원전 격납건물 돔 텐던의 축대칭 근사화에 대한 타당성 고찰

Verification for Axisymmetric Modeling of Dome Tendons in Nuclear Containment Building

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 in a nuclear containment building dome are non-axisymmetrically arranged in most cases. However, simple axisymmetric modeling of the containment has been often employed in practice, which requires the axisymmetric approximation of the actual tendon arrangements in the dome. A procedure was previously proposed that can implement the actual 3D tendon stiffness and prestressing effect into the axisymmetric model for CANDU type. This paper further verifies and compares some methodologies adopted in the proposed scheme through some numerical examples.

1. 서 론

구조물의 축대칭 해석은 전체 3차원 해석과 비교할 때 입력자료 작성의 간편성 및 해석 시간의 단축 등 큰 편의를 제공한다. 하지만, 축대칭 해석을 통하여 실제 구조물의 거동을 유추할 수 있는 경우는 일반적으로 구조물의 형상 및 하중이 축대칭인 경우이다. 원전 격납건물은 버트레스나 개구부 등에 의해 완전한 축대칭 형상은 아니며, 철근이나 프리스트레싱 텐던의 배치 또한 돔이나 바닥판에서는 축대칭 형상을 벗어난다. 하지만, 내압 등 축대칭으로 작용하는 하중에 대한 격납건물의 해석에서는 3차원 해석 이외에도 축대칭 해석이 빈번하게 수행되어 왔다[1,2]. 이 때 콘크리트의 형상에서는 버트레스나 개구부를 무시하게 되며, 비축대칭으로 배치된 철근이나 텐던의 경우에는 축대칭 모델에 적합한 별도의 변환 과정이 필요하게 된다.

이 논문의 선행 연구[3]에서는 기존 방법[1]을 개선하여 CANDU형 돔 텐던의 축대칭 모델링 기법을 제안한 바 있으며, 실제의 텐던 강성 및 프리스트레싱의 효과를 축대칭 모델에서 효과적으로 구현하는 방법론을 고찰했었다. 이 논문에서는 제안되었던 모델의 타당성을 다른 몇가지 모델과의 비교를 통하

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

여 추가적으로 검증하였다.

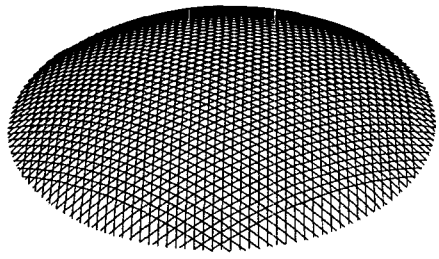

그림 1 돔 텐던의 배치 형상 (CANDU형)

2. 텐던 강성의 모델링

CANDU형 돔 텐던은 그림 1과 같이 비교적 조밀한 간격을 가지고 각 3방향으로 고르게 배치되어 있으므로, 일정한 두께를 가진 층으로 근사화시킬 수 있다. 참고문헌 3에서는 실제 3차원으로 배치된 텐던의 총부피를 구하고 이를 축대칭 모델에 적용할 수 있는 등가의 층으로 변환하는 절차를 제안하였다. 이와 관련하여 논의될 수 있는 점은 실제의 텐던이 강성에 기여하는 방향이다. 텐던은 텐던 축방향으로만 강성의 기여가 있으므로, 그림 1의 텐던 배열을 고려할 때 각 텐던의 강성은 자오선 방향 및 원환방향으로 분리되어 기여하고 있다고 볼 수 있다. 등가 층 모델링에서 텐던 층은 자오선방향과 동시에 원환방향으로도 강성을 갖게 된다. 한편, 기존 방법[1]에서는 이러한 층을 다시 단면적이 변하는 자오선방향 트러스로 변환시켰는데 이는 원환방향의 강성 기여를 무시한 것으로 볼 수 있다. 따라서, 텐던의 강성에 있어 층 모델은 실제보다 강성을 과대평가하는 반면, 트러스 모델은 강성을 과소평가할 것으로 예상되며, 이러한 경향은 내압 3 tf/m^{2}이 작용하고 프리스트레스는 작용하지 않는 다음 예제의 해석결과에서도 확인할 수 있다(표 1).

해석에는 범용구조해석 프로그램 ABAQUS[4]를 사용하였으며, 콘크리트는 3차원 모델에서는 3차원 솔리드 요소, 축대칭 모델에서는 축대칭 솔리드 요소를 사용하였다. 3차원 모델은 원환방향으로 144개의 메시로 분할하였으며, 한 단면상의 콘크리트 메시는 축대칭 모델과 동일하다. 텐던은 3차원 모델에서는 트러스 요소를, 축대칭 모델에서는 축대칭 멤브레인 요소 및 2차원 트러스 요소를 사용하여 비교하였다. 텐던 요소들은 콘크리트 메시에 매입(embed)시켰다. 단, 텐던 강성의 정확성 평가에 집중하기 위해 철근의 모델링은 제외하였다. 자세한 제원은 참고문헌 3을 참조한다. 표 1을 살펴보면, 텐던 강성만을 두고 볼 때에는 자오선방향 트러스 모델이 좀 더 실제에 근접한 결과를 주고 있음을 알 수 있다. 그러나, 뒤에서 보듯 프리스트레싱의 영향면에서 평가할 때 트러스 모델에 초기 응력을 가해서는 실제의 거동을 모사할 수 없으므로 일관성이 떨어지는 단점이 있다.

표 1 텐던 강성 평가 예제의 해석결과

	3차원 모델	축대칭 모델	
		층 모델	자오선 트러스 모델
정점 변위 (m)	0.00839	0.00786 (-6.3%)	0.00834 (-0.6%)
스프링 변위 (m)	-0.00204	-0.00195 (-4.4%)	-0.00212 (+3.9%)
정점~스프링 중간위치 원환방향 응력 (tf/m^2)	149.5	135.7 (-9.2%)	154.9 (+3.6%)

3. 프리스트레싱 효과의 모델링

3.1 층 모델과 트러스 모델의 비교

참고문헌 3에서는 돔 텐던의 정착부 하중 중에서 자오선방향의 성분만을 분리한 총합을 구하여서 이로부터 축대칭 텐던에 가할 초기응력을 유도한 바 있다. 정착부 하중 중 원환방향 성분은 텐던들간에 서로 상쇄되므로 축대칭 모델에서 고려하지 않더라도 해석 결과에 큰 영향을 미치지는 않는다.

다음 표 2는 층 모델 및 자오선 트러스 모델에 이렇게 유도된 초기응력을 가한 결과를 비교하고 있다. 여기에서는 텐던 강성의 영향을 배제하고 순수하게 프리스트레싱의 효과만을 평가하기 위해 텐던의 탄성계수를 0에 가깝게 두었다. 텐던을 트러스로 이상화시킨 경우에는[1] 자오선방향 프리스트레싱 효과는 나타나지만, 원환방향 트러스가 없는 관계로 원환방향의 프리스트레싱 효과를 구현할 수 없는

큰 단점이 있다. 그러나, 표 2의 층 모델에서 보듯이 자오선방향 및 원환방향 프리스트레싱 효과를 적절히 조합해야 실제의 구조 거동을 모사할 수 있으며, 특히 원환방향 프리스트레싱의 기여도가 큼을 알 수 있다. 단, 층 모델의 원환방향 강성이 다소 크게 산정됨에 따라 원환방향 프리스트레스도 다소 크게 도입되어 3차원 모델과의 오차를 발생시켰다고 판단된다.

표 2 프리스트레싱 효과 평가 예제의 해석결과

	3차원 모델	축대칭 모델			
		층 모델			자오선 트러스 모델
		원환방향 PS	자오선 방향 PS	원환+자오선 방향 PS	
정점 변위 (m)	-0.01102	0.04042	-0.04807	-0.00765 (-30.6%)	-0.04807 (+336.2%)
스프링 변위 (m)	-0.00514	-0.00770	0.00143	-0.00627 (+22.0%)	0.00143 (-)
정점~스프링 중간위치 원환방향 응력 (tf/m^2)	-1285	-1438	7	-1431 (+11.4%)	7 (-)

3.2 초기응력법과 등가하중법의 비교

프리스트레싱 효과를 유한요소 모델상에서 구현하는 방법에는 크게 초기응력법과 등가하중법이 있다[5,6]. 참고문헌 3에서는 주로 초기응력법을 논했지만 등가하중법을 적용하는 것도 가능하며, 2가지 방법에 대한 유사성은 Roca 등[7]에서 간략히 언급된 바 있다. 등가하중법을 적용할 때 프리스트레싱에 의해 콘크리트에 작용하는 등가하중은 크게 정착부의 집중하중 및 텐던 곡률에 의해 발생하는 분포하중으로 나뉠 수 있다. 이 중 축대칭 모델의 정착부 등가집중하중에 대한 유도는 참고문헌 3을 참조한다. 한편, 두께 t의 및 양방향 곡률반경 R을 가진 층(멤브레인)으로 이상화된 텐던에 초기응력 σ_{pos}가 작용할 때의 등가분포하중 w는 멤브레인의 힘의 평형으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$w = \frac{2\sigma_{pos}t}{R} \tag{1}$$

w는 엄밀히 말해 축대칭 모델의 텐던축을 따라 텐던축에 직각방향으로 작용하지만, CANDU형과 같이 납작한 돔 형상을 가진 경우에는 수직방향 힘으로 작용시키더라도 큰 오차는 없다. 이는 포물선 형상 텐던을 가진 PSC 보에서 등가분포하중을 수직방향 힘으로 근사화할 수 있는 것과 같은 원리이다[6] 이때 수직방향의 w값은 식 (1)에서 계산된 값을 그대로 사용할 수도 있지만 정착부의 등가집중하중 중 수직방향 성분과 평형을 이루도록 정할 수도 있으며, 그 값은 식 (1)에서 엄밀히 계산한 값과 유사하다. 3.1절에서 트러스 모델에 초기응력법을 적용하는 것은 적절치 않다고 언급했지만, 등가하중법을 사용하는 것은 가능하다. 이는 등가하중법은 텐던의 모델링 방법에 의존하지 않고 프리스트레싱 효과

표 3 초기응력법 및 등가하중법 평가 예제의 해석결과

	3차원 모델	축대칭 모델		
		초기응력법	등가하중법	
			경우 1	경우 2
정점 변위 (m)	-0.01006	-0.00593 (-41.1%)	-0.00602 (-40.2%)	-0.01078 (+7.2%)
스프링 변위 (m)	-0.00491	-0.00546 (+11.2%)	-0.00545 (+11.0%)	-0.00398 (-18.9%)
정점~스프링 중간위치 원환방향 응력 (tf/m^2)	-1210	-1209 (-0.1%)	-1208 (-0.2%)	-1275 (+5.4%)

를 외력과 같이 별도로 고려하는 것이기 때문이다. 표 3은 텐던을 층으로 모델링한 경우에 대한 결과이며, 초기응력법 및 등가하중법(경우 1)의 결과는 거의 일치한다. 단, 산출된 등가하중은 경우 1과 같이 텐던축을 따라 작용시키는 것이 정확한 결과를 주며, 등가하중을 경우 2와 같이 콘크리트 표면 상에 작용시킬 경우 등가하중의 위치 이동에 따른 오차가 발생하게 된다.

4. 결 론

원전 격납건물의 축대칭 모델은 해석상의 간편성으로 인하여 널리 사용되지만, 실제 콘크리트의 형상 및 철근과 텐던의 배치는 엄밀한 의미의 축대칭 조건이 아니므로 축대칭 모델링시 주의를 요한다. 본 논문의 선행 연구에서는 기존 방법을 개선하여 CANDU형 돔 텐던의 축대칭 모델링 기법을 제안한 바 있으며, 실제의 텐던 강성 및 프리스트레싱 효과를 축대칭 모델에서 효과적으로 구현하는 방법론을 고찰했었다. 이 논문에서는 제안되었던 모델의 타당성을 다른 몇가지 모델과의 비교를 통하여 검증하였다. 텐던을 등가의 층 및 자오선방향 트러스로 근사화하는 경우를 비교하였으며, 또한 프리스트레싱 효과를 초기응력법 및 등가하중법으로 구현하는 경우를 비교하였다. 그리고, 실제의 3차원 정밀모델과의 비교를 통하여 텐던의 축대칭 근사화에 따른 영향을 파악해 보고자 하였다. 층 모델에서 초기응력을 작용시키는 것이 범용구조해석 프로그램상에서 가장 간편하게 축대칭 텐던을 모델링하는 방법으로 생각되지만, 실제의 3차원 거동을 좀 더 정확히 모사하기 위해서는 계산상의 강성 및 프리스트레싱 효과를 보정하는 합리적인 절차가 필요하다고 사료된다.

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, 정철헌, 김영진, 정연석, "원전 격납건물 돔의 축대칭 텐던 모델링 기법", 콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 한국콘크리트학회, 제16권, 제1호, 2004, pp. 758-761.
4. "ABAQUS/Standard 6.3 - User's Manual", Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 2002.
5. 전세진, 김수만, "프리스트레스트 콘크리트 구조물의 해석기법", 콘크리트학회지, 제16권, 제1호, 2004, pp. 57-64.
6. 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.
7. 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.