원전 격납건물 돔의 축대칭 텐던 모델링 기법

Axisymmetric Modeling of Prestressing Tendons of the Nuclear Containment Building Dome

전 세 진* 정 철 헌** 김 영 진*** 정 연 석****
Jeon, Se Jin Chung, Chul Hun Kim, Young Jin Chung, Yun Suk

ABSTRACT

Prestressing tendons of the nuclear containment building dome are arranged in a non-axisymmetric manner. However, simple axisymmetric modeling of the containment building is often employed to estimate the structural behavior for, e.g. the ultimate pressure, which requires the axisymmetric approximation of the actual tendon arrangements of the dome. A procedure is proposed that can devise the actual 3-dimensional tendon stiffness and prestressing effect into the axisymmetric model. A numerical example of the CANDU type is presented to verify the procedure and to estimate the amount of approximation.

1. 서 론

구조물의 축대칭 해석은 3차원 해석과 비교하여 모델링의 간편성 등 해석상의 큰 편의를 제공한다. 하지만, 축대칭 해석을 통하여 실제 구조물의 거동을 유추할 수 있는 경우는 엄밀히 말해 구조물의 형상이 축대칭인 경우이다. 또한 하중의 경우에도 특수한 축대칭 요소를 사용하는 것을 예외로 한다면, 축대칭 해석은 기본적으로는 축대칭 하중에 대해 실시하는 것이 일반적이다.

원전 격납건물은 버트레스나 개구부 등에 의해 완전한 축대칭 형상은 아니며, 철근이나 프리스트레싱 텐던의 배치 또한 돔이나 바닥판의 경우 축대칭 형상을 벗어난다. 하지만, 내압하중 등 축대칭 형상으로 작용하는 원전 격납건물의 주요 설계하중에 대한 해석 및 설계에서는 3차원 해석 이외에도 축대칭 해석이 빈번하게 수행되어져 왔다[1,2]. 이때 콘크리트의 형상에서는 버트레스나 개구부를 무시하는 것이 보통이며, 비축대칭으로 배치된 철근이나 텐던의 경우에는 축대칭 모델에 적합한 별도의 변환과정이 필요하게 된다.

본 연구에서는 대표적으로 CANDU형 원전 격납건물 돔에 배치된 텐던의 강성 및 프리스트레싱의 효과를 축대칭 모델에서 효과적으로 구현할 수 있는 방법론을 제시하였으며, 기존 모델링에서의 문제점을 고찰하였다.

* 정회원 · 대우건설기술연구소 토목연구팀 선임연구원
** 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 교수
*** 정회원 · 대우건설기술연구소 토목연구팀 수석연구원
**** 정회원 · 한국원자력안전기술원 원자력안전연구실 책임연구원

2. 축대칭 모델의 텐던량

실제 3차원으로 배치된 텐던의 총부피를 구하고 이를 축대칭 모델에 적합하도록 변환하는 절차를 제안하였다. CANDU형 원전 격납건물의 경우 그림 1과 같이 3방향으로 텐던이 배치된다. 그림 2는 이 중에서 1방향으로 배치된 돔 텐던을 보여주고 있다. 각 방향 텐던은 돔 두께상의 중심에 가깝게 위치하지만 미소한 높이 차이가 있다. 하지만 본 유도에서는 모든 텐던이 돔 두께의 중간에 위치한다고 가정하였으며, 이 가정이 전체 해석결과에 미치는 영향은 미미하다. 또한, 그림 2에서는 수식 유도상의 편의를 위해 평면상 텐던 형상이 등간격이고 직선이라고 가정하였으며, 이는 실제의 배치와 약간의 차이는 있으나 CANDU형 돔은 매우 납작한 형태이므로 가정에 따른 텐던 형상의 근사화 정도는 매우 작은 편이다. 텐던량 결정시 기존 방법[1]이나 본 방법 모두 미소한 근사화가 도입되었으며, 서로간에 방법론의 차이가 있다. 하지만 3장의 프리스트레싱 효과의 계산 절차를 고려한다면 본 방법이 더욱 일관성이 있다.

그림 2에서 1방향으로 총 n개의 텐던이 배치되었을 때 m번째 텐던에 대해 다음 식들이 성립한다.

$$\overline{m'm''} = \frac{2R}{n+1}\sqrt{\left(\frac{n+1}{2}\right)^2 - m^2} \tag{1}$$

$$\theta_m = arctan\left(\frac{\overline{m'm''}}{L}\right) \tag{2}$$

$$\widehat{mm'} = R_m'\theta_m = \left(\frac{L}{cos\theta_m}\right)\theta_m \tag{3}$$

따라서, 텐던 한개의 단면적을 A_{ps}라 했을 때 1방향 텐던들의 총부피는 식 (4)와 같이 구할 수 있다. 여기에서 아래첨자 0은 m=0인 경우이다.

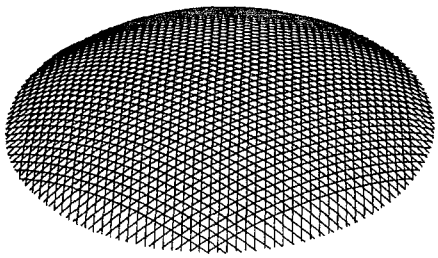


그림 1 돔 텐던의 배치 형상 (CANDU형)

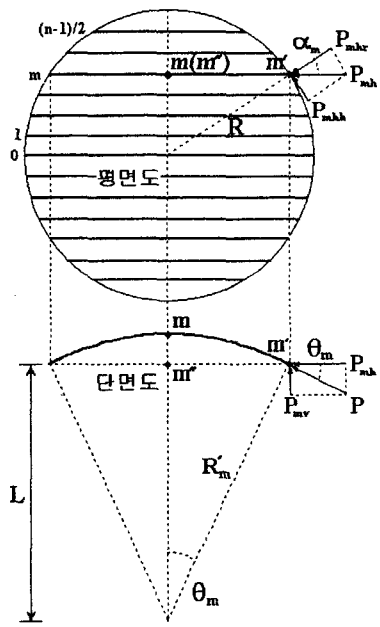


그림 2 1방향에 대한 돔 텐던

$$V = A_{ps}\left[\frac{2L\theta_0}{cos\theta_0} + 4\sum_{m=1}^{(n-1)/2}\left(\frac{L\theta_m}{cos\theta_m}\right)\right] \tag{4}$$

돔 텐던은 그림 1과 같이 비교적 조밀한 간격으로 각 3방향으로 고르게 배치되어 있으므로, 일정한 두께를 가진 층으로 근사화시킬 수 있다. 돔의 표면적은 식 (5)에서 구할 수 있으므로, 3방향의 모든 텐던의 부피를 등가의 층으로 분포시킬 때의 층의 두께는 식 (6)과 같다.

$$S = \pi R^2 \frac{2}{1+cos\theta_0} \tag{5}$$

$$t = 3V/S \tag{6}$$

기존 방법[1]에서는 이러한 층을 다시 자오선 방향 트러스로 변환시킨 경우도 있으나, 이 경우에는 텐던 강성 중 원환 방향으로 기여하는 부분이 적절히 고려되지 못하는 단점이 있다.

3. 축대칭 모델의 프리스트레싱

3.1 개 요

실제의 돔 텐던이 콘크리트에 작용시키는 힘 중에서 축대칭 모델에서 구현될 수 있는 힘은 축대칭 평면상의 힘이다. 원환 방향의 힘 성분은 텐던들간에 서로 상쇄되므로 비록 축대칭 모델에서 고려하지 않더라도 해석 결과에 큰 영향을 미치지는 않는다. 한편, 프리스트레싱 효과를 유한요소 모델상에서 구현하는 방법에는 크게 초기응력법 및 등가하중법이 있으며[3], 여기에서는 초기응력법을 사용하였다. 기존 방법들에서는 돔 텐던의 정착부에서 수평면과 이루는 각도을 엄밀히 고려하지 않거나[1], 또는 3차원 모델에서 축대칭 모델로의 변환에 따른 초기응력, 즉, 프리스트레스 값의 변화를 엄밀히 고려하지 않은 단점이 있다[2]. 또한 텐던을 본 연구에 사용된 등가의 층 대신 자오선 방향 트러스로 이상화시킨 경우에는[1] 자오선 방향 프리스트레싱 효과는 나타나지만, 원환 방향 트러스가 없는 관계로 원환 방향의 프리스트레싱 효과가 올바로 나타나지 않는 것으로 판단된다.

3.2 수식의 유도

그림 2에서 m번째 텐던에 프리스트레싱 힘 P가 가해지면 이는 수평성분 P_{mh} 및 수직성분 P_{mv}로 나눌 수 있으며, 각각의 값은 식 (2)의 θ_m으로부터 산정 가능하다. 또한 P_{mh}는 평면상에서 반지름 방향 성분 P_{mhr} 및 원환 방향 성분 P_{mhh}로 추가적으로 분리할 수 있으며, 이 중 축대칭 모델에서 고려하는 P_{mhr}은 식 (7) 및 (8)로부터 산정할 수 있다.

$$\alpha_m = arcsin\left(\frac{2m}{n+1}\right) \tag{7}$$

$$P_{mhr} = P cos\theta_m cos\alpha_m \tag{8}$$

따라서, 3방향 텐던 전체에 대한 P_{mhr} 값들의 총합은 식 (9)와 같으며, 이를 3방향 텐던 전체에 대한 P_{mv} 값들의 총합과 합성하면 축대칭 모델의 정착부에서 작용하는 집중하중들의 총합을 구할 수 있다. 이 값을 정착부에서의 텐던 층의 총단면적으로 나누어 초기응력을 산정하였으며, 텐던 층의 자오선 방향 및 원환 방향으로 각각 초기응력을 작용시켜야 실제의 프리스트레싱 거동을 모사할 수 있다.

$$P_{hr} = 6\,(P cos\theta_0 + 2\sum_{m=1}^{(n-1)/2} P_{mhr}) \tag{9}$$

4. 예 제

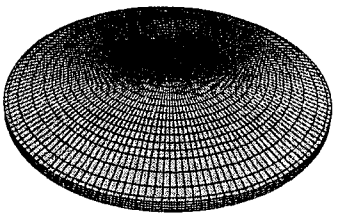
제안된 절차의 타당성을 검증하기 위하여 CANDU형 원전 격납건물 중 돔 부분에 대한 3차원 해석결과와 본 연구의 방법론에 의해 구성된 축대칭 모델의 해석결과를 비교하였다(그림 3). 해석에는 범용구조해석 프로그램 ABAQUS[4]를 사용하였으며, 기하 비선형 및 재료 비선형을 고려하였다. 콘크리트 부분은 각각 3차원 솔리드 요소 및 축대칭 솔리드 요소를 사용하였다. 3차원 모델은 원환 방향으로 144개의 메시로 분할하였으며, 한 단면상의 콘크리트 메시는 축대칭 모델과 동일하다. 텐던은 3차원 모델에서는 트러스 요소를, 축대칭 모델에서는 축대칭 멤브레인 요소를 사용하였으며, 이러한 텐던 요

소들을 콘크리트 메시에 embed시켰다. 단, 텐던 거동의 정확성 평가에 집중하기 위해 철근의 모델링은 제외하였다. 콘크리트 돔의 두께는 0.61 m이며, 설계기준강도는 350 kgf/cm^{2}이다.

P=457.8 tf, n=47개, R=19.91 m, A_{ps}=0.003652 m^2, L=36.708 m일 때 식 (1)~(6)으로부터 텐던의 등가 층두께는 0.0128 m로 계산된다. 한편, 식 (7)~(9) 등에서 구한 정착부 집중하중들의 총합은 106901.9 tf이며, 이를 텐던의 등가 층두께로부터 계산한 텐던 정착부의 총단면적으로 나누면 축대칭 모델에서 가해야 할 초기응력은 6.6907×10^4 tf/m^{2}으로 산정된다. 표 1은 3차원 모델과 축대칭 모델의 해석결과를 비교하여 보여주고 있으며, 경우 1은 주로 텐던 강성 모델링의 타당성을, 경우 2는 텐던 강성 및 프리스트레싱 모델링의 타당성을 검증하기 위한 것이다. 제안된 절차에 의하면 간편한 축대칭 모델을 통해서도 비교적 정확히 실제의 3차원 거동을 추정할 수 있음을 알 수 있다.

표 1 예제의 해석결과

	경우 1 (내압 : 3 tf/m^2)		경우 2 (프리스트레스)	
	3차원 모델	축대칭 모델	3차원 모델	축대칭 모델
정점 변위 (m)	0.008379	0.007844	-0.009898	-0.005746
스프링 변위 (m)	-0.002039	-0.001943	-0.004965	-0.005520
정점~스프링 중간위치 원환 방향 응력 (tf/m^2)	148.8	135.1	-1205	-1205



(a) 3차원 모델

(b) 축대칭 모델

그림 3 돔 텐던 및 콘크리트의 모델링 (CANDU형)

5. 결 론

원전 격납건물의 축대칭 모델은 해석상의 간편성으로 인하여 널리 사용되지만, 실제 콘크리트의 형상 및 철근과 텐던의 배치는 엄밀한 의미의 축대칭 형상이 아니므로 축대칭 모델링시 주의를 요한다. 본 연구에서는 CANDU형 격납건물 돔에 비축대칭으로 배치된 텐던을 축대칭 모델에 적용하는 합리적인 변환 절차을 제안하였으며, 이에 의하면 실제 텐던의 강성 및 프리스트레싱의 효과를 축대칭 모델상에서 비교적 정확히 모사할 수 있다. 제시된 방법은 일부 수식의 변형을 통하여 한국형 원전 격납건물에서 2방향의 격자형으로 배치된 돔 철근이나 돔 텐던에도 적용할 수 있으리라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구의 일환으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 정철헌, 장성욱, 조경태, 정한중, "원전 격납구조물의 돔 및 기초슬래브에서의 프리스트레스 텐던 모델 기법", 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제16권, 제I-3호, 1996, pp. 317-327.
2. 문일환, 이용일, 이기성, 심종성, "온도 영향을 고려한 프리스트레스트 콘크리트 격납건물의 비선형 극한내압해석", 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제19권, 제I-3호, 1999, pp. 435-448.
3. 전세진, 김수만, "프리스트레스트 콘크리트 구조물의 해석기법", 콘크리트학회지, 제16권, 제1호, 2004, pp. 57-64.
4. "ABAQUS/Standard 6.3 - User's Manual", Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 2002.