

# 일체형 원자로 내부 유동분배통의 동특성 해석

## Dynamic Characteristics of a Flow Skirt in SMART

임승호\* · 최영인\* · 박영필\* · 박노철\* · 박경수† · 정경훈\*\* · 이장원\*\*

Seungho Lim, Young-In Choi, Young-Pil Park, No-Cheol Park, Kyoung-Su Park,  
Kyeong-Hoon Jeong, and Jang-Won Lee

### 1. 서론

최근 지속 가능하고 장기적인 에너지 자원의 확보가 주요한 국가 경제 정책으로 대두되면서, 원자력 에너지에 대한 사회적 관심이 증대되고 있다. 특히 원자력 기술 확보 및 원전의 해외 수출은 단순히 국가 에너지 자립도를 높이는 데 그치지 않고 새로운 부가가치를 창출하는데 의미가 있다. 이러한 원자력 기술 개발의 일환으로 한국원자력연구소에서는 중소형 일체형 원자로(SMART)를 개발하고 있으며, 현재 표준 설계 및 기술 검증을 진행하고 있다. 일체형 원자로의 발전 일변도의 원자력 에너지의 활용에서 벗어나 해수의 담수화, 지역난방 및 선박 추진 동력 원으로서 다목적 사용이 가능하고, 상용로와 비교하여 고유 안정 특성을 향상시킬 수 있는 장점을 가진다. 그러나 기존의 상용로와는 설계 개념이 상이하여, 기술 검증 및 평가를 위해 새로운 전산 해석 및 시험 방법이 필요하다.

본 연구에서는 SMART 원자로 내부의 유동분배통의 동특성을 규명하여 설계의 건전성과 안정성을 확보한다. 이를 위해 일정한 축소비(1/12)를 갖는 유동분배통의 축소모형을 설계 및 제작하여 수치 해석과 실험 해석을 수행한다. 수치해석으로는 상용유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 활용하여 고유진동수 및 모드형상을 추출한다. 유한요소 해석모델에서는 유체에 의한 부가질량효과를 고려하기 위해 유체 요소를 활용하며, 정확한 해석 결과를 얻기 위해 유동분배통의 다공 구조 형상을 모두 나타낸다. 이와 더불어 공기 중과 냉각재에 접해 있을 경우로 나누어 유동분배통의 모달 테스트를 수행하여 수치 해석 모델의 유효성을 평가하고, 추후 SMART에 대한 종합진동평가 프로그램의 기초 자료로서 활용한다.

### 2. 수치 해석 모델

#### 2.1 유동분배통의 구조

SMART 내부의 유동분배통은 Fig. 1(a)와 같이 원자로 하부 공동에서 위치하며, 다공 원통 구조물로 설계되어 있어 냉각재가 균일한 유동 분포를 갖도록 한다. 더불어 사고 시 노심의 받침대 역할을 하여 원자로의 안정성을 증대시키는 구조를 갖는다. 본 연구에서는 실제 유동분배통 대비 1/12의 축소비를 갖는 축소모델(Fig. 1(b))을 통해 유동분배통의 동특성을 예측한다. 축소 모델에서는 상부의 플랜지 부분과 하부의 용접 부분이 모두 묘사되며 동일한 패턴을 갖는 다공 형상을 포함한다.

#### 2.2 유한요소 모델

유동분배통의 동특성을 추출하기 위해 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 유한요소 모델 구축 및 수치 해석을 수행한다. Fig. 2와 같이 유체영역은 FLUID80 요소를 사용하였으며, 구조영역은 SHELL63과 SOLID45로 나타내었다. 모든 요소는 APDL(ANSYS Parametric Design Language)을 활용하여 사변형 및 육면체 요소로 나타내었다.

다공 원통 구조는 등가 강성 및 포아송 비를 사용하지 않고 Fig. 3과 같이 과도 요소 형상(Transition Element Pattern)을 이용하여 1700여 개의 원형 구멍을 사변형으로 모두 표현하였다. 또한 구조물과 거리가 멀수록 유체의 요소망이 성하게 조절하였다. Table 1은 사용된 요소와 절점의 수를 나타낸다.

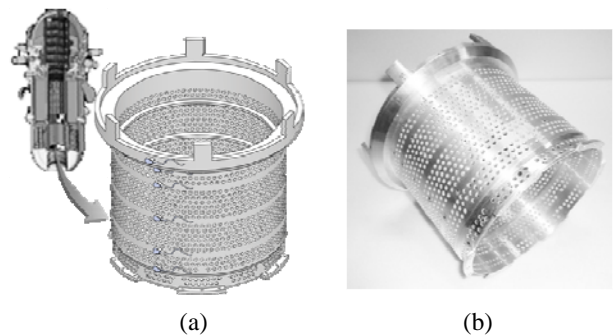


Fig. 1 Flow skirt in SMART

† 박경수; 연세대학교 기계공학과  
E-mail : pks6348@yonsei.ac.kr  
Tel : (02) 2123-4677, Fax : (02) 365-8460  
\* 연세대학교 기계공학과  
\*\* 한국원자력연구원

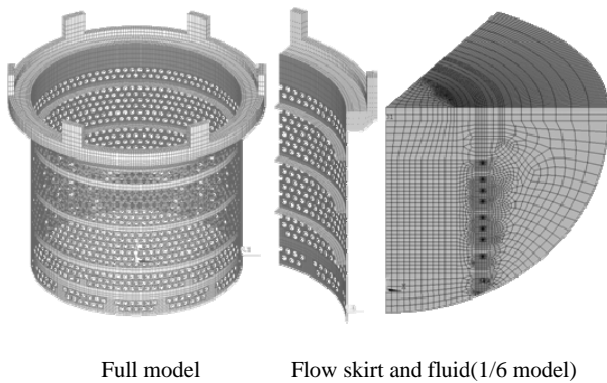


Fig. 2 Finite element model of flow skirt and coolant

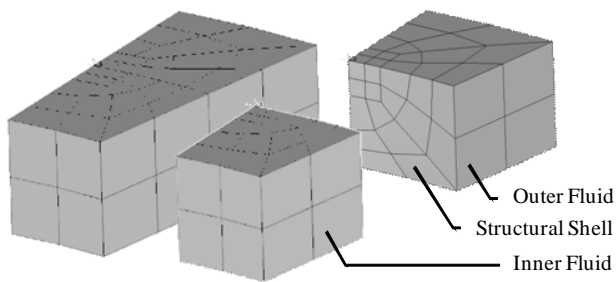


Fig. 3 Transition element pattern for the perforated plate

Table 1 Elements and nodes in finite element model

| Element Type | Element   | Node      |
|--------------|-----------|-----------|
| SHELL63      | 64,128    | 76,164    |
| SOLID45      | 10,440    | 15,456    |
| FLUID80      | 1,186,434 | 1,283,648 |
| Total        | 1,261,002 | 1,385,656 |

### 3. 모달 테스트 및 결과 비교

수치해석 모델로부터 추출한 동특성의 유효성을 검증하기 위해 Fig. 4 와 같이 실험장비를 구축하고 모달 테스트를 수행하였다. 우선 공기 중 자유단에서의 모달 테스트를 통하여 유한요소모델의 기하형상, 물성치 적합성을 판단하였고, 원자로용기에 부착한 후 가진기를 이용하여 공기 중 및 수중에서의 동특성을 추출하였다. 가진기는 복수의 테프론 스틱거와 얇은 판막을 이용하여 유동분배통과 연결하고 방수하였으며, 원주방향 16 개, 길이방향 7 개의 응답점에 방수 가속도계를 이용하여 주파수응답을 얻었다. 얻어진 주파수응답은 LMS Test Lab.을 통해 내삽하여 주요 동특성을 추출하였다. Fig. 5 는 수치해석과 모달테스트를 통해 얻은 모드 형상을 나타낸다. 더불어 Table 2 는 공기 중 및 수중에서의 고유진동수를 나타낸다. 해석 결과와 실험결과가 전반적으로

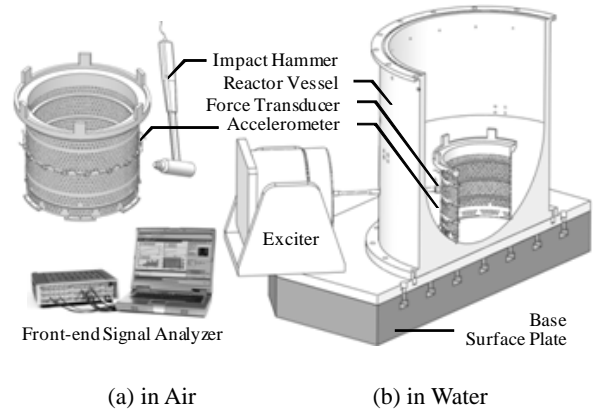


Fig. 4 Experimental setup for modal test

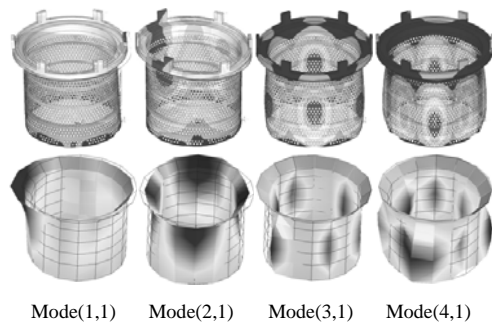


Fig. 5 Mode shape : FEM(top) and experiment(bottom)

Table 2 Natural frequency (unit: Hz)

| Mode   | in Air |      | in Water |      |
|--------|--------|------|----------|------|
|        | FEM    | Test | FEM      | Test |
| w(1,1) | 998    | 980  | 757      | 755  |
| w(2,1) | 1106   | 1052 | 805      | 789  |
| w(3,1) | 1987   | 1981 | 1426     | 1402 |

일치하고 있음을 알 수 있으며, 유체의 부가 질량효과에 의한 고유진동수의 감소를 확인할 수 있다. 따라서 본 해석 모델을 통해 실제 냉각재에 잠긴 SMART 내부의 유동분배통의 동특성을 예측할 수 있으며, 추후 유동분배통 외의 원자로내부구조물에 대한 구조동특성을 정확히 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

### 후 기

본 논문은 SMART 기술검증 및 표준설계 인가 획득사업의 지원으로 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

- (1) Kyeong-Hoon Jeong, 2001, "Modal analysis of perforated rectangular plates in contact with water," *Struct. Eng. Mech.*, Vol.12, No.2, pp.189~200
- (2) Myung Jo Chung, Jong Chull Jo, and Kyeong-Hoon Jeong, 2006, "Free vibration of perforated plate submerged in fluid," *J. Mech. Sci. Technol.*, Vol.20, No.9, pp.1323~1338