

原子爐內 二相流動系에서의 不安定性 메카니즘에 대한 考察

*Review of Instability Mechanism in Two-Phase System of
Nuclear Power Reactor*



朴 君 哲 (서울대 原子核工學科 助教授)

I. 序 言

原子爐內에는 冷却水가 蒸氣化하는 過程에서 形成되는 2相流動(Two-phase flow)이 흐르는 여러가지 部品들이 存在한다. 예를 들면 蒸氣發生機, 沸騰輕水爐의 核燃料채널 혹은 CANDU型 原子爐의 1次熱傳達系統의 高温管(Hot leg) 등이 있다. 이러한 部品內에서 2相流動은 복잡 다단한 메카니즘을 가지기 때문에 그 流動의 熱傳達特性, 그 流動內에서의 氣泡係數 혹은 壓力降下계산을 爲한 正確한 모델 및 解法開發이 활발히 연구되고 있다. 이 2相流動 메카니즘中 原子爐의 安全에 크게 영향을 주는 2相流動 不安定現象을 고찰하고자 한다.

이 不安定性은 그 振幅이 一定하거나 擴散되는 流動振動 혹은 流動急變(flow excursion)에 의해 發生되며 이 流動振動 혹은 急變은 核燃料棒 表面을 燃燬(burn out)시키거나 制御系統을 혼란시켜 部品の 기계적 損傷을 야기시킨다. 이 現象은 지난 수십년간 實驗 및 理論적으로 연구되어 왔으며^{(1),(2),(3),(4)} 최근 沸騰輕水爐의 安全性分析을 위해 沸騰메카니즘과 氣泡反應度 피이

드백을 結合한 中性子論的 및 熱水力學的 安定性(Nuclear-coupled thermal-hydraulic instability) 分析이 활발히 進行중이다.

本 論文에서는 여러가지 形態의 不安定 메카니즘을 分類, 소개하고 이들 중 原子爐施設內 가장 보편적인 Ledinegg 靜的 不安定 및 密度波振動(Density-wave oscillation)에 대해 解析方法 및 各種 設計變數의 不安定에 대한 效果를 체계적으로 소개하고자 한다.

II. 流動不安定現象의 種類 및 解析方法

먼저 流動의 不安定性에 대한 定義부터 밝히고자 한다. 制御工學的 側面에서 安定性이란 限界된(bounded) 入力에 대해 出力이 역시 限界되어야 함을 의미한다. 마찬가지로 流動이 外部攝動(入力)을 받더라도 自體 系統의 特性에 의해 最終 靜的條件이나 流量이 초기상태로 挽回되거나 時間에 따라 계속 增幅되지 않을때 流動은 安定하다고 定義할 수 있다. 이러한 定義를 바탕으로 流動不安定은 메카니즘의 特性에 따라 두가지로 크게 靜的 및 動的 不安定으로 分類될 수 있다.

靜的 不安定이란 流動狀態가 小量의 外部攝動에 의해 初期狀態를 이탈하여 다른 靜的狀態로 遷移하여 다시 환원하지 않는 現象을 意味하며, 이 現象은 단지 靜的 法則만으로도 分析可能하다. 代表的인 靜的 不安定現象으로는 Ledinegg 不安定,⁽¹⁾ 流動領域不安定, Geysering 혹은 Chugging 不安定⁽⁵⁾ 등이 있다.

Ledinegg 不安定現象은 非週期的 流動急變으로서 펌프의 head-flow 특성과 沸騰채널의 熱水力學的 特性的 相互作用에 의해 發生된다. 이 現象의 자세한 메카니즘과 不安定基準은 다음 節에서 기술하고자 한다.

流動領域(flow regime) 不安定은 同一한 氣泡係數를 갖는 다른 流動領域에서는 各各 壓力降下가 달라지기 때문에 發生하는 現象이다. 즉, 氣泡性流動은 環形流動보다 氣泡係數는 적지만 壓力降下가 크다. 따라서 예를 들어 만약 氣泡 및 슬락(slug) 流動領域 內에서 流量이 약간 감소하게 되면 氣泡가 증가하고 따라서 流動領域이 環形流動으로 遷移한다. 그러나 이 環形領域에서는 壓力降下가 낮기 때문에 一定한 채널 壓力降下로 유지하기 위해서는 流量이 증가하여야 하고 流量이 증가하면 氣泡가 감소되어 다시 氣泡 및 슬락流動領域으로 환원된다. 이러한 振動的 變化는 核燃料棒 다발이나 蒸氣分離器 流動管 內의 熱水力學的 特性的 振動을 招來한다.

Geysering 혹은 Chugging 不安定現象은 쉽게 설명하여 Yellow-stone의 間歇泉을 聯想시키는 現象으로서 流動채널로 부터 冷却材의 週期的 排出에 의해 야기되며 原子爐의 非常爐心冷却系統(ECCS)의 再給水(reflood) 단계에서 일어날 수 있다. 즉, 再給水되는 冷却材가 뜨거워진 核燃料棒 다발을 통과하면서 급격히 氣泡로 되어 그 2相混合體가 核燃料棒 다발 밖으로 噴어진다. 이 排出은 형성된 氣泡와 再給水되는 冷却材의 速度的 차이때문에 連續되지 못하고 週期的으로 噴어져 chugging 現象을 일으키게 되

고 이러한 現象은 ECCS의 冷却技能을 증가시키므로 오히려 바람직하다.

다음 動的 不安定現象이란 系統의 피이드백 메카니즘에 의해 外部攝動이 系統의 自體特性에 따라 피이드백되어 振幅이나 週기가 변하는 現象으로 이 現象을 分析하기 위해서는 動的 質量, 에너지 및 모멘트保存法則의 解法 및 Servo 技術이 요구된다. 動的 不安定現象으로는 密度波振動,⁽²⁾ 壓力降下振動,⁽⁶⁾ 音響振動⁽⁴⁾ (혹은 壓力波振動) 혹은 熱的振動⁽⁷⁾ 등이 있으며 그 외에 이러한 流動振動이 氣泡-反應度相關式에 의한 原子爐의 熱出力振動과 結合하여 이들이 相互 피이드백되는 中性子論的 및 熱水力學的 不安定 現象이 있다. 이들 現象中에서 가장 普遍的이고 중요한 密度波振動에 대해서는 제4 節에서 詳細히 기술할 것이며 壓力降下振動은 熱水力學的 실험루프에서만 觀察되는 現象으로 壓縮性 氣體內의 Ledinegg 不安定現象이라고 할 수 있다.

音響振動은 1相가스 流動內의 “오르간 파이프” 振動과 비슷한 現象으로서 壓力攝動이 音速으로 채널內를 進行하여 채널끝부분에 도달하면 一定壓力 境界條件에 의해 反射되어 이 反射波가 壓力攝動에 180° 位相差로서 結合하여 振動이 自體增幅 또는 減少되는 現象이다. 上記 振動은 各各 1~10Hz, 0.1~1Hz, 10~100Hz의 振動數를 가질 때에 發生된다.

이들 不安定性 現象을 分析하는 데는 다음과 같은 세가지 方法이 一般的으로 使用되고 있다.

- (1) 現象學的 論證
- (2) 保存法則의 數值的 積分
- (3) 保存法則의 解析의 解法

現象學的 論證이란 그 系統에서 發生possible한 不安定 形態를 現象學的으로 豫測하여 이미 알려진 각 設計係數들의 不安定性에 대한 效果를 適用하여 現象學的으로 說明하는 方法으로서 教育의 目的이나 數值計算 以前의 理論의 根據 및 計算結果分析 등에 活用될 수 있다.

數値解法은 非線形 保存方程式을 數值的으로 積分하여 얻은 解法을 사용하여 系統的 不安定性을 解析하는 方法이다. 이 數値解析은 不正確한 數値解法에 의한 誤答이나 解法 自體의 數

值的 不安定性和 같은 問題點을 內包하지만 數値解析法이 갖는 一般性 및 複雜한 메카니즘에 대한 有用性 때문에 時間領域解析(Time domain analysis)에 널리 使用되고 있다.

〈表 1〉 Classification of Flow Instabilities

| Class | Type | Mechanism | Characteristics |
|---|---|--|--|
| 1. Static instabilities | | | |
| 1.1 Fundamental (or pure) static instabilities | 1. Flow excursion or Ledinegg instability | $\left. \frac{\partial \Delta P}{\partial G} \right _{\text{system}} < \left. \frac{\partial \Delta P}{\partial G} \right _{\text{ext}}$ | Flow undergoes a sudden, large amplitude excursion to a new, stable operating condition |
| | 2. Boiling transition | Ineffective removal of heat from heated surface | Wall temperature excursion and flow oscillation |
| 1.2 Flow regime instability | 1. Flow pattern transition | Bubbly flow has higher ΔP than that of slug flow for the same void fraction | Cyclic flow pattern transitions and flow rate variations |
| | 2. Flow regime induced instability | Periodic Δp in slug flow regime | Possible excitation of system at slug flow frequency |
| 1.3 Thermal relaxation instability | 1. Bumping, geysering, or chugging | Periodic adjustment of metastable condition, usually due to lack of nucleation sites | Periodic process of superheat and violent evaporation with possible expulsion and refilling |
| 2. Dynamic instabilities | | | |
| 2.1 Fundamental (or pure) dynamic instabilities | 1. Acoustic oscillations | Resonance of pressure waves | High frequencies (10-100Hz) related to time required for pressure wave propagation in system |
| | 2. Density-wave oscillations | Delay and feedback effects in relationship between flow rate, density, and pressure | Low frequencies (~1Hz) related to transit time of a continuity wave |
| | 3. Condensation induced instabilities | Condensation driven instabilities | Large impulsive ("water hammer") loads may result |
| 2.2 Compound dynamic instabilities | 1. Thermal oscillation | Interaction of variable heat transfer coefficient with flow dynamics | Occurs in film boiling |
| | 2. Nuclear-coupled instability | Interaction of void reactivity coupling with flow dynamics and heat transfer | Strong only for a small fuel time constant and at low pressures |
| | 3. Parallel-channel instability | Interaction among small number of parallel channels | Various modes of flow redistribution |

非線形 微分方程式에 대한 一般的인 解析的 解法은 存在하지 않지만 不安定解析에서는 保存方程式을 Laplace 變形시켜 線形化함으로서 比較的 간단히 푸는 周波數領域解析(Frequency domain analysis) 등이 널리 使用되고 있다. 이러한 方法은 非線形 效果나 時間에 다른 正確한 遷移現象 등을 밝힐 수는 없지만 각 設計 變數의 不安定性 效果, 系統의 安定與否 및 安定性 餘分(stability margin) 등의 計算에는 辟 有用히 活用되고 있다.

近來 尖端技術⁽¹⁾로서 沸騰輕水爐內의 線形 不安定解析을 위해 原子爐內 不均一 出力의 效果를 考慮하기 위해 線形方程式을 노달解法으로 數值積分하고 있다. 이렇게 積分된 保存方程式으로 부터 各 狀態變數를 外部攝動變數의 函數로 表示함으로서 系統의 傳達函數로 構成된 特性

方程式, $1+G(S)H(S)$ 를 誘導한다. 마지막으로 이 特性方程式에 여러가지 制御理論을 適用하여 方程式의 根($S_1=a+bi$)을 구하고 그 根의 實數가 陽數이면 $1/(1-S_1)$ 의 傳達函數를 갖는 系統은 이 函數의 逆Laplace 變形에 의해 구해지는 e^{st} 즉 $e^{(a+bi)t}$ 와 같은 運動方程式을 갖게 되므로서 時間에 따라 外部攝動 振幅은 無限히 增加되어 “不安定”이란 判斷을 얻게 된다.

表 1⁽⁸⁾은 其他 各 不安定 現象의 種類 및 메카니즘을 要約한 것이다. 다음 節에서는 이 不安定 現象의 가장 代表的인 例가 될 수 있는 Ledinegg 不安定과 密度波振動에 대해 자세히 記述하고자 한다.

III. Ledinegg 不安定現象

이 現象은 上述한 바와 같이 펌프의 head-flow

| Class | Type | Mechanism | Characteristics |
|--|--|--|--|
| 2. 3 Compound dynamic instability as secondary phenomena | 1. Pressure drop oscillations | Flow excursion initiates dynamic interaction between channel and compressible volume | Very low frequency periodic process (~0.1 Hz) |
| 3. Nonlinear effects | 1. Subcritical instabilities | Nonlinear interaction reinforces nearby instability | Sufficiently large disturbance destabilizes linearly stable flow |
| | 2. Supercritical instabilities | Nonlinear interaction limits growth | Limit cycles |
| 4. Multidimensional effects | 1. Wave-induced instabilities | Two-dimensional disturbances interacting | Waves of particle motion sweep apparatus (fluidized beds) |
| | 2. Plenum voidage instabilities | Three-dimensional disturbances interacting | Regions of high void form and propagate |
| | 3. Subchannel instabilities | Transverse Δp fluctuation induces periodic transverse flow fluctuations | Subchannel-to-subchannel instability |
| 5. Transient effects | 1. Superimposed instability (during system transients) | Changing flow conditions excite instability | Coast-down with superimposed oscillations |
| | 2. Oscillatory (loop) flow | Imposed oscillation triggers or delays existing instability mode | Oscillations grow |

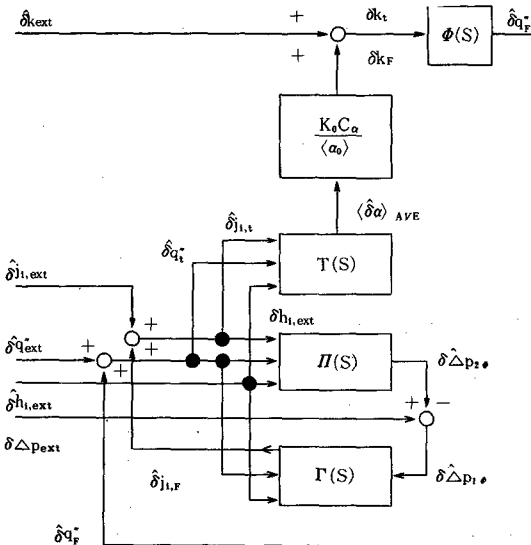
特性和 系統의 靜的 壓力降下의 相互作用에 의해 發生하며 非週期的 流動急變現象이다. 즉, 系統의 需要壓力降下/流動曲線(系統의 內部特性)의 傾斜도가 펌프의 供給壓力上昇/流動曲線(系統의 外部特性)보다 작을 때 發生되며 따라서 安定條件은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\Delta P_{\text{system}})}{\partial W} > \frac{\partial(\Delta P_{\text{pump}})}{\partial W} \dots\dots\dots (1)$$

그림1⁹⁾은 典型的인 沸騰輕水爐의 內部特性曲線에 따른 여러가지 外部特性曲線으로서 CASE 1은 外部特性曲線의 傾斜도가 ∞이므로 항상 (1) 條件을 滿足시키고 CASE 4는 典型的인 沸騰輕水爐의 運轉條件으로서 역시 (1) 條件을 滿足시켜 돌아 安定된 狀態이다. 그러나 CASE 2의 경우나 遠心 혹은 제트펌프가 外部루프에 使用되었을 때 나타나는 CASE 3의 경우에는 ① 狀態에서의 運轉은 不可能하다.

왜냐하면 이러한 狀態에서는 (1) 條件을 滿足시키지 못함으로서 系統이 輕微한 否流動攝動만 받아도 ① 狀態에서 곧장 ② 나 ② 狀態로 遷移하고 혹은 正流動攝動에 대해서는 ③ 혹은 ③ 狀態로 急變하게 되어 流動의 不安定을 招來한다. 보다 現象學的으로 說明하면 이러한 不安定

<그림1> Excursive Instability



現象은 流動이 增加함에 따라 壓力降下가 減少하는 領域에서 發生하며 例로서 高熱流量에서의 서브쿨드 沸騰領域을 들 수 있다.

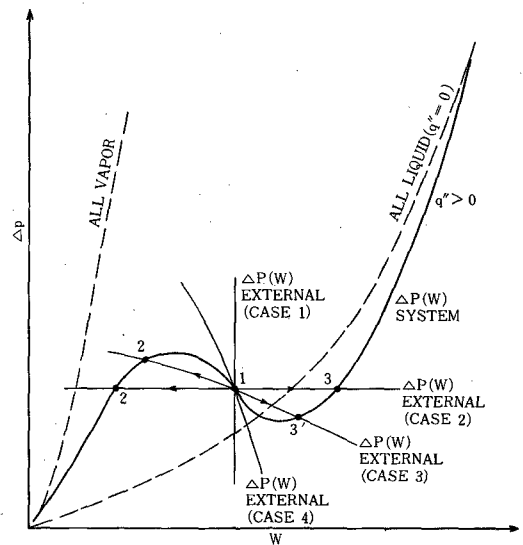
즉, 모든 다른 條件들은 固定된 液流量이 減少하면 서브쿨드 沸騰이 일어나 壓力降下가 增加된다. 이러한 增加는 非平衡 氣泡에 의한 摩擦 및 加速效果때문에 서브쿨링도가 낮을 때 急速히 進行된다. 이러한 領域에서 만약 펌프의 特性이 (1) 條件을 滿足시키지 못하면 上述한 流動急變이 일어나고 이 流動急變에 의해 流量이 急速히 減少하면 臨界熱流量(CHF)에 到達하여 核燃料棒을 燃熔시킨다.

이러한 不安定을 막기 위해서는 Throttle 밸브 등을 設置하여 펌프特性曲線의 傾斜도를 增加해 준다.

IV. 密度波振動

이 現象은 出動時間때에 종로에서 많은 信號燈을 通過하는 複雜한 交通을 聯想시키는 現象으로서 核燃料채널에서 靜的 設計變數(入口流動速度, 熱流量, 壓力 등)가 外部要件에 의해 振動을 겪게 되면, 1相領域에서의 엔탈피가 振動하여 沸騰境界面을 振動시킨다. 그리고 이 沸

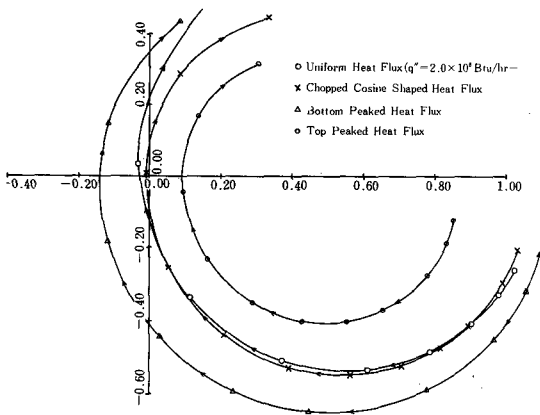
<그림2> Simplified BWR Block Diagram



〈表 2〉 Assumptions and Models Improved in the NUFREQ-N Code

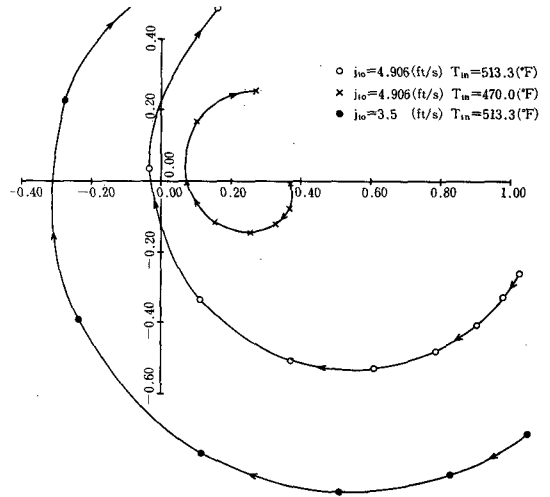
| Well-Known Assumptions and Simplified Models | NUFREQ-N Model |
|--|---|
| Homogeneous Flow | Slip Flow |
| Neglect Heat Flux perturbation In Two-Phase Region | Heat Flux Perturbation In Two-Phase Region |
| Lumped parameter Heated Wall Dynamics Model | Distributed Parameter Heated Wall Dynamics Model |
| No Spacers | Spacers Included |
| Neglect Subcooled Boiling Region | Subcooled Boiling Dynamics Included |
| Uniform Axial Heat Flux Distribution | Discretized Non-Uniform Heat Flux |
| Radially-Uniform Core Inlet Flow Velocity Perturbation | Distributed Core Inlet Flow Velocity Perturbation |
| Neutron Point Kinetics Model | 3-Dimensional Space/Time Dependent Neutron Kinetics Model |

〈그림 3〉 The Effect of Nonuniformity of Axial Power Distribution (BWR/4)

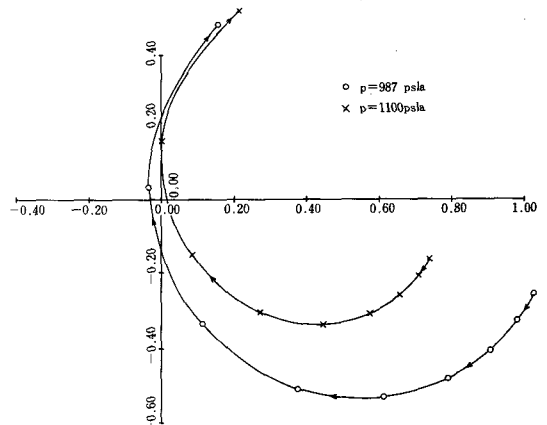


騰界面에서 엔탈피 振動은 氣泡係數의 振動으로 變換되어 이 氣泡係數의 振動이 2相領域을 따라 進行하고 이에 따라 流動振動과 氣泡係數 振動의 複合的 效果에 의해 2相領域의 壓力降 下値가 振動한다. 그러나 系統의 境界條件(즉,

〈그림 4〉 The Effect of Inlet Velocity and Subcooling(BWR/4)



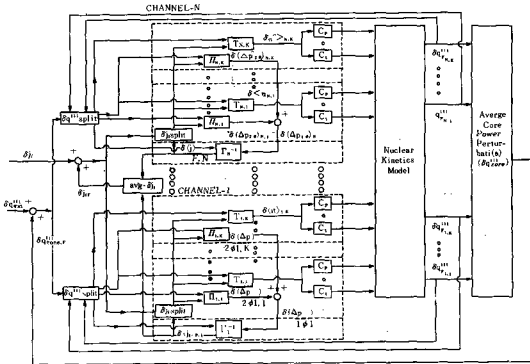
〈그림 5〉 The Effect of System Pressure(BWR/4)



一定 채널 壓力降下條件)에 의해 2相領域의 壓力降 下振動은 1相領域에 逆符號로 피드백되어 自體 振動을 일으키고 따라서 加해진 振動은 增幅 혹은 減少한다. 그림 2⁹⁾는 여러가지 設計變數의 外部攝動에 대한 이러한 現象을 간단히 보여주는 Block diagram이다. 이 現象은 原子爐에서 가장 一般的으로 發生可能한 現象이기 때문에 그동안 널리 實驗的 혹은 解析的으로 分析되어 왔다.

그 解析方法으로는 第2節에서 언급한 대로 核 燃料채널內의 質量, 에너지, 모멘트保存方程式

〈그림6〉 System Block Diagram for General Space Kinetics Model



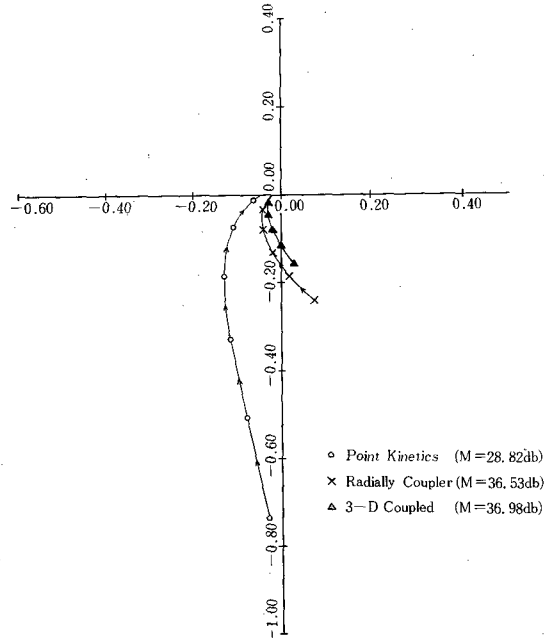
의 해석을 구하고 附加的으로 채널별 動力學 解析을 위한 熱傳導方程式, 氣泡係數를 구하기 위한 氣泡進行方程式을 풀어 1相領域 및 2相領域에서의 各各 總壓力降下值 및 氣泡係數 進動值를 外部攝動值로서 表現한다. 이때 편리한 方法으로 周波數領域解析法을 위한 Laplace 變形/線形化가 널리 使用된다. 이렇게 구한 各 領域의 壓力降下 振動值를 一定채널壓力降下條件,

$$\delta(\Delta P)_{1\phi} + \delta(\Delta P)_{2\phi} = 0 \dots\dots\dots(2)$$

에 代入하여 系統의 特性方程式, $1+G(S)H(S) = 0$ 를 算出하여 이를 Servo 技術⁽¹⁰⁾(例, Nyquist 條件)에 適用하여 系統의 安定性을 分析한다.

이때 現象의 複雜性때문에 많은 假定들이 導入되는데 이들 假定에 의해 結果가 너무 保存的이면 不必要한 制約條件을 強要해서 系統의 設計費를 引上시키고 逆일 때는 系統의 安定性을 沮害시킴으로서 正確한 모델 및 相關式 設定이 切實히 要求되어 왔다. 最近 가장 尖端技術의 熱水力學 解析方法을 使用하여 開發된 電算 코드인 "NUFREQ-N"⁽¹¹⁾에서는 表2에서 보는 바와 같이 상당수의 이러한 假定들을 排除하고 있으며 또한 氣泡係數-反應度 피이드백을 考慮하기 위해 從前에 널리 使用한 中性子 點運動方程式을 止向하고 空間 및 時間에 따른 3次元의 노달運動方程式을 導入하고 있다.

〈그림7〉 Nyquist Plot for PT3 Checker Board Analysis



마지막으로 몇 개의 重要設計變數가 密度波 振動 不安定性에 미치는 影響을 이 코드에 의해 計算된 結果로서 紹介하고자 한다.

(1) 不均一 軸方向 出力分布形態의 效果

그림3은 네가지 다른 形態의 軸方向 出力分布(均一, 잘라진 cosine, 밀이 불룩한, 위가 불룩한)에 대한 效果를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 밀이 불룩한 形態가 가장 不安定하며 위가 불룩한 形態가 가장 安定하다. 그러나 軸方向不均一性이 安定性餘分에 미치는 效果는 다른 여러가지 運轉條件에 依存하기 때문에 一般的으로 結論지을 수는 없다.

(2) 入口流動速度 및 서브쿨링度의 效果

入口流動速度가 增加하면 1相領域의 길이가 增加하여 1相領域內에 壓力降下를 增加시키고 2相領域內의 氣泡係數를 增加시켜 壓力降下를 增加시키므로 그림4에 따라 沸騰채널은 더욱 安定된다.

入口서브쿨링度의 效果는 한마디로 斷言할 수

없고 初期運轉條件에 依存하지만 少量의 增加에 따라 서브쿨링도가 클 때는 安定效果, 적을 때는 不安定效果를 가진다. 이 計算에서는 入口서브쿨링도가 比較의 크기 때문에($\Delta T_{sub}=29.7^{\circ}F$) 그림에서와 같이 安定效果를 보여 주고 있다.

(3) 系統壓力의 效果

그림5에서 보듯이 系統의 壓力이 增加함에 따라 氣泡係數가 減少하고 따라서 2相領域의 摩擦 및 모멘트壓力降下가 減少함으로서 系統이 더욱 安定된다.

(4) 中性子運動모델에 따른 效果

그림7에는 그림6에서 要約된 3次元의 中性子論의 및 熱水力學的 不安定 解析을 위한 Block diagram을 土臺로 3次元의 爐心に 대한 從前에 使用되고 있는 간단한 點運動모델과 空間 및 時間에 따른 3次元의 노달運動모델에 의한 結果가 比較되어 있다. 點運動모델은 大形 原子爐에 適用이 非現實的이며 그림에서 보는 바와 같이 너무 保存的 結果를 算出하기 때문에 보다 正確한 中性子論의 모델 選定이 定確한 不安定 解析에 切實히 要求됨을 알 수 있다.

V. 맺는말

結果的으로 不安定 現象은 2相流動系統의 安全性에 重要한 影響을 미치고 또한 그 메카니즘이 매우 複雜하기 때문에 이 現象을 正確히 解析하기 위해서는 보다 精巧한 모델 및 計算方法이 開發되어야 한다. 또한 解析方法外 正確한 中性子論의 및 熱水力學的 入力資料算出, Doppler 效果에 따른 核燃料 溫度-反應度 피이드백 메카니즘 添加 그리고 3次元의 全體爐心 解析에 따른 電算時間 및 記憶容量의 節約을 위한 數值解析學 등이 開發 혹은 增進되어야 한다.

<參考文獻>

1. Ledinegg, M., "Instability of Flow During Natural and Forced Circulation," Die Wär-

me, 61, 8(1938).

2. Lahey, R. T., Jr. and G. Yadigaroglu, "NU-FREQ, A Computer Program to Investigate Thermo-Hydraulic Stability," NEDO-13344, General Electric Company, (1973).
3. Nylund, K. et al., "Hydraulic and Heat Transfer Measurements on a Full Scale Simulated 36-Rod Marviken Fuel Element with Uniform Heat Flux Distribution," FRIGG-2, AB Atomenergi (1968).
4. Bergles, A. E., P. Goldberg and J. S. Maulbetsch, "Acoustic Oscillations in a High Pressure Single Channel Boiling System," EURATOM Report, Proc. Symp. on Two-Phase Flow Dynamics, Eindhoven, 535-550 (1967).
5. Griffith, P., "Geysering in Liquid-Filled Lines," ASME Paper No. 62-HT-39 (1962).
6. Veziroglu, T. N. and S. S. Lee, "Boiling-Flow Instabilities in a Cross-Connected Parallel-Channel Upflow System," ASME Paper No. 71-HT-12 (1971).
7. Cho, S. M. et, al., "Performance Changes of a Sodium-Heated Steam Generator," ASME Paper 71-HT-15 (1971).
8. Lahey, R. T., Jr. and D. A. Drew, "An Assessment of the Literature Related to LWR Instability Modes," NUREG/CR-1414, Rensselaer Polytechnic Institute (1980).
9. Lahey, R. T., Jr. and F. J. Moody, "The Thermal Hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor," ANS (1977).
10. Dorf, R. C. "Modern Control Systems," Addison-Wesley Publishing Company (1974).

