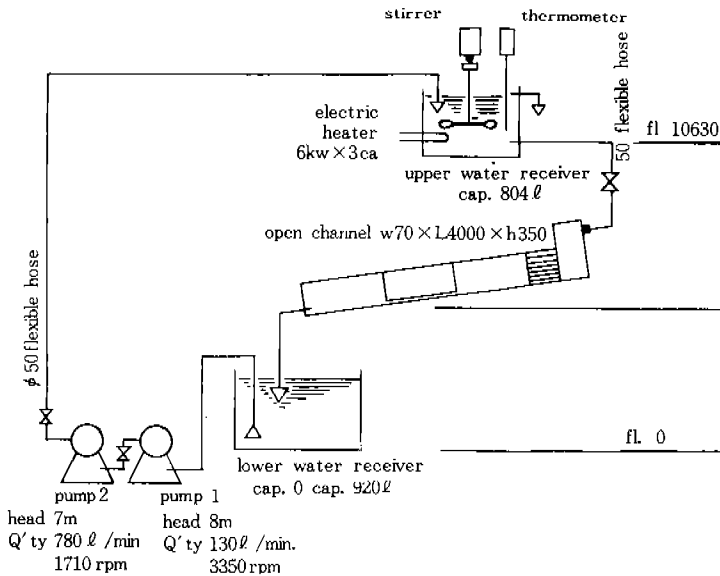


Fig. 7. Schematic diagram of testing apparatus.

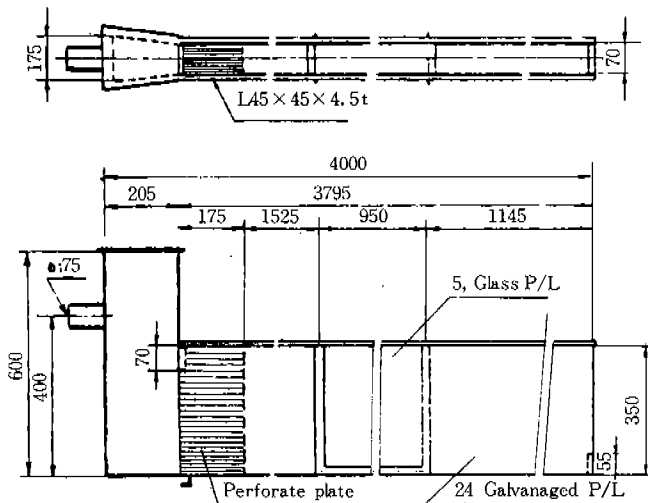


Fig. 8. Detail drawing of open channel.

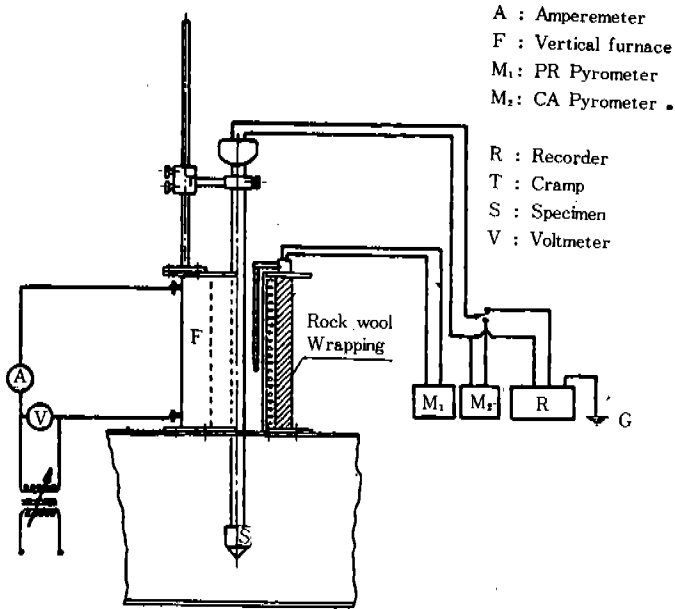


Fig. 9. Schematic diagram of Measuring apparatus.

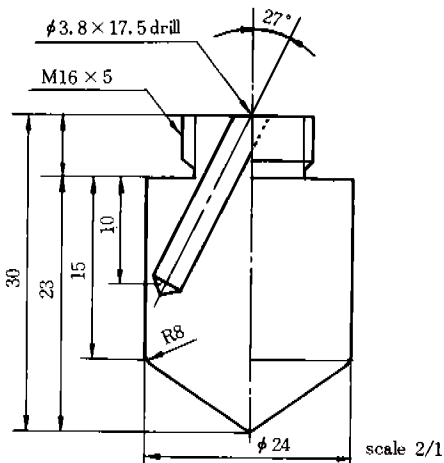


Fig. 10. Configuration of the specimen.

3.2 試驗片 및 冷却劑

試驗片은 Fig. 10에 圖示한 바와 같이 加工하였으며 99.6%銅을 使用하여서 溫度測定을 위하여 CA (素線直徑 0.6mm) 熱電對를 使用하였고, 炭素棒으로 熱電對를 熱接合하기 위하여 可變電

壓調整器로 60 volt의 電壓을 維持하였다. Fig. 10에서 圖示한 바와 같이 試片의 끝 部分을 圓錐形으로 加工한 理由는 담금할 때, 試片이 垂直 담금速度에 의한 影響을 줄이기 위해서이며, 試片의 上端部에서 27° 傾斜로 試片表面 1.5mm 내까지 drill로 直徑 3.8mm 구멍을 뚫고 그 구멍에 直徑 3.7mm의 두 개의 구멍이 뚫린 알루미늄나 絶緣管을 使用하여 CA 熱電對를 挿入한 後 실리콘 接着劑로 완전히 接着하였다. 또한 旋盤으로 試片 上端部에 나사를 내고 外徑 17.3mm, 두께 2mm의 SUS 304 tube로 된 保護管을 나사로 連結했다. 試片을 固定시킨 後 담금하기 위해 Fig. 9에서 보이는 바와 같이 clamp 裝置를 考案했다. 保護管 안쪽에는 直徑 5.5mm의 두 개의 구멍이 뚫린 알루미늄나 絶緣管으로 絶緣하고 소켓 (thermo couple head)에 熱電對를 接續하여 試片의 溫度를 pyrometer (Type 1200mv, Yamato Scientific Co., Ltd.)로서 確認하였으며, pen Type X-Y recorder (Model HO 6-135)에 의하여 記錄紙에 記錄하게 하였다. 冷却水는 上水道水를 取었고 그 分析結果는 總硬度 5.6ppm

이며, 實驗條件은 Table 4에 表示하였다.

3.3 實驗方法

Table 4. Experiment condition.

Exp. No.	temp. of water (°C)	flow rate (cm. sec)	Rey. No. (hydraulic diameter)	normal depth (cm)	Pr. No.	Fr. No. (hydraulic depth)
1	15	0	0	0	8.062	0.0
2		31	30192	13.9		0.26
3		82	88449	24.6		1.53
4		178	157786	9		2.90
5		221	200997	9.9		3.25
6		294	265588	9.7		3.02
7		372	329219	9		4.96
8		400	348228	8.5		4.94
9	20	0	0	0	7.090	0
10		31	34600	13.9		0.26
11		82	101362	24.6		0.53
12		178	180823	9		1.90
13		221	230342	9.9		2.25
15		294	304364	9.7		3.02
15		372	377285	9		3.96
16		400	399069	8.5		4.94
17	30	0	0	0	5.410	0
18		31	43089	13.9		0.26
19		82	126230	24.6		0.53
20		178	225184	9		1.90
21		221	286852	9.9		2.25
22		294	379033	9.7		3.02
23		372	469844	9		3.96
24		400	496972	8.5		4.94
25	40	0	0	0	4.386	0
26		31	51779	13.9		0.26
27		82	151740	24.6		0.53
28		178	270693	9		1.90
29		221	344824	9.9		2.25
30		294	455634	9.7		3.02
31		372	564797	9		3.96
32		400	597408	8.5		4.94
33	50	0	0	0	3.573	0
34		31	62343	13.9		0.26
35		82	182635	24.6		0.53
36		178	325807	9		1.90
37		221	415031	9.9		2.25
38		294	548403	9.7		3.02
39		372	679792	9		3.96
40		400	719043	8.5		4.94

理論 流量 122.3 ton/h을 얻기 위해 水頭 9.13 m에 탱크를 設置했으며, 速度變數를 얻기 위하여 豫備的으로 流體實驗을 하였으며, 여기서 水路의 傾斜角度와 밸부의 開閉程度 즉, 流量의 變化로서 上部 탱크의 斷面積을 알고 있으므로 탱크의 水頭가 20cm 내려갈 동안의 時間을 測定한 後, 平均水深(normal depth)을 測定하여 流速을 算出했다. 이 중에서 8가지의 速度를 選定하고 알맞은 等流(uniform flow)區間을 設定했으며 그 地點의 水深(normal depth)을 記錄했는데 水深의 60%에서 平均 流速을 나타내는 結果⁽²⁾에 의거하여 水深의 60% 깊이에서 담금을 行했다. 또한 水力半徑(the hydraulic radius)을 特性길이로 한 Re_{DN} 로 分析한 結果 測定範圍內에서는 모두 亂流狀態로 나타났다.

또한 hydraulic depth을 特性길이로 한 Fr로 分析한 結果, 31 및 82cm/sec는 常流(tranquil flow)狀態이고, 178, 221, 294, 372 및 400 cm/sec는 射流(rapid flow)로 나타났으며, 水温에 따른 流速의 變化는 거의 없었다. 水温은 15°C, 20°C, 30°C, 40°C 및 50°C로 하였으며, 15°C에서는 얼음을 添加하여 溫度를 調節하였고 30°C 이상은 heater로 加熱하여 溫度測定實驗을 통해 그 水温을 維持시켰다. 試驗片은 clamp로 固定시키고 炉內의 中心部에서 15分 程度 加熱한 後 開水路에 落下시켰다.

한편, X-Y recorder에 그려진 各溫度-時間曲線(冷却曲線)에 따라 冷却性能^{(3),(4)} 즉, 820°C에서 400°C까지의 冷却秒數를 計算 하였으며, 冷却劑의 冷却能은 熱傳達率과 熱傳溫度의 比인 담금強烈度(severity of quench), $H = \frac{h}{k}$ 로서 考察하였다.

담금強烈度を 求하는 方法은 Grossmann에 의해 시작되었고, 그 以後 많은 論文^{(1),(10)}에서 冷却能에 대한 解析으로서 이 값을 基準으로 比較 檢討되고 있다.

그러나 本 實驗은 銅試片이므로 冷却能에 對한 原理를 記述한 文獻⁽⁵⁾의 式에 의거하여 求했다.

4. 實驗結果 및 考察

4.1 流速에 의한 冷却曲線의 變化

Fig. 11은 15℃, 20℃, 30℃, 40℃ 및 50℃의 一定한 水温下에서 冷却曲線에 미치는 水温의 影響을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 冷却曲線은 流速의 增加에 따라 左側으로 移動하므로 冷却速度는 크게 된다. 流速이 작은 領域에서는 冷却曲線은 크게 左側으로 移動하고 있으나, 流速이 增加하면서 점차 그 影響이 작아져서 221cm/sec 以上の 流速에서는 冷却曲線은 거의 重複되고 있다. 한편 冷却能은 一定值에 達하게 되고, 221cm/sec 以上으로 流速을 增加하여도 冷却能은 上昇하지 않는 傾向을 보인다. 그 理由는 蒸氣膜이 두꺼워서 流速에 의하여 完全히 膜이 除去되지 않고 단지 蒸氣膜의 두께가 얇아지기 때문이다. 그 結果로 流體의 특

性温度는 높아지며, 沸騰段階의 冷印도 빠르게 된다. 한편 水温이 15℃, 20℃, 30℃, 40℃ 및 50℃의 順으로 增加할 수록 膜沸騰段階는 점점 길어지고 있으며, 對流段階의 開始温度는 어떠한 流速下에서도 一定하다. 이러한 理由는 對流段階의 開始温度가 주로 液體의 沸騰點에 關여 하기 때문이다.

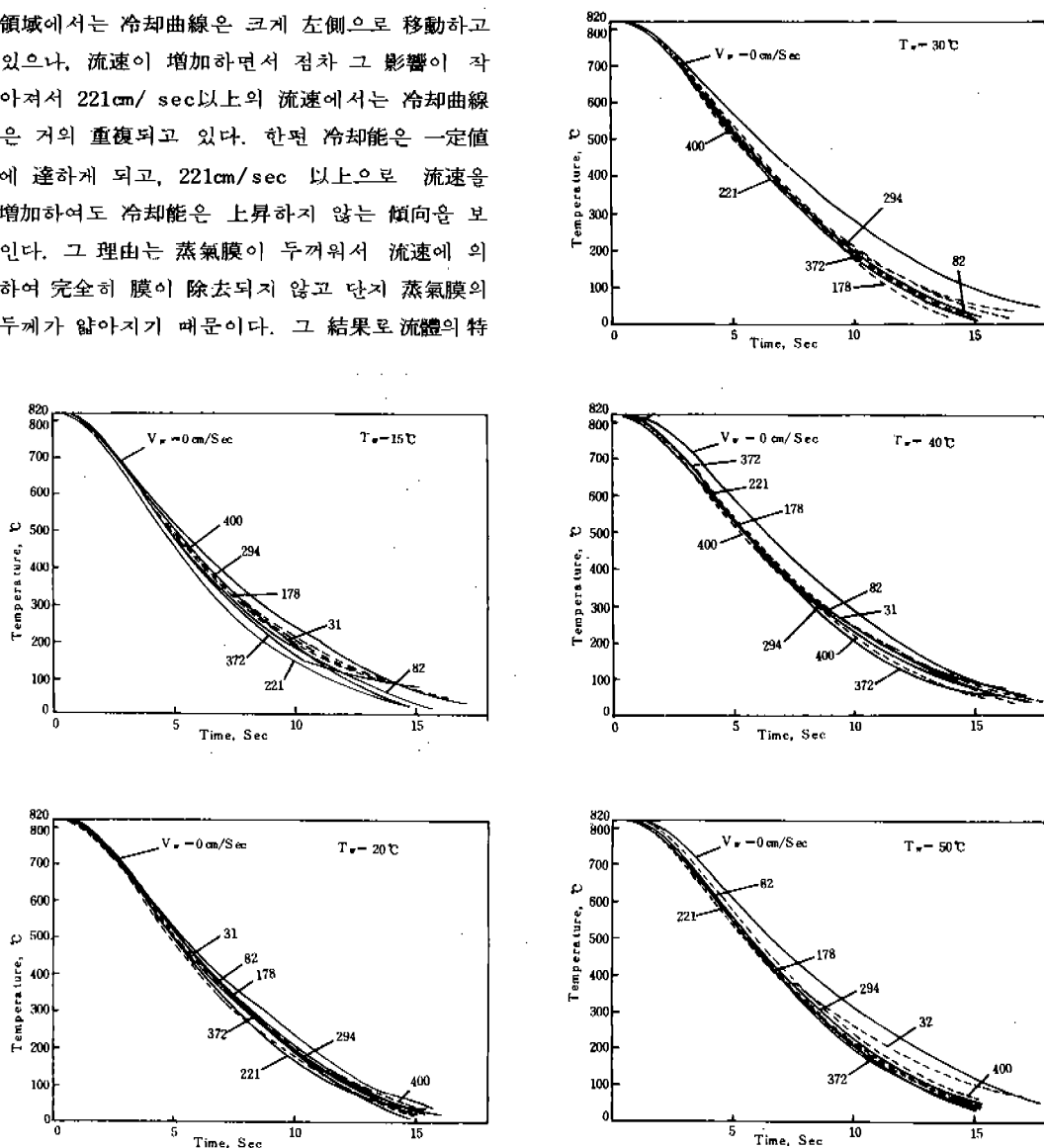


Fig. 11. Influence of Flow rate on the cooling curve of city water.

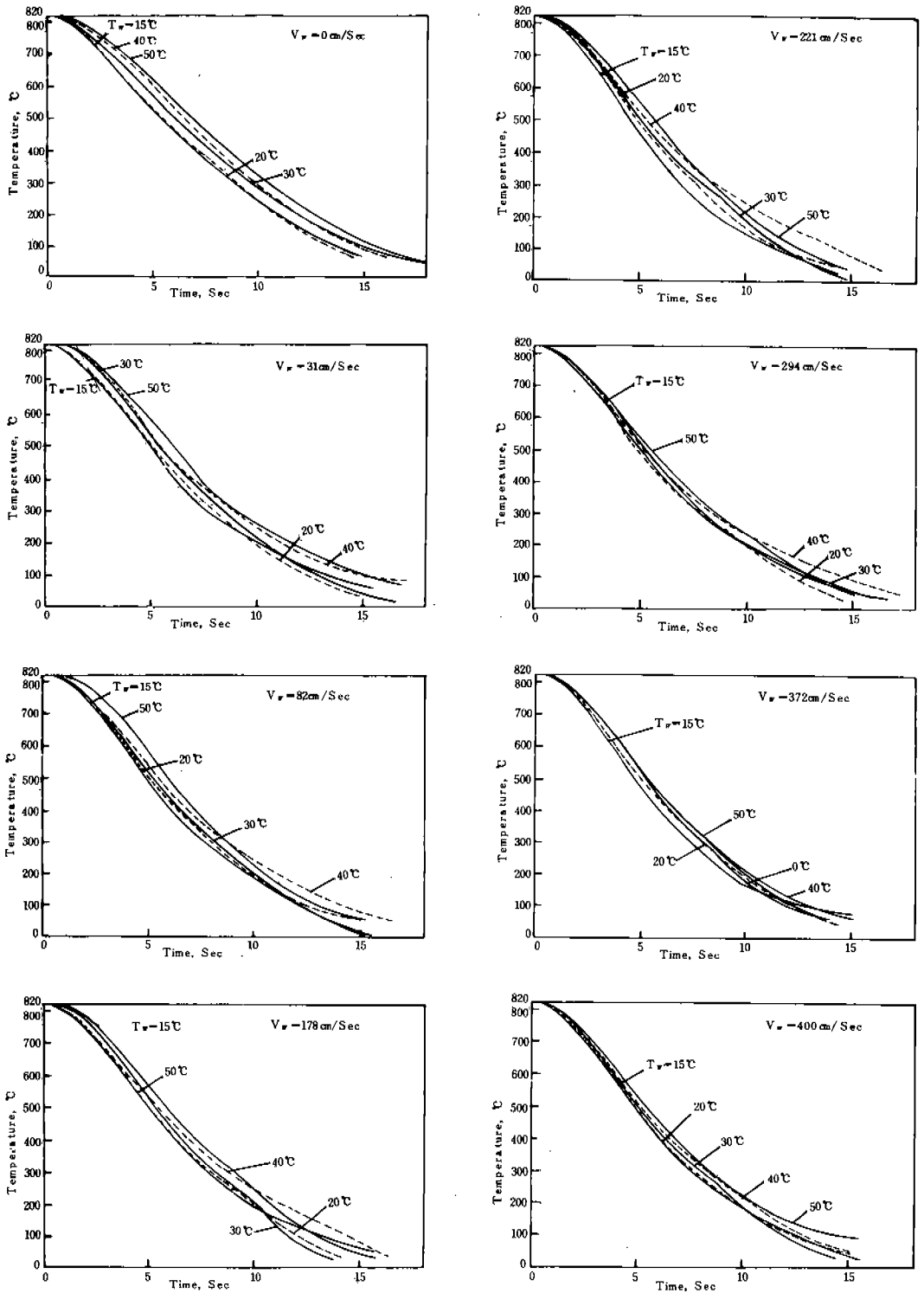


Fig. 12. Influence of water temperature on the Cooling Curve of City Water.

4.2 水温에 의한 冷却曲線の 變化

Fig. 12는 0, 31, 82, 178, 221, 294, 372 cm/sec 및 400cm/sec의 一定한 流速下에서 冷却曲線에 미치는 水温의 影響을 나타내고 있다. 水温이 增加하면서 冷却效果는 점점 減少하고 있으며, 이러한 現象은 담금질 冷却過程의 理論的 考察에서 이미 言及한 바와 같이 冷却劑의 温度가 높아짐에 따라 特性温度가 낮아지므로 冷却效果가 좋은 核沸騰이 늦게 일어나기 때문이다. 그러나 294cm/sec 以上の 流速에서는 冷却曲線에 미치는 水温의 影響이 크게 鈍化되어 冷却曲線이 重複된다.

4.3 流速에 의한 冷却能의 變化

Fig. 11의 冷却曲線으로 부터 820°C~400°C 사이의 冷却秒數를 읽을 수 있도록 Fig. 13에 圖示하였다. 冷却時間과 流速과의 關係는 流體가 静止한 경우를 除外하면 双曲線의 關係가 있으며, 이것을 담금強烈度와 流速의 關係로 圖示한 것이 Fig. 14이다. 그림에서 알 수 있는 바

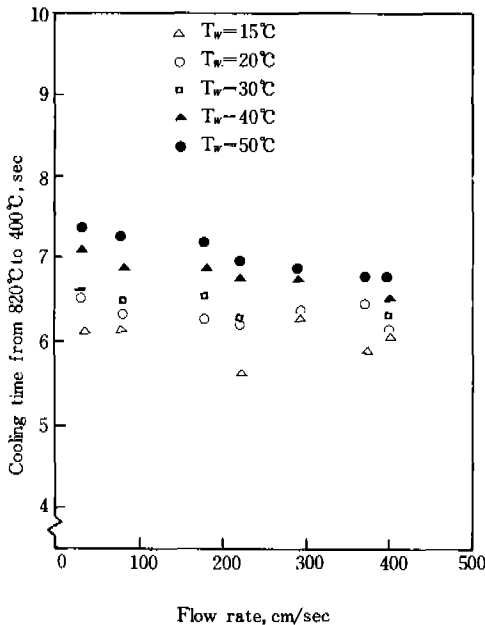


Fig. 13. Relation between Cooling Time from 820°C to 400°C and Flow Rate.

와 같이 流速을 增加시키면 冷却效果는 점차 上昇하나, 221cm/sec 以上の 流速에서는 거의 變化가 없다. 이 結果는 I. Tamura의 實驗值, 즉 400cm/sec 流速과는 相異하나 그 傾向은 거의 一致하고 있다. 그러므로 이러한 現象은 I. Tamura가 實驗한 pipe system에서 pump의 吐出管 自體內壓이 大氣壓보다 높아 蒸氣壓을 上昇시키는 影響을 주기 때문이다.

水温이 높아질수록 冷却效果는 流速의 影響에 敏感하여지는 것을 觀察할 수 있는데, 이것은 非壓縮性 流體를 使用하고 있지만 水温이 增加하면서 逆으로 密度와 粘度는 減少하여 冷却能의 上昇作用을 돕기 때문이다.

4.4 水温에 의한 冷却能의 變化

Fig. 12의 冷却曲線으로 부터 820°C~400°C 사이의 冷却秒數를 읽어서 Fig. 15에 表示하였으며, 이것을 담금強烈度와 水温의 關係로 나타내면 Fig. 16과 같다. 水温과 담금強烈度 또는 冷却秒數의 關係는 거의 直線的으로 變化하고 있으며, 静止된 水温 50°C에서는 鈍化되어 水温

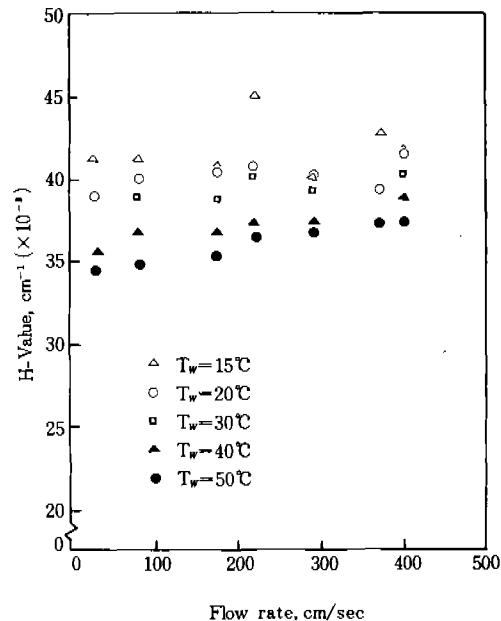


Fig. 14. Relation between Severity of Quench $H\text{cm}^{-1}$ and Flow Rate.

의 影響이 크게 나타나지 않는다. 한편 流速 31 cm/sec 以上인 경우에는 溫度에 따라 冷却能이 顯著히 上昇하지 않고 若干씩 增加하여 水温에 의한 冷却能을 나타내는 點들이 重複되고 있다.

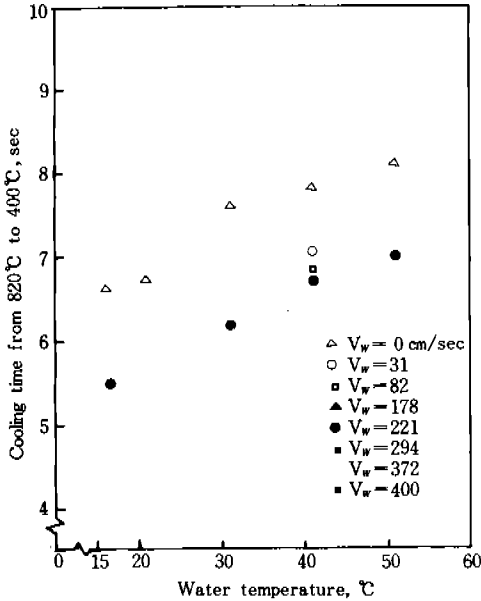


Fig. 15. Relation between Cooling Time from 820°C to 400°C and Water Temperature.

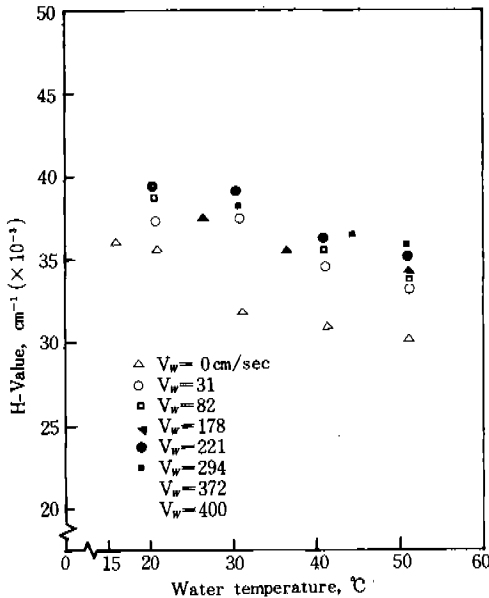


Fig. 16. Relation between Severity of Quench $H\text{cm}^{-1}$ and Water Temp.

5. 實驗에 대한 綜合的 考察

Grossmann¹⁾은 담금強烈度(severity of quench)를 $H = \frac{h}{2k}$ 로 定義하였으나 本 實驗에서는 I. Tamura가 發表한 論文¹²⁾에 의해 $H = \frac{h}{k}$ 로 定義했다. 여기서,

h : 表面熱傳達率 ($\text{Cal cm}^{-2} \text{sec}^{-1} \text{°C}^{-1}$)

k : 試片의 熱傳導度 ($\text{Cal cm}^{-1} \text{sec}^{-1} \text{°C}^{-1}$)

이며 冷却過程을 lumped heat capacity로 分析함으로써 非正常熱傳達에서 取扱하는 Biot Moduli와 매우 흡사하다. 그러나 담금질에서 取扱하는 담금強烈도는 液温을 無視하지 않으면 이 값에 의하여 一律的으로 冷却速度를 規定하는 것은 困難하며 液温을 考慮했을 때, H 값이 같아도 液温에 의하여 冷却速度가 變化하기 때문이다. 이 값에 의하여 一律的으로 冷却速度를 規定하기 위하여는 液温을 無視하지 않으면 안된다.

鋼의 담금질에서 問題가 되는 것은 一定溫度範圍에 있어서의 冷却速度이며 이것을 H 값에 의하여 나타내는 것이므로 液温을 無視하고 어느 一定溫度(例로서 0°C)로 하여 생각해도 實際로 何等의 支障이 없고, 이와 같은 H 값을 생각할 때 本來의 熱傳達比로서 定義한 것에 多少 差異가 난다. 그러므로 여기서 H 를 새롭게 담금強烈度로 定義한 것이다. 本 實驗은 위와 같은 定義로부터 冷却劑를 一定溫度, 즉 0°C로 定했다.

液體中에서 冷却能이 流速 $V(\text{cm/sec})$ 에 關係하는 것은 勿論이고, 溫度에 의해 液體의 動粘性係數 $\nu(\text{cm}^2 \text{sec}^{-1})$ 에 關係된다고 할 수 있다. 기타 여러 因子가 考慮되고 있지만 沸騰을 갖지 않는 正常狀態에 있어서는 液體의 熱傳導度 k 및 沸熱 C 를 因子로 하여 採擇하였다. 鋼을 담금질할 경우도 이같은 因子에 依存하고 있다고 하면, $H = f(V, D, \nu, C, k, P)$ 의 關係를 Buckingham의 π 정리로 次元解析하면 다음과 같이 된다.

$$(H - H_{\infty}) = K \left(\frac{VD}{\nu} \right) D^{-1} \left(\frac{C\nu P}{k} \right)^{(1+n)} \dots (1)$$

여기서 H는 담금 強度度(cm^{-1}), H_{50} 은 水温 50℃에서의 流體 靜止時의 담금 強度度이다. D는 試片 直徑을 말한다. ρ 는 比重(gcm^{-3})이다. ν 는 動粘性係數(cm^2sec^{-1})이며 (VD/ν) 는 Reynolds Number이고 $(Cv\rho/k)$ 는 Prandtl Number이다. 이것들을 각각 Re_D 및 Pr 로 表示하여

$$(H-H_{50}) = \phi(Re_D)D^{-1}(Pr)^{-(n+1)} \dots \dots \dots (2)$$

로 되었을 때보다 좋은 近似值를 얻을 수 있다. 그러나 (2) 式에 있어서 ϕ 의 函數形이 未知이기 때문에 n 값을 求하기는 困難하므로 (1) 式을 써서 n을 求한다.

여기서 물의 경우에 대한 比重, 動粘性係數, 沸熱, 熱傳導度는 參考文獻^{44, 45, 46}에 있는 物性值를 썼다. 이와 같이 해서 (1) 式의 實驗值를 適用했고, 이것을 最積法(least square method)을 利用하여 n과 K의 값을 求하면 $n=0.7721919$, $K=1.70461 \times 10^{-6}$ 을 얻었다. 이 n 값을 (2) 式에 適用해서 實驗值를 Re_D 와 $\phi(Re_D)$, 즉 $(H-H_{50})D/(Pr)^{1.77}$ 와의 關係로 해서 圖表를 作成하면 Fig. 17과 같이 된다.

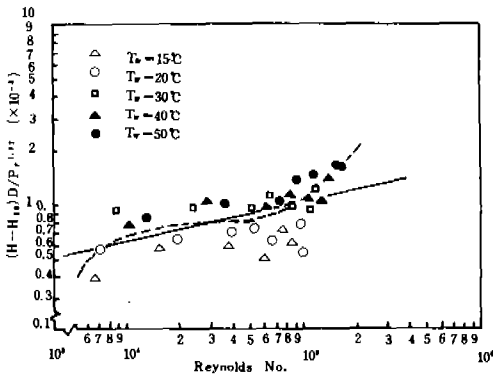


Fig. 17. Relation between $(H-H_{50})D/(Pr)^{-(n+1)}$ and Reynolds No. (Specimen Diameter is used as Dimension of Length)

그림中 直線은 (1)의 關係를 表示한다. (2) 式에 있어서 液体의 性質에 관한 因子는 Pr 로 表示되고 있으나 次元解析을 할 때, Fr 를 비롯한 모든 豫想된 因子를 網羅해서 하지 않았기 때

문에 모든 因子를 考慮한 것만큼 充分하게 된다고 생각치 않는다. 그러나 近似式이므로 $\phi(Re_D)$ 항에 不確實한 것이 있게 된다. 또 (2) 式은 試片 直徑 D에 있어서 相似法則이 成立한다고 考慮했지만 實際 I. Tamura²⁷⁾는 pipe flow로 한 實驗에서 相似性을 證明했으므로 本 實驗에서는 이것을 假定할 必要는 없다.

Fig. 17에 있어서 Re_D 의 增大와 더불어 $\phi(Re_D)$, 즉 $(H-H_{50})D/(Pr)^{1.77}$ 는 增大하고 1.2×10^4 附近에서 緩慢하다가 9.2×10^4 附近에서 急激히 上昇하고 있다. 이러한 現象은 I. Tamura²⁸⁾에서도 나타나지만 Re_D 값이 적은 것이 相異点인데 이러한 現象은 實驗條件에서 溫度를 添加한 開水路에서 했기 때문이다. 이러한 變化에 대한 考察은 非定常 熱傳達에서 다루므로 說明은 困難하지만, 膜沸騰, 核沸騰 및 直接 流體에 의한 脫熱에 대해 Re_D 의 效果로 보여지기 때문에 특히 蒸氣膜 段階에서 蒸氣膜의 두께에 대한 流速과 水温의 影響이 크게 作用한다고 할 수 있다. Fig. 17의 結果에서 생각하면 水温이 높은 狀態의 冷却水에서 낮은 水温 狀態로 갈수록 Re_D 에 의한 影響이 작아지는 것을 觀察할 수 있는데 이것으로 볼 때, 蒸氣膜 두께가 流速보다는 溫度에 의한 影響이 크다는 것을 알 수 있다.

또한 Re_D 1.2×10^4 以下이면서 攪拌을 強하게 하면 $\phi(Re_D)$, 즉 冷却能이 커진다고 할 수 있다. 담금질 設計의 基準은 McAdams⁴²⁾의 著書에 있는 data (沸騰을 隨伴하지 않는 正常狀態의 管内를 흐르는 流體의 傳熱)을 基準으로 해서 Re_D 4000 以上(이때의 直徑은 管 또는 槽의 直徑)으로 하고 있으나 本 研究에서는 open channel을 利用하여 實驗했기 때문에 어느 程度 比較할 수 없는 독특한 값, 즉 1.2×10^4 程度까지 攪拌을 해야 되리라 본다. 담금질 設計의 基準을 Re_D 로서 規定하고 있으나 試片 치수가 크면 流速이 작은 경우에 Re_D 가 크게 되므로 攪拌에 의하여 큰 效果가 나타난다고는 볼 수 없기 때문에 담금 強度度 또는 V/ν 의 값에 따라 定하는 것이 妥當하며 I. Tamura²⁸⁾에 의하면 V/ν 는 1,000 cm^{-1} 以上이 되면 攪拌할 必要가 없다고 하고 있다.

6. 結 論

本 實驗에서는 閉水路의 亂流領域에서 銅試片을 이용하여 上水道水로서 水溫과 流速을 變化시켜 水溫과 流速 및 冷却能의 關係를 檢討하여 冷却水의 流動速度와 溫度가 담금效果에 미치는 影響을 定量的으로 연구하였다. 實驗結果 및 考察을 통하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. $H - H_{00} = 1.7 \times 10^{-8} (Re_D) (Pr)^{1.7} D^{-1}$ 의 實驗式에서 보는 바와같이 전반적으로 試片 直徑에 대한 流體의 Re_D 가 크게 되므로 담금效果는 增加하고 있으나, $1.2 \sim 10^4 \sim 9.2 \times 10^4$ 의 Re_D 의 領域에서는 冷却效果의 增加率이 크지 않다.

2. 221 cm/sec 以下の 流速에서는 水溫에 따른 담금效果의 增加率이 크다. 반면에 그 이상의 流速에서는 水溫에 따른 담금效果의 增加率이 적다.

3. 流速과 水溫의 影響에 의한 담금效果는 流速보다는 水溫에 더 의존한다.

4. 水溫 50°C에서 담금效果는 鈍化되지만, 31 cm/sec의 낮은 流速에서는 담금效果가 정지상태 보다 크게 增加하는 것으로 나타난다.

5. 閉水路를 이용한 담금槽의 담금效果를 높이기 위해서는 $Re_D 1.2 \times 10^4$ 이상, V/ν 는 $3,000 \text{ cm}^{-1}$ 이상으로 設計하는 것이 바람직하다.

參 考 文 獻

1. H. J. French: Trans, 17 (1930), 646 and 798.
2. M. A. Grossmann; Elements of Hardenability. ASM (1952), 74.
3. 多賀谷, 田村; 日本金屬學會誌, B15 (1951) 11, p. 535.
4. 多賀谷, 田村; 日本金屬學會誌, B15 (1951) 11, p. 538.
5. 多賀谷, 田村; 日本金屬學會誌, B15 (1951) 12, p. 589.
6. 多賀谷, 田村; 日本金屬學會誌, 16 (1952) 2, p. 107.
7. 多賀谷, 田村; 日本金屬學會誌, 16 (1952) 6, p. 342.
8. 多賀谷, 田村; 日本金屬學會誌, 16 (1952) 12, p. 652.
9. 多賀谷, 田村; 日本金屬學會誌, 17 (1953) 5, p. 217.
10. 多賀谷, 田村; 日本金屬學會誌, 20 (1956) 3, p. 124.
11. 多賀谷, 田村; 日本金屬學會誌, 20 (1956) 6, p. 336.
12. 多賀谷, 田村; 日本金屬學會誌, 20 (1956) 7, p. 357.
13. 多賀谷, 田村; 日本金屬學會誌, 20 (1956) 8, p. 428.
14. 多賀谷, 田村; 日本金屬學會誌, 20 (1956) 9, p. 477.
15. 多賀谷, 田村; 日本金屬學會誌, 20 (1956) 9, p. 480.
16. Shell Francaise; Metal Quenching Oils, MK, 103/73.
17. 三塚, 福田; 鐵と鋼, 63 (1977) 6, p. 1008.
18. 三塚, 福田; 鐵と鋼, 64 (1978) 1, p. 70.
19. T. Inoue, K. Haraguchi, S. Kimura; Trans. ISIJ. 18 (1978), p. 11.
20. 新日鐵, 八幡技研 福田, 三塚; 鐵と鋼 57 (1971), S 584.
21. 新日鐵, 八幡技研 福田, 三塚; 鐵と鋼 57 (1971), S 585.
22. 甲藤, 國廣; 日本機械學會論文集. 39-317 (1973), p. 269.
23. 武山; 日本機械學會誌. 77-662 (1974), p. 29.
24. 新日鐵, 八幡技研 福田, 三塚; 鐵と鋼 57 (1971), S 583.
25. 日本鐵鋼協會; 鋼材の性質と試驗, 地人書館, 東京. (1977), p. 55.
26. 多賀谷, 田村; 日本金屬學會誌, 22 (1958) 12, p. 631.
27. 多賀谷, 田村, 村上; 日本金屬學會誌, 24 (1960) 10, p. 676.
28. E. L. H. Bastian, B. S. M. E; Metal Working Lubricants, McGraw Hill Book Company, Inc, New York, (1951).
29. D. K. Bullens, The Metallurgical Staff of

- The Batelle Memorial Institute; Steell And
1st Heat Treatment, John Wiley & Sons,
Inc. London, vol. II, (1948).
30. Price B. Burgess; Metal Progress, ASM,
79(1967), p. 67.
31. William H. Naylor; Metal Progress, ASM,
79(1967), p. 70.
32. 長瀬産業(株) 化学品第一部; 鑄鍛造と熱處
理, (1980), p. 53.
33. ハーカー 熱處理工業(株), 新日豊化学(株);
鑄鍛造と熱處理(1980), p. 67.
34. モービル石油(株); 鑄鍛造と熱處理, (1980),
p. 71.
35. 藤村, 佐藤; 鐵と鋼, 50(1964) 8, p. 1188.
36. 藤村, 佐藤; 鐵と鋼, 49(1963) 12, p. 1810.
37. 藤村, 佐藤; 鐵と鋼, 49(1963) 8, p. 1102.
38. 藤村, 佐藤; 鐵と鋼, 49(1963) 7, p. 1008.
39. KS M2172熱處理油 冷却性能 試験方法
40. 拔山; 日本機械學會誌, 37(1934) 206, p. 367.
41. 三塚, 福山; 鐵と鋼 60(1974) 14, p. 2079.
42. Ven Te Chow; Open-Channel Hydraulics,
McGraw-Hill Co., London, (1959).
43. 小祝; 鑄鍛造と熱處理(1980) 59.
44. International Critical Tables of Numerical
Data, Physics, Chemistry and Technology,
McGraw-Hill Book Company, New York,
(1929).
45. Chemical Engineers Hand Book, 4th Edit-
ion, McGraw-Hill Book Company, New York,
(1963).
46. 日本機械學會; 傳熱工學資料, (1975), 改訂
第3版, p. 298.
47. W. H. MacAdams; Heat Transmission, (1933),
McGraw-Hill Company, p. 152.
48. KS C 1602 열전대
49. ASM; Metals Handbook, vol. 2 (1969), p. 15.