

<論 文>

多回路의 單相自然循環系에 관한 實驗 및 數值解析的 研究

장 순 흥* · 백 원 필**

(1984년 3월 3일 접수)

A Numerical and Experimental Investigation of
the Single-Phase Natural Circulation System with Multiloop

Soon Heung Chang and Won Pil Paek

Abstract

A numerical and experimental investigation was carried out on the single-phase natural circulation system. This study is concerned with the multiloop system which is relevant to the primary system of the pressurized water reactor.

For numerical analysis, five time-dependent governing equations were derived using the one-dimensional lumped parameter model. These equations were discretized by the space-time integration technique, and a simplified computer program, SIMFARS, was developed to solve those discretized equations.

Experiments were performed for two purposes-one is to validate the developed code, and the other is to understand the qualitative behavior of the natural circulation loop.

Comparison of the computational results with experiments, and several experimental and numerical results are presented in this article.

記 號 說 明

A : 斷面積	P : 爐心 出力
(BF) : 運動量方程式에서의 浮力項	P^1 : 爐心에서의 線出力
c_p : 定壓比熱	Q : 流量
(FF) : 運動量方程式에서의 摩擦損失項	q : 熱交換器에서의 熱傳達率
g : 重力加速度	R : 全摩擦係數
H_p : 펌프 水頭	Re : Reynolds 數
L : 길이	s : 1 次元的 位置變數(space variable)
N : 全體 回路數	T : 溫度
	t : 時間
	u : s-方向의 速度
	X : A-回路의 數

* 정회원, 한국과학기술원 핵공학과

** 한국중공업(주)

ρ : 密度

下添字

A : A -回路

b : B -回路

l : Loop

$n, n+1$: Time step

r : Core

s : Heat exchanger

v : Vessel

1. 序 論

原子力發電所에서 1次系統의 펌프가 故障로 동작하지 않을 경우 爐心은 1次冷却水の 自然循環(natural circulation)에 의해 冷却되어야 한다. 따라서 自然循環은 輕水爐(light water reactor reactor, LWR)나 重水爐(heavy water reactor), 또는 高速增殖爐(fast breeder reactor) 등을 設計할 때 安定性和 관련하여 重要하게 고려되어야 할 分野이다.

지금까지 自然循環回路(natural circulation loop)에 關於하여 理論的, 實驗的으로 많은 研究가 行해졌으며, 大部分은 太陽熱 暖房과 關聯되어 있고, 최근에는 原子爐에 對해서도 相當한 研究가 수행되었다. Zvirin⁽¹⁾은 加壓輕水爐(pressurized water reactor, PWR)와 關聯된 自然순환 회로에 關한 지금까지의 研究를 整理하였다. 또한 平行回路(parallel loop) 自然순환계에 關한 實驗과 1次元的인 解析이 Zvirin 등에 의해 行해졌다⁽²⁾. 그리고 加壓輕水爐와 高速增殖爐에 關한 실제적 자료를 얻기 위한 實驗도 여러 사람에 의해 行해되었다^(3,4,5).

本論文은 多回路的 單相(single-phase) 自然循環系에 關한 實驗 및 數值解析의 研究로서, RWR 에서의 自然순환 現象을 模寫할 수 있는 fast-running code를 개발하고 이를 실험을 통하여 입증하며, 또한 自然순환계에서 일어나는 여러 現象을 定性的으로 관찰하는 것을 目的으로 삼았다. 理論部分은 저자의 다른 論文⁽⁶⁾에 발표되었으므로 여기에서는 要約하여 소개하며, 實驗은 2-回路 PWR(古里 1호기) 1次系統을 약 1/15로 축소시킨 實驗裝置에서 行하였다.

2. 理論 및 數值解析의 研究

이 部分은 참고문헌 (6)에서 자세히 다루었으므로 여기서는 간단히 整理하겠다. N 개의 동일한 回路(loop)

중에서 X 개(A -회로) 및 $(N-X)$ 개(B -회로)의 회로가 각각 같은 流動을 가질 경우, 1次元的인 lumped parameter model에 의해 다음과 같은 支配方程式(governing equations)을 얻는다.

運動量 方程式

$$\left(\frac{L}{A}\right)_1 \rho \frac{dQ_a}{dt} + \left(\frac{L}{A}\right)_v \rho \frac{dQ}{dt} + (FF)_v - (BF)_a - \rho g H_{pa} = 0 \quad (1)$$

$$\left(\frac{L}{A}\right)_1 \rho \frac{dQ_b}{dt} + \left(\frac{L}{A}\right)_v \rho \frac{dQ}{dt} + (FF)_b + (FF)_v - (BF)_b - \rho g H_{pb} = 0 \quad (2)$$

에너지 方程式

$$\rho c_p A_r \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p Q \frac{\partial T}{\partial s} = p' \quad (3)$$

$$\rho c_p A_s \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p Q_a \frac{\partial T}{\partial s} = -q'_a, \text{ loop-A} \quad (4)$$

$$\rho c_p A_s \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p Q_b \frac{\partial T}{\partial s} = -q'_b, \text{ loop-B} \quad (5)$$

以上的 式들을 얻기 위하여 여러가지 假定이 도입되었으며, 連續方程式은 이미 代入되었다.

식 (1)~(5)를 각각 時間과 位置에 따라 積分하여 다음의 discretized equation을 얻을 수 있다.

$$\left[\left(\frac{L}{A}\right)_1 + X\left(\frac{L}{A}\right)_v\right] \rho Q_{a,n+1} + \left(\frac{L}{A}\right)_v \rho (N-X) Q_{b,n+1} = \left(\frac{L}{A}\right)_1 \rho Q_{a,n} + \left(\frac{L}{A}\right)_v \rho Q_{n,n} - [(FF)_{a,n+1} + (FF)_{v,n+1} - (BF)_{a,n+1} - \rho g H_{pa,n+1}] \Delta t \quad (6)$$

$$\left(\frac{L}{A}\right)_v \rho X Q_{a,n+1} + \left[\left(\frac{L}{A}\right)_1 + (N-X)\left(\frac{L}{A}\right)_v\right] \rho Q_{b,n+1} = \left(\frac{L}{A}\right)_1 \rho Q_{b,n} + \left(\frac{L}{A}\right)_v \rho Q_{n,n} - [(FF)_{b,n+1} + (FF)_{v,n+1} - (BF)_{b,n+1} - \rho g H_{pb,n+1}] \Delta t \quad (7)$$

$$\left(1 + \frac{2Q_{n+1}\Delta t}{A_r L_r}\right) T_{h,n+1} + \left(1 - \frac{2Q_{n+1}\Delta t}{A_r L_r}\right) \frac{XQ_{a,n+1}}{Q_{n+1}} T_{ac,n+1} + \left(1 - \frac{2Q_{n+1}\Delta t}{A_r L_r}\right) \frac{(N-X)Q_{b,n+1}}{Q_{n+1}} T_{bc,n+1} = T_{c,n} + T_{h,n} + \frac{2p_{n+1}\Delta t}{\rho c_p A_r L_r} \quad (8)$$

$$\left(1 - \frac{2Q_{a,n+1}\Delta t}{A_s L_s}\right) T_{h,n+1} + \left(1 + \frac{2Q_{a,n+1}\Delta t}{A_s L_s}\right) T_{ac,n+1} = T_{h,n} + T_{ac,n} - \frac{2q'_{a,n+1}\Delta t}{\rho c_p A_s L_s} \quad (9)$$

$$\left(1 - \frac{2Q_{b,n+1}\Delta t}{A_s L_s}\right) T_{h,n+1} + \left(1 + \frac{2Q_{b,n+1}\Delta t}{A_s L_s}\right) T_{bc,n+1} = T_{h,n} + T_{bc,n} - \frac{2q'_{b,n+1}\Delta t}{\rho c_p A_s L_s} \quad (10)$$

식 (6)~(10)을 풀기 위한 간단한 코드 SIMFARS 가 개발되었고, 이에 관하여는 참고문헌 (6)에 자세히 논의하였다.

3. 實驗裝置 및 實驗方法

3.1. 實驗裝置

實驗裝置에 관한 概要를 Fig.1에 나타내었으며 Fig.2는 그 寫眞이다. 실험 장치의 주된 要素로는 加熱部位 (vessel)와 熱交換器(heat exchanger), 冷管(cold leg) 및 熱管(hot leg)을 들 수 있다.

加熱部位는 두 개의 아크릴 圓筒을 사용하여 제작하였으며, 안쪽 圓筒 안에 電氣히터(heater)를 設置하여 爐心의 역할을 하게 하였다. 두 圓筒間 사이의 罅(gap)은 降水管(downcomer) 역할을 하여 冷管으로부터 들어온 冷却水를 노심 밑으로 보낸다. 두 개의 동일한 平行回路가 銅管으로 만들어졌고, 熱管과 冷却의 內徑은 각각 47 mm와 35 mm 이다. 管壁을 통한 熱損失을 막기 위해서는 25 mm 두께의 섬유 유리(glass wool)가 사용되었다.

각 회로의 冷管에 설치한 펌프는 두가지 目的, 즉 靜止狀態로부터 流動을 일으키고 또 펌프 故障 실험을

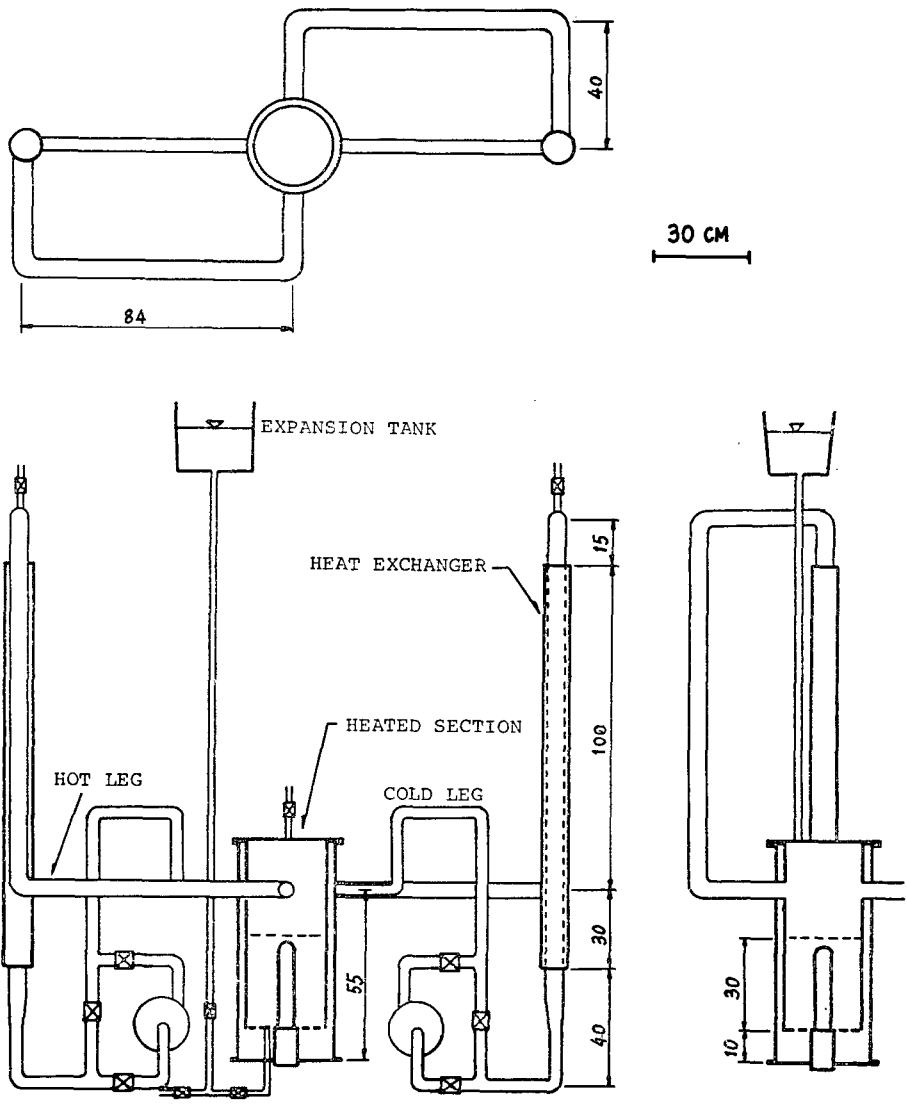


Fig. 1 The Schematic diagram of the experimental loop

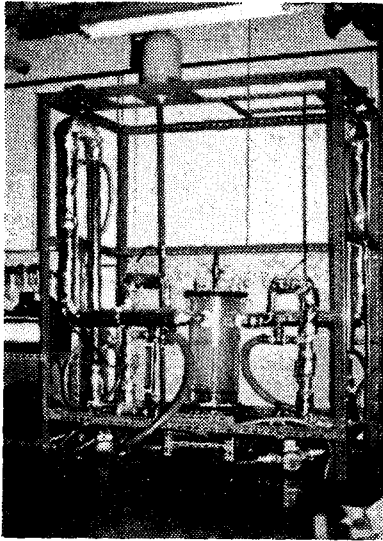


Fig. 2 The experimental loop

위하여 이용된다. 爐心の 熱源으로는 3 kW 용량의 히터가 사용되었으며 變壓器를 이용하여 出力을 조정하였다. 또한 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 작은 물탱크를 設置하여, 大氣壓하에서 시스템 内部에 물이 팽 차게 하고 溫度變化로 생기는 體積膨脹에 대비하도록 하였다.

본 실험 장치는 참고문헌 (2)에서 사용된 장치에 몇 가지 수정을 가하여 제작하였으며, 참고문헌 (3)의 실험 장치와도 비슷하다. 몇 가지 중요한 設計變數는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Important dimensions and parameters of the experimental loop

Number of loops	2
Maximum power input	3 kW
Operating pressure	1 atm(101 kPa)
Maximum design temperature	90°C
Total primary volume	0.960 m ³
Vessel	Acryl
Material	Acryl
Height	70 cm
Inside diameter	30.3 cm
Downcomer	
Material	Acryl
Length	60 cm
Inside diameter	23.8 cm
Outside diameter	25.0 cm

Hot leg	
Inside diameter	4.7 cm
Length	288 cm
Cold leg	
Inside diameter	3.5 cm
Length	224 cm
Heat exchanger	
Type	counterflow once-through type
Height	130 cm
Shell	
Inside diameter	6.6 cm
Tube	
Inside diameter	4.7 cm
Outside diameter	5.10 cm
Heat transfer area	0.1928 m ²

3.2. 實驗方法 및 內容

定常狀態와 過渡狀態를 포함하여 여러가지 형태의 實驗이 수행되었다. 過渡狀態의 流動을 관찰하기 위하여 爐心出力과 2次冷却水の 流動條件을 변화시켰다. Table 2는 수행된 實驗의 種類를 기술하고 있다.

Table 2 Types of experiments

1. The steady-state experiment
2. Transients due to the power change
3. Transients due to the change of the secondary loop condition
 - 3.1 From two to one-loop operation
 - 3.2 From one to two-loop operation
4. Natural to forced circulation
5. Forced to natural circulation
6. Flow instability

冷却水の 溫度는 Chromel-Alumel thermocouple 과 Molytek-2700 data acquisition system 을 사용하여 各回路의 冷管과 熱管, 2次冷却水の 入出口에서 測定하였고, 2次冷却水の 流量測定에는 rotameter 가 사용되었다. 1次系統의 流量은 매우 작아 일반적인 방법에 의한 測定이 어렵기 때문에 大部分의 自然循環回路에 관한 실험에서와 같이 그 測定을 생략하고, 定常狀態에서의 流量은 爐心과 熱交換器에서의 熱平衡式으로부터 구했다.

언어진 實驗結果의 信賴度를 높이기 위하여 동일한 條件에서의 實驗을 3~5 회씩 반복하였다. 2차 냉각수의 조건과 爐心出力의 작은 변동으로 인한 차이를 고

려하면, 동일한 實驗條件에서는 동일한 過渡現象이 일어난다는 것을 알 수 있었다.

靜止狀態의 冷却水에 熱을 가하여 온도가 상당히 높아지더라도 外部에서 流動을 일으키지 않으면 自然循環은 시작되지 않았다. 이는 靜止狀態로부터 自然循環이 시작되기 위한 臨界點이 존재함을 의미하며 다른 論文에서도 보고된 바 있다⁽¹⁾. 따라서 처음에 流動을 일으키기 위해서는 펌프가 이용되었는데, 이 경우 낮은 온도 영역에서도 自然循環에 의한 爐心の 冷却이 이루어졌다. 原子力發電所에서는 強制循環에 이어 自然循環이 일어나므로 이 境況가 適用된다.

모든 實驗에 걸쳐 동작하는 열교환기의 2次冷却水の 流量은 $9.4 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, 入口溫度(inlet temperature)는 $8.0 \sim 6.5^\circ\text{C}$ 로 유지하였다. 溫度變化는 2차 냉각수로 수도물을 직접 사용한 데 기인한다.

4. 結果 및 考察

개발된 전산 프로그램(SIMFARS)의 妥當性을 檢討하기 위하여 實驗과 計算結果를 비교하였다. 數值的 計算에 필요한 여러가지 입력 데이터 중에서 回路의 全摩擦係數(overall friction factor, R)와 정확한 熱傳達係數가 特히 중요하다. 본 論文에서는 壓力降下 實驗을 하지 않았으므로 R 을 구하기 위하여 friction

table에⁽⁷⁾ 의존하였다($R_{form,t} = 2.5 \times 10^{-7} m^{-4}$, $R_{form,v} = 5 \times 10^{-3} m^{-4}$).

垂直圓筒管内의 1次元 自然循環流動에 관한 熱傳達關係式을 얻을 수 없어서 처음에는 強制循環에 관한 식들을 계산에 이용하였다. 그러나 이러한 식들은 1次係數의 溫度를 너무 높게 豫測하였으므로, 實驗에 의하여 정상 상태의 熱傳達係數를 간접적으로 測定하여 회로의 과도 현상을 模寫하는데 사용하였다. 즉 정상 상태에서는 일차에서 발생된 열(측정가능)이 열교환기에 전달되는 열과 같다는 가정아래 측정된 열교환기의 일차 및 이차의 출입구 온도를 이용해서 전열전달 계수를 일차측 유량의 함수로 측정하였다.

2차 회로 상태는 모든 실험에 걸쳐 거의 일정하게 유지되었기 때문에 실험에 의해 결정된 열교환기의 全熱傳達係數를 이용한 코드 평가가 가능하다.

Figs. 3,4는 出力의 변화에 따른 定常狀態에서의 溫度와 流量을 보여준다. 流量에 관한 실험값은 爐心과 熱交換器에서의 熱平衡式(heat balance equation)으로부터 얻었는데, 두 식으로부터 구한 값이 거의 같으므로 실제 流量이라고 할 수 있다. 定常狀態에서의 溫度와 流量은 出力이 증가함에 따라 증가한다.

Figs. 5~9에서는 計算結果를 實驗과 比較하였다. 電算 프로그램은 回路內的 過渡現象을 대체로 잘 예측하지만 실험보다 짧은 過渡時間(transient time)을 나

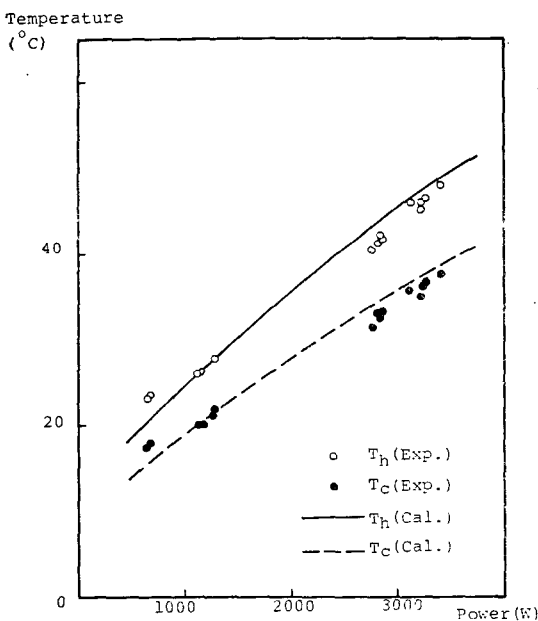


Fig. 3 Steady-state temperatures

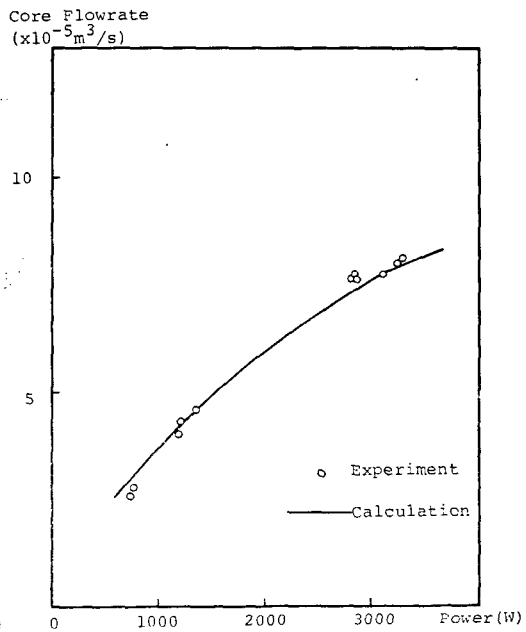


Fig. 4 Steady-state flowrates

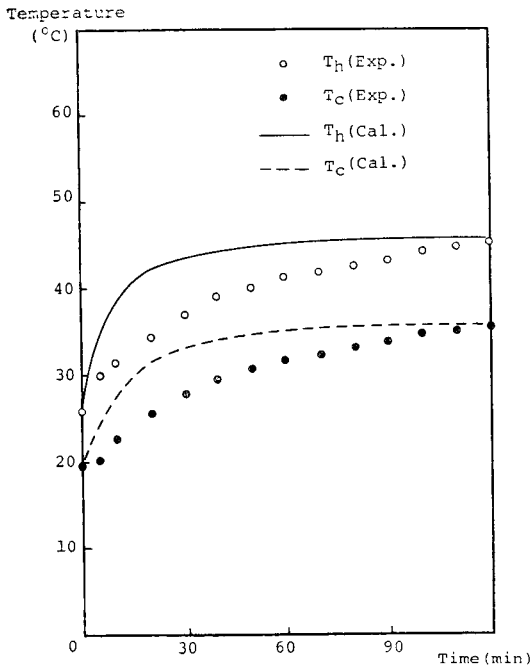


Fig. 5 Power transient from 1148 to 3124 watt

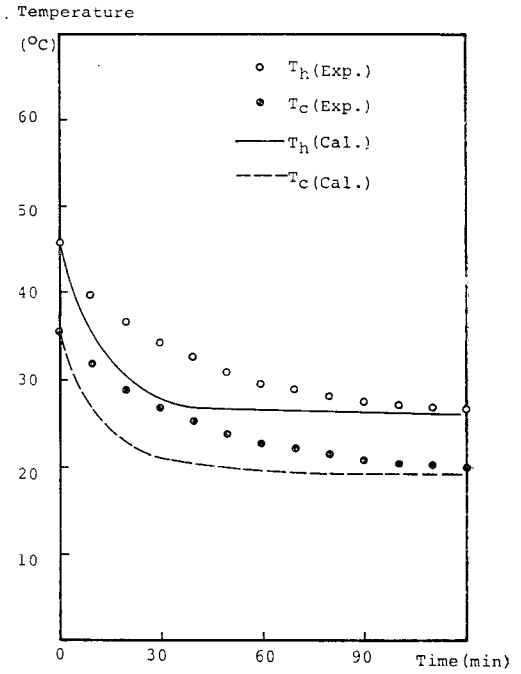


Fig. 6 Power transient from 1148 to 3124 watt

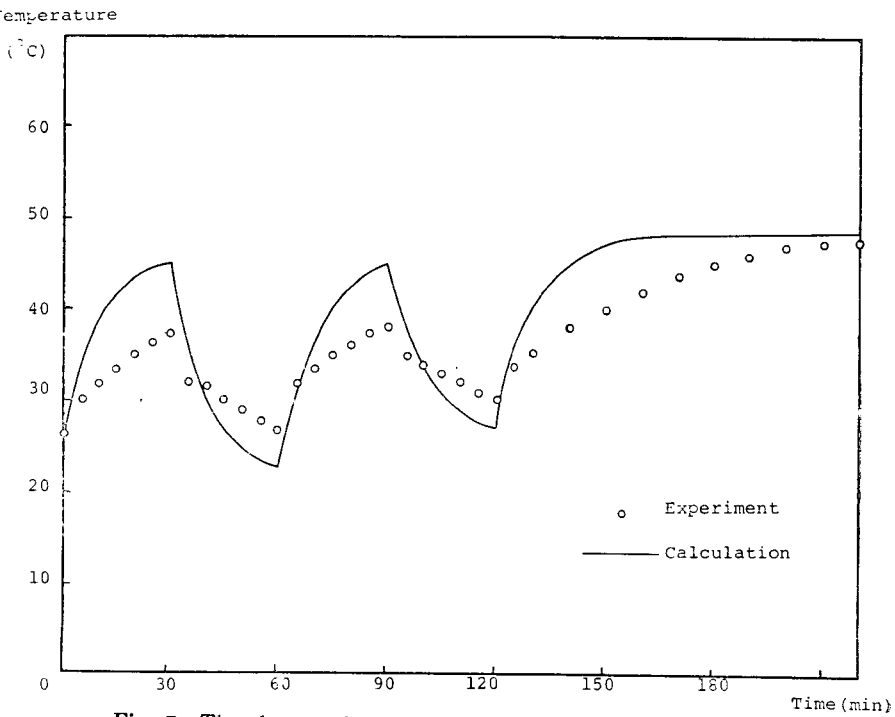


Fig. 7 The change of hot leg temperatures due to power oscillation

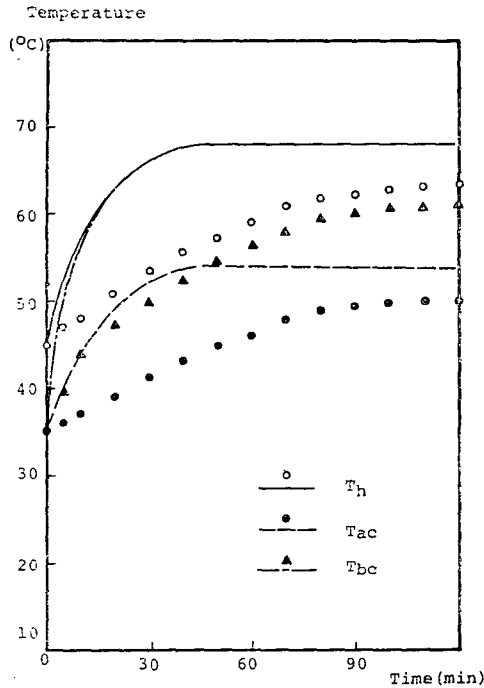


Fig. 8 Transition from two-loop to one loop operation at 3234 watt

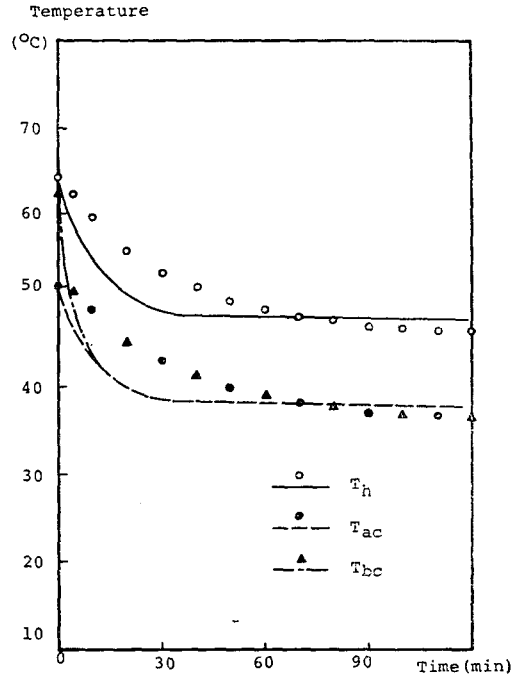


Fig. 9 Transition from one-loop to two-loop operation at 3225 watt

타법을 알 수 있다. 이는 주로 vessel 部位에 대한 일차원적인 모델링에서 연유하는 것으로 보이는데 실험에서는 3차원적인 현상이 뚜렷이 나타난다. 實驗은 層流(laminar flow) 및 遷移領域(transition region)에서 행해졌기 때문에 降水管에서 유동의 완전한 혼합(mixing)이 일어나지 않고 거의 정지해 있는 부분이 존재하게 된다. 또한 爐心에서는 히터가 中央에 위치하므로 그 부분의 물만 먼저 데워져서 上昇하게 되고, 그 주위의 물은 중앙보다 큰 밀도를 갖게 되므로 거의 움직이지 않거나 오히려 下降流動(downflow)이 될 수도 있다. 따라서 회로 조건의 변화 이후 새로운 定常狀態에 이르기 위해서는 정지 상태의 물까지 열적 평형을 이루어야 하기 때문에 과도 시간이 길어진다.

실제 原子爐에서는 自然循環의 경우라도 완전한 亂流가 유지되고(PWR의 경우 0.2% 출력에서 $Re \approx 2 \times 10^6$)⁽³⁾, 出力이 爐心全體에 分布되기 때문에 이러한 영향은 줄어들다. 그러나 보다 正確한 模寫를 위해서는 爐心을 3次元的으로 다루어야 할 것이다.

Figs. 8, 9에서 1回路運轉(1-loop operation)은 한쪽 회로에 유동이 전혀 존재하지 않음을 의미하지는 않는다. 다만 B-회로의 熱交換器가 동작하지 않을 뿐

으로 상당한 유량이 고장난 회로에도 존재한다. 實驗에서는 1회로 운전에서도 동작하지 않는 열교환기를 통하여 熱損失이 일어나서 T_{bc} 는 T_h 보다 낮고 또한 이들은 계산값보다 낮다. 特定한 原子爐에 대한 열손실을 프로그램에서 고려하는 것은 어렵지 않다.

熱交換器에서의 熱傳達係數를 구하기 위한 실험에서 層流에서 亂流로의 천이가 $Re \approx 1600$ 에서 일어났다. 이는 強制循環에서 일반적으로 통용되는 遷移 Reynolds 數 영역보다 낮은 것으로 다른 사람에 의해서도 보고된 바 있다⁽⁸⁾. 물론 自然循環流動은 Grashof 數에 의해 특징지어지며 $Gr \approx 1 \times 10^7$ 에서 遷移가 일어났다.

Fig. 10은 特定한 條件下에서의 자연 순환계의 不安定性을 보여준다. 초기 조건으로 B-회로의 冷管에 위치한 밸브를 닫음으로써 물의 흐름을 차단하여 A-회로의 유동만 존재하는 정상 상태를 만들었다. B-회로의 熱交換器는 계속 가동시키지 않은 채 닫힌 밸브를 열자 그림과 같은 온도의 진동이 일어났다. 처음의 짧은 과도기 동안 T_{bh} 는 갑자기 상승하여 T_{ch} 와 같게 되고 T_{bc} 는 급격히 하강하는데, 이는 B-회로에서의 갑작스런 流動을 뜻한다. 이후 B-회로의 熱交換器 근처에 있던 冷물과 섞임으로써 시스템의 온도는 약간

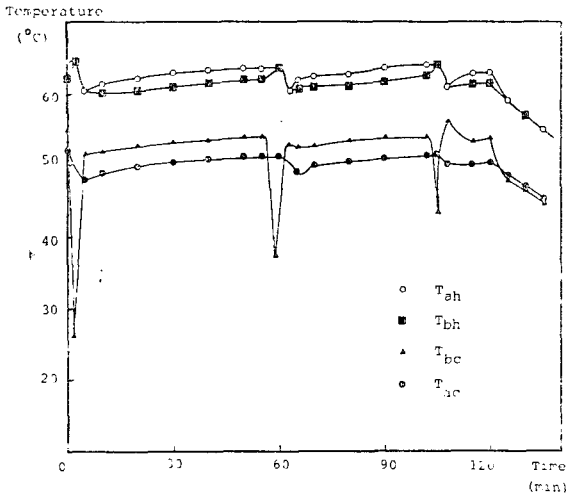


Fig. 10 Instability of the natural circulation loop

떨어졌다가 熱을 흡수하여 서서히 증가하면서 일단은 定常狀態에 이르는 것처럼 보인다. 그러나 55 분과 100 분경에 다시 搖動이 일어나는데, 그때의 溫渡가 一定한 것으로 보아 어떤 臨界點이 존재함을 짐작할 수 있다. 120 분에는 B-회로의 열교환기를 가동시켰으므로 온도가 계속 떨어진다.

Fig. 11 은 2回路流動에서 1回路流動으로 전이할 때 計算 결과 얻어진 流量의 變化를 보여준다. 熱交換器가 동작하지 않는 B-회로에도 상당한 流量이 存在하고, 全體流量은 1회로 유동에서도 2회로 유동의 경우와 비슷함을 알 수 있다. Fig. 12는 實驗裝置의 다른 변수들은 변화시키지 않고 爐心과 熱交換器 사이의 높이차(Δz)를 변화시킬 때 얻어지는 몇 가지 계산값을 나타내는데 流量은 Δz 에 거의 비례함을 보여준다.

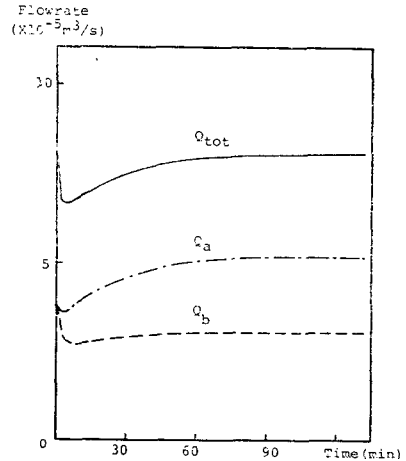


Fig. 11 Transition from two-to one-loop operation at 3234 watt

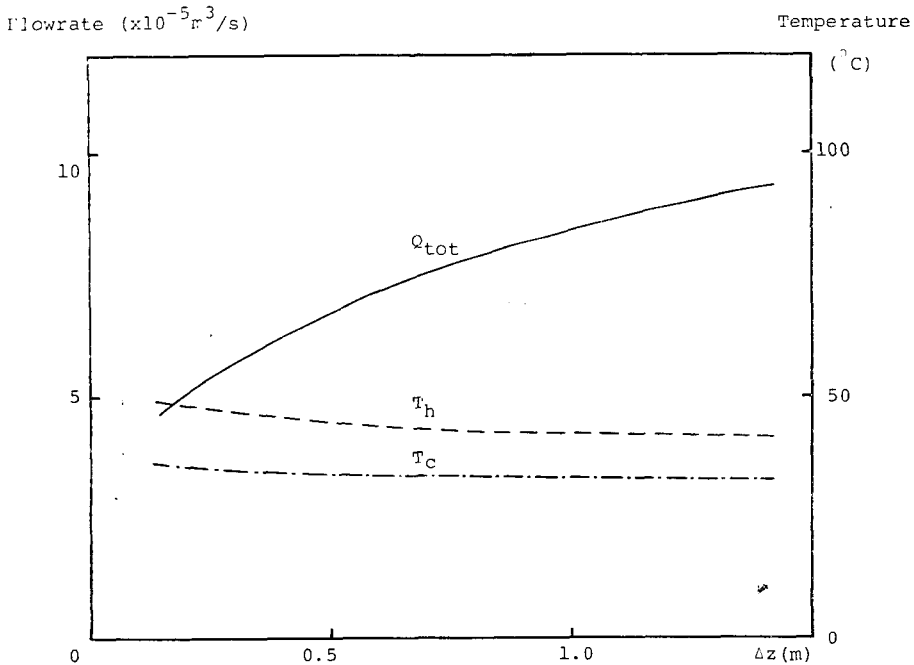


Fig. 12 The change of the steady-state behavior with varying elevation difference(Δz)

5. 結 論

開發된 전산 코드(SIMFARS)는 改善되어야 할 부분을 많이 지니고 있지만 自然循環系의 過渡現象을 대체로 잘 模寫하고 있다. 實驗結果와의 주된 차이는 과도 시간의 길이에 있는데 이는 주로 1次元的인 모델막에서 연유하는 것 같다. 그러나 이러한 차이는 자연순환의 경우에도 완전한 亂流가 유지되는 실제 原子爐에서는 줄어들며, 신속한 계산과 비교하여 허용될 수 있다.

실험을 통하여 自然循環은 낮은 온도 영역에서도 効果的인 冷却手段이 될 수 있음을 확인하였으며, 또한 特別한 條件에서는 不安定性(instability)이 일어남을 보았다.

SIMFARS 코드에 적절한 加壓器(pressurizer) 및 蒸氣發生器(steam generator) 모델 등이 결합되면 실제 原子爐의 過渡現象 해석에 이용될 수 있다. 또한 本研究는 간단한 모델링을 통해서도 多回路 自然循環界의 과도 현상을 효과적으로 모사할 수 있음을 보여주었으며, PWR 및 LMFBR 에 관한 fast-running 계통 코드 개발을 위한 좋은 出發點이 될 수 있다.

제작된 실험 장치는 또한 자연 순환계에서의 熱傳達係數 測定이나 LMFBR 에 관한 실험 등에 유익하게 이용될 수 있다.

Reference

- (1) Y. Zvirin, "A Review of Natural Circulation Loop in Pressurized Water Reactors and Other Systems", Nucl. Eng. & Des., Vol. 67, pp. 203~225, 1981
- (2) Y. Zvirin, P.R. Jeuck III, C.S. Sullivan and R.B. Duffey, "Experimental and Analytical and Analytical Investigation of a Natural Circulation System with Parallel Loops", J. of Heat Transfer, Vol. 103, pp. 645~652, 1981
- (3) P. Jeuck III, L. Lennert and R.L. Kiang, Single-Phase Natural Circulation Experiment on Small-Break Accident Heat Removal, EPRI Report NP-2006, 1981
- (4) R.L. Kiang, Two-Phase Natural Circulation Experiments in a Test Facility Modeled After Three Mile Island Unit-2, EPRI Report NP-2069, 1981
- (5) J.L. Gillette, R.M. Singer, J.V. Tokar and J.E. Sullivan, "Experimental Study of the Transition from Forced to Natural Circulation in EBR-II at Low Power and Flow", J. of Heat Transfer Vol. 102, pp. 525~530, 1980
- (6) W.P. Baek and S.H. Chang, "A Simplified Fast Running System Code Development to Simulate the Loop Transients", J. of Korean Nuclear Society, Vol. 15, pp. 183~196, 1983
- (7) E. Holmes, Handbook of Industrial Pipe Work Engineering, Chap. 3, John Wiley & Sons, New York, 1974
- (8) J.P. Holman, Heat Transfer, pp. 292-295, McGraw-Hill, New York, 1981