

MATRA-LMR코드를 이용한 액금로의 유로폐쇄 실험모사

The Simulation of Flow-blockage Experiment in LMR using MATRA-LMR

이석민, 박창환, 이은철

서울대학교
서울시 관악구 신림동 산56-1

정해용, 하귀석, 이용범

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

액체금속로는 냉각재의 열전도도가 매우 우수하기 때문에 조밀한 집합체로 구성된다. 따라서 집합체 내의 일부 유로가 폐쇄되는 현상이 발생하면 유속과 유량의 감소로 인해 국부적으로 소듐비 등이 일어나거나 피복재의 건전성에 영향을 미치게 되므로, 액금로 설계단계에서 유로폐쇄 현상에 대한 정확한 해석이 필요하다. 본 논문은 이러한 유로폐쇄 현상을 해석하기 위해 한국원자력연구소에서 개발된 부수로 해석코드인 MATRA-LMR코드의 검증계산을 위해 일본에서 ASFRE-III코드로 유로 폐쇄현상을 모사한 결과와 비교·분석하였다. 모사결과 MATRA-LMR코드가 유로폐쇄 현상에 대한 온도 분포와 유량 분포를 성공적으로 예측함을 알 수 있었다. 그러나 두꺼운 폐쇄물이 존재할 경우 폐쇄물 내부의 온도상승 효과를 해석할 수 없어 이에대한 열전달 모델이 추가되어야 할 것으로 판단된다.

Abstract

LMR(Liquid Metal Reactor) core consists of highly dense assembly structures because of coolant characteristics. Therefore, in case of local flow blockage in the coolant channels, local flow velocity and rates are reduced remarkably, which may cause fuel cladding melting or fission product release. So, this kind of phenomena should be revealed in the real design procedure. The simulation results of flow blockage experiment using MATRA-LMR which was developed by KAERI were compared with the results of ASFRE-III. As a results, it is shown that the MATRA-LMR predicts the flow and temperature profile reasonably. However, The heat transfer model which can predict the temperature increase in the thick blocakge plate are required.

1. 서 론

액체금속로의 냉각재로 사용하는 소듐은 비등점이 높고 열전도도가 매우 우수하기 때문에 액체금속로의 노심은 간격이 조밀한 핵연료봉으로 구성되어 있으며, 노심의 냉각재 유로 또한 작게 구성되어 높은 출력밀도를 이루고 있다. 이러한 액체금속로의 노심 구성조건 때문에 노심 내에서 유로폐쇄가 발생하면 폐쇄가 발생한 윗 부분의 어느정도 영역까지는, 유속과 유량이 정상적인 상태와 비교하여, 현저하게 적어지면서 역유동이 형성된다. 그 결과 핵연료봉 피복재 온도상승 및 핵분열 생성물이 방출되는 사고로까지 연결될 수 있다. 이는 액체금속로의 안전성에 영향을 미치므로 액체금속로 설계단계에 있어서 이에 대한 정확한 현상 분석 및 해석이 필요하다. 그러나 여전히 유로폐쇄의 형성 과정과 사고 전개 과정에 대한 이해가 부족한 영역이 많으므로 유로폐쇄 발생 여부를 효과적으로 검출하여 원자로를 조기에 정지시키고 심각한 사고로의 진행을 방지하기 위한 연구가 액체금속로 개발 초기부터 전세계적으로 진행되고 있다. 액체금속로의 안전성과 관련된 유로폐쇄 영향은 폐쇄(blockage)의 크기와 재질, 노심내의 위치, 핵연료봉 출력 그리고 냉각재 유속등에 의해 좌우된다. 이 인자들에 의해서 폐쇄에 끼치는 영향의 정도가 결정되며, 이에 의해 파생되는 노심내의 불균형한 온도분포의 정도를 가늠할 수 있다. 따라서 유로폐쇄가 발생한 유로내의 온도 분포와 같은 열수력 현상을 정확하게 해석할 수 있는 전산코드를 개발하여 액체금속로 집합체의 설계 및 감시 계통의 설계에 활용하고 이러한 사건에 대한 액체금속로의 안전성을 검증하는 연구가 요구되고 있으며, 안전해석 및 집합체 설계평가와 관련하여 유로폐쇄에 의한 온도분포 영향을 분석하기 위한 많은 실험과 이론적인 연구가 진행되어 왔다.

집합체 열수력 해석에 널리 사용되는 부수로 해석코드는 주목적이 온도나 유량분포 등의 열수력 설계에 사용하는 것이지만 지속적인 모델 개발을 통해 안전해석용으로까지 적용범위를 확장하여 유로폐쇄 현상의 해석에 성공적으로 사용되고 있다. 미국, 영국, 일본 등에서는 1970년대 후반부터 현재까지 TH3D, SABRE, ASFRE등의 단상유동 해석용 부수로 코드를 개발하고 지속적으로 발전시켜오고 있다. 국내에서는 한국원자력연구소에서 1997년에 COBRA-IV-i를 근간으로하여 정확도를 향상시키고 사용자 편의를 위해 여러 가지 기능을 추가한 MATRA 코드를 개발하였다. MATRA-LMR(Multichannel Analyzer for Transient and steady-state in Rod Array-Liquid Metal Reactor)은 경수로에만 적용이 가능한 MATRA 코드를 액체금속로에 적용할 수 있도록 개발한 것으로 소듐의 물성치를 계산할수 있는 부 프로그램과 열전달 계수의 상관식이 추가되었다. 이렇게 개발된 MATRA-LMR은 유로폐쇄가 없는 경우에는 계산결과가 실험 데이터와 잘 일치한다. 그러나 유로폐쇄 현상을 분석하기 위해 MATRA-LMR내의 수치기법인 음해법(Implicit scheme)을 사용할 경우, 단일 부수로 면적이 약 70% 이상 막히게 되면 축방향 속도가 반경방향 속도보다 훨씬 커야한다는 부수로 해석의 기본가정에 모순되어 계산을 수행하지 못하는 단계에 있었으며, 다른 수치기법인 양해법(Explicit scheme)은 개발단계에서 충분한 검토를 거치지 못해 계산이 불가능한 상태에 있었다. 하지만 양해법은 음해법과는 달리 유로폐쇄 해석을 위한 제한조건이 없는 관계로 양해법을 이용한 유로폐쇄 해석을 시도하려는 연구가 진행되었으며, 이에따라 다음과 같은 사항이 수정·보완되었다.

- 에너지 방정식의 대류항 처리 프로그램 수정
- 100% 유로폐쇄에 대한 면적 입력 수정
- 압력손실 모델 개선
- Wire-wrap에 의한 유동분포 모델 수정

위와같이 수정·보완된 MATRA-LMR의 검증계산을 위해 본 연구에서는 일본의 PNC(現 JNC)에서 수행한 TN9410의 실험을 모사한 ASFRE-III코드의 계산결과와 비교·분석 하였다.

2. 모사 대상 실험장치 및 입력자료

PNC TN9410실험은 1998년 PNC(現 JNC)에서 수행한 실험으로 37개의 핵연료봉으로 구성된 육각덕트에서 유로폐쇄에 따른 온도분포 측정 실험이다. 핵연료봉 지름은 8.5mm(0.335in)이고, 출력은 250W/cm이다. 전체 길이는 1650mm이며 이중 500mm부터 1150mm까지 650mm가 가열부이다. 채널 가장자리 및 중간부분에 유로 폐쇄부를 설치하여 실험을 하였는데, 본 논문에서는 가장자리 유로폐쇄 실험 결과를 모사해 보았다. 입구에서 807.5mm부분에 35mm의 Stainless Steel 재질로 만들어진 유로 폐쇄 부위가 있다. 그림1은 실험장치의 개략적인 유로와 구성도이며, 그림2는 실험장치의 내부 구조도로 총73개의 채널에서 14개의 채널이 폐쇄물로 폐쇄되어 있고 폐쇄부가 벽면과 밀착되어 있다. 입구 냉각재의 유량은 400l/min(5.868kg/s)로 이에따른 입구유속은 6.169m/s이다. 또한 냉각재 입구온도는 300℃ 이고, 실험시 압력은 대기압이다.

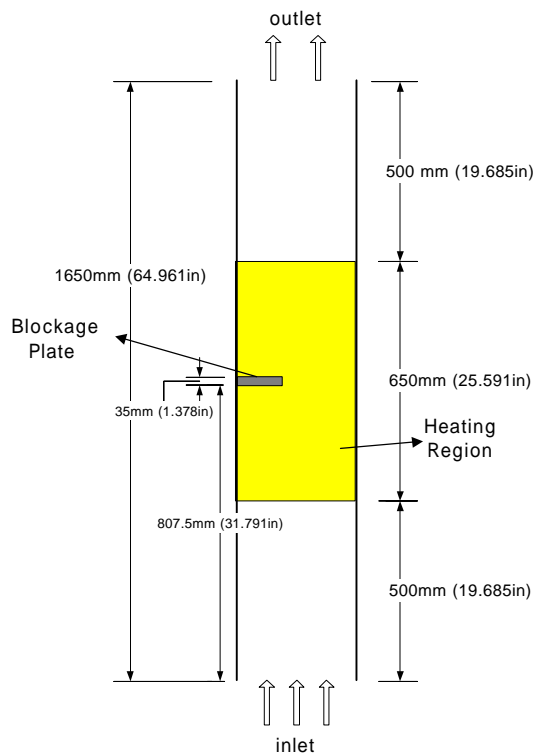


그림1. PNC TN9410 실험장치 구성도

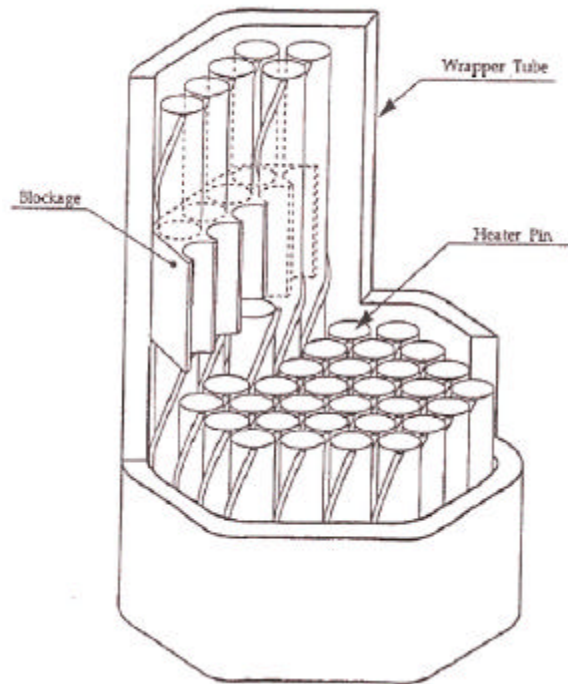


그림2. 유로 폐쇄부에서의 실험장치 내부 구조 입체단면도

PNC TN9410 실험을 모사하기 위한 MATRA-LMR 입력자료를 표1에 정리하였다. 37개의 전열봉으로 구성되어 있으며, 핵연료봉 지름은 0.3346 in., 핵연료봉 간격은 0.3780 in., 핵연료봉의 축방향 및 반경방향 출력분포는 일정하며 Wire-wrap의 직경은 0.0433 in., Wire-wrap의 pitch는 7.874 in.이다. MATRA-LMR에서는 축방향 노드는 사용자의 입력에 따라 노드의 간격을 임의로 조정할 수 있는데 TN9410 실험의 경우 폐쇄부의 길이가 상대적으로 길기 때문에 폐쇄부 부분을 5개의 노드로 세분화하여 계산하였다. 또한 폐쇄부 윗 부분에서의 온도 분포를 좀더 자세히 평가해 보기 위해 폐쇄부의 아래 부분보다 더 많은 노드로 나누어 계산하였다. 따라서 전체적으로 축방향 노드수는 Nonuniform axial node length option을 사용하여 입구부터 가열부 밑 부분까지 20개의 노드, 폐쇄부전까지 20개 노드, 폐쇄부를 5개 노드, 가열부 끝까지 20개 노드, 그후 출구까지 40개 노드로 총 105개 노드로 나누었다. 열전달 상관식은 Lyon-Martinelli 상관식, flow split 모델은 Chiu-Rohsenow-Todreas(CRT) 모델을 사용하였다. MATRA-LMR코드의 입력에 사용된 Channel 및 Gap번호는 그림3과 같으며, 노드는 그림4와 같이 구성하였다.

표1. 입력데이터 (PNC TN9410 37 pin test of the 14 edge blockages)

Number of rods	37
Number of channels	78
Number of gaps	114
Rod diameter	0.3346 in. (8.5E-3 m)
Rod pitch	0.378 in. (9.6E-3 m)
Wire-wrap diameter	0.0433 in. (1.1E-3 m)
Wire-wrap pitch	7.874 in. (0.2 m)
Total axial length	64.961 in. (1.650 m)
Flat to flat distance of inside duct	2.38516 in. (0.060583 m)
Distance between rod and duct wall	0.0433 in. (1.1E-3 m)
Radial power distribution	1.0 (uniform)
Axial power distribution	(normalized) 0 - 19.685 in. : 0 19.685 - 45.276 in. : 1 (Heating zone = 25.591 in.) 45.276 - 64.961 in. : 0
Inlet mass velocity (flux)	6.169 m/s (4.0024 Mlbm/ft ² -hr)
Rod heat flux	250 W/cm (0.2968 MBtu/hr-ft ²)
Inlet temperature	572 °F (300 °C)
Outlet pressure	14.696 psia (1.01324E5 Pa)
Thickness of blockage plate	1.378 in. (35.0E-3 m)
Pressure drop correlation	CRT
Heat transfer correlation	Lyon-Martinelli

3. 모사결과

MATRA-LMR의 두가지 수치해법중 유로폐쇄 현상을 분석하기 위해 수정·보완된 양해법을 사용하여 TN9410실험을 모사한 결과는 다음과 같다. 먼저 폐쇄부에서의 유량 및 유속을 확인하기 위한 축방향 유속 계산결과(그림5)와 유량 계산결과(그림6)를 보면, 유로폐쇄가 발생하는 41-45번 노드에서는 폐쇄물로 인한 유량이 '0'이고 유속 또한 '0'으로서 폐쇄부에서 완전 유로폐쇄가 발생했음을 확인할 수 있다. 그림에서 유량과 유속의 변동이 생기는 이유는 Wire-wrap에 의한것이다. 이에 따른 폐쇄 전후의 온도 분포를 살펴보면, 그림7, 그림8과 같다. 그림7은 폐쇄전(40번노드)의 반경방향 온도분포를 MATRA-LMR로 계산한 결과로서 41번 노드에서 시작하는 폐쇄의 영향으로 폐쇄부 밑부분에서 약간의 온도의 변화가 시작함을 볼 수 있다. 폐쇄 윗부분의 온도분포인 그림8은 폐쇄부에서 온도상승으로 인해 폐쇄부의 온도가 상승했음을 확인할 수 있다. 따라서 유로폐쇄에 대한 계산을 MATRA-LMR코드가 유로폐쇄 현상을 적절히 계산하고 있음을 확인할 수 있다.

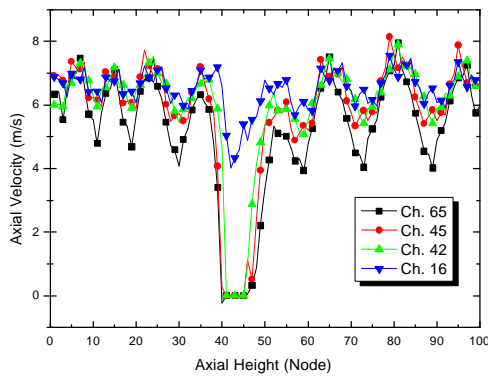


그림5. MATRA-LMR의 축방향 유속(m/s)

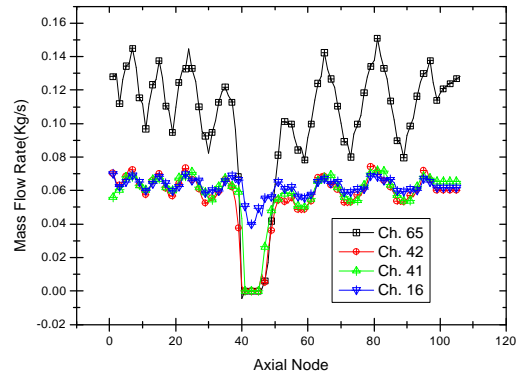


그림6. MATRA-LMR의 축방향 유량(kg/s)

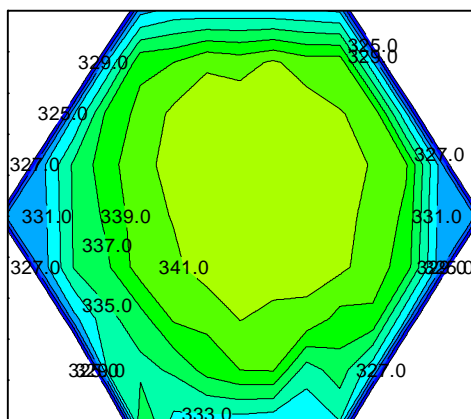


그림7. 폐쇄 밑부분(Node40)의 온도분포계산결과(℃)

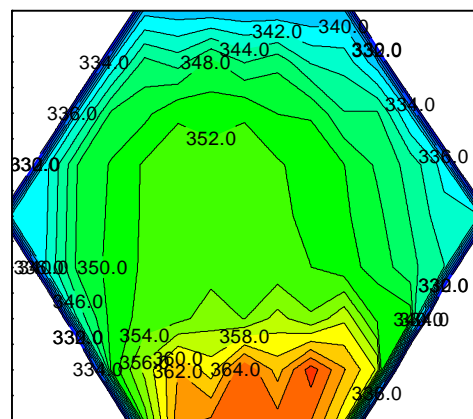


그림8. 폐쇄 윗부분(Node48)의 온도분포계산결과(℃)

전체적인 온도분포 계산결과를 ASFRE-III 계산결과와 비교해 보면 다음과 같다. 그림9는 ASFRE-III 코드로 계산한 실험장치의 온도 분포 결과를 나타낸 것으로 유로 폐쇄부 이후에서 온도가 400℃ 정도 상승하고 폐쇄부내에서는 최대 550℃까지 상승하는 것을 보여준다. 이를 MATRA-LMR코드로 계산한 그림10과 비교해 볼 때, MATRA-LMR코드 계산결과가 ASFRE-III 코드 계산보다 상부온도가 약 10℃ 정도 낮게 예측되었다. 온도가 10℃ 정도 낮게 예측되는 이유는 ASFRE-III의 경우 폐쇄부내의 온도분포를 계산할 수 있는 열전달 모델을 갖고 있으나 MATRA-LMR의 경우는 폐쇄부 자체가 전도체로 작용할 경우에 대한 폐쇄물의 열전달 모델을 갖고 있지 못하다. 따라서 폐쇄부 내부의 온도 상승에 대한 적절한 모사를 MATRA-LMR은 수행할 수 없어, 계산시 폐쇄부에서 축방향으로의 유량은 0이 되게 하였지만, 반경방향으로의 유량은 0이 되도록 구성할 수 없는 단점이 있다. 이러한 이유로 폐쇄부 내부의 최대 온도에서 차이가 발생하며, 이에 따라 폐쇄부 상부에서의 온도차가 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 MATRA-LMR 코드 계산결과는 전체적으로 ASFRE-III 코드 계산 결과와 유사한 온도 분포를 보여주고 있음을 볼 수 있다. 따라서 유로폐쇄와 같이 비교적 큰 유로 장애물이 존재할 경우 나타나는 재순환 유동을 MATRA-LMR코드가 성공적으로 모의할 수 있음을 알려주는 것이다.

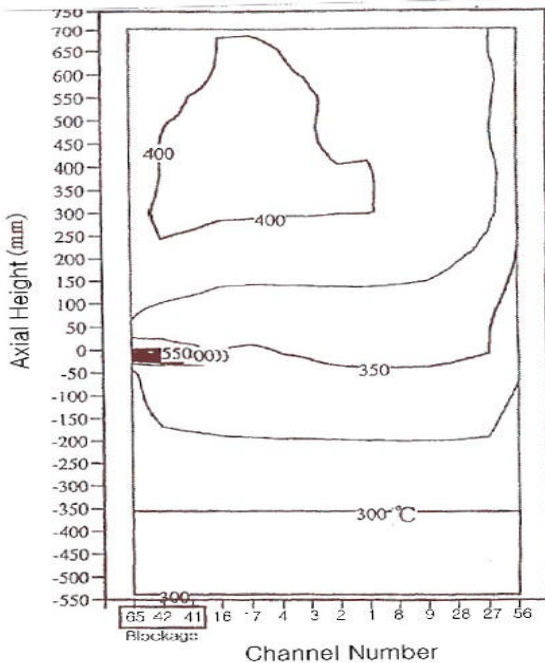


그림8. TN9410 실험에 대한 ASFRE-III 코드의 온도 분포 예측(℃)

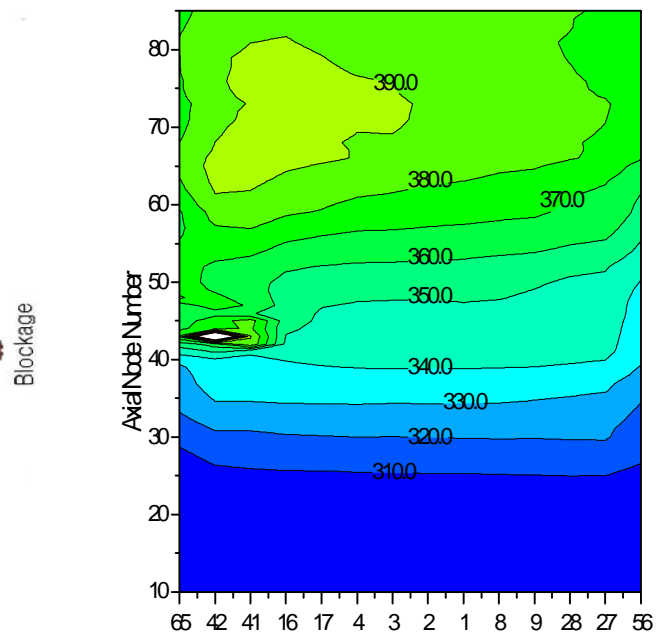


그림9. TN9410 실험에 대한 MATRA-LMR 코드의 온도분포 예측(℃)

폐쇄부에서의 온도분포를 좀더 상세히 살펴보면, 그림 10은 폐쇄부에서 채널의 온도분포를 ASFRE-III로 계산한 것이고, 그림 11은 MATRA-LMR로 계산한 것인데 MATRA-LMR결과와 비교하면 ASFRE-III 결과와 마찬가지로 폐쇄부가 위치한 41~45번 노드에서 온도가 상승하며 가장자리 채널의 온도가 가장 크게 상승함을 알 수 있다. 그러나 PNC에서 ASFRE-III코드로 계산한 결과와 비교해 보면 폐쇄부내의 최대 온도가 작게는 50℃에서 크게는 200℃까지의 차이를 보이고 있으며 대부분 ASFRE-III결과보다 낮게 예측하고 있다. 그 이유는 앞서 제기한 바와 같이 MATRA-LMR 코드는 폐쇄물 자체가 전도체로 작용하여 그 내부에서 온도가 상승하는 영향을 모의하지 못하기 때문이다. 따라서 이에 대한 MATRA-LMR의 열전달 모델이 앞으로 개선해야 할 부분으로 판단된다.

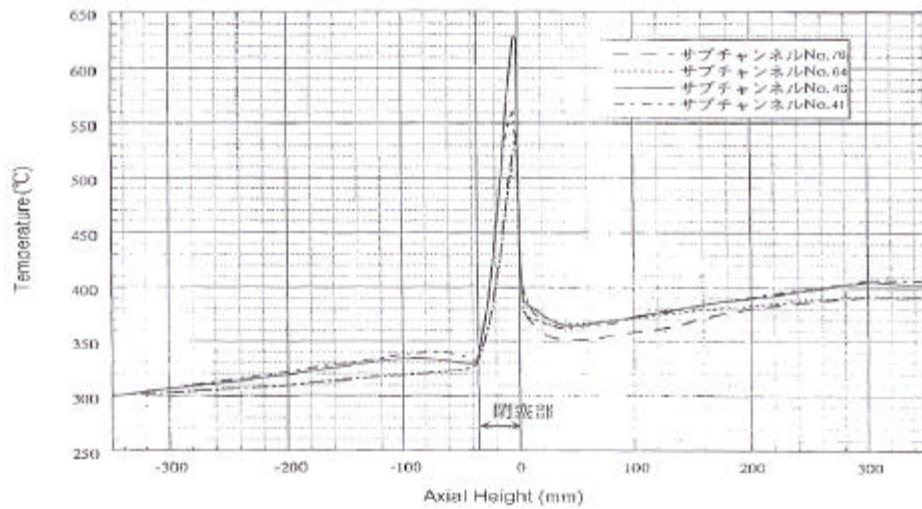


그림.10 폐쇄부에서의 ASFRE-III의 축방향 온도 분포(℃)

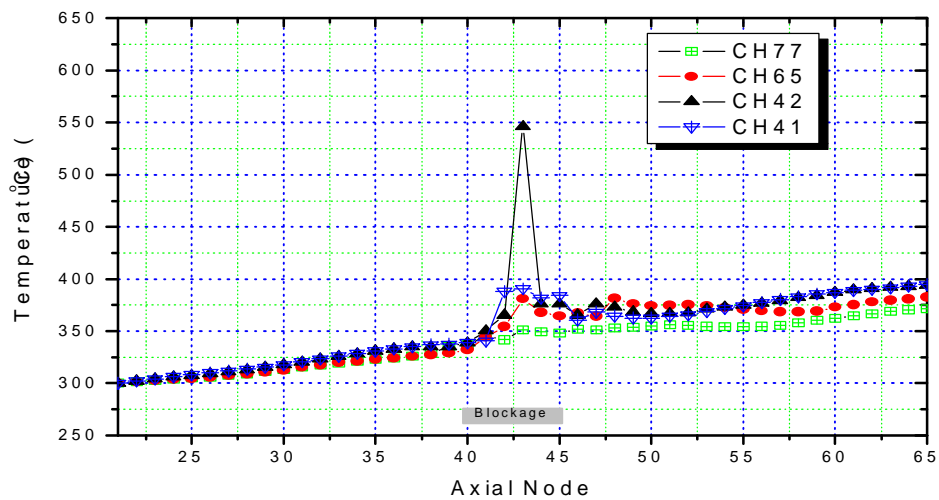


그림11. 폐쇄부에서의 MATRA-LMR의 축방향 온도 분포(℃)

4. 결론

본 논문에서는 액체금속로의 안전성에 심각한 영향을 끼칠 수 있는 노심내 유로폐쇄 현상을 해석할 수 없었던 기존의 MATRA-LMR코드를 수정·보완한 후에 이를 검증하기 위해 일본에서 수행된 PNC TN9410 실험장치를 모사 계산한 ASFRE-III코드 계산결과와 비교/분석하였다. 계산 결과 MATRA-LMR코드가 ASFRE-III코드의 계산결과와 비교해 볼 때 최대 10℃ 정도의 오차 범위 내에서 유로폐쇄 현상을 성공적으로 모사함을 알 수 있었다. 그러나 폐쇄부의 두께가 두꺼운 경우 폐쇄부 자체가 전도체로 작용하여 폐쇄부내에서의 온도상승 효과를 MATRA-LMR코드는 적절히 모사하지 못하는 단점을 갖고 있다. 향후 이에 대한 보완이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구,개발사업의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

1. 김영태, MATRA-LMR코드의 액체금속로 집합체 유로막힘 현상 해석 가능성 검토, KALIMER/CD230-CV-01/1999, 1999.
2. 김원석, BLOCKAGE 관련 MATRA-LMR 코드의 계산가능 범위 및 문제점 분석, KALIMER/CD230-CV-02/1999, 1999.
3. 김원석 외, “ MATRA-LMR 코드 사용자 지침서 (Version 2.0),” KALIMER/CD230-CM-02/2000, 2000.
4. 정해용 외, 유로폐쇄 해석을 위한 MATRA-LMR 양해법 개발 및 시험계산, KAERI/TR-2385/2003, 2003.
5. 하귀석 외, “COBRA-TF 코드를 이용한 액금로의 Flow-Blockage 실험해석,” KNS 추계학술발표회, 2002.
6. Toru Iitsuka, et al. Study for Subassembly Porous Blockage in Fast Breeder Reactors - Pre Subchannel Analysis of 37-Pin Bundle Sodium Test-, PNC TN9410 98-022, 1998.