

<論 文>

下部注入에 의한 加熱管의 再水着 現象에 관한 研究

鄭 文 基\* · 李 永 煥\*

(1983年 9月 13日 接受)

A Study on the Rewetting Phenomena of a Heated Tube by Bottom Flooding

Moon Ki Chung and Young Whan Lee

Abstract

In order to estimate the fuel rod temperature during the reflooding phase of the PWR LOCA, it is essential to obtain a better understanding of the rewetting mechanism.

This paper presents the results of analytical and experimental investigations aimed at analyzing the rewetting phenomena in a heated tube. A two-dimensional solution of the rewetting for a tube is described and used to yield the correlation of the rewetting heat transfer coefficient as the function of flooding rate and inlet subcooling. This correlation prediction is in good agreement with the experimental data.

기 호 설 명

- $Bi$  : Biot 수
- $c$  : 비열(J/kg°C)
- $G$  : 질량유량(kg/m<sup>2</sup>s)
- $h$  : 열전달계수(W/m<sup>2</sup> °C)
- $J_0, J_1$  : 제 1 종의 Bessel 함수
- $k$  : 열전도계수(W/m°C)
- $p$  : 선출력(kW/m)
- $q$  : 열유속(W/m<sup>2</sup>)
- $\dot{q}$  : 단위부피당 발생된 열량(W/m<sup>3</sup>)
- $r$  : 반지름 변수(m)
- $r_i$  : 관의 안 반지름(m)
- $r_o$  : 관의 바깥 반지름(m)
- $R_{in}$  : 내부유동관 형태계수
- $R_o$  : 외부유동관 형태계수
- $T$  : 온도(°C)

- $t$  : 시간(sec)
- $U$  : 속도(m/s)
- $Y_0, Y_1$  : 제 2 종의 Bessel 함수
- $Z$  : 원통좌표계에서 축방향좌표(m)
- $\Delta T_{sub}$  : 서브쿨링도,  $T_s - T_c$ , (°C)
- $\epsilon$  : 관의 두께(m)
- $\lambda$  : Eigenvalues
- $\delta$  : 밀도(kg/m<sup>3</sup>)

하 첨 자

- $C$  : 냉각수
- $F$  : 냉각수주입
- $R$  : 재수착
- $S$  : 포화상태
- $W$  : 관벽

1. 序 論

\*正會員, 韓國에너지研究所 熱工學研究室

高溫으로 加熱된 金屬을 冷却시키기 위하여 冷却水를

金屬表面에 붓거나 金屬自體를 冷却水속에 잠기게 하면 처음에는 表面에 蒸氣膜이 형성되어 서서히 冷却되다가 表面이 어떤 溫度, 소위 再水着溫度에 도달되면 蒸氣膜이 파괴되어 冷却水가 곧 表面에 접촉하게 된다. 이때 高溫表面은 급격히 冷却되는데 이러한 現象을 再水着(rewetting)現象이라고 한다<sup>21</sup>.

이러한 再水着現象은 처음에는 담금질이나 강철빌렛의 스프레이 冷却效果등을 위하여 研究되어 왔으나, 최근에는 原子力發電소의 1次冷却材系統에서의 破斷事故인 소위 冷却材喪失事故가 생길 경우에도 이 現象이 생기므로 이에 관해 많이 研究되고 있다<sup>22</sup>. 過熱된 燃料棒의 冷却過程에서 형성된 再水着前線(rewetting front)의 前進速度를 理論적으로 解析하는 것은 原子爐 安全性 評價를 위하여 매우 중요하다.

高溫表面의 再水着速度는 熱傳導에 의해 지배된다고 假定하여 Yamanouchi<sup>23</sup>가 上部스프레이冷却인 경우 1次元解를 최초로 제시하였다. 그는 高溫表面은 平板이며, 再水着된 지역과 再水着되지 않은 乾燥지역으로 나누어 再水着된 지역에서의 熱傳達係數는 일정한 값을 가지나 다른 지역에서의 熱傳達係數는 무시하여 再水着速度의 解를 Biot數와 無次元溫度群으로 표현하였다. Duffey와 Porthouse<sup>24</sup>는 Yamanouchi와 같은 방법으로 平板에서의 2次元解를 구하였고, Blair<sup>25</sup>와 Yeh<sup>26</sup>는 圓筒形棒에 대한 解를 구하였다. 그러나 Sun<sup>27</sup> 등은 乾燥지역에서의 熱傳達係數를 무시하지 않고 再水着前線에서부터 指數적으로 감소한다고 假定하여 1次元解를 구하였고 Dua와 Tien<sup>28</sup>은 같은 방법으로 2次元解를 구하였다. Chun과 Chon<sup>29</sup>은 下部注入을 理論의 모델로 하여 再水着되지 않은 지역에서의 豫冷却效果를 주로 조사하였다. 또한 數值解析으로 再水着速度解를 구하려는 시도도 있었다<sup>10</sup>. 이외에도 여러 研究者들에 의해 再水着速度 解析에 관한 論文이 발표되고 있으나 아직까지 一般화된 解는 없는 실정에 있다.

지금까지 알려져 있는 理論은 대부분 加熱表面이 平板이나 燃料棒을 모델로 취하고 있으나 本 論文에서는 管을 모델로 하고, 再水着된 지역에서의 熱傳達係數는 일정하며 再水着되지 않은 지역에서의 熱傳達係數는 무시하여 再水着 速度의 2次元解를 구하였다. 또한 加熱管을 이용한 實驗을 통하여 再水着 速度에 미치는 影響因자를 分析하여 再水着 熱傳達係數의 相關式을 提示하였다.

2. 理論解析

原子爐에서 冷却材喪失事故後 非常爐心冷却材가 爐

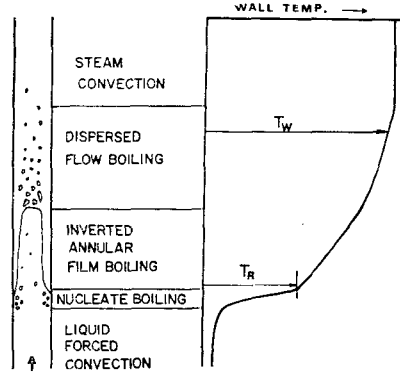


Fig. 1 Typical flow patterns and wall temperature during reflooding

心에 注入되어 過熱된 燃料棒을 冷却시키는 과정을 再冠水(reflooding)라고 하는데 이때 爐心에서 나타나는 流動樣式을 肉眼觀察한 결과에 따르면 Fig. 1에 나타난 바와같이 軸方向 上部로부터 蒸氣單相冷却, 물방울分散流, 膜沸騰, 核沸騰, 그리고 液體單相冷却으로 구분되며 再水着은 膜沸騰에서 核沸騰으로 遷移되는 과정을 알 수 있다. 그러나 再水着速度의 解를 구하기 위해서는 복잡한 熱傳達機構를 동시에 고려하지 않고 再水着 前線을 기준으로 乾燥지역과 再水着지역으로 나누어 乾燥지역의 熱은 軸方向 傳導에 의해 再水着지역으로 전달되어 이 지역에서 遷移沸騰이나 核沸騰에 의해 冷却수로 放出된다고 가정한다. 그러므로 再水着速度는 熱傳導 方程式으로부터 구할 수 있게 된다<sup>3,4</sup>.

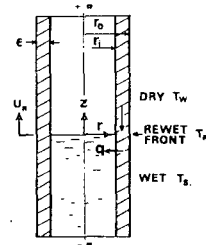


Fig. 2 Coordinate system for analysis

本 論文에서는 Fig. 2에 보이는 바와같이 管의 內部로 冷却水가 流動하는 경우에 대한 再水着 速度의 解를 구한다. 圓周方向의 溫度勾配가 없고 管内 熱發生이 없다고 假定하면 2次元 熱傳導 方程式은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{\rho c}{k} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

再水着 速度가 軸方向으로 일정하다고 假定하면 再水

着前線을 原點으로하는 移動座標軸을 이용할 수 있으므로

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -U_R \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2)$$

의 關係를 얻게 되는데 式 (2)를 式 (1)에 代入하고, 無次元시켜 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left( r^* \frac{\partial T^*}{\partial r^*} \right) + \frac{\partial^2 T^*}{\partial z^{*2}} + U^* \frac{\partial T^*}{\partial z^*} = 0 \quad (3)$$

여기서

$$T^* = \frac{T - T_s}{T_R - T_s}, \quad U^* = \frac{\rho c \varepsilon U_R}{k}, \quad z^* = \frac{z}{\varepsilon}, \quad r^* = \frac{r}{\varepsilon},$$

$$Bi = \frac{h \varepsilon}{k}$$

境界條件은 다음과 같다.

$$T^*(-\infty, r^*) = 0$$

$$T^*(+\infty, r^*) = T_w^*$$

$$\left. \frac{\partial T^*}{\partial r^*} \right|_{r_i^*} = Bi \cdot T^*, \quad z^* < 0 \text{ 인 경우}$$

$$\left. \frac{\partial T^*}{\partial r^*} \right|_{r_i^*} = 0, \quad z^* > 0 \text{ 인 경우}$$

$$\left. \frac{\partial T^*}{\partial r^*} \right|_{r_o^*} = 0, \quad \text{모든 } z^* \text{에서}$$

$$T^*(0, r_i^*) = 1$$

위의 境界條件을 이용하여 式 (3)의 解를 구하면 Bessel 함수를 포함하는 다음 式으로 표현된다.

$$T^* = \sum_{i=1}^{\infty} \exp \left[ z^* \left\{ -\frac{U^*}{2} + \left( \frac{U^{*2}}{4} + \lambda_i^2 \right)^{1/2} \right\} \right] \cdot \left[ \frac{J_0(\lambda_i r_o^*) \cdot Y_1(\lambda_i r_o^*) - Y_0(\lambda_i r_o^*) \cdot J_1(\lambda_i r_o^*)}{J_0(\lambda_i r_i^*) \cdot Y_1(\lambda_i r_o^*) - Y_0(\lambda_i r_i^*) \cdot J_1(\lambda_i r_o^*)} \right] \quad (4)$$

또한

$$Bi = \lambda_i \left[ \frac{J_1(\lambda_i r_i^*) \cdot Y_1(\lambda_i r_o^*) - Y_1(\lambda_i r_i^*) \cdot J_1(\lambda_i r_o^*)}{J_0(\lambda_i r_i^*) \cdot Y_1(\lambda_i r_o^*) - Y_0(\lambda_i r_i^*) \cdot J_1(\lambda_i r_o^*)} \right] \quad (5)$$

의 關係를 얻을 수 있다.

再水着速度를 구하기 위하여 管에서의 에너지平衡을 취하면 단위시간당 熱損失 즉,

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{r_i}^{r_o} \rho c \left( -\frac{\partial T}{\partial t} \right) 2\pi r dr dz \quad (6)$$

은 再水着된 表面을 통해 放出된 熱 즉,

$$\int_{-\infty}^{\infty} h \{ T(z, r_i) - T_s \} \cdot 2\pi r_i dz \quad (7)$$

과 같아야 한다. 再水着速度에 관한 近似解를 구하기 위하여 無限級數로 표현되어 있는 式 (4)에서 첫 項만을 취하여 式 (7)에 代入하고, 式 (6)에 式 (2)를 代入해서 정리하면 無次元 再水着 速度에 관한 式 (8)을 얻을 수 있다.

$$U^* = \frac{Bi \cdot R_{in}}{\lambda T_w^*} \left( 1 - \frac{1}{\lambda^2} \frac{Bi \cdot R_{in}}{T_w^*} \right)^{-1/2} \quad (8)$$

여기서

$$R_{in} = \frac{2r_i^*}{2r_i^* + 1}$$

이며, 이  $R_{in}$ 을 管의 幾何學的 形態에 따라 변하는 形態係數라고 定義한다. 再水着速度의 定性的 解析을 위하여 式 (8)의 괄호안의 項을 무시하면

$$U^* = \frac{Bi}{\lambda T_w^*} \cdot R_{in} \quad (9)$$

이 되는데 이제  $Bi$ 가 1보다 대단히 작은 경우와 큰 경우 두가지 극한을 생각해 본다.  $Bi \ll 1$ 이면 式 (5)에서  $Bi \approx \lambda^2$ 의 關係가 있음을 알 수 있으므로

$$U^* = \frac{\sqrt{Bi}}{T_w^*} \cdot R_{in} \quad (10)$$

의 式을 얻게 된다. 만약 高溫表面이 平板인 경우 ( $r_i^* \rightarrow \infty$ )에는  $R_{in}$ 이 1이 되므로 式 (10)은 平板모형을 이용한 Yamanouchi<sup>3)</sup>의 1次元解와 같아진다.

$Bi \gg 1$ 이면  $\lambda = \pi/2$ 에 漸近하게 되므로

$$U^* = \frac{2}{\pi} \frac{Bi}{T_w^*} \cdot R_{in} \quad (11)$$

가 된다. 마찬가지로 平板인 경우에는  $R_{in}$ 이 1이 되어 平板모형을 이용한 Duffey와 Porthouse<sup>4)</sup>의 解와 같다.

本 理論모형을 管의 外部로 冷却水가 流動하는 경우에 적용하기 위하여 前述한 方法으로 解를 구하면 形態係數만 다음과 같이 바뀌게 된다. 즉 外部流動管에서의 形態係數는

$$R_o = \frac{2(r_i^* + 1)}{(2r_i^* + 1)} \quad (12)$$

이 된다.

지금까지 알려진 理論解는 대부분  $Bi$ 와  $T_w^*$ 의 함수로 표현되어 있다는 것을 Table 1에서 알 수 있다. 그러나 本 理論解에는 形態係數가 포함되어 있다는 것이 다르다. 다만 Lee<sup>15)</sup>는 管의 1次元解析으로 形態係

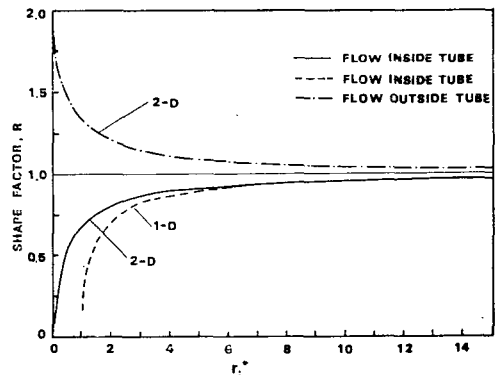


Fig. 3 Variation of shape factor  $R$  with parameter  $r_i^*$

Table 1 Various models proposed to predict the rewetting velocity

Ref.	Authors	Model
3	Yananouchi (1968)	$U^* = \sqrt{Bi} / \sqrt{T_w^*(T_w^* - 1)}$
4	Duffey and Porthouse(1973)	$U^* = \frac{2}{\pi} \frac{Bi}{T_w^*}$
10	Andersen and Hansen(1974)	$U^* = 0.74Bi / [T_w^*(T_w^* - 1)]^{0.943}$
11	Coney(1974)	$\frac{Bi}{U^*} = 1.6T_w^*(T_w^* - 1)$
12	Tien and Yao(1974)	$\frac{Bi}{U^*} = 1.707(T_w^* - 1) + 1.457(T_w^* - 1)^2$
5	Blair(1975)	$U^* = \frac{2}{\pi} \frac{Bi}{(T_w^* - 1)}$
8	Dua and Tien(1976)	$U^{*2} = \left[ \frac{Bi}{T_w^*(T_w^* - 1)} \right] \left[ 1 + \frac{0.4Bi}{T_w^*(T_w^* - 1)} \right]$
15	Lee(1979)	$U^* = \frac{Bi}{T_w^*} \sqrt{1 - \frac{1}{r_i^*}}$
13	Bonakdar and McAssey(1981)	$\frac{1}{T_w^*} = (0.551 + 0.228 \ln U^*) - \ln Bi (0.111 - 0.032 \ln U^*)$
14	Oliveri et al.(1982)	$\frac{W^2 U^{*4}}{W^2 + U^{*2}} = \left[ \frac{Bi}{T_w^*(T_w^* - 1)} \right]^2$ , where $W^2 = 1.018 + \frac{1.598}{T_w^*}$
	Present	$U^* = \frac{2}{\pi} \frac{Bi}{T_w^*} R$ ; Flow inside tube case: $R = \frac{2r_i^*}{2r_i^* + 1}$ Flow outside tube case: $R = \frac{2(r_i^* + 1)}{2r_i^* + 1}$

數를 유도한 바 있으나 2次元解析과는 약간의 차이가 있다. Fig. 3은 1次元 및 2次元에서의 形態係數(R)가 無次元半徑( $r_i^*$ )에 따라 어떻게 변하는가를 보여주고 있는데, 이 그림을 통하여 管과 平板 모델解와의 차이를 豫測할 수 있고,  $r_i^*$ 가 클수록 內部流動管의 경우 再水着速度가 빨라지나 外部流動管에서는 느리게 됨을 알 수 있다. 이는 실제 燃料棒의 경우  $r_i^*$ 가 작을수록 燃料棒의 冷却效果가 커진다는 것을 의미한다.

### 3. 實驗裝置 및 方法

#### 3.1. 實驗裝置

實驗裝置의 概略圖는 Fig. 4에 圖示되어 있다. 이 裝置는 기본적으로 試驗部, 電源供給裝置, 冷却水供給裝置와 計測裝置로 構成되어 있다. 試驗部는 外徑 15.6 mm, 두께 2.0mm, 길이 3,180mm인 直接通電에 의해 加熱되는 管(인코넬 合金 600)이며, 管의 내부로 冷却水가 注入된다. 實驗中 管의 溫度變化를 測定하기 위하여 管의 下端에서부터 길이 방향으로 200mm 간격

마다 크로멜-알루미넬 熱電對(外徑 0.5mm인 인코넬管으로 被覆된)를 은납땜으로 부착시켰다.

電源은 容量 50 kVA의 變壓器를 통하여 管의 兩端

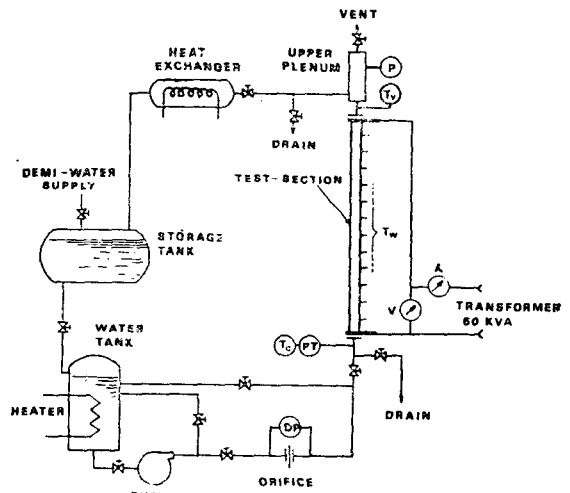


Fig. 4 Schematic diagram of the reflood experimental loop

에 부착된 단자에 直流電力을 供給하여 直接加熱시켰다. 加熱管 外壁은 絕緣材인 아스베스트천으로 약 4cm 두께로 감싸서 外部로 熱이 放出되는 것을 줄이도록 하였다. 冷却水는 이온 交換이 된 純水를 이용함으로써 加熱管을 電氣로 加熱시킬 때 生길 수 있는 電氣의 影響과 管의 腐蝕을 방지하게 되어 있다. 冷却水탱크는 冷却水溫度를 實驗條件에 맞게 加熱시키도록 13.5 kW 容量의 加熱器 및 溫度制御器가 마련되어 있다. 冷却水의 流量은 오리피스와 壓力트랜스듀서로 測定하였다.

3.2. 實驗方法

모든 實驗은 大氣壓하에서 수행하였으며 實驗節次는 다음과 같다. 이온 交換器를 통하여 生산된 純水를 우선 저장탱크에 저장시킨 후 필요한 量만 冷却水탱크로 수송한다. 冷却水탱크에서 溫度를 實驗條件에 맞게 유지시킨 후 펌프를 稼動시켜 바이패스管으로 冷却水를 순환시키면서 오리피스 流量計를 통해 流量을 조절하여 設定流量에 맞게 고정시켜 둔다. 試驗部의 溫度가 設定溫度에 도달되면 바이패스시키던 冷却水를 試驗部에 注入시키고 동시에 모든 測定을 시작한다. 實驗에서 測定되는 데이터는 管壁溫度, 注入冷却水溫度, 流量, 供給電力 및 壓力이다. 이러한 모든 데이터는 데이터처리장치(Hewlett-Packard 3052A Automatic Data Acquisition System)로 測定되고, 測定된 데이터는 마그네틱 테이프에 저장시킨 후 實驗分析에 이용한다. 實驗은 Table 2에 제시된 範圍에서 수행하였다.

Table 2 Ranges of variables investigated

Flooding rate ( $U_F$ )	10—40cm/s
Inlet subcooling ( $\Delta T_{sub}$ )	20—80°C
Initial wall temperature ( $T_w$ )	400—700°C
Linear power ( $\dot{p}$ )	0—1.89kW/m
Pressure	1 bar

加熱管에 부착된 熱電對로 얻어지는 壁溫度—時間曲線을 이용하여 再水着現象을 파악하게 되는데 이때 資料分析에 사용된 用語를 定義하면, 再水着溫度는 溫度가 급격히 下降하는 溫度曲線에 각각 접하는 接線의 交點에 해당되는 溫度이며, 再水着速度는 熱電對부착 지점간의 距離를 再水着時間差로 나누므로써 구해진다.<sup>16)</sup>

4. 實驗結果 및 考察

4.1. 熱傳達係數

再水着熱傳達現象을 파악하기 위하여 熱傳達係數는 實驗에서 測定된 加熱管의 溫度變化曲線을 이용하여 lumped parameter 方法으로 管壁에서의 에너지方程式을 세워서 구하였다. 즉,

$$q = \frac{r_o^2 - r_i^2}{2r_i} \left( \dot{q} - \rho c \frac{dT_w}{dt} \right) - q_i \cdot \frac{r_o}{r_i} \tag{13}$$

여기서 輻射熱과 軸方向傳導에 의한 熱流束은 本 實驗範圍에서 무시할 수가 있으므로 고려하지 않았다. 式(13)에서 內部熱發生率  $\dot{q}$ 는 試驗部에 공급된 電流를 測定하여 구하였고, 大氣로 損失된 熱流束  $q_i$ 는 實驗하기 전에 定常狀態에서 미리 測定한 값을 이용하였다. 이제 式(13)에 있는  $dT_w/dt$ 에 實驗에서 測定한 초당 溫度變化의 값을 代入하면 流體로 전달된 熱流束을 구할 수 있으므로 熱傳達係數는 式(14)로 구하였다.

$$h = q / (T_w - T_c) \tag{14}$$

Fig. 5는 160cm 높이에 있는 熱電對(T/C8)에서 測定된 溫度曲線에 해당되는 熱傳達係數의 時間에 따른 變化와 예상되는 流動樣式을 한 예로써 보여주고 있다. 이렇게 구한 熱傳達係數값을 이용하여 注水速度, 서브쿨링度, 初期壁溫度, 熱發生率等이 再水着速度에 미치는 影響을 評價하였다.

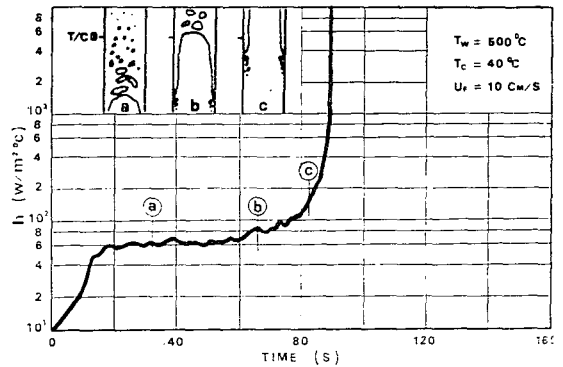


Fig. 5 Variation of the heat transfer coefficients with time during reflooding

Fig. 6은 試驗部를 加熱시킨후 冷却水를 注入하기 직전에 供給電源을 차단한 경우 壁溫度의 時間에 따른 變化曲線을 한 예로써 보여주고 있다. 이 그림을 통하여 같은 간격으로 부착된 熱電對地點의 軸方向에 따른 再水着時間의 간격이 같으므로 再水着前線이 일정하게 상승하고 있음을 알 수 있다. 모든 實驗에서 같은 경

향이었으므로 理論解析에서 熱發生이 없는 경우, 再水着 速度가 일정하다고 假定하는 것은 타당하다고 볼 수 있다.

그러나 再冠水過程에서 熱發生이 있는 경우는 없는 경우와 달리 軸方向에 따라 再水着速度가 일정하지 않다는 것을 Fig. 7에서 보여 주고 있으며, 이 경우에는 豫冷却에 의한 壁溫度減少는 熱發生으로 인해 둔화되고 冷却水는 많은 熱을 흡수하여 서브쿨링度가 심하게 감소되므로 試驗部의 上部쪽으로 갈수록 再水着速度가 줄어들고 있음을 뚜렷이 볼 수 있다.

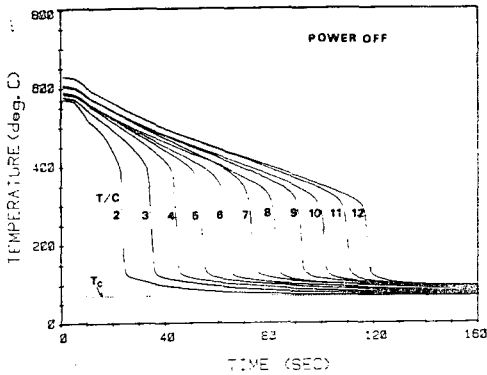


Fig. 6 Wall temperature histories at the various elevations without power

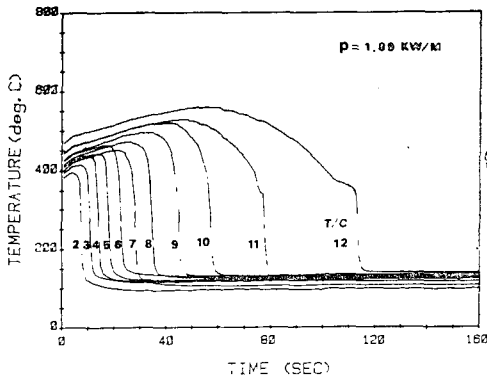


Fig. 7 Wall temperature histories at the various elevations with power

大氣壓下에서 수행된 實驗에서 注入冷却水가 많을수록, 즉 注水速度가 증가할수록 再水着速度가 증가한다는 것은 Yamanouchi<sup>3)</sup>와 Chung等<sup>17)</sup>에 의해 밝혀진 바 있다. Gaul과 Chung<sup>18)</sup>은 再水着前線에 있는 冷却水의 서브쿨링度가 1~2°C차이에 의해서 再水着이 되고 안되고가 결정된다고 보고한 바 있는데, 이것은 再水着速度에 미치는 注水速度의 영향은 서브쿨링度의 영향과 동시에 고려되는 것이 타당하다는 것을 의미한다. 그러나 실제로 再水着 前線에 있는 冷却水의 서브

쿨링度는 測定이 불가능하므로 注入冷却水의 서브쿨링度를 일정하게 유지시킨 후 注水速度만의 영향을 實驗해본 結果 모든 實驗條件에 걸쳐서 注水速度가 증가할 때 再水着 速度가 증가한다는 것을 Fig. 8을 통하

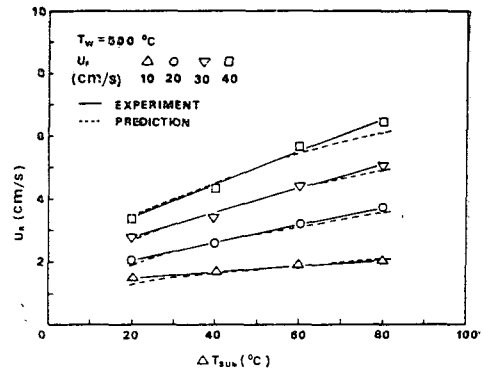


Fig. 8 Effect of inlet subcooling and flooding rate on rewetting velocity

여 알 수 있다. 이 그림에서 點線으로 표시한 것은 4.2에서 提示된 相關式을 이용하여 解析한 結果인데 實驗 結果와 대체로 잘 맞고 있다. 注水速度가 증가할수록 再水着速度가 증가하는 이유는 注水速度의 증가로 再水着 前線부근의 接水地域에서 臨界熱流束이 증가되므로 軸方向熱傳導가 좋아져 乾燥地域의 壁溫을 再水着溫度에 빨리 도달시키게 되어 再水着前線의 상승을 촉진시키기 때문이라고 생각된다. 이와 아울러 注水速度가 빠를수록 冷却水 서브쿨링度의 減少가 줄고 이로 인해 膜沸騰領域에서의 熱傳達係數가 Fig. 9에서 보인 바와 같이 다소 커지므로 再水着 速度가 증가하게 된다.

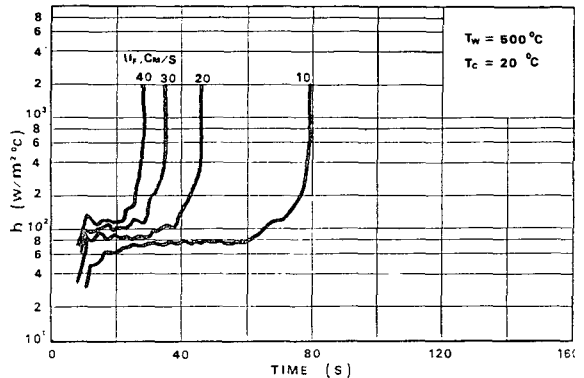


Fig. 9 Effect of flooding rate on the heat transfer coefficient

입구측 서브쿨링度가 증가 할수록 再水着 速度가 증가하고 이런 경향은 注水速度가 증가할수록 더욱 뚜렷이 나타나고 있음을 Fig. 8에서 볼 수 있다. Fig. 10은

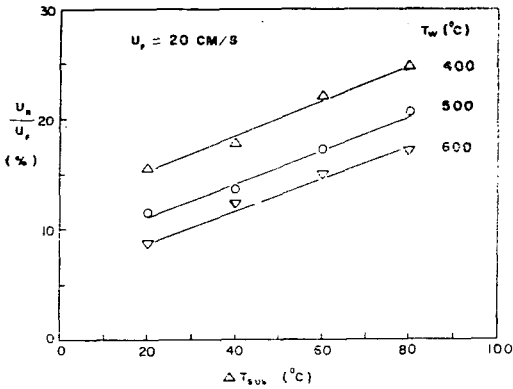


Fig. 10 Effect of initial wall temperature on rewetting velocity

서브쿠올링도에 따른 再水着 速度와 注水速度의 比를 나타내고 있다. 서브쿠올링도에 따라 速度比가 선형적으로 증가하고 있는데 이는 모든 壁溫度에 대한 서브쿠올링도의 영향이 일정하다는 것을 뜻한다. 加熱管에 注入되는 冷却水溫度가 낮을수록 豫冷却地域에서의 熱傳達係數가 높게 나타나고 있는 것을 Fig. 11에서 볼 수 있다.

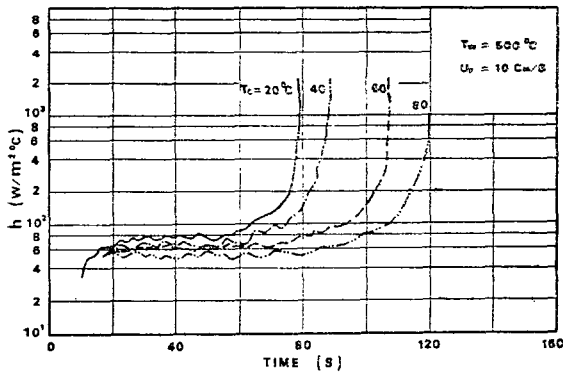


Fig. 11 Effect of inlet water temperature on the heat transfer coefficient

初期壁溫度가 높을수록 壁의 冷却이 늦어져 再水着 速度가 減少한다는 것을 Fig. 8을 통하여 알 수 있다. 이는 壁溫度가 높을수록 乾燥地域의 熱이 再水着地域으로 전달되어 再水着溫度까지 冷却되는데 時間이 많이 소요되고, 또한 再水着地域에서 冷却水는 더 많은 熱을 흡수하므로 서브쿠올링도가 떨어지기 때문이다. Fig. 12는 試驗部 出力에 대한 再水着速度의 變化의 程度를 나타내고 있는데 出力이 증가하면 再水着速度는 減少하는 경향을 보이고 있다. 또한 實驗值의 外挿法에 의해서 出力이 증가하면 速度가 0으로 수렴하는 즉, 再水着前線이 상승하지 않는 出力이 존재한다는

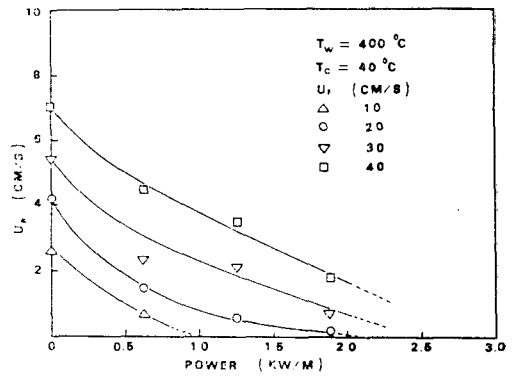


Fig. 12 Effect of power input on rewetting velocity

것을 알 수 있다. 이러한 出力을 臨界出力이라고 하면 注水速度가 증가할수록 臨界出力은 증가한다. 이러한 데이터는 最適注水速度를 선정하는 基準이 될 수 있다.

#### 4.2. 熱傳達係數 相關式

일반적으로 再水着速度의 解에는 2個의 未知數 즉 熱傳達係數와 再水着溫度가 포함된다. 그러나 이들에 대한 적절한 表現式이 아직도 없는 실정이므로 再水着 速度를 定量的으로 구하기 위해서는 實驗相關式이 필요하다. 熱傳達係數는 流量, 서브쿠올링도, 過熱壁溫度, 壓力등의 函數라고 볼 수 있다. 그러나 本 實驗을 통하여 理論解에 포함되지 않은 注水速度와 서브쿠올링도가 再水着速度에 큰 영향을 미치는 것을 알았으므로 熱傳達係數를 다음과 같이

$$h = a U_F^m \cdot \Delta T_{sub}^n \tag{14}$$

로 相關시켰다. 또 하나의 未知數인 再水着溫度는 研究者마다 그 값을 달리 취하고 있는데 여기서는 260°C로 일정하게 두었으며 이는 測定再水着溫度 중에서 流動에 의해 영향받지 않은 最少의 再水着溫度에 해당된다. 式 (14)의 常數를 구하기 위하여 이 式을 再水着速度 理論解에 代入하고, 實驗으로 測定한 再水着速度값을 代入하면 最少自乘法으로 常數가 구해진다. 이렇게 구한 常數는  $a=4.512 \times 10^5$ ,  $m=0.775$ ,  $n=0.431$ 이다.

本 相關式을 이용하여 계산한 再水着速度와 實驗값을 비교한 結果 모든 데이터는  $\pm 15\%$ 範圍에 속하고 있다는 것을 Fig. 13을 통하여 볼 수 있다. 本 相關式으로 이미 수행된 바 있는 스테인레스鋼管의 實驗結果<sup>19)</sup>에 적용시켜 비교한 結果 Fig.14와 같이 대부분  $\pm 20\%$ 에 속하고 있다.

Fig. 15는 形態係數가 다른 管의 경우, 注水速度에 대한 再水着速度의 變化를 비교하여 보여 주고 있다. 材質에 따른 영향은 크지 않으므로 무시하면 단순히

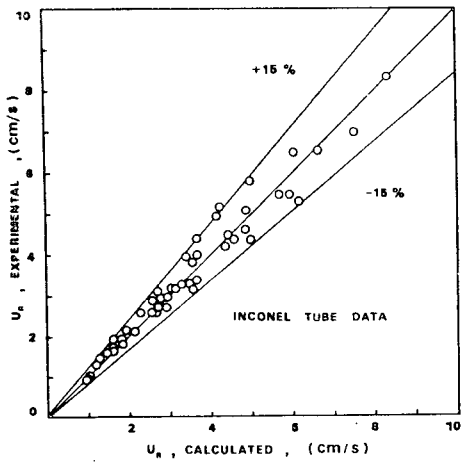


Fig. 13 Comparison of rewetting velocities calculated by present correlation with inconel tube data

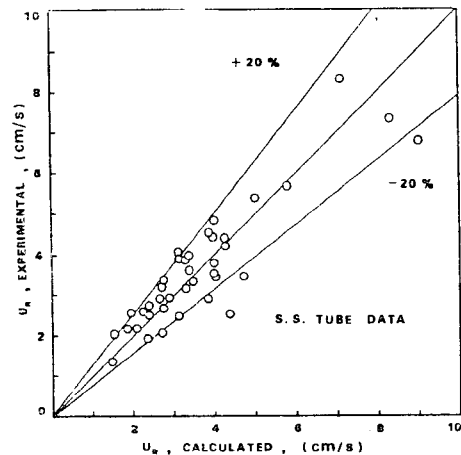


Fig. 14 Comparison of rewetting velocities calculated by present correlation with stainless steel tube data (Ref. 19)

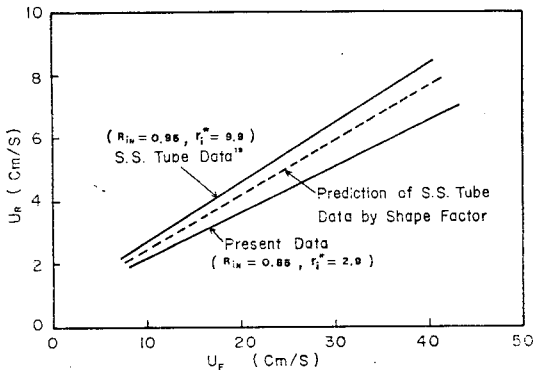


Fig. 15 Prediction of shapefactor effect on rewetting velocity

관의 形態가 다르므로 再水着速度가 차이가 난다고 볼 수 있다. 스테인레스鋼管의 再水着 速度<sup>19)</sup>가 인코넬관의 값보다 약 20% 빠르게 나타나고 있는데 이런 경향은 理論에 포함된 形態係數만으로 速度를 비교하여도 그림에 點線으로 표시된 바와같이 豫測할 수 있다. 만약 形態係數가 理論에 포함되어 있지 않으면 形態에 따른 再水着速度의 차이를 豫測할 수가 없다. 따라서 形態係數를 고려하게 되면 半徑과 두께가 다른 管의 再水着 速度解析에 본 熱傳達係數 相關式을 적용할 수가 있다.

### 5. 結 論

原子爐 事故時 爐心에서 일어나는 再水着 熱傳達에 관한 理論解析 및 單一管으로 模擬한 實驗을 통하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

- 1) 再水着 速度의 2次元解에는 形態係數가 포함되어 있으므로 管크기에 따른 速度變化를 豫測할 수 있다.
- 2) 再水着 速度의 定量的 解析을 위하여 再水着 熱傳達係數를 式 (14)와 같이 注水速度와 서브쿨링도의 函數로 나타낸 相關式을 얻었다.
- 3) 再水着 速度는 注水速度와 서브쿨링도가 증가할수록 증가하고, 壁溫도와 熱發生率이 높을수록 減少하는 傾向을 나타낸다.
- 4) 管內의 熱發生이 없는 경우, 管의 높이에 따른 再水着 速度는 일정하였다.

### 參 考 文 獻

- (1) J.G. Leidenfrost, "On the Fixation of Water in Diverse Fire, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 9, pp. 1153-1166, (1966)
- (2) 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)
- (3) A. Yamanouchi, "Effect of Core Spray Coolant in Transient State after Loss of Coolant Accident", J. Nucl. Sci. Tech. 5 (11), (1968)
- (4) R.B. Duffey and D.T.C. Porthouse, "The Physics of Rewetting in Water Reactor Emergency Core Cooling", Nucl. Eng. Des. 25, pp. 379-394 (1973)
- (5) J.M. Blair, "An Analytical Solution to a 2-



- Dimensional Model of the Rewetting of a Hot Dry Rod", Nucl. Eng. Des. 32, pp.159—170 (1975)
- (6) H.C. Yeh, "An Analysis of Rewetting of a Nuclear Fuel Rod in Water Reactor Emergency Core Cooling", Nucl. Eng. Des. 34, pp.317—322 (1975)
- (7) K.H. Sun, G.E. Dix and C.L. Tien, "Effect of Precursory Cooling on Falling-Film Rewetting", J. of Heat Trans., Trans. ASME 97 (1975)
- (8) S.S. Dua and C.L. Tien, "Two-Dimensional Analysis of Conduction-Controlled Rewetting with Precursory Cooling", J. Heat Trans., Trans. ASME 98, pp.407—413 (1976)
- (9) M.H. Chun and W.Y. Chon, "Analysis of Rewetting in Water Reactor Emergency Core Cooling Inclusive of Heat Transfer in the Unwetted Region", ASME Paper No. 75-WA/HT-32(1975)
- (10) J.G.M. Andersen and P. Hansen, "Two-Dimensional Heat Conduction in Rewetting Phenomenon", Report NORHAV-D-6 Danish Atomic Energy Commission Research Establishment, Risø, Denmark (1974)
- (11) M.W.E. Coney, "The Calculation of the Rate of Rewetting of Hot Fuel Rods by Emergency Cooling Systems in Water Reactors", Nucl. Eng. Des. 31 (2), pp.246—257 (1974)
- (12) C.L. Tien and L.S. Yao, "Analysis of Conduction-Controlled Rewetting of a Vertical Surface", J. Heat Transfer 97, pp.161—165 (1975)
- (13) H. Bonakdar and E.V. McAssey, "A Method for Determining Rewetting Velocity under Generalized Boiling Conditions", Nuc. Eng. Des. 66, pp.7—12 (1981)
- (14) E. Oliveri et al., "A New Correlation for Quench Front Velocity", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 25, pp.1589—1593 (1982)
- (15) 李永煥, "非常爐心冷却系統에서의 再冠水에 관한 實驗的 研究", KAERI/154/AR-13/79 (1979)
- (16) Y. Lee and W. J. Chen, "Effect of Flow Channel Orientation on Rewetting Phenomenon", ASMe Paper No. 78-WA/HT-31 (1978)
- (17) M.K. Chung, Y.W. Lee and J.H. Cha, "Experimental Study of Rewetting Phenomena", J. Korean Nucl. Soc., Vol. 12, No. 1 (1980)
- (18) H.P. Gaul and M.K. Chung, "Wandtemperaturemessung mit Unterschiedlich Instrumentierten Heizstäben", Kraftwerk Union Report No. KWU R 513/22/81 (1981)
- (19) 鄭文基, "單一加熱管에서의 再冠水熱傳達에 관한 研究", 高麗大學校 大學院, 工學碩士學位論文 (1979)