

鋼材의 水冷却에 있어서의 傳熱現象 (I)

崔 國 光

〈仁川工大 副教授〉

1. 서 론

鋼材의 冷却, 특히 물을 사용한 強制冷却은 製鐵工程에서 實用되어지고 있음에도 불구하고 그 冷却過程에서 어떠한 現象이 일어나고 있는지는 아직까지 명확치 못한 부분도 많고, 熱傳達率의 定量的인 값도 不確實한 부분이 많다. 石油 shock以來, energy 使用의 節約을 부르짖는 이때 물 使用의 절감 또한 絶실히 要求되고 있다. 따라서 鐵鋼關係者도, 傳熱關係者도 이방면에 中대한 관심을 기울이게 됨은 물론 研究論文의 數도 점차로 늘어나기 시작했다.

製鐵工程에서 가장 중요한 부분을 차지하는 溫度範圍는 鋼材表面溫度의 200~1300°C 정도사이이지만 이중 300~800°C 정도 범위에서는 固體面과 물사이의 傳熱現象을 가장 잘 알지 못하는 범위이다. 이 범위의 實驗値를 概觀하면 實驗하는 사람에 따라서 熱傳達率에 약간의 정도 차이가 있으며, 아직까지 研究의 端緒만 나온 것뿐이라는 관점이다. 鋼材冷却의 展望에 대해서는 三塚¹⁾의 훌륭한 敎材가 있으며, 本資料에서는 冷却하는 경우에 생기는 現象을 중심으로 傳熱研究者의 立場에서 研究現況과 그 問題點을 논술해 보고자 한다.

2. 鋼材의 各種 冷却法

三塚¹⁾에 의하면, 製鋼工程에서는 (i) 鋼材의

熱處理, 즉 素材의 溫度와 時間의 關係를 所期의 設定値로 經過 시키기 위하여, (ii) 鋼材를 깨뜨리거나 휘지 않은 범위에서 급속히 冷却하여 作業시간을 단축하기 위하여 다음과 같은 7개의 冷却法이 使用되어지고 있다.

(1) 스테브의 冷却(浸漬冷却, spray冷却)

약 1300°C에서 爐로부터 나온 ingot는 數回の 壓延후 1150°C 전후의 스테브로 되지만 scale 발생을 防止하기 위해 이것을 急冷한다.

(2) Hot strip의 冷却(spray冷却, jet冷却 laminar冷却)

粗壓延후 一定온도까지 急冷하여 그 온도로 保持하면서 壓延일을 하는데 그후 金屬조직을 微細化하기 위하여 다시금 急冷한다.

(3) 厚板의 冷却(spray冷却, jet冷却)

厚板의 담금질 및 形狀制御를 위하여 板의 양면에 다량의 냉각수를 噴射한다.

(4) 線材의 冷却(spray冷却)

材質의 熱處理를 목적으로 하여 壓延일을 마친후 약 500~600°C까지 急冷하여 그 溫度로 保定할 필요가 있으나 急冷을 위해서는 중앙을 통하는 線材에 주위로부터 냉각수를 噴射한다. 溫度保定을 위해서는 液體金屬浴, 熔融鹽浴, 알루미늄 분말에 의한 流動層등을 利用하고 있다.

(5) 形鋼의 冷却(jet冷却, spray冷却)

살 두께가 불균일한 形鋼의 휨, 잔류응력을 피하기 위해 압연과정에서 두꺼운 부분을 급냉시키기도 하고 冷却床에서의 국부적인 強制冷却이나 防熱處置를 강구한다.

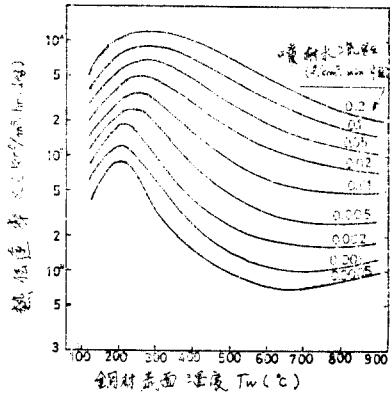


Fig. 7 鋼材表面溫度와 熱傳達率의 關係

을 나타낸 三塚¹⁾의 data로서 앞의 그림 6의 data를 그후 더욱 보충한 것이다.

그림 7 및 8은 어느 쪽도 spray의 噴射水流密度가 거의 같은 정도의 범위에서 실시되고 있고 서로 비교하여 얻은 溫度 범위에 대해서 양자를 비교한 것이 그림 9이지만 試料의 表面溫度 및 噴射水流密度가 同一條件에도 불구하고 data의 경향이 상당히 차이가 있다. 이 서로 다른 원인으로서는 생각되는 것은 ① 液滴 直徑의 差 ② 材質의 差 ③ 表面 性狀(粗度, 酸化 被膜의 存在等)의 差 ④ 實驗 誤差等이 들어간다.

液滴徑의 差에 의한 相異에 대해서는 Hoogendorn⁷⁾에 의하면 확실히 존재하며 液滴 直徑이 작은 만큼 熱傳達率이 크게 되지만 그다지 큰 差는 없다. 液滴 지름은 거의 結果에 영향을 미치지

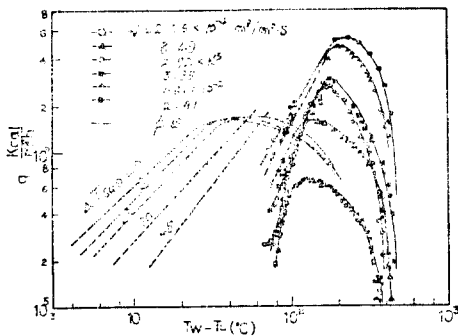


Fig. 8 鋼의 Spray 冷却傳熱曲線

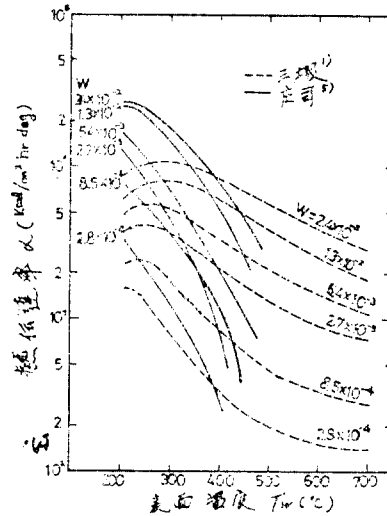


Fig. 9 Spray 冷却實驗結果의 比較

지 않는다는 田中⁸⁾ 등의 data도 있다. 다음은 測量誤差이지만 여기서 논한 바와 같은 非定常 實驗은 試料 內部の 여러 點에서 計測한 溫度의 時間的 變化 即 冷却曲線으로부터 試料[表面溫度]의 시각적 變化를 산출하여 그 係數로부터 熱傳達率을 산출하는 것이 되기 때문에 온도 計測點의 치수 精度, 熱傳帶의 熱容量, 열전대의 取付의 不備 試料의 熱的 物理值의 不正確 등이 誤差의 요인이 되며, 아무리해도 測定精度가 나쁘게 되는 것은 부득이하다. 특히 온도가 높은 동시에 급속히 변화하는 영역에서의 精度는 좋지 않으며, 鋼材冷却과 같은 高溫영역의 실험치는 실험자에 따라서 현저하게 다르다. 그러나 그림 6의 경우에는 後述하는 바처럼 傳熱面과 液體의 직접 접촉실험을 지배하는 試料의 材質 및 表面性狀의 差가 相異의 要因이다. 三塚¹⁾의 실험은 탄소강을 전기로에서 초기온도 약 900°C로 가열하여 가열선과 냉각 직전에서 剝離라는 녹이나 scale을 기계적으로 제거하는 조작을 하였다.

한편 壓司⁵⁾의 실험은 鈍銅의 표면은 사포로 연마하여 burner로 가열하고 초기온도도 약 500

傳達率을 기대할 수 있는 점과 空氣만의 熱傳達率 $\alpha=10\text{Kcal/m}^2\text{hrdeg}$ 으로부터 $10^6\text{Kcal/m}^2\text{hrdeg}$ 에 이르는 넓은 범위에 걸쳐서 水量과 空氣量의 比를 변화함에 따라 連續인 동시에 自由자재로 熱傳達率을 제어할 수 있는 점이 가장 큰 장점이다.

4. 高温 固體面의 水冷却에서의 熱傳達率

1. 非正常實驗結果

앞에서 논술한 鋼材의 각종 水冷却法의 熱傳達率 實驗值가 어떠한 값으로 되는가가 장치 설

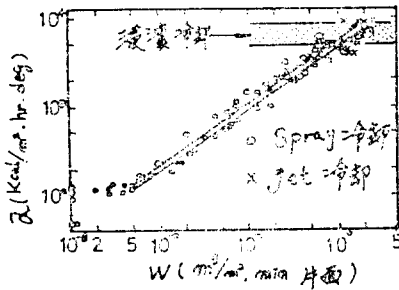


Fig. 5 各種冷却法의 比較

계상 point이다. 즉 1000°C 전후의 고온면 傳熱實驗은 특히 기술적으로 어렵기 때문에 實驗하는 사람에 따라서 데이터가 상당한 차이가 있지만 각 冷却法이 어느 정도의 熱傳達率을 가지는가 그 概略을 알기 위해 三塚⁴⁾가 220mm의 低炭素鋼板에 대해서 實驗한 實驗值를 그림 5에 나타낸다. 그림 5의 횡축은 spray 및 Jet 冷却等の 傳熱面의 단위면적당의 물의 체적유량 $w(\text{m}^3/\text{m}^2\text{min})$ 이며, 이것을 噴射水流密度라고 명명하고 우선 spray 冷却 및 jet 冷却의 熱傳達率은 w 에 크게 영향을 끼치며, 그림중의 실선으로 나타낸 바와 같이 $\alpha \propto w^{3/2}$ 정도의 관계가 있다. 그림중의 jet 冷却은 난류 jet라 하며, 浸漬冷却은 jet 冷却과 같은 정도의 熱傳達率이 얻어지고 있다.

이들의 實驗은 모두 전기로에서 試料를 초기 온도 $T_i=910\sim 930^\circ\text{C}$ 로 가열하여 이것을 冷却하는 方法으로 非正常法으로 행해지고 있다.

여기서 非正常實驗法에 對해서 조금 언급해

두기로 한다.

그림 6에 나타낸 바와 같이 최소한 試料內의 1 및 2의 위치의 두점에 열전대를 삽입하여 그 時間的 변화를 기록한다. 임의의 시각 $t=ti$ 에 있어서 表面온도 T_w 및 열유속 q 를 1차원 비정상열전도 방정식의 差分表示로부터 다음식에 의하여 구한다.⁵⁾

$$T_w = T_1^N - \left(\frac{x_1}{x_2}\right) \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_s}\right) \Delta T^N + \frac{(x_1+x_2)}{4} \left(\frac{1}{\alpha_1}\right) \left(\frac{\lambda_1}{\alpha_a}\right) \frac{T_1^{N+1} - T_1^{N-1}}{\Delta t} \quad (3)$$

$$q = \lambda_w \left[\left(\frac{x_1}{x_2}\right) \frac{1}{x_1+x_2} \Delta T^N - \left(\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_1+x_1}\right) (T_1^N - T_w) \right] \quad (4)$$

단 λ 은 銅의 열전달율, α 는 銅의 온도전도율 Δt 는 미소한 시간, 그외는 그림 6에 나타낸다. 또 첨자는 그림 6의 각 위치에서의 값들이며, 온도 T 上的 $N, N+1, N-1$ 은 시간 $t=t_N, t_N+\Delta t, t_N-\Delta t$ 에서의 T 의 값으로 나타낸다. 또 λ 및 a 에

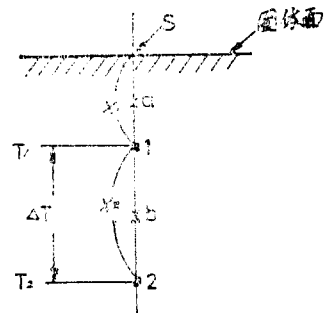


Fig. 6 非正常實驗의 整理

대해서는 溫度依存性을 고려해 넣은 식으로 나타내어 계산기로 읽는다. 열전달율 α 는 온도를 T_L 라 하면 $\alpha=q/T_w - T_L$ 로 定義되지만 鋼材의 냉각과 같은 高温固體面에 찬물이 접촉하는 傳熱의 경우에는 後述하는 바와 같이 열전달율 a 가 표면온도의 큰 함수 관계가 있다. 그림 5의 종축은 그때문에 α 라 표시하고 있지만 이것을 두께 28mm의 試料 중앙의 온도가 초기온도 930°C 에서 500°C 까지 降下하는 사이에 α 의 평균치라는 意味를 가지고 있다.

그림 7은 表面溫度에 대한 열전달율의 의존성

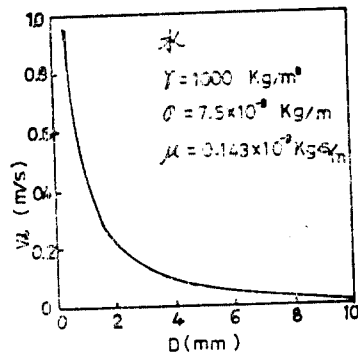


Fig. 2. 平滑流의 遷移速度

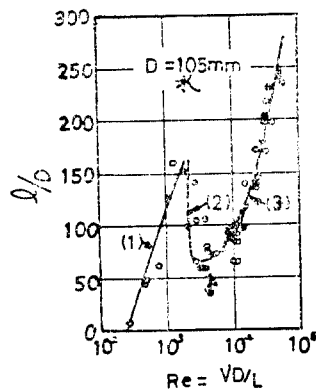


Fig. 3. Re에 의한 연속길이의 변화

數의 函數(그림 2에서 얻어지는 滴下로부터 平滑流), γ 는 물의 비중량, σ 는 표면장력, g 는 중력 가속도 μ 는 점성계수이다.

平滑流의 流速를 빠르게 하면 液流의 연속길이 l 는 짧아지고 어느 噴出速度 v_0 에서는 極小值를 취한다. 더욱 速度가 증가하면 l 는 다시 길어지지만 흐름은 이미 불투명한 波狀流, 즉 亂流 jet로 되고 있다. 물의 경우에 대해 噴出速度를 根本으로 한 레이놀즈 $Re = \frac{vD_1}{\nu}$ 과 연속길이 $\frac{l}{D_1}$ 과의 관계를 그림 3에 나타낸다. 그림 중 (1)은 平滑流 (2)는 불안정한 縱振動을 하는 영역, (3)이 波狀流 영역이고 원관내의 흐름이 층류에서 난류로 遷移하는 조건과 좋은 對應을 나타내고 있다.

다음에 波狀流의 速度를 增加하면 噴霧流, 즉

spray로 되지만 波狀流에서 噴霧流로의 변화에서는 명백한 遷移點을 알 수 없고 완만하게 변화하고 있다. 이들 噴流의 連續길이 l 과 유동상황과의 관계를 定性的으로 표시한 것이 그림 4이다. 그림중 (1)이 滴下 (2)가 平滑流(層流) (3)이 遷移流 (4)가 波狀流(亂流) (5) (6)이 噴霧流이지만 柵澤²⁾은 더욱 광범위한 유체에 대해서 實驗結果를 종합하여 下記의 jet 數를 定義하고 (γ_a 는 空氣의 비중량) 있다.

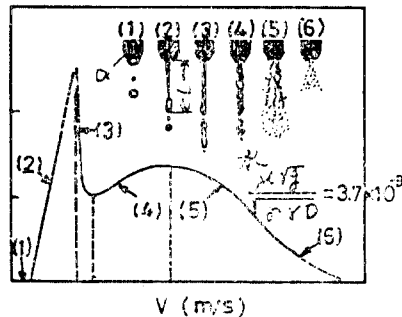


Fig. 4. 速度에 의한 液柱의 길이 변화

$$J_s = \frac{\gamma D_1 v^2}{\sigma_g} \left(\frac{\gamma_a}{\gamma} \right)^{0.65} \quad (2)$$

$J_s < 0.1$ 이면 滴下, $J_s = 0.1 \sim 10$ 이 [平滑流(層流)로 縱振動에서 미립화하며 $J_s = 10 \sim 400$ 에서 波狀流亂流로 橫振動에 의해 微粒化하고 $J_s > 400$ 에서 噴霧流로 되는 것을 나타내고 있다. 冷却장치를 설계할 때는 層流連續液噴流든지 난류連續液噴流든지 목적에 따라서 우선 冷却방식을 결정하고 다음에 上述한 결과를 참조하여 각각의 유동상태를 만족할 만한 nozzle 直徑, 噴出速度, nozzle 出口에서 鋼材까지 거리를 결정하는 것이 좋다. 또 空氣를 사용한 噴出流의 문제가 있지만 cost를 생각지 않는다면, 高速空氣流에서 液體를 微粒化하는 방식은 각종 微粒化法중에서 가장 우수한 방법이며 얻어지는 噴霧의 粒徑도 空氣流速을 300m/s정도로 하면 平均粒徑은 10μ 前後의 극히 세밀한 微粒으로 된다.

空氣速度 300m/s라는 값은 게이지 壓力 0.8kg/cm^2 정도의 空氣源이 있다면 비교적 간단히 實現할 수 있다. 이 방식은 國岡의 데이터³⁾에서 나타낸 바와 같이 적은 水量으로 높은 熱

(6) 連續鑄造의 冷却(spray冷却, jet冷却, mist冷却)

溶鋼의 응고를 촉진하기 위하여 鑄片이 조개지지 않은 범위에서 急冷한다.

(7) 低溫壓延(mist冷却, fog冷却)

結晶粒의 미세화를 도모하기 위해 저온압연이 행하여지지만, 온도의 미세 control을 필요로 한다.

以上과 같은 각종 냉각법에 붙여진 명칭은, 그 명칭을 사용하고 있는 사람들에 의해서 定義가 가지각색이어서 상당히 애매한면도 있지만 여기서는 일단 다음과 같이 구별하는 것으로 한다.

●浸漬冷却

大量의 冷却水속으로 浸漬하는 것으로 가장 단순한 방법이다.

●Laminar冷却

액체를 加壓하여 nozzle로부터 분출시켜 액체 噴流를 만들 때 분류의 出口流速이 비교적 낮은 平滑한 層流噴流를 형성한다. 이 噴流는 어떤 거리를 낙하하면 축 대칭인 진동을 발생시켜 破斷에 이르고 流滴流로 된다. 이 laminar냉각은 流量이 큰 다음 항의 亂流噴流에 비하여 噴流衝突點 근방의 熱傳達率이 작다고 생각되지만, 사실은 반대로 30~40%의 熱傳達率이 크며 널리 實用되고 있다.

●Jet冷却

噴流出口速度가 증가하면 亂流噴流로 되고 噴流表面에는 용기형태의 흐트러짐이 생겨 파단에 이른다. jet冷却으로는 이 파단에 이르기 이전의 연속적인 噴流가 固體面에 충돌하는 경우로서 penetration 성능은 크다.

●Spqay冷却

물을 加壓하여 nozzle로부터 噴出할 때, 上述한 連續噴流이상의 流速으로 되며 液流는 破斷하고, 液滴群으로 되어 固體面에 衝突하여 冷却한다.

●mist冷却

물을 噴霧중에 加壓한 空氣를 使用하여 高速 空氣流와 함께 nozzle로부터 분출한다.

3. 水噴流의 特性

上述한 바와 같이 製鋼工程에서는 물의 層流 및 亂流 jet 또는 spray를 이용한 것이 많기 때문에 원형 nozzle로부터 液體를 가압하여 분출할 때의 유동 상태 변화에 대해서 언급하겠다.

棚澤²⁾에 의하면 圓筒狀의 管으로부터 噴出하는 水流의 速度를 증가할 때 그 유동상태는 그림 1에 나타난 바와 같은 변화를 한다.

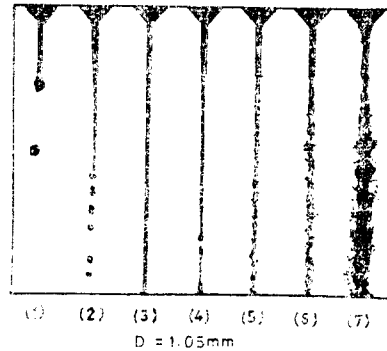


Fig. 1. 噴出液流의 模樣

그림 1 (1)는 管端에서의 滴下 (2)는 滴下로부터 平滑流로의 遷移 (3)은 투명한 平滑流 (4)는 平滑流가 縱方向, 즉 흐름의 방향으로 불안정하게 되어 縱振動을 일으키고, 表面에 凸凹이 發生하여 불투명하게 되기 시작할 즈음(平滑流에서 波狀流로 的 遷移) (5)는 表面이 凹凸로 變이 생긴다.

(6)은 나선상의 山의 일부가 주위의 空氣와의 영향에 흡수되어 糸狀으로 발전시키기 시작할 때 (7)은 더욱 高速으로 되어 波의 山부분이 불어나 조각조각의 微粒으로 되며 噴霧流를 형성하기 시작할 때이다. 平滑流 즉 laminar, jet로 噴出端으로부터 분열하는 점까지의 길이를 液流의 連續길이 (jet length) l 이라고 부른다면 이 길이는 棚澤²⁾의 다음 實驗式으로 얻어진다.

$$\frac{l}{D} = 22.4 \left\{ (v - v_R) \sqrt{\frac{rD_1}{\sigma g}} \right\}^{0.8} \times \left(1 + \frac{1}{250} \frac{1}{\mu} \sqrt{\frac{\sigma D_1}{g}} \right)$$

여기서 D_1 은 噴孔徑, v 는 噴出速度, v_R 는 Weber

°C가 되면 가열을 멈추고 噴霧가 접촉하여 소정의 실험을 개시하는 방법이다. 따라서 scale表面粗度등의 點으로부터 보던 前者의 편이 물과 접촉이 많다고 생각되며 재질의 熱의 特性 즉, 온도 전도율 및 열전도율의 차가 실험결과의 큰 오차로 된다고 생각된다.

2. 定常實驗結果

定常實驗은 이상의 非定常實驗에 대하여 적은 數이면서 정상적인 가열 조건하에서 행하여진 실험이다.

Stainless steel이나 白金등의 얇은 판에 큰 電流를 通하여 저항 가열하는 방법과 試料를 電子 beam등으로 背面으로부터 가열하는 방법등으로 높은 熱流束을 실험한 것이다. 定常實驗은 非定常實驗에 비하여 熱流束의 算定이나, 表面溫度의 測定의 誤差가 적고 精度가 좋은 실험을 기대할 수 있지만 大容量電源을 필요로 하는 등의 제약이 있다.

그림 10은 國岡⁹⁾등이 공기를 이용한 고속 mist

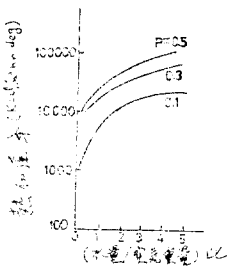


Fig. 10 Mist冷却의 定常實驗結果

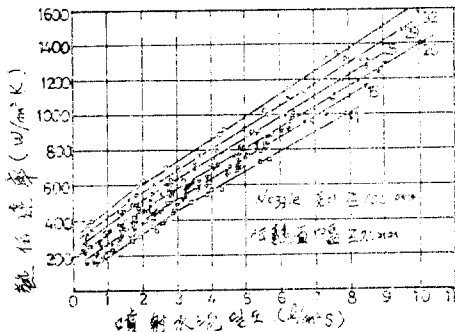


Fig. 11 Spray冷却의 定常實驗結果

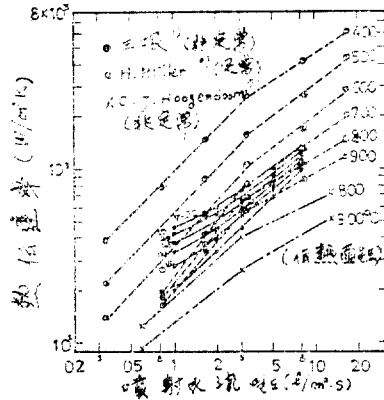


Fig. 12 Spray冷却의 實驗結果比較

냉각의 실험결과인데 0.1mm 두께의 白金얇은 판을 通電加熱함에 따라 $q_w = 5 \times 10^6$ [kcal/m²hr] 정도의 높은 熱流束이 얻어지고 있다. 단 유감스러운 것은 전열면온도가 50°C정도 낮은 온도이기 때문에 비등이 일어나지 않은 점이다. 그림 11은 Müller⁹⁾등이 같은 식으로 鋼에 通電加熱해서 실험했기 때문에 熱流束, 전열면온도(80°C~110°C)와 함께 상당히 높은 범위를 cover하고 있으며 실용적으로는 현재까지 얻어진 유일한 data라 하겠다. 그림 12는 大中¹⁰⁾가 上記한 三塚¹⁾, Müller⁹⁾ Hoogendorn⁷⁾ 등의 데이터를 比較한 것으로 그림중에서 大中 자신이 전자 beam식 가열에서 얻은 실험치를 plot하였다. 그림 12에서 알 수 있는 바와 같이 같은 정도의 噴射水流密度, 전열면온도 영역의 실험에서 같은 鋼에서도 stainless鋼과 탄소강의 차가 상당하여 비정상실험과 정상실험의 차도 큰 것 같다. 이상 鋼材의 水冷却에 관하여 열전달율의 실험치를 概觀하였지만 고온 영역에서의 신뢰할 수 있는 data가 작은 것을 알 수 있으며, 또한 噴射水流密度와 표면온도가 지배적인 parameter인 것은 上述하여 아는 바이지만, 液滴徑, 충돌속도, 材質表面性狀등을 확고하게 파악한 실험치의 集積이 요망되는 형편이다.

(488 페이지에 계속)