

원전 비상 노심냉각계통 배관 열성층화 현상 규명을 위한 실험적 연구

송도인* · 최영돈** · 박민수*

Experimental Research for Identification of Thermal Stratification Phenomena in The Nuclear Powerplant Emergency Core Coolant System(ECCS).

Dho-In Song, Young-Don Choi, Min-Su Park

Key Words: Thermal Stratification(열성층화), Experimental Research(실험적 연구), Turbulence penetration(난류 침투), Temperature analysis(온도분석)

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, it occurs thermal stratification phenomena in case that there is the mixing of cooling water and high temperature water due to valve leakage in ECCS. This thermal stratification phenomena raises excessive thermal stresses at pipe wall. Therefore, this phenomena causes the accident that reactor coolant flows in reactor containment in the nuclear power plant due to the deformation of pipe and thermal fatigue crack(TFC) at the pipe wall around the place that it exists. Hence, in order to fundamental identification of this phenomena, it requires the experimental research of modeling test in the pipe flow that occurs thermal stratification phenomena. So, this paper models RCS and ECCS pipe arrangement and analyzes the mechanism of thermal stratification phenomena by measuring of temperature in variance with leakage flow rate in ECCS modeled pipe and Reynold number in RCS modeled pipe. Besides, results of this experiment is compared with computational analysis which is done in advance.

	기호설명	1	: RCS 모형배관
T	: 온도 [°C]	2	: ECCS 모형배관
P	: 압력 [Kgf/cm ²]		
Q	: 유량 [ml/min]		
Re	: 레이놀드 수		
ρ	: 밀도 [kg/m ³]		
D	: Test section 내경 [mm]		
L	: Test section의 길이 [mm]		

하첨자

1. 서론

유체의 온도가 변화하면 유체의 밀도가 변화하여 밀도가 낮은 고온의 유체는 상승하며, 반면 밀도가 높은 저온의 유체는 하강하는 대류현상이 발생한다. 이러한 대류로 인하여 고온 및 저온의 유체가 층을 이루는 현상을 열성층화 현상(thermal stratification phenomena)이라 한다. 이러한 열성층화 현상은 대기, 바다, 강 등 유체가 이동하는 자연계 내에서는 어디든지 존재한다. 이러한 현상은 비단 자연계뿐만 아니라 유체

* 고려대학교 대학원

** 고려대학교 기계공학과

를 이송 또는 열전달을 위한 튜브, 파이프 등의 배관에서도 발생하게 되는데, 배관내에 열성층화 현상이 발생하면 그 배관에 악영향을 미치게 된다. 이와 같은 열성층화 현상은 배관의 상하단 온도차에 의한 급힘 현상을 초래 하여 배관 및 지지대의 과도한 열응력을 유발할 수 있다. 또한 열성층 현상이 주기적으로 반복되면 배관의 심각한 피로균열 현상을 초래하게 된다. 특히 원자력 발전소의 배관은 고온의 물을 냉각시키기 위한 냉각 계통이 여러곳에 설치되어 있는데, 고온의 물에 냉각수가 침투하여 열성층화 현상이 발생하는 것은 원전사고 예방을 위해 고려해야 할 중요한 사안이다.

실제로 이러한 배관내의 열성층화 현상의 발생은 기존의 원자력 발전소에서 보고되고 있다. Westinghouse형 원전인 미국 Farley Unit2와 헝가리 Tihange Plant 등의 원자로 냉각재 계통(RCS : Reactor Coolant System)에 연결되어진 비상노심냉각계통(ECCS : Emergency Core Coolant System)에 설치되어 있는 밸브에서는 냉각재 누설에 의한 열성층화(Thermal Stratification) 현상이 발생한다. 이 현상은 과도한 열응력을 유발시켜 Fig.1과 같은 부위에서 배관 변형과 열피로 균열(TFC : Thermal Fatigue Crack)을 초래하여 원자로 냉각재가 격납용기 내로 누출되는 원자력발전소 사고를 발생시킨다.

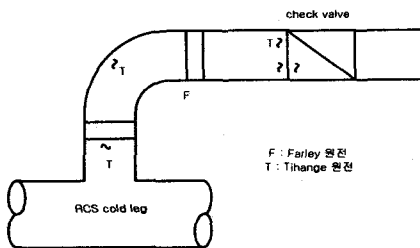


Fig.1 Outbreak site of thermal stratification fatigue crack of ECCS pipe

그 결과 현재 국내외 원자력발전소에서는 열성층화 발생 가능 배관에 대한 비파괴검사를 실시하고 있다. 그러나 이는 이미 열성층화 현상에 의한 열피로 균열(TFC)발생 후의 검사이므로 배관 균열 방지에 대한 근본적 해결 방법은 되지

못한다. 또 하나의 대책으로 온도감시장치를 배관에 부착하여 열성층 발생을 검사하고 있으나 이 방법도 역시 배관 내에 발생하는 열성층화 현상에 대한 근본적인 원인 규명과 배관 손상에 대한 근본 방지대책을 제공하지 못하고 있다. 따라서 근본적인 배관 손상 원인을 규명하기 위한 배관내 열성층화 현상에 대한 전산유체역학적 해석과 모형실험 연구 등이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 열성층화 현상이 발생할 가능성이 있는 원자력 발전소의 배관계통을 모형화하여 누설 실험을 수행한다. 이 실험에서는 열성층화 현상이 발생할 때 배관의 벽면의 온도변화를 관찰하게 된다. 그리고 실험으로 얻은 결과를 배관의 길이에 따른 온도변화로 도표화하여 열성층 영역에서 열성층화 현상을 분석한다.

2. 열성층화 현상의 모델링

2.1 국내외 연구현황 및 문제점

국·외에서는 현재 운전 중이거나 건설 중인 발전소에 열성층화 발생 가능성 유무를 검토하고

1) 관련 배관의 용접부, 열영향부, 응력집중부 부위에 대한 비파괴검사 실시,

2) 잠재적 위험성이 있는 배관부위 재설계 및 개조,

3) 배관내 유체의 온도 및 압력을 감시할 수 있는 계측설비를 구비

등의 대책을 실행하고 있으나 배관내 열성층에 관한 정확한 현상 파악 및 영향에 대한 평가는 이루어지지 않고 있는 실정이다. 이에 배관내의 열성층화 현상의 근본적 규명을 위한 실험적 연구가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 기존 원자력발전소에서 열성층화 현상의 발생이 보고된 원자로 냉각재 계통(RCS : Reactor Coolant System)에 연결되어진 비상노심냉각계통(ECCS : Emergency Core Coolant System)의 밸브누설을 모형화 한 실험장치를 설계, 제작하여 열성층화 현상을 분석, 규명한다.

2.2 실험장치의 전체적 구성

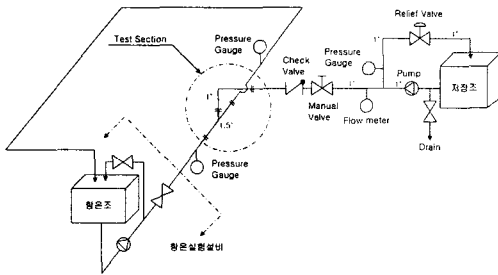


Fig.2 Test loop for identification of thermal stratification due to leakage in RCS and ECCS

Test loop는 저장조, 펌프, 수동식 유량제어밸브, 체크 밸브, 릴리프 밸브, 유량계, 압력계, Test section 및 향온실험설비로 이루어져 있다. 이는 크게 RCS계통을 모형화한 1.5 in 주배관(Main Pipe Line)과 ECCS계통을 모형화한 1 in 지관(Branch Pipe Line)으로 구성된다. 작동유체는 물(City Water)로써 소량의 물의 누설이 발생하는 지관은 상온(25 ~ 30 °C)에서 흐르게 되고, 주배관은 향온실험설비에서 일정한 온도(80 °C)를 유지하며 흐르게 된다. 실험시에는 수동식 유량제어밸브(Manual Valve)를 열어 지관의 상온의 물을 주배관쪽으로 흐르게 하면 주배관내의 고온의 물과 지관의 상온의 물이 서로 만나서 열성층을 만들게 된다. 실험장치의 전체적인 구성은 Fig.2 에 나타나 있다.

2.3 Test Section의 설계

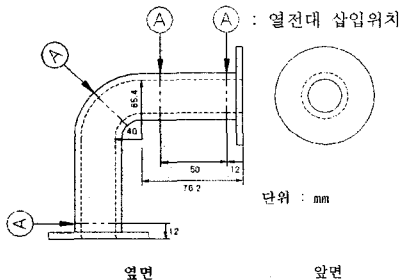


Fig.3 Test section for identification of thermal stratification phenomena in RCS and ECCS

열성층 및 난류관통현상을 관찰하기 위해 Test Section을 제작하여 지관에서 물이 주배관으로 유입되는 지점에 설치하게 된다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 Test Section은 단면이 원형 Pipe로 되어 있으며, 90 °로 꺾어진 Elbow 형태이다. Test Section은 두가지 재질로 제작되었는데 하나는 열성층 현상의 육안관측 및 사진촬영을 위하여 강화유리로 제작되었으며, 다른 하나는 온도측정을 위한 열전대(Thermo Couple)가 Test Section 외부에 부착된 SUS관으로 제작되었다. Fig.3에서 아랫부분의 출구에서 주배관에서 흐르는 고온의 물이 침투해 들어오며, 오른쪽 출구에서는 지관으로부터 누설된 상온의 물이 흐르게 된다. 또한 SUS관으로 제작된 Test Section에는 그림에 표시된 4곳에 각각 원주방향으로 Test Section의 외벽에 8개의 열전대를 삽입하여 온도 분포를 측정하게 된다.

2.4 실험조건

가. 실험온도

본 실험은 주배관에는 80 °C의 고온의 물을 사용하였으며, 지관에서는 25 ~ 30 °C의 상온의 물을 사용하였다.

나. 유량 및 레이놀드 수

본 실험에서는 열성층 현상의 정량적 분석을 위하여 지관에서는 유량을 50, 100, 200, 300 ml/min로 변화시켰고, 주배관에서는 레이놀드 수를 30,000, 40,000, 50,000으로 변화시키면서 실험하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서는 지관에서 누설되어 유입되는 상온의 물의 유량, 주배관의 고온의 물의 레이놀드 수의 변화에 따른 열성층 발생현상을 분석하였으며, 또한 열성층이 발생한 경우 배관에서의 온도

분포에 대하여 해석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

3.1 지관의 누설 유량 변화에 따른 배관내의 온도 분포

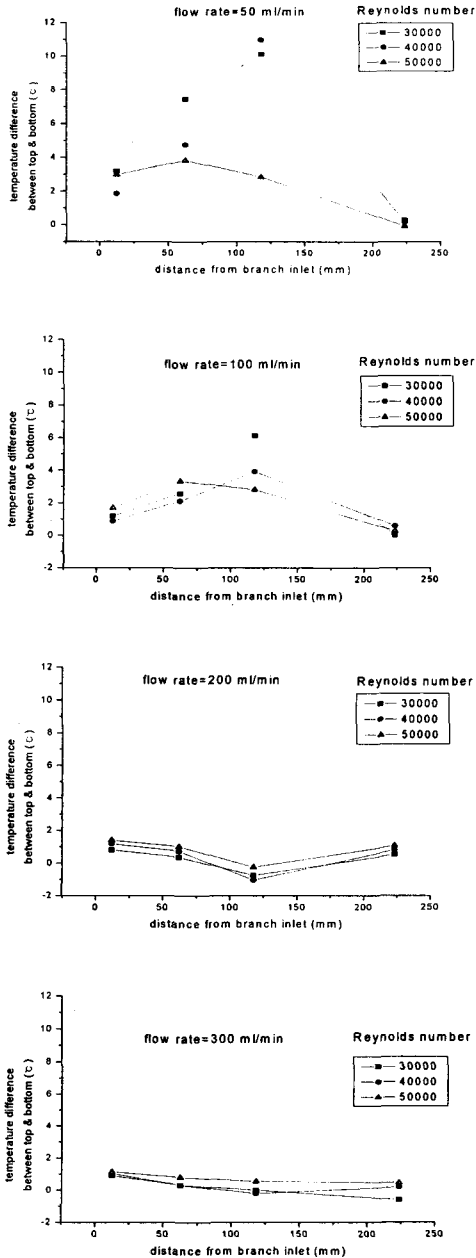
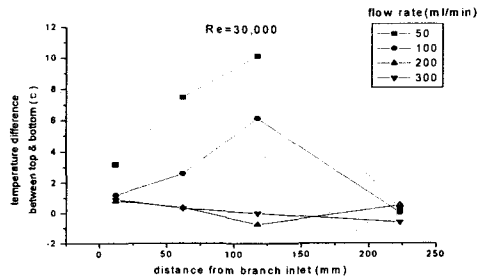


Fig.4 Temperature difference between top &

bottom due to flow rate variation

온도가 다른 유체가 혼합될 때 발생하는 열성층화 현상은 자연대류로 인하여 고온의 유체는 배관의 상층부에, 저온의 유체는 하층부에 분포하게 된다. Fig.3은 지관의 누설유량의 변화에 따른 Test section의 상층부와 하층부의 온도차를 지관입구에서의 거리의 변화에 따라 도시하였다. 배관 상층부와 하층부의 온도차의 크기와 열성층화 경향은 비례한다고 할 수 있으므로, 그림에서 누설유량과 온도차 즉, 열성층화 경향은 반비례함을 알 수 있다. 누설량이 증가함에 따라 열성층화 현상이 감소하는 것은 지관에서 Test section내로 유입되는 상온의 물이 가진 관성력에 의하여 주배관에서 고온의 물이 Test section의 상단부까지 도달하지 못하기 때문이다. 한편, 주배관의 입구에서 온도차가 발생하지 않는 것은 주배관내의 유동과 Test section내의 유동의 속도차로 인하여 발생하는 선회유동에 의하여 강제대류현상이 발생하므로 열성층화 현상이 발생할 여지가 없기 때문이다. 그림에서 누설량이 50 ml/min인 경우 Test section의 지관쪽 입구쪽에서 열성층화 경향이 감소되는 것은 Test section내의 고온의 물과 지관의 상온의 물의 경계면(interface)에서 열전달이 발생하므로 지관쪽 입구근처의 Test section내의 물이 전체적으로 냉각되기 때문이다.

3.2 주배관의 레이놀드수의 변화에 따른 배관내의 온도분포



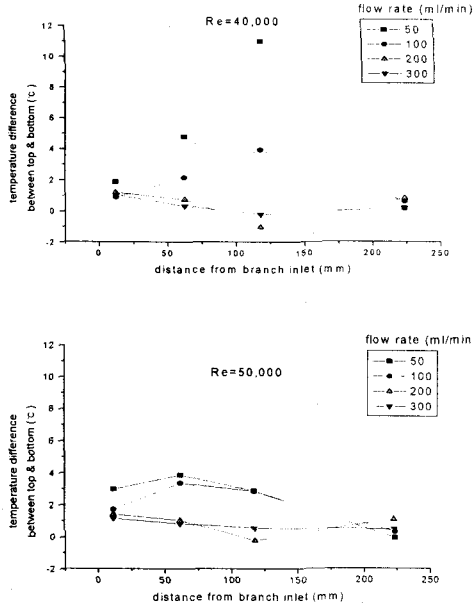
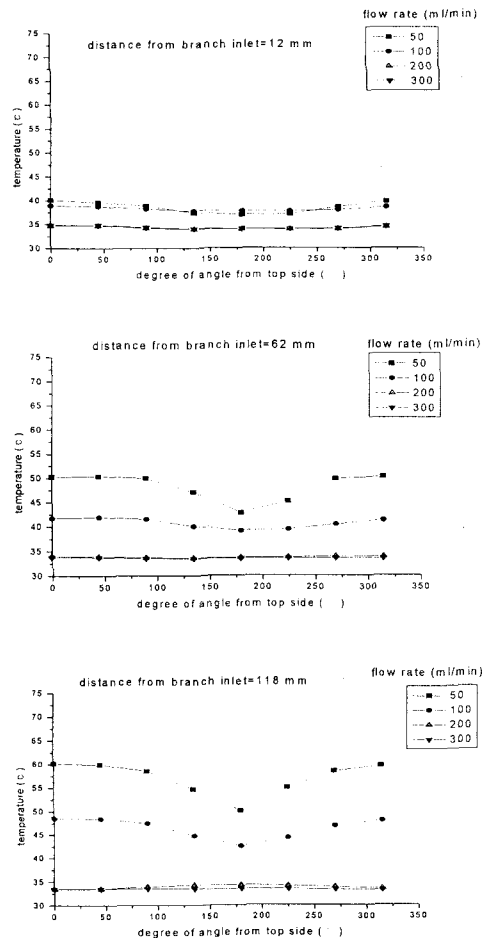


Fig.5 Temperature difference between top & bottom due to Reynolds number variation

Fig.5에서 보듯이 주배관의 레이놀드수의 증가가 열성층화 경향과 반비례적 관계에 있다고 할 수는 없으나, 레이놀드수가 50,000인 경우 열성층화 경향은 Test section 전 부위에 걸쳐서 급격히 감소함을 알 수 있다. 이것은 레이놀드수의 증가가 열성층화 현상에 긍정적 영향과 동시에 부정적 영향을 주기 때문이다. 주배관 내를 흐르는 고온의 빠른 유동이 Test section을 지날 때 주배관내의 빠른 유동과 Test section내의 느린 유동과의 속도차로 인하여 주배관근처의 Test section내에서 선회유동(recirculation)이 발생하며 이는 강제대류현상을 일으키게 된다. 이러한 선회유동에 의해 주배관에 존재하는 난류성분이 Test section내부로 이송되게 되는데 이를 난류침투(Turbulence penetration)라 한다. Test section내에 열성층이 발생하려면 주배관의 열에너지가 Test section내로 전달 되어야 하는데, 이러한 열에너지는 난류에 저장되어 있으며 이러한 난류를 선회유동에 의한 강제대류가 수송하는 역할을 한다. 따라서 레이놀드 수가 증가할수록 선회유동의 운동에너지는 증가할 것이며 또한 난류가 Test section내로 침투해 들어가는 난류침투길이(Turbulence penetration length)도 길어지며,

따라서 Test section의 상단부까지 열에너지가 공급될 수 있다. 이렇게 공급된 열에너지는 Test section내의 물의 온도를 높게 되며, 이렇게 형성된 고온의 물은 지관에서 유입되는 상온의 물과 혼합되면서 자연대류에 의한 열성층을 발생시킬 수 있다. 그러나, 난류침투길이가 증가한다는 것은 강제대류의 영역이 확대되는 것을 의미하므로 이러한 강제대류의 확대는 Test section상층부에 형성된 열성층을 파괴하는 역할을 하므로 레이놀드 수가 크게 증가하게 되면 열성층화 현상은 급격하게 감소하게 된다.

3.3 Test section단면에서의 온도분포



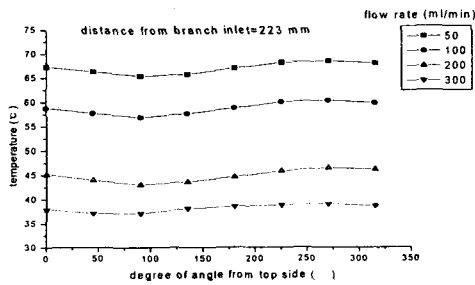


Fig.6 Temperature distribution around test section inner wall at Re=30,000

Fig.6은 열성층화 현상이 뚜렷이 나타나는 레이놀드수가 30,000인 경우의 Test section 단면의 온도분포를 나타내었다. 그림에서 지관에서의 누설유량이 증가함에 따라 Test section내의 온도가 전체적으로 감소하는데, 특히 누설유량이 300ml/min인 경우 Test section 전체의 온도가 지관으로 유입되는 상온의 물의 온도와 비슷해 지는데 이는 Test section내의 난류침투의 원인이 되는 Test section내에서 주배관 근처에서 발생하는 선회유동이 지관으로부터 유입되는 물이 가진 관성력에 의해 거의 소멸되었음을 뜻한다.

4. 결론

이상의 실험 및 데이터 분석에서 지관의 누설량의 변화 및 주배관의 레이놀드 수의 변화에 따른 열성층화 경향에 대하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 지관으로부터의 누설량이 증가할수록 누설에 의해 유입되는 물이 가진 관성력이 증가하여, 주배관으로부터의 열에너지의 유입을 막게되어 열성층화 경향을 감소시킨다.

(2) 주배관의 레이놀드수가 증가할수록 대체로 열성층화 현상이 감소한다. 이는 레이놀드수가 증가함으로써 강제대류의 영역이 확대되어 열성층을 파괴하기 때문이다.

(3) 열성층 발생의 원인이 되는 주배관으로부터 Test section으로의 열에너지의 공급은 강제유동으로 인한 난류침투에 기인한다.

열성층 발생의 원인 및 경향에 대한 보다 정확한 파악을 위해서는 현재 가동되는 원전과 온도, 유량이 유사한 조건에서 실험 및 연구가 수행되

어야 할 것이나, 본 연구에서는 상대적으로 낮은 온도, 저유량의 조건에서 배관내 열성층화 원인 및 대체적 경향을 파악 할 수 있었다. 아울러 열성층화 현상으로 인해 발생하는 원전사고를 예방하기 위해서는 배관의 재료역학적 연구도 수행되어야 할 것이다.

후기

본 연구는 기초전력공학공동연구소의 2000년도 대학부설연구소과제(원전 비상노심냉각계통 배관 열성층화 현상 규명을 위한 전산해석 및 실험 연구)에 대한 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) 전력연구원, 가압경수로 배관 열성층화 영향 분석 연구 최종보고서, Technical Report, 1997
- (2) 박만홍, 김광추, 노홍구, 김경훈, 냉각재 상실사고후 고압안전 주입시 저온관에서의 열적 혼합유동에 관한 수치적 연구, Proceedings of The First National Congress on Fluids Engineering September 1-2, 2000, Muju, Korea
- (3) 박준현, 정일석, 압력경계밸브 내부누설 평가 및 온도 감시, 한국원자력학회 99 추계 학술발표회 논문집, 1999
- (4) 한근석, 김승태, 박기성, 장기상, 최성남, 원자력발전소 가압기 노즐의 피로균열 안전성 분석, 대한기계학회논문집A권 제22권 제6호, pp. 1123-1133, 1998
- (5) D.S.Mathioulakis, Th.Pappou.S.Tsangaris, An experimental and numerical study of a 90° bifurcation, Fluid Dynamics Research 19(1997) pp. 1-26, 1997
- (6) C.X.Lin, M.A.Ebadian, The effects of inlet turbulence on the development of fluid flow and heat transfer in a helically coiled pipe, International Journal of Heat and Mass Transfer 42(1999) pp. 739-751, 1999