

<論 文>

# 수평배관에서의 열유동 성층화현상에 대한 실험적 연구

김병주\* · 이찬우\*\* · 장원표\*\*\*

(1995년 2월 3일 접수)

## Experimental Study on the Thermal Flow Stratification in a Horizontal Piping System

Byong Joo Kim, Chan Woo Lee and Won Pyo Chang

**Key Words:** Thermal Flow Stratification(열유동 성층화), Pressurizer(가압기), Surge Line(밀림관), Froude Number(프로이드수)

### Abstract

Characteristics of thermal flow stratification were studied experimentally by using the small scale pressurizer-surge line model. Thermal flow stratifications in the horizontal section of surge line were analyzed by the relation between the maximum temperature difference at any cross section in surge line and the Froude number representing the boundary conditions, i.e., in/out surge flow velocity and temperature difference of system. Thermal flow stratifications in outsurge flow decreased inversely proportional to the Froude number and did not exist for  $Fr > 1$ . In insurge flow thermal flow stratifications disappeared near  $Fr = 1.5$ , but resulted in the higher temperature difference than the case of outsurge flow.

### 기 호 설 명

- $D$  : 관직경 (m)
- $Fr$  : 프로이드 수
- $g$  : 중력가속도 (m/s<sup>2</sup>)
- $Ri$  : 리차드슨 수
- $t$  : 시간 (sec)
- $T$  : 온도 (°C)
- $\Delta T$  : 온도차 (°C)
- $\Delta T^*$  : 무자원 온도차
- $V$  : 밀림유동속도 (m/s)
- $\rho$  : 밀도 (kg/m<sup>3</sup>)
- $\theta$  : 방위각 (degree)

### 하첨자

- $c$  : 저온

- $h$  : 고온
- $PZR$  : 가압기
- $RCS$  : 원자로 냉각계통

## 1. 서 론

열유동 성층화현상이란 거의 정지상태의 유체가 있는 수평배관에 온도가 다른 유체가 비교적 낮은 속도로 유입될 경우 밀도차로 인해 온도가 높은 유체는 수평배관의 상부로, 온도가 낮은 유체는 수평배관의 하부로 분리되어 흐르는 현상을 말한다. 이러한 열유동 성층화현상은 가압경수로형 원자로의 증기발생기의 주급수 노즐부위의 수평배관이나 주급수계통 전반의 수평배관에서 발생할 수 있으며 특히 저출력운전시 급수유량이 작고 비교적 낮은 온도의 보조급수가 공급될 때 발생한다. 미국의

\*정회원, 홍익대학교 기계공학과

\*\*정회원, 홍익대학교 대학원

\*\*\*정회원, 한국원자력연구소

NRC(nuclear regulatory commission)는 기존의 원자력발전소 뿐만이 아니라 설계중인 원자력발전소에 대해서 이와 같은 배관들을 대상으로 열유동 성층화현상의 존재여부 검토 및 해석을 수행하여 배관의 건전성을 확인 및 확보하도록 NRC Bulletin 88-11에 고시하였다.<sup>(1)</sup>

열유동 성층화현상이 수평배관에 발생하면 관 단면의 상부와 하부간의 열팽창 차이에 의해 배관에 휨이 발생하며 고온유체와 저온유체의 경계면이 닿는 배관벽은 경계면변동에 따라 반복 열응력을 받게 된다. 이러한 반복 열응력은 계통의 압력경계 및 지지구조물의 건전성에 영향을 끼치며 배관의 균열이나 파손이 발생할 수도 있다. 이러한 열유동 성층화에 의해서 발생된 응력들을 기존의 배관설계시에 배관에 작용하는 열하중들에 포함하지 않았으나 최근의 실험 및 해석결과들에 의하면 열유동성층화현상이 배관지대에 하중을 주는 불필요한 번위를 발생시키는 중요한 요인으로 판명되었다.<sup>(2)</sup>

가압경수로형 원자력 설비의 가압기(PZR)와 노심냉각계통(RCS)의 고온관(hot-leg) 사이에 설치된 밀림관(surge line)은 열유동 성층화현상이 반복적으로 발생하는 대표적인 배관부이다.<sup>(3)</sup> 가압기 내에는 포화수증기와 포화수가 채워져 있으므로 포화수증기의 압축성 체적에 의해 가압기는 팽창탱크의 역할을 수행한다. RCS의 압력이 증가할 경우 냉각재는 밀림관을 통하여 가압기에 유입(안밀림)되어 RCS의 압력증가를 완충시켜주며 RCS의 압력이 감소할 경우 가압기내의 상대적으로 높은 온도의 포화수가 밀림관을 통하여 RCS로 유입(바깥 밀림)하므로 압력감소를 방지한다. 이와 더불어 가압기에 설치된 히터와 스프레이가 구동하여 계통의 압력을 기준조건으로 유지하게 된다. 바깥밀림(outsurge) 과정에서 가압기내의 상대적으로 뜨거운 유체는 수평배관 내에서 성층화되어 관의 상부를 채우며 흐르고, 관의 하부는 상대적으로 낮은 RCS 고온관내 유체의 온도로 유지된다. 안밀림(insurge)이 발생하면 RCS 고온관의 상대적으로 차가운 유체가 밀림관의 하부를 채우면서 흐르는 열유동 성층화현상이 마찬가지로 형성된다.

Soo와 Lyczkowski<sup>(4)</sup>는 원자로의 주급수관에 온도가 다른 보조급수가 고압으로 주입(high-pressure injection, HPI)될 경우의 혼합성층유동에 대하여 연구하였다. 주급수배관측에 대한 보조급수의 고압주입각의 영향을 급수배관계, 즉 강수관

(downcomer)에서 발달하는 온도분포의 함수로 해석하였다.

Nourbakhsh와 Theofanous<sup>(5)</sup>는 원자로의 주급수관에 온도가 다른 보조급수가 고압으로 주입될 경우의 혼합성층유동에 대하여 연구하였으며 이론적인 열유동 성층화현상의 경계를 순환유량과 고압주입유량의 함수로 정의하였다.

원자력발전소 배관계통에 대한 건전성 평가실험중에서 실제에 가까운 대규모 실험으로는 HDR 실험을 들 수 있다.<sup>(6)</sup> 수평관의 상부와 하부에 인접한 유체의 온도는 고온수 및 저온수의 온도로 측정되었으며 주어진 방위각범위에서 관의 측면에 접한 유체의 경우 혼합영역에 속하여 그 온도가 고온수의 온도로부터 저온수의 온도로 큰 구배로 변화하는 것을 관찰하였다. 관 내벽과 외벽의 온도구배는 관벽의 열용량이나 전도열손실 등에 의해 유체의 온도구배보다 작은 것으로 제시하였다.

Griesbach 등<sup>(7)</sup>은 SanOnofre Nuclear Generating Station의 Unit 2와 Unit 3(SONG 2/3)에서 밀림관의 열성층화를 규명하기 위하여 EPRI의 FatiguePro 시스템을 적용하였다. 약 10시간에 걸쳐 가압기의 압력을 24기압에서 153기압까지 증가시키는 가열과정(heatup)동안 밀림관에서 발생하는 온도차를 해석하였으며 이 때 RCS의 온도는 일정하게 유지되었으나 가압기내 포화수의 온도는 압력의 증가와 함께 상승하였다. 바깥밀림 유동은 가압기와 RCS간의 온도차의 30%에서 80%에 해당하는 큰 상부-하부 온도차를 유발하였으나 안밀림유동의 경우에는 20%이하, 대부분의 경우 10%미만의 상부-하부 온도차가 발생하였다고 주장하였다.

국내에서는 강형석 등<sup>(8)</sup>이 영광 원자력발전소 3, 4호기의 밀림관을 상사성에 따라 축소, 제작하여 수직방향과 축방향으로 유체 및 배관의 온도분포를 예측할 수 있는 실험식의 모형을 개발하였다. 그리고 염학기와 박만홍<sup>(9)</sup>은 원자력발전소에서 터빈출력이 급격하게 감소하여 절탄기의 급수후 단배관에 있는 급수제어밸브 후단의 수평배관에서 열성층화현상이 발생할 경우에 대하여 시간변화에 따른 배관벽 및 배관내부의 유동 및 온도분포를 수치적으로 해석하였다.

그러나 이상의 연구들은 특정조건에 대한 열성층화현상을 해석한 것으로 밀림유동 특성을 임의로 변화시키면서 급격한 과도현상에서 발생가능한 최

대온도차와 발생위치 등에 관한 실험적 연구는 미미하여 이에 대한 체계적인 연구가 요구된다.

본 연구에서는 밀림관-가압기의 축소모형을 사용하여 과도적인 안/바깥 밀림유동시의 수평밀림관에서 발생하는 열유동 성층화 특성을 실험적으로 연구하였다. 밀림관내의 열유동 성층화 특성을 밀림관의 단면에서 형성되는 최대온도차의 측면에서 밀림유동속도, 가압기와 냉각계통의 온도차 등의 운전조건의 함수로 해석하였다. 본 연구의 결과는 수평배관계의 열적반응에 대한 이해를 증진시키고 보다 효율적이고 안전한 배관시스템의 설계 및 운전을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 밀림관-가압기 계통의 기하학적인 구조를 유지하면서 그 크기를 실험물의 1/6 축소모델로 구성하여 열유동 성층화현상을 실험적으로 해석하였다. 본 실험장치는 유체공급부, 시험부, 회복부로 구성되며 RCS 모사용의 수평관은 직경 80 mm의 SUS 304를 그 외의 배관에는 직경 50 mm의 SUS 304관을 사용하였다.

#### 2.1.1 유체공급부

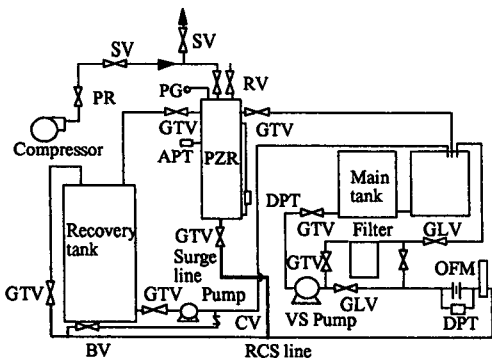
유체공급부는 시험유체인 증류수를 저장하는 주탱크(체적 400리터 2기)와 가변펌프(150~1500

rpm, 양정 8 m, 최대유량 36 t/hr, 출력 5 kW), 필터로 구성하였다. 필터의 하류에 주탱크로의 우회로를 구성하여 저유량의 경우 시험부로 보내지는 유량조절이 용이하도록 하였다. 시험부로 보내지는 유체는 유량측정용의 오리피스를 통과하며 오리피스 양단에서의 차압측정을 위한 차압변환기와 목측용 유량계가 설치되었다.

#### 2.1.2 시험부

시험부는 가압기-RCS관 사이의 수평밀림관이다. 가압기는 내경이 250 mm이고 길이가 1.5 m인 SUS관으로 제작하였다. 가압기내의 수위변화를 측정하기 위하여 가압기 상부와 하부의 차압을 측정할 수 있도록 차압변환기를 설치하였다. 또한 가압기의 수위변동은 가압기벽에 설치된 감시창에 의한 목측도 가능하다. 가압기의 상부덮개에는 감압밸브(조절범위 1-10 kgf/cm<sup>2</sup>)와 압력계(0~2 kgf/cm<sup>2</sup>)가 설치되어 있으며 가압을 위한 압축공기 공급선이 연결되어 있다. 압축공기는 공기압축기(최대압력 10 kgf/cm<sup>2</sup>, 출력 5 kW)로부터 공기필터, 압력조절기(조절범위 0~2 kgf/cm<sup>2</sup>), 그리고 솔레노이드밸브를 통과하여 공급된다. 바깥밀림의 경우 가압기내의 작동유체의 체적이 감소하여 가압기 압력이 감소할 때 비례적으로 압축공기의 공급량을 증가시켜 가압기출구의 압력을 조정하며 밀림유량을 일정하게 유지할 수 있도록 하였다. 가압기 벽면에는 길이방향으로 등간격으로 5개의 열전대(K-type)가 설치되어 있으며 그 반대측에 목측을 위한 다이알식온도계가 부착되어 있다. 이는 밀림유동시의 가압기내 유체의 성층화과정을 확인하고 가압기 길이방향의 유체온도구배를 측정하기 위한 것이다. 가압기의 아래덮개에 장착된 4개의 전기가 열기(직경 15 mm, 길이 300 mm, 단위출력 500 W)는 총출력이 2 kW이며 온도조절기에 의한 on/off 방식의 가열로 가압기내 유체온도를 일정하게 유지하는 역할을 수행한다.

가압기와 RCS관은 밀림관에 의해 연결되며 밀림관은 Fig. 2와 같이 길이 1000 mm의 수평배관부와 600 mm의 상, 하 수직배관부들로 구성하였다. 수평배관부 양단에 있는 엘보우와 선단부(엘보우로부터 수직배관부로 10 cm 거리), 중간지점의 관벽에는 등방위각(30°)으로 각각 7개의 K-type 열전대를 설치하여 관내부의 유체온도를 측정할 수 있도록 하였다.



- BV - Ball Valve
- CV - Check valve
- RV - Relief Valve
- GLV - Globe Valve
- GTV - Gate Valve
- SV - Solenoid valve
- DPT - Differential Pressure Transducer
- APT - Absolute Pressure Transducer
- OFM - Orifice Type Flowmeter
- PR - Pressure Regulator
- PG - Pressure Gauge
- PZR - Pressurizer

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

**Table 1** Ranges of parameters in thermal flow-stratification experiments

Parameter	Range
RCS hot leg temperature (°C)	10~28.5
Pressurizer temperature (°C)	70~90
Pressure (bar)	1.0
Pressurizer level (mm)	800
RCS flow rate (liter/min)	6.0~16.2
Surge flow rate (liter/min)	0~1.0

### 2.1.3 회복부

회복부는 RCS관 유체나 밀림관 유체를 일시 저장하였다가 주탱크로 이송하는 부분으로 회복탱크와 보조펌프로 구성하였다.

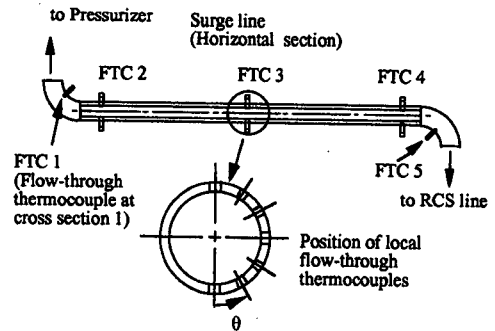
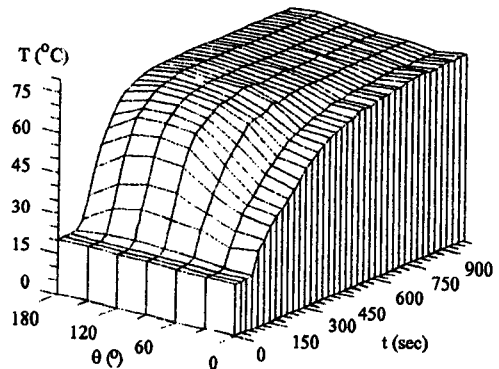
## 2.2 실험방법

수평배관내의 열유동성층화 특성을 해석하기 위한 실험은 batch방식으로 수행되며 그 과정은 다음과 같다. 먼저 가압기내의 작동유체인 물을 카트리지형 전기가열기에 의해 가열시킨다. 가압기내의 물이 설정온도로 가열되면 가변펌프를 구동하여 RCS관내 유량을 설정치로 고정하고 바깥밀림의 경우 공기압축기에서 가압된 공기를 솔레노이드 밸브를 사용하여 가압기에 공급하거나, 안밀림의 경우 대기중에 개방된 솔레노이드밸브의 개폐시간 및 빈도를 제어하여 가압기내의 공기를 배출하여 가압기의 압력을 일정하게 유지한다. 이때 상부 수직 밀림관에 설치된 밸브를 개방하면 밀림관내 유동은 가압기와 RCS관 사이의 압력차에 의해 안밀림 혹은 바깥밀림으로 나타난다. 안밀림과 바깥밀림의 전 과정동안 밀림유속이 일정하도록 솔레노이드밸브의 동작을 제어한다. 시험부에서 측정되는 압력 및 온도는 A/D변환기 및 하이브리드기록계에 의해 수집, 지시되며, 이들 자료는 PC에 연결되어 저장된다.

본 실험의 범위는 Table 1과 같다.

## 3. 결과 및 고찰

초기에 정체상태의 유체가 있는 수평 밀림관에 온도가 다른 RCS나 가압기의 유체가 비교적 낮은

**Fig. 2** Arrangement of surge lines for thermal flow stratification experiments**Fig. 3** Variation of fluid temperature at different azimuthal angle in cross section 2 in the case of outsurge flow

속도로 유입되어 안밀림이나 바깥밀림이 발생할 경우 배관내의 임의의 지점에서의 온도는 시간에 따라 크게 변화한다. 수평배관계통에서 최대온도차가 어느 시간, 어느 단면에서, 어느 부분의 온도차로 발생하는 지를 먼저 확인하기 위하여 예비실험이 수행되었다. 예비실험은 기준 경계조건인 밀림유속 1.5 cm/sec, 가압기내 물의 온도 80 °C, RCS 고온관 물의 온도 20 °C에서 안밀림과 바깥밀림의 경우에 대하여 수행되었으며 Fig. 2에 제시된 수평배관부의 5 단면에서 각각 7 방위각의 관벽에 인접한 물의 온도를 측정하였다.

Fig. 3의 바깥밀림의 경우 수평배관부의 단면 2에서 등 방위각으로 측정된 유체의 과도적인 온도 분포가 주어져 있다. 초기에 RCS의 온도로 균일하게 주어진 밀림관내 유체의 온도분포는 가압기내의 고온 유체가 수직배관부를 거쳐 수평밀림관내로

유입함에 따라 관둘레 방위각에 큰 구배를 형성하며 급격히 증가한다. 이때 수평밀림관의 최상부(방위각 180도)에서의 유체보다 약간 아래(방위각 150도)를 통과하는 유체의 온도가 좀 더 높게 나타남을 볼 수 있다. 이는 관단면의 최상부를 통과하는 유체의 열용량에 비해 관벽과의 접촉면적이 커서 관벽으로의 전도손실이 크기 때문으로 고려된다. 그러나 시간이 지나면서 이러한 온도차이는 관내의 유체의 혼합, 대류 등에 의해 감소하고 본 실험의 경우 약 20여분이 증가했을 때 단면 2에서의 온도분포는 거의 균일한 상태로 나타났다. 전 운전시간 동안 최소온도는 관단면의 하부에서 발생하였다.

Fig. 4는 바깥밀림의 경우와 동일한 조건에서 안밀림이 발생할 때 수평배관부의 단면 3에서 측정된 과도 온도분포를 제시하고 있다. 먼저 바깥밀림을 유도하여 밀림관내 유체의 온도가 가압기내의 유체와 균일한 온도분포가 되었을 때 릴리프밸브 및 슬레노이드밸브로 가압기의 압력을 조절하여 안밀림을 유도하였다.

이에 따라 RCS관의 유체가 밀림관내로 유입하므로 관하부의 유체는 그 온도가 급격히 감소하나 관 상부의 유체는 온도의 감소율이 훨씬 작음을 볼 수 있다. 이는 RCS로부터 유입되는 저온의 유체가 밀림관을 완전히 채우지 못하고 단지 수평관의 하부만을 채우고 흐르기 때문이며 초기의 관내에 존재하던 고온유체는 부력에 의해 관의 상부에 모인 후 관하부를 유동하는 저온유체와의 대류접촉과 혼합 등에 의해 서서히 그 온도가 감소하기 때문이다.

Fig. 5는 Fig. 3의 경우와 동일한 경계조건에서 수평배관부의 단면 1, 2, 3에서 발생하는 최대온도차를 바깥밀림의 전과정 동안 보여주고 있다. 수직배관부와 수평배관부의 접합부인 엘보우에서는 부력의 영향이 관단면의 온도분포에 직접적인 영향을 미칠수 없기 때문에 그 최대온도차가 상대적으로 작으나 수평배관부로 유입하면서 부력의 영향에 의해 그 온도차가 커짐을 알 수 있다. 그러나 시간이 지남에 따라 관벽으로의 손실이나 고온유체와 저온유체의 내부혼합 등에 의하여 그 온도차가 감소하며 약 18분이 지났을 때 무시할 수 있을 정도로 나타났다.

Fig. 6은 안밀림의 과정동안 단면 3, 4, 5에서 형성되는 각 단면의 최대온도차를 보여주고 있다. 단면 3에서 온도차가 가장 크게 나타나고 있으며

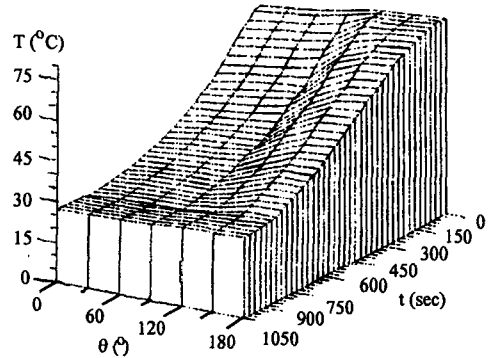


Fig. 4 Variation of fluid temperature at different azimuthal angle in cross section 3 in the case of insurge flow

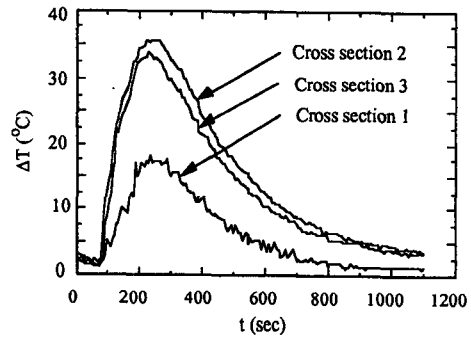


Fig. 5 Variation of maximum temperature difference at different cross sections in the outserge flow

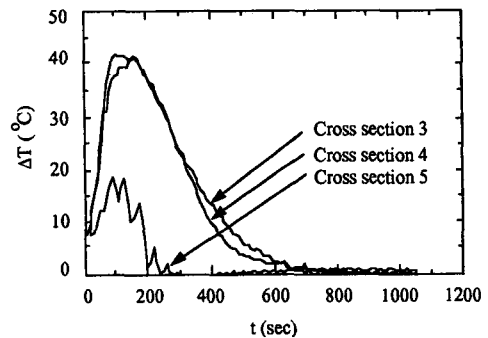


Fig. 6 Variation of maximum temperature difference at different cross section in the case of insurge flow

밀림유동이 지속됨에 따라 바깥밀림의 경우보다 안밀림의 경우 열유동 성층화가 상대적으로 빨리 소멸되는 것을 알 수 있다.

Fig. 3으로부터 6에서 볼 수 있듯이 밀림유동시

의 수평배관 계통에서 발생하는 열유동성층화는 밀림유동의 경계조건에 따라 그 최대 성층화 지점이 다양하게 바뀔 수 있으며 그 발생하는 시간도 달라질 수 있다.

본 연구에서는 열유동성층화의 크기를 전 과도유동시간 중에서 수평배관부의 임의의 유동단면에서 발생하는 유체의 온도차중 그 최대치로 제시하였다. 예비실험의 결과에 따라 열유동 성층화의 최대온도차는 바깥밀림의 경우 단면 2에서 방위각이 0°와 150°인 지점의 온도차로, 안밀림의 경우 단면 3에서 방위각이 0°와 180°인 지점의 온도차로 측정하여 다음과 같이 무차원화하였다.

$$\Delta T^* = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{PZR} - T_{RCS}} \quad (1)$$

열유동 성층화현상에 대한 상관 매개변수로 프로이드수(Froude number)가 사용되었으며 이는 다음과 같이 정의되었다.<sup>(6)</sup>

$$Fr = \left[ \frac{\rho V^2}{(\rho_c - \rho_h) g D} \right]^{1/2} \quad (2)$$

프로이드수는 부력수두에 대한 유체의 속도수두의 비이며, 이론적으로 프로이드수가 클 때, 부력의 영향이 상대적으로 작아지므로 열유동 성층화의 발생은 억제된다. 프로이드수와 유사한 의미의 무차원수로 리차드슨수(Richardson number)가 사용될 수도 있다.

$$Ri = \frac{(\rho_c - \rho_h) g D}{\rho V^2} \quad (3)$$

리차드슨수는 유체의 부력수두의 속도수두에 대한 비이다. Table 1의 실험범위에 대하여 측정된 열유동 성층화의 결과를 프로이드수와 밀림관의 임의의 단면에서 발생하는 최대 무차원 온도차와의 관계로 Fig. 7에 도시하였다.

바깥밀림의 경우 프로이드수가 1보다 클 때 열유동 성층화는 발생하지 않았으며  $0.1 < Fr < 1.0$ 의 범위에서 무차원 온도차는 거의 선형적으로 프로이드수에 반비례하여 감소하였다. 안밀림유동시에는 프로이드수가 1이상이 되어도 열유동 성층화가 완전히 사라지지 않았으며 이는 안밀림유동시 수직밀림관을 통하여 수직 상승한 RCS부의 차가운 유체가 수평밀림관내에 진입할 때 야기되는 유동교란이 중력의 영향으로 바깥밀림의 경우보다 상대적으로 작은 상태로 유입하여 기존의 유체와의 부력차이로

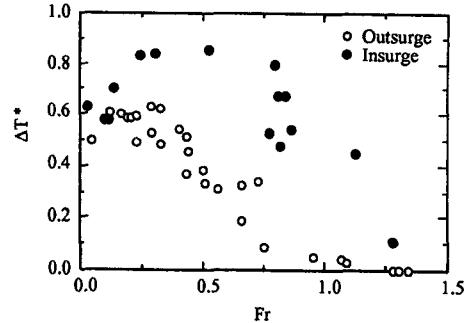


Fig. 7 Characteristics of thermal flow stratification during out/in surge flow in horizontal surge line

관하부를 따라 흐르기 때문으로 고려된다. 프로이드수에 대한 최대 무차원 온도차의 변화는 바깥밀림의 경우와 같이 안밀림에서도 프로이드수에 반비례하여 감소하나 그 변화율은 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 또한 안밀림의 경우 낮은 프로이드수에서 최대 무차원 온도차가 도리어 감소하는 경향을 가지는 것은 밀림유동 초기에 높은 온도로 유지되어 있던 관벽으로부터 관하부를 유동하는 저온유체로의 열전달에 기인하는 것으로 이해된다.

안밀림유동과 바깥밀림유동에서 무차원 온도차가 프로이드수에 따라 감소하는 기본적인 열유동성층화 특성은 Griesbach 등<sup>(7)</sup>이 제시한 결과와 정성적으로 일치하고 있다. 그러나 무차원 온도차에 대한 프로이드수의 정량적인 영향과 밀림방향의 영향은 차이를 보이고 있다. 이는 Griesbach 등<sup>(7)</sup>의 결과가 원자력발전소의 초기시동의 경우를 대상으로 한 것으로서 안밀림이나 바깥밀림이 유도될 때 밀림관내의 작동유체의 온도가 가압기나 RCS 고온관내 유체의 온도와 같은 것이 아니라 발전설비의 운전 특성에 의하여 결정되어 본 연구의 경계조건과 다르기 때문이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 밀림관의 수평배관계에서 발생하는 열유동 성층화현상의 특성을 수평배관의 유동단면에서 밀림유동중 형성되는 최대 무차원 온도차와 밀림유속이나 시스템 온도차의 경계조건을 대변하는 프로이드수의 관계로 해석하였다. 그 결론은 다음과 같다.

(1) 밀림유동과정중 유동단면의 온도차는 바깥밀

림의 경우 수평밀림관의 입구 가까이에서 그리고 안밀림의 경우 수평밀림관의 입구 하류에서 발생한다.

(2) 바깥밀림에서 열유동 성층화는 프로이드수에 거의 선형적으로 반비례하여 감소하며 프로이드수가 1보다 클 경우 발생하지 않는다.

(3) 안밀림의 경우, 프로이드수가 약 1.5일 때 열유동 성층화 특성은 소멸되고 배관단면의 온도차는 바깥밀림의 경우보다 훨씬 크게 발달한다.

## 후 기

본 연구는 한국원자력연구소의 연구비 지원으로 수행되었으며, 관계자 여러분에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) NRC, 1988, "Thermal Stress in Piping Connected to RCS," *NRC Bulletin No. 88-11*.
- (2) Pierfederici, G. A. and Bak, W. J., 1989, "Design and Analysis of Surge Line for Stratified Flow," *Proc. Int. Symp. Pressure Vessel Technology and Nuclear Codes and Standards*, Seoul, KOREA, pp.17-54-17-61.
- (3) Miksch, M., Lenz, E. and Lohbery, R., 1985, "Loading Conditions in Horizontal Feedwater

Pipes of LWRs Influenced by Thermal Shock and Thermal Stratification Effects," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 84, pp.179~187.

- (4) Soo, S. L. and Lyczkowski, R. W., 1985, "Analysis of Stratified Flow Mixing," *Nuclear Science and Engineering*, Vol. 91, pp.349~358.
- (5) Nourbaksh, H. P. and Theofanous, T. G., 1986, "A Criterion for Predicting Thermal Stratification due to High-Pressure Injection in a Circulating Reactor Loop," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 94, pp.77~79.
- (6) Talja, A. and Hansjosten, E., 1990, "Results of Thermal Stratification Tests in a Horizontal Pipeline at the HDR-Facility," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 118, pp.29~41.
- (7) Griesbach, T. J., Riccardella, P. C. and Gosselin, S. R., 1991, "Application of Fatigue Monitoring to the Evaluation of Pressurizer Surge Lines," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 129, pp.163~176.
- (8) 강형석, 심상우, 김상녕, 1993, "원자력 배관 계통내의 열성층 연구," 한국원자력학회 '93추계 학술발표회 논문집, pp.43~50.
- (9) 염학기, 박만홍, 1994, "수평배관 내에서의 비정상 열성층유동 및 열전달," 대한기계학회 '94 춘계학술대회 논문집(Ⅱ), pp.428~433.