

# 鋼材의 水冷却에 있어서 傳熱現象(II)

崔 國 光

〈仁川工大 教授〉

## 5. 高温固體面과 液體의 接觸傳熱現象

前節에서 고온의 鋼材를 水冷却할 때의 熱傳達率이 定量的으로 아직 불확실하다는 것을 논술했는데, 실은 高温固體面에 液體가 접촉할 때의 현상자체에 未知 부분이 많기 때문이다. 高温固體와 液體사이의 접촉 현상에 대해서는 金屬工學의 분야에서는 金屬의 quenching이나 연속주조등에 관련하여, 또 機械工學이나 原子力 항공 등의 분야에서는 液體燃料의 燃燒 또는 原子爐燃料棒의 冷却등에 관련하여 예로부터 많은 연구가 실시되었지만 高温固體面에 液體가 충돌할 때에 固體와 液體의 접촉이 일어나는가 아닌가, 증기막으로 차단되어 液體가 固體面에 접촉하지 않기 때문이 아닐까, 등의 근본적인 것을 알지 못하고 있다. 上記 각분야에서 高温固體面과 液體와의 접촉문제에 관련하는 物理現象을 표시하는 方法이 조금씩 다르다.

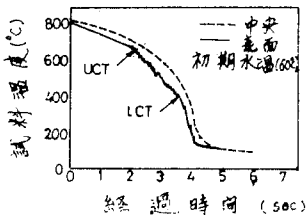


Fig. 13 銀의 圓柱를 水道水에 浸漬하였을 때 冷却曲線

우선 金屬工學의 분야에서는 「냉각곡선」을 많이 사용한다. Fig. 13은 三塚<sup>1)</sup>등의 銀棒을 물에 浸漬했을 때의 試料온도와 시간과의 관계곡

선으로서 전형적인 냉각곡선인데 三塚등은 上部特性온도 (UCT)와 下部特性온도 (LCT)를 정의하고 이 사이에 試料表面온도가 현저하게 불안정하여 특징적인 변동을 나타내 보이고 있다.

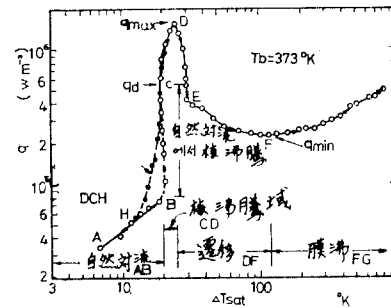


Fig. 14 水의 沸騰曲線

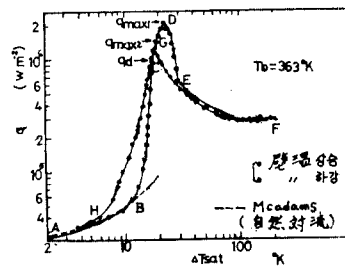


Fig. 15 水의 沸騰曲線

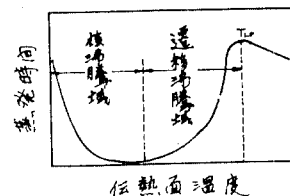


Fig. 16 高温面上的의 液滴의 蒸發曲線 model

다음에 機械工學分野에서는 「沸騰曲線」과 「蒸發曲線」이 많이 사용된다.

Fig. 14, 15는 櫻井<sup>12)</sup>가 水中에 수평으로 支持한 白金圓柱의 電氣加熱에서 入力를 computer 制御하여 온도가 熱流束을 미세하게 조정하는 것으로 보다 實現에 성공한 최신 pool 沸騰曲線이다.

Fig. 15에 나타낸 바와 같이 壁溫을 上昇시킬 때와 下降시킬 때 명백한 hysteresis를 발생하지만 兩者에서 極小熱流束(Fig. 14중의  $q_{min}$ )은 그다지 변하지 않는데 極大熱流束(Fig. 15중의  $q_{max1}$ 과  $q_{max2}$ )에서는 差異가 있으며 또 그때의 壁溫에도 差異가 있는(Fig.에서 횡축의  $\Delta T_{sat} = T_w - T_{sat}$ (飽和溫度)것을 알 수 있다.

또 高溫의 난로 덮개위를 液滴이 구르는 현상은 우리가 잘 경험하는 정도이지만 이 현상은 최초로 解析한 물리학자 이름을 붙여 「라이덴프룻트」 현상이라고 불리지고 있다.

이와같이 高溫의 固體面上에 液滴을 놓았을 때의 壁면온도의 의하여 液滴이 증발하여 소멸할 때까지의 수명과의 사이에는 예를 들면 Fig. 16의 model 그림에 나타낸 바와 같은 관계가 있으며 보통 液滴의 蒸發曲線이라 불리지고 있다.

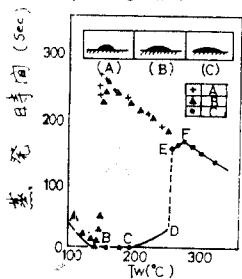


Fig. 17 黃銅面上의 水滴壽命

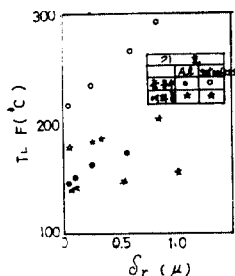


Fig. 18 表面粗度와  $T_{LF}$

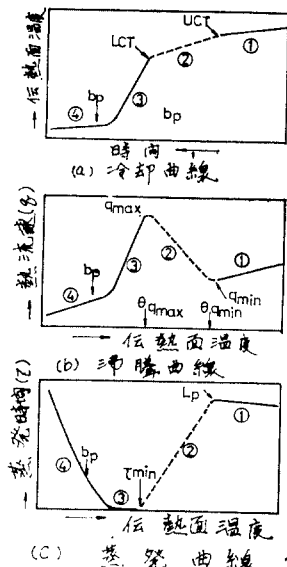


Fig. 19 여러曲線의 比較

Fig. 17은 西尾<sup>13)</sup> 등의 蒸溜水滴을 水平傳達面에 놓은 경우의 실험 결과로 그림중 (A)는 실험마다 알코올로 세척한 전열면, (B)는 실험마다 에메리 2,000번으로 다듬질한 전열면, (C)는 水滴에 의한 核沸騰을 거친 전열면인데 각각 液滴의 접촉각이 그림중에 나타난 바와 같이 다르다.

그림에서  $\overline{AB}$ 가 核沸騰領域,  $\overline{BF}$ 가 遷移領域, F 점이 수명의 극대점으로 라이덴프룻트 점이라 불리어지고, 이때의 壁面온도를  $T_{LF}$ 로 표시하며 Fig.17에서도 명백한 것처럼 이  $T_{LF}$ 는 表面狀態에 따라 크게 변하는 것을 알 수 있다. Fig.18도 같은 실험으로 에메리 60~2,000번으로 傳熱面을 연마하여 표면粗度를  $\delta_r$ 로 했을 때이며  $T_{LF}$ 는 재질에 따라서도 큰 差異를 보여 주고 있다.

以上の 固體面과 液體와의 사이의 거동을 나타내는 3종류의 표시법, 즉 冷却曲線과 沸騰曲線, 蒸發曲線 사이의 상호관계에 대해서는 三塚<sup>11),11)</sup>이 자세한 설명을 하고 있다. Fig. 19가 그 說明圖인데 定性的 또는 現象的으로는 이 說明으로 충분하지만 각 특성점 간의 대응에 대해서는 상술한 바와 같이 특성점 자신이 조건에 따라 hysteresis와 폭넓은 변화를 보이는 현상에서는 “점”으로 정해지지 않는 상황도 있기 때문에 定量的으로  $UCT-T_{w at q_{min}}-T_{LF}$ ,  $LCT-T_{w at q_{min}}$  등의 대응을 논의하는 것은 아직까지 無理가 될 것이다. 櫻井<sup>12)</sup> 등의 관찰에 의하면, 遷移沸騰領域은 白金圓柱의 방향으로 核沸騰과 膜沸騰이 공존하는 상태로 實現되어, 壁面온도가 일정하게 유지되고 있는 경우에서도 축 방향으로 온도분포가 존재하고 遷移沸騰領域曲線은 그 시간적 평균치로서 plot시킨 것이다. 核沸騰과 膜沸騰의 공존상태는 Fig. 14에서 膜沸騰域 FG에서도 관측되었으며 極小熱流束法 F는 결국 원주축 방향의 길이중 核沸騰部分과 膜沸騰部分의 점유하는 비율에 따라서 결정된다. 같은 모양의 것이 高溫高體液 液中에 浸漬하는 경우에도 일어난다고 생각된다. 固體面이 1,000°C 전후의 高溫일 때 固體面上을 완전한 蒸氣膜이 덮었다고 하여도 그 蒸氣膜과 液體와의 界面은 상당히 불안정하게 물결치고 어떤 순간에는 液體가 固體面に 접촉하는 것도 생각해 보자. 蒸氣膜

□ 資料

이 얇게 되고 또 固體面이 거칠면 돌출부가 蒸氣膜을 뚫고 나와 液體속으로 머리를 내 놓으면 先端은 급격히 冷却되어 온도는 降下하고 점점 적시기가 쉬운 상태로 된다. 안정된 膜沸騰下에서도 이와같은 부분적인 동시에 순간적인 固體—液體 사이의 접촉이 일어나는 것은 충분히 생각되지만 이 부분의 면적이 상당한 부분을 점유하도록 되기까지는 平均熱傳達量에 기하는 量이 작아 무시할 정도이며 平均的으로 膜沸騰으로서 관측되어지고 있다. 더우기 高溫高體面上的의 液滴 거동을 관찰한 西尾<sup>13)</sup> 등의 報告에 따르면 실험한 범위의 직경 5mm 정도인 비교적 큰 液滴은 Fig. 20의 (IV)의 領域, 즉  $T_w > T_{Lr}$ 의 領域에서는 液滴은 Fig. 21과 같은 움직임을 보여 준다.

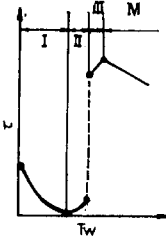


Fig. 20 蒸發曲線の 4領域

다음에 浸漬冷却의 실험결과를 보자.

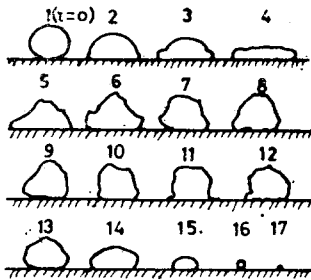


Fig. 21 第(IV)領域에 있어서 液滴의 움직임

Fig. 22는 Bradfield<sup>14)</sup>가 Co을 입힌 銅의 半圓柱를 1,000°F로 加熱하여 물속에 浸液한 실험으로, 液과 試料 사이에 직류 10V 정도의 전압을 걸고 固體 접촉면적의 비율을 흐르는 電流量으로부터 산출한 것이다. 浸漬 직후부터 어떤 시간까지는 명백하게 固液의 접촉을 알 수 없지만, 길보기에 안정한 膜沸騰상태의 도중에서 급격히 접촉이 일어나고 있다. 그간 시료의 표면 온도는 초기 온도로부터 “遷移”에 도달할 때까지 시간과 함께 거의 직선적으로 下降한다고 논술하고 있다. Bradfield는 표면 거칠기의 최대치와 膜沸騰의 蒸氣膜 두께와의 비와 固液 접촉

이 일어난 부분의 熱傳達率의 함수로서 固液 접촉부를 포함하는 면적이 결정된다고 생각하고 있지만, 이 사고 방식은 앞에서 기술한 거친 先端부분이 蒸氣膜을 뚫고 나와 液體 속으로 나오며 극소적으로 냉각되어 固液접촉이 일어나기 쉽게 된다고 하는 fin과 같은 사고방식과 공통된다.

이상 몇개의 實驗例에 의해 高溫固體面的의 水冷却 전열현상은 固體와 液體사이에 형성된 蒸氣膜을 깨뜨리며 固液의 직접접촉이 일어나는 지어면지가 근본 문제이며 그 직접접촉 부분의 전열이 차지하는 비율의 대소에 따라 極大熱流束을 넘은 遷移沸騰 및 膜沸騰部分의 熱傳達率이 결정되어짐을 보였다. 이와같이 생각해 보며 高溫面과 液體와의 전열현상을 표시하는 3개의 特性曲線, 즉 冷却曲線, 蒸發曲線도 液體가 결정되면 一義的으로 결정되는 性格인 것은 아니며, 極大熱流束, 極小熱流束, 遷移沸騰熱傳達率, 라이덴프리트온도, UCT, LCT도 이들 모두를 포함하여 固體面이 液體에 의해서 적셔져 직접 접촉전열이 행해지는가 아닌가, 즉 면의 性狀, 면과 液의 편성 液體가 지닌 慣性力 또는 貫通力, 즉 運動量등에 따라서 변화하여 얻는 것이 가능하다.

Fig. 23은 勝又<sup>15)</sup>등이 研究한 실험으로 Stainless관(외경 1.5mmφ, 내경 1.16mmφ)내에 물을 흐르게 하고 管을 通電加熱한다. 원관내 강제대류난류熱流速은 관내 平均流速 U의 0.8승에 비례한다. 다른면에서 원관내 강제대류비등의 極小熱流速은 U의 0.5~0.6승에 비례하므로 통상 流速범위(流速 10m/s 미만)에서는 熱流速을 증가시킨 경우 강제대류역→핵비등역→극대열유

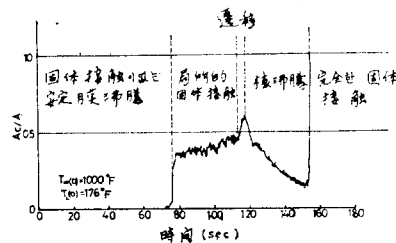


Fig. 22 浸漬冷却에 있어서 固液接觸面積

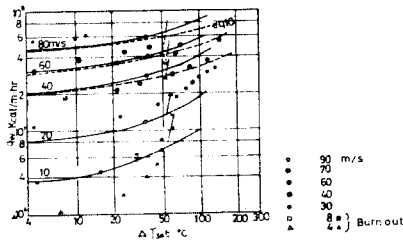


Fig. 23 圓管內超高速水流的 熱傳達

속→막비등역과 전열기구가 변화함에 대하여 粒速을 증가시켜 어딘가에서 강제대류난류전열기구가 비등전열기구를 추월하는 상태가 出現하게 될 것이다. 실험은 평균流速 96m/s까지의 超高速流로 행해지고 있지만 확실히 流速 40m/s를 넘으면 핵비등곡선도, 極大熱流速도, 소멸하여 버리고 어디까지라도 강제대류전열기구가 계속 되는 것과 같은 곡선으로 되어 왔다. 이 실험에서는 유감스럽게도  $\Delta T_{sat}$ 가 160°C 부근까지의 비교적 低溫域의 실험으로 高溫域의 상태가 어떻게 되는지가 흥미있는 부분이지만 이와같이 Subcool이 강하고 더구나 강제 流動이 강하면, 만일 核沸騰기포가 발생했다 해도 곧 소멸하여 버리고 전면에는 보통 bulk의 低溫液體가 접촉하기 때문에 특히 높은 熱流速을 얻을 것이다. 이와같이 高溫固體와 液體사이에서 존재하는 蒸氣膜을 파손하고 bulk의 液體가 전열면에 도달하기 위해서는 液體에 상당한 運動量이 요구되지만 그 의미에서는 浸漬冷却, 沸騰 및 液滴蒸發, 3種의 特性實驗중에서 液滴의 증발실험이 가장 運動量이 적다. 앞의 Fig. 5의 결과를 보면 보통 정도의 高速 jet와 浸漬冷却은 같은 정도의 액체 판통력을 갖고 있다고 볼 수 있다. 따라서 1,000°C 전후의 高溫固體면에 액체접촉을 일으키기 위해서는 상당히 高速의 jet로 더구나 噴射水流밀도가 높지 않으면 안된다고 예상된다.

그와 같은 高溫領域에서 超高速水噴流, 더구나 정상실험이 실행되면 매우 흥미있는 data가 제공되어 질 것이다. 만일 그와 같은 領域까지 실험이 행하여 진다면, 예를 들어 沸騰曲線에서 그 상황을 예상하면 아마 Fig. 24의 모형도와 같은 曲線群이 얻어질 수는 없을가?

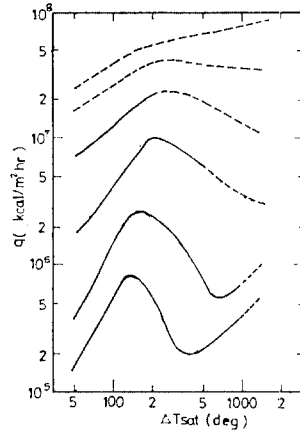


Fig. 24 鋼材의 水 jet冷却의 想像 model.

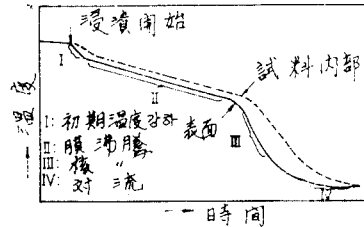


Fig. 25 冷却曲線의 model.

이 그림은 Fig. 7과 Fig. 23의 결과를 참고로 하여 시도적으로 작성하여 본 鋼材의 高速水 jet 冷却실험 결과의 예측도로서 그림중 파선으로 나타낸 領域은 아직까지 data가 없는 領域이다. 여기서 한번 더 注意를 환기해 두고 싶은 것이 있다. 그것은 앞의 Fig. 13에서는 그다지 명확히 되어 있지 않았으나 일반적으로 高溫物體를 冷却液속으로 浸漬했을 때의 冷却曲線으로서 浸漬직후에 발생하는 급격한 溫度降下 문제이다. 三塚<sup>11)</sup>에 의하면 전형적인 冷却曲線의 모형도는 Fig. 25와 같은 것인데 이 Fig.중 I 영역의 것이다. 이것은 試料표면에 완전한 蒸氣膜이 형성되어 끝날 때까지의 短時間, 특히 高溫領域이면서 固體의 접촉이 일어나고 있는 것을 시사하는 것은 아닐까 한다. 이 領域은 蒸發曲線 Fig. 20의 領域(II)에 대응하는 現象으로 固體面은 한번 液體로서 적신후에 蒸氣膜이 발생하기 때문이 아닐까 한다. 液의 過冷度가 커지면 커진만큼 발생한 蒸氣는 급속히 bulk의 液體로 응축해

## □ 資料

버리며 전열면이 완성된 蒸氣膜으로 덮일 때까지는 시간이 걸릴 것이다. 鋼材冷却과 같이 非定常인 과정에서는 鋼材의 표면만이 급속히 冷却되어 표면온도가 급속히 降下해서 固液접촉이 일어나기 쉬운 상태로 되어 있는 것도 충분히 생각할 수 있다.

표면이 거칠면 거친만큼 固液 직접접촉의 상태로 급속히 돌입하는 것도 생각할 수 있다. 반대로 안정된 蒸氣膜이 發生되기 이전에 급속히 표면온도만 내려가 버릴 수 있다면 沸騰過程을 經過하지 않고 固液 직접접촉이 전열면을 지배하는 상태 그대로(물론 국부적인 비등이 일어나도 좋다) 冷却하는 방법이 있으며 赤熱한 鋼材를 안정된 層流로 冷却할 때 충돌점 근방만이 급격히 黑變하여 週邊部가 赤熱한 그 상태로 膜沸騰하고 있는 상태라는 것은 우리가 경험하는 것이다.

이와 같이 固體 직접 접촉이 일어나고 있는 상태의 水噴流의 熱傳達率 계산이 필요하게 되며 沸騰이 없는 低溫領域에서 水噴流의 層流域(平滑流), 亂流域(波狀流), 液滴引領域(噴霧流)에 이르기까지 광범위한 유동상태를 망라하여 실험을 행한 森岡<sup>16)</sup> 등의 실험이 참고로 된다. 이들의 水噴流에서 停滯點에 대한 熱傳達率은 Fig. 26과 같이 되며 理試式과 잘 일치하여 다음 식으로 나타낸다.

$$Nu_D = 0.763 P_r^{0.4} \{ (1 + \xi)^{1/2} Re_D \}^{0.5}, \quad (H/D < 180) \quad (5)$$

단,

$$Nu_D = \frac{\alpha D}{\lambda}, \quad Re_D = \frac{vD}{w}, \quad \xi = \frac{28H}{v^2}$$

$H$ 는 nozzle과 전열면 사이의 거리,  $D$ 는 nozzle직경,  $\lambda, v, P_r$ 는 각각 물의 열전도율, 동점성계수 및 Prandtl수  $v$ 는 nozzle의 출구속도,  $\alpha$ 는 停滯點의 熱傳達率이다.

이와같이 沸騰이 없는 단순한 對流라면 定量的으로도 좋은 것을 알 수 있다. 水噴流의 停滯點 근방의 熱傳達率의 절대치는  $\alpha = 5 \times 10^4$  (kcal/m<sup>2</sup>hr deg) 정도의 높은 값을 나타내며 더구나 Fig. 26과 같이 亂流噴流에서도, 噴霧流에서도 層流의 理理解가 넓은 Reynolds수 범위에 적용

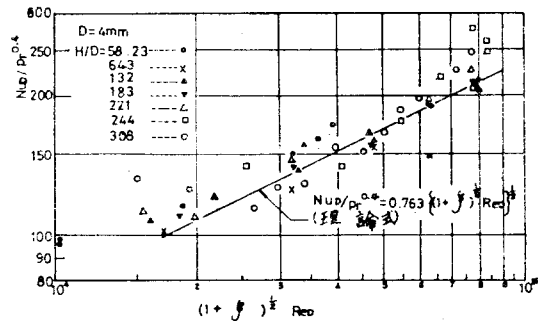


Fig. 26. 水噴流의 Stagnation point의 熱傳達率 할 수 있는 것은 흥미 깊은 것이며 또 실용상 대단히 편리한 것이다.

## 6. 結 語

高溫鋼材의 水冷却時에 대한 熱 및 物質移動(증발) 현상에 대하여 최근의 연구를 概觀하여 傳熱研究者 입장에서 종합하여 보았다. 冶金研究者의 안목에서 보게 되면 극히 불만족하여 小論일지 모르지만 根本이 명확치 않은 현상에서는 우리들의 傳熱研究者 자신도 미흡한 感을 벗어나지 못한다.

어쨌든 가장 定量化하기 어려운 領域을 실용범위로 하고 있는 것이 이해된다면 筆者의 목적은 달성된 느낌이다.

앞에서 몇개의 個所에서 今後의 연구 방향을 이야기하였지만 많은 분들의 관심이 이 방면으로 향해서 많은 data가 나오기를 희망한다.

## 參 考 文 獻

- 1) 三塚; 日本機械學會 第380回講習會教材(1973. 5).
- 2) 棚澤; ディーゼル機關工學(熱機關大系 6) p.76 山海堂.
- 3) 國岡, 野口; 鐵と鋼 58 (1972) 11, S511.
- 4) 福田, 三塚; 鐵と鋼 58 (1972) 11, S513.
- 5) 庄司; 第12回日本傳熱シンポジウム論文集(1975) p. 213.
- 6) 戶田; 日本機械學會論文集 38(1972) p. 581 39(1973) p. 323 p. 2160.

(참고문헌 7)~(16)은 43페이지에 계속)