

## 技術情報

# PWR 熱水力設計方法

開 發 部

### 目 次

1. 序 言
2. 改良 COBRA3-C code
  - 2.1 改良 COBRA3-C code의 特徵
  - 2.2 基礎方程式
  - 2.3 境界條件
  - 2.4 model 및 相關式
3. 解析手法
  - 3.1 概 要
  - 3.2 爐心領域의 解析
  - 3.3 hot assembly 解析
  - 3.4 hot channel 解析
4. 改良 COBRA3-C code의 實證
5. 參考文獻

## 1. 序 言

本書는, 改良 COBRA3-C code를 사용한 PWR熱水力設計 方法과 그 評價에 關해서 정리한 것이다.

改良 COBRA3-C code는, PWR 爐心을 垂直平行한 水路의 모임이라고보고 各水路 에서의 冷却材의 局所條件 및 DNB比(DNBR)를 계산하는 code이다.

계산은, 各水路를 軸方向으로 細分한 control volume 에

- a. 質量保存法則
- b. 運動量保存法則
- c. energy 保存法則

을 적용해서 얻어지는 連立方程式을 인프리트하게 풀므로서 行해진다.

이때, 各水路間의 冷却材亂流 混合과 橫流를 고려한다.

또, 냉각재의 void model, 壓損增倍 係數의 設定數에 대해서는 PWR의 조건에 적합한 相關式을 사용하고 있다.

DNBR의 계산은, 改良 COBRA3-C code 에 서 얻은 hot channel의 局所熱 水力條件을 W-3 相關式에 適用해서 行한다. 이때의 hot channel의 熱水力 조건에는, 燃料棒이나 pellet 의 製作公差, 照射變形 및 核計算 誤差등의 여러가지 不確因子가 고려된다.

改良 COBRA3-C code를 사용한 熱水力設計法의 妥當性에 대해서는 PWR 조건을 想定한 여러가지의 爐外 시험 data의 解析으로서 뒷바침 되고 있다.

## 2. 改良 COBRA3-C code

### 2.1 改良 COBRA3-C code의 特徵

改良 COBRA3-C code는, PWR의 爐心熱水力 設計와 熱水力 實驗 data 등의 解析을 목적으로한 code이다.

本 Code에 의해서, 定常 및 非定常 狀態에서

의 爐心冷却材流量, enthalpy 및 DNBR의 3次元 特性을 계산할 수가 있다.

原版의 COBRA3-C code (文献 1)부터의 主要한 改良點은,

(1) PWR조건에 적합한 2相流 相關式을 받아들였는 것.

(2) 解析体系 外部境界에서의 橫流가 고려할 수 있다는 것.

後者の 改良에 의해 hot channel解析時에 爐心解析에서 얻어진 hot assembly와 인접 集合體間의 橫流의 영향이 고려될 수 있게 되었다. 이 결과 PWR 설계에서 주목하는 hot channel의 熱水力 特性은, 爐心 全體의 冷却材 舉動에 應해서 解析된다.

COBRA3-C는, 4次元 冷却材熱水力 特性의 解析code로서 넓이 인정되고 있으나, 앞에서 말한 改良에 加해서 PWR條件에서의 實測 data에 의한 實證을 行하여 改良 COBRA 3-C code의 PWR 熱水力 設計 code로서의 妥當性이 확인되어 있다. 以下에 COBRA 3-C code의 特徵을 요약한다.

(1) 定常 및 非定常의 냉각재熱水力 特性을 解析한다.

(2) 下流側의 흐름의 擾亂의 영향이 上流 側에 나타나도록 境界值 問題로 해서 方程式을 풀고 있다.

(3) 亂流混摻 및 發散流의 影響을 고려하고 있다.

(4) 徑方間 運動量 方程式에 空間加速項이 들어 있으며, 橫流의 慣性效果가 고려되어 있다.

(5) PWR 熱水力 設計에 적합한 기능을 가지며, 다시 實證 data에 의한 뒷받침이 있다.

## 2.2 基礎方程式

冷却材의 流量 및 enthalpy分布는, 냉각재의 混摻을 고려한 數學 model로 부터 계산한다. 冷却材熱水力 諸量의 關係式은, control volume에 質量, 運動量 및 energy 保存法則을 적용해서 얻어진다.

### 2.2.1 數學 model의 假定

基礎式을 導入할때에 다음의 假定을 設置한다.

1) 2相流 model

沸騰狀態의 水路에서는, 氣液 各相이 각각 一定한 物性 및 速度를 가지는 것으로 假定해서 1次元 2相分離 model를 사용한다.

2) void率

enthalpy, 壓力 및 流量의 關數로서 3次元各位置와 時間마다 定義한다.

3) 亂流混摻

인접水路間의 亂流混摻에서는 流體의 正味の 交換이 없는 것으로 한다. 또 亂流混摻에 의한 橫流는, 發散流에 重疊되는 것으로 한다.

4) 音速傳播에 의한 影響을 無視한다.

5) 發散流

發散流에 의한 流速은, 軸方向 流速과 비교해서 작은 것이라고 假定한다. 이 假定에서 橫流가 인접水路間에 發生한 경우에 그 方向性이 水路에 流入하고 이 時點에서 잃어버리는 것으로서 처리할 수 있으며, 또 水路間 gap에 垂直인 徑方向 運動量束의 差는 無視할 수 있다.

### 2.2.2 數學 model의 式

計算体系 軸方向 斷面에서의 mode 郡에 對해 다음의 連立 方程式이 얻어진다. 式中 { } 은 vector를, [ ]는 行列을 나타낸다. 行列에 대해서는 [S]以外的은 모두 對角行列이다.

連續式

$$\{A\} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial m}{\partial x} \right\} = - [S]^T \{W\} - \{W^B\} \quad (1)$$

energy 式

$$\begin{aligned} \left\{ \frac{m}{u^*} \frac{\partial h}{\partial t} \right\} + \left\{ m \frac{\partial h}{\partial x} \right\} &= \{q'\} - [S]^T [\Delta h] \\ &\{W'\} - [S]^T [\Delta t] \{C_T\} \\ &+ [h] [S] \{W\} - [S] [h^*] \{W\} \\ &- [\Delta h^B] \{W'\} + [h^B] \{W^B\} - [h^B *] \{W^B\} \end{aligned} \quad (2)$$

軸方向 運動量 方程式

$$\begin{aligned} \left\{ \frac{I}{A} \frac{\partial m}{\partial t} \right\} - \left\{ 2u \frac{\partial \rho}{\partial t} \right\} + \left\{ \frac{\partial p}{\partial x} \right\} &= \{a'\} + \\ [A]^{-1} [2u] [S] - [S] [u^*] \{W\} &\quad (3) \end{aligned}$$

$$\{a'\} = - \left\{ \left( \frac{m_j}{A_j} \right)^2 \left( \frac{v f \phi}{2D} + \frac{K v'}{2\Delta x} + A \frac{\partial(v'/A)}{\partial k} \right) + \rho \cos \theta \right\} - f_T [A]^{-1} [S]^T [\Delta u] \{W'\} + [A]^{-1} \{[2u^B] - [u^{B*}]\} \{W^B\} - f_T [A] [\Delta u^B] \{W'^B\} \quad (4)$$

徑方向 運動量 方程式

$$\left\{ \frac{\partial W}{\partial t} \right\} + \left\{ - \frac{\partial(u^{*W})}{\partial x} \right\} + \left( \frac{S}{I} \right) \{CW\} = [S] \{p\} \quad (5)$$

基礎式(1)~(5)에서 未知量은,  $\{m\}$ ,  $\{p\}$ ,  $\{h\}$ 이다.

計算体系에서, 徑方向 node數를 I, node間的 境界數를 K個로 하거나는 I個의 連續式, I個의 軸方向 運動量式, I個의 energy式 및 K個의 徑方向 運動量 方程式의 合計 3 I+K個의 式이 얻어진다. 이에 對해 未知量도 3 I+K個가 된다.

上式中的 諸變數 및 記號의 說明을 以下에 記述한다.

- $\rho$  冷却材密度
- A 流路斷面積
- m 軸方向流量
- W 内部計算 node境界에서의 發散流
- $W^B$  計算体系 最外周境界에서의 發散流
- h enthalpy
- $\Delta h$  隣接 node의 enthalpy 差로서, node境界에 對해 定義한다.
- $\Delta T$  인접 node의 溫度差로서 node境界에 對해 정의한다.
- $W'$  内部계산 node境界에서의 亂流混合量
- $C_T$  내부계산 node境界에서의 冷却材熱傳導度
- $h^*$  發散流 W에서 移行하는 enthalpy (인접 node i와 j로서  $W_{ij}$ 의 正負에 의해  $h_i$  또는  $h_j$ 가 된다.)
- $W'^B$  計算体系 最外周계산 node와 体系外 水路와의 亂流混合量
- $\Delta h^B$  計算体系 最外周계산 node와 体系外 水路와의 enthalpy 差
- $h^{*B}$   $W^B$ 의 正負로서  $h^*$ 와 같이 決定되는 enthalpy
- $h^B$  計算体系 外部의 enthalpy
- $\rho$  壓力
- u momentum velocity
- $u''$  發散流 W에서 移行하는 momentum velocity ( $W_{ij}$ 의 正負에서  $u_i$  또는  $u_j$ )
- $u^B$  計算体系 外部의 momentum velocity
- $u^{B*}$   $W^B$ 에서 移行하는 momentum velocity ( $W^B$ 의 正負에서  $u^*$ 와 같이 定해진다.)

- $\nu$  比体積
- f 마찰損失係數
- $\phi$  2相流 增倍係數
- K 支持格子 또는 nozzle의 壓損係數
- $u'$  輸送運動量의 比体積
- $f_T$  亂流運動量 因子
- (S/I) rod gap와 subchannel間 거리의 比
- [S] 着目하는 node i와 인접 node j를 關係 지우는 matrix (I×k)

### 1) 連續의 式

式(1)의 右邊은 發散流이며, 計算 node 에서의 正味의 流量 變化를 나타낸다. 亂流混合에서는, 正味자 質量 交換이 없으므로 式中에 나타나지 않는다. 密度의 時間 變化를 표시하는 項은, 流体의 膨脹 또는 收縮에 의한 流量 變化를 표시한다.

### 2) energy 式

式(2)의 右邊은, 發熱에 의한 energy 上昇과 亂流混合, 熱傳導 및 發散流에 의한 energy 移行을 포함한다.

亂流混合  $W'$ 는, 渦擴散과 相似한 것이며, 實驗에서 定해지는 定數를 사용해서 定義한다.

發散流 W로서 移行하는 enthalpy  $h^*$ 는, W의 方向性으로서 定해진다.

### 3) 軸方向運動量式

式(3)의 右邊은, 軸方向壓力 勾配를 支配하는 項을 포함하며, 여기서 S는 橫流의 項과 마찰, 加速損失 및, 水頭에 의한 壓力 勾配의 項이다.

亂流混合의 項은, 亂流應力의 近似이며  $f_T$ 는 enthalpy와 運動量의 亂流輸送에 關하는 差違를 補正하는 因子이다.

發散流의 項은, 인접 node間에서의 流速의 差에 의한 運動量 變化를 나타낸다.

### 4) 徑方向運動量式

徑方向 運動量 方程式은, 橫流의 時間과 空間의 加速項과 마찰 및 壓力差의 項으로서 된다.

(S/I)는, 마찰 및 壓力項의 慣性項에 對하는 重要度를 표시하는 parameter이다.

慣性項의 中에서 橫流에 의한 流速이 軸方向 流速에 比해서 작다고 하는 假定부터

$\frac{\partial u W_{ij}}{\partial y}$ 를 除外하고 있다. 이 假定에 의해 橫流의 方向性은 인접 node間 만으로서 고려하고

있다. 左邊第2項은, Kahn 등의 橫流 低抗相關式에서 보는 慣性効果(水路 下流側에서 橫流가 持續하는 것)의 原因이 된다.

### 2.3 境界條件

前項에서 유도한 基礎式을 다음의 境界條件으로서 用다.

表 2.1 境界條件

境界	條件
入口部	(1) 冷却材入口 溫度 또는 enthalpy 分布 (2) 冷却材入口 流量分布 (3) 橫流하는 流量은 零
周邊境界部	(1) 境界가 物理的인 障壁 또는 對稱面 境界部일때 橫流하는 流量은 零 (2) 高温集合體의 subchannel 解析 인접集合體와의 流量, enthalpy 交換量
出口部	(1) system 壓力

### 2.4 MODEL 및 相關式

#### 2.4.1 表面熱傳達係數

非沸騰 領域에서의 燃料棒 表面의 熱傳達 係數는 Dittus-Boelter의 式을 用한다.

$$h = 0.023 (K/De) Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (6)$$

여기서

- K 물의 熱傳導度 (Btu/hr·ft<sup>2</sup>·°F)
- De 等價直徑 (in)
- Re Reynolds 數
- Pr Prandtl 數

또, 沸騰 領域에서는 Thom의 式을 用한다.

$$T_c = T_{sat} + \frac{0.072 Q''^{0.5}}{\exp(P/1260)} \quad (7)$$

여기서

- T<sub>c</sub> 被覆管 表面溫度 (°F)
- T<sub>sat</sub> 冷却材의 飽和溫度 (°F)
- Q'' 表面熱流束 (Btu/hr·ft<sup>2</sup>)
- P 壓力 (psia)

#### 2.4.2 void 率

沸騰 過程을 다음의 3領域으로 나누어서 void 率을 評價한다.

- ① 高 subcool 沸騰領域
- ② 低 subcool 沸騰領域
- ③ 體積沸騰領域

高 subcool 沸騰 領域은 發生한 氣泡가 傳達壁面에 附着하고 있는 領域이다. 이 영역에서는 冷却材 平均 subcool가 크기 때문에 發生한 氣泡는 傳熱壁面上에서 凝縮해 버린다.

低 subcool 沸騰 領域에서는, 液體의 加熱이 進行되어 傳熱面을 離脫한 氣泡는 冷却材 全体로서는 未飽和일지라도 一定期間 存在할 수 있다. 體積沸騰 領域에서는 冷却材 平均溫度가 沸點을 넘어 全体로서 沸騰이 發生하는 狀態이다.

##### 1) 表面沸騰開始點

冷却材 平均溫度는, 沸點以下이나 強制 對流 傳達式으로 계산되는 被覆管 表面 溫度가 表面 沸騰時의 被覆管 表面 溫度計算值와 같아지는 點을 沸騰開始點으로 한다. 表面沸騰熱 傳達式은 Thom의 式을, 強制對流 熱傳達式은 Dittus-Boelter 式을 用한다.

##### 2) 高 subcool 沸騰 領域의 void 率

Maurer가, Griffith et al의 實驗式을 一部修正한 다음의 相關式을 用한다. (文獻 2)

$$\alpha = a \cdot Ph/A \quad (8)$$

$$a = \left[ \phi - h_{DB} (T_w - T_B) \right] Pr K / \{ 1.07 h_{DB}^2 (T_{sat} - T_B) \} \quad (9)$$

但, α void 率

- a 傳熱面上의 void 率 (in)
- Ph 單位길이 當의 發熱面積 (in)
- A 流路斷面積 (in<sup>2</sup>)
- T<sub>w</sub> 壁面溫度 (°F)
- T<sub>B</sub> 冷却材 平均溫度

$$TW = T_{sat} + 60 (\phi/10^6)^{0.25} e^{-P/900}$$

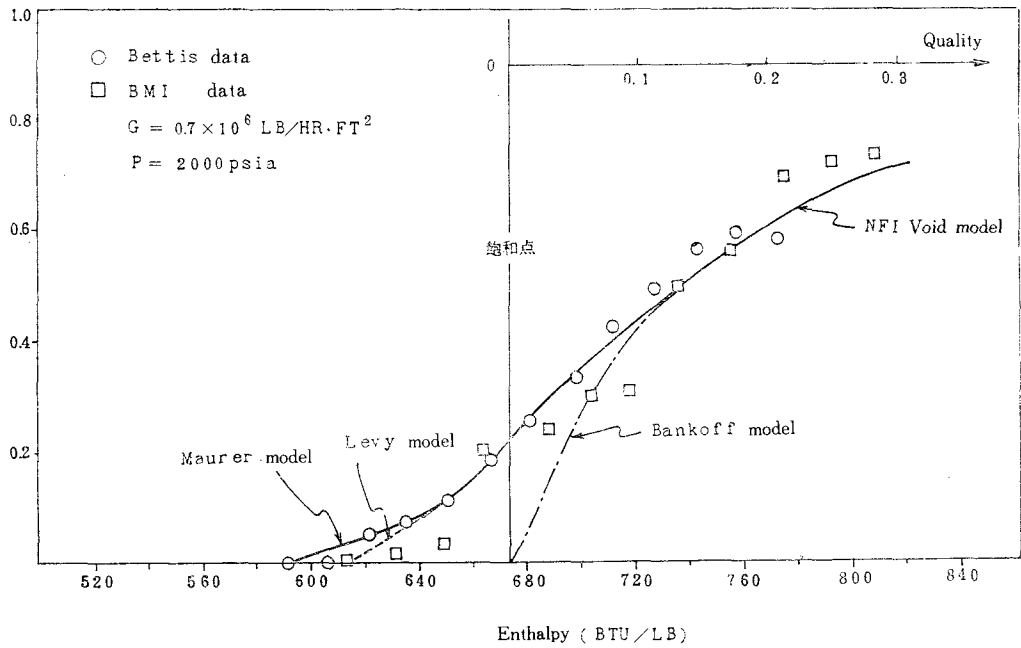
本領域의 上限은, Griffith 등의 실험 結果에 의 해 α=0.004in로 한다.

##### 3) 低 subcool 沸騰 領域의 void 率

低 subcool 沸騰 領域의 眞의 quality (熱的非平行衡 quality)를 算出하고, 이 quality부터 別途로 주어지는 void 率 相關式을 利用해서 void 率을 求한다. (文獻 3)

眞의 quality는, Levy式에서, void 率은 Ban-koff 式으로서 求한다.

$$\alpha = (0.71 + 0.0001P) / (1 + \frac{vq}{v_e} (1 - X_e) / X_e) \quad (10)$$



第 2.1 圖 實驗 data와 NIF Void model의 比較

$$X_e = X - X_d e^{(X/X_d - 1)} \quad (11)$$

$$X_d = -C_p \Delta t d / H_{fg} \quad (12)$$

$$\Delta t d = \phi / h_{DB} = 5Q \{ Pr + 1 + \ln(1 + 5Pr) + \frac{1}{2} \ln \left( \frac{Y_B^+}{30} \right) \} \quad (13)$$

$$Y_B^+ = \frac{0.015}{ue} \sqrt{\sigma De \cdot g / ue} \quad (14)$$

$$Q = \phi / C_p \cdot G \sqrt{f / 8} \quad (15)$$

- 但,  $u_g$  氣相比重量 (ft<sup>3</sup>/lb)
- $u_e$  液相比重量 (ft<sup>3</sup>/lb)
- $X_e$  眞의 quality
- $X$  熱平衡 quality
- $X_d$  氣泡離脫 開始點의 quality
- $\Delta t d$  氣泡離脫 開始點의 subcool (°F)
- $C_p$  定壓比熱 (Btu/lb. °F)
- $H_{fg}$  潛熱 (Btu/lb)
- $\sigma$  表面張力 (lb/ft)
- $ue$  液相粘性係數 (lb/hr·ft)
- $G$  質量速度 (lb/hr·ft<sup>2</sup>)
- $f$  摩擦係數

4) 體沸騰 領域의 void率  
 3) 에서 표시한 Bankoff의 式을 使用한다.  
 (式(10))

5) 原燃工 void model와 實驗值의 比較  
 Bettis 및 BMI (文獻2, 3)에서의 實驗 data와

原燃工의 void model에 의한 計算 結果의 比較  
 를 第 2.1圖에 표시한다.

이 圖를 以下에 要約한다.

① BMI와 Bettis의 兩 data는 잘 一致하고  
 있으며, 兩者의 data의 信賴性은 높다.

② void發生點 附近에서는, Maurer의 void  
 model와 實驗은 잘 一致하고 있다.

따라서 void相關으로서 原燃工 model를 使用  
 하는 것은 妥當하다.

### 2.4.3 壓力損失係數

(1) 軸方向 壓力損失

① 摩擦損失 係數(f)

Reynolds 數의 依存性을 고려한 式을 使用한  
 다.

$$f = A Re^B \quad (16)$$

燃料束에 의한 壓力損失의 測定 data부터 上式  
 中の 係數A, B가 결정된다.

② 支持格子 및 nozzle 部의 壓損係數

拘束部의 壓力損失은, 다음式으로서 評價한다.

$$\Delta p = \frac{K}{2g\rho} \left( \frac{m}{A} \right)^2 \quad (17)$$

壓力損失 係數K는, 實際 寸수 모형 燃料集合  
 體를 使用한 流水실험의 結果부터 求한다. K는

高 Reynolds 數領域 ( $\sim 3 \times 10^5$  以上)에서 一定하게 된다. PWR 爐心の 平均 Reynolds 數는 약  $4.3 \times 10^5$ 이며, Reynolds 數의 依存性이 거의 없는 領域이다.

(2) 徑方向 壓力損失 係數

다음에 표시한 徑方向 運動量 方程式에서 C가 徑方向 壓力損失 係數이다.

$$\left\{ \frac{\partial w}{\partial t} \right\} + \left\{ \frac{\partial (u^{*w})}{\partial x} \right\} + \left( \frac{s}{l} \right) \{ C \mid W \mid W \} = \left( \frac{s}{l} \right) [S] \{ p \} \quad (18)$$

설계에서는 壓損 係數 C에 關하는 感度 解析과, 實測 data의 解析 結果부터 다음의 値를 사용한다.

① subchannel 解析 (燃料棒 4本으로서 둘러싸인 水路를 1channel로 할 때)

$$C = 0.5$$

② 爐心 解析 (集合體 1體를 1channel로 할 때)

$$C = 0.5 \times N_c$$

但,  $N_c$  = 集合體 gap 數 (15 × 15 燃料에서는 15)

(3) 마찰損失 增倍係數 ( $f/f_{iso}$ )

다음의 void 領域마다 마찰損失 增倍係數를 사용한다.

① 單相流

加熱壁面 근방에서의 粘性 變化를 고려한

Esselman et al의 式을 사용한다. (文獻4, 文獻5)

$$f/f_{iso} = 1 - 0.001915 \Delta T f \quad (19)$$

$$\Delta T f = \phi / h_{DB} \quad (20)$$

② subcool void 領域

Bettis 實驗에 의한 式을 사용한다. (文獻5, 6)

$$f/f_{iso} = (1 - 0.0025 \Delta T) \{ 1 + 0.76 \left( \frac{G}{10^6} \right)^{0.666} \left( 1 - \frac{\Delta T}{0.766 \Delta T f} \right) \} \quad (21)$$

$$\Delta T = T_{sat} + 60 (\phi / 10^6)^{0.25} e^{-P/900} - T_B \quad (22)$$

③ 體沸騰 領域

2000psia에서의 Sher의 實驗 data (文獻6)에 따라서, 流量과 quality를 關數로 한 修正 Martineri-Nelson 式을 사용한다.

$$f/f_{iso} = \phi^2 LO - M - N \left( \frac{\phi^2 LO}{\phi LO - M - N} \right) \quad (23)$$

$$\phi^2 LO - M - N = \text{Exp} \{ [0.0054967 (\ln p)^2$$

$$- 0.0420123 \ln p - 0.0460659] \} (\ln X)^2$$

$$+ [ -0.0169938 (\ln p)^2 + 0.1018 \ln p + 0.374889] \ln X$$

$$+ [ -0.192039 (\ln p)^2 + 1.0184 \ln p + 4.99236] \} \quad (24)$$

$$\left( \frac{\phi^2 LO}{\phi LO - M - N} \right) = (3.645 \times 10^{-12} G^2 - 1.36858 \times 10^{-6} G - 1.52805) X^2$$

$$+ (3.646 \times 10^{-13} G^2 - 5.28258 \times 10^{-6} G + 4.82373) X$$

$$+ (1.55713 \times 10^{-14} G^2 - 8.59097 \times 10^{-8} G - 1.05403) \quad (25)$$

但,  $\phi^2 LO - M - N$  Martineri-Nelson 乘數

$$\left( \frac{\phi^2 LO}{\phi LO - M - N} \right) \text{ Martineri-Nelson 修正式}$$

X	quality	( )
P	壓力	(psia)
G	質量速度	(lb/hr·ft <sup>2</sup> )

#### 2.4.4 亂流 混合量

인접 subchannel i, j間에서의 亂流 混合量  $W_{ij}$ 는 次式으로서 표시한다.

$$W'_{ij} = TDC \times \bar{G} \times S \quad (26)$$

但,

TDC	亂流 混合係數	( )
$W_{ij}$	亂流 混合量	(lb/hr·ft)
$\bar{G}$	subchannel i, j의 平均 質量速度	(lb/hr·ft)
S	channel 間 gap	

亂流 混合量은, 支持格子의 구조등에도 영향을 받는다. 설계에서는, 混合實驗 結果를 解析하여 얻어진 TDC에 대해 過小評價한 TDC를 사용한다.

#### 2.4.5 DNB 相關式

DNB 相關式으로서 W-3 相關式과 軸方向 非一樣 熱流束 因子 및 修正 支持 格子 因子를 사용한다. 또 冷壁面을 가지는 simple cell에는 冷壁面 效果 因子를 적용한다. DNB 熱流束은 改良 COBRA 3-C에서 예측한 局所 冷却材 條件을 W-3 相關式에 적용시켜 評價한다. W-3 相關式은, THINC code에 의해 多數의 DNB 시험 data를 解析하여 개발된 것이다.

COBRA 3-C code와 THINC code의 DNB

豫測에 對한 同等性은, WH社 公開 data를(文獻 7) 改良 COBRA 3 - C로서 解析하여 實證하였다.

DNBR는 次式으로서 定義된다.

$$DNBR = \frac{Q''_{DNB, EU} \cdot CWF \cdot F'_s}{F \cdot Q''_{Loc}} \quad (27)$$

(1) W - 3 相關式 ( $Q''_{DNB, EU}$ )

$$\begin{aligned} \frac{Q''_{DNB, EU}}{10^6} = & \{ (2.022 - 0.0004302p) + (0.1722 \\ & - 0.0000984p) e^{(18.177 - 0.00412p) x} \} \\ & \times \{ (0.1484 - 1.596x + 0.1729x^2) \times | \\ & G/10^6 + 1.037 \} \times (1.157 - 0.869x) \\ & \times \{ 0.2664 + 0.8357e^{3151De} \} \times \\ & \{ 0.8258 + 0.000794 (H_{sat} - H_{in}) \} \quad (28) \end{aligned}$$

(2) 軸方向 非一樣熱流束 分布因子 (F)

$$F = C \times \frac{1}{Q''_{Loc} [1 - e^{-C_{1DNBR}}]} \int_0^{1DNBR} Q''(z) e^{-C_{1DNBR} z} dz \quad (29)$$

$$C = 0.15 (1 - x)^{4.31} / (G/10^6)^{0.478} \quad (30)$$

(3) 冷壁面因子 (CWF)

$$\begin{aligned} CWF = & 1.0 - Ru \{ 13.76 - 1.372e^{1.78x} - 4.732 \\ & (\frac{G}{10^6})^{-0.0535} - 0.0619 (\frac{p}{1000})^{0.14} \\ & - 8.509Dh^{0.107} \} \quad (31) \end{aligned}$$

$$Ru = 1 - De/Dh$$

(4) 支持格子因子 ( $F'_{s-L}$ )

$$\begin{aligned} F'_s = & 0.986 \{ (\frac{p}{225.896})^{0.5} (1.445 - 0.0371 \times L) \\ & (e^{(x+0.2)^2} - 0.73) \\ & + K_s \frac{G}{10^6} \cdot (\frac{TDC}{0.019})^{0.35} \} \quad (32) \end{aligned}$$

但,

$Q''_{Loc}$	燃料棒局所熱流束	(Btu/hr·ft <sup>2</sup> )
p	1次系壓力	(psia)
X	quality	(-)
G	冷却材質量速度	(lb/hr·ft <sup>2</sup> )
De	水力等價直徑	(in)
Dh	發熱等價直徑	(in)
Hsat	飽和enthalpy	(Btu/lb)
Hin	入口enthalpy	(Btu/lb)
$l_{DNB}$	沸騰開始點부터의 距離	(in)
L	發熱長	(ft)
TDC	熱擴散係數	(-)
$K_s$	支持格子間隔 補正因子	(-)

### 3. 解析方法

#### 3.1 概要

原子爐 熱水力 設計 code改良 COBRA 3 - C 를 사용한 경우의 DNB解析 手法에 對해서 표시한다. 熱水力 設計基準은, 爐心內의 hottest channel에서의 DNBR를 1.3이상으로 하는 것이다 이 基準이 滿足되며는, 95%의 信賴度로서 燃料 棒의 적어도 0.5%가 DNB를 일으키는 일이 없다.

DNB熱流束은, subchannel 解析 code로서 計算한 局所冷却材 條件에 W - 3 相關式을 적용해서 얻어진다.

局所冷却材 條件은, 燃料의 製作公差나 出力 分布의 不確性에 영향을 받으므로, DNB 解析에 있어서는 이들의 不確性的 評價나 影響의 파악이 重要하다. 이들을 고려한 DNB解析의 方法을 圖 3.1에 표시한다.

이 DNB解析 手法은 下記와 같은 特徵이 있다.

1) 冷却材流量, enthalpy 分布의 계산은 冷却 材의 混合 效果를 고려해서 行한다.

W - 3 相關式을 改良COBRB 3 - C code 에서 사용하는 것의 妥當性은, DNB試驗 data 등으로 서 實證되고 있다.

2) 燃料集合체를 1channel로 한 爐心 規模의 解析을 行하여 hot assembly의 流量 條件을 파악하고 다음에 hot assembly內의 subchannel 解析을 行하여 最小 DNBR를 산출한다. hot-channel 解析에서의 流量은, 1/8爐心 解析의 結果를 사용하고 있다.

3) 出力, 流量·流路 등의 不確性은 統計處理 또는 相乘處理하므로써 考慮한다.

改良 COBRA 3 - C code 에서는 이들의 不確 性度를 직접 계산조건으로서 入力하거나 또는 계산 結果에 不確性 因子를 乘해서 평가한다.

#### 3.2 爐心領域의 解析

##### 3.2.1 目的

1/8對稱 爐心에서, 集合체를 1水路로 하는

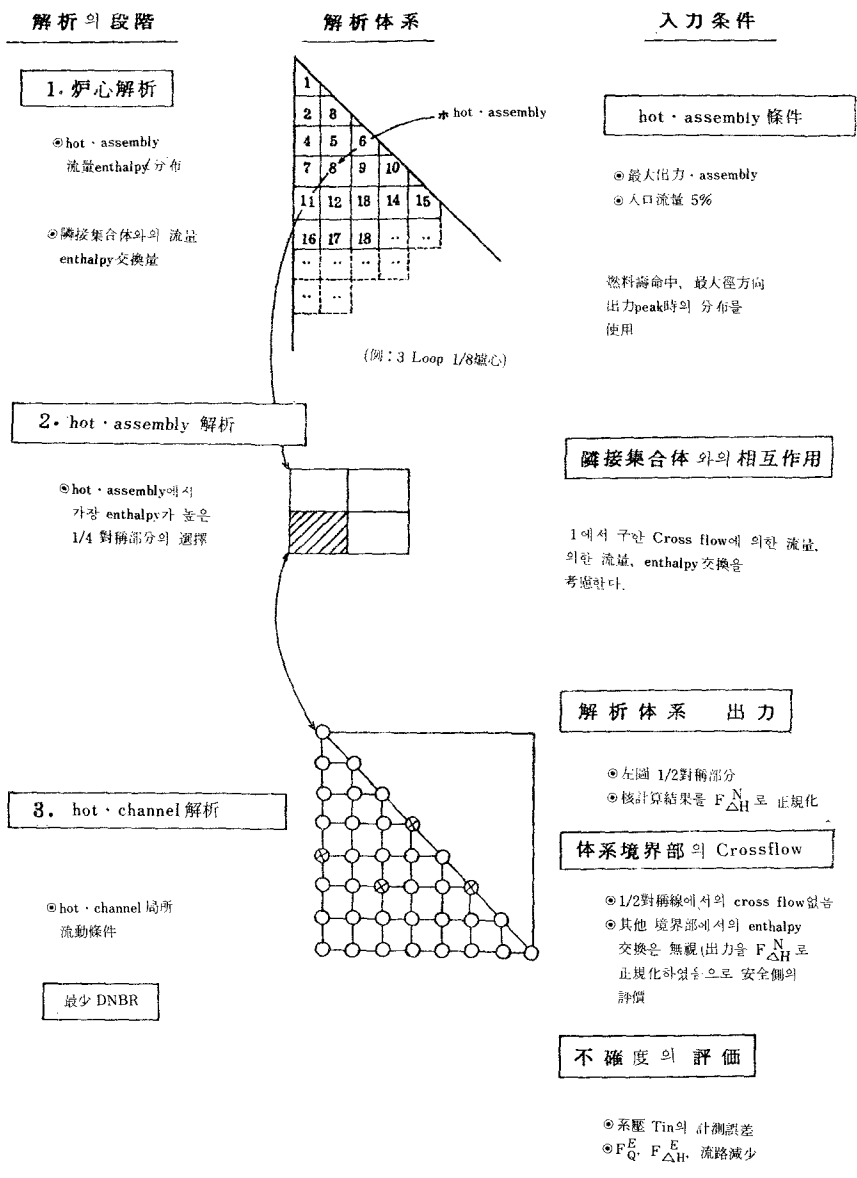


圖 3.1 DNB 解析의 方法

解析을 行하여 hot assembly 를 흐르는 냉각재의 enthalpy와 流量分布를 파악한다. hot assembly와 인접集合체間의 流量과 enthalpy의 交換量을 保存하고 그 後의 解析段階에서 境界條件으로서 使用한다.

### 3.2.2 解析條件

- (1) 計算體系  
集合체를 1channel로 하는 1/8對稱 爐心을 계산 체계로 한다.
- (2) 出力分布  
壽命中 徑方向 出力 peaking이 최대가 되는 出



力分布를 사용한다.

(3) hot-assembly 條件

① 出力

徑方向出力 peak가 최대가 되는 위치의 연료를 hot-assembly로 한다.

② 入口流量分布

hot-assembly의 入口流量을, 爐心 下部 plenum구조와 流動의 不確度를 고려하여 平均値의 5%減으로 한다.

(4) 計測誤差의 評價

① 冷却材入口 溫度: nominal値+4°F로 한다.

② system 壓 力: nominal値-30psia로 한다.

### 3.3 hot-assembly 解析

#### 3.3.1 目的

hot-assembly内를 1/4對稱部分으로 分割하고, 最高溫 部分의 流量과 enthalpy 分布를 파악한다. 入口流量 條件 및 各軸方向 높이에서의 인접연료集合체와의 運動量 및 enthalpy의 交換은 爐心領域의 解析에서 求한 値를 사용한다.

#### 3.3.2 解析條件

(1) 計算體系

hot-assembly를 計算體系로 하고 内部를 4 等分한 4channel model로 한다.

(2) 出力分布

hot-assembly의 1/4對稱部 마다에 核計算에서 얻어진 出力을 주어진다.

(3) 流水抵抗

爐心領域의 解析에 使用한, hot-assembly 의 入力値와 같은 値를 사용한다.

(4) 流路面積

爐心領域의 解析에 使用한 hot-assembly 의 入力値의 1/4을 各 channel의 流路面積으로 한다.

### 3.4 hot-channel 解析

#### 3.4.1 目的

hot-channel를 포함한 연료集合체의 全体的인 熱水力 計算 結果부터 hot-channel의 최소 DNBR를 解析한다. 이 解析에서는, 製作公差, 연료의 照射變形, 出力 分布의 不確度를 고려한다.

#### 3.4.2 解析條件

(1) 計算體系

hot-assembly 解析에서 얻어진 最高溫 1/4 對稱部를 圖3.1에 표시한 subchannel로 分割해서 解析한다.

(2) 出力分布

① 徑方向: 核 계산에서 求한 燃料棒 마다의 出力 分布를  $F_{\Delta H}$ 로 正規化한다.

② 軸方向: 1.55 cos 分布 (3 Loop爐) 또는 1.72 cos 分布 (2 Loop爐)

③ 出力分布에 關하는 安全側으로의 配置 爐心領域부터 hot-assembly 으로서의 解析을 通해서 本體系 에서의 冷却材流量은 爐心 全体的 냉각재 流量 配分의 結果가 살려져 있다.

따라서, 徑方向出力 分布를  $F_{\Delta H}$ 로 正規化 하므로서 enthalpy의 level는, 爐心領域의 解析結果보다도 높여져 있다.

또, 인접集合체부터의 橫流에 의한 enthalpy의 교환을 무시 했으므로 出力을  $F_{\Delta H}$ 로 正規化 하는 것이 엄하게 평가 되는 結果로 되어 있다.

(3) 不確度 係數의 處理法

최소 DNBR 가 發生하는 channel(hot channel)에 대해서 下記의 不確度를 고려한다.

① 熱流束의 不確度

pellet徑, 濃縮度, 密度 및 被覆管 外徑의 製造公差를 統計處理해서 局所熱流束의 3σ 까지의 不確度量을 算出한다.

이 結果를 개량 COBRA 3-C에 入力시켜 hot channel의 局所熱流束 및 enthalpy上昇 을 評價한다.

② 流路斷面積의 不確度

燃料棒의 外徑, pitch 및 屈曲등의 製造公差를 統計處理하여 95% 確率에서의 流路面積減少量을 算出한다.

이 結果를 改良 COBRA-3 C 解析의 hot channel 流路斷面積에 入力한다.

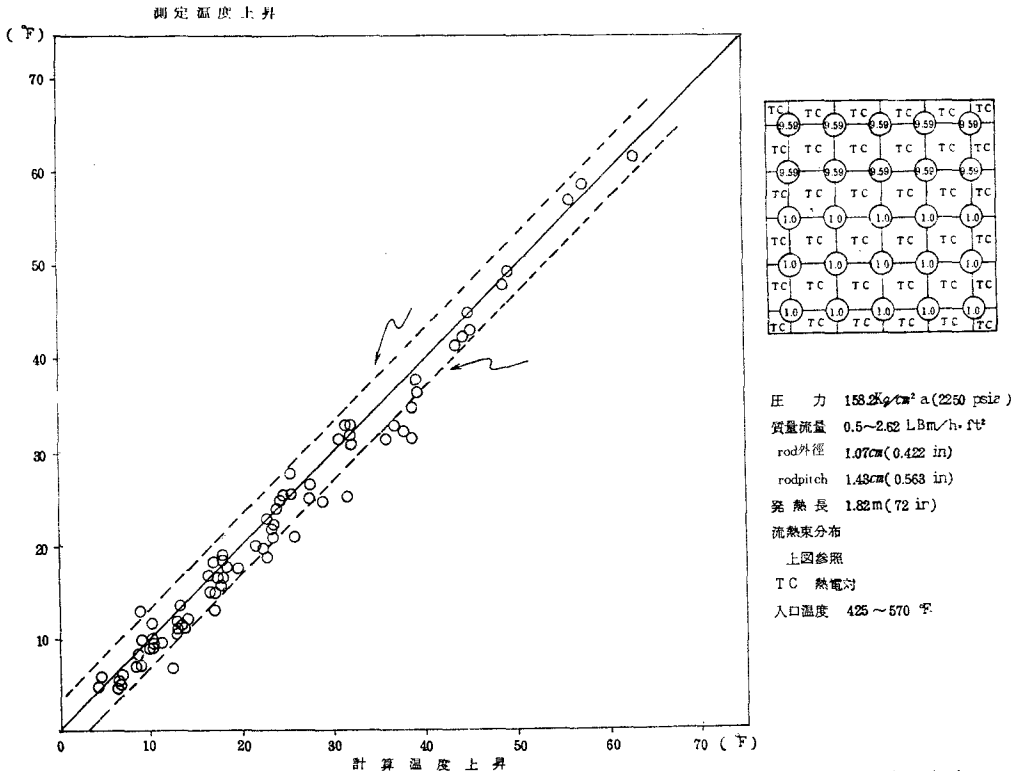
表 3.1에 熱水力 設計에서 고려하는 不確性因子와 그 處理法을 정리하였다.

## 4. 改良 COBRA3-C code 의 實證

PWR에서의 爐心解析 및 subchannel 解析에

表 3 .1 改良 COBRA3 - C 解析에서의 保守性

項 目	分 類	不確性量 또는 分布	處 理 法
入口流量分布	爐 心 解 析	5 %	hot channel를 포함한 集合體(以下 hot assembly)의 入口流量을 平均値의 5 %減으로 한다.
計 測 誤 差	爐心, hot assembly, subchannel解析	冷却材入口溫度 $\pm 4^{\circ}F$ system 壓力 - 30psi	入口溫度를 nominal 値 + 4 $^{\circ}F$ 로 한다. system 壓力을 nominal 値 - 30psia로 한다.
軸方向出力分布	爐心, hot assembly subchannel解析	1.72cos分布 (2 Loop爐) 1.55cos分布 (3 Loop爐)	各集合體 또는 各燃料棒의 軸方向出力 分布로서 사용한다.
徑方向出力分布	subchannel解析	$F_{\Delta H}^N = \begin{cases} 1.51(2\text{Loop爐}) \\ 1.55(3\text{Loop爐}) \end{cases}$	rod마다의 出力分布는,  최대 發熱棒 出力比의 計算値를 $F_{\Delta H}^N$ 로 올려놓고 全體를 正規化한다.
製 作 公 差 (1) 熱流束 ( $F_q^E$ )	Subchannel解析	Pellet密度 Pellet濃縮度 Pellet外徑 被覆管外徑	統計解析에 의한 3 %의 局所熱流束의 不確性을 고려한다.
(2) 流路減少 ( $F_{SS}$ )	subchannel解析	被覆管外徑 pitch	統計解析에 의해 hot channel流路의 pitch를 減少시킨다.
(3) enthalpy上昇 ( $F_{\Delta H}^E$ )	subchannel解析	pellet密度 pellet濃縮度 pellet外徑	統計解析에 의해 hot channel의 enthalpy上昇을 nominal부터 增加시킨다.



對한 改良 COBRA3-C의 實證을 下記 data 에 의해서 行하였다.

(1) 原子爐 運轉時의 爐心出口 溫度測定 data

(2) 5×5 燃料束에 의한 混合試驗 data

第 4.1圖 및 第 4.2圖에서 표시하는것 같이 實測 data와 改良 COBRA3-C의 解析結果는 좋은 一致를 나타내고 있다.

또, 第 4.3圖에 改良 COBRA3-C code 와 T HINC code에 의한 DNB試驗 data의 解析結果를 비교해서 표시한다. 兩者의 一致는 良好하며, 兩 code는 同等하다고 할 수 있다.

## 5. 參考文獻

- (1) D. S. Rowe: BNWL-1695 COBRA3C: A Digital Computer program For Steady State And Transient Thermal Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements
- (2) G. W. Maurer: A Method of Predicting steady state Boiling Vapour Fractions in

- Reactor Coolant Channels, WAPD-BT-19
- (3) S. Levy: Forced Convection Subcooled Boiling Prediction of Vapor Volumetric Fraction, GEAP-5157. G. E. Atomic Power Equipment Dept. San Jose, California (April 1966年)
- (4) L. S. Tong: Pressure Drop Performance of a Rod Bundle, ASME '68
- (5) L. S. Tong: Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow·Wiley '66
- (6) WAPD-TH-326: Revised Pressure Drop Recommendations for Pressurized Water Reactor Design
- (7) E. R. Rosal et al: High Pressure Rod Bundle DNB Data with Axially Non Uniform Heat Flux, Nuclear Eng. and Design 31 ('74)
- (8) K. W. Hill et al: Effect of a Rod Bowed to Contact on Critical Heat Flux in Pressurized Water Reactor Rod Bundles 75-WA/HT-77

## 이달의 到着 資料

### ◇ 定期刊行物

- △ ENERGY <스위스> Vol 3, No. 10, 12, 12, 13.
- △ BUIIETIN <英國, 原産> 1979年 5月號
- △ ATOMS IN JAPAN <日本> Vol 23, 205.
- △ 原子力 産業新聞 <日本> 977, 978, 979, 981 號
- △ 原子力文化 <日本> 114號
- △ Nuclear News <美國> Vol 22, No.5, 6, 7.
- △ BUIIETIN <IAEA> Vol 28.
- △ ATOM <英國> 1979, 6月號
- △ 原子力 資料 <日本> No.10

### ◇ 參考圖書

- △ 亞細亞 太平洋 地域의 ENERGY 事情 <日本> — 韓國과 自由中國편 —
- △ FINNATOM <핀란드> 핀란드 原子力 産業紹介

- △ NFO, Hot Laboratory 施設의 設計와 建設 <日本>
- △ 原子力 發電所用 Cable 特性 <日本>
- △ NEA 6th Activity Report <佛>
- △ Symposium on International Co-operation Co-operation PARIS <佛> <1978. 2>
- △ 發電所 温排水魚業 <日本>

### ◇ 會社 및 製品案内 Catalogue <日本, 到着順>

- △ 大倉電氣(株)
- △ 助川電氣(株)
- △ 新日本製鐵(株)
- △ 大林組(株)
- △ 若井田理學機器(株)
- △ 住友金屬(株)
- △ 日本核燃料開發(株)
- △ 日本 Nuclear Fuel(株)
- △ 大倉電氣(株)
- △ 大日本電線(株)
- △ 三菱原子力發電(株)
- △ 日本原子力發電(株)
- △ 平田 Valve 工業(株)
- △ 科學技術社
- △ 富士電氣(株)