

## 와이어-랩 핵연료다발 집합체의 유로폐쇄사고시 열유동 특성

### Thermal-hydraulic Characteristics of Local Blockage within a Wire-Wrapped Pin-Bundle Subassembly for KALIMER

권영민, 이용범, 한도희  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요약

액체금속로에서 집합체 내부의 국부유로폐쇄사고는 피복재와 핵연료의 대규모 용융의 원인이 되어 가상적인 노심용융 사고의 기인사고로 취급된다. 본 연구에서는 Wire-wrapped 핵연료 다발 집합체 내부에서 유로폐쇄가 발생하는 경우 열유동 특성을 조사하였다. KALIMER의 최대출력 핵연료 집합체에 대해 SABRE 전산코드를 사용하여 계산을 수행하였다. 냉각재 침투온도의 크기와 위치와 더불어 유로폐쇄 감지 가능성을 평가하기 위해 집합체 출구에서의 온도분포 특성을 조사하였다. 해석결과 KALIMER의 설계기준사고인 6 부수로 유로폐쇄사고시 소듐 비등은 발생하지 않았으나 집합체 출구에서의 평균 온도변화는 크지 않았다.

#### Abstract

Local blockage within a wire-wrapped assembly in the Liquid Metal Reactor may cause extensive clad and fuel melting and are thus regarded as a potential whole core accident initiator. The thermal-hydraulic characteristics for the local blockage within a wire-wrapped pin-bundle subassembly are investigated in this paper. The driver fuel subassembly of KALIMER core was analyzed using the SABRE computer code. The magnitude and location of the peak temperatures together with the temperature distribution at subassembly exit were investigated in order to look at the potential for damage within the subassembly, and the possibility of blockage detection. The calculated peak temperature for the 6-subchannel blockage (design bases event) was much below the sodium boiling temperature and no significant difference in the mixed mean temperature was calculated at the subassembly exit.

#### 1. 서론

액체금속로의 노심은 핵연료 및 비핵연료 집합체로 구성되어 있으며 각 핵연료집합체는 얇은 육각형 관 내부에 가늘고 긴 원기둥 모양의 핵연료봉 다발이 들어있다. 소듐 냉각재는 핵연료집합체 하부에서 관 내부로 유입하여 핵연료봉 사이의 유로채널을 따라 유동하면서 핵연료에서 생성되는 열을 이송한다. 핵연료봉은 내부가 핵연료 슬러그(slug)로 채워져 있으며 외부는 HT9 재질의 얇은 피복관(clad)으로 둘러 쌓여 있다. 집합체 내에서 인접한 핵연료봉과는 공간지지대(spacer)를 통하여 일정거리를 유지한

다. 공간지지대는 각 핵연료봉을 헬리컬 모양으로 감아 올라가는 나선으로 이루어진 wire-wrap 형태와, 핵연료봉 다발의 축방향으로 일정거리 마다 격자모양의 구조물을 설치하는 grid 형태가 있다. 핵연료봉 다발 내의 유량 및 온도 분포의 계산은 횡방향 유동이 없는 경우는 비교적 단순하지만 일반적인 경우에는 복잡한 3차원 유동해석이 필요하다.

집합체 내부에서 국부적으로 유로가 막히는 현상이 유로폐쇄 (flow blockage)이다. 액체금속로에서 사용되는 핵연료집합체는 내부의 핵연료봉 다발이 매우 조밀하게 설치되어 있으므로 외부물질에 의해 국부적으로 유로가 막힐 가능성이 높으며, 또한 핵연료봉의 출력밀도가 일반적으로 높으므로 유로폐쇄가 발생하여 열이 제거되지 못하면 핵연료봉이 손상될 가능성이 높다. 1966년 Fermi 원자로에서 파손된 지르코늄 박편이 노심 입구에 유입하여 발생한 국부유로폐쇄가 핵연료를 손상시켰으며 더 위험한 사고로 진전될 가능성이 있었다. 이후 액체금속로의 노심설계가 개선되어서 일차냉각계통 내의 잔류물이 노심으로 유입되는 사고는 구조적으로 어렵게 되었다.

집합체 내부에서 국부적으로 유로폐쇄가 발생하면 그 부근에서의 냉각재 온도가 상승하게 되고, 그 결과 소듐 비등이 일어나거나 피복재 건전성이 위협을 받는다. 유로폐쇄 해석의 목적은 안전성 관점에서 최대 허용손상도를 결정하고 과도사고시 이 허용안전기준 한계를 초과하지 않음을 정량적으로 보여주기 위함이다. 집합체 유로폐쇄 해석의 주요변수는 집합체 내부에서 발생하는 최고온도이며 그 위치는 유로폐쇄지역 근처나 또는 재순환 후류영역 내에 발생할 수 있다. 집합체 내부에서 유로폐쇄로 인해 국부적으로 높은 온도가 유지되면서 외부에서는 유로폐쇄를 감지하지 못한다면 위험이 증가될 수 있다. 유로폐쇄로 인해 집합체 유량이 크게 감소하지 않으면 집합체 출구에서의 평균온도는 크게 변하지 않는다. 따라서 어떤 조건에서의 유로폐쇄가 집합체 안전성에 영향을 미치며, 이때 위험도가 증가되기 전에 사고를 감지할 수 있는 열수력적 변수를 찾는 것이 중요하다. 원자로 감시계통은 유로폐쇄 사고결과가 안전허용기준에 도달하기 전에 사고를 감지하여 원자로를 비상정지 시키도록 설계되어야 한다. 특히 일반적으로 집합체 출구에 열전대가 설치되어 있으므로 냉각재 출구온도는 중요한 변수가 된다. 따라서 집합체의 설계 및 안전성 평가의 일환으로 유로폐쇄 열유동 현상을 분석할 필요가 있다.

## 2. KALIMER 유로폐쇄 설계기준사고 해석

KALIMER 집합체 유로폐쇄사고는 설계기준사고 (DBE)와 초과설계기준사고 (BDBE)의 두 범주로 크게 구분되며 설계관점에서 접근방법을 달리한다. KALIMER의 일반 사고분류는 초기사건의 발생확률에 따라 네 가지 범주로 구분되고 있다. 원칙적으로 발생 가능한 모든 집합체 사고의 발생원인을 파악하여 각각의 사고발생 확률을 PSA를 통하여 결정하여야 한다. 그러나 KALIMER 설계를 위해 PSA가 수행되지 않았으므로 대표적인 해외 액금로의 사고분류 기준을 참고로 하여 다음과 같이 각 범주에 해당하는 대표사고를 선정하였다 [1].

- (a) Infrequent Event (IE): ( $> 10^{-2}$  /RY): 핵연료봉 손상
- (b) Unlikely Event (UE): ( $> 10^{-4}$  /RY): 집합체 내부의 핵연료 번들간의 유로폐쇄사고
- (c) Extremely Unlikely Event (XE): ( $> 10^{-7}$  /RY): 대규모 집합체 외부 유로폐쇄사고

KALIMER 집합체 유로폐쇄사고로 고려되는 설계기준사고는 집합체 내부에서 국부적으로 6개의 부수로가 같은 높이에서 완전히 막히는 사고로 정의하였다. 이러한 설정은 KALIMER와 같은 wire-wrapped 핵연료를 사용하는 EFR 설계의 경우와 같다. 외국의 유로폐쇄 발생기구에 대한 실험연구에 [2] 의하면 핵연료봉 지지를 위해 wire-wrap을 사용하는 집합체에서는 wire-wrap의 구조적 특성상 6개의 부수로가 동시에 같은 높이에서 완전히 막히는 경우는 매우 희박하다고 알려져 있다. 노심 냉각유로 및 집합체 설계를 통하여 외부의 이물질이 노심이나 집합체 입구로 유입하기 곤란하도록 하였지만 핵연료 자체 손상으로 인하여 핵연료 물질이 누출되어 집합체 부수로를 폐쇄하는 경우는 근본적으로

배제할 수 없다. 그러나 대규모의 핵연료봉 손상을 제외하고는 wire-wrap의 구조상 유로폐쇄 영역은 같은 높이에서 반경방향으로 증가하여 인접한 부수로까지 폐쇄시킬 수 없으며, 더욱이 부수로의 유로는 완전히 막히지 않고 일정한 공극율을 가지므로 냉각수가 틈 사이로 흐를 수 있다. 그러나 KALIMER 설계에서는 보수적인 관점에서 인접한 6개의 부수로가 완전히 막히는 사고를 설계기준사고로 채택하였다.

설계기준사고에서는 원자로 감시계통과 같은 보호계통의 운전을 고려하여 기 설정된 각 범주의 안전 허용기준을 적용한다. 만약 UE범주에 속하는 사고라면 사고 해석결과에의 영향은 UE의 안전허용기준을 초과하여서는 안 된다. KALIMER 개념설계의 예비 안전허용기준 [1]에 의하면, 정상운전과 설계기준 과도사고 시 안전허용기준은 다음과 같다: (1) 핵연료봉 손상 금지 (2) 소듐 냉각재 비등 금지 (노심 내 기포생성 금지) (3) 원자로 구조물의 건전성 확보. 핵연료 집합체의 안전목표는 손상된 집합체의 냉각을 유지시키는 것이다. 논리적으로 과도한 피복재 손상만 피할 수 있다면 집합체의 냉각성은 유지된다고 볼 수 있다. 집합체 유로폐쇄사고 시 안전허용기준은 유로폐쇄사고를 감지하여 원자로를 자동정지시킬 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 비등온도 아래로 유지되어야 한다.

본 연구에서는 KALIMER breakeven 노심설계에서 6 부수로가 폐쇄되는 설계기준사고에 대해 안전성을 평가하였으며 24 및 54개의 부수로가 폐쇄되는 경우에도 안전여유도를 평가하기 위해 해석을 수행하였다. 한편 6개 부수로의 유로폐쇄 위치 및 크기에 따른 민감도해석을 수행하여 혹시 존재할지 모를 집합체 설계의 취약성을 점검하였다.

### 3. SABRE4 전산코드

SABRE4 (Subchannel Analysis of Blockage in Reactor Elements) [3]는 액체금속로 집합체내 열수력 계산을 위한 3 차원 부수로 해석 코드이다. 이 코드는 자연순환 유로의 장애물로 발생하는 재순환 후류를 계산하는 방법론을 갖춤으로써 집합체 내부 flow blockage 영향을 계산하는 목적으로 개발되었다. SABRE4 코드는 정상 및 과도 상태, 단상 및 비등에 의한 이상 유체, grid 및 wire-wrap 형태의 핵연료 공간지시대, 다수의 blockage, pin 휨 현상과 같은 유량 및 기하형상의 변화를 포함하는 경우에 대해 계산이 가능하다. 과도상태는 시간에 대해 semi-implicit 또는 fully implicit 해법을 이용해 계산하고 냉각재의 속도 및 온도뿐 아니라 핵연료봉 내의 온도분포 계산도 가능하다.

KALIMER 집합체의 기하학적 모양은 그림 1과 같은 규칙적인 삼각형 격자이다. 주노드 (i, j, k)는 세 개의 인접한 봉 표면적과 그들의 중심을 연결하는 선으로 정의되는 부수로의 중심에 해당된다. 이때 i와 j 는 집합체의 횡단면을, k는 축방향을 나타낸다. 정상적인 핵연료봉의 중심들은 균일한 삼각형 모양을 가지지만, 실제 핵연료봉은 휨(bowing)과 같은 영향을 받을 수 있으므로 그 중심선이 정상적인 위치로부터 벗어날 수 있다. SABRE4의 주요 계산 변수들은 3방향의 유속성분인 u, v, w와 정압 p, 에너지 I 등이다. SABRE4는 속도를 계산하기 위해 엇격자 (staggered mesh) 시스템을 가지며 속도성분은 주 제어체적면에 수직하는 방향을 가진다. 축방향 속도의 제어체적은 부수로의 일부로서 두 인접한 주노드의 축방향 중간을 경계면으로 한다. 횡방향속도(transverse velocity)는 v와 u이고 u는 좌표축에 평행하지 않고 축에서 ±30°의 방향을 가진다. 속도 v는 삼각형 배열의 특성 때문에 모든 j 노드에서 정의되지 않고 한 칸씩 건너뛰는 격자에서 정의된다.

SABRE4의 기본적인 열수력 방정식은 다음과 같다.

(1) 연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho = -\nabla \cdot \rho \mathbf{u}$$

여기서  $\rho$ 는 밀도,  $u$ 는 속도,  $t$ 는 시간을 나타낸다.

(2) 운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u^r = -\nabla g \rho u^r + \nabla g_t \nabla u^r - \nabla p + R$$

여기서  $\mu$ 는 점도,  $p$ 는 압력,  $R$ 은 모멘텀원 (drag나 중력에 의한 저항)이다.

(3) 에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho I = -\nabla g \rho I + \nabla g \Gamma \nabla I - \rho \nabla g I + S$$

여기서  $I$ 는 내부 에너지,  $\Gamma$ 는 열확산계수 ( $=k/C_p$ ),  $S$ 는 열원이다.

(4) 상태방정식

$$\rho = \rho(I, p)$$

여기서, 점성, 열전도, 난류등에 대한 영향은 확산항인  $\mu \nabla^2 u$ ,  $\Gamma \nabla^2 I$ 에 의해서 고려된다. 이때  $\mu$ 는 유효점도,  $\Gamma$ 는 유효열전달계수,  $R$ 과  $S$ 는 각각 외부 체력 (body forces) 그리고 열원 (heat source)을 각각 나타낸다.

SABRE4는 소동 냉각재의 균질비등 (homogeneous boiling)을 가정하고 두 상간의 미끄럼 (slip) 현상에 대한 가능성을 고려하여 이상유동을 계산한다. 일반적인 입구 경계조건으로 압력, 속도, 전체유량을 사용하며 이들 조건은 시간에 따라서 선형적인 다른 값을 가질 수 있다. 출구 경계조건으로는 일정한 압력을 이용한다. 핵연료간의 공간지지물이 grid인 경우는 grid의 입구와 출구에서 비가역적인 수두손실로써 모델링 하며, wire-wrap인 경우는 wire 방향과 이에 수직하는 방향을 축으로 하는 grid resistance tensor 개념을 도입하여 선회류의 영향을 만족할만한 수준으로 모델링 가능하다. SABRE4 계산에서 난류 모델링은 매우 중요하게 다루어지며 난류원 (turbulent source) 데이터를 얻기 위해 상세한 격자를 가진 곡선좌표계에서의 계산이 가능한 CFD 전산코드의 해석결과를 이용한다.

SABRE코드의 주목적은 안전해석을 위하여 비정형의 기하구조에서 유동장 해석을 수행하는 것이다. 정상운전 상태에서 냉각재 유동은 핵연료봉의 축 방향이지만 대부분의 조건에서는 강한 횡방향 유동이나 재순환 유동이 존재한다. 횡방향 유동을 포함하는 일반적인 유동장에서의 수력학적인 방정식의 해를 구하는 기법으로 Imperial Collage와 London에서 개발한 SIMPLE 기법과 Los Alamos에서 개발한 MAC과 ICE 기법들이 SABRE 코드에 도입되어 핵연료 집합체의 부수로 해석에 적용되었다.

공간적으로 이산화된 열수력방정식을 수치적으로 푸는 과정에서 주된 문제는 대류항을 취급하는데 있어서 정확성과 안정성을 유지하는 것이다. 초기 SABRE4 코드는 혼합차분방법을 사용하였다. 즉, 노드의 Reynolds수 (또는 Peclet수)가 2보다 작은 경우에는 중앙차분방법을 사용하고, 2보다 클 경우에는 상류차분방법을 사용한다. SABRE4에서 격자의 크기는 부수로 모양에 따라 정해지므로 재순환 후류영역과 같은 낮은 속도 구역에서조차 실제로 상류차분방법을 사용할 수 있다. 오류확산은 온도를 상당히 낮게 예측하며 특히 재순환 영역에서는 그 영향이 더욱 크다. SABRE4에서 도입한 벡터상류차분방법 (VUDS)은 대류효과가 큰 유선방향에 대해서만 오류확산의 영향을 제한시킴으로써 상류차분방법의 단점을 보완할 수 있다. 벡터상류차분법은 제어체적면에서 유동방향을 고려하여 인접한 주변 노드의 대류관련 변수에 가중치를 줌으로써 제어체적면에서의 값을 보다 효과적으로 결정한다.

## 4.

### 4.1

Fig. 1 KALIMER fuel assembly and

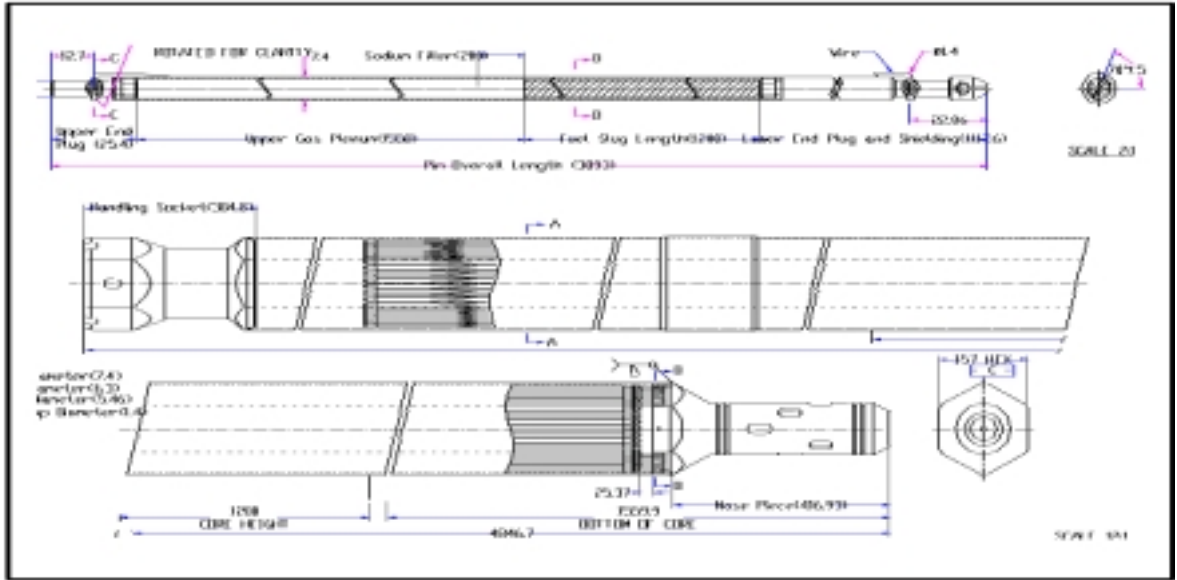


그림 1 KALIMER 핵연료 집합체 및 핵연료봉

KALIMER breakeven 노심설계[4]의 핵연료 집합체에서 6부수로가 폐쇄되는 설계기준사고시 안전성을 평가하였다. 핵연료 집합체의 전체길이는 354 cm 이며 핵연료의 외경과 피치는 각각 0.745 cm, 0.895 cm 이다. 집합체 내부에는 271개의 핵연료봉이 있으며 각 핵연료봉 주위는 직경 0.141 cm의 wire-wrap 이 피치 20.62 cm의 나선형 모양으로 감고있다. 핵연료와 피복관의 재질은 각각 U-Pu-10%Zr와 HT9이다. 단일 핵연료 집합체에서 생성되는 총 열량은 22.55 KW이며, 집합체의 입구 경계조건으로 집합체 전체 유량은 27.2 kg/sec, 냉각재 소듐온도는 386.2 °C를 사용하였으며 출구 경계조건으로는 일정 압력인 0.17578 MPa을 사용하였다. 참고로 SABRE4가 계산한 집합체 입구의 압력은 0.329 MPa이며 집합체의 유량면적은 77.76 cm<sup>2</sup> 이다. 핵연료가 장전된 부분의 길이는 105 cm이며 정확한 축방향 출력분포를 계산에 사용하였다. 이때 핵연료가 장전된 부분의 평균 선출력은 257.1 Watt/cm 이다. 그림 1은 KALIMER 노심에 장전되는 핵연료 집합체 및 핵연료봉의 개략도이며 그림 2는 wire-wrap 핵연료봉 변들에서 wire-wrap의 위치에 따라 변화되는 부수로의 모양을 나타낸 것이다.

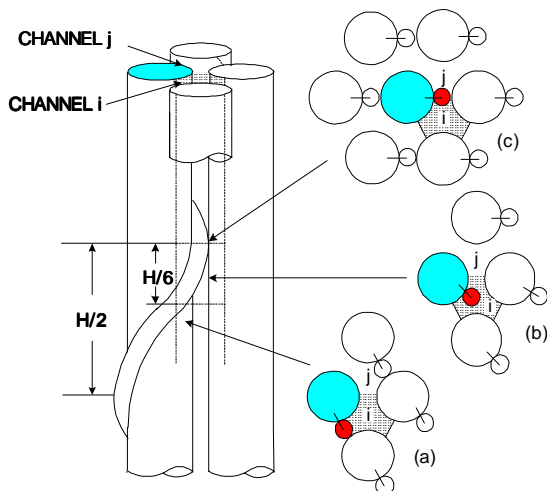


그림 2 Wire-wrapped 핵연료봉 변들

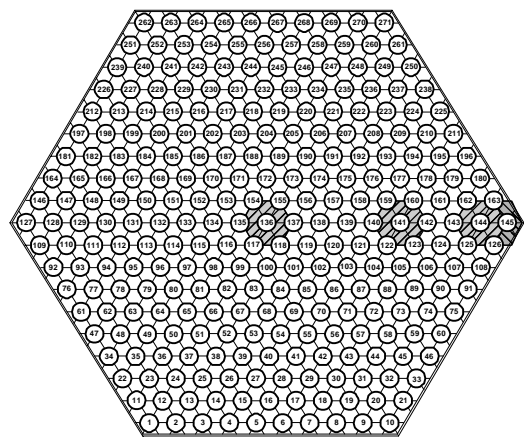


그림 3 SABRE4 해석을 위한 집합체 번호체계 및 유로폐쇄 위치

SABRE4 해석을 위해 핵연료 집합체를  $I = 40, j = 21, k = 103$ 의 노드로 세분하였다. 집합체 축방향의 한 노드의 길이는 wire-wrap 피치의 1/6에 해당하는 3.44 cm로 선정하였다. 집합체 내부에 위치하는 부수로 하나의 유효면적은  $0.121 \text{ cm}^2$  이며 이에 해당하는 입구유량은  $0.0458 \text{ kg/s}$  이다. 집합체의  $i-j$  단면은 그림 3과 같이 271개의 핀과 600개의 부수로로 구성된다. 핵연료봉의 wire-wrap에 의해 집합체 외곽과 벽면의 간극에서 큰 규모로 형성되는 선회류의 영향을 고려하기 위해서는 전체 집합체를 계산영역에 포함하여야 한다. 6개 부수로의 폐쇄위치는 그림 3과 같이 집합체의 중심, 집합체 중심과 벽면간의 중간, 벽면에 인접한 경우, 벽면에 접촉한 경우의 4가지이며, 각 경우에 대해 폐쇄깊이를 wire-wrap 피치의 1/6배로 하여 계산을 수행하였다.

핵연료가 장전된 부분의 노드는  $k = 33$ 에서  $k = 63$  까지며 출력분포가 최대인 위치는  $k = 47$  노드이다. 따라서 유효폐쇄는  $k = 47$ 을 기준으로 전후에서 발생하는 것으로 가정하였다. 그림 4는 유효폐쇄가 없는 정상상태 경우의  $j = 12$  위치에서  $i-k$  단면의 온도분포를 나타낸다. 집합체 입구온도는  $386.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 이며 SABRE4로 계산한 출구온도는 약  $590.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 로서  $204.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 가 증가하는 것으로 예측되었다. 온도구배가 핵연료 장전 부분에서 크게 나타나고 있으며 집합체 외곽노드에서는 wire-wrap에 의한 선회류 영향으로 인해 주변보다 낮은 온도를 예측하고 있다. 선회류의 영향은  $y$ 축 눈금이 확대된 그림 5에서 보다 자세히 나타나고 있다. Wire-wrap의 한 피치는 축방향의 6노드와 같으므로  $k$ 의 값이 6 증가할 때마다 벽면에서 선회류의 영향이

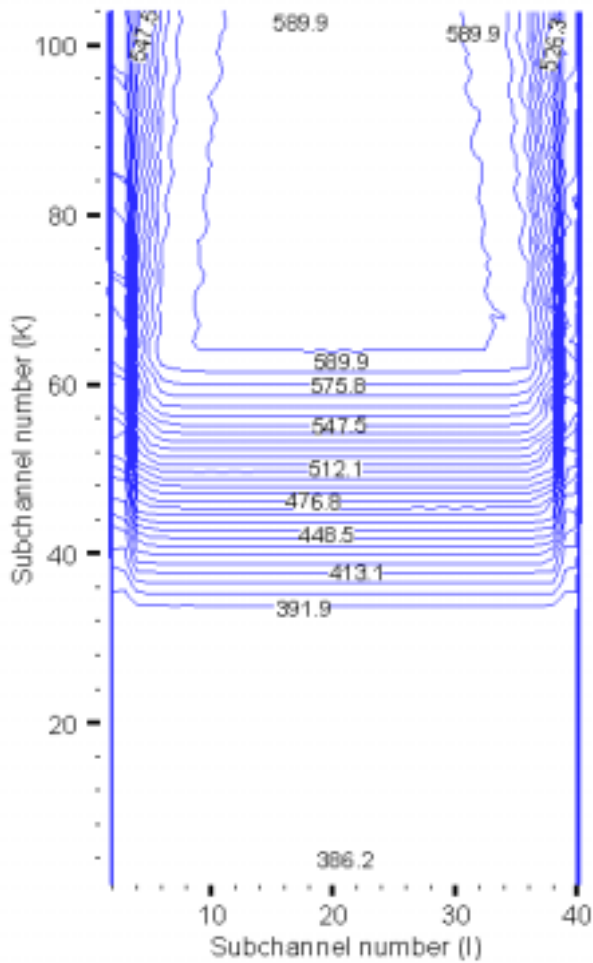


그림 4 유효폐쇄가 없는 경우의 온도분포 (J=12위치에서 i-k 단면)

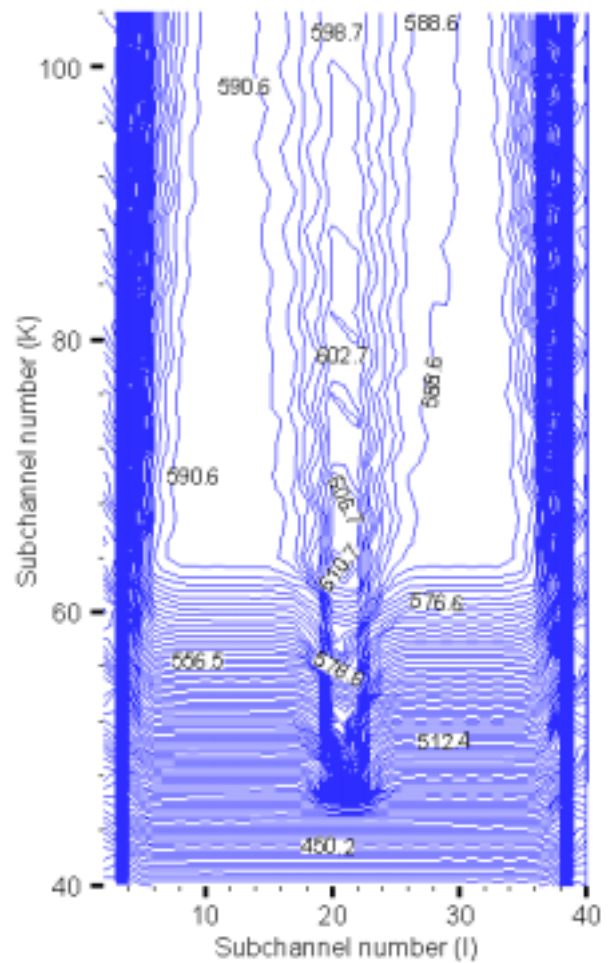


그림 5 집합체 중심 유효폐쇄시 온도분포 (J=12위치에서 i-k 단면)

나타난다. 그림 8은 정상상태시 집합체 출구에서의 온도분포이다. 그림 4 ~ 7에 나타난 온도값은 SABRE4가 계산한 온도 데이터를 사용하여 TECPLOT 소프트웨어가 매끈한 그래프를 그리기 위해 위치에 따라 내삽한 값이므로 SABRE4의 실제 계산값은 아니다.

집합체 중심에 유로폐쇄가 발생하는 경우 SABRE4는 최대온도를 (i, j, k)가 (22, 12, 62)인 위치에서 606.7 °C로 계산하였고, 집합체 출구의 최대온도는 (20, 12, 104) 위치에서 598.2 °C로 계산하였다. 유로폐쇄가 없는 경우에 비해 최대온도는 16.4 °C, 출구온도는 7.9 °C 증가하였으며 온도 증가율은 각각 2.8%, 1.3%에 해당한다. 이 경우의 집합체 출구 온도분포는 그림 9와 같으며 정상상태시의 온도분포인 그림 8에 비해 집합체 중심부분에 고온영역이 추가로 나타나고 있다. 집합체 중간에 유로폐쇄가 발생하는 경우는 최대온도를 (31, 12, 63)인 위치에서 611.7 °C로 계산하였고, 집합체 출구의 최대온도는 (30, 12, 104) 위치에서 598.6 °C로 계산하였다. 유로폐쇄가 없는 경우에 비해 최대온도는 21.4 °C, 출구온도는 8.3 °C 증가하였으며 온도 증가율은 각각 3.6%, 1.4%에 해당한다. 집합체 벽면에 인접한 유로폐쇄가 발생하는 경우는 최대온도를 (36, 12, 63)인 위치에서 602.4 °C로 계산하였고, 집합체 출구의 최대온도는 (31, 11, 104) 위치에서 590.0 °C로 계산하였다. 유로폐쇄가 없는 경우에 비해 최대온도는 12.1 °C로 온도 증가율은 2.0%에 해당한다. 그러나 집합체출구 최대온도는 오히려 0.3 °C 낮게 예측하였다. 집합체 벽면에 접촉하여 유로폐쇄가 발생하는 경우는 wire-wrap에 의한 선회류 영향으로 인해 최대온도는 유로폐쇄지역 하류에 나타나지 않고 집합체 출구인 (18, 12, 104)에서 589.76 °C로 계산하였다. 유로폐쇄가 없는 경우에 비해 최대온도는 0.54 °C 낮게 예측하였다.

이상의 계산결과를 분석하면 집합체 내부의 최대온도 변화율은 유로폐쇄의 발생위치가 변할지라도 4% 이내로 계산되어 발생위치에 민감하지 않음을 알 수 있다. 최대온도는 유로폐쇄가 집합체 중간, 즉 집합체 중심과 벽면 사이에 발생하는 경우이며 이때의 최대온도는 611.7 °C로서 소듐의 비등온도인 약 1000 °C에 비해 약 400 °C의 여유가 있어 집합체 안전성에는 문제가 없다. 한편 이 경우 집합체 출구온도는 유로폐쇄가 없는 경우에 비해 단지 8.3 °C 증가하기 때문에 계기의 오차범위를 고려한다면 집합체 출구에 설치한 열전대로서 유로폐쇄 발생여부를 판단하기는 불가능하다. 유로폐쇄가 집합체 벽면근처에 발생하면 집합체 외곽에 형성되는 대규모의 선회류 영향으로 유로폐쇄 부분의 하류에 후류영역이 안정적으로 형성되지 못할 뿐 아니라 예측되는 최대온도도 다른 유로폐쇄 위치에 비해 낮게 계산된다.

## 4.2 민감도 해석

집합체 내부 유로폐쇄사고 결과에 영향을 미치는 변수 중 유로폐쇄의 형상과 관련된 민감도 해석을 수행하였다. 특히 폐쇄위치와 폐쇄크기에 대한 영향을 조사하였다. 폐쇄위치는 반경방향으로 집합체 중심이나 또는 집합체 벽면 근처에 위치할 수 있으며 축방향으로도 임의의 위치에 존재할 수 있다. KALIMER 핵연료의 축방향 출력분포에 따르면 최대출력은  $k = 47$  노드에서 발생하므로 유로폐쇄의 축방향 위치는  $k = 47$  부근으로 가정하는 것이 보수적이다. 폐쇄크기는 반경방향의 넓이와 축방향의 두께로 표시될 수 있다. 폐쇄넓이는 한 개의 핵연료봉을 중심으로 인접한 첫 열에 포함된 6 부수로, 첫열부터 둘째열까지의 24 부수로, 첫열부터 세째열까지의 54 부수로의 유로가 각각 폐쇄되는 경우에 대한 계산을 수행하였다. 폐쇄두께에 대한 영향은 6 부수로와 24 부수로 유로폐쇄의 경우에 대해 폐쇄두께가 wire-wrap 피치길이의 1/6, 3/6, 6/6, 12/6, 18/6, 24/6에 해당하는 경우를 계산하였다. 폐쇄영역의 냉각재 투과율은 보수적인 관점에서 0으로 가정함으로써 냉각재가 유로폐쇄 영역을 전혀 통과하지 못하게 하였다.

6 부수로가 폐쇄되는 경우의 유로폐쇄 위치에 대한 냉각재 온도 결과는 그림 5 ~ 7에서 이미 비교한바가 있다. 24 부수로 및 54 부수로의 유로폐쇄사고 경우에도 같은 위치에서 계산을 수행하였으며 각 경우의 집합체의 냉각재 최대온도와 출구온도를 그림 10에 함께 비교하였다. 그림 10과 11은 폐쇄두께가 wire-wrap

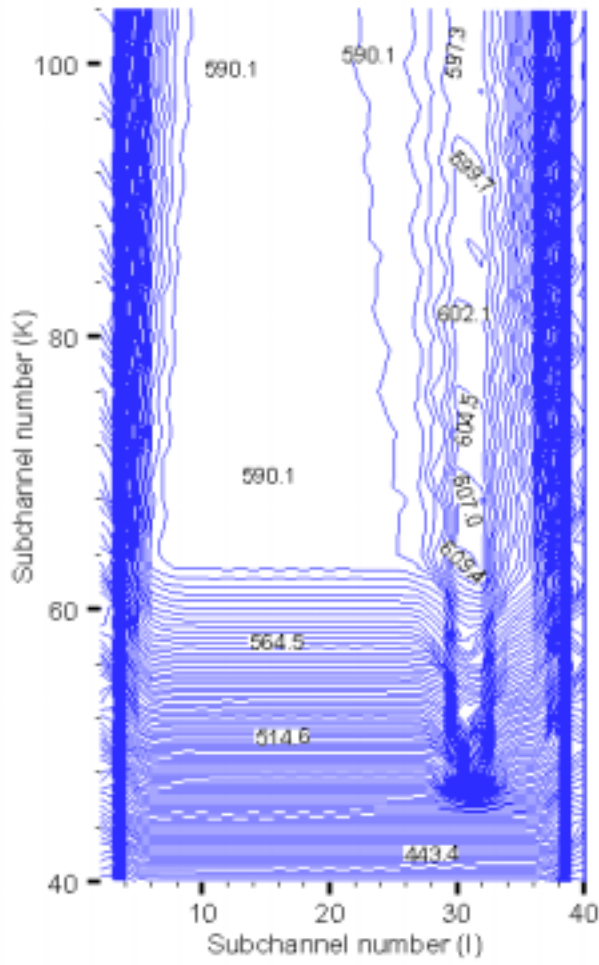


그림 6 집합체 중간 유로폐쇄시 온도분포 (J=12위치에서 i-k 단면)

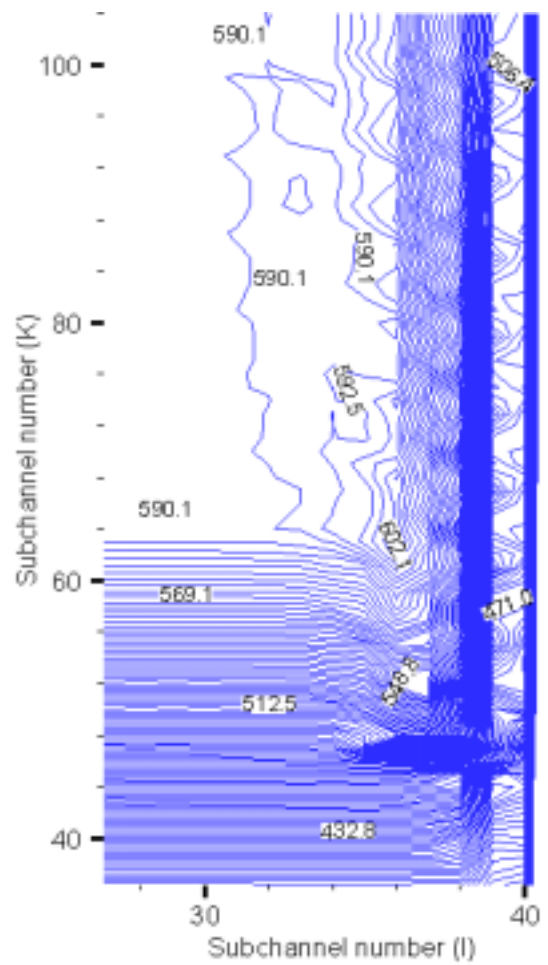


그림 7 집합체벽면 인접 유로폐쇄시 온도분포 (J=12위치에서 i-k 단면)

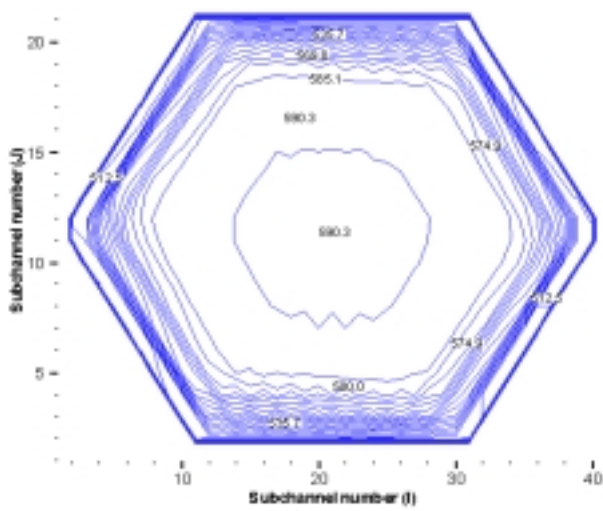


그림 8 정상상태시 출구 온도분포

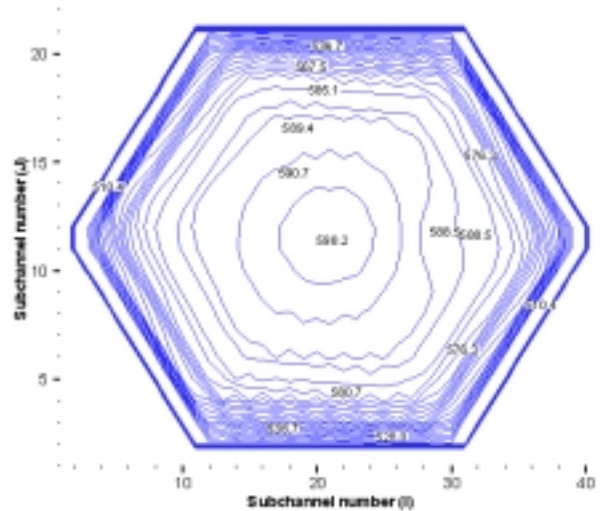


그림 9 집합체 중심 유로폐쇄시 출구 온도분포



피치의 1/6과 1인 경우의 계산결과이다. 그림에서 가로축에 표시된 center는 집합체 중심을 의미하며, midpoint는 집합체 중간, edgeA는 집합체 벽면근처, edgeB는 집합체 벽면과 접촉한 유로폐쇄 위치를 의미한다. 예상한대로 유로폐쇄의 반경방향 넓이가 증가할수록 집합체 온도는 높게 계산되었으며, 유로폐쇄 위치의 영향은 집합체 중간에서 최대온도와 출구온도 모두 가장 높게 계산되었다. 유로폐쇄가 없는 정상상태의 경우 집합체 중심영역에 비해 집합체 중간영역의 유량이 다소 적게 계산되므로 유로폐쇄 계산에서는 집합체 중간영역의 온도가 중심영역보다 높게 계산된다. 그러나 그 차이는 그림에서 보듯이 매우 작다. 그림 10에서 54 집합체 중심 부수로폐쇄의 경우는 24 부수로폐쇄에 비해 최대온도가 급격히 증가하여 824.0 °C로 계산되었으나 여전히 소듐 비등온도와는 약 176 °C의 여유가 있어 집합체 안전성 기준은 만족한다.

6 부수로와 24 부수로의 유로폐쇄가 집합체 중심 위치에서 발생하는 경우 폐쇄두께가 집합체 최대온도 및 출구온도에 미치는 영향을 그림 12와 13에 나타내었다. 그림에서 별 표시는 유로폐쇄가 없는 상태의 집합체 출구온도이며 이는 동시에 집합체 최대온도를 표시한다. 폐쇄두께가 증가할수록 집합체 냉각재의 최대온도와 출구온도는 증가하는 경향을 보이지만 단순 비례식으로 나타나지는 않는다.

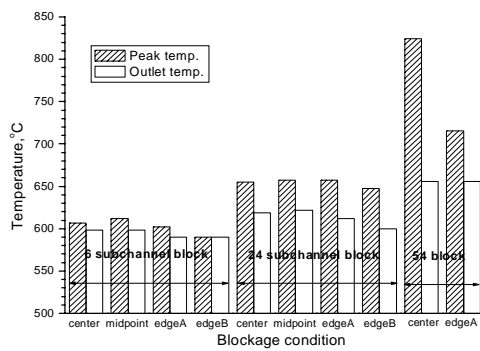


그림 10 유로폐쇄 위치에 따른 집합체 냉각재의 최대 및 출구 온도 (폐쇄두께: 1/6 wire-wrap pitch)

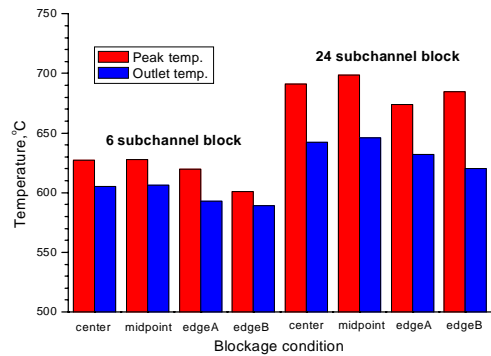


그림 11 유로폐쇄 위치에 따른 집합체 냉각재의 최대 및 출구 온도 (폐쇄두께: 1 wire-wrap pitch)

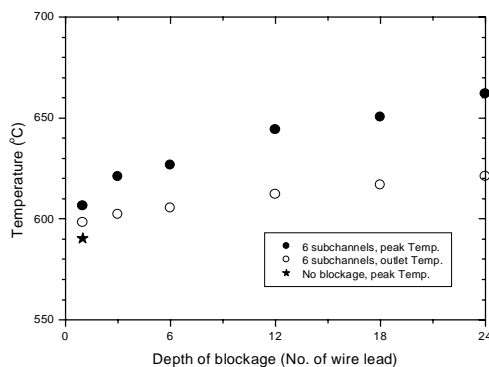


그림 12 6부수로 폐쇄시 폐쇄두께에 따른 집합체 냉각재의 최대 및 출구온도 (폐쇄위치: 집합체 중심)

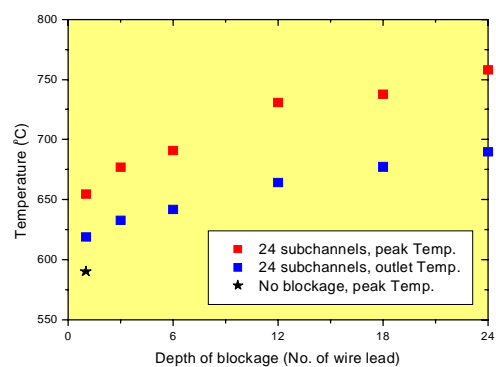


그림 13 24부수로 폐쇄시 폐쇄두께에 따른 집합체 냉각재의 최대 및 출구온도 (폐쇄위치: 집합체 중심)

그림 14와 15는 24 부수로 및 54 부수로가 집합체 중심에서 유로폐쇄되는 경우의 i-k 단면의 온도분포이다. 이들 단면의 j 좌표는 12이며 폐쇄두께는 1/6 wire-wrap 피치이다. 24 부수로 폐쇄의 경우 집합체 냉각재 온도는 핵연료 장전위치의 끝 부분인 k=63에서 최대가 되며 이러한 경향은 6 부수로 폐쇄사고와 동일하다. 그림 14에서 보듯이 냉각재 온도는 유로폐쇄 영역의 하류로 갈수록 높아지다가 k = 63에서 최대값(657.3 °C)을 가지고 이후는 핵연료봉으로부터의 열원이 무시할 정도로 작으므로 집합체 출구(621.6 °C)에 이르기까지 온도는 계속 감소한다. 그러나 54 부수로 유로폐쇄의 경우, 최대온도는 폐쇄위치인 k = 47 노드 다음인 k = 48에서 824.0 °C로 국부적인 첨두값을 가진 후 24 부수로 폐쇄사고와 같은 경향으로 k = 64 노드에서 이차 첨두값인 725.8 °C를 가진다. 최대온도가 발생한 좌표는 (i, j, k)가 (22, 12, 48)인 위치이다. 54 부수로 유로폐쇄사고는 집합체 한가운데의 핵연료봉을 중심으로 하여 반경방향으로 세제 열까지의 부수로를 포함한다. 따라서 유로폐쇄 영역이 넓어져 중앙부분 (i = 22)은 주변으로부터의 냉각재 공급이 부족하여 국부적으로 온도가 급격히 증가하는 현상을 보인다.

그림 16과 17은 폐쇄두께가 1 wire-wrap 피치인 24 부수로 유로폐쇄사고 시 폐쇄위치가 집합체 중심과 집합체 벽면과 접촉한 (edgeB) 경우의 i-k 단면 (j = 12) 온도분포를 나타낸다. 집합체 중심 유로폐쇄는 최대온도가 k = 63 노드에서 691.1 °C로 계산되었으며 집합체 벽면과 접촉한 경우에는 같은 k 위치에서 684.6 °C로 계산되었다. 6 부수로 유로폐쇄 사고에서는 집합체 외곽의 대규모 선회류 영향으로 edgeB 폐쇄위치에

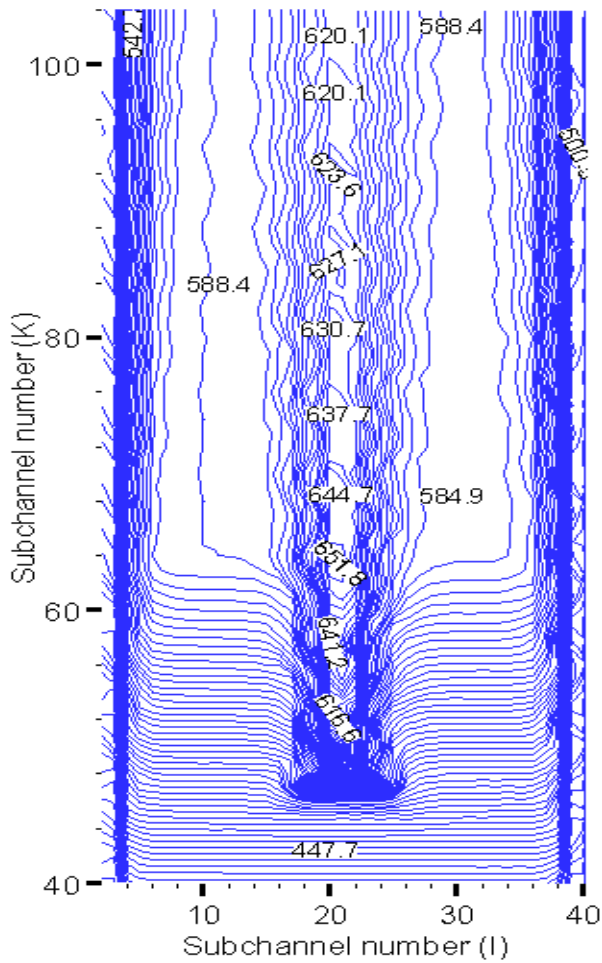


그림 14 집합체 중심 24 부수로 유로폐쇄시 온도분포 (J=12위치에서 i-k 단면)

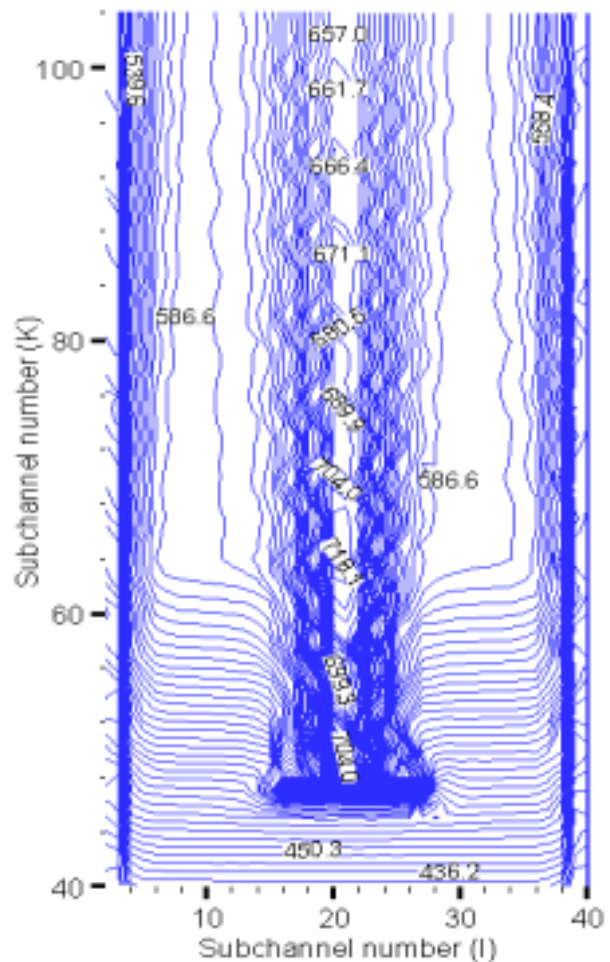


그림 15 집합체 중심 54 부수로 유로폐쇄시 온도분포 (J=12위치에서 i-k 단면)

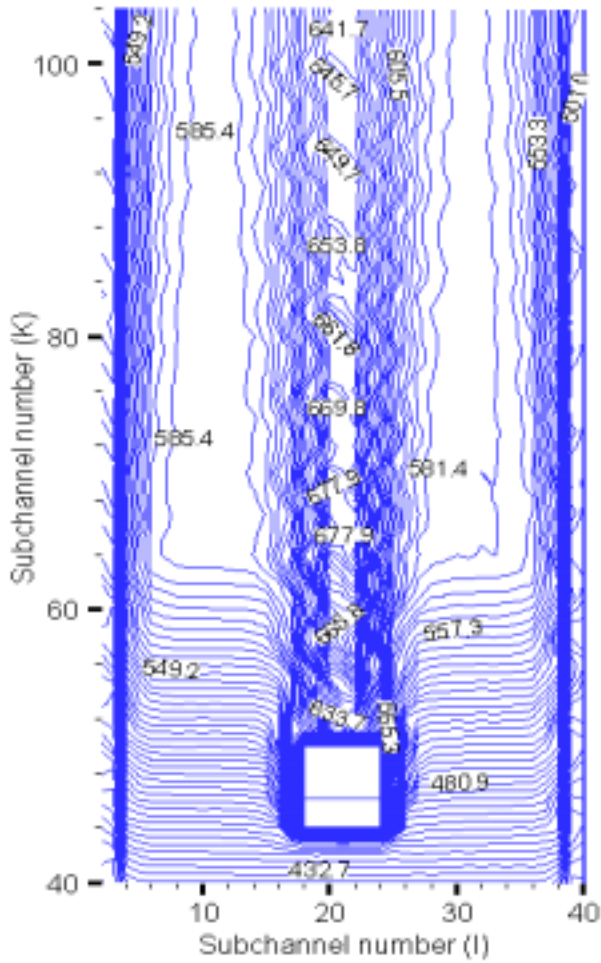


그림 16 집합체 중심 24 부수로 유로폐쇄시 온도분포 (폐쇄두께=6/6 WR 피치)

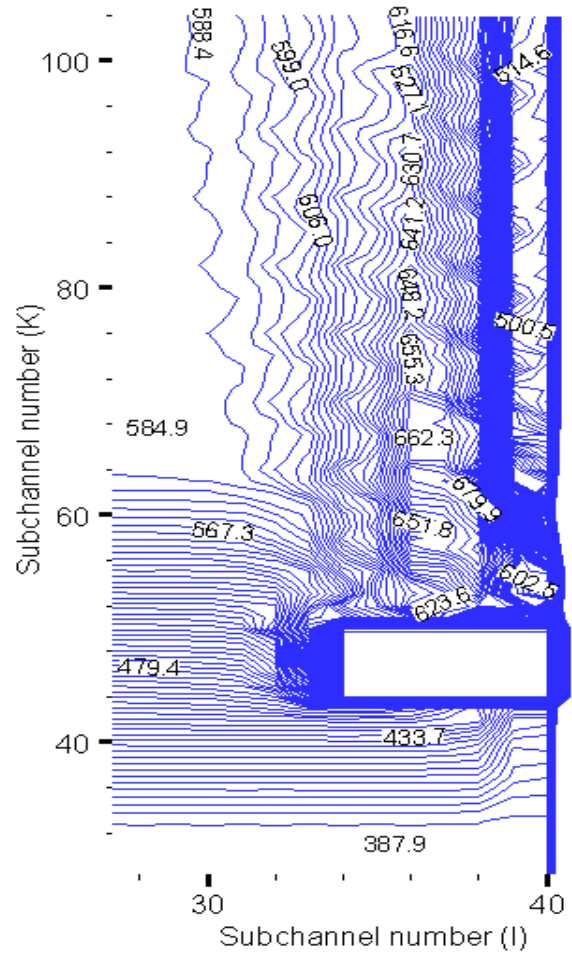


그림 17 집합체벽면 24 부수로 유로폐쇄시 온도분포 (폐쇄두께=6/6 WR 피치)

서는 폐쇄지역 하류에 고온영역이 형성되지 못하여, 결과적으로 edgeA 폐쇄위치의 집합체 최대온도보다 낮게 계산되었다. 그러나 24 부수로와 같이 비교적 큰 규모의 유로폐쇄 경우는 그림 17에서 보듯이 집합체 외곽의 선회류 영향에도 불구하고 유로폐쇄 하류에서 고온지역이 형성되고 있다.

## 5.

집합체 내부의 유로폐쇄사고시 사고결과와 위험도와 사고감지 가능성 측면에서 집합체 내부의 열유동특성을 조사하였다. 설계기준사고인 6부수로 폐쇄사고의 경우 냉각재 소듐의 최고온도는 재순환 후류 영역에서 발생하였으나 소듐 비등온도보다 크게 낮은 온도를 예측하여 충분한 안전 여유도를 나타내었다. 또한 6부수로 유로폐쇄 경우는 집합체 유량이 크게 감소하지 않아서 집합체 출구에서의 평균온도는 열전대가 감지할 만큼 크게 변하지 않았다. Wire-wrap의 영향으로 집합체 외곽에서는 전체적인 선회류가 형성되었으며 이는 주기적인 온도변동의 원인이었다. 유로폐쇄 사고결과는 국부적인 폐쇄위치 및 폐쇄두께에 큰 영향을 받았다.

## 참고문서

1. Y. M. Kwon, Safety Related Design Bases events for KALIMER, KALIMER/SA120-SB-01/1999, Rev.0 (1999).
2. 권영민, 정관성, 한도희, KALIMER의 국부집합체 손상사고 분석, KAERI/TR-1659/2000, 한국원자력 연구소 (2000).
3. G. P. Dobson and J. M. O'Neill, SABRE, User Guide for Version 4, AEA Technology.
4. Y. M. Kwon, Design Data for the Plant Safety Analysis for KALIMER Design, LMR/ SA121-DO-01/2001, Rev.00, KAERI (2001).