

## 3차원 각분할법 코드를 이용한 KALIMER 차폐해석 KALIMER Shielding Analysis Using TORT Code

김종경, 신창호, 김기환  
한양대학교

김영일  
한국원자력연구소

### 요 약

한국원자력연구소에서 개념설계 중인 150MWe급 액체금속로인 KALIMER에 대한 차폐해석을 수행하였다. 속중성자 플루언스( $>0.1$  MeV)와 구조물에서의 DPA(Displacement per Atom)를 계산하였다. 차폐계산은 3차원 각분할법 코드인 TORT 코드를 이용하였으며, 계산에 사용된 핵자료집은 한국원자력연구소에서 생산한 KAFAX-F22 고속로용 라이브러리를 이용하였다. 차폐계산을 위하여 전체 노심 외곽 구조물을 R- $\theta$ -Z 모델링 하였다. 차폐체 설치시 Support Barrel과 Upper Grid Plates에서의 속중성자 조사량은  $4.113 \times 10^{19}$ 과  $7.284 \times 10^{20}$ 으로 각각 계산되었고, DPA는  $1.597 \times 10^{-2}$ 과  $3.315 \times 10^{-1}$ 로 원자력연구소에서 고려하고 있는 설계제한치에 대해 충분한 마진을 가지는 것으로 계산되었다.

### Abstract

A shielding design of the KALIMER (Korea Advanced LIquid METal Reactor) was evaluated by using TORT, three-dimensional discrete ordinates code. The shielding design has tentatively adopted to use two limits on the fast neutron fluence ( $E > 0.1$  MeV) and the DPA (Displacement Per Atom) simultaneously as a base for the irradiation limit for neutron damages to reactor structures. The reactor system was represented as five axial zones, each of which was modeled in R- $\theta$ -Z geometry. The KAFAX-F22 library was used in the analyses, which was generated from the JEF-2.2 for LMR applications by the KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute), and consists of 80 neutron and 24 gamma energy groups. The evaluation of the shielding design was compared with the shielding design criteria. In the support barrel, upper grid plate, and other reactor structures, the fast neutron fluence and DPA were sufficiently satisfied with the shielding design criteria. It was also found that the results of DPA provided larger margins than those of fast neutron fluence

## 1. 서론

KALIMER는[1,2] 가압경수로와 달리 1차 냉각계통에 해당하는 IHX(Intermediate Heat Exchanger), EM Pump와 같은 주요 구조물이 용기내부에 위치해있어 고속중성자에 의한 구조적 손상이 가압경수로보다 더 취약하다고 할 수 있다. 본 연구에서 수행한 액체금속로 차폐설계의 일차적인 목표는 수명기간동안 속중성자에 의한 노심 내외곽 구조물의 구조적 손상을 방지하여, 구조물의 건전성을 확보하는데 있다.

또한 고속중성자( $E > 0.1\text{MeV}$ ) 플루언스와 함께 구조적 손상정도를 좀더 잘 나타낼 수 있는 DPA(Displacement Per Atom)기준[3]을 병행하여 사용하였다. DPA는 중성자 조사에 의한 구조적 손상을 나타내는 좀더 근접한 변수로서 중성자 플루언스가 스펙트럼에 대한 영향이 반영되지 않은 양인데 비해 DPA는 스펙트럼 효과가 포함되어있는 개념이다. 차폐설계에서 고려된 주된 노심 외곽 구조물은 Support Barrel, Reactor Vessel, Upper Grid Plate이며, 차폐체로 Radial PSDRS Shields, Inner Fixed Shield, Lower IHX Shield, Inner/Outer IHX Shield가 적용되었다.

전체 차폐해석은 3 차원 각분할법 수송코드인 TORT코드[4]를 이용하였으며 계산에 이용한 핵자료집은 한국원자력연구소에서 생산한 고속로용 단면적 라이브러리 KAFAX-F22[5]를 사용하였다. 각 구조재에서의 DPA를 직접 계산하기 위해 KAFAX라이브러리에서 제공하는 Damage Energy Production Cross Section을 사용하였다. 전체 노심 내외곽 구조물은 R- $\theta$ -Z 모델링 하였으며 계산상의 제약으로 축방향으로 5개의 부분영역으로 나누어 계산하였다.

## 2. 차폐체 설계

KALIMER는 다양한 구조물들이 용기 내부에 위치해 있기 때문에 각 구조물에 대한 차폐설계기준을 만족시키기 위해 복잡한 차폐설계를 요구한다. 본 연구에서 적용한 차폐체는 원자력연구소의 “FY98 칼리머 차폐설계 예비평가“ 보고서에[6] 기술된 차폐설계안을 이용하였다. 차폐체의 재질은 실제설계에서는 중성자 흡수재를 Stainless Steel과 같은 재질로 둘러싸서 캔의 형식이나 Plate의 형식으로 사용되나 본 연구에서는 차폐체가 중성자 흡수재로만 구성되어 있는 것으로 가정하였다. 중성자 흡수재는 보편적으로 널리 사용되고 있는 자연농축도를 갖는 B<sub>4</sub>C 분말을 사용하였으며 차폐체의 설치장소에 따라 Inner Fixed Shield, Radial PSDRS Shields, Lower IHX Shield, Inner/Outer IHX Shield를 설치하였다. 표 1은 계산에 적용한 차폐체의 위치와 재원을 나타낸 것이다.

그림 1은 전체 노심 구조물 및 차폐체 설치위치를 나타낸 것이다. Inner Fixed Shield는 Support Barrel 안쪽에 실린더 형태로 설치되어 Support Barrel을 중성자 조사로부터 보호하는 역할을 하며, Radial PSDRS Shields는 Support Barrel과 Flow Guide사이에 3개의 실린더 형태로 위치하여 Reactor Vessel, Containment Vessel을 보호하고 반경방향으로의 중성자 유

출에 의한 PSDRS의 방사화를 막는다. IHX내부 2차 냉각재의 방사화를 막기 위해서 Flow Guide 윗쪽과 Support Barrel 안쪽과 바깥쪽에 Lower IHX Shield와 Inner/Outer IHX Shield를 설치하였다.

### 3. 차폐해석 방법

차폐해석은 3 차원 각분할법에 의한 TORT코드를 통해 이루어졌으며 P<sub>3</sub> Scattering Order와 S<sub>8</sub> Angular Quadrature가 적용되었다. 차폐계산에 사용한 단면적 라이브러리는 JEF-2.2를 바탕으로 한국원자력연구소에서 고속로 적용을 목적으로 개발한 KAFAX-F22 라이브러리(중성자 80그룹, 광자 24그룹)를 이용하였다. KAFAX-F22 라이브러리는 수송방정식 해법을 위해 필요한 기본 단면적 이외에 DPA계산을 위한 Damage Energy Production Cross Section, HEAT, KERMA등 그외 구조적 손상 및 방사화량 계산을 위한 부가적인 단면적을 같이 제공해준다. KAFAX라이브러리는 MATXS 파일형식으로 이것을 차폐계산을 위한 TORT코드에 사용하기 위해 TRANSX[7]/GIP 과정을 통해 단면적 라이브러리 형식 변환 및 각 영역별 거시단면적을 생산하였다.

TORT코드를 통해 노심 내외곽 구조물은 R-Z 모델링을 하였다. 반경방향으로 노심 중앙에서 Collector Cylinder 외부 콘크리트벽까지, 축방향으로는 Containment Vessel 하단의 콘크리트 Floor부터 Reactor Head 상단부까지를 포함한다. 전체 모델은 계산상의 제약으로 그림 2와 같이 축방향으로 Lower-Core, Near-Core, Upper-Core, Top-Core, Reactor Head 모델로 5개 영역으로 나누어 계산하였다.

선원항 계산은 그림 3의 노심 layout을 TORT 코드의 eigen value 계산 모드의 계산 결과를 이용하였다. 그림 4는 Drive fuel 영역의 플럭스로 eigen value 계산 결과이다. 차폐계산에서 사용된 중성자 선원항은 TORT 고유값계산을 통해 전체 영역별 핵분열 중성자 선원 분포를 계산하여 다음 식에 의해 계산하였다.

$$\text{중성자 선원항} = \frac{P \cdot C \cdot \nu}{F} \cdot S_{i,j} \cdot \chi_g \quad (\text{식 1})$$

여기서

$S_{i,j}$  : 핵분열 중성자의 공간적 분포

$\chi_g$  : 핵분열 중성자 스펙트럼

$P$  : 출력밀도 = 87.05 [Wth/cm<sup>3</sup>]

$C$  : 환산계수 = 6.242 × 10<sup>12</sup> [MeV/sec/Wth]

$\nu$  : 핵분열당 방출되는 중성자수 = 2.645 [neutrons/fission]

$F$  : 핵분열 에너지 = 200 [MeV/fission]

핵분열 스펙트럼은 TRANSX로부터 생산한 Drive Fuel 영역의 값을 사용하였으며 Top-Core 모델과 같이 핵분열 중성자 선원이 모델 내부에 없는 경우에는 Upper-Core 모델계산시 Top-Core 모델의 하부경계부분에서 각중성자속을 미리 저장한 후 Top-Core 모델 계산시 경계선원으로 이용하였다. 또한 Reactor Head 모델의 경우도 Top-Core 모델의 경계면에서 중성자속을 저장한 후 Reactor Head 모델의 선원항으로 이용하였다.

TORT 2차원적 R- $\theta$ -Z모델을 바탕으로 노심에 인접해있는 영구 구조물에 대한 에너지 0.1 MeV 이상의 최대 고속 중성자 플루언스를 계산하였다. 이때 30년 설계수명과 0.85 이용률을 고려하였으며 계산상의 불확실도는 고려되지 않았다. 앞에서 언급한 바와 같이 노심 외곽 구조물의 구조적 손상여부를 판단하기 위해 고속중성자 플루언스와 병행하여 다음 계산식[8]에 의해 DPA를 계산하였다. 그림 5는 이번 계산에 이용한 철의 DPA 반응단면적이다.

$$DPA = T \cdot \sum_g \sigma_{d,g} \phi_g \quad (\text{식 2})$$

여기서

$\sigma_{d,g}$  : DPA Cross Section

$$= \frac{\chi \sigma_{DAME,g}}{2E_d}$$

$\phi_g$  : Neutron Group Flux

$\chi$  : Displacement Efficiency(=0.8)

$\sigma_{DAME,g}$  : Damage Energy Production Cross Section from MATXS

$E_d$  : Atomic Displacement Energy

$T$  : 설계수명  $\times$  이용률

#### 4. 계산 결과 및 토의

노심에 인접해 있는 영구구조물에 대한 고속중성자 플루언스 및 DPA 계산 결과를 차폐체 설치 여부에 따라 그림 2와 표 2에 나타내었다. 원자력연구소에서는 속중성자 플루언스 제한치로[6]  $5.0 \times 10^{21}$  neutrons/cm<sup>3</sup>와 SS304, SS316에 대한 DPA 제한치로[6] 2.4, 4.1 dpa를 고려하고 있다. 본 연구에서의 계산결과는 Upper Grid Plates에서의 속중성자 조사량이  $7.284 \times 10^{20}$ , DPA가 0.3318로 원자력연구소에서 제한치로 고려되고 있는 값에 대해 충분한 여유도를 가지고 있는 것으로 계산되었다.

현재의 결과를 향후 차폐체 설계의 최적화에 적용하기 위해서는 IHX와 EM-Pump와 같이 반경방향으로 균질하지 않은 분포를 갖는 구조물에 대한 정확한 계산을 수행하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 한국원자력연구소 및 한국과학재단 지정 우수연구센터인 방사선안전신기술연구센터의 지원으로 수행되었다.

#### 참고문헌

1. Y. I. Kim, KALIMER Breeder Equilibrium Core Conceptual Design and Analysis, LMR/CD120-ER-01/1999, KAERI, 1999.
2. 김영인, KALIMER Breakeven 노심 차폐해석용 설계제원 자료, Memorandum, KAERI, Nov., 2000.
3. "WBS 4.1.5, Reactor Shielding Analysis : ALMR Mode-B '93 Reactor System Shielding Analysis," ALMR-W-94-005 (1994).
4. W. A. Rhoades and M. B. Emmett, "DOS: The Discrete Ordinates System," ORNL/TM-8362, ORNL (1982).
5. 김정도, 김충섭, "KAFAX-F22:JEF-2.2를 이용한 고속로용 다군 단면적 라이브러리 생산 및 검증," KAERI/TR-842/97, KAERI (1997).
6. Jae-woon Yoo, Preliminary Evaluation of FY98 KALIMER Shielding Design, KAERI/TR-1196/98, KAERI, 1999.
7. R. E. Macfralance, "TRANSX 2: A Code for Interfacing MATXS Cross-section Libraries to Nuclear Transport Codes," LA-12312-MS, LANL (1993).

표 1. KALIMER 차폐체 설계안

차 폐 체	제 원	비 고
Inner Fixed Shield	8 cm	Support Barrel 안쪽에 실린더형으로 위치
Radial PSDRS Shields	15 cm	Support Barrel과 Flow Guide 사이에 실린더형으로 위치
Lower IHX Shield	15 cm	Flow Guide 상단부에 위치
Inner IHX Shield	8 cm	Formal Ring 위에 Support Barrel 안쪽에 위치
Outer IHX Shield	10 cm	Flow Guild 상단부터 Support Barrel 바깥쪽에 위치

표 2. 고속중성자 플루언스 및 DPA 계산 결과

Component (Material)		Results	
		Without Shield	With Shield
Support barrel (SS316)	Fluence*	6.148E+20	4.113E+19
	DPA	2.263E-01	1.597E-02
Upper grid plate (SS304)	Fluence	7.284E+20	7.284E+20
	DPA	3.318E-01	3.315E-01
Reactor vessel (SS316)	Fluence	1.008E+17	1.530E+13
	DPA	1.325E-04	6.255E-09
Containment vessel (CR-Mo-Alloy)	Fluence	4.889E+16	9.116E+12
	DPA	5.040E-05	3.511E-09

\* unit : neutrons/cm<sup>3</sup>

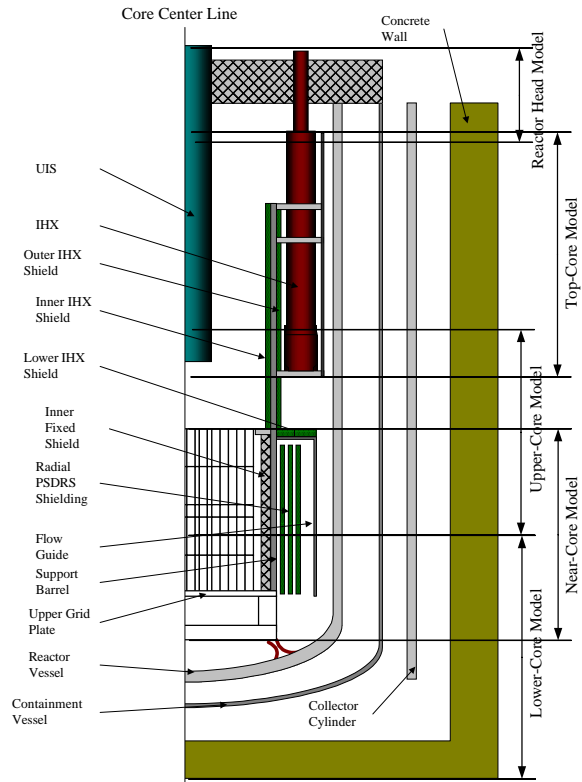


그림 1. 노심 내외곽 구조물 및 차폐체 Layout

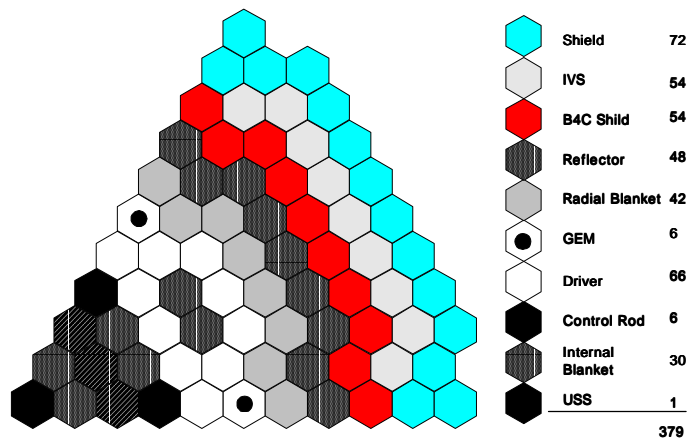
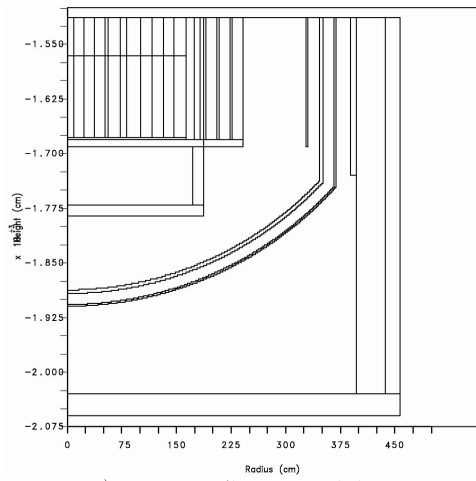
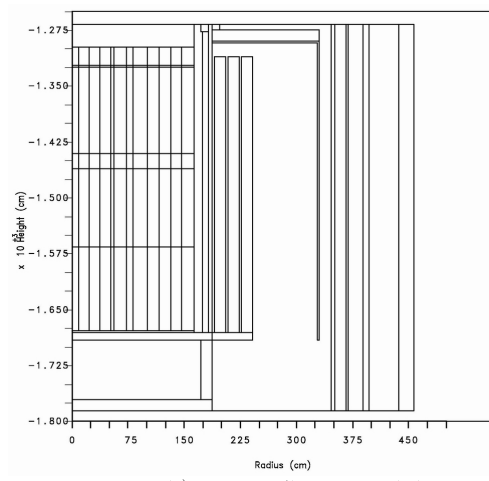


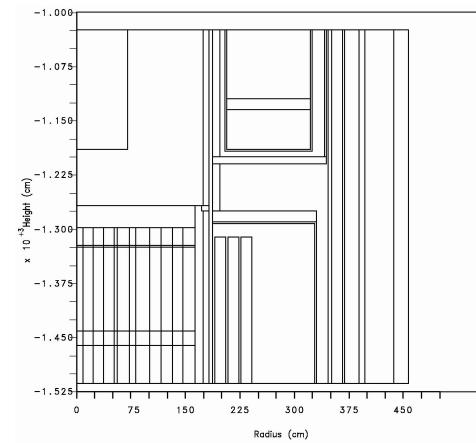
그림 2. 칼리머 노심 Layout



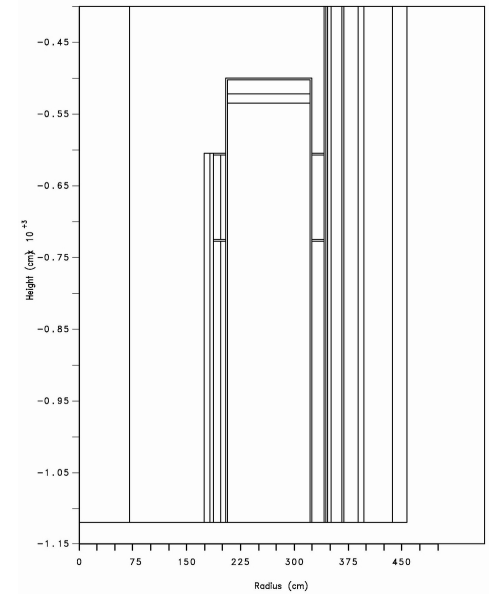
a) Lower-Core Model



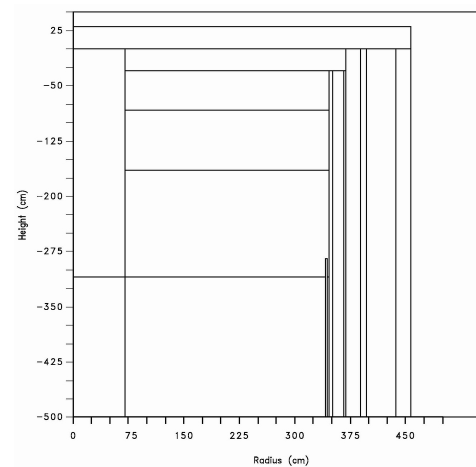
b) Near-Core Model



c) Upper-Core Model



d) Top-Core Model



e) Reactor Head Model

그림 3. R-Z 방향의 TORT 코드 모델링 결과



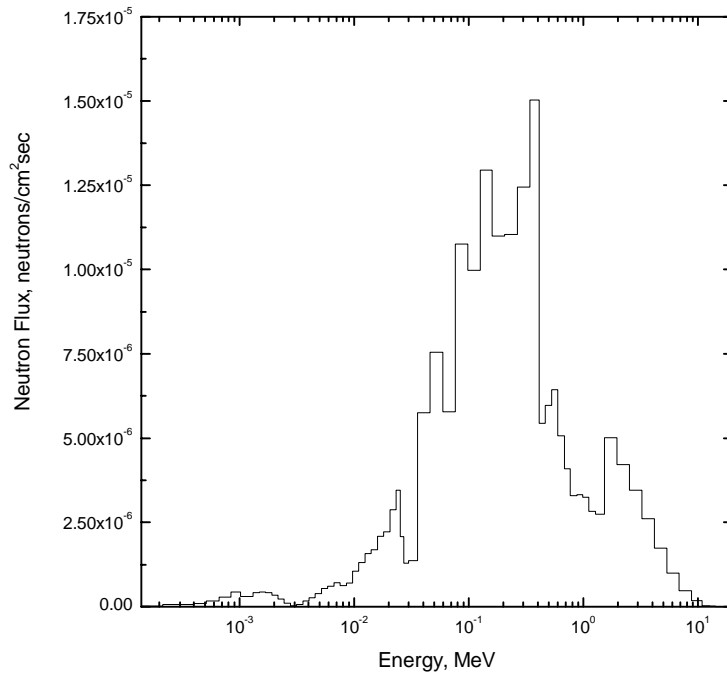


그림 4. Drive Fuel 영역의 선원항 계산결과

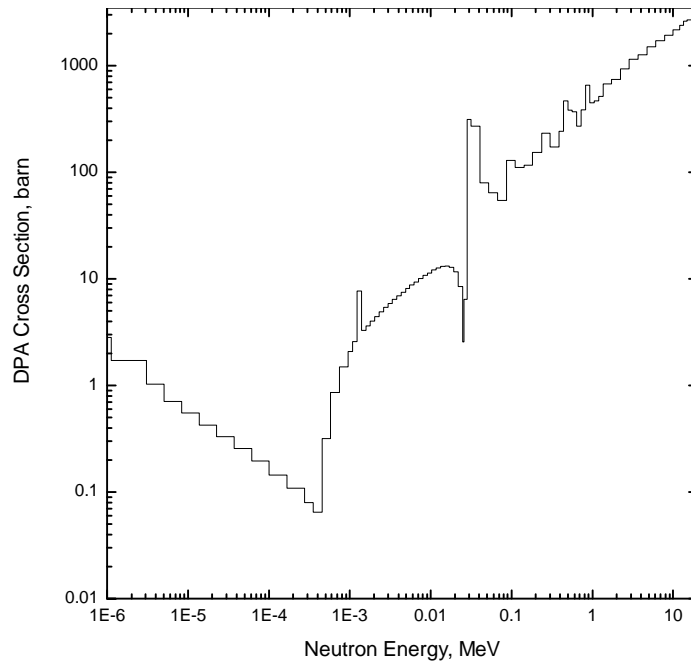


그림 5. 철의 DPA 반응단면적