

## SMART 원자로 제어봉 구동 장치의 동특성해석<sup>§</sup>

이장원<sup>\*\*</sup>, 조상순<sup>\*</sup>, 김동옥<sup>\*</sup>, 박진석<sup>\*</sup>, 이원재<sup>\*</sup>

\* 한국원자력연구원

### Dynamic Characteristics on the CRDM of SMART Reactor

Jang-Won Lee<sup>†\*</sup>, Sang Soon Cho<sup>\*</sup>, Dong-Ok Kim<sup>\*</sup>, Jin Seok Park<sup>\*</sup> and Won Jae Lee<sup>\*</sup>

\* Korea Atomic Energy Research Institutes

(Received March 15, 2010 ; Revised July 1, 2010 ; Accepted July 5, 2010)

**Key Words:** SMART(중소형일체형원자로), CRDM(제어봉 구동 장치), Dynamic Analysis(동특성해석), Lumped Mass(집중질량), Model Updating(모델 보정), Optimization(최적화)

**초록:** 한국원자력연구원은 전력생산과 해수담수화를 동시에 수행하고 친환경적인 SMART 원자로를 개발하였다. SMART 원자로의 여러 구조물 중에 제어봉 구동 장치(CRDM)는 제어봉의 삽입량을 조절하여 원자로의 출력을 조정하고 비상시 제어봉을 긴급 삽입하여 원자로를 정지시키기 위한 기기이다. 본 연구의 목적은 제어봉 구동 장치의 구조적 건전성을 확보하기 위해서 동특성해석을 수행하는 것이다. 또한 향후 내진해석에 활용될 단순모델의 활용을 위해 상세모델과의 비교, 검증을 수행하였다. 해석은 유한요소 해석기법을 활용하였고 상용해석 프로그램인 ABAQUS 와 ANSYS V12 를 사용하였다. 유한요소 해석모델은 상세모델인 3-D Solid 모델과 단순모델인 Beam 모델을 작성하여 비교하였고 추가로 단순모델을 오일러 보인 Beam4 요소와 티모센코 보인 Beam188 요소로 작성하여 비교 검토하였다. 향후 SMART 원자로집합체의 단순모델을 작성하여 내진해석 등 다양한 해석에 활용될 계획이므로 단순모델은 상세모델과의 오차를 줄이기 위해서 모델 보정(model updating)이 수행되었다.

**Abstract:** The Korea Atomic Energy Research Institutes has been developing the SMART (System integrated Modular Advanced ReacTor), an environment-friendly nuclear reactor for the generation of electricity and to perform desalination. SMART reactors can be exposed to various external and internal loads caused by seismic and coolant flows. The CRDM(control rod drive mechanism), one of structures of the SMART, is a component which is adjusting inserting amount of a control rod, controlling output of reactor power and in an emergency situation, inserting a control rod to stop the reactor. The purpose of this research is performing the analysis of dynamic characteristic to ensure safety and integrity of structure of CRDM. This paper presents two FE-models, 3-D solid model and simplified Beam model of the CRDM in the coolant, and then compared the results of the dynamic characteristic about the two FE-models using a commercial Finite Element tool, ABAQUS CAE V6.8 and ANSYS V12. Beam 4 and beam 188 of simplified-model were also compared each other. And simplified model is updated for accuracy compare to 3-D solid.

### 1. 서론

SMART 원자로는 한국원자력연구원이 개발하고 있는 일체형 원자로로서 전력생산과 해수담수화를 동시에 수행하는 친환경적인 원자로이다. SMART 원자로의 가동 수명기간 동안 외부의 지진하중과 내부의 유동하중에 노출되므로 동특성해석을 통한 건전성 검토가 필요하다.

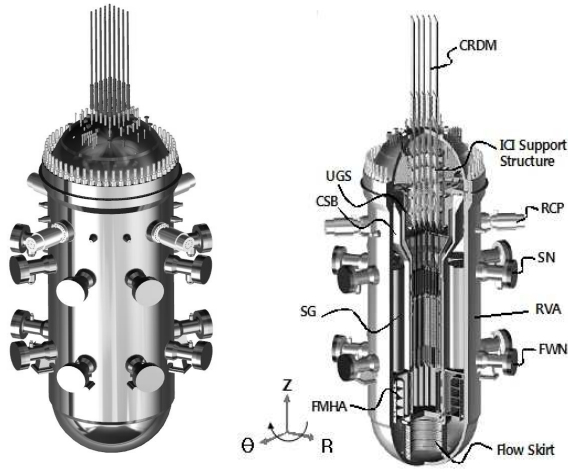
SMART 원자로의 내·외부의 형상은 Fig. 1 에 제시하였다. SMART 원자로의 제어봉 구동장치는 제어봉의 삽입량을 조절하여 원자로 출력을 제어하고 비상시에 제어봉을 긴급 삽입하여 원자로를 정지시키는 기기이다.

제어봉 구동장치의 유한요소 해석모델은 구조물 형태를 상세하게 기술하여 작성하는 상세모델과 개략적인 형상을 기초로 작성하는 단순모델로 구분할 수 있다. 구조물의 해석에 상세모델을 이용하는 경우 구조물 전체의 거시적인 특징과 국부적인 특성을 매우 높은 정밀도를 가지고 동시에 계산할 수 있다. 그러나 모델의 작성과 해석에 많은 시간이 소요되므로 복잡한 구조물의

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 춘계학술대회(2010. 3. 4.-5., 서울대) 발표논문임.

† Corresponding Author, jwlee@kaeri.re.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers



(a) External configuration (b) Internal configuration

**Fig. 1** Configurations of SMART Reactor

거시적인 특성을 파악하기 위한 해석 모델에는 상세모델보다 단순모델을 이용하는 것이 보다 효율적이라 하겠다. 특히 원자로집합체 전체의 모델은 매우 복잡하고 많은 구조로 결합되어있고 또한 냉각재를 포함하고 있어 내진해석등 다양한 해석에 활용하기 위해서는 원자로집합체를 단순화하여 작성한 해석모델의 개발이 필요하다.

본 논문에는 제어봉 구동 장치의 상세모델과 단순모델의 동특성 결과를 비교하고 단순모델의 보정을 통해 SMART원자로 제어봉 구동 장치의 단순모델의 개발과 동특성해석 방법론에 대한 고찰 결과를 기술하였다.

## 2. 제어봉 구동 장치 상세 유한요소모델

### 2.1 제어봉 구동 장치 3D 상세 모델링

본 논문에서 고려하고 있는 제어봉 구동 장치의 3D 모델은 Fig. 2(a)에 제시하였다.

제어봉 구동 장치의 구성은 크게 하우징과 코일 집합체로 나뉘며, 하우징은 다시 제어봉 구동 장치 상부를 구성하는 봉 이송 하우징과 하부에 래치 집합체를 포함하고 있는 래치 하우징으로 나뉜다. Fig. 2(b)는 ABAQUS V6.8를 활용한 제어봉 구동 장치의 해석모델을 제시한 그림이다. 일반적으로 유체의 모델링은 구조재 주변 유체의 부가질량을 반영하여 구조재에 적용하는 방법과 유체 요소를 직접 모델링 하여 고체-유체 연성해석을 수행하는 방법이 있는데, 본 논문에서는 구조재주변의 유체 부가질량을 구조재에 적용하였다.



(a) 3D solid model (b) 3D solid FE model

**Fig. 2** 3D model & FE model of the CRMD

등가밀도는 내부유체의 부가질량을 고려해 전체의 부피로 나눈 값을 각 부분별로 적용한다. 봉 이송 하우징과 래치 하우징은 스테인리스스틸(SS403)재료로, 냉각재는 물의 밀도 값을 적용하였다. 유체 부가질량은 각각 봉 이송 하우징과 래치 하우징 그리고 코일 집합체의 부피로 나누어 등가 밀도를 계산하여 적용한다.

해석은 상세모델의 경우 요소를 3D 육면체요소를 활용하였고, 경계조건은 제어봉 구동장치의 하단을 고정하였다. 하단을 고정한 이유는 SMART 원자로집합체와 제어봉동장치의 조립상태를 반영하여 모사하였기 때문이다.

### 2.2 3D 상세 모델의 유한요소 해석결과

제어봉 구동 장치 상세모델의 동특성해석은 상용 구조해석 프로그램인 ABAQUS V6.8을 이용하였고 solver는 block lanczos method를 사용하였다.<sup>(3)</sup> 해석결과 제어봉 구동 장치의 고유진동수와 진동 모드를 추출하였고 제어봉 구동 장치의 모드형상은 저 차로부터 12개를 Fig. 3에 제시하였다. 12개의 모드에는 굽힘 모드와 비틀림 모드가 주요 진

동모드로 존재한다. 또한 Table 1 은 제어봉 구동 장치의 12 개의 주요 고유진동수와 유효질량에 대한 결과를 보여준다. 12 차 모드 이내에서 X 와 Z 방향의 유효질량이 대부분 추출되었다. 9 번째 모드와 10 번째 모드에서 유효질량은 X,Y,Z 방향에서 각각 0 이며 ROTY 에서 각각 1.75e6, 4.84e6 을 확인하여 이 모드가 회전, 비틀림 모드임을 확인하였다. 모드형상은 확장된 것처럼 보이나 이는 Scale factor 를 크게 표현한 것이며 모드형상을 애니메이션으로 확인한 결과 비틀림 모드임을 확인하였다.

### 3. 제어봉 구동 장치의 단순 유한요소모델

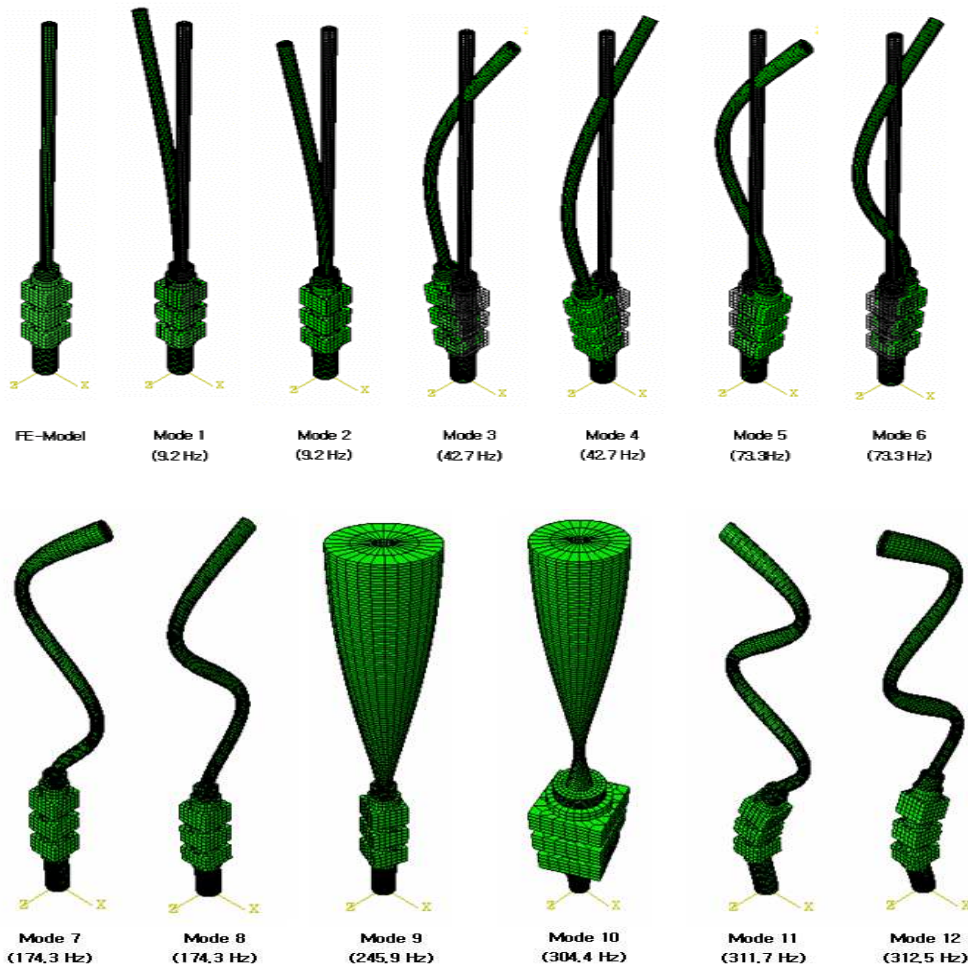
#### 3.1 제어봉 구동 장치 단순모델링

원자로집합체와 같은 복잡한 구조물의 해석모델은 상세모델을 단순화시켜야 해석결과를 설계시간에 맞추어 반영할 수 있다. 제어봉 구동 장치의

단순 해석모델은 간략화 방법을 이용하여 해석모델을 크게 구조재와 비구조재로 나누어 가정하였

**Table 1** Natural frequencies and mode shapes of CRDM

Mode	Natural Frequency (Hz)	Effective mass (kg)			mode description
		X	Y	Z	
1	9.2	95.40	0	0	1st bending
2	9.2	0	0	95.3	
3	42.7	304.6	0	0	2nd bending
4	42.7	0	0	304.7	
5	73.3	116.1	0	0	3rd bending
6	73.3	0	0	116.3	
7	174.3	16.3	0	0	4th bending
8	174.3	0	0	16.3	
9	245.9	0	0	0	1st torsion
10	304.4	0	0	0	2nd torsion
11	311.7	49.0	0	0	5th bending
12	312.5	0	0	47.7	



**Fig. 3** Natural frequencies and mode shapes of CRDM from 3D solid model

다. 구조재는 해석모델의 모드형상에 영향을 줄 수 있는 부재로 하우징이 이에 해당하며 하우징은 제어봉 구동 장치 상부를 구성하는 봉 이송 하우징과 하부의 래치집합체를 포함하고 있는 래치 하우징으로 나누어 모델링 하였다. 반면, 비구조재는 집중질량으로 가정하며 코일집합체가 이에 해당한다. 본 논문에서는 ANSYS V12 를 활용하여 제어봉 구동 장치를 모드형상에 영향을 주며 압력경계를 이루는 봉 이송 하우징과 래치 하우징은 beam 요소로 단순화하여 모델링 하였고, 비구조재인 코일 집합체는 집중질량으로 가정하여 유한요소 해석모델을 완성하였다.

해석모델의 작성은 제어봉 구동 장치의 대표적인 단면형상을 기준으로 유한요소모델을 작성하였다. 단순모델은 ANSYS 요소 형태 중 3 차원 beam4 요소 모델과 beam188 요소 모델을 비교하였다. beam 4 요소는 오일러보(Euler beam)이고 beam188 요소는 티모셴코보(Timoshenko beam)이다. 진단변형의 영향을 고려한 티모셴코보의 경우 두 겹고 짧은 부재의 해석에 보다 정확한 결과를 도출한다.<sup>(3)</sup>

제어봉 구동 장치의 하우징은 제어봉 구동 장치 압력경계를 구성하는 하우징의 내경과 외경, 그리고 단면의 형상이 불연속 되는 지점의 높이정보에 기초하여 제어봉 구동 장치 형상단순화 작업을 수행한다. 제어봉 구동 장치의 하우징을 총 9 개의 단면형태로 분류하고 각 단면의 위치와 단면을 구성하는 주요부품의 치수 그리고 단면을 대표하는 등가밀도를 구하였다.

불연속 단면을 기준으로 제어봉 구동장치의 구역을 나누어서 각 구역 별로 치수와 질량을 결정한다. 등가밀도는 내부유체에 의한 질량을 고려해 전체의 부피로 나눈 값을 각 부분별로 적용한다.

유한요소 해석모델의 총 절점수는 52 개이며 51 개의 beam 요소와 3 개의 집중질량요소로 구성하였다. 해석모델의 총 질량은 637kg 이다. 경계조건은 하단을 완전 고정 하였다. 경계조건은 SMART 원자로집합체와 제어봉 구동 장치의 조립상태를 고려하여 하단을 고정한 것으로 가정하였다.

### 3.2 단순모델의 유한요소해석결과

일반적으로 지진하중은 33Hz 이내에서 원자로집합체에 지배적인 영향을 준다.<sup>(4)</sup> 따라서, 제어봉 구동 장치의 동특성해석 결과 저 차로부터 12 개의 고유진동수와 진동모드를 구하였다. 동특성해석 solver 는 block lanczos method 를 사용하였다. Table 2 는 티모셴코보와 오일러보의 단순모델과 3D 상

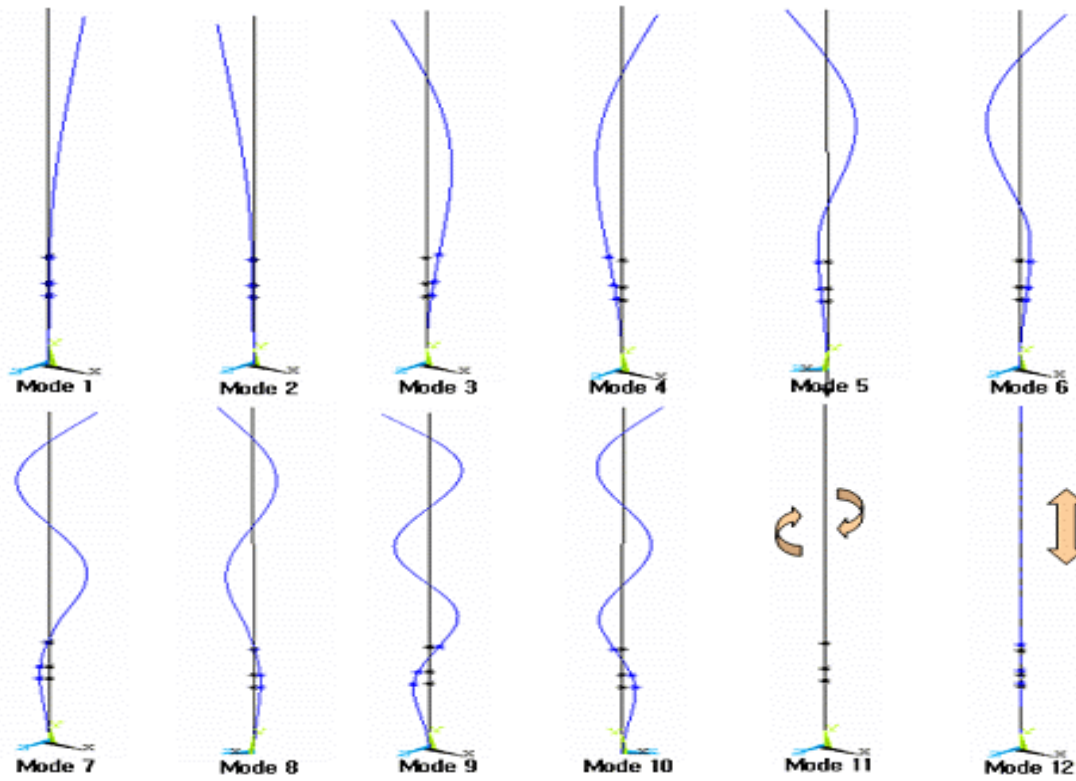
세 해석모델에 대한 고유진동수 결과를 비교 정리한 표이다. 또한 티모셴코보와 상세모델의 오차와 오일러보와 상세모델의 오차를 비교 정리하였다. 고유진동수는 굽힘모드가 주로 나타나는 8 개의 진동모드를 비교하였다. 제어봉 구동 장치의 모드형상을 추출한 결과는 굽힘모드, 비틀림모드와 인장-압축모드 등이 존재하며 Fig. 4 에 제시하였다. Fig. 4(a)는 티모셴코보 모델을 활용한 결과이며 굽힘 모드와 비틀림 모드, 압축-인장 모드 등이 나타났다. Fig. 4(b)는 오일러보 모델을 활용한 결과이며 역시 저 차 12 개 모드에서 굽힘 모드, 비틀림 모드, 압축과 인장 모드가 확인되었다. 여기서 비틀림 효과를 반영하는 티모셴코보 모델의 경우 비틀림 강성이 반영되어 비틀림 모드에 대한 고유진동수가 오일러보 모델 대비 고차에서 확인 됨을 알 수 있다. 1 차 비틀림 모드는 티모셴코보 모델의 경우 249 Hz 에서 나타나며, 오일러보 모델은 228 Hz 에서 나타난다.

## 4. 유한요소 해석 모델보정

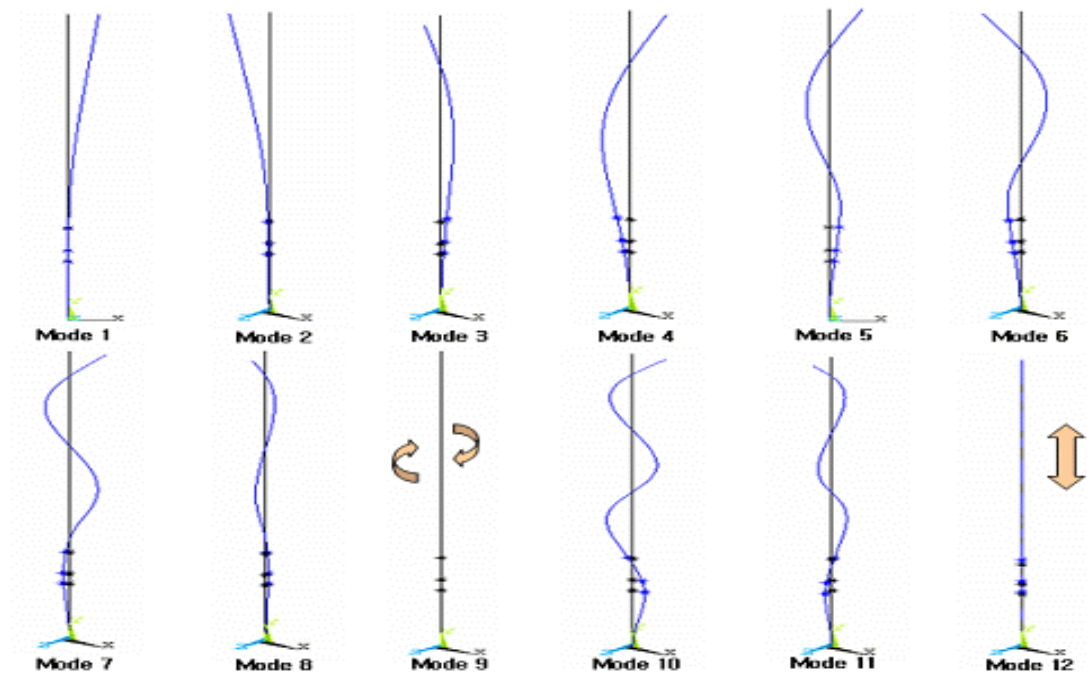
일반적으로 상세모델(3-D solid model)은 정확도가 다소 높은 장점이 있으나 많은 자유도를 가지며 계산시간이 길어서 설계 변경의 반영이 용이하지 않은 단점이 있다. 하지만, 단순모델(Simplified model, skeleton)은 계산시간이 짧고 적은 자유도를 가지며 설계변경에 대한 해석 적용이 용이한 장점이 있으나 모델의 정확도가 다소 낮다. 그러므로 향후 수행되는 내진해석과 구조해석 등의 정확도를 위해 단순 유한요소모델을 보정(Updating) 하는 과정은 필요하다.

Table 2 Natural frequency comparison

Mode	티모셴코보 (Hz)	오일러보 (Hz)	3D Solid Model (Hz)	티모셴코보/3D Solid 오차(%)	오일러보/3D Solid 오차(%)
1	9.30	8.40	9.20	1.10	8.70
2	9.30	8.40	9.20	1.10	8.70
3	38.20	37.80	42.70	-10.50	11.50
4	38.20	37.80	42.70	-10.50	11.50
5	75.00	73.70	73.30	2.30	0.50
6	75.00	73.70	73.30	2.30	0.50
7	165.20	158.80	174.30	-5.20	8.90
8	165.20	158.80	174.30	-5.20	8.90



(a) Analysis results of beam 188 element (Timoshenko beam)



(b) Analysis results of beam 4 element (Euler beam)

Fig. 4 Mode shapes of simplified model of CRDM

**Table 3** Parameters of CRDM before and after updating for simplified Beam 188(Timoshenko Beam) model

Parameters Updated	Initial values	Updated values	Change (%)
Elastic modulus	210 GPa	215 GPa	2.3
Mass of movable coil	77.03 kg	104.57 kg	26.3
Mass of stationary coil	77.03 kg	117.66 kg	34.5
Mass of lift coil	85.58 kg	17.18 kg	79.9
Mass of coil assembly	239.6 kg	239.4 kg	0.1

**Table 4** Natural frequency of initial simplified FE model, updated model and detailed 3D solid model

Mode	티모센코 보 Beam 188 initial (Hz)	티모센코 보 Beam 188 updated(Hz)	3D Solid Model (Hz)	Initial model/Solid 오차(%)	Updated model/Solid 오차(%)
1	9.30	9.27	9.20	1.10	0.80
2	9.30	9.27	9.20	1.10	0.80
3	38.20	40.31	42.70	10.50	5.60
4	38.20	40.31	42.70	10.50	5.60
5	75.00	76.99	73.30	2.30	4.80
6	75.00	76.99	73.30	2.30	4.80

일반적으로 모델보정은 수치적인 해석 값과 실험값의 오차를 최소화 프로그램을 통하여 최소화하는 과정이다.<sup>(5)</sup>

본 연구에서 사용한 최적설계 알고리즘은 근사화법 중의 하나인 sub-problem approximation 기법을 채택하였다. Sub-problem approximation 기법은 종속변수(목적함수와 상태변수)의 도함수가 아닌 오직 그 값만을 필요한 영계법(zero-order method)을 개선한 것이다. 먼저 종속변수는 최소자승적합(least squares fit)에 의해 근사화되고, 제약최소화 문제는 벌칙함수(penalty function)를 이용하여 비제약 문제로 전환된다. 그리고 최소화는 근사화되고 벌칙화된 함수가 수렴할 때까지 반복수행한다.<sup>(6)</sup> 목적함수와 변수제한은 다음 식 (1) 과 같다. 식 (1)의 내용은 탄성계수와  $m_1, m_2, m_3$  를 변수로 가정하고 고유진동수 값의 차이를 최소로 하는 변수를 결정한다. 여기서 질량  $m_1, m_2, m_3$  는 변수 이나 질량의 총합은 보존한다.

$$\min \Pi(E, m_1, m_2, m_3) = \frac{\sum \gamma_i (f_i - f_i^0)^2}{\sum \gamma_i (f_i^0)^2} \quad (1)$$

*Lower Limit*  $\leq E, m_1, m_2, m_3 \leq$  *Upper Limit*  
subjected to  $0.999M \leq m_1 + m_2 + m_3 \leq M$

여기서, E 는 탄성계수 이고  $m_1$  는 movable coil 의 질량,  $m_2$  는 stationary coil 의 질량,  $m_3$  는 lift coil 의 질량이고 M 은 세 부품의 총 질량이다. 최적화 수행시 식 (1)과 같이 Lower limit 과 Upper limit 을 기입해야 하며, 질량의 편차는 추후 Reactor vessel 에 반영하여 모델을 완성한다. 그리고  $f_i^0$  는 3D 모델의 고유진동수,  $f_i$  는 initial model 의 고유진동수 이며  $\gamma_i$  는 가중치(weight factor)이다. 또한,  $\Pi$  는 목적함수를 나타낸다.

단순유한요소 해석모델은 각 변수를 변경하여 목적함수인 식 (1)를 최소화 한 결과 Table 3 과 같이 유한요소 모델이 보정되었다. 그리고 Table 4 에서, 초기해석모델(Initial simplified FE model)의 결과는 상세 유한요소 모델과 최대 10.5% 오차가 발생하였으나 보정된 단순 유한요소 해석 결과는 최대 5.6% 이내의 정확도를 확인하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 SMART 원자로를 구성하는 제어봉 구동 장치의 유한요소모델을 작성하고 동특성 해석의 수행결과를 기술하였다. 유한요소해석은 상세유한요소모델인 solid 모델과 단순유한요소모델인 beam 모델을 비교하였다. 해석은 상용유한요소 해석프로그램인 ABAQUS V6.8 과 ANSYS V12 를 활용하였고 단순모델은 티모센코보와 오일러보 두 모델이 사용되었다. 동특성해석 결과 제어봉 구동 장치의 중요 고유진동수를 살펴보면, 오일러보 모델은 8.4 Hz, 37.8 Hz, 73.7 Hz, 158.8 Hz 이고, 티모센코보 모델은 9.3 Hz, 38.2 Hz, 75.0 Hz, 165.2 Hz 등이며 이들은 제어봉 구동 장치의 굽힘과 비틀림, 인장-압축 등의 진동모드이다. 또한, 향후 SMART 원자로 전체를 유한요소기법으로 모델링 할 경우 해석의 목적에 따라 단순유한요소 해석모델을 구성할 수 있다. 이를 위해서 해석모델의 모델보정에 대한 방법을 고찰하였다.

본 연구에서는 제어봉 구동 장치의 유한요소모델을 완성하였고 동특성해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 상세 유한요소모델과 단순유한요소모델을 비교한 결과 사용목적에 따라서

두 개의 해석모델 중 선택하여 활용 가능하며 모델보정기법을 통해 정확한 단순모델 작성이 가능함을 확인하였다. 그리고 SMART 원자로 제어봉 구동장치의 고유진동수와 모드 형상을 얻었다. 이 결과는 향후 SMART 원자로 설계개선과 성능향상의 연구에 활용이 가능하다.

### 후 기

본 연구는 교육과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- (1) Kim, D. O., Kim, J. I., Kim, J. H., Huh, H. and Park, J. S., 2001, "Equivalent Bending Stiffness of Discontinuous Beam with Periodic Cross Sections for Dynamic Analysis of SMART CEDM," *Korea Nuclear Society conference*.
- (2) Kim, T. W., Park, K. B., Jeong, K. H., Lee, K. M. and Choi, S., 2001, "Dynamic Characteristics of the Integral Reactor SMART," *Journal of the Korean Nuclear Society*, Vol. 33, No. 1, pp.111~120.
- (3) ANSYS, Inc., 2007, "ANSYS Command Reference," ANSYS Inc., pp. 1013~1017.
- (4) US NRC Regulatory Guide 1.60 Rev.01, 1973
- (5) Kim, G. H. and Park, Y. S., 2004, "An Improved Updating Parameter Selection Method and Finite Element Model Update Using Multi Objective Optimization Technique," *Journal of Mechanical System and Signal Processing*, Vol. 18, No. 1, pp. 59~78.
- (6) Choi, Y. J. and Lee, Y. S., 2003, "Optimization for the Nuclear Fuel Irradiation Capsule Under Thermal Loading," *Spring Conference of the Korean Society of Mechanical Engineers(KSME)*.