

소형 원자로용 모듈화 격납구조의 내진성능 분석

박우룡, 임성순*
서울시립대학교 토목공학과

Analysis of Seismic Performance of Modular Containment Structure for Small Modular Reactor

Woo-Ryong Park, Sung-Soon Yhim*
Department of Civil Engineering, University of Seoul

요약 전세계적으로 다양한 규모의 지진이 계속하여 발생하고 있으므로 원자로용 격납구조가 구조적인 건전성을 유지하기 위해서는 내진성능의 확보가 필수적이다. 따라서 소형 원자로용 모듈화 격납구조의 경우에도 내진성능의 분석이 필요하다. 본 연구에서는 소형 원자로용 모듈화 격납구조의 내진성능 분석을 위해 콘크리트 모듈 간 접촉면과 긴장재를 반영한 유한요소 모델을 작성하여 고유진동해석과 지진해석을 수행한다. 이를 통해 입력지진파에 의한 모듈화 격납구조의 변위, 응력 및 연결부 접촉면 갭 크기의 변화특성을 분석한다. 그리고 긴장력, 연결부 접촉면 마찰계수 및 입력지진파의 변화가 내진성능에 미치는 영향을 분석한다. 비교를 위해 일체화 격납구조의 내진성능도 분석한다. 긴장재의 긴장력과 모듈 연결부 접촉면의 마찰력에 의한 합성효과로 모듈화 격납구조는 발생 가능성이 가장 높은 1, 2차 고유모드에서 일체화 격납구조와 유사한 횡방향 동적거동을 한다. 긴장재의 긴장력과 연결부 접촉면의 마찰력에 의한 합성효과가 충분히 발휘될 경우, 연결부를 갖는 모듈화 격납구조에서도 일정수준 이상의 내진성능이 확보된다. 연결부 접촉면 재질을 마찰계수가 더 큰 재료로 바꿀 경우 추가적인 내진성능 향상이 기대된다.

Abstract The seismic performance of a containment structure should be secured to maintain the structural soundness of a containment structure under various earthquakes that occur globally. Therefore, an analysis of the seismic performance of a modular containment structure for a small modular reactor is also required. To analyze the seismic performance of modular containment, FEM models with contact surfaces between the modules and tendon were prepared and the modal and seismic analyses were performed. The displacement, stress, and gap size of modular containment under earthquake wave were analyzed. The effects of the tendon force, friction coefficient, and earthquake wave on the seismic performance were analyzed. The seismic performance of monolithic containment was also analyzed for comparison. In the 1st and 2nd natural modes, which most likely affect, the modular containment showed horizontal dynamic behavior, which is similar to monolithic containment, because of the combined effects of the tendon force and friction force between modules. When the combined effect is sufficient, the seismic performance of the modular containment is secured over a certain level. An additional increase in seismic performance is expected when some material with a larger friction coefficient is adopted on the contact surface.

Keywords : Seismic Performance, Modular Containment Structure, Contact Surface, Tendon, Combined Effect

*Corresponding Author : Sung-Soon Yhim(University of Seoul)

email: yhimss@uos.ac.kr

Received September 9, 2019

Accepted January 3, 2020

Revised September 30, 2019

Published January 31, 2020

1. 서론

발전용량이 약 10 ~ 300 MW 인 소형 모듈형 원자로 (SMR: Small Modular Reactor, 이하 SMR)의 개발을 위해 인도, 러시아, 한국, 등 여러나라에서 연구가 이루어지고 있다[1,2]. SMR은 모듈화 방식을 채택하기 때문에 표준화된 단위 모듈 원자로를 전력 수요량에 맞춰 유동적으로 추가 배치할 수 있다. 그리고 원자로 및 관련 설비를 공장에서 미리 제작하므로 품질을 확보하고 공기를 단축할 수 있다. 발전소 건설에 이러한 모듈화 방식의 장점을 충분히 활용하기 위해서는 원자로 뿐만 아니라 원자로를 감싸고 있는 격납구조(containment structure)에도 모듈화 방식을 적용할 필요가 있다. 격납구조에는 주로 프리스트레스트 콘크리트 구조가 적용되므로 이러한 격납구조에 모듈화 방식을 적용하기 위해서는 각 모듈을 프리캐스트 콘크리트 구조로 제작한 후에 긴장재(tendon)를 이용하여 모듈과 모듈을 연결해야한다.

전세계적으로 다양한 규모의 지진이 끊임없이 발생하고 있다. 따라서 원자로를 보호하고 방사능 유출을 막아주는 격납구조가 구조적인 건전성을 유지하기 위해서는 내진성능의 확보가 필수적이다. 이를 위해 격납구조의 내진성능을 분석하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다 [3-7]. SMR과 함께 설치되는 모듈화 격납구조도 예외가 될 수 없으므로 내진성능에 대한 분석이 필요하나 이에 대한 연구는 부족한 상황이다. 특히, 모듈화 구조의 특성상 연결부를 가지게 되므로 이를 고려한 내진성능에 대한 분석이 필요한 실정이다.

본 연구의 목적은 소형 원자로용 모듈화 격납구조의 내진성능 분석이다. 이를 위해 고유진동해석과 입력지진파를 이용한 지진해석을 수행한다. 입력지진파에 의한 모듈화 격납구조의 변위, 응력 및 연결부 접촉면 갭(gap) 크기의 변화특성을 분석한다. 그리고 긴장력, 연결부 접촉면 마찰계수 및 입력지진파의 변화가 내진성능에 미치는 영향을 분석한다. 모듈화 격납구조와의 비교를 위해 기존 형식인 일체화 격납구조의 내진성능도 함께 분석한다.

2. 유한요소해석

2.1 모듈화 격납구조의 형상

격납구조는 주로 기초 슬래브 위에 원통형 벽체가 놓이고 다시 그 위를 돔 구조가 덮는 형상을 갖는다. 모듈

화 격납구조는 일체화 격납구조와 외형은 동일하나, 복수의 단위 모듈이 모여 전체 구조를 형성하는 것이 차이점이다. 본 연구의 모듈화 격납구조의 형상은 Fig. 1과 같다. 돔 구조와 원통형 벽체는 각각 원주방향(circumferential direction)으로 4등분 된다. 수직방향으로는 돔 구조와 원통형 벽체 경계에서 나누어지며, 원통형 벽체가 다시 2등분 된다. 모듈화 격납구조의 상세 단면 특성치는 Table 1과 같다.

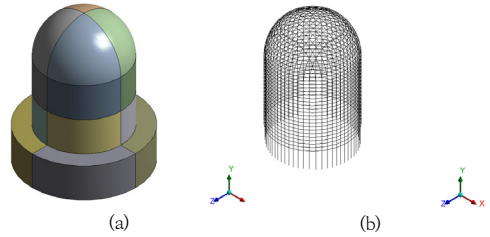


Fig. 1. Modular containment structure
(a) Concrete module (b) Tendon

Table 1. Section property of modular containment structure

Module	Diameter (outside, m)	Diameter (inside, m)	Height(m)
Dome	10.0	8.0	-
Cylindrical shell(top)	10.0	8.0	4.0
Cylindrical shell(bottom)	10.0	8.0	4.0
Foundation	14.0	-	4.0

돔 구조와 원통형 벽체 콘크리트 내부에는 원주방향과 수직방향으로 긴장재가 배치된다. 원주방향 긴장재는 원통형 하부 벽체와 상부 벽체, 그리고 돔 하부(원통형 벽체와 돔 구조 연결부 접촉면에서 돔 정상 방향으로 45도 구간)에 각 10개씩 총 30개가 원형으로 배치된다. 수직방향 긴장재는 역U자형으로 돔 상부(돔 정상에서 돔 하부 방향으로 45도 구간)에서 각 방향으로 14개의 긴장재가 서로 직교한 후, 돔 하부와 원통형 벽체를 지나 기초 슬래브까지 연장되어 총 28개가 배치된다. 이때, 수직방향 긴장재를 원주방향 긴장재가 바깥쪽에서 감싸는 순서로 배치된다. 원주방향과 수직방향 긴장재는 단면적이 서로 동일하며, 각 해석모델 별로 긴장력 변화 영향을 살펴보기 위해 3가지의 긴장재 단면적(99, 1283, 2270 mm²)을 사용한다.

2.2 유한요소 모델

모듈화 및 일체화 격납구조의 유한요소해석을 위해 범

용 해석프로그램인 ANSYS를 이용한다. 재료가 콘크리트인 돔 구조, 원통형 벽체, 그리고 기초 슬래브는 3차원 솔리드 요소(solid185)를 사용하여 유한요소 모델을 구성한다. 이 요소는 8절점 요소이며 각 절점에서 3개의 자유도를 갖는다. 콘크리트 내부에 배치되는 강재(steel) 긴장재는 일축 요소(link180)를 사용하여 유한요소 모델을 구성한다. 이 요소는 2절점 요소이며 각 절점에서 3개의 자유도를 갖는다. 콘크리트와 강재의 재료 특성치는 Table 2, 3과 같다.

Table 2. Concrete material property

Density (kg/m ³)	Elasticity modulus (MPa)	Poisson's ratio	Compressive strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
2300	0.3E+5	0.18	41	5

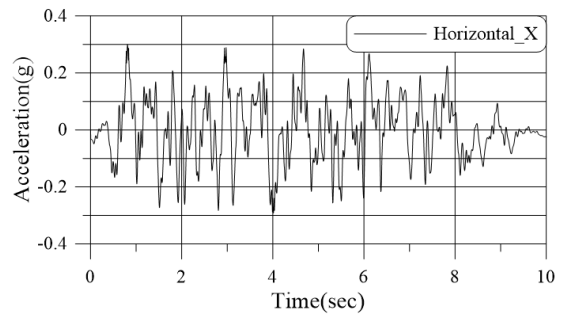
Table 3. Tendon material property

Density (kg/m ³)	Elasticity modulus (MPa)	Poisson's ratio	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
7841	1.96E+5	0.3	1579	1857

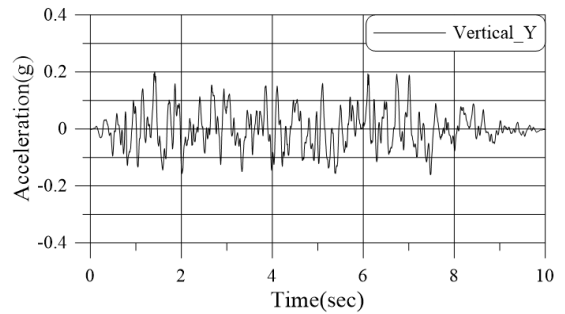
콘크리트와 긴장재는 완전부착되는 것으로 가정한다. 이를 위해 내부 명령어(ceintf)를 사용하여 긴장재의 절점과 긴장재 주변 콘크리트 요소 사이에 구속조건(constraint condition)을 적용한다.

긴장재에 프리스트레스를 도입하기 위하여 내부 명령어(inistate)를 사용한다. 원주방향과 수직방향 긴장재의 유효긴장응력은 긴장재 항복강도의 80 %가 도입되는 것으로 가정하여, 1263 MPa로 설정한다.

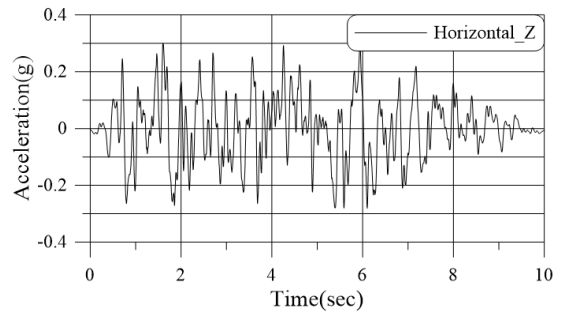
모듈화 격납구조 연결부 접촉면은 서로 미끄러지거나 분리되는 것을 표현할 수 있도록 마찰조건(frictional condition)을 적용한다. 콘크리트 모듈 간의 마찰이므로 마찰계수는 0.4로 한다[8]. 단, 원통형 하부 벽체와 기초 슬래브 사이 연결부 접촉면은 지점부이므로 미끄러짐이나 분리가 없는 것으로 가정하여 결합조건(bonded condition)을 적용한다. 기초 슬래브는 단단한 지반 속에 묻혀있는 것으로 가정하여 기초 슬래브 바닥면과 측면의 절점에 고정조건(fixed condition)을 적용한다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. Artificial earthquake wave set, W10(duration 10 sec, horizontal PGA 0.3 g, vertical PGA 0.2 g)
 (a) Horizontal X direction (b) Vertical Y direction
 (c) Horizontal Z direction

2.3 입력지진파

지진해석을 위한 입력지진파로 인공지진파를 이용한다. 이를 위해 지진파 생성 프로그램인 SIMQKE[9,10]를 이용하여 수평 2방향(X, Z)과 수직 방향(Y) 인공지진파를 각각 생성시킨다. 이 때 각 인공지진파는 US NRC Regulatory Guide 1.60[11]의 설계응답스펙트럼(design response spectrum)에 부합하도록 작성한다. 감쇠계수가 5 %에 해당되는 수평 및 수직 설계응답스펙트럼의 최

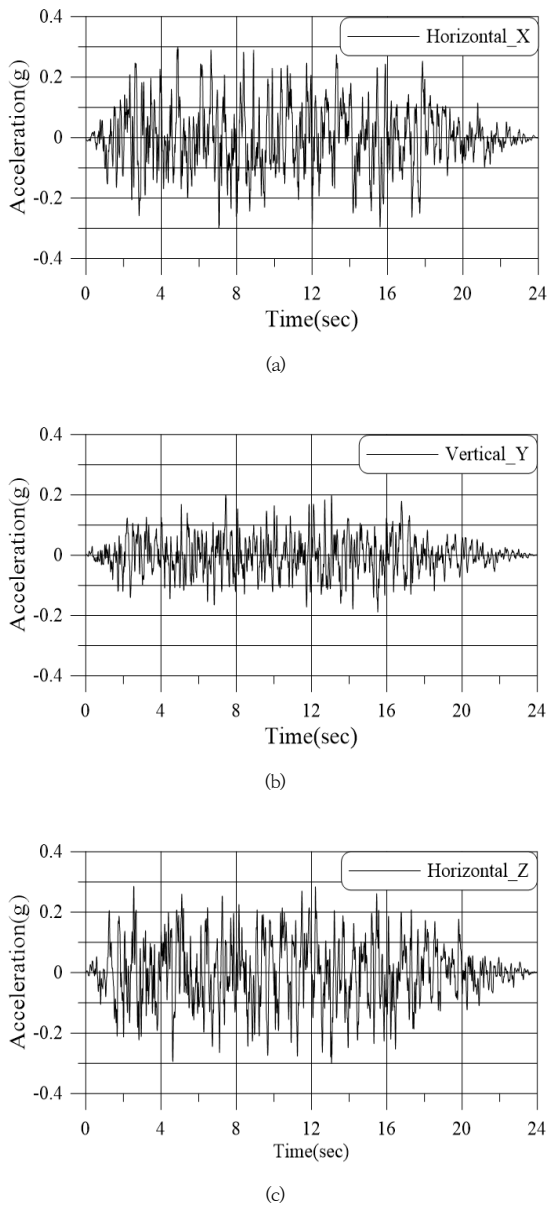


Fig. 3. Artificial earthquake wave set, W24(duration 24 sec, horizontal PGA 0.3 g, vertical PGA 0.2 g)
 (a) Horizontal X direction (b) Vertical Y direction
 (c) Horizontal Z direction

대 지반가속도(PGA: Peak Ground Acceleration, 이하 PGA)를 각각 0.3 g와 0.2 g(g: 중력가속도)로 선형 스케일링한 후, 이에 부합하도록 인공지진파를 생성시킨다.

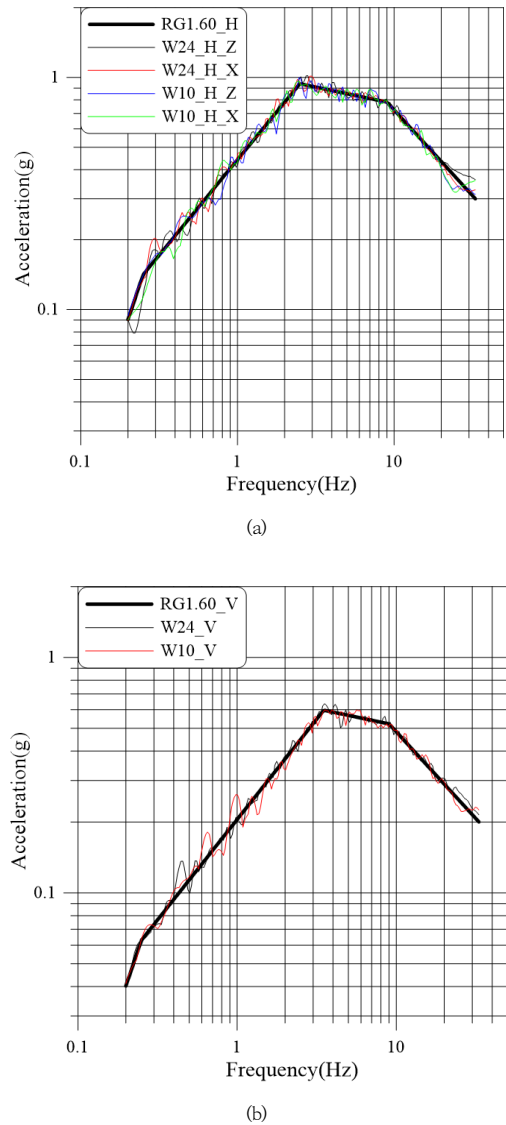


Fig. 4. Design and artificial acceleration response spectra
 (a) Horizontal X, Z component(PGA 0.3 g)
 (b) Vertical Y component(PGA 0.2 g)

본 연구에서는 ASCE 4-98[12]에 제시된 지진파의 지속시간 중 가장 짧은 경우(10 초)와 가장 긴 경우(24 초)를 기준으로 총 2가지 지진파 세트를 사용한다. 각 세트는 수평 및 수직 방향 성분으로 구성되며 생성된 지진파 세트는 Fig. 2, 3과 같다.

Fig. 4에 보이는 것처럼 인공지진파 세트 W10과 W24의 응답스펙트럼은 US NRC Regulatory Guide 1.60의 수평 및 수직 설계응답스펙트럼과 부합하고 있다.

2.4 해석 케이스

모듈화 및 일체화 격납구조의 유한요소해석을 위한 해석 케이스는 Table 4와 같다. 긴장력의 크기(긴장재 단면적의 크기)와 연결부 접촉면 마찰계수를 변수로 하여, 각 해석 케이스 별로 입력지진파 세트 W10과 W24의 각 방향 성분의 PGA를 선형 스케일링한 지진파 세트를 이용하여 직접적분법에 의한 지진해석을 수행한다.

Table 4. Parameter type for seismic analysis

Parameter type	Description	Remark	
No. 1	Modu	Modular	Containment structure type
	Mono	Monolithic	
No.2	T99	99	Tendon area(mm ²)
	T1283	1283	
	T2270	2270	
No. 3	F0.4	0.4	Friction coefficient
	F1.0	1.0	
No. 4	W10	Wave set (duration 10 sec)	Artificial earthquake wave
	W24	Wave set (duration 24 sec)	
Example of analysis case name	Modu_T1283_F0.4_W24	Modular structure with tendon area 1283 mm ² and friction coefficient 0.4 under wave set W24	

2.5 해석결과의 수렴성

격납구조의 요소크기는 해석결과의 안정성과 해석수행의 경제성을 고려하여 격납구조 벽체의 두께방향 요소분할수가 2가 되도록 한다[13]. 그리고 지진해석결과의 신뢰성을 확보하기 위해, 지진해석을 위해 설정하는 시간간격(time step)의 크기가 충분히 작아서, 그 크기에 관계없이 동일한 수준의 결과값을 나타내는 시간간격을 확인한다. 이를 위해 동일한 해석조건에서 시간간격의 크기만 변화시켜가면서 모듈화 격납구조 돔 정상부의 결과 가속도와 주응력의 최대값을 확인하며 그 결과는 Fig. 5와 같다. 그리고 각 해석 시 생성되는 결과파일의 크기도 함께 확인한다. 모듈화 격납구조 가속도의 최대값은 시간간격의 크기가 작아질수록 증가하다가 시간간격이 0.004 초 이하로 작아지면 그 크기가 일정해지고 있다. 돔 정상부 주응력의 크기는 시간간격이 0.004 초 이하로 작아지기 이전부터 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 그리고 결과파일의 크기는 시간간격이 작아질수록 급격하게 증가하고 있다. 따라서 해석결과의 신뢰성과 해석시간의 경제성을 고려하여 이후의 지진해석 시 시간간격의 크기는 0.004 초로 한다.

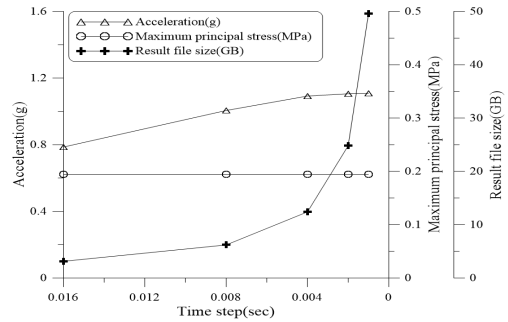


Fig. 5. Convergence of acceleration and maximum principal stress at the dome top in Case Modu_T1283_F0.4_W10(the analysis result file sizes are also illustrated)

3. 해석결과분석

3.1 고유진동해석

지진해석을 수행하기에 앞서, 모듈화 격납구조의 동적 거동특성을 예측하기 위해 고유진동해석을 수행한다. 모듈화 및 일체화 격납구조의 고유진동해석 결과는 Table 5와 같다. 기존의 대형 원전 격납구조의 1차 고유진동수는 약 4.5 Hz 정도이나[14], 본 연구의 격납구조는 소형이므로 모듈화 및 일체화 격납구조의 1차 고유진동수는 각각 17.7 Hz, 23.3 Hz가 되어 상대적으로 큰 값을 갖는다. 그리고 모듈화 격납구조의 고유진동수가 일체화 격납구조의 고유진동수보다 작은 결과를 보인다. 이는 모듈화 격납구조의 경우 연결부의 존재로 인해 강성이 감소되는 효과가 반영된 것으로 판단된다.

모듈화 및 일체화 격납구조 모두 동일하게 1, 2차 모드형상은 수평방향(X, Z)으로 기울어지는 형상을 나타내며, 3차 모드형상은 수직축(Y)을 중심으로 회전하는 형상을 보이고 있다. 그리고 차수가 증가하여도 대체적으로 유사한 모드형상(원통형 벽체에 휨 발생)을 나타내고 있다. 즉, 모듈화 격납구조의 경우 연결부가 있어도 긴장재에 도입되는 긴장력과 연결부 접촉면의 마찰력에 의해 일체화 격납구조와 유사한 동적거동을 나타내고 있다.

3.2 지진해석

모듈화 격납구조의 지진해석은 하중단계(load step)를 구분하여, 첫 번째 하중단계에서 격납구조의 자중과 긴장재에 부여되는 프리스트레스를 먼저 도입시킨 후, 두 번째 하중단계부터 입력지진파를 이용하여 지진해석을

Table 5. Natural frequency of containment structure(Case Modu_T1283_F0.4 and Mono_T1283)

Order	Modular		Monolithic	
	Frequency (Hz)	Remark	Frequency (Hz)	Remark
1	17.6730	Z direction	23.3140	Z direction
2	17.6771	X direction	23.3168	X direction
3	31.5412	Y rotation	49.4489	Y rotation
4	42.9629	Shell bending	54.1169	Shell bending
5	46.9507	Shell bending	54.1303	Shell bending
6	56.4070	Shell bending	63.3886	Y direction
7	56.4168	Shell bending	72.1220	Shell bending
8	59.9338	Y direction	72.1275	Shell bending
9	72.2314	Shell bending	80.5497	Shell bending
10	72.2361	Shell bending	80.5510	Shell bending

수행한다(감쇠비 5 % 적용). 입력지진파 세트 W10과 W24의 PGA값을 각각 [수평X 0.3 g, 수직Y 0.2 g, 수평Z 0.3 g], [수평X 0.6 g, 수직Y 0.4 g, 수평Z 0.6 g], [수평X 0.9 g, 수직Y 0.6 g, 수평Z 0.9 g] 등과 같은 방식으로 선형 스케일링하여 사용한다.

3.2.1 모듈화 격납구조의 변위, 응력 및 연결부 접촉면 갭 크기의 변화특성

입력지진파 세트 W10의 PGA값을 증가시켰을 때 격납구조의 돔 구조 정상부 최대 변위는 Fig. 6과 같이 변화한다. 전체적으로 입력지진파의 PGA값 증가에 따라 최대 변위가 증가한다. 고유진동해석 결과에서 확인되는 것처럼, 일체화 격납구조 대비 모듈화 격납구조의 강성이 연결부의 존재로 인해 작아지기 때문에, 모듈화 격납구조의 최대 변위가 더 크게 발생하고 있다.

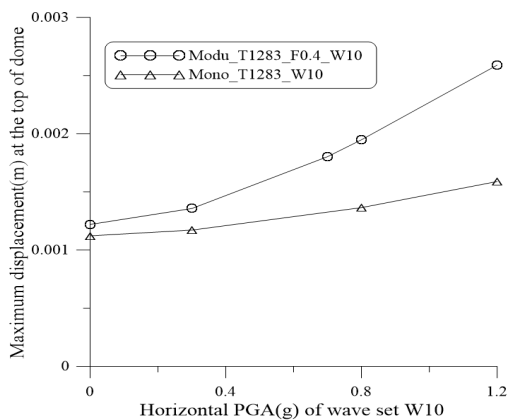


Fig. 6. Maximum displacement at the top of dome in Case Modu_T1283_F0.4_W10 and Mono_T1283_W10

입력지진파 세트 W10의 PGA값 변화 시 모듈화 격납구조의 지점부와 돔 구조 정상부에 발생하는 콘크리트 응력(주응력)과 모듈 간 갭 크기의 변화특성은 Fig. 7과 같다. 콘크리트에 발생하는 응력이 가장 큰 곳은 모듈화 격납구조의 지점부이며 같은 위치에서 갭이 발생한다. 즉, 일체화 격납구조와 유사하게, 격납구조의 일반부가 아닌 지점부에서 먼저 갭이 발생하고 있다.

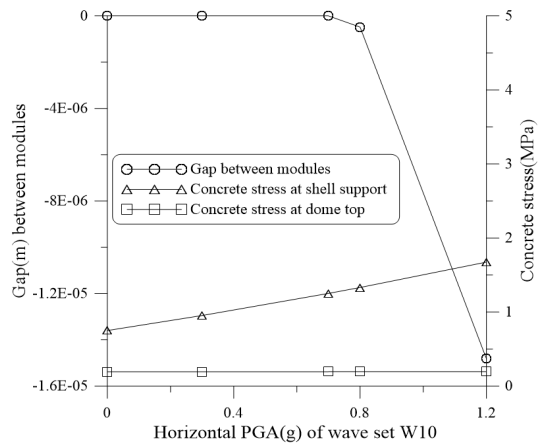


Fig. 7. Concrete stress and gap between modules in Case Modu_T1283_F0.4_W10

입력지진파 세트 W10의 PGA값 증가에 따른 모듈화 격납구조의 긴장재 응력과 모듈 간 갭 크기의 변화특성은 Fig. 8과 같다. 긴장재에 발생하는 응력은 갭 발생 이후에도 긴장재 항복강도 이하의 응력수준을 유지하고 있다. 즉, 긴장재의 응력이 항복강도에 도달하기 전에 갭이 먼저 발생하고 있다.

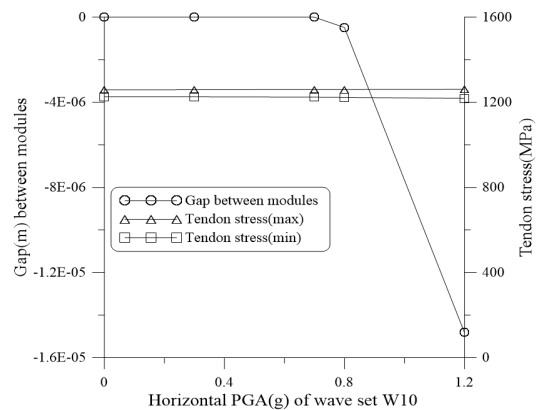


Fig. 8. Tendon stress and gap between modules in Case Modu_T1283_F0.4_W10

3.2.2 긴장력 변화가 격납구조의 내진성능에 미치는 영향

격납구조의 내진성능을 설명하기 위한 기본 가정은 다음과 같다. 주응력이 콘크리트 인장강도를 초과할 때 균열이 생긴다고 할 수 있으므로, 일체화 격납구조의 내진성능은 입력지진파 세트의 PGA값 중에서 주응력이 콘크리트 인장강도를 넘지않는 최대 PGA값으로 정의 한다. 모듈화 격납구조의 내진성능은 모듈 간 갭이 생기지 않는 최대 PGA값으로 정의한다. 각 긴장재에는 동일한 응력이 도입되는 것으로 가정하므로 긴장재의 단면적 증감을 통해 긴장력을 변화시킨다.

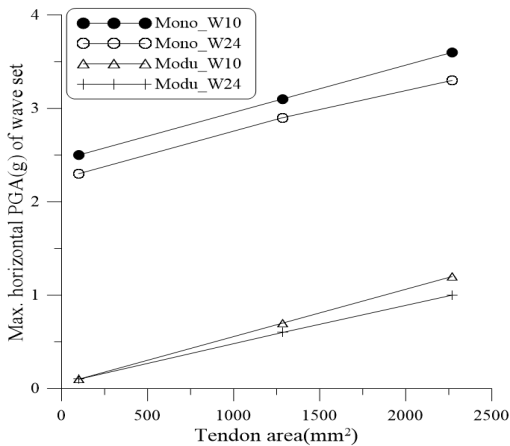


Fig. 9. Seismic performance of containment structure in Case Mono_T99, T1283, T2270, Modu_T99_F0.4, T1283_F0.4, T2270_F0.4 under wave set W10 and W24(tendon area 100 mm² corresponds to tendon force of 126.3 kN because all the tendon stresses are 1263 MPa.)

모듈화 및 일체화 격납구조의 내진성능은 Fig. 9에 보이는 것처럼 긴장재에 도입되는 긴장력(긴장재의 단면적)이 증가함에 따라 증가한다. 입력지진파는 수평 및 수직 방향으로 구성된 3개의 지진파가 1개의 세트이므로, Fig. 9의 세로축은 입력지진파 세트의 수평 방향 성분의 PGA값으로 나타낸다. 모듈화 및 일체화 격납구조 모두 입력지진파의 종류에 따라 내진성능이 약 0.1~0.3 g 정도 차이를 보이고 있으나, 전체적으로는 긴장력 증가 시 내진성능이 증가하는 경향을 보이고 있다. 도입되는 긴장력의 크기가 동일할 때 모듈화 격납구조의 내진성능은 일체화 격납구조 대비 수평방향 최대 PGA값이 약 2.2~2.4 g 정도 작다. 하지만 긴장재 추가배치를 통해 긴장력을 증가시키

면 모듈화 격납구조에서도 기존 원전의 설계지진 크기인 0.2~0.3 g [14] 이상의 내진성능이 확보되고 있다.

3.2.3 연결부 접촉면 마찰계수 변화가 모듈화 격납구조의 내진성능에 미치는 영향

모듈화 격납구조의 내진성능은 연결부 접촉면 마찰계수의 크기에 따라 Fig. 10과 같은 변화를 보인다. 입력지진파의 종류에 따라 내진성능에 다소 차이가 있으나, 전체적으로는 연결부 접촉면의 마찰계수가 증가할수록 내진성능이 증가하는 결과를 보이고 있다.

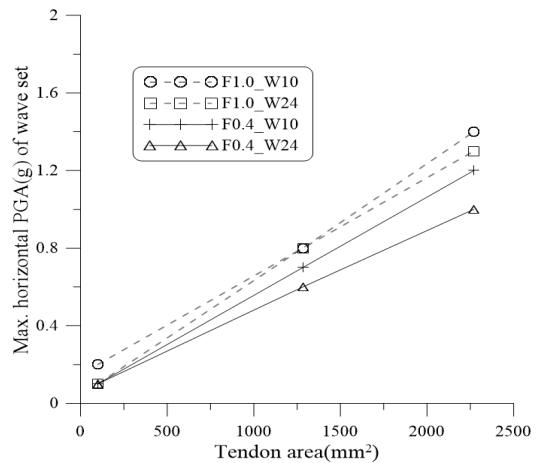


Fig. 10. Effect of friction coefficient in contact surface on the seismic performance in Case Modu_T1283

4. 결론

소형 원자로용 모듈화 격납구조의 내진성능 분석을 위해 연결부 접촉면과 긴장재 배치를 고려하여 유한요소 모델을 작성했다. 고유진동해석을 통해 격납구조의 동적 거동특성을 분석하고 지진해석을 통해 모듈화 격납구조의 변위, 응력 및 연결부 접촉면 갭 크기의 변화특성을 분석했다. 그리고 긴장력, 연결부 접촉면 마찰계수, 입력지진파 등의 변수가 모듈화 격납구조의 내진성능에 미치는 영향을 분석했다. 이에 대한 결론은 다음과 같다.

첫째, 긴장재의 긴장력과 연결부 접촉면의 마찰력에 의한 합성효과로 모듈화 격납구조는 발생 가능성이 가장 높은 1, 2차 고유모드에서 일체화 격납구조와 유사한 횡방향 동적거동을 한다.

둘째, 긴장력과 마찰력에 의한 합성효과가 충분히 발휘될 경우, 연결부를 갖는 모듈화 격납구조에서도 일정수준 이상의 내진성능이 확보된다.

셋째, 연결부 접촉면 재질을 마찰계수가 더 큰 재료로 바꿀 경우 추가적인 내진성능 향상이 기대된다.

References

[1] IAEA, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, p.250, International Atomic Energy Agency, 2018, p.1

[2] International Atomic Energy Agency. IAEA ARIS(Advanced Reactors Information System) [Internet]. IAEA, c2019 [cited 2019 June 04]. Available From: <https://aris.iaea.org/sites/SMR.html> (accessed Jun. 04, 2019).

[3] F. Lin, H. Li, "Safety analysis of nuclear containment vessels subjected to strong earthquakes and subsequent tsunamis", *Nuclear Engineering and Technology*, Vol.49, No.5, pp.1079-1089, Aug. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2017.03.008>

[4] P. Yi, Q. Wang, X. Kong, "Aseismic safety analysis of a prestressed concrete containment vessel for CPR1000 nuclear power plant", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol.16, No.1, pp.55-67, Jan. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11803-017-0368-y>

[5] J. H. Lee, J. K. Kim, K. J. Hong, "Characteristics of Earthquake Responses of an Isolated Containment Building in Nuclear Power Plants According to Natural Frequency of Soil", *Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.17, No.6, pp.245-255, Nov. 2013. DOI: <https://doi.org/10.5000/EESK.2013.17.6.245>

[6] J. W. Huh, H. S. Jung, J. M. Kim, C. H. Hyun, "Seismic Response Analysis of NPP Containment Structures to Improve the Guidelines of Strong Motion Duration", *Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.15, No.4, pp.33-43, Aug. 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.5000/EESK.2011.15.4.033>

[7] T. Hirama, M. Goto, H. Kumagai, Y. Naito, A. Suzuki, H. Abe, K. Takiguchi, H. Akiyama, "Seismic proof test of a reinforced concrete containment vessel (RCCV): Part 3. Evaluation of seismic safety margin", *Nuclear Engineering and Design*, Vol.237, No.11, pp.1128-1139, Jun. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2007.01.009>

[8] N. J. S. Gorst, S. J. Williamson, P. F. Pallet, L. A. Clark, Friction in temporary works, Technical Report, The University of Birmingham, United Kingdom, pp.20.

[9] D. A. Gasparini, E. H. Vanmarcke, SIMQKE: A Program for Artificial Motion Generation, Technical Report, Department of Civil Engineering, MIT, US, pp.1-101.

[10] D. K. Kim. SSL Software & EQ Data. Structural System

Laboratory [Internet]. Kusan National University, c2018 [cited 2018 September 22]. Available From: http://www.kim2kie.com/3_ach/SSL_Software.php (accessed Jun. 04, 2019).

[11] U.S. NRC, Regulatory Guide 1.60 Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, Technical Report, U.S. Nuclear Regulatory Commission, US, pp.1-13.

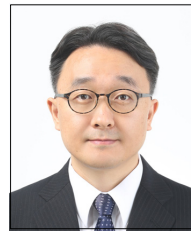
[12] ASCE, ASCE Stanadard 4-98 Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary, p.134, ASCE, 1999, pp.1-35

[13] W. R. Park, S. S. Yhim, "Analysis of Internal Pressure Capacity of Modular Containment Structure for Small Modular Reactor", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.20, No.8, pp.362-370, Aug. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.8.362>

[14] S. G. Cho, S. H. Lee, "Seismic Design of Safety Related Concrete Structures of Nuclear Power Plant", *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol.23, No.4, pp.22-27, Jul. 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.22636/MKCI.2011.23.4.22>

박 우 룡(Woo-Ryong Park)

[정회원]



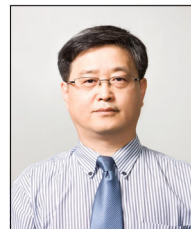
- 2002년 2월 : 서울시립대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2015년 7월 ~ 현재 : 현대엔지니어링 (주)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 서울시립대학교 대학원 토목공학과 (박사과정)

<관심분야>

토목구조, 구조진동

임 성 순(Sung-Soon Yhim)

[정회원]



- 1987년 8월 : 서울대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1993년 1월 ~ 1999년 3월 : 서울시립대학교 토목공학과 조교수
- 1999년 4월 ~ 2004년 8월 : 서울시립대학교 토목공학과 부교수
- 2004년 9월 ~ 현재 : 서울시립대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

토목구조, 구조진동