

# APR1400 원자로 내부구조물의 유체-구조 연성에 따른 동특성 변화

## Dynamic characteristics transition of APR1400 reactor internals considering fluid-structure interaction

이상정\* · 최영인\* · 박종범\* · 박영필\* · 박노철\* ·  
박경수† · 김진성\*\* · 박찬일\*\*

Sang-Jeong Lee, Young-In Choi, Jong-beom Park, Sang-Jeong Lee, Young-Pil Park, No-Cheol Park, Kyoung-Su Park, Jin-Sung Kim, Chan-Il Park

### 1. 서론

최근 발생한 후쿠시마 원전 사고로 인해 높은 안전성과 신뢰성을 가진 원자로 설계를 요구하는 추세이다. 이 요구에 따라 높은 안전성을 가진 원자로를 설계하기 위해서는 원자로 구조물에 대한 정확한 동특성 규명이 필수적이다.

원자로의 정확한 동특성을 규명하기 위해서는 내부 구조물과 내부유체를 포함한 해석이 이루어져야 한다. 원자로 용기, 노심지지배럴집합체 및 상부안내구조물들과 같은 내부구조물들은 동축 원통형 구조를 가지고 있고, 원통형 구조물들이 접수 되어있을 경우, 유체의 부가 질량 효과는 구조물의 동특성에 지대한 영향을 미친다. 특히 원통구조물이 자체 크기에 비해 좁은 간격 가지고 여러 개가 배치되어 있을 경우 구조물 사이에 존재하는 간극유체는 구조물간의 거동을 연성시키기 때문에 정확히 파악할 필요가 있다.

따라서 본 연구는 현재 건설 중이며, 주력 수출 모델인 APR1400 경수로 원자로의 내부구조물과 내부유체간의 유체-구조 연성에 따른 동특성 변화를 알아보고자 간단한 동축 원통형 모델해석으로 동특성 변화의 경향을 파악하고 원자로의 3차원 유한요소모델을 유체-구조연성 해석을 통해 얻은 동특성 변화의 타당성 및 경향성을 검증하였다.

### 2. 실험 및 해석

#### 2.1 동축 원통형모델

본 연구에서 실제 원자로 내부구조물의 내진 해석을 위한 동특성 파악을 위해 1/10 축소모형을 제작하였고, 실제 해석 수행 전에 대략적인 동특성 파악을 위해 주요 내진 해석 대상인 원자로 용기 및 노심지지배럴을 Fig 1과 같은 동축 원통으로 모델링하였다. 축소모형의 크기와 유사하도록 하기 위해 높이와 지름이 같은 동축 원통으로 간단히 모델링하였다.

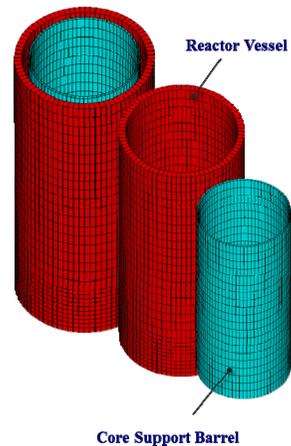


Fig 1 Patch Test Model

내부유체가 공기일 때와 물 일 때로 나누어 유체-구조연성 해석을 진행하였고 결과는 Table 1과 같다.

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

**Table 1** Natural Frequency of Patch Test

Mode(n,m)	In Air (Hz)	In Water (Hz)	Decrement (%)
1 (2,1)	181	51.4	71
2 (1,1)B	266	66.4	75
3 (3,1)	365	126	65

\*B: Bending

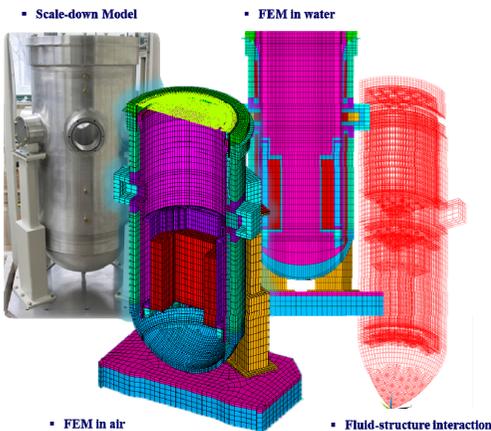
\*n: Circumstantial node number

\*m: Axial node number

결과적으로 내부유체효과로 인해 모드에 따른 고유진동수가 65%~75% 정도 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 내부 유체의 연성 효과로 인해 Out-of-Phase 모드가 저차 모드로 나오고 In-Phase 모드가 상대적으로 고주파 대역에서 나오는 것을 알 수 있었다. 유체의 부가 질량 효과는 유체의 간극에 따라 크게 좌우된다. 하지만 위 동축 원통모델에서는 간단하지만 축소 모델의 원자로 용기와 노심지지배럴의 지름과 길이를 유지하였으므로 간극 또한 유지하였기 때문에 비록 모델을 단순화 시켰고 노심 집합체의 질량 및 관성이 빠져 있으므로 어느 정도의 오차는 존재하지만 축소 모델 유한요소해석에도 비슷한 감소량을 보일 것으로 예측하였다.

### 2.2 축소모델 유한요소해석

동축 원통해석을 바탕으로 예측된 경향을 확인하고자 축소모형을 이용한 시험을 통해 타당성을 검증하면서 유한요소해석을 진행하였고, 그 결과는 Table 2와 같다.



**Fig 2** Scale-Down Model and Finite Element Model

결과를 보면 패치 시험에서의 모드별 고유진동수 감소량과는 오차는 보이지만 대략 65%~80% 정도 감소하는 것을 보아 경향이 일치하는 것을 알 결과 결과를 보면 동축 원통형 모델과 결과와 같이 내부유체효과로 인해 Out-of-Phase 모드가 저차 모드로 나오고 In-Phase 모드가 상대적으로 고주파 대역에서 나오는 경향이 일치함을 알 수 있다. 또한 모드 순서는 노심집합체의 질량 및 관성에 의해 굽힘 모드가 1차모드로 나타남을 알 수 있다.

**Table 2** Result of FEA

Mode(n,m)	In Air (Hz)	In Water (Hz)	Decrement (%)
1 (1,1)B	148.8	51.3	65
2 (2,1)	429.5	93.1	78
3 (3,1)	412.6	101.1	75

\*B: Bending

\*n: Circumstantial node number

\*m: Axial node number

### 3. 결 론

유체-구조 연성 해석 결과 고유진동수가 최소 65%에서 최대 78%까지 감소하는 것을 확인하였다. 큰 세장비와 핵연료의 질량 및 관성 때문에 1차모드로 굽힘모드가 발생하는 가장 중요한 해석 대상인 노심지지배럴집합체의 저주파에서의 거동을 확인 하였고, 또한 내부유체 효과로 1차 모드의 고유진동수의 감소와 Out-of-Phase 모드가 저차 모드로 나오고 In-Phase 모드가 상대적으로 고주파 대역에서 나오는 경향을 가짐을 알 수 있었다. 상사성 및 축소비와 재질을 고려했을 때 대략 1차모드가 51Hz에서 5Hz로 감소할 것으로 예상되며 이는 추후에 있을 내진 해석의 범위에 들어가므로 중요하게 될 것으로 예상된다. 추후에 이루어질 연구에서는 전체 조립품의 유한요소해석 및 축소모형 실험을 통해 동특성을 확인하고 상사성을 적용하여, 실제 원자로의 동특성을 예측 및 확인 후 이 자료를 바탕으로 APR1400 경수로 원자로의 내진 해석을 진행하게 된다.

### 후 기

본 연구는 한국원자력안전기술원의 지원을 받아 이루어졌으며 관계자 여러분들께 감사 드립니다.