

SMART 증기발생기 동특성 해석

Dynamic Analysis of SMART Steam Generator

김충관
현대티타늄(주)
인천광역시 남동구 고잔동 732번지

김동욱, 김용완, 김종인
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

본 연구에서는 SMART 증기발생기의 동특성 해석을 위한 유한요소모델을 개발하였으며 해석 결과를 이용해 운전 중 동적 안전성을 검사하였다. 일체형원자로 SMART의 증기발생기는 상용로와 달리 원자로 내벽에 매달린 형태로 설치되며 냉각재순환펌프 임펠러에 의한 가진을 받으므로 진동특성에 관해 정확한 분석이 필요하다. 증기발생기의 배관부분은 보요소를 사용하고 전열관집합체는 집중질량요소를 사용하여 유한요소모델을 구성하였다. 상용코드인 ABAQUS를 사용한 해석에서 증기발생기의 고유진동수와 고유모드형을 구하였다. 냉각재순환펌프 임펠러의 회전수와 날개 수에 따라 결정되는 가진력의 주파수와 증기발생기의 고유진동수를 비교하여 증기발생기의 운전 중 안전성을 평가하였다. 해석결과 증기발생기의 고유진동수와 가진력의 주파수가 근접해 있어 구조적 보강이 필요할 것으로 판단된다.

Abstract

The finite element model for the dynamic analysis of the SMART Steam Generator(SG) was developed. Dynamic stability of SG was investigated using the developed FE model. The SG of the integral reactor SMART is hung on the inside wall of the reactor and is excited by the impeller of the Main Coolant Pump(MCP). SG has been simplified with 2D beam and lumped mass elements in FE model. ABAQUS was used for the calculation of the natural frequency and the mode shape. The excitation frequency of the SG is the function of the rotational speed and the number of the impeller blade of the MCP. Comparing the excitation frequency with the natural frequency of the SG, the stability of the SG was evaluated. According to the result, the natural frequency and excitation frequency are close to each other. Therefore, the structural reinforcement for the SG is to be considered.

1. 서론

기존 상용로와 달리 일체형원자로 SMART의 증기발생기는 원자로 내부에 설치되므로 냉각수 배관 파단 사고와 같은 심각한 안전사고의 원인을 근본적으로 제거할 수 있는 매우 큰 장점을 갖고 있다[1, 2]. 반면 증기발생기의 구조적 손상이 원자로의 기능 저하와 밀접히 연관되는 단점을 갖고 있다. 그러므로 증기발생기가 받게 되는 각종 하중과 이에 대한 구조적 안전성을 정확히 파악하는 것은 증기발생기 설계과정에서 매우 중요한 과정이다.

증기발생기는 고온 고압의 일차냉각수를 이용해 저온 상태로 공급되는 이차냉각수로부터 고온 고압의 증기를 생산하는 기기로 심각한 열하중 및 압력하중을 받는다. 또한 증기발생기 전체가 일차냉각수 유로 속에 설치됨에 따라 받게 되는 유속변동으로 인한 동하중 역시 증기발생기의 설계에서 고려해야 할 중요한 하중이다. 열하중 및 압력하중에 대한 증기발생기 주요부의 구조적 건전성 및 안전성 평가는 정적해석을 위한 유한요소모델을 작성하여 수행할 수 있다. 동하중에 대한 구조물의 응답특성 및 안전성 분석은 고유진동수와 고유모드 등과 같은 구조물의 동특성에 기초하여 수행된다. 그러므로 동하중에 대한 구조물의 안전성 평가에는 구조물의 동특성을 구하는 과정이 선행되어야 한다.

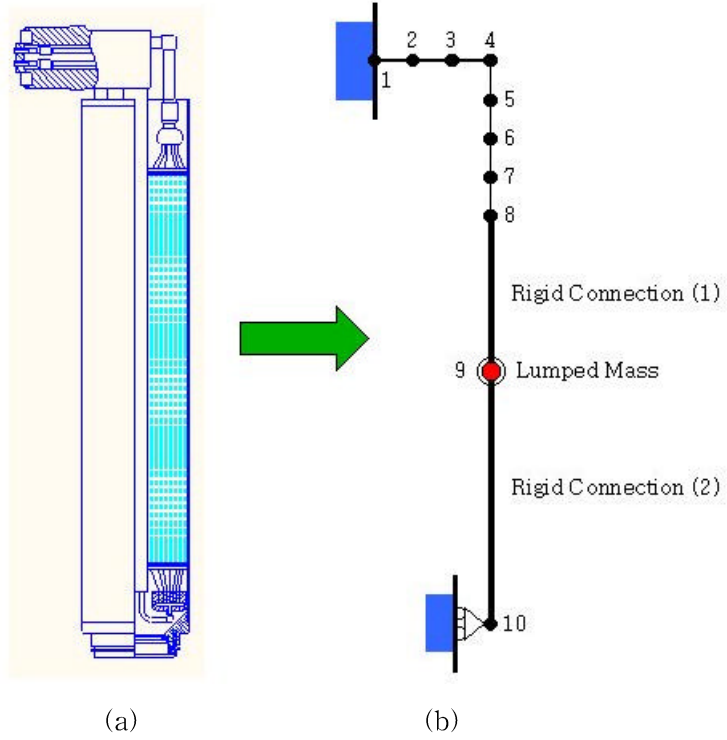
본 연구는 SMART 증기발생기 동특성 해석의 첫 단계로 증기발생기 전체의 거시적 동특성 분석에 그 목적을 두고 있다. 이를 위해 증기발생기의 동특성 해석을 위한 단순화된 유한요소 모델을 개발하였으며 해석을 통해 증기발생기 전체의 고유진동수와 고유모드형을 구하였다. 또한 증기발생기에 가해지는 대표적 동하중인 냉각재순환펌프 임펠러에 의한 가진 주파수와 증기발생기 고유진동수의 비교를 통해 구조진동 측면에서의 안전성을 검사하였다.

2. 증기발생기 유한요소모델

SMART 증기발생기의 거시적 동특성을 유한요소법으로 예측하기 위하여 동적해석 모델을 개발하였다. 증기발생기는 카세트 노즐, 모듈증기관, 전열관 집합체를 비롯한 각종 배관 구조물로 이루어져 있어 상세 모델을 구성할 경우 매우 복잡하고 많은 자유도가 필요하다. 그러나 증기발생기를 구성하는 각 부품의 특성을 이용하면 매우 간략한 형태의 모델을 구성할 수 있다. 이러한 모델을 이용한 해석은 증기발생기 전체의 거시적 특성을 파악하는데 매우 효과적이다. 그림 1은 증기발생기와 유한요소모델의 개략도이다.

그림 1.(b)의 유한요소모델에서 각 절점의 좌표와 구속조건은 표 1에, 모델을 구성하는 요소에 대한 정보는 표 2에 각각 정리하였다. 그림과 표에서 나타낸 바와 같이 모델에는 유한요소법의 보요소와 집중질량요소 그리고 강체요소를 사용하였다. 보요소로 모델된 부분의 탄성계수와 밀도는 각각 199GPa과 8027kg/m³으로 하였다. 카세트 노즐은 실린더에 여러 개의 원공이 있고 형상이 다소 복잡하여 보요소로 단순화시켰다. 모듈증기관부는 6개의 모듈증기관이 등간격으로 배치되어 있고, 길이도 서로 달라 하나의 보요소로 하였다. 전열관 집합체부의 모델은 전열관 집합체와 일차냉각수 및 이차냉각수를 모두 고려하여, 질량과 관성모멘트로 표현되는 집중질량 요소와 이웃한 자유도와 구속조건을 나타내는 강체요소를 함께 사용하였다.

유한요소해석은 2차원으로 고려하였기 때문에 경계조건에 대한 자유도는 X방향에 대한 변위, Y방향에 대한 변위 그리고 Z방향에 대한 회전성이 있다. 카세트 노즐은 원자로 압력용기를 관통하여 용접되므로 모든 자유도를 구속하였다. 증기발생기 하부는 원자로 내부 구조물에 끼여서 장착되므로 X방향의 변위를 구속하였다. 그림 2와 같은 유한요소모델을 만들었다.



(a) (b)
 그림 1. 증기발생기 카세트 동적해석 모델링

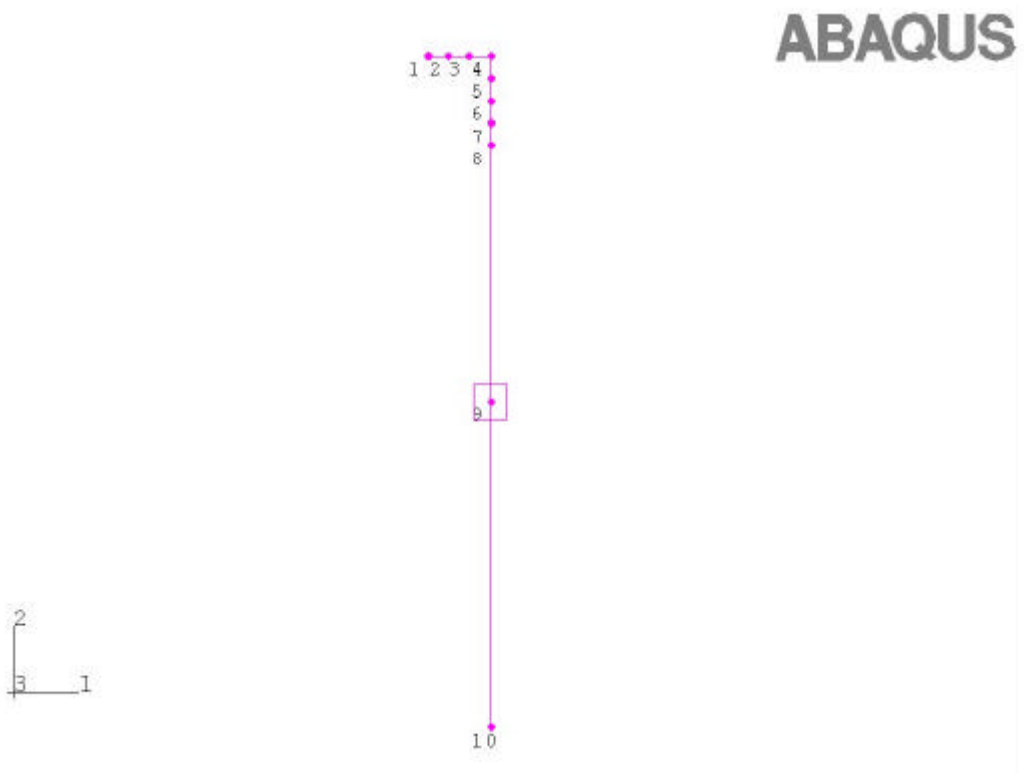


그림 2. SG 동특성해석 유한요소모델

표 1. SG 유한요소모델 절점좌표 및 구속조건

절점번호	절점좌표 (m)			구속조건
	x	y	z	
1	0.000	0.000	0.000	all fix
2	0.130	0.000	0.000	all free
3	0.260	0.000	0.000	
4	0.400	0.000	0.000	
5	0.400	- 0.143	0.000	
6	0.400	- 0.285	0.000	
7	0.400	- 0.428	0.000	
8	0.400	- 0.570	0.000	
9	0.400	- 2.200	0.000	
10	0.400	- 4.270	0.000	fix U_x, U_z

표 2. SG 유한요소모델 요소정보

요소번호	절점		단면적(m^2)	면적모멘트(m^4)		집중질량 (kg)	질량모멘트(kgm^2)		요소형식
	i	j		I_{yy}	I_{zz}		J_{xx}, J_{zz}	J_{yy}	
1	1	2	0.0650	2.40×10^{-3}	1.04×10^{-4}	·	·	·	보요소
2	2	3	0.0650	2.40×10^{-3}	1.04×10^{-4}	·	·	·	
3	3	4	0.0650	2.40×10^{-3}	1.04×10^{-4}	·	·	·	
4	4	5	0.0900	1.21×10^{-5}	1.21×10^{-5}	·	·	·	
5	5	6	0.0900	1.21×10^{-5}	1.21×10^{-5}	·	·	·	
6	6	7	0.0900	1.21×10^{-5}	1.21×10^{-5}	·	·	·	
7	7	8	0.0900	1.21×10^{-5}	1.21×10^{-5}	·	·	·	
8	8	9	·	·	·	·	·	·	강체요소
9	9	10	·	·	·	·	·	·	
10	9		·	·	·	2980	3700	210	집중질량요소

동특성해석은 ABAQUS(Ver 5.8) 코드로 수행하였다[3]. 그림 3, 4, 5, 6은 동특성 해석 결과로 각각의 고유진동수에 대한 모드이다. 보의 굽힘 진동 형상이 나타나는 것을 알 수 있다. 각 모드에 대한 고유진동수는 표 3과 같다.

표 3. 증기발생기의 고유진동수

모드	고유진동수 [Hz]
1	64.3
2	319
3	643
4	1647

ABAQUS

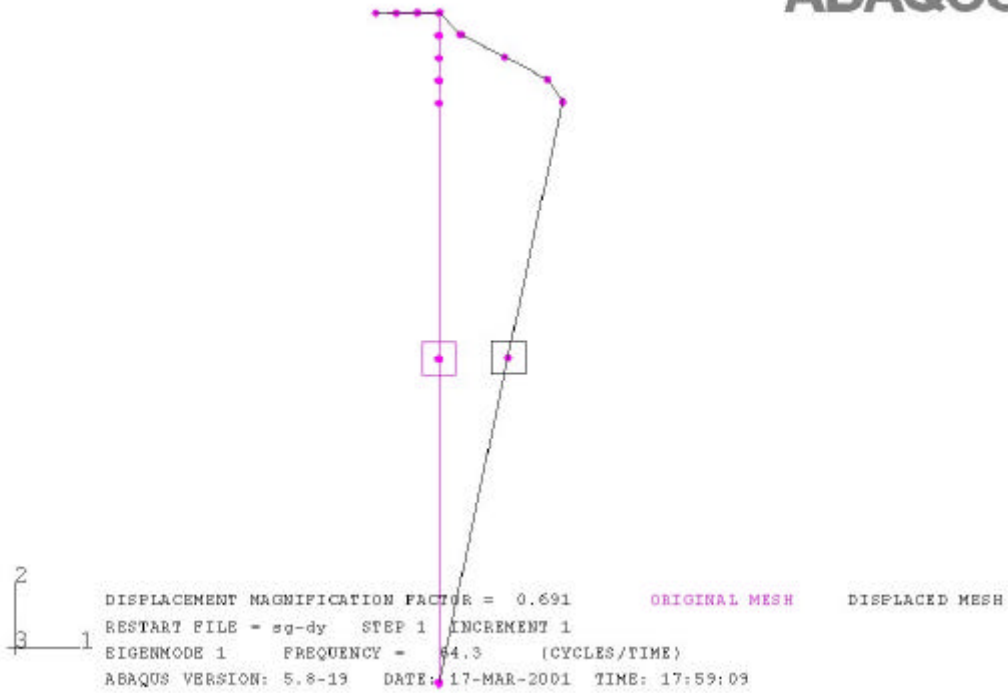


그림 3. SG 동특성해석에 대한 1차 모드 형상

ABAQUS

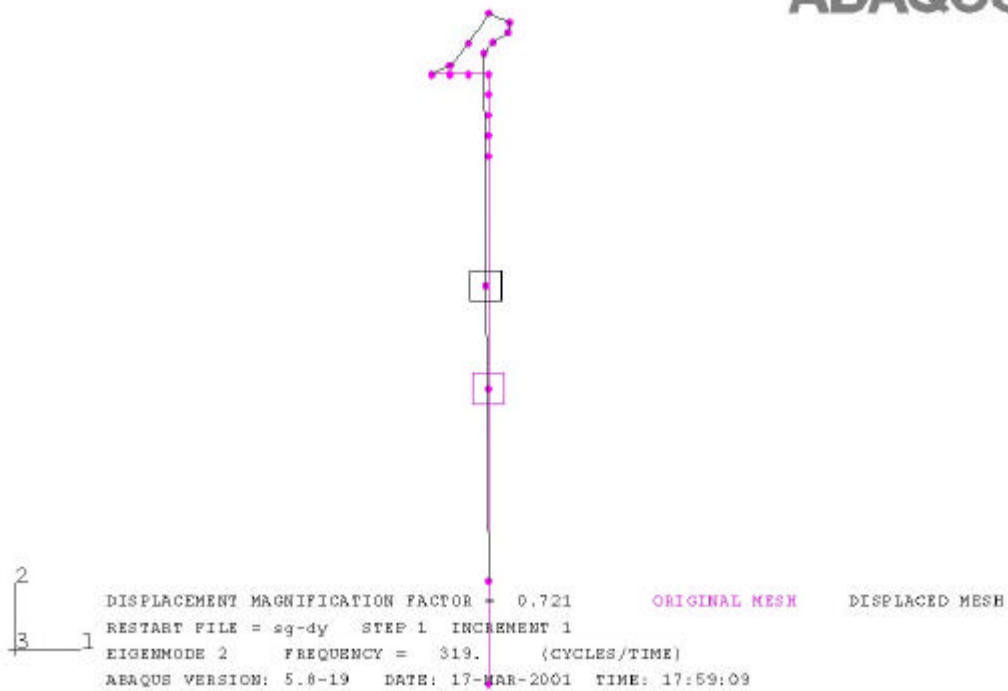


그림 4. SG 동특성해석에 대한 2차 모드 형상

ABAQUS

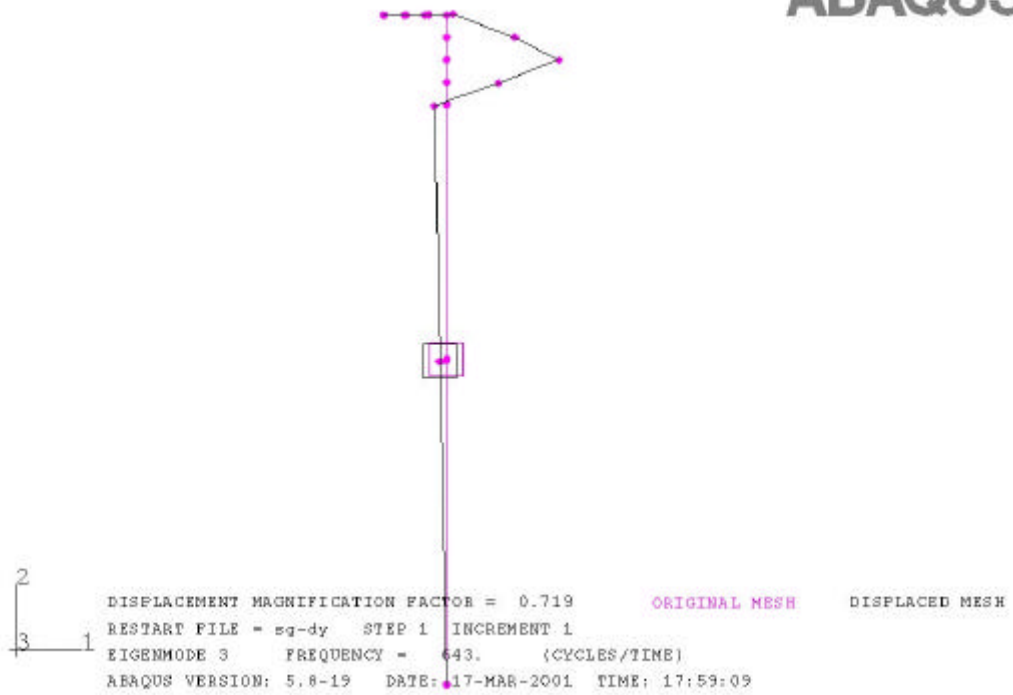


그림 5. SG 동특성해석에 대한 3차 모드 형상

ABAQUS

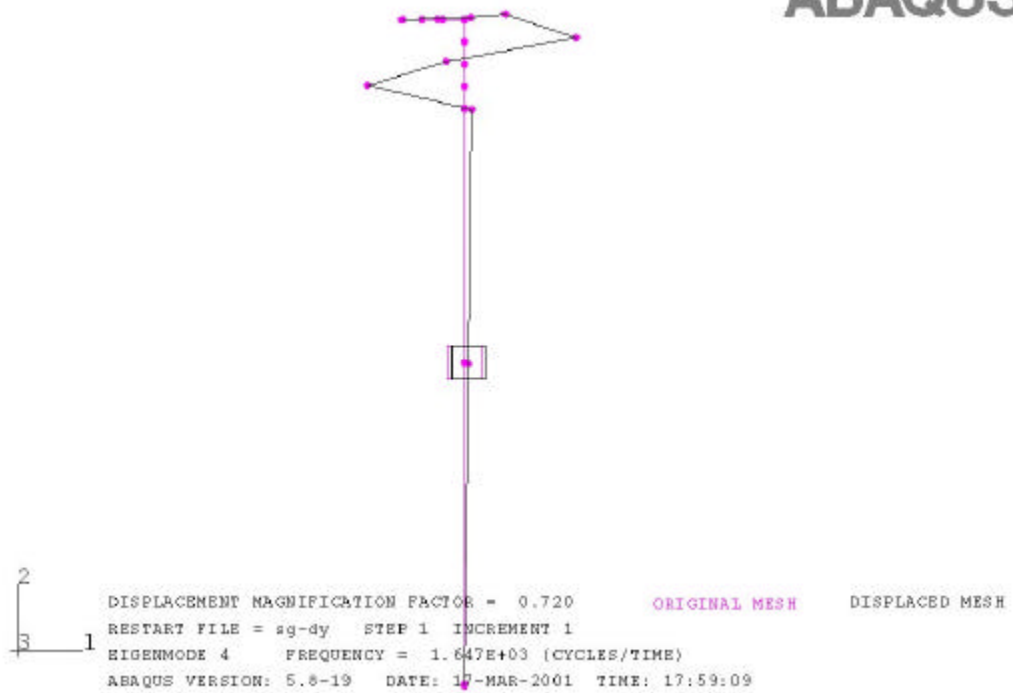


그림 6. SG 동특성해석에 대한 4차 모드 형상

증기발생기에 가해지는 대표적인 동하중은 냉각재순환펌프 임펠러의 가진력에 의한 것이다. 냉각재순환펌프는 원자로 운전 시 저속과 고속으로 운전할 수 있게 설계되었다. 임펠러에서 발생하는 가진력의 주파수는 105~300Hz이다. 증기발생기의 1차와 3차 그리고 4차 모드의 고유진동수는 임펠러에 의한 가진력의 주파수와 충분히 멀기 때문에 문제가 없다. 그러나 2차 모드의 고유진동수는 319Hz로 임펠러에 의한 가진력의 주파수에 근접해 있기 때문에 운전 중 안전성에 영향을 줄 수 있을 것으로 예상된다.

증기발생기의 안전성을 개선하기 위해선 증기발생기 카세트 노즐과 전열관집합체사이의 연결부 강성을 증가시켜 두 번째 고유진동수를 더 높게 이동시켜야 할 것이다. 그 방안으로 첫째, 증기발생기 카세트 노즐과 모듈증기관 등의 배관연결부의 강성을 증가시키는 것이다. 둘째, 카세트 노즐과 전열관집합체 사이에 보강재를 추가해서 강성을 증가시키는 것이다. 그러면 두 번째 고유진동수를 더 높게 이동시킬 수 있을 것이다. 현재 이를 위한 설계가 진행 중이다.

각 모드에서 모듈증기관부의 형상을 살펴보면 강성이 매우 작은 것처럼 보인다. 실제 구조물은 모듈증기관 6개가 카세트 노즐과 연결되어 있고, 카세트 노즐과 전열관집합체가 보강재로 연결되어 있다. 모델링 과정에서 하나의 보요소로 단순화하는 과정에서 강성을 충분히 보정하지 못한 것으로 판단된다. 상세 모델에서 더 보완해야 할 것으로 생각된다.

3 결론

본 연구에서는 SMART 증기발생기 동특성 해석의 첫 단계로 증기발생기 전체의 거시적 동특성 분석을 수행하였다. 증기발생기의 동특성 해석을 위한 보요소와 집중질량요소를 사용한 단순화된 유한요소모델을 개발하였으며, 유한요소해석을 통해 증기발생기 전체의 고유진동수와 고유모드형을 구하였다. 해석결과 증기발생기의 두 번째 고유진동수가 임펠러에 의한 가진력의 주파수와 근접해 있어 운전 중 안전성에 문제가 있을 것으로 예상된다. 증기발생기의 안전성을 개선하기 위해선 증기발생기 카세트 노즐과 전열관집합체사이의 연결부 강성을 증가시켜 두 번째 고유진동수를 더 높게 이동시켜야 할 것이며 현재 이를 위한 설계가 진행 중이다. 향후 보다 정밀한 모델을 개발하고 상세한 동특성을 해석을 수행하여 고유진동수와 각종 가진력 사이의 관계를 분석할 필요가 있을 것으로 생각된다. 개선된 증기발생기의 해석을 위한 정밀한 유한요소모델이 현재 개발 중에 있다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Kim Jong In, et al., Development and Verification Test of Integral Reactor Major Components, KAERI/RR-1889/98, 1999.
2. Kim Yong Wan, et al., Conceptual Design of Once-Through Helical Steam Generator for Integral Reactor SMART, KAERI/TR-1446/99, 1999.
3. ABAQUS/Standard User's Manual, Version 5.8.