2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

# KALIMER 집합체에 대한 유로폐쇄 현상 분석

# The Analysis of flow blockage in a assembly of KALIMER

하귀석, 정해용, 장원표, 이용범

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

**요약**

액금로 집합체 사고 중에서 국부적인 유로폐쇄로 인한 핵연료 손상이 노심 전체로 전파되면 원자로 안전에 심각한 영향을 미칠 수 있으므로 유로폐쇄사고는 집합체 안전성 평가에서 반드시 고려된다. 설계기준사고로서 6 개 부수로 폐쇄 사고에 대해 폐쇄 위치별로 안전성을 평가하였으며, 설계기준 초과 사고로서 24 개 및 54 개 부수로 폐쇄사고를 해석하였다. 또한 부수로 폐쇄 사고로 인한 유량 감소를 고려한 민감도 분석이 수행되었다. 분석 코드는 현재 연구소에서 개발한 MATRA-LMR 을 사용하였다. 6 개 및 24 개 부수로 폐쇄 사고시 모든 경우에서 설계 기준(704 ℃)을 만족하는 반면에, 54 개 부수로 폐쇄 사고에서 부수로 폐쇄로 인한 유량 감소의 경우에는 최대 온도가 706 ℃로 예측되어 장기 피복재 온도 기준을 만족하지 못하는 것으로 분석되었다.

**Abstract**

A local flow blockage within a fuel assembly in liquid metal reactor (LMR) has to be considered in the safety analysis because the accident may lead to a severe result if the damage of fuel rod were propagated into the whole core. The safety evaluations were performed for the 6-subchannel blockage accidents as design basis events and for the 24- and 54-subchannel blockage accidents as beyond design basis events of LMR. Also, sensitivity analyses were carried out to take account of the flow reduction due to the blockages. The MATRA-LMR computer code was used to the analyses. The results for the cases of 6- and 24-subchannel blockage showed to satisfy the design criterion(704 ℃) for the long term cladding temperature while the analysis of 54-subchannel blockage with the flow reduction revealed that the design criterion was violated by the coolant maximum temperature of 706℃.

## 1. 서론

KALIMER 집합체 유로폐쇄사고는 설계기준사고 (DBE)와 초과설계기준사고 (BDBE)의 두 범주로 크게 구분되며 설계관점에서 접근방법을 달리한다. KALIMER 집합체 유로폐쇄사고로 고려되는 설계기준사고는 집합체 내부에서 국부적으로 6 개의 부수로가 같은 높이에서 완전히 막히는 사고로 정의하였다. 외국의 유로폐쇄 발생기구에 대한 실험연구에 의하면[1] 핵연료봉 지지를 위해 Wire-wrap 을 사용하는 집합체에서는 Wire-wrap 의 구조적 특성상 6 개의 부수로가 동시에 같은 높이에서 완전히 막히는 경우는 매우 희박하다고 알려져 있다. 노심 냉각유로 및 집합체 설계를 통하여 외부의 이물질이 노심이나 집합체 입구로 유입되는 것을 방지하도록 설계되었지만, 핵연료 자체 손상으로 인하여 핵연료 물질이 누출되어 집합체 부수로를 폐쇄하는 경우는 근본적으로 배제할 수 없다. 그러나 대규모의 핵연료봉 손상을 제외하고는 Wire-wrap 의 구조상 유로폐쇄 영역은 같은 높이에서 반경방향으로 증가하여 인접한 부수로까지 폐쇄시킬 수 없으며, 더욱이 부수로의 유로는 완전히 막히지 않고 일정한 공극율을 가지므로 냉각수가 틈사이로 흐를 수 있다. 그렇지만 KALIMER[2] 설계에서는 보수적인 관점에서 인접한 6 개의 부수로가 완전히 막히는 사고를 설계기준사고로 채택하였다. 이러한 설정은 KALIMER 와 같은 Wire-wrap 핵연료를 사용하는 EFR 설계의 경우와 같다.

설계기준사고는 원자로 감시계통과 같은 보호계통의 운전을 고려하여 사고범주에 따라 이미 설정되어 있는 안전허용기준을 적용한다. 만약 UE(Unlikely Event)범주에 속하는 사고라면 사고해석결과의 영향은 UE 의 안전허용기준을 초과하지 않아야 한다. 핵연료 집합체의 안전 목표는 손상된 집합체의 냉각을 유지시키는 것이기 때문에, 논리적으로 과도한 피복재 손상만 피할 수 있다면 집합체의 냉각성은 유지된다고 볼 수 있다. 집합체 유로폐쇄사고 시 안전허용기준은 유로폐쇄사고를 감지하여 원자로를 자동 정지시킬 수 있어야 하며, 이때 집합체는 냉각 가능한 안정된 상태로 유지되어야 한다. 그러므로 집합체 유로폐쇄사고 시 피복재가 용융되지 않으면 집합체의 안전성은 확보되므로 보수적인 관점에서 집합체 내부의 소듐 냉각재 비등금지를 안전허용기준으로 삼았다. 즉, 집합체 내부의 최대 냉각재 온도가 소듐의 비등 온도 아래로 유지되어야 한다.

대규모 집합체 외부 유로폐쇄사고는 KALIMER 사고분류의 발생희박사고 (Extremely Unlikely Event; XE) 범주에 포함하며 한계사고 (Bounding Event; BE)로 분류된다. XE 범주의 집합체 유로패쇄사고는 피복재와 핵연료의 대규모 용융을 야기 시키는 잠재적 가능성을 가지고 있으므로 전체 노심용융 사고의 기인사고로 취급되어 사고 발생확률이 $10^{-7}$/RY 이하가 되도록 제한되고 있다.

사고 집합체에서의 용융물질이 집합체 외벽을 파손시켜 그 영향이 주변 집합체로 전파되면 대규모의 피복재와 핵연료의 용융이 발생할 수 있다. 그러므로 한계사고에 속하는 유로폐쇄사고의 안전기준은 유로폐쇄로 인해 국부적인 손상이 전체 노심 용융사고로 전개되지 않을 것을 요구한다. KALIM 에서는 잠정적으로 프랑스나 영국에서 채택하고 있는 기준에 따라 유로폐쇄사고 결과로 인한 단일 집합체의 용융이 주변의 6 개의 집합체로 전파되지 않도록 설정하고 있다. KALIMER 에서 고려하는 집합체 사고의 한계사고는 집합체–입구–완전폐쇄사고 (Total Instantaneous Subassembly Inlet Blockage: TISIB)이며, 이 사고의 발생확률은 매우 낮지만 안전성 평가 측면에서 이와 같은 최악의 사고 상황은 여전히 고려할 필요가 있다.

본 연구에서는 신개념 원자로인 KALIMER 에 대해 노심설계에서 6 개의 부수로가 폐쇄되는 설계기준사고에 대해 안전성을 평가하였으며, 24 및 54 개의 부수로가 폐쇄되는 대규모 집합체 유로폐쇄 사고 경우의 안전 여유도를 평가하기 위한 해석도 수행하였다. 이와 함께 각 유로 폐쇄 크기와 폐쇄 위치 등에 따라 민감도 해석을 수행하였다.

## 2. 설계기준사고해석(6개 부수로 폐쇄)

다양한 종류의 가상적인 액금로 집합체 사고 중에서 집합체 내부의 유로폐쇄사고에 대한 안전성 분석을 수행하였다. 국부적인 유로폐쇄로 인한 핵연료 손상이 노심 전체로 전파되면 원자로 안전에 심각한 영향을 미칠 수 있으므로 유로폐쇄사고는 집합체 안전성 평가에서 반드시 고려된다. 핵연료 파손으로 잔해물 또는 냉각계통 내에서 잔류하던 이물질로 인해 국부적으로 유로가 폐쇄될 수 있으며, 사고 결과의 심각성 (Seriousness)과 사고의 발견가능성 (Detectability)이 안전성 관점에서 가장 중요한 두 인자이다. 집합체 유로폐쇄 해석의 주요변수는 집합체 내부에서 발생하는 최고 온도이며, 그 위치는 유로폐쇄지역 근처나 또는 재순환 후류영역 내에 발생할 수 있다. 집합체 내부에서 유로폐쇄로 인해 국부적으로 높은 온도가 유지되는 동안 외부에서 유로폐쇄를 감지하지 못한다면 위험이 증가될 수 있다.

또한 유로폐쇄로 인해 집합체 유량이 크게 감소하지 않으면 집합체 출구에서의 평균온도는 크게 변하지 않는다. 따라서 어떤 조건에서의 유로폐쇄가 집합체 안전성에 영향을 미치는 지를 파악하고, 위험도가 증가되기 전에 사고를 감지할 수 있는 열수력적 변수를 찾는 것이 중요하다. 일반적으로 집합체 출구에 열전대가 설치되어 있으므로 냉각재 출구온도는 중요한 변수가 된다. 핵연료봉이 파손된 이후에는 지발 중성자 검출 장치를 이용해 사고를 감지하여 원자로의 안전을 확보할 수 있다.

KALIMER 노심의 핵연료 집합체에서 6 개 부수로가 폐쇄되는 설계기준사고의 안전성을 평가하였다. 핵연료 집합체의 전체길이는 고온 조건에서 353.33 cm 이며 핵연료의 외경과 피치는 각각 0.765 cm, 0.905 cm 이다. 집합체 내부에는 271 개의 핵연료봉이 있으며, 각 핵연료봉 주위는 직경 0.131 cm 의 Wire 가 피치 20.62 cm 의 나선형 모양으로 감고 있다. 핵연료와 피복관의 재질은 각각 U-Pu-10%Zr 와 HT9 이다. 단일 핵연료 집합체에서 생성되는 총 열량은 20.33 kW 이며, 집합체의 입구 경계조건으로 집합체 전체 유량은 26.7 kg/s, 냉각재 소듐의 입구 온도는 366.2 °C 를 사용하였으며, 출구 경계조건으로는 일정 압력인 0.1 MPa 을 사용하였다.

KALIMER 집합체 유로폐쇄 안전 해석은 현재 연구소에서 분산유동저항 모델과 혼합 수치해석 기법을 적용하여 개발한 MATRA-LMR 코드[3]를 사용하였다. KALIMER 집합체의 기하학적 모양은 규칙적인 삼각형 격자이다. MATRA-LMR 해석을 위해 그림 2-1 과 같이 핵연료 집합체를 540 개의 부수로와 810 개의 Gap, 축 방향으로 103 개의 노드로 세분하였으며, 집합체 내부의 전체 핵연료봉은 271 개이다. 집합체 축방향의 한 노드의 길이는 Wire-wrap 피치의 1/6 에 해당하는 3.44 cm 로 선정하였다. 집합체 내부에 위치하는 부수로 하나의 유로면적은 0.124 $cm^2$ 이다. 핵연료봉의 Wire-wrap 에 의해 집합체 외곽과 벽면의 간극에서 큰 규모로 형성되는 선회류의 영향을 고려하기 위해서는 전체 집합체를 계산영역에 포함하여야 한다. 6 개 부수로의 폐쇄위치는

그림 1 과 같이 집합체의 중심, 집합체 중심과 벽면간의 중간, 벽면에 접촉한 경우의 3 가지이며, 각각의 경우 한 개의 Node 가 폐쇄되었다고 가정하였다.

집합체 중심에 유로폐쇄가 발생하는 경우 MATRA-LMR 코드는 최대 온도를 6 번 부수로, 67 번째 축 방향 Node 에서 584.08 ℃ 로 계산하였고, 집합체 출구의 최대 온도는 같은 부수로의 출구에서 572.06 ℃ 로 계산하였다. 집합체 중간에 유로폐쇄가 발생하는 경우는 최대 온도를 150 번 부수로, 66 번째 축 방향 Node 에서 584.33 ℃ 로 계산하였으며, 집합체 출구의 온도는 같은 부수로에서 571.66 ℃ 로 계산하였다. 집합체 벽면에 접한 유로폐쇄가 발생하는 경우는 최대 온도를 384 번 부수로, 65 번째 축 방향 Node 에서 572.62 ℃ 로 계산하였고, 집합체 출구의 최대 온도는 집합체 중심 부근에서 563.0 ℃ 로 계산하였다. 따라서 집합체의 중심과 벽면 중간에 부수로 폐쇄가 발생하는 경우가 가장 높은 온도를 나타낸다.

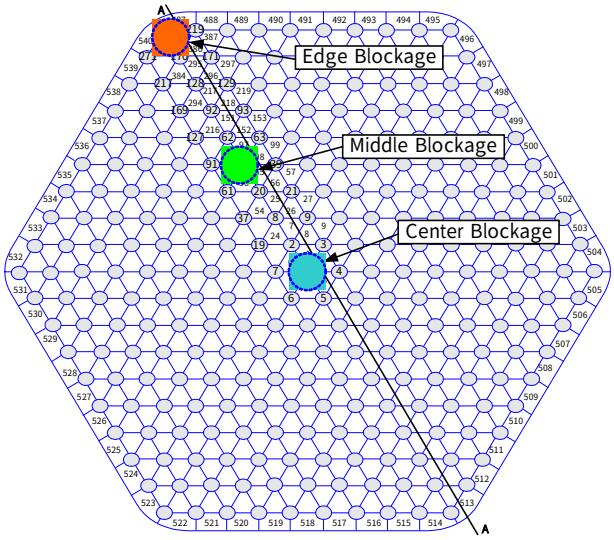


그림 1. 유로 폐쇄사고 해석을 위한 MATRA -LMR 입력 번호체계 및 유로폐쇄 위치

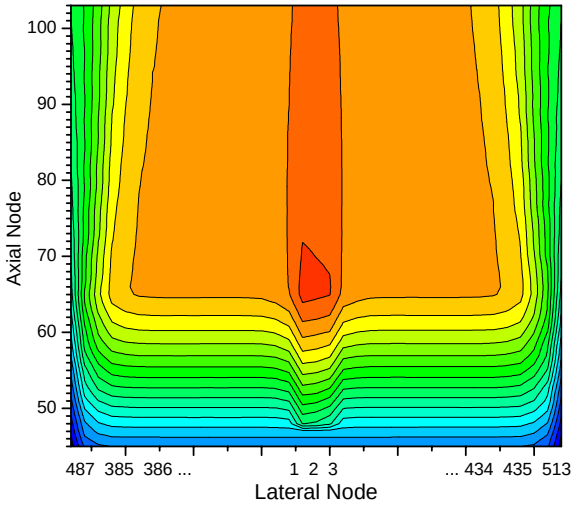


그림 2. 집합체 중심에서 부수로 폐쇄가 발생한 경우의 온도 분포(A-A 단면)

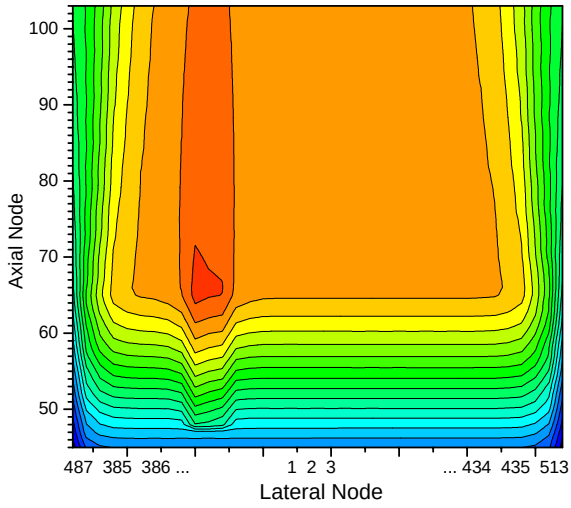


그림 3. 집합체 중심과 벽면 중간에서 부수로 폐쇄가 발생한 경우의 온도 분포

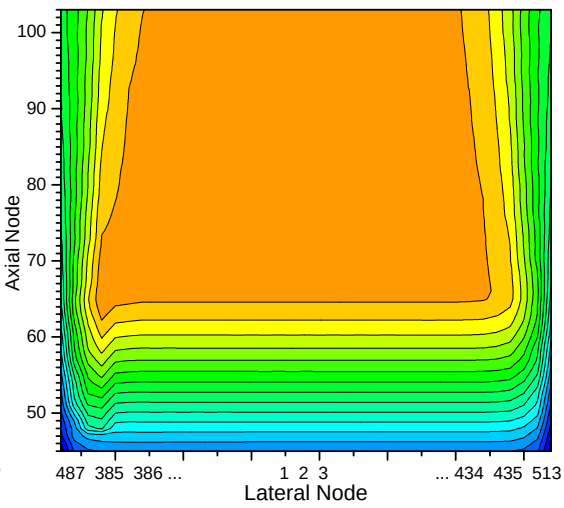


그림 4. 집합체 벽면에서 부수로 폐쇄가 발생한 경우의 온도 분포

그림 2 ~ 4 까지는 집합체 내부의 부수로 폐쇄 위치에 따라서 나타나는 온도 거동을 보여준다. 3 가지의 모든 경우에서 집합체 내부의 최대 온도는 재순환 유동으로 인해 부수로가 폐쇄되는 하류에서 발생한다. 그림 5 와 6 에 보인 바와 같이, 출구의 최대 온도는 집합체 중심 부수로 폐쇄와 중간 부수로 폐쇄의 경우에 폐쇄된 상부에서 최대 온도가 예측되는 반면에, 벽면에 인접한 부수로가 폐쇄되는 경우는 Swirl 유동의 영향으로 출구에서 Peak 온도를 보이지 않고 부수로가 폐쇄되지 않았을 때의 일반적인 온도 거동을 보인다.

결과적으로 최대온도는 부수로 폐쇄가 집합체 중심과 벽면 사이에 발생하는 경우이며, 이때의 최대온도는 584.33 ℃ 로서 소듐의 비등온도인 약 1000 ℃ 에 비해 약 400 ℃ 의 여유가 있어 집합체 안전성에는 문제가 없다. 한편 이 경우 집합체 출구온도는 유로폐쇄가 없는 경우에 비해 약 10 ℃ 정도의 차이를 보이기 때문에, 집합체 출구에서 부수로 폐쇄를 검출하기 위해서는 매우 정확한 열전대가 필요하다. 특히, 유로폐쇄가 집합체 벽면근처에 발생하면 집합체 외곽에 형성되는 대규모의 Swirl 유동의 영향으로 유로폐쇄 부분의 하류에 후류영역이 안정적으로 형성되지 못할 뿐 아니라 예측되는 최대온도도 다른 유로폐쇄 위치에 비해 낮게 계산된다.

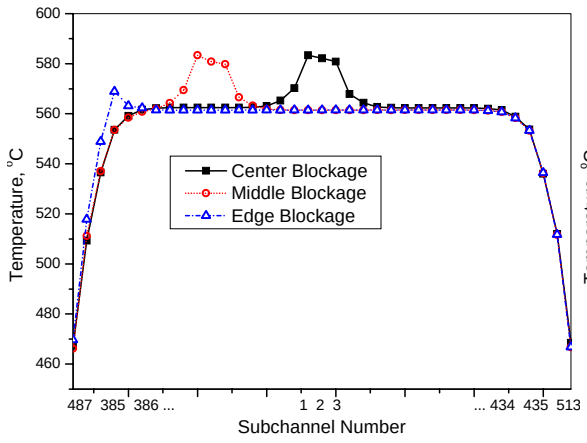


그림 5. 부수로 폐쇄 위치에 따른 집합체 내부의 최대 예측 결과 비교

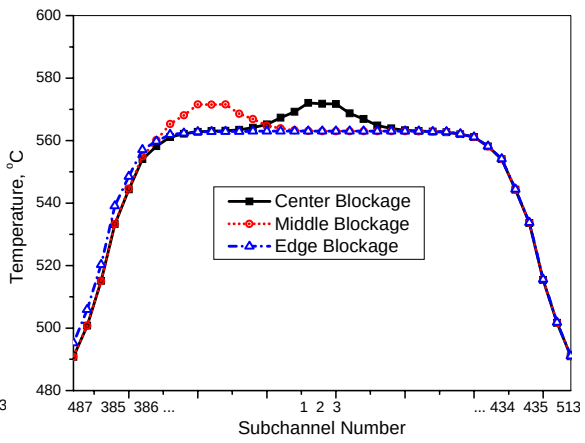


그림 6. 부수로 폐쇄 위치에 따른 집합체 온도 출구의 최대 온도 예측 결과 비교

## 4. 대규모 유로 폐쇄 사고해석

집합체 내부 유로폐쇄사고 결과에 영향을 미치는 변수 중 폐쇄 위치와 폐쇄 크기에 대한 민감도 해석을 수행하였다. 폐쇄위치는 반경방향으로 집합체 중심이나 또는 집합체 벽면 근처에 위치할 수 있으며 축방향으로도 임의 위치에 존재할 수 있다. KALIMER 핵연료의 축 방향 출력 분포에 따르면 최대 출력은 축 방향으로 47 번째 노드에서 발생하므로 유로폐쇄의 축 방향 위치는 47 번째 노드 부근으로 가정하는 것이 보수적이다. 폐쇄 크기는 반경 방향의 넓이만을 고려하였다. 폐쇄 넓이는 한 개의 핵연료봉을 중심으로 인접한 첫 열에 포함된 6 부수로, 첫 열부터 둘째 열까지의 24 개 부수로, 첫 열부터 셋째 열까지의 54 개 부수로의 유로가 각각 폐쇄되는 경우에 대한 계산을 수행하였다. 폐쇄영역의 냉각재 투과율은 보수적인 관점에서 0 으로 가정함으로써 냉각재가 유로폐쇄 영역을 전혀 통과하지 못하게 하였다.

6 개 부수로가 폐쇄되는 경우와 같이 24 개 부수로 및 54 개 부수로의 폐쇄 사고 경우에도 같은 위치에서 계산을 수행하였으며, 각 경우의 집합체의 냉각재 최대온도와 출구온도를 그림 7 에 함께 비교하였다. 그림에서 가로축에 표시된 center 는 집합체 중심을 의미하며, midpoint 는 집합체 중심과 벽면 중간, edge 는 집합체 벽면과 접촉한 유로 폐쇄 위치를 의미한다. 계산 결과, 유로 폐쇄의 반경 방향 넓이가 증가할수록 집합체 내부의 냉각재 최대 온도는 높게 계산되었으며, 유로폐쇄 위치가 집합체 중심과 벽면 중간인 경우에 최대 온도와 출구 온도가 모두 가장 높게 계산되었다. 24 개 부수로 폐쇄 사고에서 집합체 중간에서 부수로 폐쇄가 발생할 경우에 집합체 내부의 냉각재 최대 온도는 627.7 ℃ 로서 6 개 부수로 폐쇄 사고보다 약 43 ℃ 정도 높은 것으로 나타났다. 또한 54 개 부수로 폐쇄 사고에서는 668.3 ℃ 로서 6 개 부수로 폐쇄 사고보다 약 84 ℃ 정도 높은 것으로 계산되었으나, 여전히 소듐 냉각재의 비등 온도에는 훨씬 못 미친다. 또한 모든 경우에서 구조물(피복재)의 건전성에 영향을 미칠 정도의 온도 상승은 보이지 않았다. 그러나 보다 많은 부수로가 폐쇄된다면 피복재의 건전성을 보장하지 못할 것으로 판단된다.

## 5. 집합체 설계 변수의 민감도 분석

3 절과 4 절에서는 집합체의 설계 값을 이용하여 부수로 폐쇄 사고를 모의하였다. 그러나 실제로 부수로가 폐쇄되면 유로 면적 감소로 인해 유량 감소가 발생할 것이다. 이를 고려하기 위하여 6 개, 24 개 54 개 부수로 폐쇄 사고가 발생하였을 경우에 유량 감소를 계산하였다. 이를 입력으로 4 절에서 가장 온도를 높게 계산한 경우인 집합체 중간에서 부수로가 폐쇄되었을 경우에 대해 사고 해석을 수행하였다. 유량 감소를 계산하기 위해, 부수로가 폐쇄됨에 따라 형태 손실(Form's Loss)로 인한 압력 강하가 오리피스(형태 손실 계수=1.5)와 같은 정도로 발생한다고 가정하였다. 또한 전체 압력 강하는 건전한 집합체와 같다. 따라서 6 개 부수로 폐쇄 사고에서는 4 %, 24 개 부수로 폐쇄 사고에서는 6 %, 54 개 부수로 폐쇄 사고에서는 11 % 정도의 유량 감소가 예상되었다.

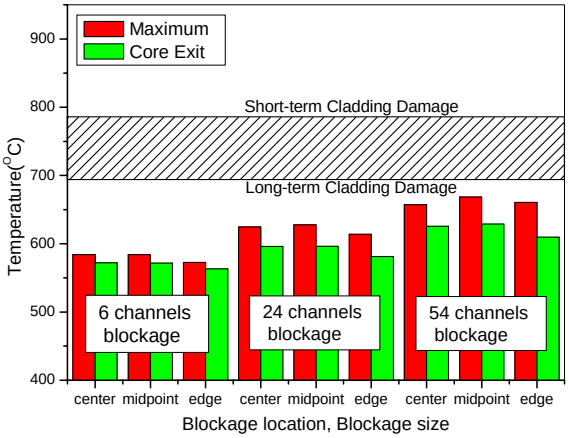


그림 7. 유로 폐쇄 위치/크기에 따른 집합체 내부 냉각재의 최대 및 출구 온도

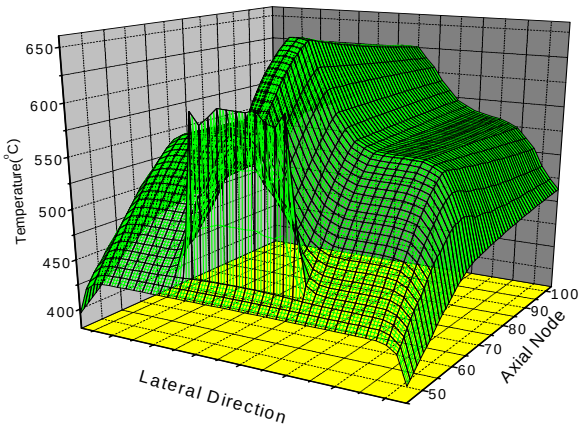


그림 8. 54 개 부수로 폐쇄 사고시 집합체 내부의 온도 분포

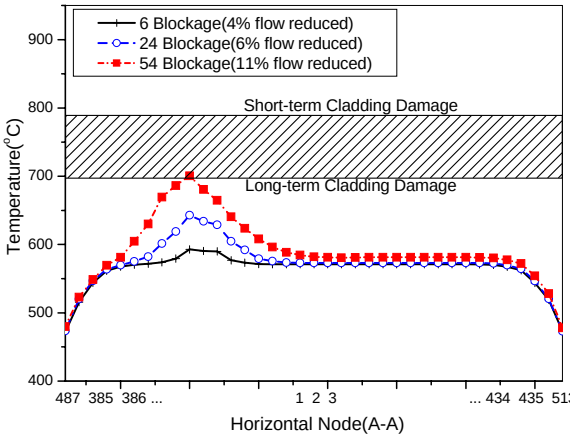


그림 9. 부수로 폐쇄 사고시 유량 감소에 따른 냉각재 온도 거동

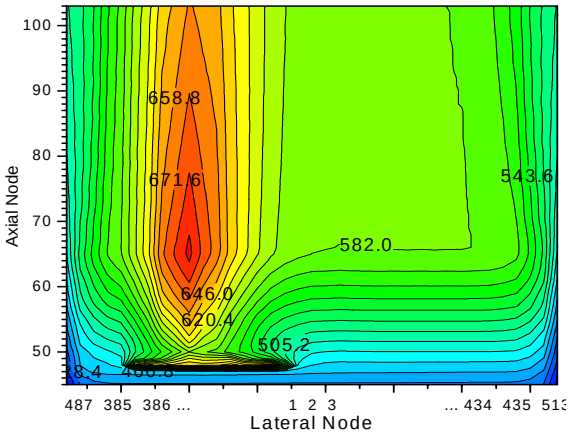


그림 10. 54 개 부수로 폐쇄 사고시 냉각재 온도 분포(유량 감소)

그림 9 는 3 개의 경우에 대한 계산 결과 중 그림 1 의 A-A 단면에서 본 온도 거동을 보이며, 그림 10 은 54 개 부수로가 폐쇄되었을 경우에 대한 집합체 내부 전체의 온도 분포를 나타낸다. 그림에서 보듯이 6 개 및 24 개 부수로 폐쇄 사고들에서는 유량 감소로 인해 약간의 온도 상승을 초래하지만, 피복재의 건전성을 위협할 정도는 되지 않는다. 그러나 54 개 부수로 폐쇄 사고에서는 150 번 부수로에서 축 방향으로 65 번째 노드에서 705.9 ℃ 의 온도가 예측되었다. 이 온도는 장기적인 피복재의 건전성을 충분히 위협하는 온도이며, 유량 감소를 고려하지 않았을 경우에 비해 약 38 ℃ 정도 높게 계산된다. 따라서 대규모의 유로 폐쇄 사고에서는 유량 감소를 반드시 고려해서 안전해석이 수행되어야 하며, 이러한 사고의 검출 또한 매우 중요하다.

## 6. 결론

액금로 집합체 사고 중에서 국부적인 유로폐쇄로 인한 핵연료 손상이 노심 전체로 전파되면 원자로 안전에 심각한 영향을 미칠 수 있으므로 유로폐쇄사고는 집합체 안전성 평가에서 반드시 고려된다. 설계기준사고로서 6 개 부수로 폐쇄 사고에 대해 폐쇄 위치별로 안전성을 평가하였으며, 설계기준 초과 사고로서 24 개 및 54 개 부수로 폐쇄사고를 해석하였다. 또한 부수로 폐쇄 사고로 인한 유량 감소를 고려한 민감도 분석이 수행되었으며, 분석 코드는 현재 연구소에서 개발한 MATRA-LMR 을 사용하였다. 설계기준사고의 분석 결과, 최대온도는 부수로 폐쇄가 집합체 중심과 벽면 사이에 발생하는 경우이며, 이때의 최대온도는 584.33 ℃ 로서 소듐의 비등온도인 약 1000 ℃ 에 비해 약 400 ℃ 의 여유가 있어 집합체 안전성에는 문제가 없다. 또한 24 개 부수로 폐쇄 사고에서 집합체 중간에서 부수로 폐쇄가 발생할 경우에 집합체 내부의 냉각재 최대 온도는 627.7 ℃ 로서 6 개 부수로 폐쇄 사고보다 약 43 ℃ 정도 높은 것으로 나타났다. 반면에, 54 개 부수로 폐쇄 사고에서 부수로 폐쇄로 인한 유량 감소의 경우에는 최대 온도가 706 ℃로 예측되어 장기 피복재 온도 기준을 만족하지 못하는 것으로 분석되었다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구.개발사업의 일환으로 수행되었다.

## 7. 참고 문헌

[1] 권영민, “KALIMER의 국부집합체 손상사고 분석”, KAERI/TR-1659/2000 (2000)

[2] 한도희, “ KALIMER 개념설계 보고서 ”, KAERI/TR-2204/2002

[3] K. S. Ha et. al.,” Wire-wrap Models for Subchannel Blockage Analysis”, to be published at Journal of KNS Vol. 36, (2004)