

|||||  
講座  
|||||

# 衝突水噴流冷却法の 體系化(1)

崔 國 光\*

## Systematization of Cooling Method Impinging Water Jet(I)

Gug Gwang Choi\*

### 記 號 說 明

### 無 次 元 數

$U_o$	: Nozzle 出口에서의 噴流速度	[m/s]
$U_i$	: 衝突速度	[m/s]
$U_\infty$	: 壁面에서의 周圍速度	[m/s]
$r$	: 衝突面の 半徑	[m]
$\mu$	: 물의 粘性係數	[kg/ms]
$\rho$	: 물의 密度	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\nu$	: 물의 動粘性係數	[m <sup>2</sup> /s]
$T_l$	: 물의 溫度	[C°]
$T_s$	: 飽和 溫度	[C°]
$T_w$	: 壁面の 溫度	[C°]
$\Delta T_{sat}$	: 過熱溫度差( $T_w - T_s$ )	[C°]
$W$	: 물의 容量	[m <sup>3</sup> ]
$\dot{q}$	: 熱流速	[W/m <sup>2</sup> ]
$t$	: 時間	[sec]
$h$	: 熱傳談率	[W/m <sup>2</sup> K]
$\lambda$	: 熱傳導率	[W/m K]
$g$	: 動力加速度	[m/s <sup>2</sup> ]
$C_p$	: 물의 比熱	[J/kgK]
$\phi$	: 角度	[deg]
$A_h$	: 傳熱面積	[m <sup>2</sup> ]

$Re_D = U_o D / \nu$ .....	Reynolds Number
$Nu_D = h D / \lambda$ .....	Nusselt Number
$Pr = C_p \mu / \lambda$ .....	Prandtl Number
$m = \phi / (2\pi - \phi)$	
$n = \bar{x} / (T_s - T_\infty) \cdot d(T_w - \bar{T}_\infty) / d\bar{x}$	
$\eta = \frac{y}{x} \sqrt{U_\infty x / \nu} \cdot U_\infty / U_i$	
$\xi = 2gH / U_o^2$	
$\phi$	: 흐름의 函數
$\zeta$	: $\eta$ 만의 函數

### 1. 緒 論

噴流은 流體力學上 가장 基本的인 流動形態의 하나이며, 따라서 工業的으로는 勿論 工學的인 면에 있어서도 많은 研究가 지금까지 進行되고 있다. 特히 噴流의 亂流特性에 대해서는 工學的으로 볼 때 아직도 未知의 問題가 많이 남아 있다고 여겨진다. 그런데 이 噴流를 板에 衝突시킬 때의 流動系도 또한 工業·工學上 重要的 研究對象이 되고 있다. 特히 이 衝突噴流는 噴出流體와 衝突板과의 사이의 輸送現象에 立脚한 應用範圍가 工學的으로 볼 때 매우 廣範圍하다는 것이 注目된다.

\* 正會員, 仁川大學 機械工學科

衝突領域에서는 높은 熱 및 物質傳達率인 얻어진다는 것이 經驗적으로 알려져 있으며 따라서 衝突噴流系의 傳熱(輸送)特性을 利用하는 例는 壓到的으로 많은 것으로 생각된다.

즉, 工業界에서 使用되고 있는 衝突噴流의 應用途를 보면 製鐵, 製紙, 유리, 纖維界는 勿論 plastic 等の 非鐵金屬의 燒鈍 등에서와 같이 物體表面의 局所加熱, 가스 터빈의 블레이드 内部冷却, 高 energy 密度를 갖는 小型 電氣部品の 冷却, 젖은 면의 乾燥, 特히 印刷直後の 紙面, 織物, Vinyl 等の Film 狀面の 乾燥, 그리고 Film 面の coating 과 塗裝 等を 代表的 用途로 들 수 있다.

그러나 모든 衝突噴流系의 構造를 統一的으로 取扱하는 데는 無理가 따른다고 생각되며 따라서 本講座에서는 鐵鋼製造 프로세스에 있어서 여러 場所의 目的에 따라서 水噴流冷却法, 特히 물을 使用하는 強制冷却은 製鐵工程에서 널리 使用되어 지고 있음에도 불구하고 그 冷却 過程에서 어떠한 現象이 일어나고 있는 지는 아직도 명확치 못한 부분도 많고 熱傳達의 定量的인 값도 不確實한 부분이 많다. 石油 派動 以來 에너지 使用의 節約을 부르짖는 이때 물의 使用 절감 또한 절실한 現實이다. 따라서 鐵鋼關係者도, 傳熱關係者도 이 方面에 重大한 관심을 기울이게 됨을 알 수 있다. 低溫(50°C 附近)부터 製鐵工程에서 가장 중요한 部分을 차지하는 溫度範圍는 鋼材表面溫度로 200 ~ 1,300°C 쯤 이지만 이 중 300 ~ 800°C 정도 범위에서는 固體面과 물사이의 傳熱現象을 가장 잘 알지 못하는 범위이다. 이 범위의 實驗值를 概觀하면 實驗에 따라서 熱傳達率에 약간의 정도 差가 있으며, 아직까지 研究의 端緒만 나온 것 뿐이라는 觀點이다.

本講座에서는 鋼材를 水冷却하는 경우에 생기는 現象을 低溫冷却法과 高溫冷却法을 中心으로 各種 水噴流冷却法을 比較 檢討하고, 工學의 見地에서 整理하여 冷却法을 體系化하고자 한다.

## 2. 衝突噴流의 熱傳達에 關한 從來의 研究

本節에서는 衝突噴流의 熱傳達에 關한 지금까지의 研究의 概要를 紹介하고 아울러 論評을 하기로 한다.

이미 前節에서 論한 바와 같이 衝突噴流의 衝突領域에서는 높은 熱 및 物質傳達率인 얻어진다는 것은 經驗적으로 알려져 있다. 그러나 衝突噴流의 熱傳達에 關한 研究로는 1962 年에 처음으로 發表된 Gardon<sup>1)</sup> 등의 一連의 研究를 들 수 있다.<sup>1)</sup> 그들은 二次元 噴流 및 軸對稱 噴流에 있어서 單獨 nozzle 의 衝突에서 群噴流로서의 衝突까지 研究를 進行하였다. 이 중에서 關心을 끄는 것은 Stagnation point 에서의 局所熱傳達率은 衝突板이 nozzle 幅(또는 直徑)의 約 8 倍 떨어진 位置에서 最大가 된다는 點이다.

그러나 이 現象에 대해서는 全然 理論的 考察을 하고 있지 않으며 다만 上流에서 創成되는「亂動」때문이라고 推論하고 있다. 仲戶川<sup>2)</sup>은 二次元, 軸對稱, 亞音速, 超音速別로 衝突噴流에 대해서 系統的 實驗을 하여 各 경우에 대한 熱傳達率의 實驗式을 提示하였다. 그는 이 중에서 Stagnation point 에서 主流亂動의 作用이 熱傳達率 增進을 可能하게 한다고 推論을 하고 있다. 熊田<sup>3)</sup> 등은 Naphline 衝突板을 使用하여 物質傳達率의 測定을 하여 局所 物質傳達率을 正確히 算出한 다음 熱傳達과의 相似性이 成立함을 表示하였다. 얻은 結果는 從前의 結果(特히 Gardon 等の 研究結果)와 良好하게 一致함을 말하고 있지만 傳熱增進 現象에 關한 새로운 意見은 不足한 것 같다. 衝突噴流에서는 노즐 衝突板의 距離가 어떤 距離이상이면 Stagnation point 에서는 이미 亂流가 생긴다는 것이 충분히 認定되고 있다. 單相流의 強制對流 亂流 熱傳達에서는 流動構造(flow pattern)가 決定的으로 傳熱現象을 決定짓게 됨은 勿論 森岡<sup>4)</sup> 등은 매끈한 圓形 nozzle 로부터 空氣中을 통하여 鉛直下向으로 噴出되는 水噴流가 低溫加熱平板에

垂直으로 衝突할 때의 平板上에서의 熱傳達에 관한 研究에서 平板上 靜壓의 半徑方向의 近似式, 液膜內境界層外線速度的 半徑方向變化 및 Stagnation point에서의 壓力 등을 表示하였으며  $Re < 3 \times 10^6$  에서 噴流는 平板의 存在로 亂動이 抑制되고 平均熱傳達率은 層流理論値와 거의 一致함을 提示하였다.

Schmidt<sup>5)</sup> 등은 凝縮熱傳達의 研究를 위하여 凝縮背面에 圓形水噴流를 衝突시켜 높은 熱傳達를 얻었다.

그러나 主目的이 凝縮의 研究에 있었기 때문에 水噴流에 대하여는 Data 提示에만 그쳤다.

Linacre<sup>6)</sup> 는 銅 block 傳熱面을 burner로 加熱하는 方法을 使用하여 Spray Jet의 熱傳達에 대해서 研究를 하였으나 實驗値와 理論値의 差가 크게 나타났다.

McMurray<sup>7)</sup> 는 二次元噴流(Plane Jet)를 通電加熱한 傳熱面에 衝突시키는 研究를 하였으나 實驗値는 層流熱傳達의 理論値보다 높은 값을 보여주고 있다. 그 原因으로서 實驗을 等熱流速의 條件에서 실시하였기 때문으로 알고 있다.

水野<sup>8)</sup> 등에 依하며 速度分布는  $r/D$ 가 1의 附近에서도 直線은 되지않고 그 結果 熱傳達率이 半徑方向  $r/D = 0.75$ 에서 最大値를 取하며  $r/D \leq 0.35$ 에서는 熱傳達率은 一定하다고 하였으며 實際의 熱傳達率의 測定에 의하면 거의 單調롭게 增加하는 傾向을 나타내고 있다.

다음은 高溫面에서의 水噴流의 衝突領域에서의 水噴流의 衝突領域에서의 沸騰現象에 관한 從來의 研究를 調査하면 다음과 같다.

佐藤一松材<sup>9)</sup>는 單一氣泡의 成長條件을 생각하고 初期氣泡를 考慮할 때의 過熱層두께가 매우 얇고 過熱層사이의 熱輸送은 傳熱만으로 보고 直線的인 溫度分布를 豫想하여 沸騰開始點의 熱流束에 대한 式을 提示하였다.

水野<sup>8)</sup> 등에 依하면 比較的 낮은 流速(3m/s 以下)의 衝突噴流에서는 流速, Sub-Cool 등의 Parameter는 核沸騰의 勾配에 影響을 주지않는

다고 하였으며 또 流速의 範圍를 크게 잡고 實驗을 한 門出<sup>10)</sup> 등도 역시 同一하게 言及하고 있다. 다만, 水野<sup>8)</sup> 등은 流速이 커지면 沸騰이 始作하여 熱負荷를 增加시킬때는 반대로 壁面이 내려 간다고 하였다.

그리고 門出<sup>10)</sup> 등은 傳熱面이 큰 銅 블록에 出口가 작은 노즐로부터 噴流를 衝突시키는 實驗에서 Sub Cool 度, 流速 등의 Parameter의 影響을 調査하고, 그 實驗結果와 次元解析에서 Burnout 熱流速에 관한 整理式을 얻었다.

小泉<sup>11)</sup> 등은 核沸騰에서 Burnout 까지를 實驗하여 核沸騰領域에서 離脫하는 明白한 Burnout 點이 存在하지 않고 輻射만에 依한 曲線에 漸近한다고 하였으며 이것은 從來의 研究와는 전혀 다른 現象을 指摘하게 된다. 즉 이것은 衝突面에서 半徑方向의 溫度分布의 存在 및 衝突周邊에서 遷移沸騰이나 膜沸騰이 일어나고 있는 現象을 고려하지 않고 熱流速을 그대로 適用시켰기 때문이라는 批判을 받고 있다.

### 3. 噴流形態

#### a) 噴流의 種類

一般的으로 噴流는 霧圍氣 및 噴流에 있어서 各各의 流體의 種類의 組合에 따라 다음과 같이 分類된다.

- |             |                   |
|-------------|-------------------|
| 1) 氣中 · 氣噴流 | } 霧圍氣 · 噴流가 同種 流體 |
| 2) 液中 · 液噴流 |                   |
| 3) 液中 · 氣噴流 | } 霧圍氣 · 噴流가 異種 流體 |
| 4) 氣中 · 液噴流 |                   |

여기서 液中 · 氣噴流란 霧圍氣가 液體이고 噴流는 氣體인 경우이며 다른것도 마찬가지로 解析한다.

本講座는 上記 4가지의 경우에서 霧圍氣는 空氣이고 噴流가 물이므로 所謂 氣中 · 水噴流가 된다. 이 氣中 · 水噴流는 噴水와 같은 水噴流를 볼 수 있으며 工業의으로도 應用價値가 넓다. 즉

鐵鋼工程에서의 強制冷却에 依한 方法으로서 좋은 例로 引 수 있으며, 그러나 그 冷却過程에서의 現象과 그 傳熱特性에 있어서는 不明確한 部分이 아직도 많다.

b) 氣中 · 水噴流의 構造

噴流와 霧圍氣가 같은 相의 境遇에 對해서는 많은 研究가 있지만<sup>4)8)10)</sup> 氣中 · 水噴流에 對해서는 그 自體의 流體力學的 特性이 생각보다 잘 알려지지 않은 것이 많다. 液體噴流는 그 nozzle 出口流速의 增加에 따라 다음과 같은 3가지의 噴流形態가 存在한다( $J_e$ 에 對해서는 後述됨).

- 1) 平滑流  $J_e \cong 0.1 \sim 10$
- 2) 波狀流  $J_e \cong 10 \sim 400$
- 3) 噴霧流  $J_e > 400$

1)의 平滑流層流噴流는 nozzle 近傍에서 外界와의 境界가 매우 圓滑하며 이 平滑部길이가 噴出速度  $U_0$ 와 對應한다. 2)의 波狀流(亂流噴流)는  $U_0$ 을 어느 程度 以上 增大시키면 液流가 中斷되며 다시  $U_0$ 를 加速시키면 再次連續部分이 길어진 狀態가 되어 噴流表面은 不規則한 凹凸形이 된다. 1)에서 2)로의 遷移點은 普通 層流에서 亂流로의 遷移點과 一致한다. 3)의 噴霧流는  $U_0$ 가 더 增加한 狀態에서 表面이 조각이 나서 絲狀, 膜狀이 되는 狀態이다. 棚澤<sup>6)</sup>은  $J_e$ 인 無次元數(Jet Number 라고 한다)에 依해서 上記의 狀態를 나타낼 수 있다고 하였다.

$$J_e = (\gamma D U_0^2) / (\sigma \gamma) (\gamma_a / \gamma)^{0.55}$$

다만,  $\gamma_a$  : 周圍空氣의 比重量

$\sigma$  : 液體 · 空氣間의 表面張力

$D$  : Nozzle 徑

$U_0$  : Nozzle 의 噴出速度

$\gamma$  : 液體의 比重量

c) 衝突水噴流의 構造

위에서 말한 氣中 · 水噴流를 平板에 衝突시킬 때 이 系는 다음과 같은 部分으로 나뉘어진다.

- 1) 自由噴流域(Free jet region)
- 2) 衝突領域(Impingement region)
- 3) 液膜領域(Wall jet region)

1)은 噴流自體의 衝突이 없는(自由落下) 경우와 같으며 衝突에 依한 影響이 없는 領域이다. 2)는 噴流中心이 平板과 交叉하는 點으로부터 速度境界層이 發達하여 境界層外線速度가 直線的으로 上昇하는 領域이며 始發點은 Stagnation Point가 되는데 傳熱的으로는 溫度境界層도 이 點이 始點이 되므로 가장 큰 熱傳達率을 갖는다. 3)은 噴流가 平板衝突한 後 平板에서 液膜狀이 되는 領域이며 거의  $U_\infty$ (境界層外線速度)는 一定하며 液膜두께는 中心에서 半徑方向으로 向하고 있어서 減少하는 傾向이 있다. 以上 위의 領域들을 그림으로 나타내면 그림 1.과 같다. (다음호 계속)

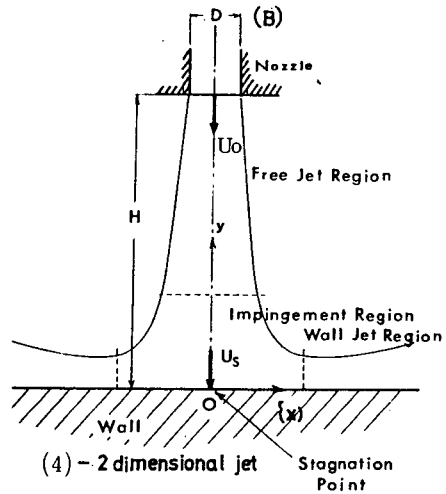


그림 1. 座標系

參 考 文 獻

1) Gardon, R. and Akfirat, J.C ; Transactions A.S.M.E, Mc, Vol.88, pp.101~108 (1966).

- 2) 仲戸川, 平田賢; “平板面上 垂直に次ぎいせる 噴流の熱傳達に関する研究” 第八回傳熱シンポジウム講演論文集 pp.121 ~ 124 (1971).
- 3) 熊田, 阿部, 石黒; 日本機械學會論文集, Vol.43, No 370, pp.2278 ~ 2287(1977).
- 4) 森岡, 平田; “氣中水噴流の熱傳達に関する研究,” 日本機械學會講演論文集, Vol. 29 , No.204 (1963).
- 5) E. Schmidt, W. Schuring, and W. Sellschopp; “Versuche Über die kondensatin Vom Wasserdampf in Film-und Tropfen - form,” Forschung Bd.1, S.53, (1930).
- 6) E.T. Linacre; “Heat Transfer by Spray Cooling,” I.M.E and A.S.M.E General Discussion on Heat Transfer, P. 48, (1951).
- 7) McMurray, D.C; Proc 3rd Int, Heat Transfer, Conf 2, P.292, (1966).
- 8) 水野, 石谷; “衝突圓形水噴流にする冷却 (單相流傳熱)から限界熱負荷まで,” 傳熱研究會資料, (1973).
- 9) 佐藤, 松村; “強制對流を伴う表面沸騰開始條件につて,” 日本機械學會論文集, Vol.29, No.204, (1963).
- 10) 門出, 甲藤; “衝突噴流徑のパーンアウト熱流速の研究,” 第12回傳熱シンポジウム講演論文集, (1975).
- 11) 小泉, 宮坂; “衝突水噴流と加熱面間の熱傳達に関する研究 第2報,” 第12回日本傳熱シンポジウム講演論文集, (1975).