

<論 文>

高温表面의 冷却時 再水着 溫度에 관한 研究

鄭 文 基* · 朴 鍾 碩* · 李 永 煥*

(1985年 3月 16日 接受)

A Study of Rewetting Temperature in Cooling of Hot Surfaces

Moon Ki Chung, Jong Seuk Park and Young Whan Lee

Key Words: Reflooding(재관수), Rewetting Temperature(재수착 온도), Rewetting Temperature Correlation(재수착 온도 상관식), Rewetting Experiment(재수착 실험), Leidenfrost Film Boiling(Leidenfrost 막비등)

Abstract

In this study a parametric analysis for the rewetting temperature was made with 572 data obtained from the single tube experiment. The rewetting temperature was also evaluated by measuring the vaporization time of a liquid drop on a hot surface at the elevated pressures.

The results showed that the rewetting temperature increased with flooding rate, inlet subcooling pressure and initial wall temperature, and decreased with increasing axial elevation. Based on the results obtained, the rewetting temperature correlation was suggested. From the comparison of correlated rewetting temperatures with measured values, it showed that the correlated values fell within ±5% error from the measured values.

記 號 說 明

- A : 面積[m²]
- C : 比熱[J/kg·°C]
- h : 熱傳達係數[W/m²·°C]
- i : 엔탈피[J/kg]
- k : 熱傳導係數[W/m·°C]
- m : 質量[kg]
- \dot{m} : 質量流速[kg/m²·s]
- Q : 熱量[J]
- q : 熱流束[W/m²]
- T_c : 冷却水溫度[°C]
- T_R : 再水着溫度[°C]
- \bar{T}_R : 平均再水着溫度[°C]
- T_i : 飽和溫度[°C]
- T_w : 加熱壁溫度[°C]

- t : 時間[sec]
- z : 加熱管의 높이[m]
- δ : 물방울두께[m]
- ϵ : 管壁두께[m]
- ρ : 密度[kg/m³]

1. 序 論

假想的인 原子爐 事故로 인하여 冷却水가 상실되어 核燃料棒이 노출 되었다면 發生된 열을 제거할 수가 없어 核燃料棒의 온도는 계속 상승하게 된다. 이러한 온도 상승은 결국 核燃料棒 被覆材의 파손을 초래할 가능성이 크기 때문에 적절한 조치로써 核燃料棒을 냉각시켜야 한다. 이때 이미 과열된 核燃料棒에 冷却水를 주입하면 燃料棒 表面에 2相流를 동반한 복잡한 沸騰現象이 생기게 되는데, 이러한 沸騰熱傳達現象을 再冠水

* 正會員, 韓國에너지研究所

(Reflooding) 熱傳達이라고 하여 많은 관심속에 연구되고 있다⁽¹⁾. 특히 核燃料棒의 냉각과정을 살펴보면 온도가 서서히 떨어지기 시작하다가 어떤 순간 급격히 떨어지는데 이렇게 급격히 온도가 떨어진다는 것은 熱傳達이 좋아졌다는 의미이고 熱傳達이 좋아졌다는 것은 燃料棒을 덮고 있던 氣泡膜이 파괴되어 冷却水가 燃料棒表面과 직접 접촉했다는 의미이다. 冷却水가 加熱表面과 접촉이 시작되는 온도는 再水着(rewetting) 또는 急冷(quenching) 溫度라고 하며, 이 온도는 核燃料棒의 냉각여부를 결정해 주는 주요한 基準溫度이므로 이에 관해 많이 연구되고 있다⁽²⁾.

再水着溫度를 해석하기 위한 연구로써 Berenson⁽³⁾은 膜沸騰의 수력학적 안정성을 바탕으로 푸울비등에서의 最小熱流束과 熱傳達係數의 관계를 이용한 해석 모델을 제안한 바있고, Henry⁽⁴⁾는 Berenson의 모델에 가열표면과 냉각수의 물성치를 포함시킨 相關式을 제시하였다. 그러나 Spiegler⁽⁵⁾ 등은 再水着溫度는 冷却水의 熱的 性質에만 관련되고 加熱表面의 재질과는 관련이 없다고 주장하여, 再水着溫度는 van der Waals 식에서 유도되는 最大過熱溫度와 같다고 밝혔으며, Baumeister⁽⁶⁾ 등은 Spiegler의 모델에 表面粗度の 영향을 포함시켜 모델을 개선하였다. 또한 Kim 과 Lee⁽⁷⁾은 再水着溫度에 영향을 미치는 변수들의 차원해석을 통하여 相關式을 제시하였다. 그러나 Chung 과 Lee⁽⁸⁾는 이러한 再水着溫度모델을 서로 비교한 결과 상당한 차이가 있다고 보고한 바있다.

再水着溫度를 실험으로 파악하기 위한 방법은 일반적으로 3가지로 분류할 수가 있는데(Fig. 1 참조), 再

水着溫度는 (a) 沸騰熱傳達에서 잘 알려져 있는 沸騰曲線상의 最小熱流束點에 해당하는 온도, (b) 고온표면상의 물방울 증발거동을 통하여 물방울이 最大蒸發時間을 갖을 때의 表面溫度, (c) 加熱體 또는 加熱管의 冷却曲線상에서 온도가 급격히 떨어질 때의 온도라고 정의하여 구하는 방법이다.

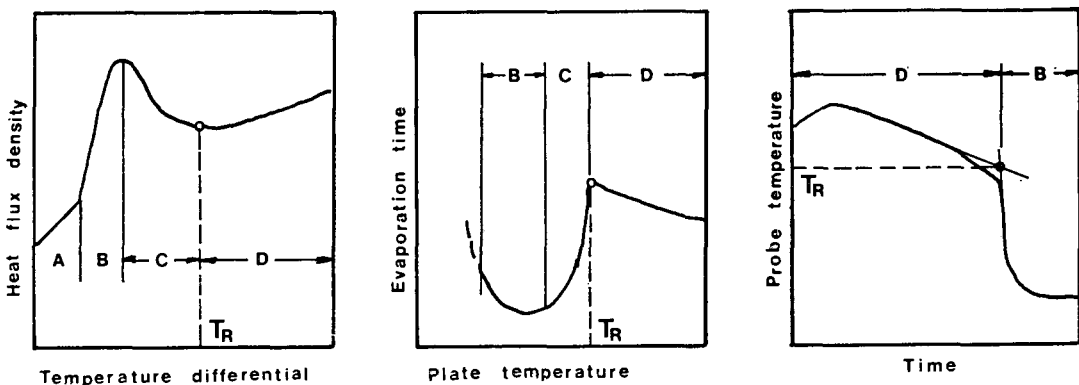
본 논문에서는 加熱管을 이용한 실험과 고온표면에 놓인 물방울의 증발실험을 통하여 再水着溫度에 미치는 영향인자들을 분석하였으며, 이러한 분석결과를 토대로 再水着溫度相關式을 제시하였다.

2. 實 驗

2.1. 加熱管 實驗

實驗裝置의 개략도는 Fig. 2에 표시되어 있다. 試驗部는 외경 15.6mm, 두께 2.0mm, 길이 3,180mm 인 單一加熱管(인코넬합금 600)이며, 전기로 가열시킨 管의 내부로 冷却水를 주입시켜 管을 냉각시키므로써 再冠水現象을 발생시킨다. 실험중 管의 온도변화를 측정하기 위하여 Fig. 3에 표시한 바와같이 加熱管의 외벽에 홈을 파서 외경 0.5mm 인코넬판으로 피복된 크롬-알루미늄 熱電對를 삽입한 후 은납땜으로 축방향 20cm 간격마다 모두 13개의 熱電對를 부착시켰다.

電源供給裝置는 용량 50kVA의 변압기로 구성되며, 加熱管 양단에 부착된 단자에 직류전원을 공급하여 직접 가열시키도록 되어 있다. 加熱管 外壁은 絶緣材인 아스베스트천으로 약 4cm 두께로 감싸서 외부로 열이



(a) Boiling curve (b) Droplet evaporation (c) Cooling curve

A : Convection, B : Nucleate boiling, C : Transition boiling, D : Film boiling

Fig. 1 Methods of determining rewetting temperature

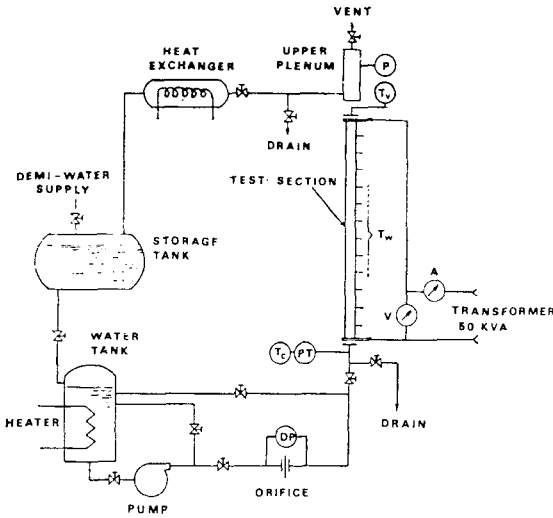


Fig. 2 Schematic diagram of the single tube reflow experimental loop

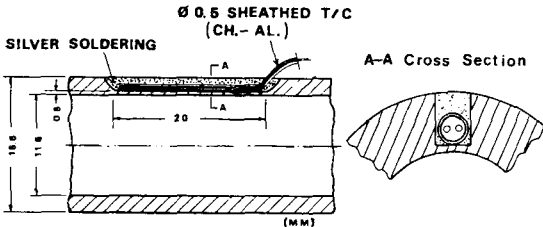


Fig. 3 Cross-section of test section and thermocouple attachment

방출되는 것을 줄이도록 되어 있다. 冷却水供給裝置에는 이온교환수를 저장하는 저장탱크, 냉각수공급탱크, 펌프 및 오리피스유량계가 부착되어 있다. 冷却水는 이온교환이 된 純水를 이용하였고 冷却水 溫度를 실험 조건에 맞도록 가열시켰다.

모든 실험은 대기압하에서 수행되며 實驗節次는 다음과 같다.

이온교환기를 통하여 생산된 純水는 우선 저장탱크에 저장되고 필요한 양만 냉각수탱크로 수송된다. 냉각수탱크에는 加熱器와 이에 연결된 自動溫度制御裝置가 있어 冷却水의 온도가 실험조건에 맞도록 유지된다.

다음에 펌프를 가동시켜 바이패스관으로 冷却水를 순환시키면서 오리피스유량계를 통해 유량을 조절하여 設定流量에 고정시켜 둔다. 試驗部의 온도가 미리 정해진 온도에 도달하면 바이패스시키던 冷却水가 試驗

部로 주입되므로써 실험이 시작된다.

실험에서 측정되는 데이터는 壁溫度, 冷却水의 試驗部入·出口溫度, 入口壓力, 供給電力, 注入流量 등이며 모든 데이터는 資料處理裝置(HP 3052 System)를 이용하여 1초간격으로 측정, 기록시킨다.

2.2. 물방울 蒸發實驗

물방울을 고온표면 위에 놓고 그 蒸發時間을 측정하여 最大蒸發時間을 가질 때의 표면온도를 Leidenfrost 온도라고 하며 많은 연구자들⁽⁹⁾이 이 온도를 측정하기 위해 노력을 해 왔다. 이 온도는 최근에 再水着 溫度와 같은 의미로 쓰이므로 구별하지 않고 여기서도 再水着 溫度로 정의된다.

加熱管實驗에서 구하기 어려운 再水着 溫度에 미치는 壓力의 영향을 본 實驗으로 조사하였다.

Fig. 4는 고온표면에 놓인 물방울의 蒸發時間을 측정하도록 만든 實驗裝置의 概略圖를 보여주고 있다. 본 實驗에서 고온표면으로 사용된 試片의 재질은 스테인레스강 304이다. 試片의 지름 90mm, 두께 8mm, 의 원판이며 물방울이 놓이는 표면은 약간 오목하게 하였고 고온표면과 약 1mm 간격에 熱電對의 교점이 놓이도록 試片의 뒷면에 홈을 파서 3개의 熱電對를 부착시켰다. 고온표면은 表面粗度의 試片은 加變電壓加熱器로 간접가열시켰으며, 물방울은 실린더형의 injector를 통해 고온표면에 떨어뜨렸고, 물방울 蒸發時間은 압력용기에 마련된 點檢窓를 통하여 육안으로 관찰하여 스톱워치를 사용하여 측정하였다.

測定方法을 간략히 기술하면 다음과 같다. 처음에 질소를 공급하여 용기압력을 일정하게 유지시키면서 試片이 設定溫度에 도달되어 일정하게 유지되면 물방

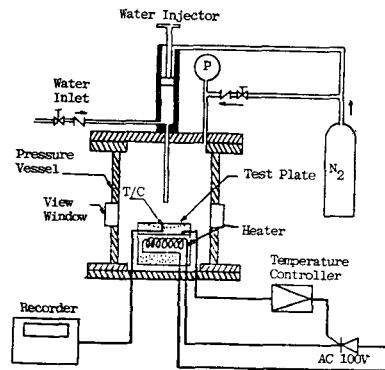


Fig. 4 Apparatus for leidenfrost phenomena study

물을 고온표면에 서서히 떨어뜨린 후 蒸發時間을 측정하게 된다. 이러한 방법으로 表面溫度와 壓力을 바꾸면서 실험을 진행한다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1. 再水着 溫度에 미치는 영향인자

본 實驗을 통하여 加熱管에 부착되어 있는 熱電對로부터 얻어지는 壁溫度—時間曲線의 대표적인 예는 Fig. 5와 같으며, 이러한 曲線上에서 再水着溫度는 Fig. 1의 (c)에서 표시한 바와같이 溫度曲線에 각각 접하는 접선의 交點에 대당되는 온도라고 정의한다.

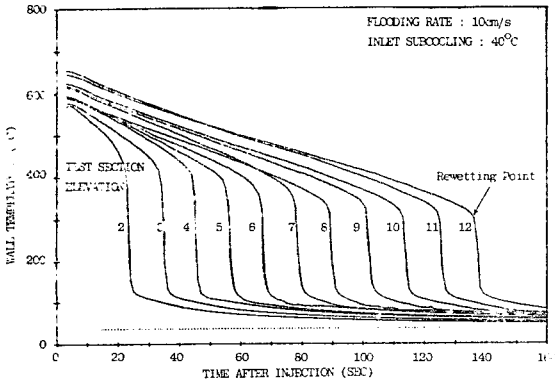


Fig. 5 Typical wall temperature histories at the various elevation during reflooding

再水着溫度에 관하여 아직도 定說이 존재하지 않는 것은 이 온도에 영향을 미치는 인자가 表面粗度, 加熱表面의 재질, 加熱表面溫度, 流體의 物性值 및 溫度, 壓力, 流量 등 많을 뿐만 아니라, 再水着過渡期에 데이터를 어떻게 처리하고 해석하는가에 따라 再水着溫度가 다르기 때문이다.⁽¹⁰⁾ 이 뿐만 아니라 實驗裝置에 따라 다를 수도 있고, 再水着溫度에 미치는 軸方向 熱傳導의 영향이 고려되어야 한다는 어려운 점도 있다. 이러한 어려운 점에도 불구하고 再水着溫度는 熱傳達領域을 구분해 주기 위하여 相關式으로 표현되어야 한다. 이러한 목적으로 여기에서는 加熱管實驗을 통하여 注入流速, 亞冷却度, 壁溫度, 軸方向높이 등이 再水着溫度에 미치는 영향을 주로 분석하였다. 再水着溫度는 軸方向 높이에 따라 다르지만 각 높이에 따라 얻어진 再水着溫度의 평균값(\bar{T}_R)을 軸方向높이를 제외한 각 인자들의 영향분석을 위하여 이용하였다.

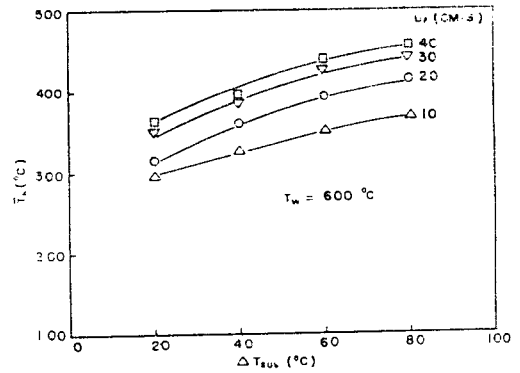


Fig. 6 Effect of inlet subcooling on rewetting temperature

Fig. 6은 壁溫度가 600°C인 경우 冷却水溫度를 변수로 하여 注入流速에 따른 再水着溫度의 변화를 나타내고 있다. 이 그림을 통하여 注入流速이 클수록 再水着溫度가 증가하고 冷却水溫度가 낮을수록, 즉, 亞冷却度가 높을수록 再水着溫度가 증가한다는 것을 알 수 있다.

또한 Fig. 7을 통하여 壁溫度가 높을수록 再水着溫度가 높아지며 注入速度가 빠른 경우 壁溫度가 600°C 이상에서는 再水着溫度의 증가율이 감소되는 것으로 壁溫度가 계속 높아진다고 해서 再水着溫度가 계속해서 증가하는 것이 아님을 알 수 있다.

再水着溫度가 壁溫度와 亞冷却度에 따라 다르다는 것은 試驗部의 軸方向높이에 따라 再水着溫度가 다를 수가 있다는 것을 의미한다. 왜냐하면 再冠水過程 중 壁溫度와 亞冷却度는 변하기 때문이다. 試驗部높이의 함수로 局所再水着溫度의 변화를 나타내고 있는 Fig. 8를 통하여 注入流速이 낮을수록 높이에 따른 再水着

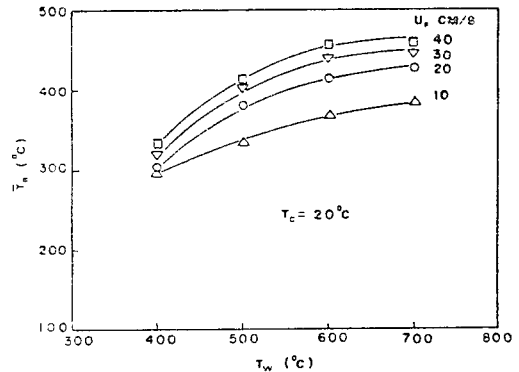


Fig. 7 Effect of wall temperature on rewetting temperature

溫度的 감소가 심하게 나타나고 있음을 알 수 있는데 이는 注入流速이 낮을수록 試驗部 높이에 따라 亞冷却度의 감소가 심하기 때문이며, 또한 再水着 前線이 도달되기 전에 豫冷却에 의해 壁溫度가 낮아지므로 낮은 壁溫度에서 再水着이 되기 때문에 再水着 溫度가 낮아지고 있다. 그러나 注入流速이 빠를수록 壁溫도와 亞冷却度의 감소가 완화된기 때문에 높이에 따른 再水着 溫度의 변화가 심하지 않다. Fig. 9는 Fig. 8과 같으나 壁溫度가 500°C이고 冷却水溫度가 80°C인 경우로써 亞冷却度가 낮기 때문에 亞冷却도가 높은 Fig. 8의 경우와 다른 경향을 보이고 있다. 즉, 亞冷却도가 높은 경우에는 注入流速에 따라 再水着 溫度의 변화가 다르게 나타났으나 亞冷却溫度가 낮은 경우에는 모든 注入流速의 조건에서 再水着 溫度가 변하는 경향이 거의 비슷하다. 이는 亞冷却도가 처음부터 낮아서 注入流速에 따른 亞冷却도의 감소율이 거의 같기 때문이라

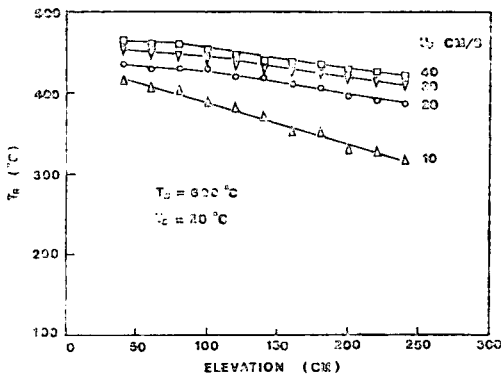


Fig. 8 Variation of rewetting temperature along axial elevation at high subcooling condition

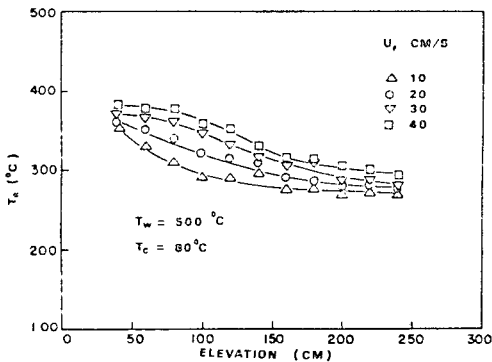


Fig. 9 Variation of rewetting temperature along axial elevation at low subcooling condition

고 생각된다. 이런 사실을 통하여 注水速度와 亞冷却度는 서로 밀접한 관계에 있으므로 서로 분리하여 영향분석하기는 어려우나 再水着 溫度에 큰 영향을 미치고 있다는 것은 분명하다.

3.2. 再水着 溫度相關式

再水着 速度의 이론적인 解를 구할 때 필요한 再水着 溫度는 대부분 연구자들도 일정한 값으로 가정하고 있다⁽¹¹⁾. 이러한 가정은 再水着 前線의 전진을 주로 軸方向熱傳導에 의해 지배된다고 보기 때문에 流動條件을 고려하지 않는다면 타당하다. 본 실험의 결과로서 얻어진 再水着 溫度는 260~480°C의 범위에 놓여 있다. 실제로 再冠水 過程중 燃料棒의 온도거동(最高燃料棒 溫度 豫測) 등을 保存方程式으로 해석하기 위해서는 流動條件과 高温表面의 物性值 등을 고려한 再水着 溫度相關式이 필요하다.

대부분의 실험자들은 再水着 溫度相關式을 단순히 亞冷却度만의 함수로 표현하고 있으나 실제로 再水着 溫度에 미치는 인자는 $c, \epsilon, \dot{m}, k, T_c, T_s, T_w, Z$ 이다. 그러나 이러한 인자는 복잡한 함수관계에 있으므로 단순한 식으로 표현하기가 어렵다. 따라서 Buckingham의 π 정리를 사용하면 4개의 無次元變數를 얻을 수 있다.

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4) = 0 \quad (1)$$

$$\text{여기서 } \pi_1 = \frac{T_R - T_s}{T_w - T_s}, \quad \pi_2 = \frac{T_s - T_c}{T_w - T_s}$$

$$\pi_3 = \frac{C \cdot \dot{m} \cdot \epsilon}{k}, \quad \pi_4 = \frac{k \cdot \rho^2 \cdot (T_w - T_s)}{\epsilon \cdot \dot{m}^3}$$

이러한 無次元變數間의 함수관계는 실험치를 이용하여 Regression 分析으로 구할 수 있다. Kim과 Lee⁽⁷⁾는 이러한 법으로 相關式을 만들어 그들의 실험치와 비교한 결과 대부분의 데이터는 $\pm 10\%$ 범위에 속하였다고 보고한 바 있다. 본 실험에서 얻어진 再水着 溫度를 Kim과 Lee의 相關式에 적용시켜 비교하였으나 잘 맞지 않았다. 본 實驗結果考察을 통하여, Kim과 Lee의 相關式에는 再水着 溫度에 미치는 壁溫도의 영향이 본 실험결과 보다 크다는 사실을 알았다.

본 실험에서 再水着 溫度에 미치는 영향인자분석결과와 도입된 無次元數를 토대로 다음과 같은 再水着 溫度 相關式을 구하였다.

$$T_R = 2058.4 \Delta T_{sat} * \left(\frac{\Delta T_{sub}}{\Delta T_{sat}} \right)^{0.151} * \left(\frac{C \dot{m} \epsilon}{k} \right)^{-0.691} * \left(\frac{k \rho^2 \Delta T_{sat}}{\epsilon \dot{m}^3} \right)^{-0.29} * \left(\frac{Z}{\epsilon} \right)^{-0.17} + T_s \quad (2)$$

본 相關式에는 高温表面의 재질, 壁溫度, 流量, 冷却

水溫度, 試驗部の 높이 및 두께가 고려되어 있다. 본 相關式의 적용범위는 Table 1에 주어져 있고 본 相關式으로 계산된 再水着 溫度와 實驗에서 구한 再水着 溫度를 비교하여 Fig. 10에 표시하였다. Fig. 10에 표시된 데이터는 모두 572개이며, 대부분(데이터의 98%) +5% 범위에 속하고 있으므로 전반적으로 再水着 溫度는 式 (2)에 주어진 相關式과 잘 일치하고 있다. 再冠水 過程중 燃料棒의 온도거동을 해석하기 위하여 개발된 REFLUX 코드⁽¹²⁾에서 Henry의 再水着 溫度 相關式 대신에 본 相關式을 적용시켜 燃料棒의 온도거동을 예측한 결과, 再水着 時間은 實驗結果와 잘 일치하

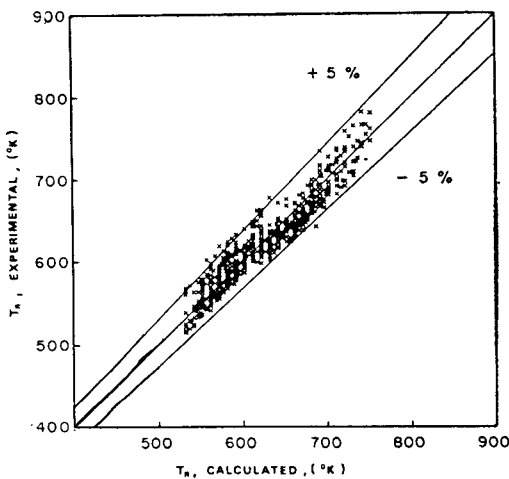


Fig. 10 Comparison of rewetting temperature calculated by present correlation with single tube data

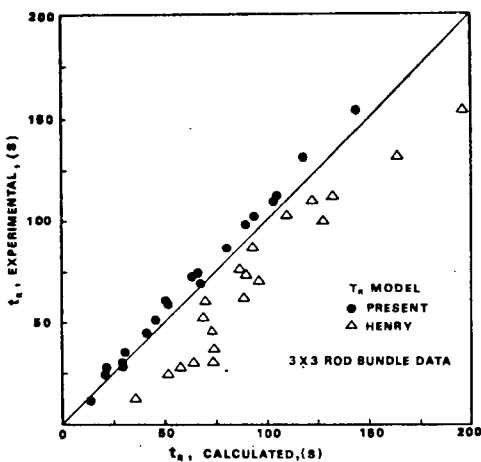


Fig. 11 Comparison of rewetting time calculated by Henry model and present model with 3x3 rod bundle data (ref. 16)

고 있음을 Fig. 11에서 알 수 있다.

이와같이 본 相關式은 전산코드로써 再冠水 熱傳達 現象을 해석할 때 熱傳達 領域을 구분해 주는 경계조건이 되기 때문에 相關式의 정확성은 바로 再冠水 熱傳達 解析의 신빙성과 직결된다. 다만 순수한 實驗의 相關式은 차원면에서 물리적 의미가 희박한 단점이 있으나 實驗結果를 제대로 예측할 수 있는 장점이 있기 때문에 완전한 이론이 정리되기 전까지는 再冠水 過程중 燃料棒溫度舉動을 예측하는데 기여하게 될 것이 예상된다. 보다 더 완전한 再水着 溫度 相關式을 얻기 위하여 表面粗度가 再水着 溫度에 미치는 영향을 평가할 수 있는 실험을 수행하는 것이 또한 바람직하다.

3. 3. 高壓에서의 再水着 溫度舉動

Fig. 12는 물방울蒸發實驗에서 얻어지는 蒸發時間—壁溫度曲線의 대표적인 예를 보여주고 있다. 蒸發時間이 급격히 줄어들기 시작하는 점에 해당하는 온도가 再水着 溫度이다. 이는 물방울과 高溫表面 사이에 蒸氣膜이 파괴되어 물방울이 직접 표면과 접촉하는 온도에 해당된다.

Fig. 12는 스테인레스강판위에 冷却水 溫度가 20°C이고, 물방울크기가 0.063ml인 경우에 해당된다. 사용된 물방울의 크기는 0.063, 0.125, 0.5ml이었는데, 물방울의 크기는 再水着 溫度에 영향을 주지 않았으며, 이는 Gottfried⁽¹³⁾ 등의 주장과 일치하고 있다. 따라서 다른 영향을 보기 위하여 주로 0.063ml 물방울을 이용하였다. 물방울온도를 변경시켜 가면서 실험해 본 결과 물방울의 亞冷却度가 높을수록 再水着 溫度가 높다는 것을 알았다. 이는 單—管實驗에서 측정한 再水着 溫度와 같은 경향을 보이고 있다.

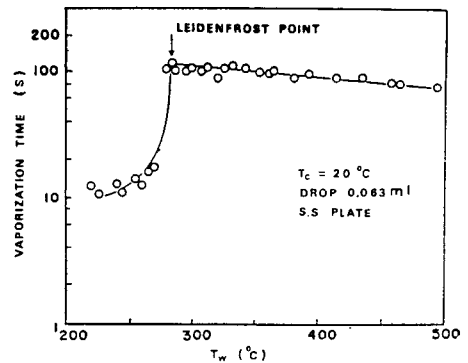


Fig. 12 Vaporization times of water droplets deposited on a heating wall (stainless steel)

Fig. 13 은 압력변화에 따른 再水着 溫度의 實驗値를 보여 주고 있는데, 압력이 증가할수록 再水着 溫度가 증가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 冷却材 喪失事故의 블로다운단계에서도 再水着이 가능함을 의미하게 되고, 또한 小型 冷却材 喪失事故와 같은 爐心の 부분노출시 再水着이 가능하다는 것을 의미하므로 原子 爐의 安全性側面에서 가장 큰 장점이 될 수 있다. 대부분의 再水着 溫度理論式이 대기압에서 유도되어 壓力 因子를 고려하지 않고 있으므로 실험치와 직접 비교하기는 어렵다. 그러나 실험치와 Berenson 모델로 계산한 값을 비교하여 보여 주고 있는 Fig. 13 에서 대기압에서는 다소 차이가 있으나 압력이 높은 경우 비교적 잘 일치하고 있다. 高壓의 경우 再水着 溫度를 예측하는 데보다 나은 모델의 개발이 필요하지만 그때까지는 Berenson의 모델로 이용하는 것도 타당하다고 본다.

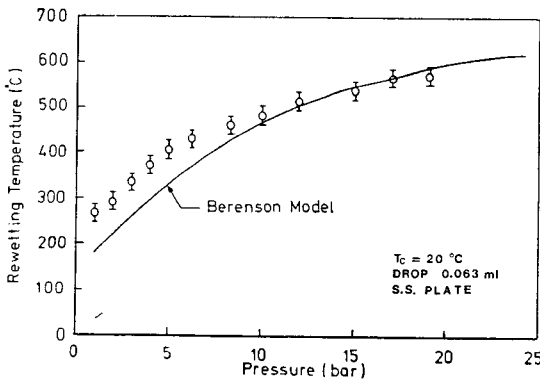


Fig. 13 Effect of pressure on the rewetting temperature

3.4. 물방울 沸騰曲線

高溫表面에서의 물방울 沸騰現象, 소위 Leidenfrost 膜沸騰시의 熱流速을 계산하여 ฟู올비등에서의 熱流速과 비교해 보기 위하여, 高溫表面에 놓인 물방울로 전달된 열과 물방울이 증발할 때까지 필요한 열량이 같다고 가정하고 高溫表面에 놓인 물방울은 디스크형이며, 크기는 Baumeister⁽¹⁴⁾ 등이 제안한 형상을 갖고 증발에 의해 물방울이 줄어드는 과정은 일정한 두께를 유지하면서 반지름만 줄어든다고 가정한다면 물방울이 증발할 때까지 필요한 열량은

$$dQ = -(i_{fg} + \Delta i_{sat})dm \tag{3}$$

이다. 여기서 i_{fg} 는 蒸發潛熱이고 Δi_{sat} 는 액체의 飽和 溫度와 初期溫度의 엔탈피차이다. 물방울은 일정한 두

께를 갖는다고 가정하였기 때문에

$$dQ = -(i_{fg} + \Delta i_{sat})\rho \delta dA \tag{4}$$

가 된다. 한편 高溫表面에서 물방울에 전달된 열량은

$$dQ = hA(T_w - T_s)dt \tag{5}$$

이 되므로 式 (4)과 式 (5)을 등치시키고, A 와 t 이 되는 상수라고 가정하여 적분하면 熱傳達係數는

$$h = \frac{(i_{fg} + \Delta i_{sat})\rho \delta \cdot l_n(A_1/A_2)}{(T_w - T_s)\Delta t} \tag{6}$$

가 된다. 여기서 Δt 는 물방울의 初期斷面積 A_1 이 A_2 가 될 때까지 걸린 시간이다. 그러므로 熱流速은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$q = h(T_w - T_s) \tag{7}$$

Fig. 14는 Fig. 12에 표시된 데이터를 式 (7)을 이용하여 구한 熱流速과 過熱壁溫度의 곡선을 나타내고 있다. Leidenfrost 膜沸騰領域에서의 熱流速은 Baumeister⁽¹⁴⁾ 등이 제안한 式과 유사한 경향을 나타내고 있다. Michiyoshi⁽¹⁵⁾ 등 물방울의 蒸發時間에 관한 相關式을 高溫表面溫度와 물방울크기의 함수로 표현하여 熱流速을 구하였는데 그들의 실험에 사용된 물방울 크기 변수인 N 이 1과 2의 범위에서는 본 實驗結果와 잘 일치하고 있다. 이 그림을 통하여 알 수 있는 흥미 있는 사실은 실험에 의한 最小熱流速은 Nukiyama의 ฟู올비등시 最小熱流速과 거의 같지만 沸騰曲線에서 最小熱流速에 해당되는 점을 잘못 선택하면 Leidenfrost 온도 즉, 再水着 溫度의 결정에 큰 오차가 생길수 있음을 알 수 있다. 그러므로 沸騰曲線상에서 再水着 溫度를 구하는 것은 적합하지 못하다.

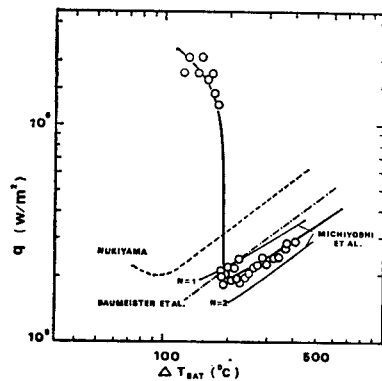


Fig. 14 Heat flux VS. wall temperature superheat

4. 結 論

原子 爐 冷却材 喪失事故시 核燃料棒의 온도거동을 해

석하는 모델에 필요한 再水着溫度舉動을 單一管 實驗과 물방울 蒸發實驗을 통하여 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 再水着溫度는 注入流速, 亞冷却度, 初期壁溫度가 증가할수록 높아지고 燃料棒높이에 따라 감소하는 경향이 있다.

(2) 再水着溫度는 壓力이 증가할수록 증가하고 있으며, 이러한 경향은 Berenson 모델로서 예측이 가능하다.

(3) 本 實驗에서의 測定값을 근거로 再水着溫度 實驗相關式을 구하였다. 計算값과 測定값을 비교한 결과 ±5% 내에서 잘 일치하였다.

참 고 문 헌

- (1) E. Elias and G. Yadigaroglu, "The Reflooding Phase of the LOCA in PWRs, Part II : Rewetting and Liquid Entrainment", Nuclear Safety, Vol. 19, No. 2, 1978
- (2) D. Butterworth and R.G. Owen, "The Quenching of Hot Surfaces by Top and Bottom Flooding-a Review", Report AERE-R 7992, United Kingdom Atomic Energy Authority, 1975
- (3) P.J. Ecrenson, "Film Boiling Heat Transfer from a Horizontal Surfaces", J. of Heat Transfer Trans. ASME, Vol. 83, pp.351~358, 1961
- (4) R.E. Henry, "A Correlation for the Minimum Film Boiling Temperature", AIChE Symposium Ser., Vol. 70, No. 138, 1974
- (5) P. Spiegler et al., "On-set of Stable Film Boiling and the Foam Limit", Int. J. Heat Mass Trans., Vol. 6, pp.987~994, 1963
- (6) K.J. Baumeister and F.F. Simon, "Leidenfrost Temperature-Its Correlation for Liquid Metals Gryogens, Hydrocarbons, and Water", J. Heat Trans., Vol. 95, No. (2), pp.166~173, 1973
- (7) A.K. Kim and Y. Lee, "A Correlation of Rewetting Temperature", Lett. Heat and Mass Trans., Vol. 6, pp.117~123, 1979
- (8) M.K. Chung and Y.W. Lee, "Description and Discussion of the Current State of the Knowledge about the Leidenfrost Phenomenon", J. Korean Nucl. Uoc., Vol. 14, No. 4, pp.204~218, 1982
- (9) K.J. Bell, "The Leidenfrost Phenomenon, a Survey", Chem Eng. Prog. Symp. Ser. Vol. 63, No. (79), 1967
- (10) S.C. Yao and R.E. Henry, "A Investigation of the Minimum Film Boiling Temperature on Horizontal Surfaces", J. Heat Transfer, Trans. ASME, Vol. 100, pp.00~00, 1978
- (11) R.B. Duffey and D.T.C. Porthouse, "The Physics of Rewetting in Water Reactor Emergency Core Cooling", Nucl. Eng. Des. Vol. 25, pp. 379~394, 1973
- (12) W.L. Kirchner, "Reflood Heat Transfer in a Light Water Reactor", Ph. D. Thesis, MIT, 1976
- (13) B.S. Gottfried, C.J. Lee and K.J. Bell, "The Leidenfrost Phenomenon : Film Boiling of Liquid Droplets on a Flat Plate", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 9, pp.1187~1197, 1966
- (14) K.J. Baumeister, T.D. Hamill and G.J. Schoessow, "A Generalized Correlation of Vaporization Times of Drops in Film Boiling on a Flat Plate", Proc. 3rd. Int Heat Trans. Ccnf., Vol. 4, pp.66~72, 1966
- (15) I Michiyoshi and K. Makino, "Heat Transfer Charateristics of Evaporation of a Liquid Droplet on Heated Surfaces", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 21, pp.605~613, 1978
- (16) 李永煥 等, "冷却材喪失事故研究" KAERI/RR-355/81, 1982