

원자로 비상 냉각재 누설에 의한 열성층의 비정상 특성에 관한 연구

한 성 민, 최 영 돈^{**}, 박 민 수
고려대학교 대학원, *고려대학교 기계공학과

Study of Thermal Stratification into Leaking Flow in the Nuclear Power Plant, Emergency Core Coolant System

Seong-Min Han, Yong Don Choi^{**}, Min Soo Park

Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

(Received March 11, 2005; revision received January 18, 2006)

ABSTRACT: In the nuclear power plant, emergency core coolant system(ECCS) is furnished at reactor coolant system(RCS) in order to cool down high temperature water in case of emergency. However, in this coolant system, thermal stratification phenomenon can be occurred due to coolant leaking in the check valve. The thermal stratification produces excessive thermal stresses at the pipe wall so as to yield thermal fatigue crack(TFC) accident. In the present study, when the turbulence penetration occurs in the branch pipe, the maximum temperature differences of fluid at the pipe cross-sections of the T-branch with thermal stratification are examine.

Key words: Thermal stratification(열성층), Turbulence penetration(난류침투), Safety injection system(안전주입계통), Branch pipe(분기배관)

기 호 설 명

- D_h : 수력 직경
- Re : Reynolds 수, UL/ν
- Ri : Richardson 수, $g'(D/V^2)$
- L_t : 난류침투길이(turbulenc penetration lenght)
- S_L : 배관중심길이(pipe center length)

그 리 스 문 자

α_b : 분기배관 기울기(branch pipe gradient)

1. 서 론

원자로 냉각재 계통(Reactor Coolant System, RCS) 배관에서 분기되어 있는 비상노심냉각 계통(Emergency Core Coolant System, ECCS) 배관⁽¹⁾의 수평 부위에는 체크밸브의 마모로 인한 냉각재의 누설 유입으로 열성층이 발생할 수 있다. 열성층의 지속적인 존재와 열교번⁽²⁾(thermal cycling)은 냉각 계통 배관에 과도한 열응력을 발생시켜 배관 변형 및 열피로 균열(Thermal Fatigue Crack, TFC)을 가져오며 심한 경우 배관 균열로 이어져 원자로 냉각재의 유출사고를 초래할 수 있어 배관손상의 원인이 되고 있는 열성층에 대한 이론적 연구가 필요하다. 현재 분기관의 열성층에 대

† Corresponding author

Tel.: +82-2-3290-3355; fax: +82-2-928-1067

E-mail address: ydchoi@korea.ac.kr

한 연구는 활발히 진행이 되고 있으며, 이들 대부분의 경우는 격리 밸브 전·후단의 온도차에 의한 정상상태⁽³⁻⁶⁾ 및 비정상상태⁽⁷⁾로 해석이 수행이 되고 있다. 또한 최근 발표된 논문을 보면 격리 밸브의 하단부에 누설을 가정하여 누설에 의한 분기관에서의 저온 물 유입과 분기관에서의 난류침투에 의한 열성층의 생성을 수치해석 및 실험에 의해서 규명하고 있다. 하지만 분기관 누설에 의한 상단부의 열성층이 주기적인 난류침투로 인해 어떠한 결과로 예측이 되며 상단부에서 발생한 열성층이 분기관 하단부에서는 어떻게 발생이 되며 유지가 되는지에 대한 비정상상태에서의 발생경로와 메카니즘에 대한 연구는 현재까지 이루어지지 못하고 있다. 실제 피로파괴는 비정상 열성층에서의 열교번일 가능성이 크기 때문에 비정상 열성층 현상의 발생 메카니즘과 규명이 본 연구의 가장 큰 목적이다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1과 같은 원관에서 정상상태 및 비정상 수치해석으로 난류침투의 비정상성(unsteadyness)에 의하여 열성층 생성영역이 시간에 대하여 변화하는 열교번(thermal cycling) 현상에 초점을 맞추었으며, 주관의 레이놀즈수와 분기관의 누설 유입량 변화에 의한 열교번의 주기성과 열성층 현상의 관계성을 알아보려고 하였다.

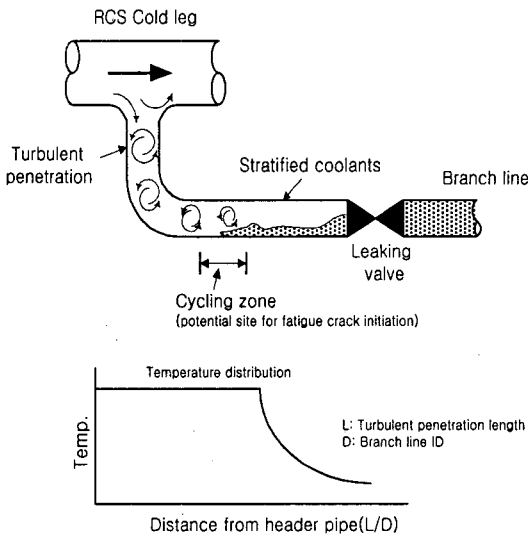


Fig. 1 Schematic diagram showing the effect of turbulent penetration on the thermal stratification.

2. 해석방법

2.1 수치해석

2.1.1 문제의 정의

본 연구는 상용 수치해석 프로그램인 Fluent를 사용하였으며, 벽면에서의 난류 유동을 해석하기 위해 RSM(Reynolds Stress Model) 채택하여 수행하였다. Fig. 2는 분기관에 생성된 격자 형상을 나타낸 것이다. 원전 비상노심 냉각재 계통 배관은 2개의 원관이 만나는 형상으로 인하여 곡면과 곡면의 경계면에서 격자 생성이 쉽지 않다. 따라서 분기관 하단부를 주관에 투영시킨 체적을 생성시키고 분기관 및 주관은 사각 덕트와 다르게 원관으로 이루어져 있어 원관 격자 생성으로 잘 알려져 있는 Butter-Fly법 격자를 이용하여 벽면 원주와 수직으로 만나게 되는 방법을 사용하여 격자를 생성하였다. 분기관의 곡관 경사도에 따라 90°, 120°, 150°로 3가지 형상에 대하여 격자 수를 각각 871,840개 그리고 841,120개로 하였고 벽면 집중 격자계를 이용하였으며 첫번째 격자점은 y^+ 를 0.5 이하로 하였다.

2.1.2 경계조건

Fig. 3에서 보는 바와 같이 주관의 입구와 출구가 있고 분기관에서는 밸브의 누설로 인한 누설 유입이 있다. 입구조건으로는 주관과 같은 단면을 갖는 직관유동을 완전 발달시킨 후 입구조건으로 넣어 주었고 출구에서는 입구에서 들어오는 유량과 누설로 들어오는 유량을 합한 유량이

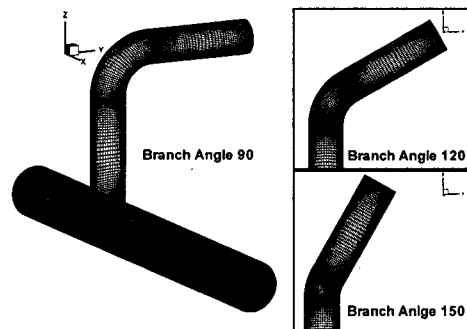


Fig. 2 Configuration of grid used in the computation (Branch $\angle_s=90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$).

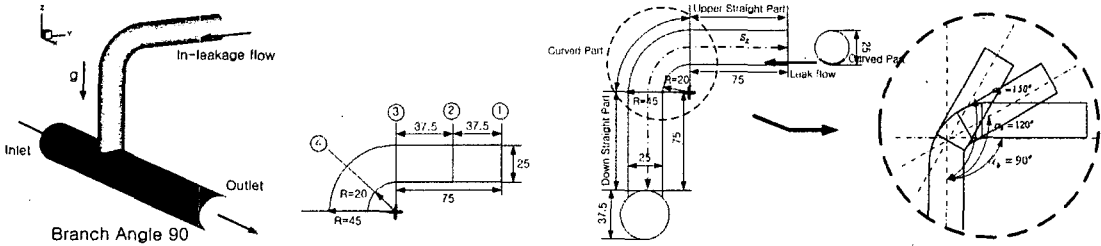


Fig. 3 Schematic diagram of branch pipe.

출구를 통하여 나간다고 하였다. 누설 유동은 정상상태이며 단면 하단부에서 일정한 속도로 들어오는 것으로 가정하였다.

분기관의 상단부 중앙에서부터 곡관의 중심과 하단부의 중앙을 잇는 선분으로 분기관의 중심길이 S_L 로 정의하고, 또한 분기관의 형상에 있어서 분기관의 기울기는 α_b 로 정의하며 곡관의 곡률중심으로부터 90°, 120°, 150°의 각에 따른 기울기를 줌으로써 난류침투에 대한 열성층의 발생을 비교하였다. 또한 난류침투의 비정상상태(unsteady state)에 의하여 열성층 생성 영역이 시간에 대하여 변하는 열교번(thermal cycling)을 확인함으로써 실제 원자로 냉각재 계통의 분기관에서 난류침투에 의한 열성층 발생 메커니즘을 확인하고자 하였다. 그리고 온도장에 대해서는 벽면은 단열되었다고 가정하였고 주관 입구의 누설에서는 각각 주관에서 흐르는 고온수(90°C)의 온도와 분기관으로 유입되는 저온수(20°C)의 온도를 가정하였다.

2.1.3 기준모형 선정

주관의 직경은 $D_1=37.5$ mm이고 분기관의 직경은 $D_2=25$ mm로 하였으며 기준모형은 실험 가능한 조건 하에서 난류침투와 열성층이 뚜렷하게

나타나는 조건을 예비 시뮬레이션을 통하여 찾아낸 것이다. 특성변수의 선택은 현재까지 보고된 자료들을 통하여 유추한 것이며 주관의 레이놀즈수와 밸브의 누설 유입량, 주관과 분기관의 직경, 그리고 분기관의 길이가 난류침투와 열성층 형성에 영향을 준다고 추정하였다. 본 연구에서는 주관과 분기관의 직경을 각각 D_1 와 D_2 로 고정시키고 나머지 특성변수에 변화를 주면서 시뮬레이션을 하여 기준모형은 선정하였다. 주관 입구로 들어오는 물의 온도는 363.15 K, 분기관의 누설 유동의 온도는 293.15 K로 하였으며, 밀도, 점성계수, 열전도계수, 정적비열 등의 물성치는 주관 입구의 압력에 대하여 온도에 따라 곡선맞춤(curve-fitting)한 수식을 만들어 사용하였다. 압력은 입구에서 출구까지의 변화량이 작고 물의 물성치 또한 압력에 대한 변화율이 매우 작으므로 입구의 압력에 대해서 온도만의 함수로 표현한 것은 타당성이 있다. 입구 압력은 실험 가능한 조건을 감안하여 1기압으로 하였고 기준모형의 입구 레이놀즈수를 57,000으로 한 것은 펌프의 용량을 감안한 것이다. 주관의 레이놀즈수 변화에 따른 상단부 원관의 수직방향 온도분포로 열성층이 잘 나타날 수 있는 레이놀즈수를 선정하고자 하였으며,

Table 1 Specifications of reference model

Case	Inlet		In-leakage		Curved		Down	Upper	Branch angle [°]	State
	Re	V_m [m/s]	V_i [m/s]	A [$E-3 m^2$]	r [mm]	R [mm]	L_1 [mm]	L_2 [mm]		
Reference	57,000	0.5	0.01	0.036128	20	45	75	75	90	Steady
									120	
									150	
									90	Unsteady
150										
A1	34,300	0.3						90	Steady	
A2	114,430	1.0								
A3	228,860	2.0								

레이놀즈수가 57,000일 때 온도차가 크게 나타남으로 주관의 레이놀즈수를 57,000으로 선정하였다. 기준모형의 상세조건은 Table 1에 나타내었다.

2.2 실험적 해석

2.2.1 실험장치

Fig. 4는 실험장치도의 개략적 모습을 나타내었다. 그림에서처럼 원자력발전소의 RCS 배관 계통을 모형화한 주관이 폐회로를 이루게 되며, ECCS 배관을 모형화한 분기관과 시험부에서 만나게 되며, 시험부에서는 각 부위 별로 관의 외부에 열전대를 삽입하여 온도의 분포를 측정하게 된다. 시험부에는 유리로 제작된 시험부와 스테인리스로 제작된 시험부가 있으며, 육안 관측인 가시화 실험과 온도측정 실험으로 구분하여 설치 및 측정을 하게 된다.

실험장치도는 저장고, 펌프, 수동식 유량제어밸브, 체크밸브, 유량계, 압력계, 시험부, 가시화 장비 및 항온설비로 이루어져 있다. 이는 크게 RCS 계통을 모형화한 1.5 inch 주관(main pipe line)과 ECCS 계통을 모형화한 1 inch 분기관(branch pipe line)으로 구성된다. 작동유체는 물로써 일정한 누설이 발생하는 분기관은 상온(20℃)에서 흐르게 되고, 주관은 항온설비에서 일정한 온도(90℃)를

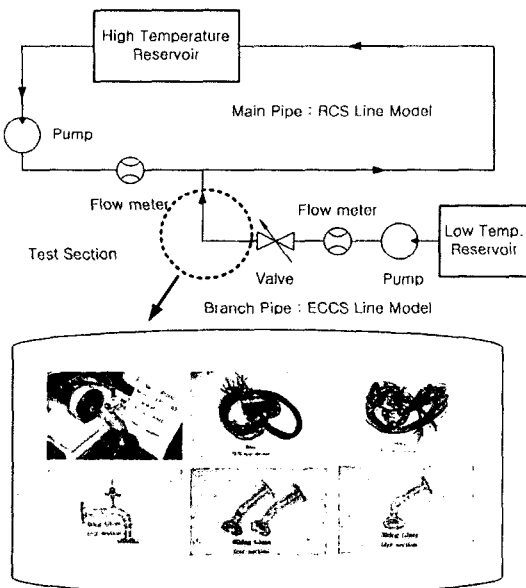


Fig. 4 Schematic diagram of test loop.

유지하며 흐르게 된다. 실험시에는 수동식 유량 제어밸브를 열어 분기관의 저온 물을 주관 쪽으로 흐르게 하면 주관 내의 고온의 물과 분기관에서 주관으로 흐르는 물이 서로 만나서 열성층 및 난류관통 현상을 만들게 된다. 이때 분기관에서 주관으로 흐르는 물의 유량은 유량제어밸브 전단에 설치되어 있는 유량계로 측정하게 된다.

2.2.2 실험내용

(1) 비정상 열성층 유동 가시화

본 실험에서는 열성층 현상을 육안 관측하기 위하여 저온 저장조에 물과 잘 섞이는 먹물을 넣어 고온의 물과 색으로 구별할 수 있게 하였으며, 실험시 유리로 제작된 시험부 내에서 색이 있는 저온의 물이 주관 내로 유입되면서 시험부에 충만한 고온의 물과 만나면서 열성층을 이루게 된다. 이때 색깔의 차이로 인하여 열성층의 형태를 육안으로 관측할 수 있다. 본 실험에서는 분기관의 누설유량의 변화와 주관 내의 레이놀즈수 변화에 따른 열성층의 형태를 관찰하였다.

(2) 비정상 열성층 유동의 온도변화 측정

Fig. 5는 온도측정을 위한 열전대의 삽입위치를 나타낸 것이다. 열성층의 발생은 유량, 유속, 온도차 등에 따라서 차이가 있으나 대체로 분기관 물이 유입되는 누설부 주위에 집중된다. 따라서 열전대는 그림에서처럼 분기관에서 저온의 물(20℃)이 시험부로 유입되는 부분과 상단부 중앙과 상단부 75 mm인 위치와 곡관의 중앙에 위치하였으며 각각 30°의 간격으로 12개씩 삽입하여 열전대를 설치하였다. 누수에 의한 어려움으로 제작된 스테인레스 시험부의 외벽면에 구멍을 뚫어 열전대를 삽입하였으며 시험부의 내벽 근처의 온도를 측정하였다. 그리고 분기관에서 상온의 물이 시

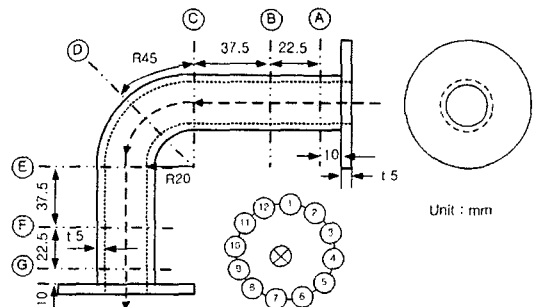


Fig. 5 The test is produced with the SUS.

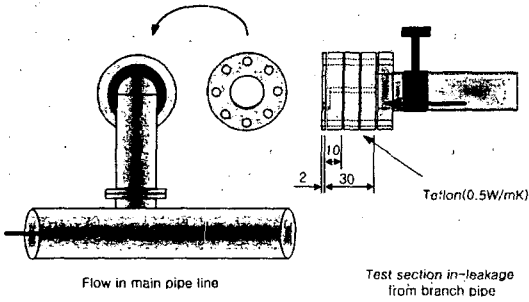


Fig. 6 Status for leak plate installation at test section.

험부로 유입될 때 밸브를 통해서 유입을 조절하게 된다. 이때 밸브를 지나온 분기관이 매우 복잡하고 불규칙하게 변하므로 시험부 내로 유입되는 상온물의 유선을 단순화하기 위하여 분기관에서 시험부 입구에 누설판(leak plate)을 설치하였다. 누설판이란 디스크 모양의 판에 물이 지나갈 수 있도록 두께 1mm인 1/4의 홈을 낸 것이다. 누설판을 설치함으로써 분기관에서의 유량을 속도만으로 조절이 가능하게 하였다. 누설판의 단면적은 0.000036128m^2 이다. 단열을 목적으로 10mm의 테프론 중 누설판과 인접한 테프론의 형상을 그림과 같다. 분기관에 고온 분포를 유지하기 위해서 주관의 고온수를 지관으로 역류시키면, 분기관 후단에 위치한 파이프와 밸브 전단 공간에 고온수가 채워지게 된다. 이곳을 지나서 저온수는 온도가 상승되어 실험조건을 만족하지 못하게 된다. 그래서 저장되는 고온수의 양을 최소화시키고자 Fig. 6과 같은 형상으로 설

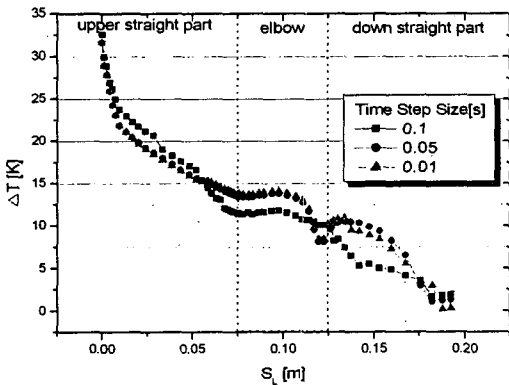


Fig. 7 Temperature variation along branch tube according to time step size.

계를 하였으며, 상단부에 유량계를 통해 들어오는 분기관의 전체적인 형상을 도시하였다. 삽입된 누설판의 재질은 축방향의 단열조건을 만족시키기 위해 0.5W/mK 이하의 테프론으로 제작하였으며 또한 테프론은 플랜지의 체결에 의한 누수의 방지에 적합한 재질로서 많이 사용된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수치해석 결과

3.1.1 기준 모형에 대한 온도장과 2차유동

Fig. 7은 기준모형에 대한 비정상상태 수치해석 시 시간에 의한 오차를 최소화하는 시간간격을 찾아보고자 0.1초, 0.05초, 그리고 0.01초 간격으로 각각 10초까지 해석하여 분기관의 중앙 단면에 대한 온도차를 계산하였으며, 0.05초가 계산결과 및 시간적인 효율에서 적당한 값으로 선정하였다. 이후 분기관에 대한 수치해석의 시간간격을 0.05초로 하여 해석을 수행하였다. Fig. 8은 시간에 따른 x축 중앙 단면의 상·하 온도차를 나타낸 것으로 거리 0mm인 위치는 누설 유입이 이루어지는 분기관 상단부 쪽으로 시간이 경과하면서 상·하부의 온도차가 증가하다가 60초가 지나면 상·하부 온도차가 일정한 온도차를 유지하게 된다. 75mm에서 120mm까지는 곡관부의 위치로 곡관부의 곡률반경이 큰 윗 벽면을 타고 고온의 열에너지의 유입으로 상·하부의 온도차가 크게 증가를 하다가 곡관부 하단인 125mm 지점에서는 복잡한 유동에 의해 온도차가 급격하게 감소하게

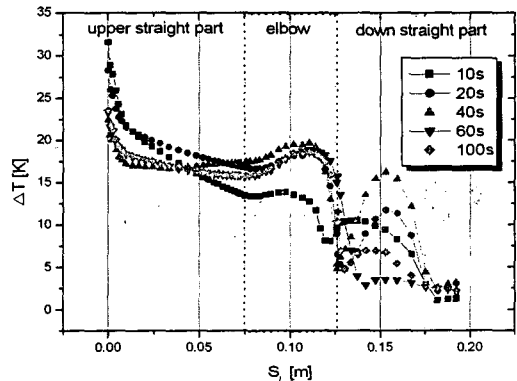


Fig. 8 Variation of maximum wall temperature difference.

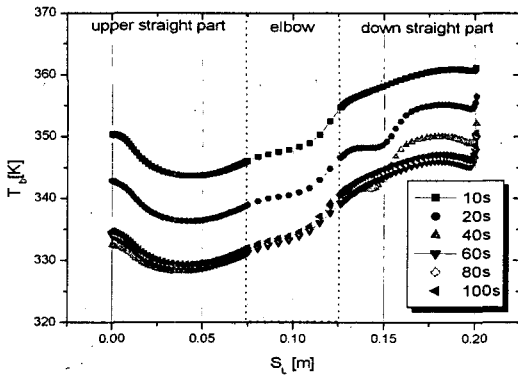


Fig. 9 Variation of bulk mean temperature.

된다. 그리고 125 mm 이후인 분기관 하단부에서는 주관의 난류침투로 인한 강제대류에 의한 큰 체적을 그리는 2차유동에 의해 온도차가 발생하게 되고 시간이 경과하게 되면 온도차는 감소하게 되는 것을 볼 수 있었다. Fig. 9는 누설 부위 바로 앞 단면에서 분기관 하단부까지의 단면 평균 온도를 나타낸 것으로 60초가 될 때까지는 평균 온도가 감소하다가 60초 이후에는 일정한 형태의 평균 온도분포를 보이고 있다. 하지만 아주 미미한 차이기는 하나 분기관 하단부에서 상단부로 주기적인 고온의 열에너지 수송에 의해 평균 온도가 상승하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10은 분기관의 하단부의 세 평면에서의 최대 최소 온도차를 나타낸 것으로 하단부의 총 길이인 75 mm를 3등분한 위치로 19.02 mm은 주관과 하단부의 교차 지점이다. 이 도표에서는 시간

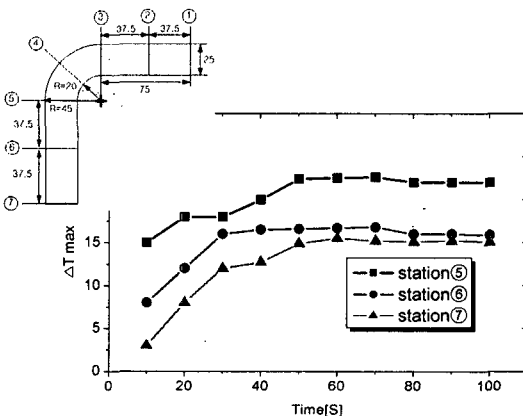


Fig. 10 Variation of maximum wall temperature difference.

에 따른 난류침투의 주기성에 의해 상단부로 고온의 열에너지를 난류성분이 수송을 하게 되어 열성층이 발생하게 되나 하단부에서의 분기관으로 침투하는 강력한 강제대류에 의해 하단부 분기관의 왼쪽 벽면측으로는 분기관의 누설에 의한 저온수가 공급되어 하단부에서도 상단부와 같은 열성층이 발생하게 되며 60초가 경과하게 되면 발달된 열성층을 유지하게 되어 Fig. 1에서 나타난 것처럼 하단부에서도 균열이 발생할 가능성을 설명하고 있다.

3.1.2 분기관 기울기에 따른 비정상 열성층 변화

기준모형인 90° 분기관과 150° 분기관 두 개에 대한 비정상상태에 대한 해석을 수행하였다. 기울기의 증가는 분기관 상·하부에 있어서의 열성층을 악화시킨다는 결과를 앞에서 언급하였다. 아래 도표 상에서도 기울기의 증가가 열성층의 악화를 설명하고 있다. Fig. 11은 두 개의 분기관에서 단면 평균 온도를 10초, 20초, 그리고 40초에 대해서 도시한 것이다. 분기관의 기울기가 증가한 150° 분기관에서는 90° 분기관에 비해 누설 부위까지 난류침투가 수월하여 상단부와 곡관부의 전체적인 평균 온도는 상승하였고 하단부에서는 단면 평균 온도차가 미미한 수준이었다. 이는 분기관으로 침투하는 일부의 난류에너지가 비슷한 것으로 볼 수 있다. 또한, 90° 분기관보다 150° 분기관의 강도가 높게 나타났다. 곡관부의 곡률에 의한 영향을 덜 받아 누설 부위까지의 난류침투가 일어나는 150° 분기관이 곡관부에서의 2차유동 강도가 높게 나타난 것이라 설명할 수 있다.

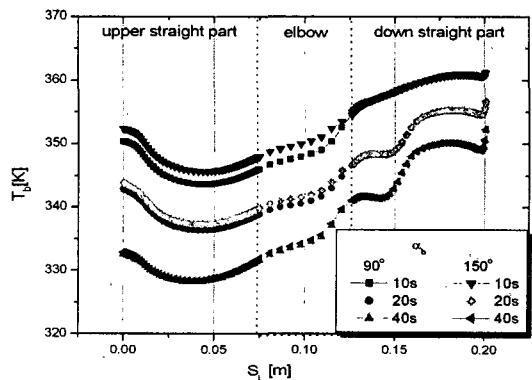


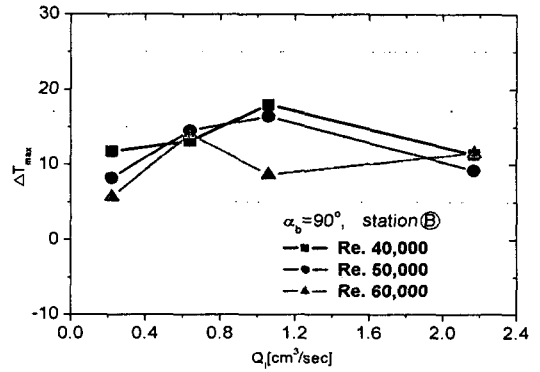
Fig. 11 Variation bulk mean temperature.

3.2 실험결과

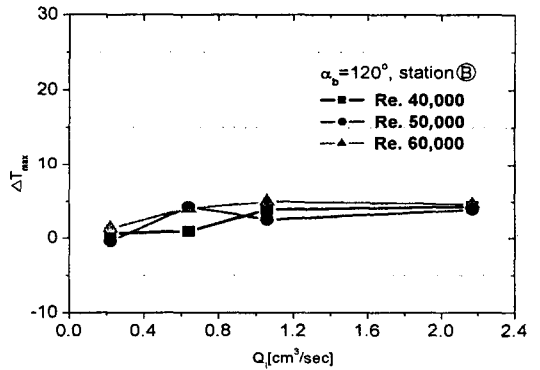
3.2.1 분기관벽 온도 자료분석

주관 및 누설 유량이 변화에 대한 온도분포를 분기관 각도가 90°에서 측정된 데이터로 분기관의 누설유량을 0.22, 0.64, 1.06 및 2.17 cm³/sec의 변화를 주고 주관의 레이놀즈수는 40,000, 50,000 및 60,000으로 하였다. 주관의 유량이 일정할 때 분기관의 유량증가는 상·하 온도차인 열성층의 발생을 증가시켰고, 분기관의 유량이 일정할 경우에는 주관의 레이놀즈수의 증가는 온도차를 감소시켜 열성층의 발생을 억제하였다. 우선 주관의 레이놀즈수가 60,000일 때를 보면 분기관의 누설 유입량의 증가는 열성층을 향상시킴을 볼 수 있으며, 누설 초기에는 온도차가 증가하다가 약 200 초 경과한 후에는 일정한 온도범위 내에서 열교번을 일으키며 유지한다. 지관의 누설유입량의 감소하면 열교번 현상의 약화되는 것을 볼 수 있는데 이는 주관으로부터 유입된 난류성분이 상단부의 열성층을 약화시켜 발생하는 것으로 볼 수 있다. 주관의 레이놀즈수와 분기관의 누설유입량, 그리고 열성층화 정도는 일정한 비례성의 관계보다는 특정점에서 잘 나타남을 볼 수 있다. 이는 주관의 레이놀즈수가 감소하였을 시 누설유입량이 2.17 cm³/sec보다 1.06 cm³/sec와 0.64 cm³/sec 사이에서 높은 것으로부터 확인할 수 있다. Fig. 12는 분기관 각도가 $\alpha_b=90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ 일 때 상단부 중앙인 37.5 mm와 곡관 시작부인 75 mm에서의 500초 경과한 후 평균 온도차를 나타낸 것으로 37.5 mm의 경우는 주관의 레이놀즈수 증가는 열성층을 감소시켰고, 분기관의 유량은 1.06 cm³/sec에서 최대값을 보였다. 75 mm에서는 레이놀즈수 40,000, 60,000에서는 0.64 cm³/sec에서 최대값을 보였고, 레이놀즈수 50,000에서는 1.06 cm³/sec에서 최대값을 보였다. 분기관의 기울기가 120°는 전체적인 온도차의 감소로 열성층은 약화되었다. 37.5 mm에서는 주관의 레이놀즈수 변화보다는 분기관의 유량 증가가 열성층에 미치는 영향이 크게 나타났으나 온도 변화폭은 작게 측정이 되었고, 75 mm에서는 레이놀즈수 40,000, 50,000에서 분기관의 유량이 증가하게 되면 열성층은 감소하는 경향을 보였고 레이놀즈수 60,000인 경우는 난류침투에 의한 영향으로 열성층이 증가한 것으로 보인다. 분기관의 기울기가 150°는 37.5 mm와 75

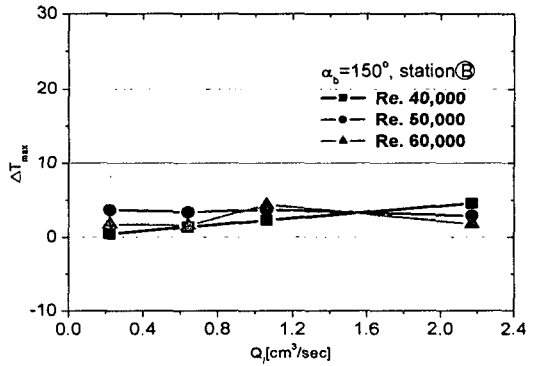
mm에서는 분기관의 경사에 의한 기울기 영향을 크게 받아 주관의 레이놀즈수와 분기관의 유량변화에도 온도차에 의한 열성층은 발생하지 않았다. 레이놀즈수 40,000인 경우에는 분기관의 유량 증가에 온도차의 증가경향을 볼 수 있으나 5°C



(a) $\alpha_b = 90^\circ$



(b) $\alpha_b = 120^\circ$



(c) $\alpha_b = 150^\circ$

Fig. 12 Maximum temperature difference with respect to leak flow rate.

이하의 범위에서 변화하는 값으로 열성층이 발생하지 않은 것으로 볼 수 있다.

3.2.2 열교번의 주기성

Fig. 13과 Fig. 14는 기준모형에 대한 수치해석과 실험적 해석에 대한 주기성(frequency)을 알아본 것이다. 90° 분기관에서 곡관부 중앙에 위치한 상부 임의점에서 온도변화 추이를 나타내어 주기를 알아보았다. 식(1)을 이용하여 기준모형에 대한 수치해석에서는 28초 정도로 0.0357 Hz의 주

기성을 보였으며, 실험에서는 30초인 0.0333 Hz의 주기성을 보였다. 두 경우 모두 초기 과도구간에서는 하단부의 복잡한 유동에 의해 안정화된 주기성을 찾기 어려웠지만 일정시간이 흐른 뒤

$$f = \frac{1}{T'} \text{ [Hz]} \tag{1}$$

에는 보다 안정된 주기성을 나타내었다. 그리고 실험결과에서 보는 것처럼 분기관의 누설유량의 증가는 주기성을 빠르게 함을 알 수 있으며, 수치해석결과와 유사한 결과를 보였다.

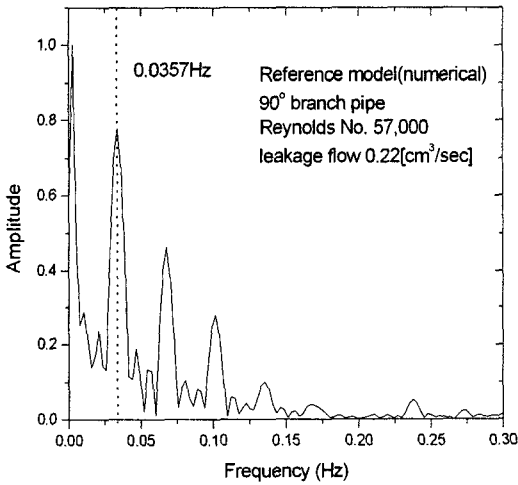


Fig. 13 Frequency of numerical analysis.

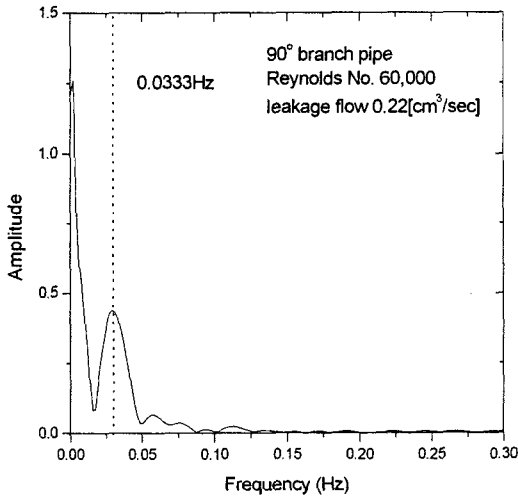


Fig. 14 Frequency of experimental analysis.

3.2.3 리차드슨수 임계값의 존재범위

Fig. 15는 누설유량이 0.22 cm³/sec인 경우 누설 유입부 부근에서 온도차는 거의 발생하지 않았다. 누설유량이 3.33 cm³/sec 이상 증가하여도 온도차는 발생하지 않는 것으로 보고된(6) 바 있다. 따라서 누설유량이 0.64~3.33 cm³/sec 사이에 리차드슨수의 임계값(Ri_{cr})이 존재함을 알 수 있다. 리차드슨수는 식(2)에 의해 구할 수 있다.

$$Ri = g' \frac{D}{V^2} \tag{2}$$

여기서, $g' = \left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \right) g$: 감소된 중력가속도
 D: 파이프의 내경, V: 유체의 속도

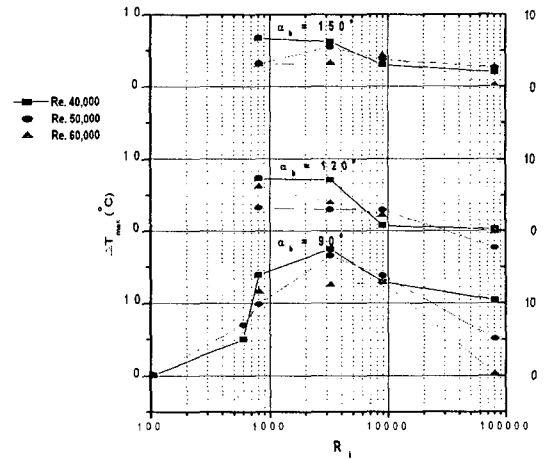


Fig. 15 Maximum temperature difference with respect to Richardson number.

Table 2 Richardson number with respect to leakage flow rate

Q_l [cm ³ /sec]	0.22	0.64	1.06	2.17
Ri	80,687	8,962	3,228	807

본 실험에서는 ρ_2 는 분기관외의 20°C 물의 밀도이고, ρ_1 는 주관의 90°C 물의 밀도이며, D 는 상단부의 내경이고, V 는 누설유입이 되는 물의 평균 속도로 정하여 리차드슨수를 계산하였다. 계산된 리차드슨수는 Table 2와 같다. 따라서 본 실험에서의 리차드슨수의 임계값은 온도차를 10°C로 보았을 때 20,000과 100,000 사이에서 존재한다고 추정할 수 있으며, 상단부의 누설유입부 근처의 최대 온도차와 리차드슨수와의 관계를 도시하였다.

4. 결 론

(1) 원전 비상노심 냉각 계통의 배관에 생기는 열성층을 재현함으로써 현상을 검증하였고, 상단부의 열성층화 현상은 특정 유량에서의 난류침투에 의한 것임을 확인하였다.

(2) 기존에는 상단부 열성층화 현상만을 고려하였지만, 열성층은 분기관외의 하단부에서도 발생하며, 이는 주관에서 유입되는 난류성분의 일부가 하단부에서 큰 궤적을 그리는 강제대류에 의해 침투하는 저온수가 한쪽으로만 유입이 이루어져 발생하는 것임을 확인하였다.

(3) 분기관에서의 열성층 주관의 레이놀즈수 및 분기관의 누설유량이 일정한 균형을 이룰 때 발생함을 확인하였다.

(4) 열교번 현상에 의한 열성층 발생의 일정한 주기성을 확인하였다.

(5) 리차드슨수 임계값의 범위를 찾아내고, 열성층화 현상은 임계값의 범위 내에서만 존재함을 확인하였다.

(6) 분기관에 기울기를 줌으로써 분기관의 곡률효과에 의한 열성층 완화방안을 수치해석적 및

실험적 연구로 검증하였다.

(7) 냉각재 누설에 의한 원자력발전소의 사고 후 처리가 아닌 미연에 사고를 방지할 수 있는 열성층 완화의 근본적인 대책을 강구할 수 있게 하였다.

참고문헌

1. Thermal Stresses in Piping Connected to Reactor Coolant Systems, 1988, United States Nuclear Regulatory Commission, Bulletin No. 88-08.
2. EPRI, Thermal Stratification, Cycling and Striping (TASCS), TR-103581, 1994.
3. Hong, S.-W., Choi, Y. D., Park, M.-S. and Seo, J.-H., 2001, Numerical analysis of thermal stratification into leaking flow in a T branch, Trans. B, Proc. of Fall Conf. of KSME, pp. 729-734.
4. Hong, S.-W., Choi, Y. D. and Park, M.-S., 2003, The effect of turbulence on the thermal stratification phenomenon caused by leaking flow in a T-branch of square cross-section, Korean J. of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 15, No. 3, pp. 239-245.
5. Choi, Y. D., Hong, S. W. and Park, M. S., 2003, The effect of turbulence penetration on the thermal stratification phenomenon caused by coolant leaking in a T-branch of square cross-section, International J. of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 11, No. 2, pp. 51-60.
6. Song, D.-I., Choi, Y. D. and Park, M.-S., 2001, Experimental research for identification of thermal stratification phenomena in the nuclear powerplant emergency core coolant system (ECCS), Trans. B, Proc. of Fall Conf. of KSME, pp. 735-740.
7. Park, M.-H., Kim, K.-C., Lee, S.-K., Kim, T.-R. and Lee, S.-C., 2002, Proc. of Summer Conf. of SAREK, pp. 785-790.