

일체형 원자로 집합체에 대한 내진 측면의 구조적 건전성 평가
Evaluation of Seismic Integrity for System Integrated Modular
Advanced Reactor Assembly

왕순면, 김종성, 진태은
한국전력기술(주)
경기 용인시 구성읍 마북리 360-9

정명조, 최영환, 조종철
한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19번지 305-338

요 약

내진 측면에서의 안전 여유도를 평가하기 위해 상용 유한요소 패키지인 ANSYS를 이용하여 일체형 원자로 집합체의 구조적 건전성을 평가하였다. 우선, Super Element 모델의 유효성을 검증하고 고유진동수에 대한 유체 연성효과를 평가하기 위해 동특성 해석을 수행하였다. 동특성 해석 결과에 근거하여, Single Point Response Spectrum을 이용한 내진 해석을 수행하였다. 최종적으로 동특성 해석결과, Super Element 모델과 관성 하중 접근법을 이용하여 강제 진동해석을 수행하였다. 결과적으로, 일체형 원자로 집합체에 대한 신뢰성 있고 효율적인 내진해석 모델을 개발하였고 원자로 집합체는 충분한 안전 여유도를 가지는 것을 확인하였다.

Abstract

The structural integrity of system integrated modular advanced reactor assembly is assessed using the commercial finite element package ANSYS in order to evaluate the seismic safety margin. First of all, modal analyses are performed using the various analysis models with/without the fluid coupling effect in order to validate a super element model and to evaluate the coupling effect on natural frequency. Based on the modal analysis results, seismic analyses are performed using a single point response spectrum. Finally, forced vibration analyses are performed using the modal analysis results, the super element model and an inertia load approach. As a result, the reliable and efficient seismic analysis model for system integrated modular advanced reactor assembly is developed and it is found that RPV assembly has the sufficient seismic safety margin.

1. 서론

해수담수화, 대형 화물선, 잠수정, 산업공정 열생산 등의 분야에 활용될 수 있는 중소형 원자로에 대한 선진국간 개발경쟁이 치열해지고 있는 대내외적 동향을 반영하여 우리나라에서도 중소형 규모의 다목적용 원자로 개발에 관심을 가지고 한국원자력연구소 주관하에 330MWt 규모의 일체형 원자로 설계개발을 목표로 연구를 수행하여 왔다. 개념설계 및 2단계 기본설계가 완료되었으며 현재 3단계에서는 일체형 원자로 기술을 검증하여 실용화하기 위한 65MWt의 검증용 일체형 원자로의 개발 및 건설이 추진되는 중이다^{1~4)}.

검증용 일체형 원자로 설계기술 개발과 병행하여 원자력 안전 규제연구 분야에서는 검증용 일체형 원자로의 안전성 측면의 기술지원과 설계개발 단계에서 안전성에 중요한 현안들을 도출하고 그 기술적 해결 방안을 강구하기 위해 한국원자력안전기술원의 주도하에 연구를 수행하는 중이다.

본 논문은 이러한 규제연구 분야 중 검증용 일체형 원자로 기계기기의 내진 관련 구조건전성 규제기술 개발과 관련된 것으로서 검증용 일체형 원자로의 전체 거동을 대표할 수 있는 원자로 압력용기/가압기 집합체를 대상으로 상용 유한요소 패키지인 ANSYS⁵⁾를 사용하여 동특성/내진 해석모델을 개발하였다. 해석은 동특성 해석, 내진해석, 강제진동해석의 과정으로 이루어졌다. 원자로 압력용기 내의 유체와의 연성효과를 고려한 강제진동해석 경우 시간 이력에 따른 해석을 수행하여야 하나 Normal Element를 사용시 계산시간의 장시간화와 저장용량의 대형화로 인해 적용상 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 완화시키기 위하여 Super Element⁵⁾를 적용하였고 Super Element의 타당성을 검증하기 위해 다양한 방법들로 동특성 해석을 수행, 결과를 비교 후 타당성이 검증된 Normal Element와 Super Element를 사용하여 각각 내진해석과 강제진동해석을 수행하였다.

2. 본론

2.1 유한요소 모델

검증용 일체형 원자로 집합체에 사용되는 재료의 종류와 물성치는 표 1과 같다.

표 1. 각 부품별 사용재질 및 물성치

구분		UTS(MPa)	YS(MPa)	E(GPa)	S _m (MPa)	밀도(kg/m ³)
원자로 압력용기 용기/덮개	SA508	621	483	183.4	206(150℃)	7,800
	Class 4				198(350℃)	
가압기 중앙덮개/내부 판/내부 쉘/외부 쉘	SA240	517	205	173.1	138(150℃)	7,800
	Type 321				110(350℃)	

모델은 지진하중이 가해지는 원자로 압력용기와 가압기로 한정했으며 기타 부품은 집중하중으로 절점에 인가했다. 유체연성효과를 파악하기 위해 유체가 있는 경우와 없는 경우로 구분하여 모델을 개발하였다. 사용된 유한요소 모델은 그림 1과 같다.

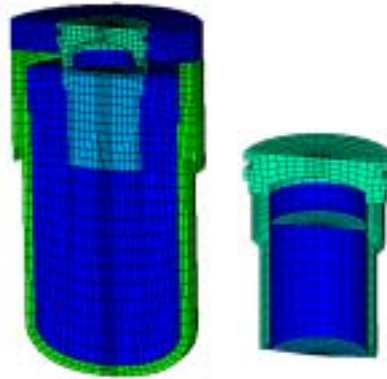


그림 1. 원자로 집합체 유한요소 모델

우선 유체와의 연성(Coupling)효과와 기계적 구속과 관련된 경계조건을 다음 아래와 같이 결정하였다.

- 유체/고체가 서로 접하는 법선방향의 자유도를 연성시킴.
- 구속 경계조건으로써 지진하중이 적용될 부위에 모든 방향의 자유도를 구속시킴.
- Master DOF(MDOF)⁽⁵⁾는 Super Element 생성에 사용될 자유도로써 다음 조건들을 포함한다.
- 구조물의 전체거동을 표현할 수 있어야 함.
- 강제 진동해석을 위해 구속점을 모두 포함.
- 일반적으로 회전 자유도는 포함시키지 않음.
- 본 해석에서는 구조물의 거동을 관찰하는 것이 주관심사이므로 유체 자유도는 미포함.

2.2 동특성 해석

ANSYS를 기본 계산 프로그램으로 하여 Full Method/ Normal Element를 사용한 경우와 Reduced Method/Super Element를 사용한 경우로 구분하여 해석결과를 비교하였다.

표 2에서 보듯이 유체 연성효과 고려시 고유 진동수가 감소하였으며, 구조물로서는 비교적 높은 진동수인 약 70~72Hz의 1차 모드 고유 진동수가 계산되어졌다. Normal Element와 Super Element 경우에 대해 비교시 5.14% 오차 이내였으며 강제 진동해석시 Super Element를 사용하여도 동적거동을 정확히 예측할 수 있음을 확인 하였다. 또한, Super Element 사용시 Normal Element 사용 경우에 비하여 5배 이상 계산시간을 단축할 수 있었다.

표 2. 고유 진동수 해석결과

Mode	Structure Only(Hz)		Error(%)	Mode	Structure + Water(Hz)		Error(%)
	Normal (Block Lanczos)	Super Element (Reduced)	$\frac{(F_s - F_n)}{F_n} * 100$		Normal (Reduced)	Super Element (Reduced)	$\frac{(F_s - F_n)}{F_n} * 100$
1	72.603	72.455	-0.204	1	71.078	70.239	-1.180
2	72.603	72.455	-0.204	2	71.089	70.539	-0.223
3	88.719	89.335	0.689	3	72.639	72.639	0
4	114.997	115.551	0.479	4	77.131	77.131	0
5	115.001	115.552	0.476	5	77.408	77.408	0
6	133.125	135.062	1.434	6	78.225	78.225	0
7	135.484	138.361	2.079	7	83.455	83.455	0
8	141.947	149.643	5.143	8	84.322	84.322	0
9	141.947	149.651	5.148	9	89.304	89.304	0
10	148.031	153.651	3.657	10	92.008	91.961	-0.052

2.3 내진 해석

가진점에 한국 표준형 원전에 적용되는 그림 2의 입력지진가속도 응답스펙트럼⁶⁾을 적용하였다. 구조물의 감쇠값은 4% 임계감쇠비⁷⁾를 적용하였고 모드조합은 SRSS (Square Root of Sum of Square)를 사용하였다. 사용된 모드수는 100개로써 최대진동수가 최대 가진 진동수 (30Hz)의 약 7배에 해당하므로 충분 하다고 판단되었다. 해석에 쓰인 질량은 총중량이 152,048kg (냉각재 제외 : 138,648kg), 가압기 총 중량이 7,524kg, 원자로 압력용기 총중량이 131,124kg, 냉각재 총중량은 13,400kg이다.

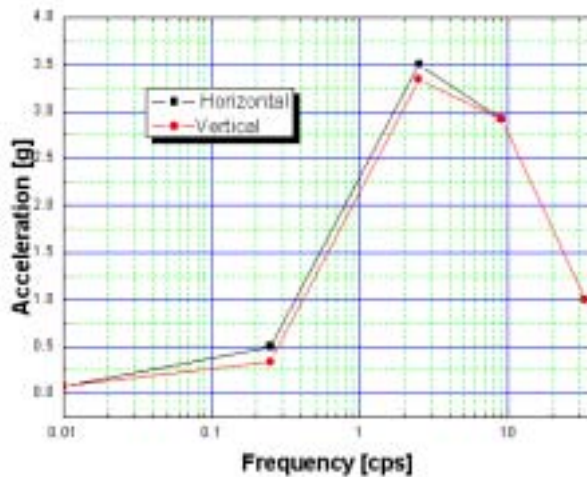


그림 2. Single Point Response Spectrum

연성효과 고려 여부에 따른 최대 응력/변위/가속도 값 및 발생 위치의 변화는 표 3에 제시되어 있다.

표 3. 내진해석 결과 (1g 기준)

Mode	Value/Location	최대 응력(MPa)	최대 변위(mm)	최대 가속도(m/sec ²)
Structure Only	Value	1.52	0.0254	14.628
	발생위치	가압기(External Shell 중간)	가압기(Inner Plate)	가압기(Bottom Plate)
Structure + Water	Value	2.75	0.0311	13.625
	발생위치	가압기(Internal Shell 중간)	가압기(Inner Plate)	가압기(Bottom Plate)

2.4 강제 진동해석

Super Element를 사용했으며 본 해석에서는 Time Dependant Gravity Load를 사용하는 관성 하중 접근법(Inertial Load Approach)⁸⁾를 사용하였다.

해석에 사용된 입력데이터는 한국형 표준원전의 인공지진⁹⁾으로써 최대 가속도는 약 0.2g에 해당한다. 적분시간간격(ITS)은 0.0025를 초기치로 한 후 Auto Time Stepping을 사용하였다. 입력지진의 시간 이력은 0.005초 등 간격 25초 간의 데이터를 사용하였고 구조물의 감쇠값은 4% 임계감쇠비를 사용하였다. 구조물만 있는 경우와 유체와 연성이 된 두 가지 경우로 해석을 수행하였으며 결과 측정 위치는 6개소로 그림 3과 같다.

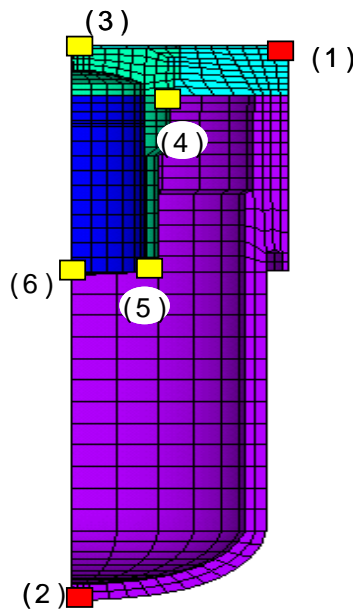
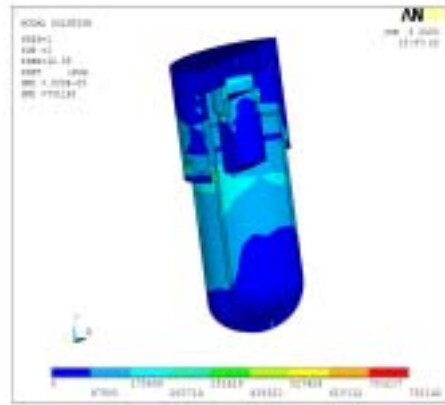
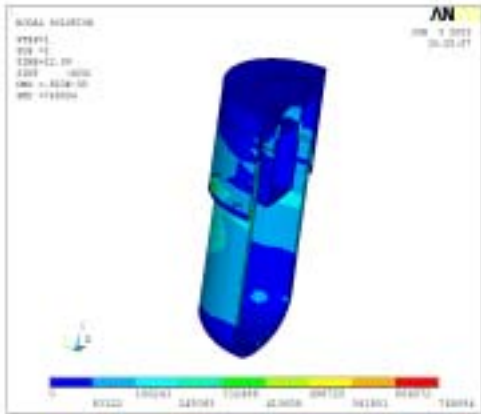


그림 3. 강제 진동해석 결과 측정위치

응답가속도 증폭비는 표 4와 같으며 원자로 압력용기의 하단 중심부에서 최대치(약 10.92~18.82)가 발생하였다. 또한, 응답이 최대인 시점인 12.090초에서의 응력분포를 그림 4에 제시하였다.

표 4. 강제 진동해석결과 응답가속도 증폭비

측정위치	모델	응답가속도 증폭비(응답/입력)		
		X	Y	Z(Vertical)
원자로 압력용기 상단의 최외곽 부위 (Point #1)	구조물	0.23	0.23	0.63
	구조물+유체	0.23	0.23	0.72
원자로 압력용기 하단의 중심점 (Point #2)	구조물	10.92	10.92	14.78
	구조물+유체	14.34	14.34	18.82
가압기 덮개 상단의 중심점 (Point #3)	구조물	0.44	0.44	0.32
	구조물+유체	0.58	0.58	0.36
가압기와 환형덮개의 연결점 (Point #4)	구조물	0.45	0.45	0.54
	구조물+유체	0.55	0.55	0.59
가압기 하단의 최외곽 부위 (Point #5)	구조물	3.01	3.01	4.35
	구조물+유체	4.66	4.66	7.47
가압기 하단의 중심점 (Point #6)	구조물	3.11	3.11	4.40
	구조물+유체	4.66	4.81	7.56



<Structure Only : Max. 0.748MPa>

<Structure + Water : Max. 0.791MPa>

그림 4. 12.090sec에서의 응력분포

3. 결론

김중용 일체형 원자로 압력용기 집합체에 대한 동특성/내진 해석 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 동특성 해석결과로부터 강제 진동해석시 Super Element를 사용하여 동적거동을 정확하고 효율적으로 예측할 수 있음을 확인하였음.

- 원자로 압력용기는 유체연성효과가 적으나, 가압기는 상대적으로 효과가 큼을 확인할 수 있었으며, 유체연성효과를 고려하여야지만 정확한 해석이 될 수 있음을 확인하였음.
- 가진력의 주요 진동수 범위에 비하여 상당히 높은 고유진동수를 갖고 있어 공진현상이 거의 발생하지 않으므로 지진하중에 의한 파손 우려는 거의 없을 것으로 판단됨.
- 응답가속도 증폭비는 원자로 압력용기의 하단 중심부에서 최대치(10.92~18.82)가 발생하였으며 최대 응력 값은 0.748~0.791MPa로 매우 낮은 값을 도출하였음.

참고문헌

- 1) 한국원자력연구소, 신형원자로 기술개발, 일체형 원자로 기기개발 및 검증시험, KAERI/RR-1889/98, 1999.
- 2) 한국원자력연구소, 일체형원자로 설계기술개발, 일체형원자로 주기기 설계기술 개발, KAERI/RR-2200/2001, 2002.
- 3) 한국원자력연구소, 신형원자로 기술개발, 일 체형원자로 기계설계기술개발, KAERI/RR-1888/98, 1999.
- 4) 한국원자력연구소, 일체형원자로 설계기술개발, 일체형원자로 기계설계기술개발, KAERI/RR-2209/2001, 2002.
- 5) ANSYS, Inc., ANSYS User's Manuals, Ver.7.0, 2003.
- 6) NRC, RG 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants.
- 7) NRC, RG 1.61, Damping Values for Seismic Design of Nuclear Power Plants.
- 8) MSC, MSC/NASTRAN User's Guide, V70 Advanced Dynamics, 2002.
- 9) NRC, NUREG-0800, Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants, LWR Edition, Sec.3.7.