

원전 격납건물 돔 텐던의 축대칭 모델링 기법 I. 이론식의 유도

전세진^{1)*}·정철현²⁾

¹⁾ 대우건설기술연구소 ²⁾ 단국대학교 토목환경공학과

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

Axisymmetric Modeling of Dome Tendons in Nuclear Containment Building I. Theoretical Derivations

Se-Jin Jeon^{1)*} and Chul-Hun Chung²⁾

¹⁾ Daewoo Institute of Construction Technology, Suwon, 440-210, Korea

²⁾ Dept. of Civil & Environmental Engineering, Dankook University, Seoul, 140-714, Korea

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

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 to estimate structural behavior for the axisymmetric loadings such as an internal pressure. In this case, the axisymmetric approximation is required for the actual tendon arrangements in the dome. Some procedures are proposed that can implement the actual 3-dimensional tendon stiffness and prestressing effect into the axisymmetric model. Prestressing tendons, which are arranged in 3 or 2-ways depending on a containment type, are converted into an equivalent layer to consider the stiffness contribution in meridional and hoop directions. In order to reflect the prestressing effect, equivalent load method and initial stress method are devised and the corresponding loads or stresses are derived in terms of the axisymmetric model. In a companion paper, the proposed schemes are applied into CANDU and KSNP(Korean Standard Nuclear Power Plant) type containments and are verified through some numerical examples comparing the analysis results with those of the actual 3-dimensional model.

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

1. 서 론

구조물의 축대칭 해석은 전체 3차원 해석과 비교할 때 구조 모델링을 위한 입력자료 작성이 간편해지며, 해석 시간 및 해석 결과의 분석에 소요되는 시간이 단축되는 등 큰 편의를 제공한다. 하지만, 축대칭 해석을 통하여 실제 구조물의 거동을 유추할 수 있는 전제 조건으로 구조물은 축대칭 형상을 가져야 한다. 또한 하중의 경우에도 특수한 축대칭 요소를 사용하는 것을 예외로 한다면, 축대칭 해석은 일반적으로 축대칭 하중에 대해 실시하게 된다.

원전 격납건물은 전체적으로 축대칭 형상에 가깝지만 엄밀히 말해 원환 텐던의 정착을 위한 부벽(buttress)이나 개구부(작업원 출입구 및 장비 반입구) 등에 의해 완전한 축대칭 형상을 갖지는 않는다. 철근이나 프리스트레싱 텐던의 경우에도 벽체에서는 수직방향 및 원환방향으로 배

치되어 축대칭 형상을 이루지만, 돔이나 바닥판에서는 축대칭 형상을 벗어나는 것이 보통이다. 하지만, 대표적인 설계하중인 내압 등 축대칭으로 작용하는 하중에 대한 격납건물의 해석에서는 3차원 해석 이외에도 축대칭 해석이 빈번하게 수행되어 왔다^{1,2)}. 이는 엄밀한 3차원 해석을 수행해 보면 부벽이나 개구부 등 특정한 부위를 제외하고는 대체로 축대칭에 가까운 거동을 보이기 때문이다. 축대칭 모델링시 콘크리트의 형상에서는 부벽이나 개구부를 무시하게 되며, 비축대칭으로 배치된 철근이나 텐던의 경우에는 축대칭 모델에 적합한 별도의 변환 과정이 필요하게 된다.

이 중에서 본 연구에서는 주로 돔 텐던의 축대칭 모델링 기법을 고찰하였다. 비축대칭으로 배치된 돔 텐던은 격납건물 형식에 따라 배치 방법에 차이를 보이며, 국내의 대표적인 원전의 돔 텐던을 예로 들자면 한국형(KSNP: Korean Standard Nuclear Power Plant) 격납건물은 2방향으로, CANDU형 격납건물은 3방향으로 배치된다. 또한 텐던 간의 배치 간격이 결정되는 방법론에 있어서도 차이

* Corresponding author

E-mail : jsj@dwconst.co.kr

©2005 by Korea Concrete Institute

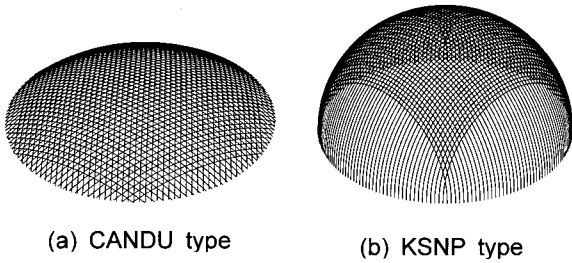


Fig. 1 Arrangement of dome tendons

를 보인다. 여기에서는 원전 격납건물 돔에 배치된 텐던의 강성 및 프리스트레싱 효과를 축대칭 모델에서 효과적으로 구현하는 방법론을 CANDU형 및 한국형에 대하여 각각 제시하였다. 기존의 격납건물의 축대칭 해석에 관한 연구에서는 CANDU형 돔 텐던의 축대칭 근사화¹⁾ 및 한국형 돔 텐던의 축대칭 근사화²⁾ 과정이 포함되었으나, 엄밀한 모델과의 해석 결과 차이에 대해 언급되어 있지 않으므로 각 방법론의 정확성을 검증할 수 없었다. 반면, 제안된 모델은 엄밀한 3차원 모델의 해석 결과와 비교하여 근사화 정도 및 타당성을 검증하였다. 본 연구는 총 2편의 논문으로 작성되었으며, 본 1편에서는 축대칭 텐던 모델링에 필요한 이론적인 수식들이 유도되었고, 후속편인 2편³⁾에서는 유도된 절차를 적용한 예제들의 비교 분석을 통하여 제안된 수식을 검증하였다.

2. 텐던 강성의 모델링

2.1 개요

Fig. 1은 각각 CANDU형 및 한국형 원전 격납건물 돔 텐던의 배치를 보여주고 있다. Fig. 1(a)의 CANDU형은 3방향으로 배치된 돔 텐던이 링빔의 측면에 정착되는 형태이다. 반면, Fig. 1(b)의 한국형은 벽체의 수직 텐던이 그대로 이어져서 돔 텐던을 구성하며 2방향으로 배치된다. 한국형에서는 돔 부위에도 일정 높이까지 원환 텐던이 배치되지만 원환 텐던은 그 자체로 축대칭이므로 본 논의 대상에서 제외하였다.

텐던은 텐던 축방향으로만 강성의 기여가 있으므로 Fig. 1의 배치를 참조할 때 각각의 돔 텐던은 돔의 자오선방향 및 원환방향으로 분리되어 강성에 기여하고 있으며 그러한 기여 비율은 텐던 축상의 위치에 따라 달라진다. 기존 연구에서 자오선방향 강성만을 고려한 경우가 있으나¹⁾, 이는 텐던의 강성을 과소평가하는 결과를 낳을 것으로 생각된다. 부록에는 임의의 텐던상의 특정한 점에서 자오선방향 및 원환방향의 강성 기여분이 유도되어 있다. 그러나, 텐던상 위치마다 달라지는 강성의 기여분을 일일이 고려하여 축대칭 모델에서의 텐던 강성을 유도하

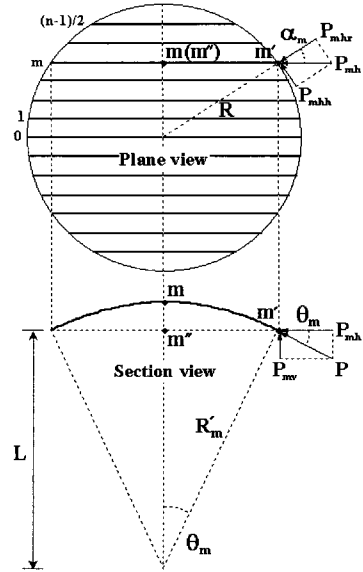


Fig. 2 Dome tendons (CANDU type)

는 것은 매우 번거로운 작업을 수반한다. 또한, 부록의 절차를 따라 강성을 유도하더라도 축대칭 모델에 적용하기 위해서는 결국 유도된 텐던 강성을 원환방향으로 평균화시키는 근사화 절차가 필요하다. 여기에서는 텐던이 비교적 조밀한 간격을 가지고 돔 전체에 걸쳐 각 방향으로 고르게 배치되어 있다는 데 착안하여, 비록 비축대칭으로 배치되었지만 전체적인 텐던 강성은 자오선방향 및 원환방향으로 고르게 기여하는 것으로 보았다. 즉, 강성 면에서는 분포된 층과 유사한 경향을 보일 것으로 예상하고 식을 유도하였으며, 즉, 3차원으로 배치된 텐던의 총 부피를 구하고 이와 같은 부피를 가지는 등가의 층으로 텐던의 강성을 모델링하였다. 이러한 등가의 층은 축대칭 형상을 가지므로 축대칭 모델에 직접적으로 적용 가능하게 된다.

2.2 CANDU형

Fig. 2는 CANDU형에서 3방향으로 배치된 텐던 중에서 특정한 방향으로 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 해석 결과에 미치는 영향은 미미하다. 또한, Fig. 2에서는 수식 유도상의 편의를 위해 평면상 텐던 형상이 등간격이고 직선이라고 가정하였으며, 이는 실제의 배치와 미소한 차이는 있으나 CANDU형 돔은 매우 납작한 형태이므로 가정에 따른 텐던 형상의 근사화 정도는 매우 작은 편이다.

Fig. 2에서 1방향으로 총 n 개의 텐던이 배치되었을 때, 텐던 간의 간격은 $2R/(n+1)$ 이므로 m 번째 텐던에 대해 다

음 식 (1)~(4)가 성립한다. 참고로 n 이 홀수가 아닌 짝수 일 경우에는 $m=0$ 일 때에 텐던 2개가 중복 배치되어 있고 그 위쪽으로는 $m=1$ 에서 $m=(n-2)/2$ 까지 텐던이 배치되어 있다고 가정하는 것이 수식 유도상 간편하고 일관성도 확보할 수 있으며, 그에 수반되는 오차는 역시 무시할만한 것으로 판단된다.

$$\begin{aligned} \overline{m'm''} &= \sqrt{R^2 - \left(\frac{2mR}{n+1}\right)^2} \quad (1) \\ &= \frac{2R}{n+1} \sqrt{\left(\frac{n+1}{2}\right)^2 - m^2} \end{aligned}$$

$$\theta_m = \arctan(\overline{m'm''}/L) \quad (2)$$

$$R'_m = L/\cos\theta_m \quad (3), \quad \widehat{mm'} = R'_m \theta_m \quad (4)$$

따라서, 텐던 한개의 단면적을 A_{ps} 라 했을 때 1방향 텐던들의 총 부피는 식 (5)와 같이 구할 수 있다. 여기에서 아래첨자 0은 $m=0$ 인 경우이다.

$$V = A_{ps} \left(2R'_0 \theta_0 + 4 \sum_{m=1}^{(n-1)/2} R'_m \theta_m \right) \quad (5)$$

돔의 표면적은 식 (6)에서 구할 수 있으므로, 3방향의 모든 텐던의 부피를 일정한 두께를 가진 등가의 층으로 분포시킬 때의 층의 두께 t 는 식 (7)과 같다.

$$S = \frac{2\pi R^2}{1 + \cos\theta_0} \quad (6), \quad t = 3V/S \quad (7)$$

전술하였듯이 실제 텐던의 강성은 자오선방향 및 원환 방향으로 나뉘어져 각 방향으로 일정 부분의 강성 기여가 있지만, 여기에서 사용된 층모델의 경우 양 방향의 강성을 좀 더 크게 평가할 것으로 사료된다. 따라서, 적절한 두께 보정계수를 적용하여 식 (7)에서 산정된 두께를 일부 감소시켜 주는 것이 좀 더 실제 거동에 가까울 수도 있다. 보정계수의 값은 전체적인 텐던 배치 형상의 함수가 되며, 이론적인 유도보다는 3차원 해석과의 비교를 통하여 도출하는 것이 좀 더 바람직할 것으로 생각된다.

2.3 한국형

Fig. 3은 한국형에서 2방향으로 배치된 텐던 중에서 특정한 방향으로 배치된 돔 텐던을 보여주고 있다. 각 방향 텐던은 거의 돔 두께상의 중심에 위치하지만 중복되어 배

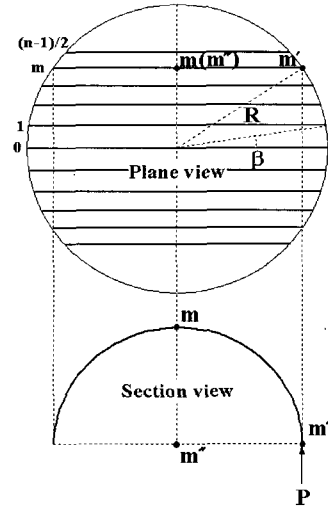


Fig. 3 Dome tendons (KSNP type)

치되기는 어려우므로 미소한 높이 차이가 있다. 하지만 본 유도와 같이 모든 텐던이 돔 두께의 중간에 위치한다고 가정하더라도 전체 해석 결과에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다. CANDU형에서 거의 일정한 간격으로 배치된 돔 텐던과 비교할 때 한국형의 가장 큰 차이점은 벽체에 원주방향을 따라 일정한 간격으로 배치된 수직 텐던이 그대로 연장되어 돔 텐던을 이루고 있는 관계로 돔 정점부에서 멀어질수록 돔 텐던의 간격이 줄어든다는 점이다. 수식 유도시 이러한 차이점이 반영된 것 이외에는 CANDU형에서의 유도 개념과 대체로 대동소이하다.

Fig. 3은 벽체의 수직 텐던이 β 의 각도를 가지고 등간격으로 배치되었을 때, 1방향으로 배열된 n 개의 돔 텐던을 보여주고 있다. 이때 m 번째 텐던에 대해 다음 식 (8) ~ (9)가 성립한다. 텐던 한개의 단면적을 A_{ps} 라 했을 때 1방향 텐던들의 총 부피는 식 (10)과 같이 유도되며, 2방향의 모든 텐던들의 부피 $2V$ 를 반구형 돔의 표면적으로 나누면 등가의 텐던 층 두께를 구할 수 있다. 역시 필요시에는 이렇게 유도된 두께에 감소계수를 적용하여 축대칭 모델에서의 텐던 강성을 실제에 가깝게 조절할 수 있다.

$$\overline{m'm''} = R \cos(m\beta) \quad (8)$$

$$\widehat{mm'} = \overline{m'm''} \times \frac{\pi}{2} = \frac{\pi R}{2} \cos(m\beta) \quad (9)$$

$$V = A_{ps} \left(\pi R + 4 \sum_{m=1}^{(n-1)/2} \frac{\pi R}{2} \cos(m\beta) \right) \quad (10)$$

3. 프리스트레싱 효과의 모델링

3.1 개요

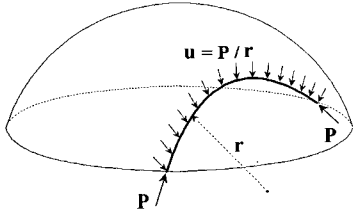


Fig. 4 Tendon-induced equivalent loads

Fig. 4는 프리스트레싱이 가해진 특정한 돔 텐던이 콘크리트에 작용시키는 힘, 즉, 등가하중⁴⁾의 분포를 보여주고 있다. 돔 텐던의 정착부에는 프리스트레싱 힘 P 와 같은 크기의 집중하중이 텐던 축방향으로 작용하며, 곡률을 가진 곡선부에는 분포하중이 작용한다. 분포하중 u 의 크기는 텐던 미소 요소의 자유물체도로부터 유도할 수 있으며, 작용방향은 곡선 텐던이 속해 있는 평면상에서 텐던 축에 직각방향이다⁴⁾.

Fig. 1과 같이 돔에 배치된 일련의 텐던들은 Fig. 4와 같은 힘을 콘크리트에 작용시키고 있으며, Choo⁵⁾ 및 김명모⁶⁾는 이러한 힘들을 각 방향의 압력으로 근사화한 바 있다. 이 연구들에 의하면 압력 성분 중 지배적인 것은 돔 표면에 직각방향으로 작용하고 있는 압력이며 원환방향을 따라 비교적 일정한 크기로 작용하고 있음을 보였다.

여기에서는 기존 연구와는 또 다른 방법론에 의해 이러한 힘들을 변환하여 실제의 3차원 해석 결과와 비슷한 값을 산출하도록 축대칭 모델상에서 구현하고자 한다. 프리스트레싱 효과를 유한요소 모델상에서 구현하는 방법에는 크게 등가하중법(equivalent load method) 및 초기응력법(initial stress method)이 있으며⁴⁾, 이하에서는 두가지 방법 모두를 비교하여 논하고자 한다. 이 두가지 방법에 대한 유사성은 Roca 등⁷⁾에서 간략히 언급된 바 있다.

3.2 등가하중법

3.2.1 CANDU형

CANDU형 돔에는 Fig. 1(a)와 같이 텐던들이 비교적 조밀한 간격으로 돔 전체에 걸쳐 3방향으로 고르게 배치되어 있으므로, 프리스트레싱에 의한 압력, 즉, 등가분포하중은 평균화되어 돔 전체적으로 비교적 일정한 크기로 돔 표면에 직각방향으로 작용한다고 가정해 볼 수 있다. 한편, 돔 텐던의 정착부에 작용하는 힘, 즉, 등가집중하중 중에서 축대칭 모델에서 구현될 수 있는 힘은 축대칭 평면상의 힘이다. Fig. 2를 참조할 때 정착부 하중 중 원환방향의 성분은 텐던들 간에 서로 상쇄되므로 비록 축대칭 모델에서 고려하지 않더라도 해석 결과에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 이러한 점에 착안하여 다음과 같이 축대칭 모델상의 정착부 등가집중하중을 먼저 유

도하고 이를 이용하여 돔에 작용하는 등가분포하중을 구하는 방법론을 취하였다.

Fig. 2에서 m 번째 텐던에 프리스트레싱 힘 P 가 가해지면 이는 수평 성분 P_{mh} 및 수직 성분 P_{mv} 로 나눌 수 있으며, 각각의 값은 식 (2)에서 유도된 θ_m 으로부터 다음과 같이 산정 가능하다.

$$P_{mh} = P \cos \theta_m \quad P_{mv} = P \sin \theta_m \quad (11)$$

또한 P_{mh} 는 평면상에서 식 (12)와 같이 유도된 α_m 로부터 식 (13)과 같이 반지름방향 성분 P_{mtr} 및 원환방향 성분 P_{mth} 로 추가적으로 분리할 수 있으며, 이 중 축대칭 모델에서 고려되는 것은 P_{mtr} 이다.

$$\alpha_m = \arcsin\left(\frac{2mR/(n+1)}{R}\right) \quad (12)$$

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

$$P_{mtr} = P_{mh} \cos \alpha_m \quad P_{mth} = P_{mh} \sin \alpha_m \quad (13)$$

따라서, 식 (14)에서 3방향 텐던 전체에 대한 P_{mtr} 값들의 총합 P_{tr} 및 P_{mv} 값들의 총합 P_v 를 구하여 합성하면 축대칭 모델의 텐던 층 정착부에 작용시킬 집중하중들의 총합 P_{axi} 를 구할 수 있다. 유한요소해석에 기반한 구조해석프로그램에 적용시 프로그램상에서 축대칭 요소의 원주방향 적분을 2π radian에 대해 수행할 경우 이러한 총합을 그대로 작용시키면 되지만, 만약 1 radian에 기초한다면 총합을 2π 로 나눈 후 적용한다. 아래 식에서 아래첨자 0은 $m=0$ 인 경우이다. 기존 연구¹⁾에서는 CANDU형 돔 텐던의 정착부 하중이 수평면과 이루는 각도를 엄밀히 고려하지 않아서 근사화가 커진 단점이 있었다.

$$P_{tr} = 6 \left(P_{0tr} + 2 \sum_{m=1}^{(n-1)/2} P_{mtr} \right) \quad (14a)$$

$$P_v = 6 \left(P_{0v} + 2 \sum_{m=1}^{(n-1)/2} P_{mv} \right) \quad (14b)$$

이상과 같이 구한 P_{axi} 를 정착부의 원주방향 길이로 나누면 단위길이당 집중하중 p_{axi} 를 구할 수 있다. 한편, 실제 텐던들이 고르게 배치된 관계로 텐던 층의 자오선방향 및 원환방향으로 프리스트레싱 효과가 유사하게 발생한다고 가정해 볼 수 있다. 이 때 축대칭 모델에 작용시킬 등가분포하중은 Fig. 5와 같이 텐던 층의 미소 요소 상에서 p_{axi} 와 평형을 이루도록 셀이론에 근거하여 식 (15)와 같이 유도할 수 있다⁸⁾. 여기에서 R_0 은 Fig. 2를 참조할 때 돔

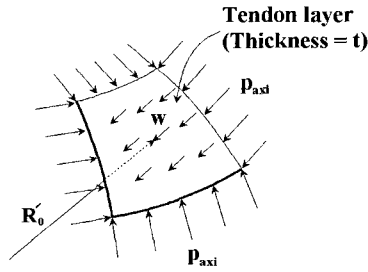


Fig. 5 Derivation of equivalent distributed loads

의 곡률 반경이자 또한 텐던 층 곡률 반경에 해당한다. Fig. 5는 엄밀히 말해 텐던 층이 텐던 층 위치의 콘크리트에 작용하는 힘을 표현한 것이며, 텐던 층 자체에 작용하는 힘은 Fig. 5와 크기는 같고 방향은 반대이다.

$$w = \frac{2p_{axi}}{R_0} \quad (15)$$

3.2.2 한국형

한국형에 대한 정착부 등가집중하중의 유도도 기본적으로는 CANDU형과 같으나, 정착부 하중이 Fig. 3과 같이 수직방향이므로 성분 분리 등의 절차가 필요 없어 수식의 유도가 훨씬 간편하다. 한국형은 벽체 수직 텐던이 그대로 돔 텐던으로 이어지므로 실제로 돔 상에는 정착부가 존재하지 않지만 수식의 유도를 위해 임시로 가상의 정착부를 가정한다. 일반부의 등가분포하중은 역시 식 (15)와 같은 방식으로 구할 수 있으며, 단, 한국형에서 R_0 은 R 로 대체한다.

3.3 초기응력법

텐던 층에 자오선방향 및 원환방향으로 초기응력을 가함으로써 3.2절에서 유도한 정착부 등가집중하중 및 일반부 등가분포하중의 효과를 동시에 구현할 수 있다. 따라서, 초기응력법을 적용하는 것이 해석이 좀 더 간편하게 되는 면은 있으나, 등가하중법은 텐던에 대한 특별한 고려가 없는 프로그램에서도 일반 하중과 유사하게 해석할 수 있는 반면, 초기응력법은 텐던에 해당하는 요소에 초기응력을 가할 수 있는 알고리즘을 내장하고 있어야 한다. 초기응력 σ_{ps} 는 Fig. 5의 p_{axi} 를 텐던 층의 두께 t 로 나누어 구할 수 있다. 만약 자오선방향 초기응력과 원환방향 초기응력을 같게 두지 않고 다소 차별화 하는 것이 실제의 3차원 해석 결과와 더 유사한 값을 준다면 초기응력에 대해 보정계수를 적용하는 방법도 가능하다.

4. 결 론

원전 격납건물의 축대칭 모델은 해석상의 간편성으로

인하여 내압 등 원전의 주요 하중에 대한 해석시 널리 사용되지만, 실제 콘크리트의 형상 및 철근과 텐던의 배치는 엄밀한 의미의 축대칭 조건이 아닌 경우가 많으므로 축대칭 모델링시 주의를 요한다. 특히 돔 텐던의 경우 곡률을 가진 돔에 곡선 텐던이 임의로 배치됨에 따라 축대칭 모델링시 텐던 기하 형상에 대한 좀 더 엄밀한 수학적 표현이 요구된다.

본 연구에서는 기존 방법을 개선하여 국내의 CANDU형 및 한국형 원전 격납건물 돔에 비축대칭으로 배치된 텐던을 축대칭 모델에 적합하도록 변환하는 합리적인 절차를 제안하였다. 텐던 강성의 모델링에서는 실제 3차원으로 배치된 돔 텐던의 자오선방향 및 원환방향으로의 강성 기여를 적절히 고려할 수 있도록 텐던을 등가의 층으로 근사화하였다. 프리스트레싱의 효과는 등가하중법 및 초기응력법 관점에서 고찰하였으며, 각 방법에 적용할 등가하중 및 초기응력을 축대칭 모델링의 방법론에 적합하도록 유도하였다. 강성 산정에 대해 제시된 방법은 일부 수식의 변형을 통하여 한국형 원전 격납건물에서 2방향의 격자형으로 배치된 돔 철근에도 적용할 수 있으리라 기대된다. 후속 논문에서는 제안된 모델을 범용구조해석 프로그램에 적용한 수치 예제들을 통하여 타당성을 비교 검증하였다.

참고문헌

1. 정철현, 장성욱, 조경태, 정한중, "원전 격납구조물의 돔 및 기초슬래브에서의 프리스트레스 텐던 모델 기법", 대한토목학회논문집, 16권 I-3호, 1996, pp.317~327.
2. 문일환, 이용일, 이기성, 심종성, "온도 영향을 고려한 프리스트레스트 콘크리트 격납건물의 비선형 극한내압 해석", 대한토목학회논문집, 19권 I-3호, 1999, pp.435~448.
3. 전세진, "원전 격납건물 돔 텐던의 축대칭 모델링 기법 II. 수치예제를 통한 검증", 콘크리트학회논문집, 17권 4호, 2005, pp.527~533.
4. 전세진, 김수만, "프리스트레스트 콘크리트 구조물의 해석기법", 콘크리트학회지, 16권 1호, 2004, pp.57~64.
5. Choo, Y. I., "Pressures due to Post-tensioned Tendons on a Dome of a Nuclear Reactor Containment Vessel", *Nuclear Engineering and Design*, Vol.32, 1975, pp.386~393.
6. 김명보, "P.S. 콘크리트 원자로 격납구조물의 돔에 작용하는 프리스트레스힘의 평가방법", 대한토목학회논문집, 18권 I-4호, 1998, pp.573~586.
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.
8. Calladine, C. R., *Theory of Shell Structures*, Cambridge University Press, UK, 1983, 89pp.

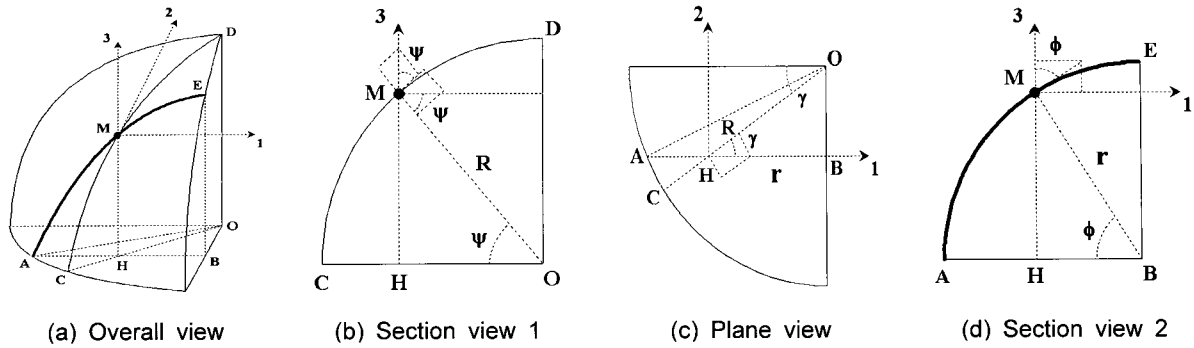


Fig. 6 Separation of dome tendon stiffness

부록 : 자오선 및 원환방향으로의 텐던 강성의 분리

본 유도는 문일환 등²⁾에서 사용된 과정의 일부를 발췌하여 정리하였으며, 여기에서는 돔의 1/4 부분에서 굽은 실선으로 표시된 특정한 텐던의 임의점 M 에서 자오선 및 원환방향으로 강성을 분리하는 과정을 예시하였다. 텐던의 강성은 텐던의 단면적에 비례하며, 다음과 같이 최종적으로 유도된 식에 M 에 대응되는 γ 및 ψ 값을 대입함으로써 텐던 단면적 A 에서 자오선방향의 기여분 A_m 및 원환방향의 기여분 A_θ 를 분리할 수 있다. 아래첨자 1, 3 및 rad 는 각각 좌표축상에서 1방향, 3방향, 그리고 수평면상 반지름방향을 의미한다. ψ 값의 범위를 조절함으로써 본 유도는 반구형 돔 뿐 아니라 부분구형 돔에도 적용 가능하며, 다른 방향으로 배치된 텐던에 대해서도 유사한 절차를 적용하면 된다.

$$\overline{MH} = R \sin \psi \quad \overline{OH} = R \cos \psi \quad (16)$$

$$\overline{OB} = \overline{OH} \sin \gamma \quad \overline{BH} = \overline{OH} \cos \gamma \quad (17)$$

$$r = \sqrt{R^2 - \overline{OB}^2} \quad (18)$$

$$\cos \phi = \overline{BH}/r \quad \sin \phi = \overline{MH}/r \quad (19)$$

$$A_1 = A \sin \phi \quad A_3 = A \cos \phi \quad (20)$$

$$A_{rad} = A_1 \cos \gamma \quad (21)$$

$$A_\theta = A_1 \sin \gamma \quad (22)$$

$$A_m = A_{rad} \sin \psi + A_3 \cos \psi \quad (23)$$

요 약

원전 격납건물의 축대칭 모델은 해석상의 간편성으로 인하여 널리 사용된다. 하지만, 일반적인 돔 텐던의 배치는 축대칭 형상이 아니며 곡률을 가진 돔에 임의로 배치된 관계로 축대칭 근사화시 좀 더 엄밀한 수학적 유도가 요구된다. 본 연구에서는 국내의 CANDU형 및 한국형 격납건물 돔에 비축대칭으로 배치된 텐던을 축대칭 모델에 적용하기 위한 합리적인 변환 절차를 제안하였다. 텐던 강성의 모델링에서는 실제 3차원으로 배치된 돔 텐던의 자오선방향 및 원환방향으로의 강성 기여를 고려할 수 있도록 텐던을 등가의 축으로 근사화하였다. 프리스트레싱의 효과는 등가하중법 및 초기응력법 관점에서 고찰하였으며, 축대칭 모델의 방법론에 적합하도록 등가하중 및 초기응력을 유도하였다. 후속 논문에서는 제안된 모델을 적용한 수치 예제들을 범용 구조해석 프로그램으로 해석하고 타당성을 검증하였다.

핵심용어 : 원전 격납건물, 돔, 프리스트레싱 텐던, 축대칭 모델