

## 원전 격납건물 돔 텐던의 축대칭 모델링 기법 II. 수치예제를 통한 검증

전세진 <sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup> 대우건설기술연구소

(2004년 11월 17일 원고접수, 2005년 5월 30일 심사완료)

### Axisymmetric Modeling of Dome Tendons in Nuclear Containment Building II. Verification through Numerical Examples

Se-Jin Jeon <sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup> Daewoo Institute of Construction Technology, Suwon, 440-210, Korea

(Received November 17, 2004, Accepted May 30, 2005)

#### ABSTRACT

Axisymmetric modeling of the nuclear containment building has been often employed in practice to estimate structural behavior for the axisymmetric loadings, where the axisymmetric approximation is required for the actual non-axisymmetric tendon arrangements in the dome. In the preceding companion paper, some procedures are proposed for the domestic CANDU and KSNP type containments that can implement the actual 3-dimensional tendon stiffness and prestressing effect into the axisymmetric model. In this paper, the proposed schemes are verified through some numerical examples comparing the results of the actual 3-dimensional model with those of some axisymmetric models. The results of the proposed axisymmetric analyses show relatively good agreements with the actual structural behavior especially for the CANDU type. Also, it is shown that proper level of the prestressing in a hoop direction plays an important role to predict the actual prestressing effect in the axisymmetric dome modeling. Finally, correction factors are discussed that can revise some approximations introduced in the derivations.

**Keywords :** nuclear containment building, dome, prestressing tendon, axisymmetric model

#### 1. 서 론

원전 격납건물의 축대칭 모델은 내압 등 주요 설계하중에 대한 해석에서 널리 사용되어 왔으며, 이 경우 비축대칭으로 배치된 철근이나 프리스트레싱 텐던은 축대칭 모델에 적합하도록 소정의 절차에 의해 변환해야 한다. 그 중에서도 특히 돔 텐던은 곡률을 가진 돔에 곡선 텐던이 임의로 배치된 관계로 텐던 형상에 대한 좀 더 엄밀한 수학적 유도가 요구된다.

본 연구는 총 2편의 논문으로 이루어졌으며, 앞선 논문<sup>1)</sup>에서는 돔 텐던의 축대칭 모델링 기법을 이론적인 수식을 통하여 제안한 바 있다. 돔에 배치된 텐던의 강성 및 프리스트레싱 효과를 축대칭 모델에서 효과적으로 구현하는 방법론을 국내에서 사용되는 CANDU형 및 한국형(KSNP: Korean Standard Nuclear Power Plant) 원전 격납건물에

대하여 각각 제시하였었다.

본 논문에서는 제안된 축대칭 모델을 적용한 일련의 수치예제들을 범용구조해석 프로그램으로 해석하여 타당성을 검증하였다. 엄밀한 3차원 모델의 해석 결과와 비교하여 축대칭 모델의 근사화 정도를 추정하였으며, 또한 기존 연구에서 제안된 축대칭 모델과의 비교를 통하여 본 모델의 장점을 부각하고자 하였다. 실제에 좀 더 가깝게 거동하도록 필요시 축대칭 모델의 텐던의 강성이나 프리스트레싱 효과에 대해 보정계수를 적용하는 방법론에 대해서도 논하였다.

#### 2. 예제 개요

이하의 예제들에서는 전체 원전 격납건물 중에서 주된 관심사인 돔 부분만을 고려하였으며, 해석을 위해 범용구조해석 프로그램인 ABAQUS<sup>2)</sup>가 사용되었다. Fig. 1에는 CANDU형 돔의 유한요소모델이, Fig. 2에는 한국형 돔의 유한요소모델이 각각 나타나 있으며, Table 1에는 콘크리

\* Corresponding author

E-mail : jsj@dwconst.co.kr

©2005 by Korea Concrete Institute

**Table 1** Finite elements used in the dome modeling

	3-dimensional modeling	Axisymmetric modeling 1	Axisymmetric modeling 2
Concrete elements	3-dimensional solid(8-nodes)	Axisymmetric solid(4-nodes)	Axisymmetric solid(4-nodes)
Tendon elements	Truss (2-nodes)	Axisymmetric membrane(2-nodes)	Truss (2-nodes)
Remarks	Prototype	Proposed modeling	Conventional modeling <sup>3)</sup>

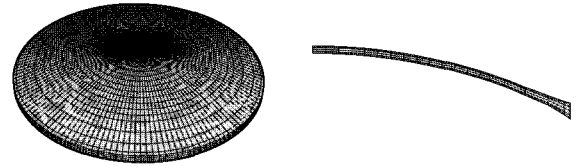
**Table 2** Relevant data of dome

		CANDU type	KSNP type
Concrete	Thickness (m)	0.61	1.07
	Inner radius of curvature (m)	41.45	21.95
	Modulus of elasticity (MPa)	$2.66 \times 10^4$	$2.94 \times 10^4$
	Poisson's ratio	0.18	0.17
Pre-stressing tendon	Prestressing force (kN)	4578	5664
	Area (m <sup>2</sup> )	0.003652	0.005051
	Arrangement	3-way (Number of 1-way tendons: 47)	2-way (Number of 1-way tendons: 48)
	Modulus of elasticity (MPa)	$2.0 \times 10^5$	$1.96 \times 10^5$
	Poisson's ratio	0.3	0.3

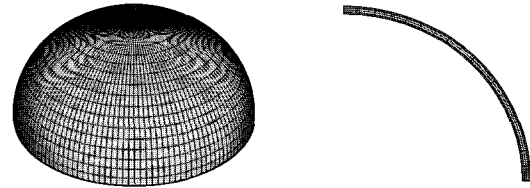
트와 텐던의 모델링을 위해 사용된 유한요소가 3차원 모델과 축대칭 모델 각각에 대하여 비교되어 있다. 3차원 해석에서는 개별적인 돔 텐던들이 실제의 배치 그대로 고려되었으므로 비교 기준이 되며, 축대칭 모델 1은 선행 논문<sup>1)</sup>에서 제안된 모델로서 텐던들을 등가의 층으로 본 것이다. 한편, 축대칭 모델 2는 기존 연구<sup>3)</sup>에서 텐던들을 자오선방향으로 배치된 트러스 요소로 본 경우로서 제안된 모델과의 비교를 위해 도입하였다. 단, 텐던 거동의 정확성 평가에 집중하기 위해 모든 예제에서 철근의 모델링은 제외하였다.

일반적으로 3차원 모델의 유한요소 메시(mesh)를 원주방향으로 세분화 할 수록 축대칭 모델의 해석 결과에 근접하게 된다. 여기에서는 공정한 비교를 위해 3차원 모델의 콘크리트 요소를 원주방향으로 144 등분으로 충분히 세분화하여 축대칭 모델과의 차이를 최소화하고자 하였다. 축대칭 모델의 콘크리트 메시는 3차원 모델의 한 단면상의 콘크리트 메시와 일치시킴으로써 역시 텐던 모델링 이외에는 공정한 조건에서 비교하고자 하였다. 경계조건으로서 돔의 스프링 부분은 수직방향으로만 구속시켰으며, 수평방향으로는 변위를 허용하였다. 텐던의 모델링 방법에는 크게 discrete(이산) 모델, embedded(매설) 모델, smeared 모델 등이 있다<sup>4)</sup>.

여기에서는 프로그램상에서 제공하는 기능을 활용하여 텐던 요소들을 이산 모델처럼 콘크리트 메시 형상에 의존하지 않고 자유롭게 생성하였다. 이렇게 생성된 텐던 요



(a) 3-dimensional model (b) Axisymmetric model  
**Fig. 1** Finite element modeling of dome (CANDU type)



(a) 3-dimensional model (b) Axisymmetric model  
**Fig. 2** Finite element modeling of dome (KSNP type)

소들을 콘크리트 요소 내부에 위치시키면 일반적으로 텐던 요소들의 절점과 콘크리트 요소들의 절점이 일치하지 않는데, 본 프로그램에서는 그러한 절점간의 위치 차이를 자동적으로 보정하는 기능이 있다. 즉, 텐던 절점의 자유도가 콘크리트 절점의 자유도로 표현되어 최종적으로는 매설 모델의 형태를 취하게 된다.

Table 2에는 CANDU형 및 한국형 격납건물의 콘크리트 돔 및 프리스트레싱 텐던에 관련된 자료가 정리되어 있다. 모든 예제들은 정점부의 수직 변위, 스프링부의 수평 변위, 정점과 스프링 중간에서의 원환방향 움직임에 대하여 비교하였으며 이 세가지 값들이 전체적인 거동을 대략적으로 대표할 수 있다고 보았다.

### 3. 텐던 강성의 모델링

#### 3.1 예제 1 : 텐던 강성의 모델링

선행 논문<sup>1)</sup>에서 제안된 축대칭 모델 1은 실제 3차원으로 배치된 텐던의 총 부피를 구하고 이를 축대칭 모델에 적용할 수 있는 등가의 층으로 변환한 것이다. 제안된 절차에 따르면 CANDU형 돔 텐던의 등가 층 두께는 0.01277m로, 한국형은 0.00977m로 산정된다. 한편, 축대칭 모델 2는 층의 단면적을 합산하여 자오선방향으로 단면적이 변하는 트러스로 재구성하여 자오선방향으로 배치한 것이다. 예제 1에서는 텐던 강성 모델링의 정확성만을 평가하기 위해 프리스트레싱은 가하지 않았으며, 0.03 MPa의 내압만을 작용시켰다. 해석 결과는 Tables 3, 4에 비교되어 있다. 단, Table 4의 한국형의 경우 CANDU형과 비교할 때 3차원 모델에서 원주방향으로 해석 결과 값의 변동이 좀 더 큰 관계로 3차원 모델에서는 원주방향 평균값을 명시하였다.

**Table 3 Analysis results for tendon stiffness (Example 1: CANDU)**

	3-dim. modeling (1)	Axisymmetric modeling 1		Axisymmetric modeling 2	
		Value (2)	Ratio (2)/(1)	Value (3)	Ratio (3)/(1)
Vertical displacement at crown (m)	0.00839	0.00786	0.94	0.00834	0.99
Horizontal displacement at spring (m)	-0.00204	-0.00195	0.96	-0.00212	1.04
Hoop stress at mid-height (MPa)	1.495	1.357	0.91	1.549	1.04

### 3.2 예제 1에 대한 결과 분석

축대칭 모델 1은 층 모델인 관계로 자오선방향 및 원환방향 모두 고루 강성을 보유하게 된다. 한편, 축대칭 모델 2는 자오선방향으로 트러스가 배치되므로 자오선방향 강성만을 보유하고 있고 따라서 층 모델에서 원환방향 강성 기여를 무시한 것과 같은 결과를 준다. 그런데, 실제의 텐던은 텐던 축방향으로만 강성의 기여가 있으며 이러한 텐던 축은 일반적으로 자오선 및 원환방향과 일치하지 않으므로 텐던 강성이 자오선 및 원환방향으로 나누어지게 된다. 이러한 점을 고려할 때 축대칭 모델 1은 강성을 실제보다 과대평가하는 반면, 축대칭 모델 2은 과소평가하는 경향이 나타날 것으로 판단된다.

Table 3의 CANDU형은 이러한 예상에 부합하는 결과를 보여 주고 있다. 즉, 축대칭 모델 1은 텐던 강성이 실제보다 다소 크게 평가된 관계로 변위나 응력이 실제보다 다소 작게 산출되며, 축대칭 모델 2는 전반적으로 반대의 결과를 주고 있다. Table 3을 살펴보면, 텐던 강성만을 두고 볼 때에는 축대칭 모델 2가 좀 더 실제에 근접한 결과를 준다고 볼 수도 있으며 이는 텐던의 원환방향 강성 기여가 자오선방향 만큼 크지는 않다는 것을 시사하고 있다. 그러나, 위에서 보듯 프리스트레싱의 효과 면에서 평가할 때 축대칭 모델 2에 초기응력을 가해서는 실제의 거동을 모사할 수 없으므로 일관성이 떨어지는 단점이 있다. 따라서, 텐던 강성면에서 비교적 정해에 가까운 값을 주면서도 프리스트레싱 시의 일관성을 유지한다는 면에서는 제안된 축대칭 모델 1이 좀 더 바람직한 것으로 판단된다.

한편 Table 4의 한국형은 위에서 언급한 강성에 대한 경향이 CANDU형보다는 덜 부합되는 결과를 주고 있다. 이는 한국형의 돔 텐던은 CANDU형과 같이 돔 전체에 분포되기 보다는 부위별로 어느 정도 밀도의 차이가 있으며, 특히 배치 특성상 스프링 부위에 텐던이 덜 배치되므로 스프링부의 강성이 정점부 주변보다 더 작기 때문이다. 그 결과 내압에 대한 3차원 해석에서 스프링 보다는 정점

**Table 4 Analysis results for tendon stiffness (Example 1: KSNP)**

	3-dim. modeling (1)	Axisymmetric modeling 1		Axisymmetric modeling 2	
		Value (2)	Ratio (2)/(1)	Value (3)	Ratio (3)/(1)
Vertical displacement at crown (m)	0.000177	0.000181	1.02	0.000160	0.90
Horizontal displacement at spring (m)	0.000192	0.000177	0.92	0.000192	1.00
Hoop stress at mid-height (MPa)	0.301	0.285	0.95	0.306	1.02

변위가 더 작게 산정됨을 알 수 있다. 반면, 축대칭 모델 1에서는 텐던 강성을 층으로써 돔 전체에 분포시킨 관계로 스프링과 정점의 변위가 비슷하게 산출되어, 3차원 모델과 비교할 때 정점 변위는 다소 크게 평가된 반면 스프링 변위는 다소 작게 평가되고 있다. 3차원 모델과의 차이는 축대칭 모델 1 및 2 모두 비슷한 수준으로 판단되지만, 역시 프리스트레싱 시의 일관성 면에서 축대칭 모델 1이 좀 더 장점이 있다.

## 4. 프리스트레싱 효과의 모델링

### 4.1 예제 2 : 프리스트레싱 효과의 모델링

선형 논문<sup>1)</sup>에서는 돔 텐던들의 정착부 하중 중에서 자오선방향 성분만을 분리한 총합을 구하여서 이로부터 축대칭 텐던에 가할 초기응력을 유도한 바 있다. 정착부 하중 중 원환방향 성분은 축대칭 모델에서 고려하기 어려우며, 또한 텐던들 간에 서로 상쇄되므로 고려하지 않더라도 해석 결과에 큰 영향을 미치지 않는다는 점이다. 제안된 절차에 따라 구한 초기응력은 CANDU형의 경우 669.08 MPa로서 실제 텐던에 도입되는 프리스트레싱의 53.4% 수준이다. 한편, 한국형에 도입되어야 할 초기응력은 787.66 MPa로서 실제의 프리스트레싱의 70.2% 수준이다.

예제 2에서는 각각의 축대칭 모델에 프리스트레싱 효과를 초기응력법으로 구현했을 때의 결과를 비교하였다. 프리스트레싱의 방향에 따른 기여도를 살펴보기 위해 축대칭 모델 1에서는 각각 원환방향, 자오선방향 및 양 방향으로 프리스트레싱을 가하고 결과를 비교하였다. 여기에서는 프리스트레싱 효과의 비교가 주목적이므로 외력을 가하지 않고 프리스트레싱만을 작용시켰다.

또한, 텐던의 탄성계수를 0에 가깝게 줌으로써 텐던 강성의 영향을 배제하여 프리스트레싱 효과 자체에 대해서만 엄밀히 평가하고자 하였다. 해석 결과는 Tables 5, 6에 비교되어 있다.

**Table 5** Analysis results for prestressing effect (Example 2: CANDU)

	3-dimensional modeling (1)	Axisymmetric modeling 1				Axisymmetric modeling 2	
		Hoop PS only	Meridional PS only	Hoop PS + Meridional PS		Value (3)	Ratio (3)/(1)
				Value (2)	Ratio (2)/(1)		
Vertical displacement at crown (m)	-0.01102	0.04042	-0.04807	-0.00765	0.69	-0.04807	4.36
Horizontal displacement at spring (m)	-0.00514	-0.00770	0.00143	-0.00627	1.22	0.00143	-
Hoop stress at mid-height (MPa)	-12.85	-14.38	0.070	-14.31	1.11	0.070	-

**Table 6** Analysis results for prestressing effect (Example 2: KSNP)

	3-dimensional modeling (1)	Axisymmetric modeling 1				Axisymmetric modeling 2	
		Hoop PS only	Meridional PS only	Hoop PS + Meridional PS		Value (3)	Ratio (3)/(1)
				Value (2)	Ratio (2)/(1)		
Vertical displacement at crown (m)	-0.01129	0.01184	-0.01650	-0.00465	0.41	-0.01650	1.46
Horizontal displacement at spring (m)	0.00106	-0.00549	0.000956	-0.00453	-	0.000956	0.90
Hoop stress at mid-height (MPa)	-3.791	-7.460	0.070	-7.390	1.95	0.070	-

역시, Table 6의 한국형의 3차원 모델에서는 원주방향 평균값을 명시하였다. 그러나, 0.00106m로 표시된 스프링 변위는 실제로는 원주방향으로 0.000373m~0.00175m까지 변동하며, -3.791 MPa로 표시된 원환 응력은 -4.442 MPa ~ -3.139 MPa까지 변동하므로 한가지 값으로 대표하기에는 어려움이 있다.

4.2 예제 2에 대한 결과 분석

Table 5의 CANDU형에서 축대칭 모델 1을 살펴볼 때 원환방향 및 자오선방향으로의 프리스트레싱이 모두 중요한 역할을 하며 이 두가지 효과가 적절히 조합되어야 실제의 구조 거동을 모사할 수 있음을 알 수 있다. 특히 원환방향 프리스트레싱의 기여도가 큼을 알 수 있다. 단, 원환방향 프리스트레싱의 영향이 다소 크게 들어가서 실제 거동과 차이를 발생시키는데 이는 층 모델에서 원환방향 강성이 실제보다 다소 크게 고려되는 관계로 텐던에 초기 응력으로 도입하는 프리스트레싱 효과 또한 원환방향으로 좀 더 크게 나타나기 때문으로 생각된다. 당연한 귀결이지만, 자오선 트러스 모델인 축대칭 모델 2에는 자오선방향 프리스트레싱만 도입될 수 있으므로, 층 모델인 축대칭 모델 1에서 자오선방향 프리스트레싱만 가한 경우와 동일한 값을 산출하며 결과적으로 실제 거동을 모사할 수 없음이 명확하다. Table 5에서 축대칭 모델 2는 3차원 해석과 비교할 때 값 차이가 매우 크게 발생하거나 부호를 반대로 예측하기도 한다.

한편 Table 6의 한국형의 경우 축대칭 모델 1에서 원환 및 자오선방향 프리스트레싱을 모두 가하더라도 실제 거동과는 비교적 큰 차이를 보였다. 이는 한국형 돔 텐던은

2방향 배치로서 CANDU형의 3방향 배치와 비교할 때 축대칭으로 거동하는 효과가 떨어지고, 또한 텐던 배치상 정점 부근의 프리스트레싱 효과가 크고 스프링 부분의 프리스트레싱 효과가 상대적으로 적은 반면 축대칭 모델 1에서는 돔 전체적으로 고르게 프리스트레싱이 작용한다고 가정하였기 때문이라 생각된다. 본 한국형 예제에서는 축대칭 모델 1과 2 중 어느 것이 실제 거동과 가깝다는 뚜렷한 경향을 파악하기 어려웠다.

4.3 예제 3 : 프리스트레싱 효과의 모델링

선행 논문<sup>1)</sup>에서는 프리스트레싱의 효과를 구현하기 위해 등가하중법 및 초기응력법<sup>4)</sup>을 적용할 때 축대칭 모델에 필요한 등가하중 및 초기응력의 유도 절차를 제시한 바 있다. 초기응력법에 대한 것은 예제 2에서 이미 언급하였으며, 제시된 절차에 따라 등가하중을 유도해보면 CANDU형에서 정착부 등가집중하중은 원주 전체에 대해  $1.06902 \times 10^6$  kN, 일반부 등가분포하중은 0.40927 MPa로 산정된다. 한국형에서 등가집중하중은 원주 전체에 대해  $1.08749 \times 10^6$  kN, 일반부 등가분포하중은 0.68468 MPa로 산정된다.

예제 3에서는 초기응력법 및 등가하중법을 축대칭 모델 1에 각각 적용하였을 때의 결과를 비교하였으며, Tables 7, 8에 정리되어 있다. 축대칭 모델 1에서 case 1은 등가하중을 텐던 위치에 직접 작용시킨 경우이며, case 2는 등가하중의 작용 위치를 콘크리트 표면으로 옮긴 것이다. 프리스트레싱 효과에 대한 비교에 집중하기 위해 역시 텐던 강성의 영향은 배제하였다.

**Table 7** Analysis results for prestressing effect  
(Example 3: CANDU)

	Axisymmetric modeling 1				
	Initial stress method (1)	Equivalent load method			
		Case 1		Case 2	
	Value (2)	Ratio (2)/(1)	Value (3)	Ratio (3)/(1)	
Vertical displacement at crown (m)	-0.00765	-0.00774	1.01	-0.01304	1.70
Horizontal displacement at spring (m)	-0.00627	-0.00626	1.00	-0.00464	0.74
Hoop stress at mid-height (MPa)	-14.31	-14.31	1.00	-15.05	1.05

#### 4.4 예제 3에 대한 결과 분석

등가하중법은 가정에 따라 여러 가지 형태로 적용될 수 있지만<sup>5)</sup>, 선행 논문<sup>1)</sup>에서 유도된 등가하중은 그 크기, 방향 및 작용 위치에 있어 엄밀하게 유도된 것이다. 즉, 텐던과 주변 콘크리트가 맞닿는 부분에서 프리스트레싱의 효과가 등가분포하중으로 나타나므로 엄밀한 의미의 등가하중은 case 1과 같이 텐던 위치를 따라 작용시키는 것이 정확하다<sup>5)</sup>. Roca 등<sup>6)</sup>은 초기응력법과 등가하중법의 이론적인 동일성을 언급한 바 있으며 이는 등가하중의 크기, 방향 및 작용 위치가 정확히 적용될 때 성립한다. Tables 7, 8에서 초기응력법의 결과와 등가하중법의 case 1의 결과가 거의 정확히 일치하고 있다는 점이 그러한 사실을 뒷받침하고 있다. 반면, 등가하중법의 case 2는 수계산으로 등가하중의 영향을 평가할 때 흔히 그러하듯 등가하중의 작용 위치를 텐던에서 콘크리트 표면으로 옮긴 경우로서, 초기응력법이나 등가하중법의 case 1과 결과값에 차이를 보이며, Table 7과 같이 때로는 그 오차가 무시할 수 없을 정도로 크게 발생하므로 바람직하지 않다.

한편, CANDU형과 같이 납작한 돔 형상을 가진 경우에는 등가분포하중의 방향이 수직방향에 가깝게 되므로 등가하중의 자체 평형의 성질<sup>5)</sup>을 이용하여 근사적으로 유도하는 것도 가능하다. 즉, 정착부 하중들의 수직 성분과 힘의 평형을 이루도록 하는 수직방향의 등가분포하중을 결정하는 것이다. 이렇게 유도한 등가분포하중의 크기는 0.40928 MPa로서 앞서 엄밀하게 돔의 곡률에서 유도한 값과 큰 차이는 없다. 그러나, 한국형 돔과 같이 곡률이 큰 경우에 이러한 근사적 방법은 오차가 매우 커지므로 적절하지 않다.

앞서, 축대칭 모델 2(자오선 트러스 모델)는 프리스트레싱 효과를 구현할 때 초기응력법을 적용하는 것이 적절치 않다고 언급했지만, 이상의 논의에 근거한다면 등가하중법을 사용하는 것은 가능하다. 등가하중법은 텐던의 모델링 방법에 의존하지 않고 프리스트레싱의 효과를 외력과 같

**Table 8** Analysis results for prestressing effect  
(Example 3: KSNP)

	Axisymmetric modeling 1				
	Initial stress method (1)	Equivalent load method			
		Case 1		Case 2	
	Value (2)	Ratio (2)/(1)	Value (3)	Ratio (3)/(1)	
Vertical displacement at crown (m)	-0.00465	-0.00472	1.02	-0.00479	1.03
Horizontal displacement at spring (m)	-0.00453	-0.00453	1.00	-0.00470	1.04
Hoop stress at mid-height (MPa)	-7.390	-7.383	1.00	-7.666	1.04

이 별도로 고려하는 것이기 때문이다. 다시 말해, 축대칭 모델 2도 텐던 강성만을 두고 볼 때에는 어느 정도 실제 거동과 근접해 있으므로 프리스트레싱의 효과만 등가하중법으로 따로 모델링한다면 어느 정도는 타당한 결과를 산출할 수 있다고 판단된다.

## 5. 보정계수에 대한 논의

### 5.1 CANDU형

CANDU형의 경우 텐던 강성 및 프리스트레싱의 효과 면에서 제안된 축대칭 모델은 3차원 해석의 결과와 대체로 유사한 값을 주고 있지만, 어떠한 값은 다소의 오차를 발생시키고 있다. 이는 몇가지 가정들을 도입하여 실제의 비축대칭 거동을 축대칭으로 이상화시키는 과정에서 나타난 것으로 생각된다. 따라서, 실제 거동에 좀 더 근접할 수 있는 방안의 하나로서 텐던 강성 및 프리스트레싱 효과에 대하여 적절한 보정계수를 도입하는 방안을 모색해 볼 수 있다. 실제의 텐던 배치 형상을 고려하여 이러한 보정계수를 유도할 수도 있겠으나, 곡면에 배치된 임의의 곡선 텐던들을 일일이 추적해가며 수식을 유도하는 것은 상당한 번거로움을 유발한다. 따라서, 앞의 예제들에서 나타난 축대칭 모델의 경향들을 반영하여 시행착오를 통하여 최적의 보정계수를 역으로 유추하는 방안도 가능할 것으로 생각된다.

텐던 강성의 경우 Table 3을 참조하면 제안된 층 모델이 텐던 강성을 다소 과대평가하는 것으로 나타났으므로, 앞서 산정된 텐던 층의 두께를 두께 감소계수를 통하여 적절히 감소시켜 줄 경우 3차원 해석 결과와 더욱 가까운 값을 산출하게 된다. 이 때 주의할 점은 프리스트레싱 효과에 있어서 이처럼 텐던 층 두께를 보정하고 초기응력법을 적용할 경우 보정된 두께에 맞추어 초기응력값을 재계산하여야 한다는 점이다. 하지만, 프리스트레싱을 외력처럼 다루는 등

가하중법을 적용할 경우 텐던 층의 두께 변화에 관계없이 등가하중값은 원래의 값을 그대로 사용하면 된다.

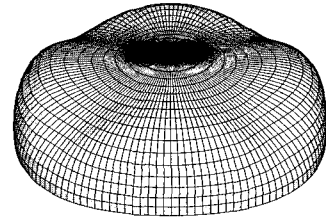
프리스트레싱 효과의 경우 Table 5에서 제안된 모델은 원환방향 프리스트레스가 실제보다 다소 크게 고려되는 것으로 나타났으므로, 초기응력법을 적용함에 있어 자오선 방향 초기응력은 그대로 두되 원환방향 초기응력값을 약간 감소시켜 보았다. 역시 몇가지 감소계수에 대해 검토한 결과 원환방향 초기응력에 0.9 정도의 감소계수를 곱했을 때 3차원 해석 결과와 더욱 부합하였다. 초기응력법은 이처럼 특정한 방향에 대한 초기응력만을 보정할 수 있는 장점이 있지만, 등가하중법의 경우 등가분포하중의 크기를 바꿀 경우 양 방향의 프리스트레싱 효과가 함께 변동하므로 원하는 방향만의 보정 효과를 얻기 어렵다. 이처럼 프리스트레싱의 보정시에는 초기응력법이 등가하중법보다 유리한 면이 있다. 위에서 언급한 보정계수들은 텐던의 배치 형상에 의존하는 함수이므로 형상에 따라 적절한 값을 찾아서 적용시켜야 할 것으로 판단된다. 그러나, 해석 결과 돛에 배치된 프리스트레싱 텐던은 강성에 대한 기여보다는 프리스트레싱 면에서 두드러진 효과가 나타나므로 실용적으로는 프리스트레스에 대한 보정만을 수행해도 충분할 것으로 생각된다.

## 5.2 한국형

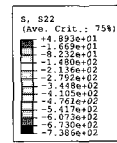
CANDU형의 경우 텐던 강성과 프리스트레싱 효과에 있어 경향이 명확했으므로 보정계수를 적용하기에 용이하지만, 한국형의 경우에는 그 경향이 명확하지 않아 보정계수를 적용하는데 좀 더 어려움이 있다. Fig. 3은 텐던 강성이 고려된 상태에서 프리스트레스를 가했을 때의 변형 형상 및 원환 응력의 분포로서 텐던이 2방향으로만 배치된 관계로 축대칭 거동으로 평균화되는 경향이 CANDU형보다 덜함을 알 수 있다. 문일환 등<sup>7)</sup>은 한국형과는 제원에 차이가 있으나 역시 돛 텐던이 2방향으로 배치된 원전 격납건물 축소 모형의 해석 결과 비축대칭으로 거동하는 경향이 큼을 언급한 바 있다.

Table 4의 텐던 강성에서는 두께 감소계수를 적용할 경우 스프링 변위와 중간 높이의 원환 응력의 경우 실제값에 근접하지만, 정점 변위의 경우 오히려 실제값과의 차이가 더 커지는 결과를 산출한다. 따라서, 축대칭 모델의 해석값들을 실제값에 근접시키는 보정계수를 일률적으로 정하기 어려우므로 보정계수를 적용하지 않는 것이 더 바람직할 것으로 생각되지만, 세가지 값의 오차가 비슷한 정도로 조절되는 보정계수가 존재하는 것으로 나타났다.

Table 6의 프리스트레싱의 효과에서는 CANDU형과 같이 원환방향 초기응력에 대한 감소계수를 적용할 경우 좀 더 실제값에 근접하지만, 이 경우에도 스프링 변위의 부호



(a) Deformed shape (1000 times magnified)



(b) Hoop stress contour

Fig. 3 Analysis results of 3-dimensional modeling for prestressing (KSNP type)

가 실제와 다른 것은 개선되지 않는 것으로 나타났다. 그러한 제한 조건하에서 특정한 감소계수를 원환방향 초기응력에 곱했을 때 3차원 해석결과에 좀 더 근접하였다.

## 6. 결 론

원전 격납건물의 축대칭 모델은 해석상의 간편성으로 인하여 내압 등 원전의 주요 하중에 대한 해석시 널리 사용되지만, 실제의 비축대칭 조건을 주는 요소들을 축대칭 모델상에서 구현하기 위해서는 적절한 가정 및 변환 절차를 도입해야 한다. 이 중 돛 텐던에 대해서는 기존에 몇 가지 축대칭 모델링 기법이 제안된 바 있으나, 실제 거동과의 비교 분석을 통한 검증은 부족하였다 생각된다. 본 연구에서는 국내의 CANDU형 및 한국형 원전 격납건물 돛에 비축대칭으로 배치된 텐던을 축대칭 모델에 적합하도록 변환하는 합리적인 절차를 제안하였다. 선행 논문에서는 실제 3차원상의 텐던 강성 및 프리스트레싱 효과를 축대칭 모델에서 구현할 수 있는 이론적인 수식을 제안하였다. 텐던은 등가의 층으로 근사화하였으며, 프리스트레싱의 효과는 정착부의 하중으로부터 유도하되 등가하중법 및 초기응력법 관점에서 각각 고찰하였다.

본 논문에서는 제안된 모델을 범용구조해석 프로그램에 적용한 수치 예제들을 통하여 타당성을 비교검증하였다. CANDU형의 경우 돛 전체에 걸쳐 3방향으로 비교적 조밀한 간격으로 텐던이 배치된 관계로 텐던 강성이나 프리스트레싱 효과에 있어 축대칭에 매우 가깝게 거동하므로, 제안된 축대칭 모델은 실제의 3차원 거동을 비교적 유사

하게 추적할 수 있는 것으로 나타났다. 다만, 근사화 과정에서 원환방향의 강성 및 프리스트레싱 효과를 다소 크게 평가하는 경향이 나타났다. 한국형의 경우 텐던이 2방향으로만 배치되었으므로 축대칭 거동으로 평균화되는 경향이 덜한 것으로 나타났으며, 또한 스프링 부분에 텐던이 덜 배치된 관계로 CANDU형과 비교할 때 수식 유도시 가정에 따른 오차가 좀 더 크게 나타났다.

프리스트레싱을 구현하기 위해 사용되는 초기응력법 및 등가하중법을 비교 분석 하였으며, 그 결과 축대칭 모델에 초기응력법을 적용할 때 실제 거동을 예측하기 위해서는 원환방향 프리스트레싱의 기여도가 매우 큼을 보였다. 따라서, 자오선방향 프리스트레싱만을 모사할 수 있는 기존 모델은 적절치 않은 것으로 나타났다. 마지막으로 제안된 수식에 도입된 근사화를 보정하여 좀 더 실제 거동에 가까운 값들을 산출할 수 있는 보정계수에 대하여 논하였다.

실제 비축대칭 조건인 원전 격납건물의 구조거동을 축대칭 근사 모델을 통하여 규명하고자 할 때에는 실험 결과 또는 3차원 정밀해석 결과와의 비교를 거친 검증 과정이 반드시 선행되어야 할 것으로 생각되며, 또한 축대칭 근사화가 발생시키는 실제와의 거동 차이를 명확히 파악하고 있어야 할 것이다.

## 참고문헌

1. 전세진, “원전 격납건물 돔 텐던의 축대칭 모델링 기법 I. 이론식의 유도”, 콘크리트학회논문집, 17권 4호, 2005, pp.521~526.
2. ABAQUS/Standard 6.3 - User's Manual, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., USA, 2002.
3. 정철현, 장성욱, 조정태, 정한중, “원전 격납구조물의 돔 및 기초슬래브에서의 프리스트레스 텐던 모델 기법”, 대한토목학회논문집, 16권 I-3호, 1996, pp.317~327.
4. 전세진, 김수만, “프리스트레스트 콘크리트 구조물의 해석기법”, 콘크리트학회지, 16권 1호, 2004, pp.57~64.
5. Oh, B. H. and Jeon, S. J., “Limitations and Realistic Application of Equivalent Load Methods in Prestressed Concrete Structures”, *Magazine of Concrete Research*, Vol.54, No.3, 2002, pp.223~231.
6. Roca, P. and Mari, A. R., “Numerical Treatment of Prestressing Tendons in the Nonlinear Analysis of Prestressed Concrete Structures”, *Computers and Structures*, Vol.46, No.5, 1993, pp.905~916.
7. 문일환, 심종성, “비대칭요소를 고려한 PSC 원자로 격납건물의 극한내압능력 평가”, 대한토목학회논문집, 24권 3A호, 2004, pp.639~646.

## 요 약

원전 격납건물의 축대칭 모델은 해석상의 간편성으로 인하여 널리 사용되지만, 실제의 비축대칭 조건을 주는 요소들을 축대칭 모델상에서 구현하기 위해서는 적절한 가정 및 변환 절차를 도입해야 한다. 선행 논문에서는 국내의 CANDU형 및 한국형 격납건물 돔에 비축대칭으로 배치된 텐던들을 축대칭 모델에 적용하기 위한 합리적인 변환 절차를 제안하였으며, 텐던 강성 및 프리스트레싱의 효과 측면에서 고찰하였다. 본 논문에서는 제안된 모델을 범용구조해석 프로그램에 적용한 수치 예제를 통하여 타당성을 검증하였다. 제안된 축대칭 모델은 CANDU형의 3차원 거동을 비교적 유사하게 추적할 수 있는 것으로 나타났지만, 한국형의 경우에는 돔 텐던 배치상 축대칭 가정에 따른 오차가 다소 크게 나타났다. 또한, 프리스트레싱을 구현하기 위해 사용되는 초기응력법 및 등가하중법을 비교 분석 하였으며, 축대칭 모델에 초기응력법을 적용할 때 원환방향 프리스트레싱의 역할이 매우 큼을 보였다. 마지막으로 제안된 수식에 도입된 근사화를 보정하여 좀 더 실제 거동에 가까운 값들을 산출할 수 있는 보정계수에 대하여 고찰하였다.

**핵심용어** : 원전 격납건물, 돔, 프리스트레싱 텐던, 축대칭 모델