

## 소형 원자로용 모듈화 격납구조의 내압성능 분석

박우룡, 임성순\*  
서울시립대학교 토목공학과

### Analysis of Internal Pressure Capacity of Modular Containment Structure for Small Modular Reactor

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

**요약** 격납구조는 사고시 방사능 유출을 막기 위해 내압성능을 확보해야 하므로 소형 원자로용 격납구조에 모듈 방식을 적용하기 위해서는 내압성능의 분석이 필요하다. 따라서 소형 원자로용 모듈화 격납구조의 내압성능 분석을 위해 프리캐스트 콘크리트 모듈과 모듈 사이의 연결부 접촉면과 긴장재 배치를 고려한 FEM모형을 작성하고 정적해석을 수행한다. 이를 통해 모듈화 격납구조의 하중단계별 변위 및 응력의 변화특성을 분석한다. 그리고 변수 분석을 위해 선정된 각 변수가 모듈화 격납구조의 내압성능에 미치는 영향을 분석한다. 비교를 위해 일체화 격납구조의 내압성능도 함께 분석한다. FEM해석을 통한 변수 분석을 통해 긴장력 크기, 긴장재 배치 간격, 콘크리트 두께방향 긴장재 위치, 연결부 접촉면 마찰 계수 크기, 콘크리트 두께 등과 같은 변수 값의 범위가 제시되었다. 모듈화 격납구조의 모듈 간 접촉면에서 합성효과를 발생시켜주는 주요인자는 긴장재에 의한 긴장력과 연결부 접촉면의 마찰력이다. 일체화 격납구조 대비 추가적인 긴장재 배치를 통해 긴장력을 증가시키면 모듈화 격납구조에서도 일체화 격납구조와 동등 수준의 내압성능을 확보할 수 있다.

**Abstract** The internal pressure capacity of a modular containment structure requires analysis to prevent the release of radioactive material in the case of an accident. To analyze the capacity, FEM models were prepared while considering the tendon arrangements and the contact surfaces between precast concrete modules, and then static analyses were carried out. The changing characteristics in the displacement and stress under step-wise loading were analyzed, along with the effects of selected parameters. For comparison, the capacity of a monolithic containment structure was also analyzed. Parametric analyses were done to suggest ranges of parameters such as the tendon force, tendon spacing, tendon location in concrete thickness direction, friction coefficient, and concrete thickness. The tendon force and frictional force provide a combined effect between contact surfaces of modules. The same level of internal pressure capacity can be secured even in the modular containment structure as in the monolithic containment structure by increasing the tendon force with additional tendons.

**Keywords** : Internal Pressure Capacity, Modular Containment Structure, Small Modular Reactor, Tendon Force, Frictional Force

### 1. 서론

인도, 러시아, 한국 등 여러나라에서 다양한 소형 모듈

형 원자로(SMR: Small Modular Reactor, 이하 SMR)가 개발되고 있다[1-3]. SMR이란 발전용량 300 MW 이하인 소형 원자로를 말한다[4]. SMR은 모듈 방식이므로

\*Corresponding Author : Sung-Soon Yhim(University of Seoul)  
email: yhimss@uos.ac.kr

Received June 3, 2019  
Accepted August 2, 2019

Revised July 1, 2019  
Published August 31, 2019

단위 원자로를 필요한 만큼 복수로 연결하여 더 많은 전력을 생산하는 발전소를 구성할 수 있다. 그리고 사전에 공장에서 제작 후 운반하여 현장에서 주로 조립만 하는 방식이므로 설치기간을 줄일 수 있다. 발전소 건설시 이와 같은 모듈 방식의 장점을 극대화시키기 위해서는 원자로를 둘러싸는 격납구조(containment structure)에도 모듈 방식의 적용이 필요하게 된다. 이 경우, 원자로 격납구조는 보통 프리스트레스트 콘크리트 구조를 적용하므로 모듈방식의 적용을 위해서는 프리캐스트 콘크리트 모듈을 직접 연결할 필요가 생기게 된다.

이러한 모듈화 격납구조의 적용을 위해서는 내압성능 분석이 필요하다. 원자로 격납구조는 원자로 사고시 방사능 유출을 차단하여 인명을 보호하고 재산 피해를 막는 최후의 수단이므로 그 역할이 매우 중요한 구조물이다. 격납구조가 방사능 유출을 막기 위해서는 사고로 인해 내부 압력이 증가하더라도 일정수준의 내압성능을 유지해야하므로 내압성능에 대한 분석을 위해 다수의 연구가 수행되고 있다[5-9]. 같은 이유로 모듈화 격납구조의 안전성 검증을 위해서도 내압성능의 분석이 필요하다. 특히, 구조재료가 분리될 수 있는 모듈 간 연결부가 취약할 수 있으므로 연결부의 영향을 고려한 내압성능 분석이 필수적이다. 하지만 이에 대한 기존의 연구사례는 제한적인 상황이다.

본 연구의 목적은 소형 원자로용 모듈화 격납구조의 내압성능 분석이다. 이를 위해 정적해석(static analysis)을 수행하여 다음 사항을 분석한다. 첫째, 격납구조의 하중단계별 변위 및 응력 변화특성을 분석한다. 둘째, 변수 분석(parametric analysis)을 위해 긴장력 크기, 콘크리트 두께방향 긴장재(tendon) 위치, 연결부 접촉면 마찰계수, 콘크리트 두께, 콘크리트 모듈 개수를 변수로 하여 각각의 변수 변화에 따른 내압성능의 변화를 분석한다. 비교를 위해 일체화 격납구조의 내압성능도 함께 분석한다.

## 2. FEM 해석

### 2.1 모듈화 격납구조의 형상

소형 원자로용 모듈화 격납구조의 형상은 Fig. 1과 같다. 일반적으로 원자로용 격납구조는 상부의 돔(dome)과 돔을 받치는 원통형 벽체(cylindrical shell) 그리고 바닥의 기초 슬래브로 구성되는 일체화 구조이다. 이에 반해 모듈화 격납구조는 일체화 격납구조와 형상은 동일하나 복수의 단위 모듈이 모여 전체 격납구조를 형성하

게 된다. 이때, 모듈 사이의 접촉면이 수평, 수직방향으로 형성된다. 수평 방향 접촉면은 돔과 원통형 벽체 사이 (spring line), 원통형 벽체의 상부 벽체와 하부 벽체 사이, 그리고 원통형 하부 벽체와 기초 슬래브 사이에 형성된다. 수직방향 접촉면은 돔, 원통형 벽체 각각에서 모듈 분할 위치에 형성된다. 격납구조의 상세 단면 특성치는 Table 1과 같다.

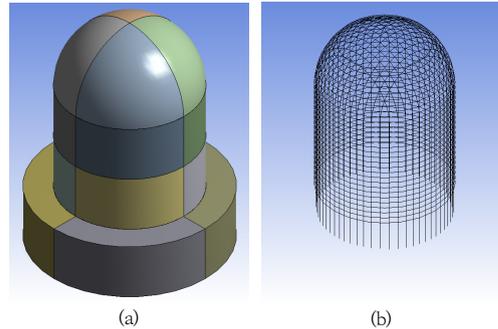


Fig. 1. Modular containment structure  
(a) Concrete module (b) Tendon

Table 1. Section property of modular containment structure

Section	Outside diameter(m)	Inside diameter(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

격납구조의 돔과 원통형 벽체 내부에는 부착 긴장재가 수직방향과 원주방향(circumferential direction)으로 배치된다. 총 28개의 역U자 형태 수직방향 긴장재는 돔의 상부(돔 정상에서 돔 하부 방향으로 45도 구간)에서 각각 14개의 긴장재가 서로 직교하도록 배치되며 돔을 받치는 원통형 벽체를 지나 기초 슬래브까지 연장되어 배치된다. 총 30개의 원주방향 긴장재는 돔의 하부(돔과 원통형 벽체 접촉면에서 돔 정상 방향으로 45도 구간)에 10개가 배치되며 원통형 상부 벽체와 하부 벽체에 각각 10개가 배치된다. 이때, 콘크리트 두께방향 긴장재 배치 순서는 수직방향 긴장재를 안쪽에 배치하고 이를 바깥쪽에서 감싸는 위치에 원주방향 긴장재를 배치한다[10].

통상의 격납구조를 이루는 구성요소로 콘크리트와 긴장재 외에 철근과 라이너(liner)가 있다. 그러나 모듈화

격납구조에서는 모듈 간 연결부에서 철근은 불연속하게 되고, 방사능 차폐를 위한 라이너는 주요 구조 부재가 아니므로, 긴장재가 모듈과 모듈을 연결하는 주요 역할을 하게 된다. 따라서 긴장재에 의한 연결부의 합성효과에 주목하고 경제적인 해석모델 구성을 위해 본 연구의 해석모델에서 철근과 라이너를 포함시키지 않기로 한다. 또한, 격납구조에서 사람 또는 장비 출입을 위한 개구부, 원주방향 긴장재 정착을 위한 부벽(buttress), 그리고 수직방향 긴장재 정착을 위한 기초 슬래브 내 텐던 갤러리(tendon gallery)는 각각 해당 위치에서 국부적으로 영향이 있으나 이러한 요소가 없는 일반부의 구조거동에 영향이 적을 것으로 판단되어[11] 본 연구의 해석모델에서 포함시키지 않는다.

## 2.2 FEM 모델

범용해석소프트웨어인 ANSYS를 이용하여 모듈화 및 일체화 격납구조를 모델링한다. 콘크리트가 사용되는 돔, 원통형 벽체, 그리고 기초 슬래브 모델링에는 3차원 솔리드 요소(solid185)를 사용한다. 이 요소는 8절점 요소이며 각 절점에서 3개의 자유도를 갖는다. 강재(steel)로 이루어진 긴장재 모델링에는 일축 요소(link180)를 사용하며 내부 명령어(r)를 이용하여 압축하중은 받지 못하고 인장하중만 받도록 설정한다. 이 요소는 2절점 요소이며 각 절점에서 3개의 자유도를 갖는다.

콘크리트와 긴장재는 완전부착되어 상호 간의 상대변위가 없는 것으로 가정한다. 이를 위해 내부 명령어(ceintf)를 이용하여 긴장재 절점과 긴장재 주변 콘크리트 요소 사이를 연결해주는 구속조건(constraint equation)을 생성시킨다.

모듈화 격납구조 단위 모듈 사이의 접촉면은 프리캐스트 콘크리트 모듈이 서로 직접 맞닿는 것으로 가정한다. 접촉면 설정은 접촉면에서 분리 또는 미끄러짐(sliding)이 발생할 수 있도록 마찰 조건(frictional condition)을 적용하며 마찰계수는 0.4[12]로 한다. 원통형 하부 벽체와 기초 슬래브 사이는 지점부이므로 일체화시켜 분리 또는 미끄러짐이 없는 것으로 가정하여, 접촉면 설정은 결합 조건(bonded condition)을 적용한다. 격납구조 기초 슬래브는 단단한 지반 속에 묻혀 있는 것으로 가정하여, 기초 슬래브 측면 및 바닥면의 모든 절점 자유도를 고정시킨다.

콘크리트와 긴장재의 재료 특성치는 각각 Table 2, 3과 같다.

Table 2. Concrete material property

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

Table 3. Tendon material property

Elasticity modulus (MPa)	Poisson's ratio	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
1.9E+5	0.3	1579	1857	7841

내부 명령어(inistate)를 사용하여 긴장재 요소에 초기조건으로 프리스트레스를 도입한다. 이때, 격납구조 긴장재의 유효긴장응력은 원주방향 긴장재와 수직방향 긴장재 모두 재료 항복강도의 80 %인 1263 MPa이 도입되는 것으로 가정한다.

Table 4. Parameter type for static analysis

Parameter type		Description	Remark
No. 1	Modu	Modular	Containment structure type
	Mono	Monolithic	
No. 2	V3	3	Module division number in vertical direction
	V2a	2 (between dome and cylindrical shell)	
	V2b	2 (between cylindrical shell top and bottom)	
No. 3	C4	4	Module division number in circumferential direction
	C2	2	
No. 4	T1.6	1.6	Concrete thickness(m)
	T1	1.0	
	T0.4	0.4	
No.5	T99	99	Tendon area(mm <sup>2</sup> )
	T691	691	
	T1283	1283	
	T1875	1875	
	T2468	2468	
No. 6	O	Outward	Tendon layer location in concrete thickness direction
	M	Mid	
	I	Inward	
Example of analysis case name	Modu_V3C4T1.6_T99O	Modular structure, divided by 3 in vertical direction, 4 in circumferential direction, concrete thickness 1.6 m, tendon area 99 mm <sup>2</sup> , outward tendon layer arrangement	

### 2.3 해석 케이스

소형 원자로용 모듈화 격납구조의 내압성능 분석을 위해 변수 변화에 따른 내압성능의 변화를 분석한다. 이때, 긴장력 크기, 콘크리트 두께방향 긴장재 위치, 연결부 접촉면 마찰계수, 콘크리트 두께, 원주방향 및 수직방향 콘크리트 모듈 개수를 변수로 사용한다. 변수 종류 상세와 해석 케이스 명칭에 대한 예는 Table 4와 같다.

### 2.4 수렴성

모듈화 격납구조 해석시 요소분할수 증가에 따른 해석 결과 및 전체 모델의 요소 개수의 변동 특성은 Fig. 2와 같다. 격납구조를 이루는 각 솔리드 요소의 원주방향, 수직방향 그리고 두께방향 요소 크기는 서로 유사한 크기가 되도록 분할한다. 모듈화 격납구조의 극한내압(ultimate pressure)은 모듈 간 연결부에 갭(gap)이 발생하지 않는 최대 내압으로 정의한다. 이와 같은 조건에서 두께가 1 m인 돔과 원통형 벽체의 두께방향 요소분할수가 2보다 큰 경우 해석결과(극한내압)가 거의 변동이 없이 일정한 값으로 수렴한다. 그리고 두께방향 요소분할수가 3이상인 경우 전체 모델의 요소 개수가 급증하고 있다. 따라서 본 연구의 해석에서는 이후에 다뤄질 두께방향 영향분석 및 경제적인 해석 수행을 위해 돔과 원통형 벽체 두께방향 요소분할수를 3으로 정하여 해석을 수행한다.

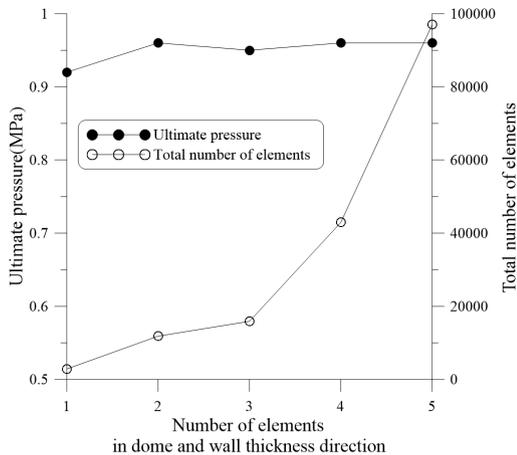


Fig. 2. Convergence of analysis results(ultimate pressure) and total number of elements in Case Modu\_V3C4T1\_T1283M

## 3. 정적해석 결과분석

### 3.1 모듈화 격납구조 하중단계별 변위 및 응력 변화 특성

모듈화 격납구조의 하중단계별 변형특성은 Fig. 3과 같다. 첫 번째 단계로 단위 모듈이 각각의 위치에 배치된 직후에는 모듈 콘크리트 자중만 작용하게 된다. 이 단계에서는 돔, 원통형 상부 벽체, 하부 벽체 간 연결부에 수직방향으로 작용하는 콘크리트 자중에 의해 모듈 간 구속력이 작용한다. 그러나 원주방향으로는 모듈 사이에 구속하는 힘이 없으므로 수직방향 연결부에서 모듈이 분리되는 것을 알 수 있다(Fig. 3(a)). 두 번째 단계로 모듈 내부에 긴장재가 배치되어 긴장력이 도입되면 분리되어 있던 연결부가 서로 접촉하게 된다. 이때, 긴장력에 의해 돔 정상부(dome crown)는 수직 하부방향으로 원통형 벽체는 격납구조 내부방향으로 수축하여 변위가 발생한다. 그리고 모듈 간 접촉면에서 미소한 미끄러짐이 함께 발생한다(Fig. 3(b)). 세 번째 단계로 내압을 증가시키면 내부 방향으로 수축되어 있던 격납구조가 내압에 의해 돔 정

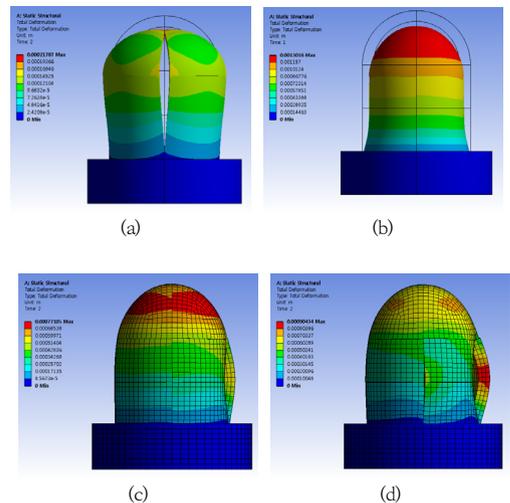


Fig. 3. Deformation of modular containment structure in Case Modu\_V3C4T1\_T1283M(the figure (a) is magnified 6000 times and the figure (b), (c) and (d) are 1200 times.)  
 (a) Step 1 : concrete self weight only (b) Step 2 : concrete self weight + tendon force (c) Step 3 : concrete self weight + tendon force + internal pressure(0.95 MPa) (d) Step 4 : concrete self weight + tendon force + internal pressure(1.0 MPa)

상부는 수직 상부방향으로 원통형 벽체는 격납구조 반경 방향(radial direction)으로 팽창하여 변위가 발생한다. 이때, 모듈 간 접촉면에서 발생하는 미끄러짐은 콘크리트 자중과 긴장력만 작용하는 두 번째 단계보다 조금 줄어

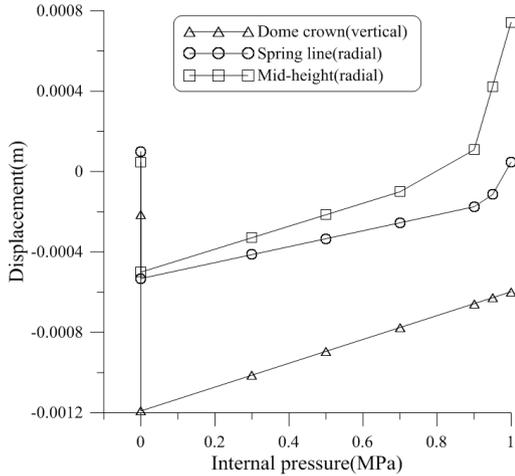


Fig. 4. Dome crown, spring line and mid-height displacement in Case Modu\_V3C4T1\_T1283M (when the internal pressure is 0 MPa, it corresponds to Step 1 and 2 in Fig. 3. In legend, the dome crown means vertical displacement and the spring line and mid-height are radial displacements.)

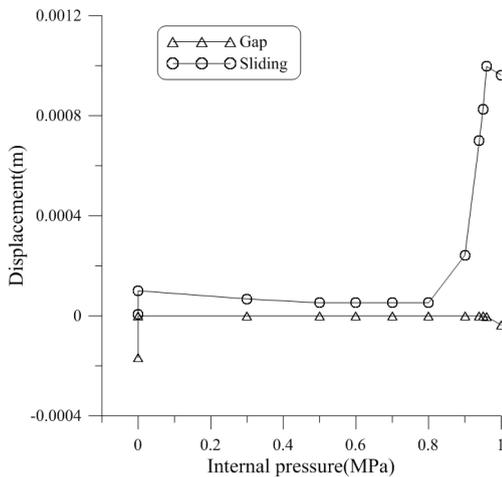


Fig. 5. Maximum gap and sliding at the contact surface in Case Modu\_V3C4T1\_T1283M (when the internal pressure is 0 MPa, it corresponds to Step 1 and 2 in Fig. 3.)

든 후 일정한 값을 유지하다가 모듈이 분리되기 전에 다시 증가하기 시작한다(Fig. 3(c)). 마지막 단계로 내압이 더욱 증가하여 극한내압 이상이 되면 원통형 벽체 모듈 간 연결부(수직방향 접촉면)가 분리되어 격납구조가 그 기능을 상실하게 된다(Fig. 3(d)). 상기에서 설명된 각 하중단계별 돔 정상부 수직방향 변위, 돔과 원통형 벽체 사이 연결부의 반경 방향 변위, 원통형 상부 벽체와 하부 벽체 사이 연결부(mid-height)의 반경 방향 변위에 대한 상세 변화는 Fig. 4와 같다. 그리고 연결부가 분리될 때 접촉면 사이의 거리인 갭과 접촉면 사이의 미끄러짐 크기의 최대값에 대한 하중단계별 변화는 Fig. 5와 같다.

하중단계별 긴장재의 응력 상세는 Fig. 6과 같다. 내압이 증가함에 따라 긴장재의 응력이 조금씩 증가한다. 하지만 전체적으로는 내압이 0 MPa인 경우와 내압이 극한내압 0.95 MPa를 초과하여 연결부 접촉면에 갭이 생긴 이후에도 원주방향과 수직방향 긴장재의 긴장응력은 처음에 입력된 1263 MPa와 동일 수준의 값을 유지하고 있다. 즉, 내압증가시 긴장재의 응력이 항복응력에 도달하기 전에 연결부 갭이 먼저 생기고 있다.

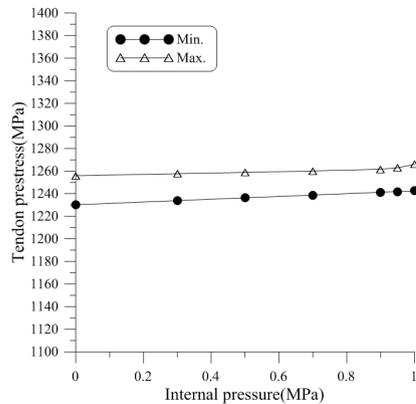


Fig. 6. Maximum and minimum stress of tendon in Case Modu\_V3C4T1\_T1283M (when the internal pressure is 0 MPa, it corresponds to Step 2 in Fig. 3.)

모듈화 격납구조 돔과 원통형 벽체에 극한내압이 작용하는 경우의 주응력 분포는 Fig. 7과 같다. 내압이 증가하여 극한내압(0.95 MPa)이 작용할 때 콘크리트의 주응력은 약 -1.68 ~ 0.88 MPa 로 콘크리트의 인장강도를 넘지 않는다.

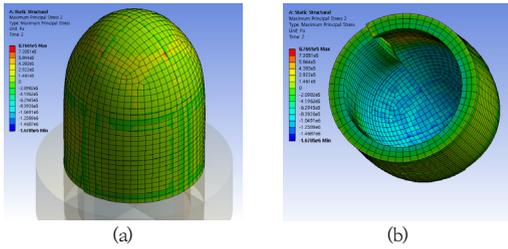


Fig. 7. Maximum principal stress of concrete in Case Modu\_V3C4T1\_T1283M(internal pressure is 0.95 MPa)  
(a) Isometric view (b) View from bottom

모듈화 격납구조의 하중단계별 변위 및 응력 변화특성은 긴장재 단면적이 99, 691, 1875, 2468 mm<sup>2</sup> 인 경우에도 앞서 설명된 긴장재 단면적이 1283 mm<sup>2</sup> 인 경우(Case Modu\_V3C4T1\_T1283M)와 유사한 경향을 보인다.

### 3.2 긴장력 변화 영향

모듈화 격납구조의 긴장력 변화에 따른 내압성능 변화 특성은 Fig. 8과 같다. 긴장력이 증가함에 따라 격납구조

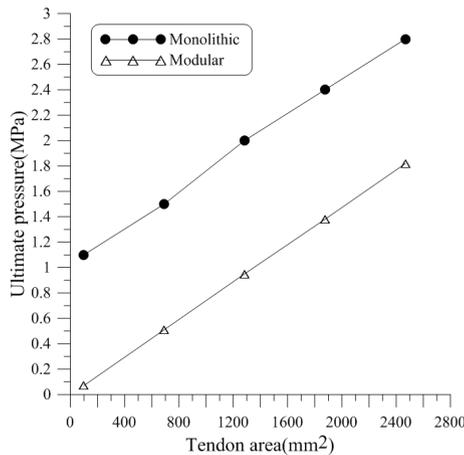


Fig. 8. Internal pressure capacity of containment structure in Case Mono\_V3C4T1\_T99M, T691M, T1283M, T1875M, T2468M, Modu\_V3C4T1\_T99M, T691M, T1283M, T1875M, T2468M(tendon area 100 mm<sup>2</sup> corresponds to tendon force of 126.3 kN because all the tendon stresses are 1263 MPa.)

의 내압성능이 증가한다. 2.4절에서 정의한 것처럼 모듈화 격납구조의 극한내압은 모듈 간 연결부에 갭이 발생하지 않는 최대 내압으로 정의한다. 주응력이 콘크리트의 인장강도를 넘을 때 균열이 발생한다고 할 수 있으므로, 일체화 격납구조의 극한내압은 주응력이 콘크리트의 인장강도를 넘지 않는 최대 내압으로 정의한다. 모든 긴장재에는 동일한 응력이 도입되는 것으로 가정하므로, 긴장력의 증가 또는 감소는 긴장재 단면적의 증감으로 변화를 준다. 동일한 긴장력이 도입되었을 때 모듈화 격납구조의 극한내압은 일체화 격납구조보다 약 1 MPa 작지만 추가적인 긴장재 배치를 통해 긴장력을 증가시키면 필요로 되는 내압성능 확보가 가능한 결과를 보이고 있다.

### 3.3 콘크리트 두께방향 긴장재 위치변화 영향

모듈화 격납구조 연결부에서 내압에 의해 모듈이 분리될 때 돔 또는 원통형 벽체의 외부 또는 내부에서부터 분리가 발생할 것을 가정할 수 있다. 이때, 긴장재 층(tendon layer)을 모듈 분리가 시작되는 위치에 가깝게 배치할 경우 내압성능이 향상되는지에 대한 확인이 필요하다. 이를 위해 콘크리트 두께방향으로 긴장재 층의 위치를 바꿔가며 해석을 수행한다.

콘크리트 두께방향 긴장재의 배치순서 및 위치는 Fig. 9와 같다. 콘크리트 두께(1 m)를 외측, 중앙, 내측 3개의 영역으로 구분한다. 이때, 원주방향 긴장재와 수직방향 긴장재로 이루어지는 긴장재 층을 상기 3개의 영역 중 한곳에 배치하여 내압성능의 변화를 분석한다.

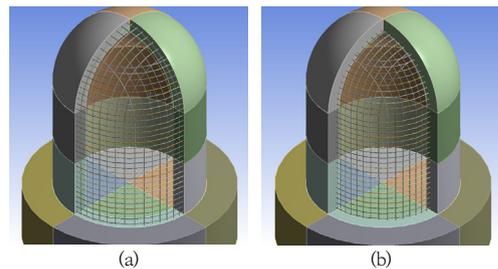


Fig. 9. Tendon layer arrangement in concrete thickness direction  
(a) Outward location(Case Modu\_V3C4T1\_T1283O) (b) Inward location(Case Modu\_V3C4T1\_T1283I)

해석결과 모듈화 격납구조 콘크리트 두께방향 긴장재 위치변화에 따른 내압성능 변화 특성은 Fig. 10과 같다.

이때, 내압증가로 인해 모듈화 격납구조 원통형 벽체 모듈 간 연결부 중에서 수직방향 접촉면이 분리되며 해석 케이스 별로 격납구조 외측 또는 내측에서부터 접촉면 분리가 시작된다. 극한내압은 긴장재 층을 콘크리트 두께 방향 중앙에 배치할 때 가장 크다. 그리고 내측배치, 외측 배치 순서로 극한내압이 점점 작아지며 긴장력이 커질수록 그 감소폭이 커지고 있다. 즉, 긴장재 층이 콘크리트 두께방향 중앙에 위치할 때 가장 효과적으로 연결부를 결합시켜 내압성능을 향상시키는 결과를 보인다.

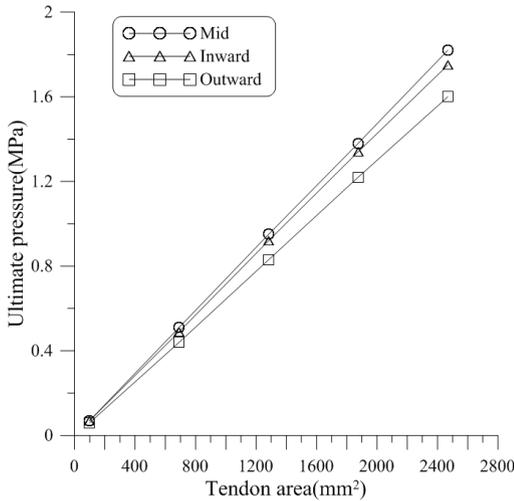


Fig. 10. Effect of tendon layer arrangement in concrete thickness direction on the internal pressure capacity in Case Modu\_V3C4T1\_T990 ~ T2468O, Modu\_V3C4T1\_T99M ~ T2468M, Modu\_V3C4T1\_T99I ~ T2468I

### 3.4 연결부 접촉면 마찰계수 변화 영향

모듈화 격납구조의 연결부 접촉면 마찰계수 변화에 따른 내압성능 변화 특성은 Fig. 11과 같다. 접촉면 마찰계수가 0.3이상인 경우 각 긴장력 크기 별로 일정 수준의 내압성능이 확보되고 있으나 0.2인 경우 긴장력 크기에 상관없이 극한내압이 거의 0에 가깝게 감소하는 경향을 보이고 있다. 모듈화 격납구조의 경우 접촉면은 프리캐스트 콘크리트 모듈이 맞닿고 있다. 이 경우 마찰계수가 0.3보다 큰 0.4이므로 내압성능이 확보된다. 그리고 모듈 접촉면 마찰계수를 0.3에서 1.0까지 증가시켜도 각 긴장력 크기별 내압성능은 거의 변동이 없다. 즉, 연결부 접촉면 재질을 바꿔 마찰계수를 증가시켜도 내압성능 향상에 미치는 영향은 거의 없는 결과를 보인다.

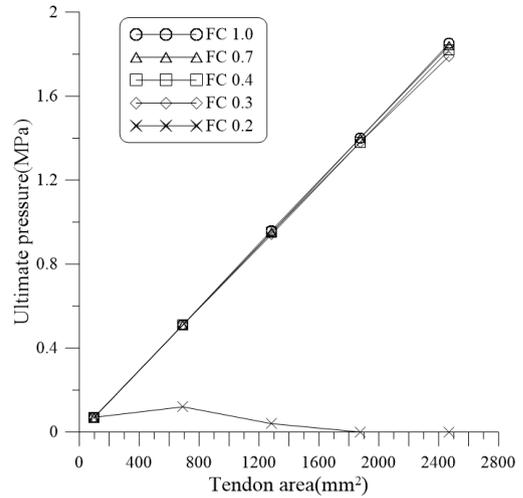


Fig. 11. Effect of friction coefficient in contact surface on the internal pressure capacity in Case Modu\_V3C4T1\_T99M ~ T2468M

### 3.5 콘크리트 두께 변화 영향

모듈화 격납구조의 콘크리트 두께 변화에 따른 내압성능 변화 특성은 Fig. 12와 같다. 콘크리트 두께가 두꺼워질수록 내압성능이 증가하고 있으나 증가율은 감소하고 있다. 특히, 긴장력이 커질수록 그 경향이 뚜렷해지고 있다. 즉, 콘크리트 두께를 증가시켜도 두께가 일정 수준 이상이 되면 내압성능 향상에 미치는 영향은 작아지게 된다.

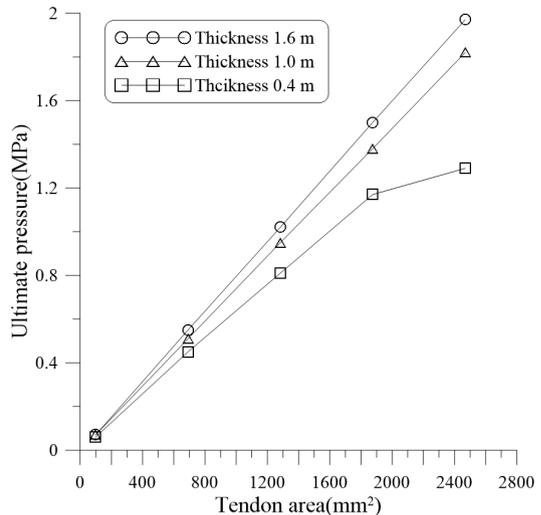


Fig. 12. Effect of concrete thickness on the internal pressure capacity in Case Modu\_V3C4T1.6\_T99M ~ T2468M, V3C4T1\_T99M ~ T2468M, V3C4T0.4\_T99M ~ T2468M

### 3.6 모듈 개수 변화 영향

모듈화 격납구조의 모듈 개수 변화에 따른 내압성능 변화 특성은 Fig. 13과 같다. 원주방향 또는 수직방향 모듈분할수가 바뀌어도 모듈화 격납구조의 내압성능은 거의 변하지 않고 있다. 이는 연결부 개수에 상관없이 일단 연결부가 생기게 되면 그곳이 취약부가 되어 모듈화 격납구조의 극한내압이 결정되기 때문인 것으로 판단된다.

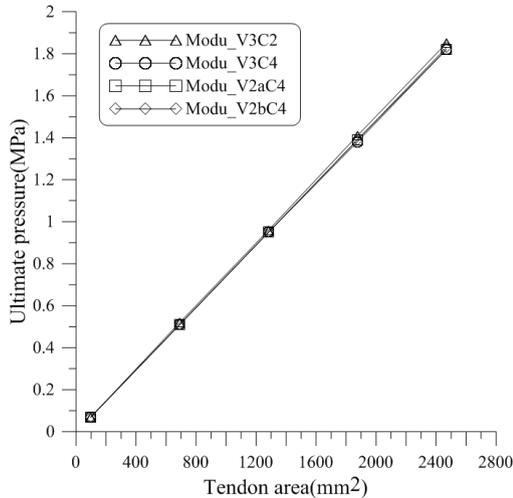


Fig. 13. Effect of module division number on the internal pressure capacity in Case Modu\_V3C4T1\_T99M ~ T2468M, Modu\_V3C2T1\_T99M ~ T2468M, Modu\_V2aC4T1\_T99M ~ T2468M, Modu\_V2bC4T1\_T99M ~ T2468M

## 4. 결론

소형 원자로용 모듈화 격납구조의 내압성능 분석을 위해 프리캐스트 콘크리트 모듈 간 연결부 접촉면과 긴장재 배치를 고려한 FEM모델을 작성했다. 정적해석을 수행하여 모듈화 격납구조의 하중단계별 변위 및 응력 변화특성과 변수 분석에 사용된 각 변수가 내압성능에 미치는 영향을 분석했으며, 그에 대한 결론은 다음과 같다. 첫째, FEM해석을 통한 변수 분석을 통해 소형 원자로용 모듈화 격납구조의 내압성능 확보를 위해 필요로 되는 긴장력 크기, 긴장재 배치 간격, 콘크리트 두께방향 긴장재 위치, 연결부 접촉면 마찰계수 크기, 콘크리트 두께 등과 같은 변수 값의 범위가 제시되었다. 둘째, 모듈화 격납구조 연결부에서 합성효과를 발생시켜주는 주요인자는

긴장재에 의한 긴장력과 연결부 접촉면의 마찰력이다. 이때, 접촉면 마찰계수는 0.3이상이어야 한다. 셋째, 일체화 격납구조 대비 추가적인 긴장재 배치를 통해 긴장력을 증가시키면 모듈화 격납구조에서도 일체화 격납구조와 동등 수준의 내압성능을 확보할 수 있다.

## References

- [1] M. K. Rowinski, T. J. White, J. Zhao, "Small and Medium sized Reactors (SMR): A review of technology", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.44, pp.643-656, Apr. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.006>
- [2] Z. Liu, J. Fan, "Technology readiness assessment of Small Modular Reactor (SMR) designs", *Progress in Nuclear Energy*, Vol.70, pp.20-28, Jan. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pnucene.2013.07.005>
- [3] J. Vujić, R. M. Bergmann, R. Škoda, M. Miletić, "Small modular reactors: Simpler, safer, cheaper?", *Energy*, Vol.45, Issue 1, pp.288-295, Sep. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.078>
- [4] IAEA. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. p.1, International Atomic Energy Agency, 2018.
- [5] D. G. Hahm, H. K. Park, I. K. Choi, "Assessment of the internal pressure fragility of the PWR containment building using a nonlinear finite element analysis", *Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol.27, No.2, pp.103-111, Apr. 2014. DOI: <http://doi.org/10.7734/COSEIK.2014.27.2.103>
- [6] H. G. Kwak, J. H. Kim, S. H. Kim, Y. S. Chung, "Nonlinear analysis of prestressed concrete containment structures considering slip behavior of tendons", *Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol.18, No.4, pp.335-345, Dec. 2005.
- [7] K. Yonezawa, K. Imoto, Y. Watanabe, M. Akimoto, "Ultimate capacity analysis of 1/4 PCCV model subjected to internal pressure", *Nuclear Engineering and Design*, Vol.212, Issues 1-3, pp.357-379, Mar. 2002. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0029-5493\(01\)00498-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0029-5493(01)00498-8)
- [8] M. F. Hessheimer, V. K. Luk, E. W. Klammer, S. Shibata, S. Mitsugi, J. F. Costello, Pretest round robin analysis of 1:4-scale prestressed concrete containment vessel model, Technical Report, Sandia National Laboratories, United States, pp.1-12.
- [9] K. J. Byun, H. W. Song, H. J. Cho, I. S. Kim, Y. J. Yoo, Development of Analysis Method for Prestressed Concrete Reactor Containment Structures subjected to Ultimate Pressure, Technical Report, Engineering

Research Institute, Yonsei University, Korea, pp.1-137.

- [10] H. G. Kwak, J. H. Kim, "Numerical models for prestressing tendons in containment structures", *Nuclear Engineering and Design*, Vol.236, Issue 10, pp.1061-1080, May 2006.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2005.10.010>
- [11] H. P. Lee, Y. S. Choun, I. K. Choi, J. M. Seo, A Study on the Nonlinear Analysis of a 1/4 Scale Prestressed Concrete Containment Vessel Model, Technical Report, Korea Atomic Energy Research Institute, Korea, pp.81-82.
- [12] 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.
- 

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