

# 원자로 노심지진해석을 위한 SAC-CORE 코드개발 및 검증

## Development and Verification of SAC-CORE Code for Reactor Core Seismic Analysis

구경희, 이재한, 유 봉

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

본 연구에서는 액체금속로 노심에 대한 지진해석용 SAC-CORE 코드를 개발하고 적용 예로서 KALIMER 원자로노심에 대한 지진해석을 수행하여 면진설계가 노심지진응답에 미치는 영향을 평가하였다. 그리고 공기중에서의 프랑스 RAPSODIE 모형노심에 대한 지진해석을 수행하여 실험결과와 비교함으로써 개발된 SAC-CORE 코드의 정확성을 검증하였다.

### Abstract

The purpose of this paper is to develop the SAC-CORE code for core seismic analysis of Liquid Metal Reactor. Using the SAC-CORE code, the core seismic analysis for KALIMER reactor core is carried out to show the seismic isolation performance. For the verification of SAC-CORE code, the seismic analysis in air for RAPSODIE core mock-up is performed and the results are compared with those of the experiments. In this benchmark, SAC-CORE code gives good results.

### 1. 서 론

노심지진해석은 노심을 구성하고 있는 집합체들 사이에 발생할 수 있는 수많은 간격간의 충돌현상을 고려해야 하며 이러한 충돌현상은 매우 복잡한 비선형특성을 나타낸다. 특히 기존 가압경수로의 노심구조와 근본적으로 크게 다른 액체금속로용 노심구조는 덕트집합체로 구성되어 있으며 이러한 집합체에는 중간 지지구조물이 존재하지 않고 각각의 덕트에 Load pad를 설치하여 지진시에 덕트간의 직접접촉을 방지하고 있다. 저압고온으로 운전되는 액체금속로의 노심에 대한 상세지진해석은 지진시 노심의 안전성을 보장하는데 매우 중요하며 이러한 인식하에서 IAEA 주관하에 각국에서 개발된 노심지진해석 코드의 상호비교를 위한 국제공동연구가 수행된 바 있다[1,2,3].

본 연구에서는 현재 국내에서 개발중인 KALIMER 액체금속로의 노심지진해석을 위한 SAC-CORE(Seismic Analysis Code-Core) 코드를 개발하였다. 개발된 해석코드를 이용하여 KALIMER 노심지진해석을 수행하고 면진설계가 노심지진응답에 미치는 영향을 분석하였

다. 그리고 프랑스 RAPSODIE 모형노심에 대한 지진해석을 수행하여 실험결과와 비교분석함으로써 SAC-CORE 코드의 정확성을 검증하였다.

## 2. SAC-CORE 코드

### 2.1 해석코드의 전반적 구성

원자로노심에 대한 지진해석을 위하여 본 연구에서 개발중인 SAC-CORE 코드의 전반적인 구성은 그림 1 과 같다. 그림에서와 같이 SAC-CORE 코드는 시간이력 지진응답해석을 수행하기 위한 주해석코드이며, 주어진 노심해석모델의 고유진동수와 진동모우드를 해석할 수 있는 SAC-MODAL, 시간이력 지진응답해석 결과로부터 각 응답점의 층응답스펙트럼을 계산하기 위한 SAC-FRS, 그리고 후처리 프로그램으로서 시간이력 지진응답결과를 그래프로 분석하기 위한 SAC-PLOT, 지진해석모델과 SAC-MODAL 의 해석결과에 대한 진동모우드를 도식적으로 분석하기 위한 SAC-POST 프로그램으로 구성되어 있다.

주 프로그램인 SAC-CORE 와 SAC-MODAL 은 FORTRAN 언어로 구성되어 있으며 후처리 프로그램인 SAC-PLOT 과 SAC-POST 는 Microsoft-C 언어로 되어있다.

SAC-PLOT 프로그램은 주어진 시간이력 지진응답 해석결과에 대한 침두 가속도응답 분석기능, Zooming 기능 등이 있다. SAC-POST 프로그램은 지진해석모델에 대한 입력자료 검증과 고유진동모우드를 도식적으로 분석하고 각 모우드에 대한 동화상 분석을 수행할 수 있는 기능 등이 있다.

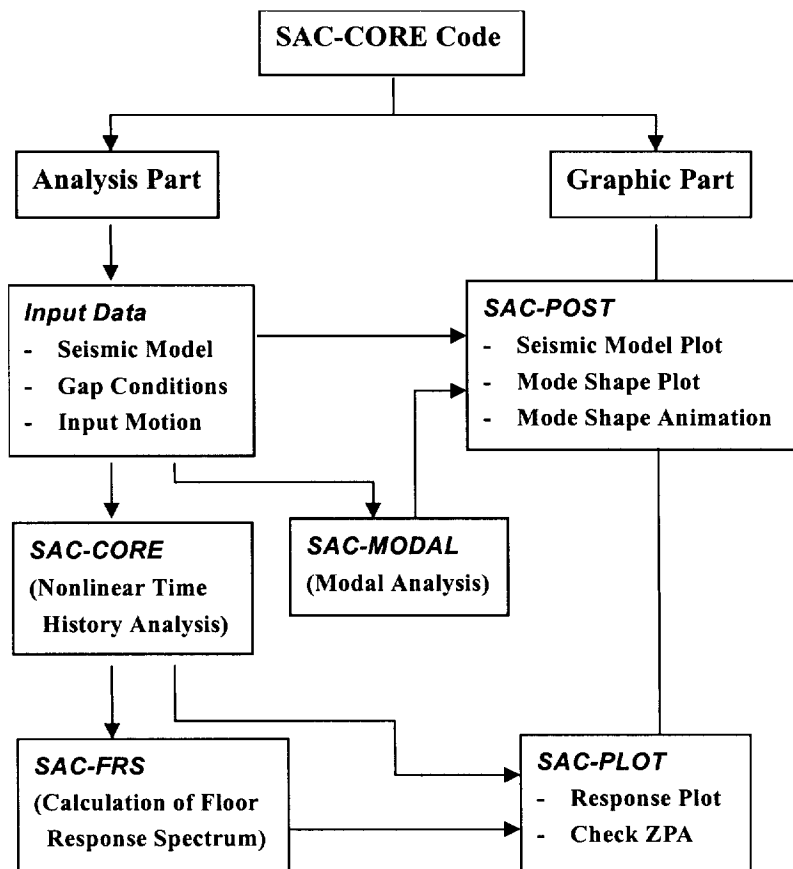


그림 1. SAC-CORE 코드의 전반적 구성도

## 2.2 이론적 배경 및 해석절차

입력지진동에 대한 대상구조물의 지진운동 방정식은 일반적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[M]\{\ddot{x}_r\}+[C]\{\dot{x}_r\}+[K]\{x_r\}=-[M]\{\ddot{x}_b\} \quad (1)$$

위의 식에서  $[M]$ ,  $[C]$  그리고  $[K]$ 는 노심해석모델의 질량행렬, 감쇠행렬 그리고 강성행렬을 각각 나타낸다. 그리고  $x_r$ 은 입력지진동에 대한 상대변위벡터이며  $\ddot{x}_b$ 은 노심지진물의 입력가속도벡터를 나타낸다. 이러한 시스템행렬에는 노심 Load pad에 작용하는 있는 충격강성과 노심주위의 냉각재 영향이 고려된다.

위의 지진운동방정식에 대한 해를 구하기 위하여 SAC-CORE에서는 Runge-Kutta 수치해석알고리즘을 이용한 직접적분법을 사용하였다. 이를 위하여 2 차미분방정식 형태의 식 (1)을 다음과 같이 변환해야 한다.

$$y_r = \begin{Bmatrix} x_r \\ \dot{x}_r \end{Bmatrix}, \quad \dot{y}_r = \begin{Bmatrix} \dot{x}_r \\ \ddot{x}_r \end{Bmatrix} \quad (2), (3)$$

위의 식 (3)에서 가속도벡터  $\ddot{x}_r$ 는 식 (1)로부터 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\{\ddot{x}_r\}=-[M]^{-1}[K]\{x_r\}-[M]^{-1}[C]\{\dot{x}_r\}-[M]^{-1}[M]\{\ddot{x}_b\} \quad (4)$$

따라서 2 차미분방정식 형태인 식 (1)의  $(n \times n)$  행렬은 다음과 같이  $(2n \times 2n)$  행렬의 1 차미분방정식으로 표현된다.

$$\{\dot{y}_r\} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix} \{y_r\} + \begin{Bmatrix} 0 \\ -\{\ddot{x}_b\} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)로부터 구한 지진응답해는 입력지진동에 대한 상대응답이며 절대응답은 다음과 같이 구해진다.

$$x_{abs} = x_r + x_b, \quad \dot{x}_{abs} = \dot{x}_r + \dot{x}_b, \quad \ddot{x}_{abs} = \ddot{x}_r + \ddot{x}_b \quad (6, 7, 8)$$

일반적으로 Runge-Kutta 수치해석방법은 다른 직접적분법에 비하여 비교적 정확한 해를 구할 수 있으나 상태방정식이 높은 고유진동수를 포함할 경우에는 매우 많은 해석시간이 요구되는 단점을 가지고 있다. 따라서 이러한 단점을 해결하기 위해서는 불필요한 자유도는 제거하여 전체 상태방정식의 고유진동수를 적절한 수준으로 유지할 필요가 있다. SAC-CORE 코드에서는 이를 위하여 강성 및 질량행렬에 대한 응축기법(condensation technique)을 이용하였다. 먼저 강성행렬에 대한 응축은 고려하고자 하는 강성행렬과 요소의 변위와 힘벡터를 다음과 같이 분리한다.

$$\begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ac} \\ K_{ca} & K_{cc} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_a \\ U_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_a \\ R_c \end{Bmatrix} \quad (9)$$

여기서  $U_a$ 와  $U_c$ 는 고려하고자 하는 변위벡터와 제거하고자 하는 변위벡터를 각각 나타낸다. 식(9)에서 제거하고자 하는 변위벡터는

$$U_c = K_{cc}^{-1}(R_c - K_{ca} U_a) \quad (10)$$

이다. 따라서 식(10)을 식(9)에 대입하면 다음과 같이 응축된 방정식을 얻을 수 있다.

$$(K_{aa} - K_{ac} K_{cc}^{-1} K_{ca}) U_a = R_a - K_{ac} K_{cc}^{-1} R_c. \quad (11)$$

다음으로 질량행렬을 응축하기 위해서는 에너지균형을 이용할 수 있다. 식(11)에서 제거하고자 하는 자유도  $U_c$  방향으로는 지진하중이 작용하지 않는다고 가정하고 집중질량 모델을 사용할 경우에는 대각선 방향의 질량요소만 존재함으로 다음 식과 같이 간단히 응축된 질량행렬을 구할 수 있다.

$$M_{con} = M_{aa} + K_{ca}^T K_{cc}^{-1} M_{cc} K_{cc}^{-1} K_{ca}. \quad (12)$$

지진해석시에 Gap 이 서로 충돌할 동안 작용하는 충격감쇠는 다음과 같은 식으로 부터 결정된다.

$$C_{gap} = K_{gap} \frac{(1 - \varepsilon^2) T_s}{\pi} \quad (13)$$

위의 식에서  $K_{gap}$ ,  $\varepsilon$ , 그리고  $T_s$ 는 각각 Gap 강성, 반발계수, 충격시간을 나타낸다.

그림 2는 SAC-CORE 코드의 일반적인 비선형 노심지진해석 절차를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 시스템행렬의 구성은 일반적인 유한요소해석기법을 사용하고 있으며 Gap에서의 충격거동은 이전 해석시간에서의 Gap 상태에 따라서 결정된다. 시스템행렬을 구성하기 위해 SAC-CORE에서는 노심 덕트집합체를 위한 보요소, Gap 모델을 위한 스프링-감쇠요소, 주변 냉각재 및 기타 부속구조물의 추가 질량효과를 고려하기 위한 집중질량요소를 제공한다.

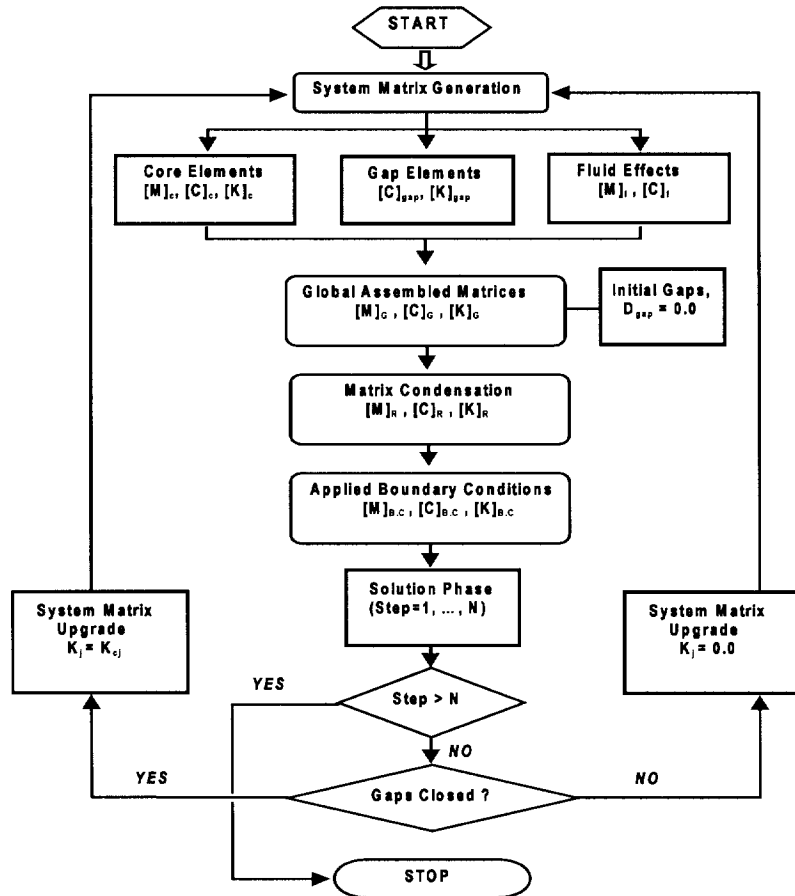


그림 2. SAC-CORE 코드의 노심지진해석 흐름도

### 2.3 해석자료 입력방법

SAC-CORE 코드에 필요한 입력자료는 외부 Batch 입력화일을 이용하여 마련하도록 되어있다. 해석자료의 입력형태는 자유형식으로 되어있으며 입력화일은 요소정보, 재료성질, Gap 자료, 절점좌표, 요소구성, 경계조건, 지진방향, 그리고 해석시간의 순서로 따라서 작성되어야 한다.

각 입력요소들에 요구되는 자료들의 입력내용은 다음과 같다.

- 요소정보 : 총요소수, 총절점수, 요소종류
- 재료성질 : ID, 탄성계수, 단면관성모멘트, 단면적, 전단면적, 밀도, 포아송비, 감쇠비
- Gap 자료 : ID, KX, KY, KR<sub>i</sub>, KR<sub>j</sub>, CX, CY, CR<sub>i</sub>, CR<sub>j</sub>
- 절점좌표 : 절점번호, X, Y, Z
- 요소구성 : 요소종류, 요소번호, I 절점번호, J 절점번호, 재료번호, Gap ID
- 경계조건 : 절점번호, Dx, Dy, Dz
- 지진방향 : 방향(1: X, 2: Y, 3: Z), 중력가속도, 증폭상수
- 해석시간 : 해석시간간격, 총 Step 수

위에서 Gap 자료입력에 필요한 KX, KY, CX, CY 는 스프링-감쇠요소에서 국부좌표 x 와 y 방향 스프링상수와 감쇠를 나타내며 KR<sub>i</sub>, KR<sub>j</sub>, CR<sub>i</sub>, CR<sub>j</sub> 는 I 절점과 J 절점에서의 회전스프링상수와 감쇠를 각각 나타낸다. 그리고 경계조건 입력자료에 필요한 Dx, Dy, Dz 는 주좌표 X, Y, Z 방향의 변위구속량을 각각 나타낸다.

### 2.4 적용예

그림 3 은 KALIMER 원자로노심의 덕트집합체에 대한 단순 지진해석모델을 제안하기 위한 3 개의 Cluster 모델형상을 나타낸 것이다[4]. 그림에서 Cluster A 와 C 는 Radial blanket, Gas expansion module, Reflector, B<sub>4</sub>C shield, In-vessel storage, 그리고 Shield 등의 덕트 집합체로 구성되어 있으며 Cluster B 는 핵연료와 제어봉등의 덕트집합체로 구성되어 있다.

그림 4 는 노심지진해석모델을 나타낸 것으로 지진하중이 노심지시물과 노심보호체를 통하여 덕트집합체로 전달되며 이때 이들 구조물들은 강체로 가정하였다.

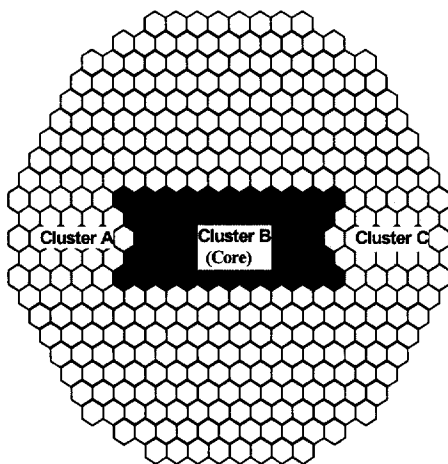


그림 3. 지진해석모델을 위한 Cluster

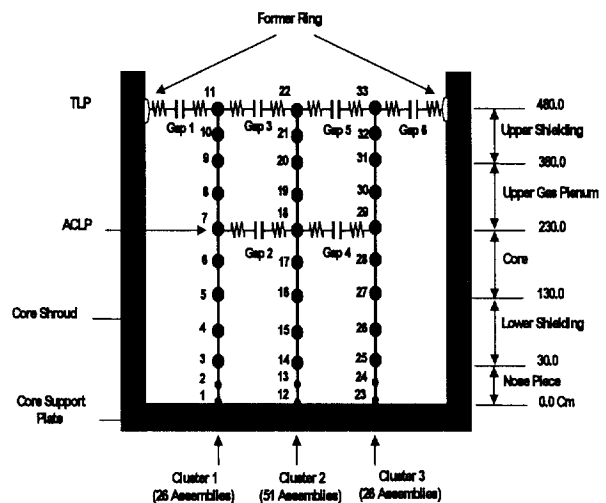


그림 4. KALIMER 노심지진해석모델

제안된 노심지진해석모델에 대한 SAC-MODAL 을 이용한 고유진동수해석 결과 1 차고 유진동수는 4.3Hz 그리고 2 차고유진동수는 24.3Hz 로 나타났다.

노심지진해석에 사용된 입력지진은 KALIMER 의 면진설계와 비면진설계 조건을 고려 하였으며 일반적인 응답분석을 위하여 표 1 과 같은 최대 침두가속도를 갖는 조화가진 함수를 사용하였다.

표 1. 노심지진해석에 사용된 하중조건

Core Support Excitation for SSE Conditions (0.3g)			
Load Case	Acc.	Freq.	Remarks
1	1.28g	8.1 Hz	Non-Iso, RI Freq.
2	1.28g	4.3 Hz	Non-Iso, Core Freq.
3	0.22g	4.3 Hz	Iso., Core Freq.
4	0.22g	0.7 Hz	Isolation Freq.

그림 5 는 Cluster B 의 상부끝단(절점 22)에서의 상대변위 시간이력응답을 나타낸 것이며 그림 6 은 각 하중조건들에 대한 Gap 1 에서의 충격력 시간이력응답을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 면진설계의 경우에 노심지진응답이 현저하게 줄어들며, 특히 Load pad 에서의 충격횟수 및 크기가 크게 줄어들므로 피로손상등을 미연에 제거할 수 있을 것으로 예상된다.

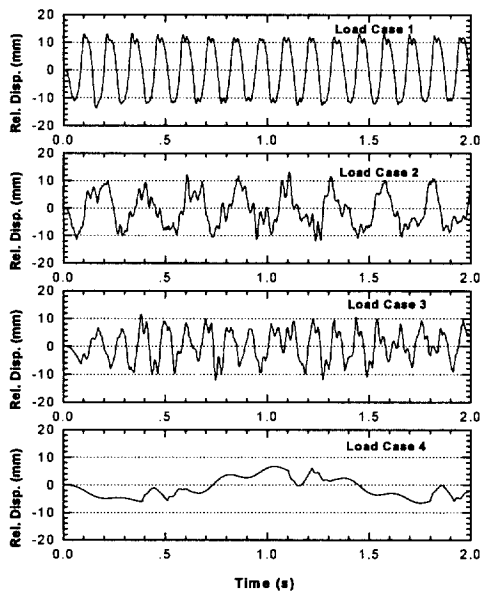


그림 5. 상대변위 시간이력응답(절점 22)

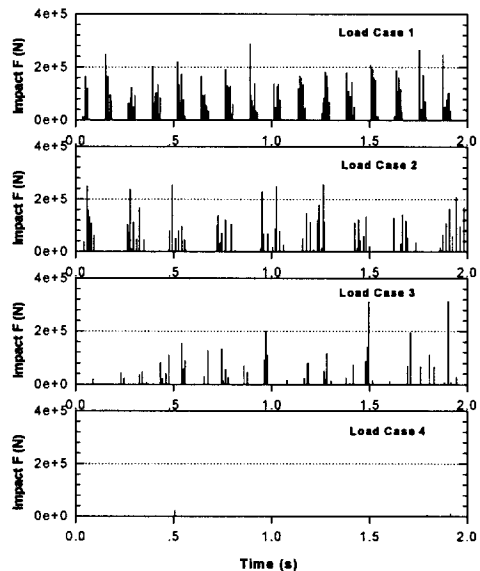


그림 6. 충격력 시간이력응답(Gap 1)

### 3. SAC-CORE 코드검증

SAC-CORE 코드의 정확성을 검증하기 위하여 프랑스 RAPSODIE 모형노심에 대해 일반적으로 알려진 해석모델[2]을 사용하였다. 그림 7 은 이러한 지진해석모델을 나타낸 것으로 덕트집합체에서 19 개의 일직선상의 덕트만을 고려한 해석모델이다.

본 연구에서 수행한 해석은 냉각재의 영향을 고려하지 않은 공기중에서의 실험결과를

이용한 노심지진응답 해석을 수행하였다. 그림 8은 덕트상부 끝점에서의 최대변위 응답에 대한 해석결과와 실험결과를 비교한 것으로 SAC-CORE에 의한 해석결과와 실험결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 표 2는 각국에서 개발한 노심지진 해석코드로부터 계산된 최대변위 응답결과[2]와 SAC-CORE의 결과를 실험값과 비교한 것으로 본 연구에서 개발한 노심지진해석코드 SAC-CORE가 충분히 정확한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

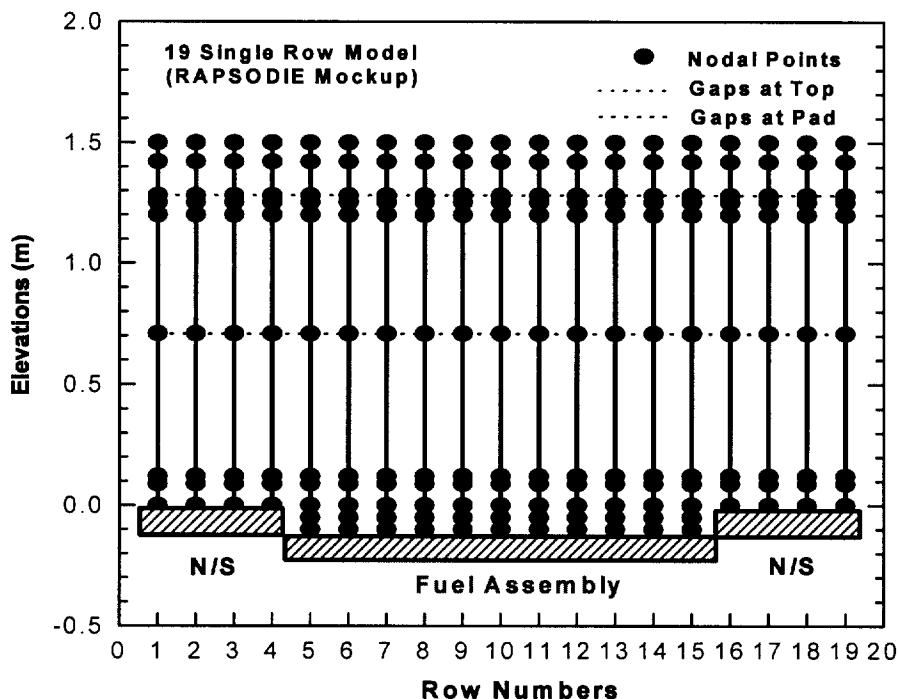


그림 7. RASODIE 모형노심 지진해석모델 (19 Row)

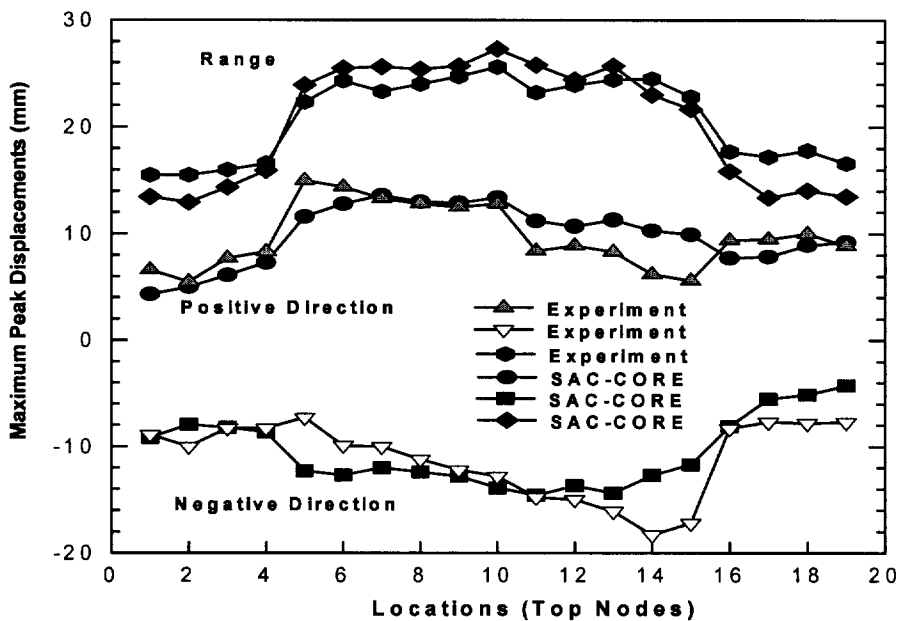


그림 8. 상부끝단에서의 최대변위 응답결과 (공기중)

표 2. 최대변위응답에 대한 각국의 노심지진해석코드 결과와의 비교 (상단절점)

(Unit : mm)

	Row 1	Row 4	Row 5	Row 10	Row 15	Row 16	Row 19
Experiment	9.0	8.4	15.2	12.6	17.4	9.5	8.6
CASTEM2000	-	7.6	19.4	14.6	12.8	6.2	-
CORE-SEIS	12.2	8.3	14.4	14.3	14.8	8.2	10.7
FINAS	8.0	6.5	13.2	12.4	12.4	6.5	8.7
FINDS	6.6	5.8	12.8	11.3	13.9	6.4	5.8
SAFA	6.5	6.1	12.5	12.3	13.5	5.7	6.6
SALCON	10.5	8.1	14.6	11.1	13.6	11.3	-
SAC-CORE	9.2	8.0	12.3	13.9	11.7	8.1	9.2

#### 4. 결론

본 연구에서는 액체금속로 원자로노심의 지진해석을 위하여 SAC-CORE 코드를 개발하였다. 적용예로서 개발된 해석코드를 이용하여 KALIMER 원자로노심에 대한 지진해석을 수행하고 면진설계가 노심지진 응답감소에 매우 효과적임을 보였다. 그리고 공기중에서의 프랑스 RAPSODIE 모형노심에 대한 지진해석을 수행한 결과 개발된 SAC-CORE는 실험결과와 매우 유사한 결과를 보여주었다. 향후 SAC-CORE 코드를 실제 노심지진해석 코드로서 활용하기 위한 보다 세부적인 코드보완과 실험적 검증이 요구된다.

#### 참고 문헌

- [1] Intercomparison of Liquid Metal Reactor Seismic Analysis Codes, Volume 1: Validation of Seismic Analysis Codes Using Reactor Core Experiments, IAEA-TECDOC-798, 1993
- [2] Intercomparison of Liquid Metal Reactor Seismic Analysis Codes, Volume 2: Verification and Improvement of Reactor Code Seismic Analysis Codes Using Core Mock-up Experiments, IAEA-TECDOC-829, 1994
- [3] Intercomparison of Liquid Metal Reactor Seismic Analysis Codes, Volume 3: Comparison of Observed Effects with Computer Simulated Effects on Reactor Codes from Seismic Disturbances, IAEA-TECDOC-882, 1995.
- [4] G.H. Koo, J.H. Lee, and B. Yoo, "Core Seismic Analysis for a Seismically Isolated LMR," ASME PVP, Vol. 379, Seismic Shock, and Vibration Isolation, pp.221-227, 1998.

#### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었음.