2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

SMART 증기발생기 카세트 동특성 해석

Dynamic Analysis of SMART Steam Generator Cassette

김동옥, 김용완, 김종인, 장문희
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

일체형원자로 SMART의 증기발생기는 상용로와 달리 원자로 내벽에 매달린 형태로 설치되며 총 12개의 증기발생기 카세트가 사용된다. 원자로 구조물에 사용되는 모든 기기는 운전중 받게되는 다양한 하중에 대해 구조적 건전성을 확보하여야 한다. 일체형원자로 SMART의 기본설계과정에서는 기기의 유한요소모델과 거시적 동특성을 이용해 각종 동하중에 대한 기기의 구조적 건전성을 확인하였다. 본 연구에서는 여러 단계를 거쳐 증기발생기 카세트의 거시적 동특성해석을 위한 매우 단순한 형태의 유한요소모델을 개발하고 동특성해석에 사용하여 유용한 결과를 얻었다. 개발된 유한요소모델은 증기발생기 카세트의 동특성을 정확히 기술할 뿐만 아니라 매우 단순한 형태를 하고 있어 원자로 전체의 유한요소모델 구성 시 매우 효율적으로 사용될 수 있다.

Abstract

Integral reactor SMART has hanging twelve steam generator cassettes on its inside wall of the reactor vessel. It is important for designing of main components of reactor structure to secure structural safety against all sorts of load. Using FE model and macroscopic dynamics, the structural safety of SG cassette are studied in the basic design stage of SMART. In this study, very simple FE model is developed through three steps, and the final model gives very useful analysis results. Although the final FE model is very simple, the dynamic analysis with it gives accurate dynamic characteristics of steam generator cassette. And since the model is very simple, one can develope a full FE model of the reactor assembley with relatively small degree of freedom.

1. 서 론

원자력발전소를 비롯한 모든 원자력 구조물은 고유의 위험성으로 인해 설계 및 제작 시 매우 높은 안전성을 확보하는 것이 바람직하며 각종 엄격한 규정을 통해 안전성을 보장하도록 되어 있다. 복잡한 구조물 혹은 대형구조물의 경우 시험용 구조물의 제작이 용이하지 못하므로 수학적 모델을 사용하는 유한요소해석법의 이용이 보다 일반적이고 경제적인 방법이다. 단순하면서도 증기발생기의 거시적 거동 및 응답특성을 효과적으로 모사할 수 있는 증기발생기 유한요소 해석모델을 개발하였다[1]. 모델개발과정은 총 세 단계로 이루어졌다. 첫 단계에서는 증기발생기 형상을 최대한 단순화한 초기 해석모델을 작성하고 동특성 해석을 통해 모델의 문제점을 파악하였다. 두 번째 단계에서는 파악된 문제점을 바탕으로 증기발생기의 상세 해석모델을 개발하고 해석하여 증기발생기 및 모델의 특성을 분석하였다. 마지막 단계에서는 상세모델의 해석결과를 바탕으로 매우 단순한 형태의 3차원 단순유한요소모델을 개발하였다.

2. 증기발생기 카세트 유한요소모델

(1) 증기발생기 카세트 2차원 단순모델

증기발생기의 형상단순화를 거쳐 매우 단순한 형태의 2차원 유한요소모델을 작성하고 동특성 해석을 통해 모델의 문제점을 분석하였다. 증기발생기 주요부를 중심으로 증기발생기의 개략도를 그리고 이를 바탕으로 증기발생기의 단순화된 2차원 유한요소모델을 구성하였다[2]. 그림 ?은 증기발생기로부터 개략도 그리고 단순모델을 작성하는 단계를 개념적으로 보여주는 그림이다. 그림 ?의 2차원 단순모델에 표시된 숫자는 유한요소모델의 절점번호로 총 10개의 절점이 사용되었다. 유한요소모델을 구성하는 요소로는 2차원 보요소와 집중질량 및 회전관성체요소 그리고 강체요소가 사용되었다.

작성된 증기발생기 카세트의 2차원 단순모델을 이용해 동특성 해석을 수행하였다. 해석에는 상용 코드인 ABAQUS를 사용하였다. 표 ?에 해석에서 구한 증기발생기의 저차 고유진동수를 정리하였다. 증기발생기 단순모델을 이용해 구한 저차 모드의 진동모드형을 그림 ?에 수록하였다.

표 1 증기발생기 카세트 2차원 단순유한요소모델 해석결과

모드번호	고유진동수 [Hz]
1	57.6
2	31.9
3	638
4	1642

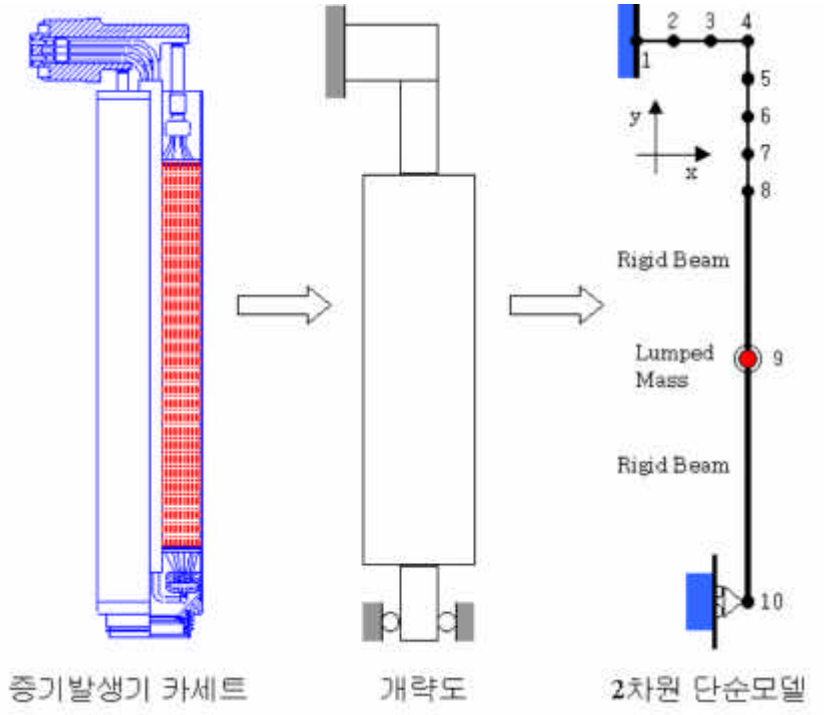


그림 1 증기발생기 카세트 2차원 단순유한요소모델 작성과정

이러한 해석결과를 신뢰할 경우 본 증기발생기는 운전 중 공진이 발생할 가능성이 있다고 판단된다. 그러나 증기발생기 2차원 단순모델은 많은 단순화를 거쳐 작성되었으므로 현재의 해석결과를 바탕으로 보다 상세한 모델을 작성하고 재해석한 결과의 검토를 통해 문제점을 분석해야 할 것이다.

2차원 모델에서 표현되지 않는 특성을 관찰하기 위해 3차원 상세유한요소모델을 작성하도록 하며 단순모델을 이용한 결과에서 진동 중 변형이 심각히 발생하는 부분의 모델을 보다 상세히 작성한다. 해석을 통해 구한 모든 진동모드형에서 모듈증기관부에 심각한 굽힘이 발생하는 것을 볼 수 있다. 단순모델에서는 총 6개로 이루어진 모듈증기관부를 단일 관으로 모델링 하였으므로 모델의 굽힘강성은 실제 값보다 매우 작을 것이다. 모듈증기관부의 진동을 보다 상세히 묘사하기 위해 각 모듈증기관을 독립적으로 모델링 한다. 단순모델 해석을 통해 구한 두개의 저차 모드에서 전열관집합체부는 병진운동과 회전운동을 한다. 이는 전열관의 질량과 회전관성이 고유진동수와 밀접한 관계가 있다는 것을 의미한다. 그러므로 개선된 모델에서는 전열관집합체부의 총 질량과 회전관성역시 보다 정확한 값을 사용하도록 한다. 다음 장에서는 이러한 점을 고려하여 증기발생기의 거시적 동특성 해석을 위한 3차원 유한요소모델을 작성하였다.

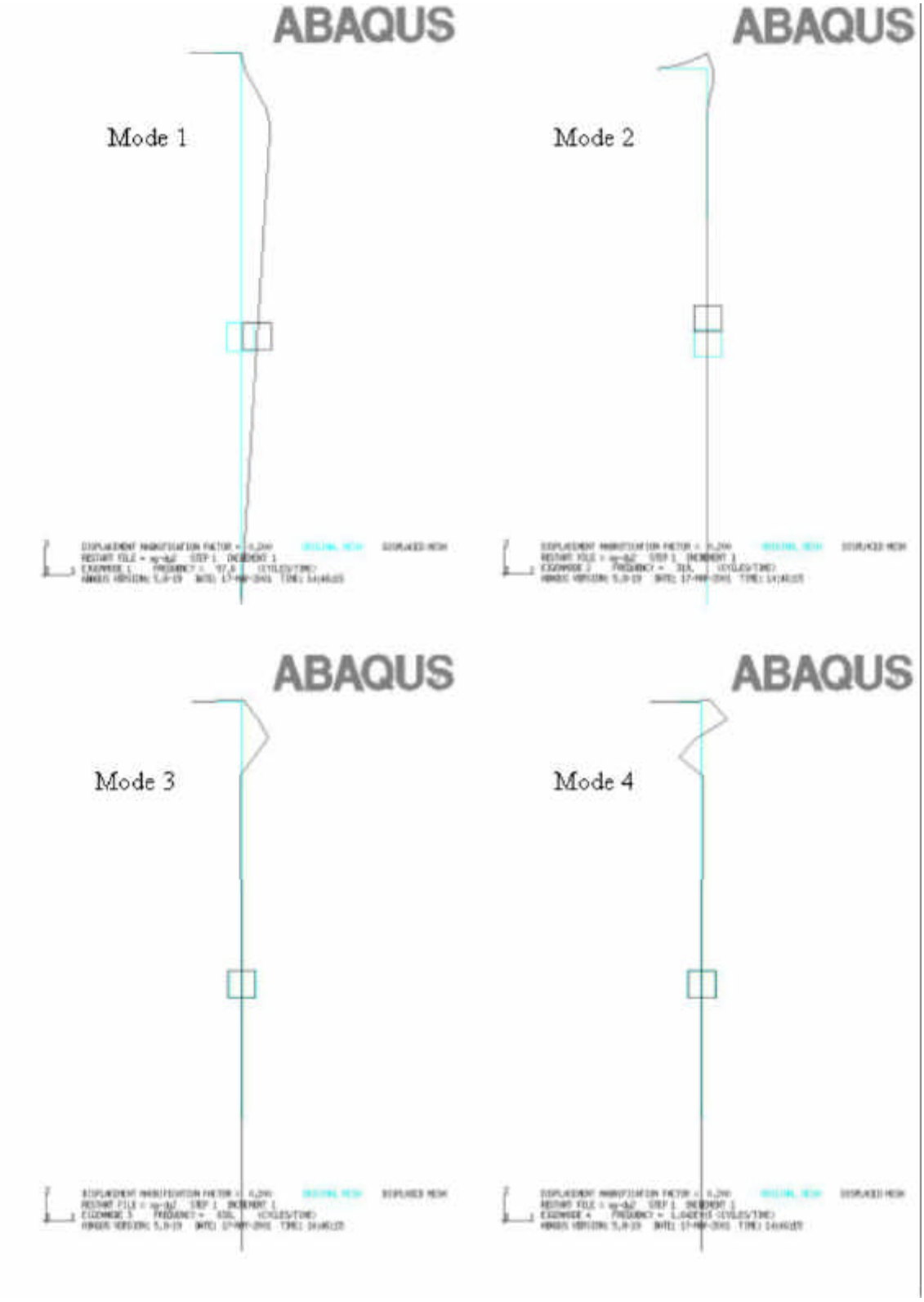
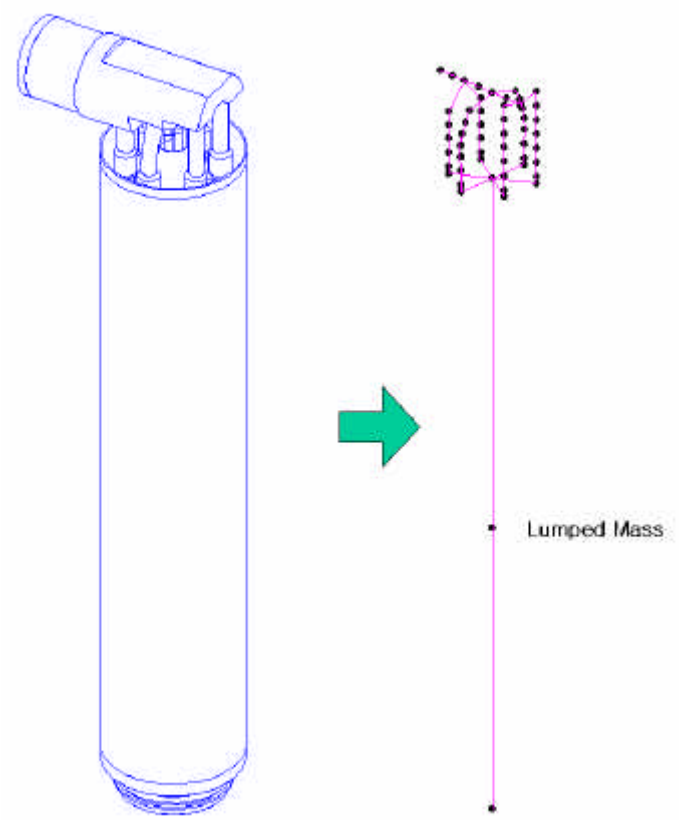


그림 2 증기발생기 카세트 2차원 단순유한요소모델 진동모드

(2) 증기발생기 카세트 3차원 상세모델

SMART 증기발생기 카세트의 각 부분 형상과 물성치를 바탕으로 그림 ?와 같은 동특성 해석을 위한 3차원 유한요소모델을 작성한다.



증기발생기 카세트　　3차원 상세 유한요소모델

그림 3 증기발생기 카세트와 동특성 해석을 위한
3차원 상세유한요소모델

증기발생기는 질량과 굽힘강성이 매우 큰 전열관집합체부가 강성이 비교적 적은 모듈증기관들을 통해 강성이 매우 큰 카세트노즐에 매달린 구조라고 할 수 있다. 이러한 증기발생기의 구조적 특성을 반영하여 증기발생기의 3차원 유한요소모델을 작성한다. 전열관집합체부는 집중질량체로 모델링하며 모듈증기관부는 가능한 자세히 그 형상을 모사하여 모델링하였다. 카세트노즐부는 굽힘강성을 상세히 하는 방향으로 모델링하였다. 전열관집합체부는 인접한 구조에 비하여 질량 및 강성이 매우 크다고 가정하여 집중질량과 회전강성체로 모델링하였다.

상용 프로그램인 ABAQUS를 이용해 증기발생기 3차원 상세유한요소모델의 고유진동수 및 고유모드를 계산하였다. 각 모드의 진동형은 그림 ?부터 그림 ?에 수록하였다. 각 그림

에서 좌측은 입체도이고 우측은 증기발생기를 위에서 본 평면도로 모듈증기관의 진동형을 보이기 위한 것이다. 첫번째 모드는 전열관집합체가 비틀림 진동하는 모드이고 두번째부터 네번째 모드는 각각 전열관집합체부가 좌우(X_2방향), 전후(X_3방향), 상하(X_2방향)로 진동하는 모드이다. 또한 이중에서 세번째 모드는 카세트노즐부가 비틀림진동을 하는 모드이며 네번째 모드는 상하로 굽힘진동하는 모드이다. 다섯번째 모드는 카세트노즐부가 좌우로 굽힘진동하는 모드이며 여섯번째 모드는 모듈증기관부에서 국부진동이 발생한 모드이다.

증기발생기의 3차원 유한요소모델을 사용한 결과와 2차원 단순모델을 사용한 결과를 비교하였다. 각 해석결과에서 진동모드의 형상을 기준으로 한 고유진동수의 비교결과를 표 ?에 기록하였다.

표 2 증기발생기 3차원 상세모델과 2차원 단순모델의 결과 비교

진동형상		2차원 단순모델		3차원 상세모델	
		모드	고유진동수 [Hz]	모드	고유진동수 [Hz]
전열관 집합체	비틀림진동	-	-	1	45.1
	X_1방향 병진동	1	57.6	2	92.7
	X_3방향 병진동	-	-	3	99.0
	X_2방향 병진동	2	319	4	185
카세트노즐	X_3방향 굽힘진동	-	-	5	780
모듈증기관	국부 굽힘진동	3	638	6	953

고유진동수 측면에서 보면 전열관집합체의 좌우진동의 경우 3차원 모델의 결과가 2차원 단순모델의 결과보다 높은 진동수를 보이고 있다. 이는 2차원 단순모델에서 모듈증기관부의 통합굽힘강성이 실제보다 매우 낮게 설정되었기 때문이다. 동일한 단면을 갖는 총 여섯개의 모듈증기관이 중앙부에 집중되어 있다고 가정한 2차원 단순모델은 매우 부적절 했음을 알 수 있다. 증기발생기는 질량과 굽힘강성이 매우 큰 전열관집합체부가 강성이 비교적 적은 모듈증기관들을 통해 강성이 매우 큰 카세트노즐부에 매달린 구조라는 점을 고려하면 3차원 상세모델의 결과가 2차원 단순모델의 결과보다 실제 구조물의 특성을 보다 잘 기술하고 있음을 알 수 있다. 즉 증기발생기는 탄성체에 매달린 추와 같은 구조를 갖고 있으므로 증기발생기 전체의 거시적 동특성 역시 이와 유사한 형태를 갖게 된다. 탄성체에 매달린 추의 진동형태는 비틀림진동, 전후진동, 좌우진동, 상하진동이 된다는 것을 쉽게 알 수 있다. 3차원 상세모델의 처음 네 개 모드는 이러한 형상을 정확하고 빠짐없이 모사하고 있으며 2차원 단순모델보다 상세한 결과를 주고 있다. 3차원 상세모델을 이용하여 증기발생기 카세트의 거시적 통특성에 관한 자료를 확보하였다. 다음 절에서는 이를 바탕으로 새로이 증기발생기의 단순유한요소모델을 개발하였다.

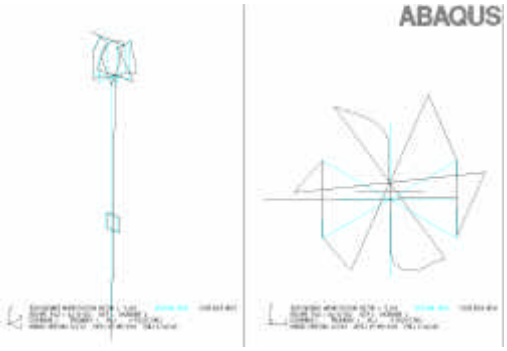


그림 4 증기발생기 카세트
상세유한요소모델 1차 진동모드

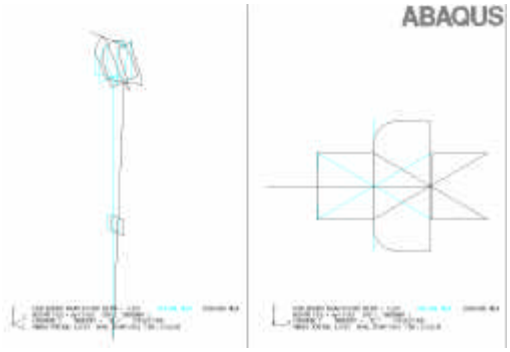


그림 5 증기발생기 카세트
상세유한요소모델 2차 진동모드

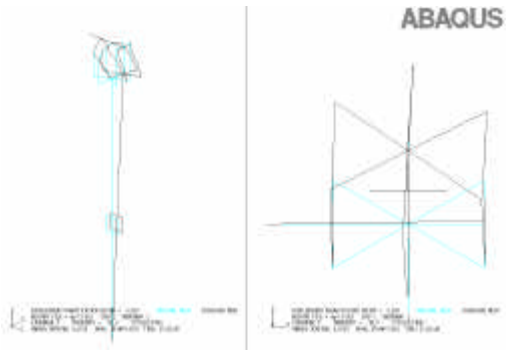


그림 6 증기발생기 카세트
상세유한요소모델 3차 진동모드

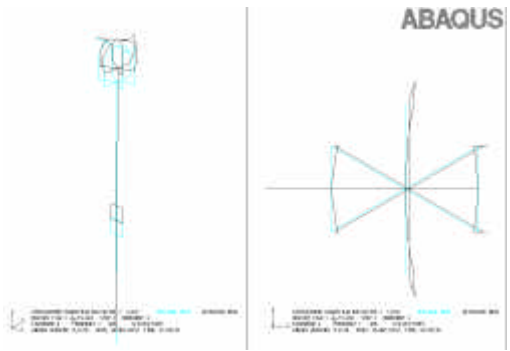


그림 7 증기발생기 카세트
상세유한요소모델 4차 진동모드

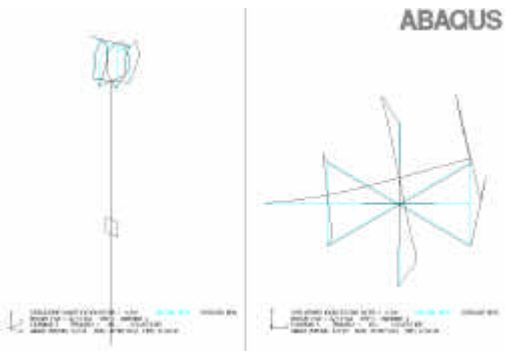


그림 8 증기발생기 카세트
상세유한요소모델 5차 진동모드

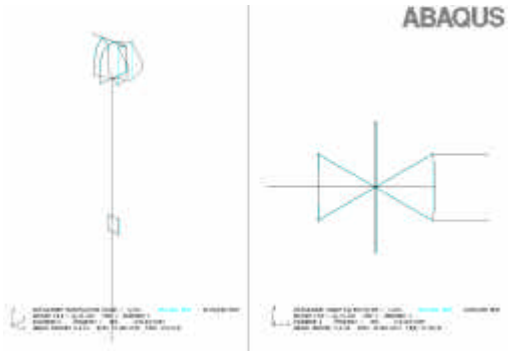


그림 9 증기발생기 카세트
상세유한요소모델 6차 진동모드

(3) 증기발생기 카세트 3차원 단순모델

3차원 상세유한요소모델과 해석결과를 바탕으로 매우 단순한 형태의 3차원 단순유한요소모델을 개발하였다. 이를 위하여 그림 ?와 같이 증기발생기 카세트의 형상을 나타내는 매우 단순한 모형을 작성하였다.

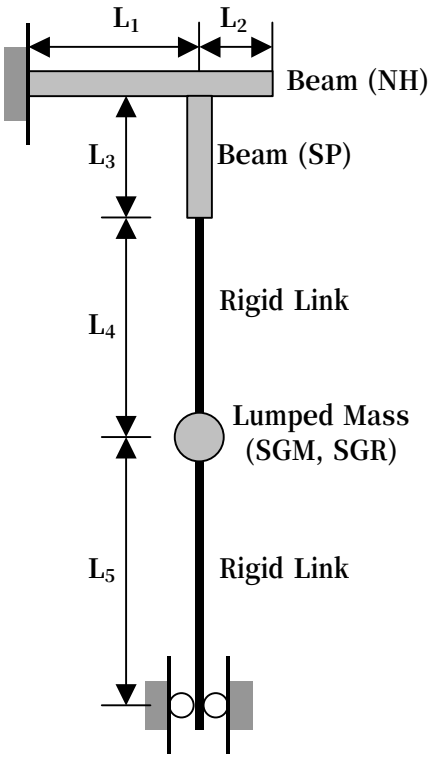


그림 10 증기발생기 카세트 단순모형

그림 ?에 표시된 증기발생기 카세트 단순모델 각 부분의 길이에 관한 정보는 표 ?에 정리하였다. 단순모형의 형상을 바탕으로 유한요소모델을 작성하고 보의 단면정보와 물성치는 앞장에서 기술한 상세모델의 자료에서 적합한 값을 선택하였다. 표 ?은 이를 정리한 것이다. 표 ?는 증기발생기 카세트 단순모델에서 전열관집합체와 외통부를 나타내기 위해 사용된 집중질량요소와 회전질량요소에 관한 내용을 정리한 것이다.

단순모델을 이용해 구한 고유진동수와 상세모델을 이용한 결과 그리고 그 차이를 표 ?에 정리하였다 저차 3개 모드의 경우 두 모델의 차이는 1%미만이며 전체적으로 그 차이는 수퍼센트 수준이다. 그러므로 증기발생기 카세트의 단순모델은 비교적 정확하게 증기발생기의 동특성을 나타낸다고 할 수 있다. 단순모델을 이용한 해석에서 구한 증기발생기 카세트의 진동모드를 그림 ?에 정리하였다. 그림에서 알 수 있듯이 단순모델을 이용해 구한 진동모드역시 상세모델을 이용해 구한 결과와 잘 일치하고 있다.

표 3 증기발생기 카세트 단순모델 각 부분의 길이 정보

부분	L1	L2	L3	L4	L5
길이 [m]	0.397	0.211	0.510	2.087	1.673

표 4 증기발생기 카세트 단순모델의 보요소 단면정보

ELEMENT SET	단면적 [m^2]	면적모멘트 [m^4]		탄성계수 [Pa]	전단계수 [Pa]	밀도 [kg/m^3]
NH	7.215E-02	I_{11}	9.95E-04	1.748E+11	6.882E+10	8207
		I_{12}	0			
		I_{22}	1.55E-03			
		J	2.55E-03			
SP	1.827E-02	I_{11}	1.47E-05	1.748E+11	6.882E+10	8207
		I_{12}	0			
		I_{22}	1.77E-05			
		J	1.05E-04			

표 5 증기발생기 카세트 단순모델 집중질량요소 및 회전질량요소

Elelement Set (Material Set)	질량 [kg]	관성모멘트 [kgm2]		
		I_{11}	I_{22}	I_{33}
SGM	2314	-	-	-
SGR	-	2899	171.6	2899

표 6 증기발생기 카세트 3차원 단순모델과 3차원 상세모델과의 해석결과 비교

모드번호	고유진도수 [Hz]		차이 [%]	진동형상
	상세모델	단순모델		
1	45.1	45.3	0.44	전열관집합체 X_2 방향 비틀림 진동
2	92.7	92.7	0.00	전열관집합체 X_1 방향 병진동
3	99.0	99.2	0.20	전열관집합체 X_3 방향 병진동
4	185	171	-7.57	전열관집합체 X_2 방향 병진동
5	780	727	-6.79	카세트노즐 X_3 방향 굽힙진동
6	953	925	-2.94	모듈증기관 국부진동

3. 결 론

본 연구에서는 일체형원자로 SMART에 사용되는 증기발생기 카세트의 유한요소모델을 개발하고 거시적 동특성해석에 사용하였다. 모델 개발과정에서는 최종 모델인 3차원 단순 유한요소모델을 작성하기에 앞서 2차원 단순모델과 3차원 상세모델을 먼저 작성하고 해석

하여 최적의 모델을 개발하기 위한 기초자료로 활용하였다. 개발된 3차원 단순유한요소모델은 매우 단순하면서도 증기발생기 카세트의 동특성을 정확하게 기술할 수 있음을 해석을 통하여 확인하였다. 또한 해석결과에서는 증기발생기의 고유진동수가 주요 가진 진동수에서 충분히 멀리 떨어져 있음을 확인하였다. 단순성과 정확성은 본 모델의 큰 장점으로서 본 모델을 사용하여 개발되는 원자로 본체의 전체 유한요소모델 작성 시 모델의 자유도를 줄이고 정확도를 높이는 데 효과적으로 기여할 것이다.

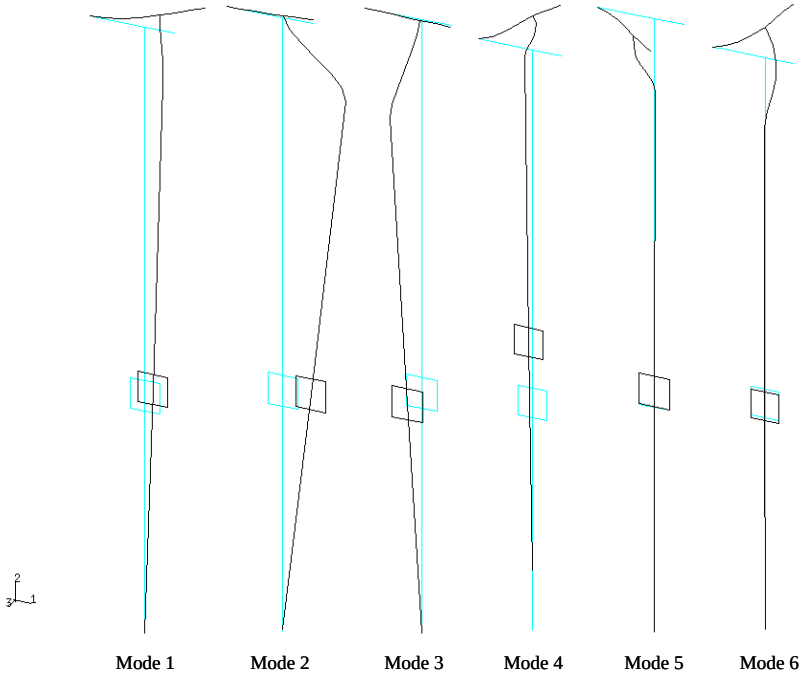


그림 11 증기발생기 카세트 3차원 단순유한요소모델 진동모드

4. 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

5. 참고문헌

[1] 김동옥외, “SMART 증기발생기 동특성해석모델 개발,” KAERI/TR-1893/2001, 한국원자력연구소 기술보고서, 2001.

[2] 김충관외, “SMART 증기발생기 동특성해석,” 한국원자력학회 2001 춘계학술발표회