

원형 T분기배관 내 누설유동의 열성층화와 난류침투에 관한 전산해석적 연구

한성민* (고려대학교 대학원) · 최영돈† (고려대학교 기계공학)

Numerical Analysis of Thermal Stratification and

Turbulence Penetration into Leaking Flow in a Circular Branch Piping

Seong-Min Han* , Young-Don Choi†

Key Words: Thermal Stratification(열성층), Turbulence Penetration(난류침투), Safety Injection System(안전주입계통), Branch piping(분기배관)

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 piping, the maximum temperature differences of fluid at the pipe cross-sections of the T-branch with thermal stratification are examine

1. 서 론

원자로 냉각재 계통(RCS: Reactor Coolant System) 배관에서 분기되어 있는 비상노심냉각 계통(ECCS: Emergency Core Coolant System) 배관의 수평 부위에는 체크밸브의 마모로 인한 냉각재의 누설 유입으로 열성층이 발생할 수 있다.⁽¹⁾ 열성층의 지속적인 존재와 열교번(thermal cycling)^{(2)~(4)}은 냉각계통 배관에 과도한 열응력을 발생시켜 배관 변형 및 열피로 균열(TFC: thermal fatigue crack)⁽⁵⁾을 가져오며 심한 경우 배관 균열로 이어져 원자로 냉각재의 유출 사고를 초래할 수 있다. 따라서 배관 손상의 원인이 되고 있는 열성층에 대한 이론적 연구가 필요하다. 그러나 기존의 연구^{(5)~(6)}에서는 열성층 발생

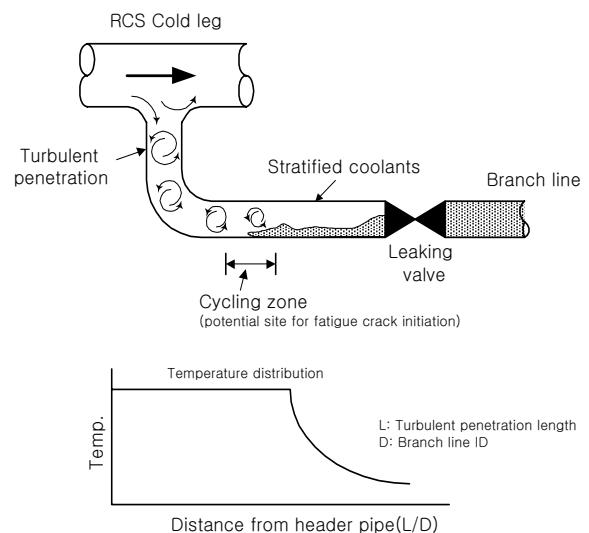


Fig. 1 Interaction of turbulent penetration and thermal stratification

여부와 발생 위치를 예측할 만한 이론적 연구가 되어있지 않았다.

본 연구에서는 원자로 냉각재 공급 분기배관에서의 열성층 현상의 원인 규명을 위해 분기배관 내 유동의 열진달을 전산해석하여 열성층 생성에 관련된 변수들의 영향을 관찰하고 원자로 냉각재 계통 배관에서의 냉각재 누출에 의해 발생하는 열성층 현상의 규명과 대안을 제시하려한다.

2. 이론 해석

본 연구에서는 Fig. 2와 같은 분기배관에서 발생하는 주기적인 열교번에 의한 비정상 유동은 관찰의 대상에서 제외하고 분기배관에서 발생하는 난류침투의 영향에 의한 열성층 현상에 대한 열유동 해석을 수행하였다. 유동은 정상상태 3차원 유동이며, 온도차에 의한 유체의 밀도변화는 중력항에만 존재한다고 가정하였고, 그 이외에는 유체 및 배관의 모든 물성치는 일정하며, 유체의 압축성, 점성소산 및 복사열전달 효과는 무시한다고 가정하였다. 난류모델은 RNG (ReNormalization Group) $k-\epsilon$ 모델을 채택하였다.

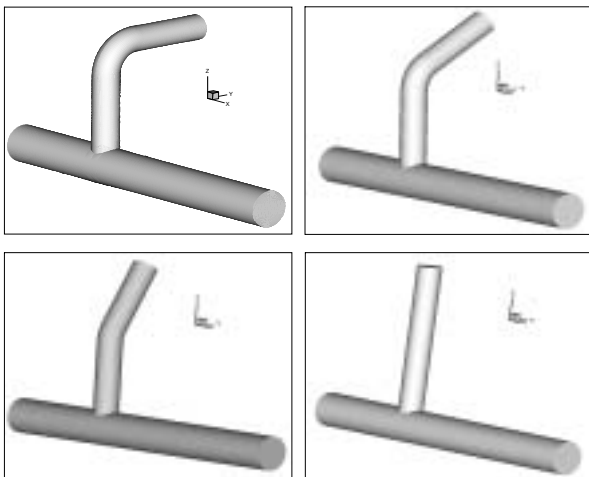


Fig. 2 Schematic diagram for the cold leg of RCS and SIS branch piping (0°, 30°, 60°, 90°)

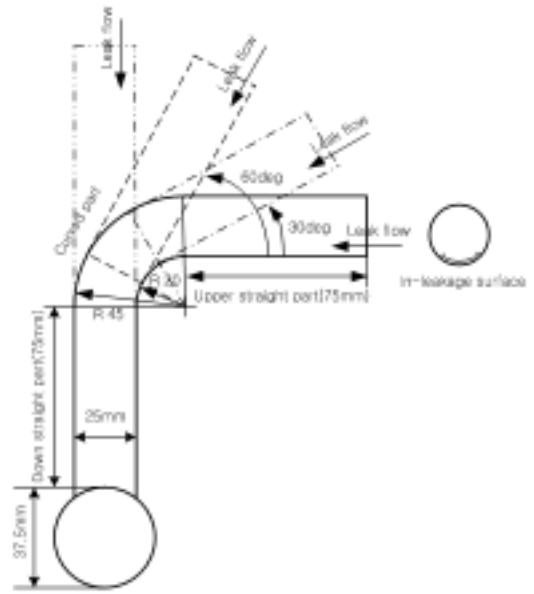


Fig. 3 Dimension of T-branch pipe inclination angles 0°, 30°, 60°, 90°

3. 수치해석방법

Fig. 2 에서 보는 바와 같이 원형 단면을 갖는 분기배관(0°, 30°, 60°, 90°) 유동을 해석 대상으로 삼았다. 실제 원자력 발전소의 비상노심 냉각수 공급 분기배관은 원관으로 되어 있다. 열성층현상을 해석하기 위하여 상용 CFD 코드인 FLUENT V.6 프로그램을 사용하였으며, 계산에 사용된 격자수는 약 870,000개이다.

반복 계산시 해의 수렴성을 개선하고 해가 발산하는 것을 방지하기 위하여 모든 종속변수에 대하여 하향이완방법을 도입하였다. 압력, 온도 및 난류량의 이완계수로는 각각 0.3, 0.5 및 0.5를 사용하였다. 본 문제는 두 개의 입구와 하나의 출구가 있는 문제로 인식할 수 있다. 주원형관의 입구조건으로는 완전발달한 속도장을 주었고, 분기관의 누설유입은 정상상태라고 가정하며 단면 하단부에서 균일한 속도분포로 유입한다고 가정하였다. 입구기준압력은 대기압으로 하였다.

주원형관의 수력직경은 37.5mm이고 분기관의 수력직경은 25mm로 하였으며 비교 대상으로 파이프의 기울기 정도에 어떠한 영향이 있는지를 비교 관찰하였다. 기준모형을 0°원관으로 하여

난류침투와 열성층이 뚜렷하게 나타나는 조건을 시행착오법으로 찾아낸 것이고 분기관 상단부로 누설 유입되는 저온 유체의 유입 유량이 과다할 경우에는 분기배관 전체가 냉각되므로 열성층이 발생하지 않는다. 변수의 선택은 현재까지 보고된 자료^{(4),(5)}들을 근거로 하여 분기배관의 기울기 정도가 난류침투와 열성층 형성에 영향을 줄 것으로 추측되어, 본 연구에서는 분기배관의 기울기 정도와 주원형관에서의 레이놀즈수 변화가 열성층의 생성에 미치는 영향을 정량적으로 관찰하는데 초점을 맞추었다.

4. 실험결과 및 토론

Fig. 4는 각각의 RCS 저온관에서의 온도 분포를 측정하고 Fig. 5에서는 각각의 분기배관의 상단부 단면을 잘서 본 온도장 분포를 보여준다. Fig. 5를 통해서 보면 누설 부위 바로 앞 단면에서 열성층이 뚜렷하고 여러개의 작은 와가 단면 아래쪽에서 발생하였는데 와가 발생한 이유는 상하부 온도차가 커짐으로 인한 자연대류에 의한 것으로 보인다. 누설 부위로부터 37.5mm 떨어진 곳에 위치한 단면은 상단부의 중앙에 해당한다. 열성층은 누설 부위 바로 앞에 비하여 상대적으로 약해졌지만 와는 오히려 더 뚜렷하게

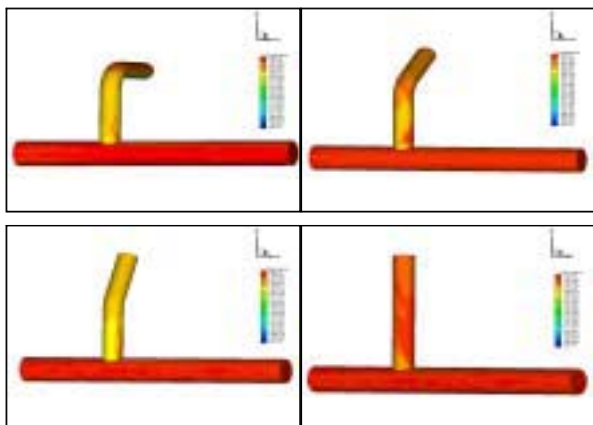


Fig. 4 Temperature distribution(K) of T-branches of inclination angles 0°, 30°, 60°, 90°

발달하였는데 자연대류에 의한 2차유동 강도가 극대화된 것으로 보인다. 그리고 누설 부위로부터 75mm 떨어진 곳, 즉 분기관의 곡관부와 상단부가 만나는 지점에서의 열성층은 더욱 약화되었고 와는 전체적으로 일정한 방향을 이루는데 자연대류에 의한 효과보다 곡관 부위의 곡률에 의한 효과가 유동장에 더 큰 영향을 주게 되어 나타난 현상이다. 아래 그림으로부터 열성층이 생

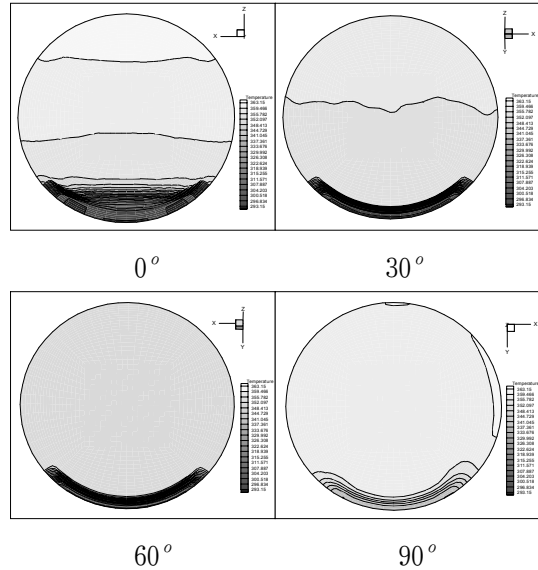


Fig. 5. 1 Temperature distributions on the sections just after in-leakage

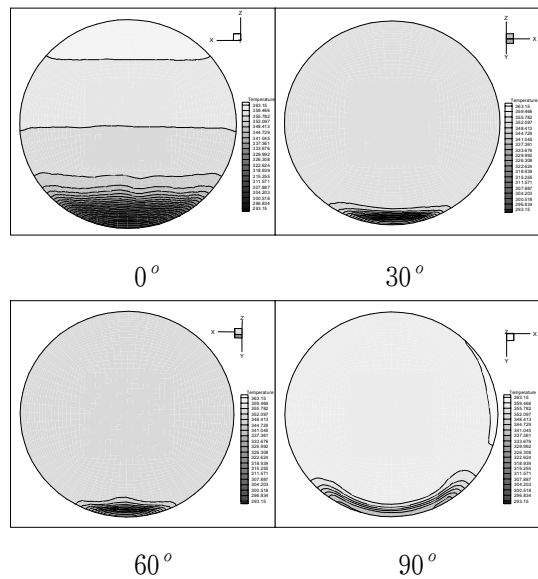


Fig. 5. 2 Temperature distributions on the sections 37.5mm away from in-leakage

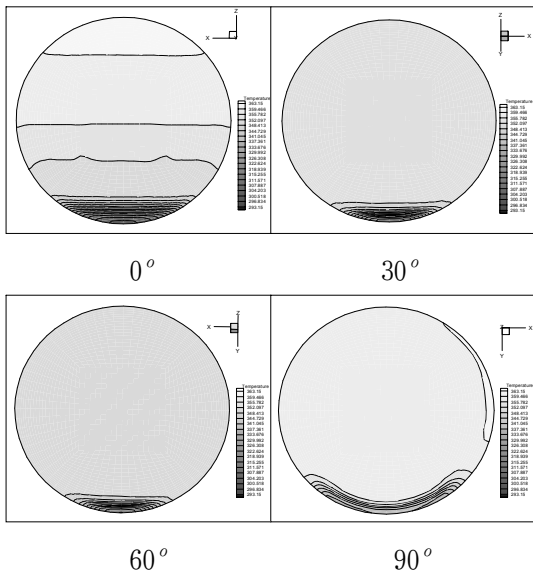


Fig. 5. 3 Temperature distributions on the sections 75mm away from in-leakage

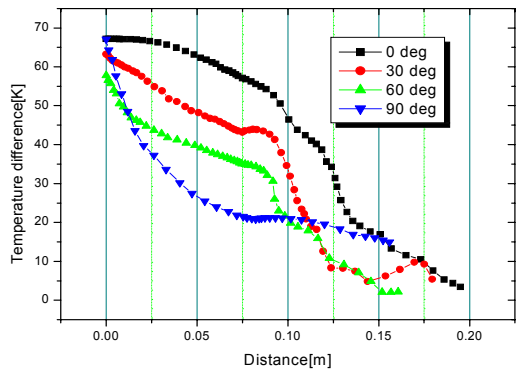


Fig. 6 Variation of maximum wall temperature difference vs. inclination of T-branch

김을 확인하였으며 열성층은 누설 부위 바로 앞에서 가장 뚜렷하고 거리가 멀어짐으로 인하여 차츰 약해져서 결국 분기관 하단부에 이르러서는 거의 소멸된다.

또한 분기배관의 기울기 정도 차에 의한 것을 비교해보면 0°도 보다는 30°, 30° 보다는 60°의 기울기를 갖는 분기배관에서 열성층이 약해졌음을 볼 수 있다.

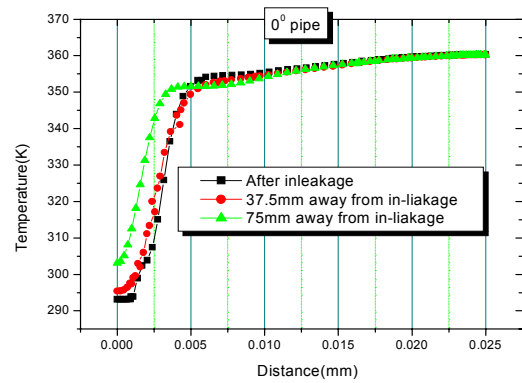


Fig. 7. 1 Variation of bulk temperature vs. length of T-branch(0°)

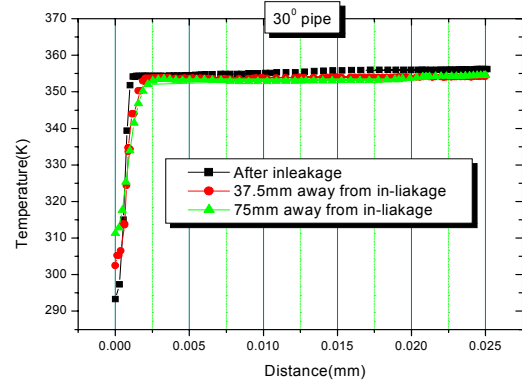


Fig. 7. 2 Variation of bulk temperature vs. length of T-branch(30°)

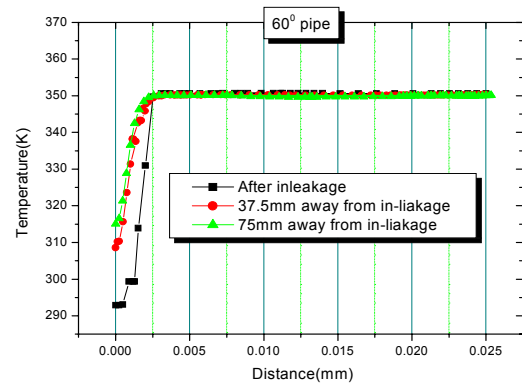


Fig. 7. 3 Variation of bulk temperature vs. length of T-branch(60°)

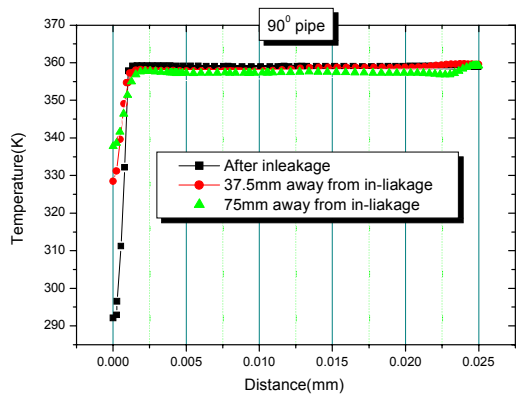


Fig. 7. 4 Variation of bulk temperature vs. length of T-branch(90°)

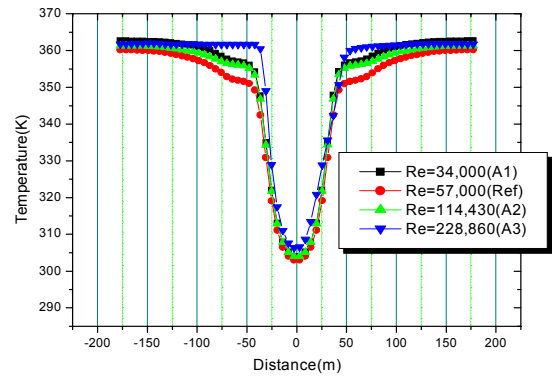


Fig. 8. 3 Variation of bulk temperature vs. inclination angles (75mm away from in-leakage)

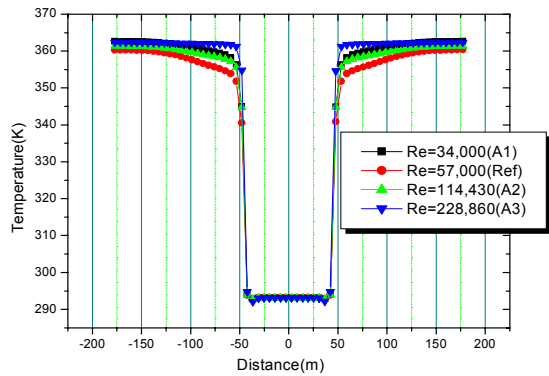


Fig. 8. 1 Variation of bulk temperature vs. inclination angles (just after in-leakage)

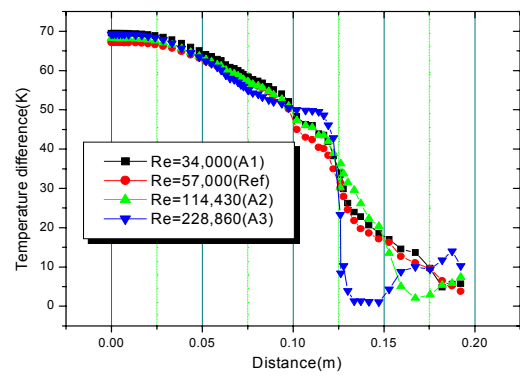


Fig. 9 Variation of maximum wall temperature difference vs. Reynolds numbers

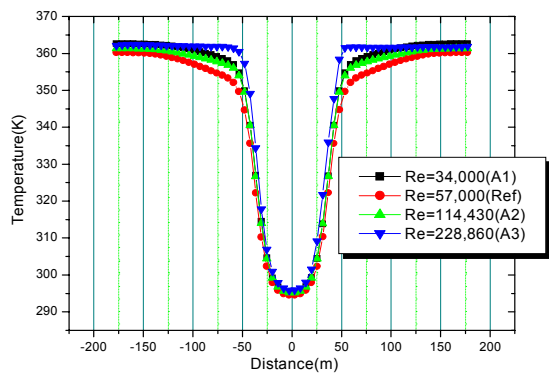


Fig. 8. 2 Variation of bulk temperature vs. inclination angles (37.5mm away from in-leakage)

Fig. 6은 분기관을 기울기 정도에 따른 벽면의 최대 온도차를 나타낸 것이다. 열성층이 생기는 위치에 경사를 주게 되면 열성층의 두께가 현저히 얇아짐을 알 수 있으며 상단부의 단면평균 온도가 급격히 증가하여 하단부의 단면평균온도와 큰 차이가 없게 되었다. 30° 기울였을 때와 60° 기울였을 때 곡관부를 지난 이후에서는 열성층 생성에 대한 억제 효과는 거의 비슷한 것으로 나타났다. 이것으로 분기배관에 경사를 주는 방법이 열성층화 현상을 효과적으로 억제할 수 있음을 보였다.

Fig. 7은 경도에 따른 상단부 세 단면에서의 수

직 방향 온도분포이다. 상단부에서의 경사가 증가할 수록 온도의 변화하는 구간이 짧아짐을 알 수 있다. Fig. 8은 0°의 기울기를 갖는 분배기관에서 레이놀즈수의 변화에 상단부 벽면의 온도를 나타낸 것이고 이를 이용하여 Fig. 8은 누설부위 단면에서 주 원관과의 분기되는 위치까지의 단면 온도차를 나타낸 것이다. 수직 분기관의 위치에서 재순환에 의해 온도차가 급격히 감소하고 레이놀즈수 변화에 따라서는 온도차는 작지만 증가함에 따라 열성층의 완화됨을 확인 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 열성층에 영향을 미치는 변수로 상단부의 경사와 레이놀즈수를 변화 시키며 열성층 발생을 수치적으로 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 주 원관의 강제대류에 의해 발생한 재순환 유동과 누설유동에 의해 발생한 재순환 유동이 엘보우 부근에서 교차되면서 주 원관의 난류와 열에너지를 분기배관 상단부까지 전달하여 열성층을 생성시킨다.
- (2) 상단부의 경사가 증가할수록 누설유동이 중력을 덜 받으므로 열성층이 얇아지고 주 원관으로부터의 난류 침투에 의해 경사가 증가할 수록 열성층이 약화된다
- (3) 주 원관의 레이놀즈수가 증가하면 난류관통 길이가 증가하게 되고 열혼합이 증진되어 분기관 상단부에 위치한 열성층의 발생 영역을 좁혀주게 된다.

후 기

이 연구는 2002년 기초전력공학공동연구소의 전력기술기초연구사업관리번호(02340-39)의 '원자로 냉각재 계통과 연결된 분기관에 발생하는 열성층과 취약부위의 균열을 예측하기 위한 전산해석 기법에 관한 연구'의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사한다.

참고 문헌

1. EPRI, 1994, Thermal Stratification, Cycling and Striping(TASCS), TR-103581.
2. NRC Bulletin 88-08, 1998, Thermal Stress in Piping Connected to Reactor coolant System.
3. NRC Bulletin 88-11, 1998, Pressurizer Surge line Thermal Stratification
4. NRC, Information Notice No. 91-19, 1991, Steam Generator Feedwater Distribution Piping Damage
5. Han. K. S., Kim. S. T., Park. K. S., Jang. K. S., Choi. S. N., 1998, Safety Analysis on Fatigue Cracking of Pressurizer Nozzle in Nuclear Power Plant, Proc. of the Korea Society of Mechanical Engineers, pp.1125-1133.
6. Park. M. H., Kim, K. C., Noh, H. K. and Kim, K. H., 2000, Numerical Study on the Thermal Mixing Flow of Cold Leg during High Pressure Safety Injection after Loss of Coolant Accident, Proc. of the First National Congress on Fluids Engineering, September 1-2, Muju, Korea, pp.475-478.
7. Park. M. H., Kim. K. C., Lee. S. K., Kim. T. R., Lee. S. C., 2002, Analysis for Unsteady Thermal Stratification Flow due to Turbulent Penetration in Branch Piping, Proceedings of the SAREK Summer Annual Conference Volume II, pp. 785-790