

원형탱크구조물 벽체의 텐던 배치에 대한 고찰

Effect of Arrangement of the Prestressing Tendons in the Wall of Circular Storage Tank

전 세 진* 정 철 현** 진 병 무* 김 성 운***
Jeon, Se Jin Chung, Chul Hun Jin, Byeong Moo Kim, Seong Woon

ABSTRACT

Prestressing tendons in the wall of circular storage tank were investigated from the viewpoint of equivalent load method. Special attention was paid to the effectiveness of eccentricities of the circumferential and vertical tendons. Some aspects which are frequently overlooked or misinterpreted in the analysis of vertical tendons are discussed. It is expected that the equivalent load method can be effectively used to simplify the analysis of tendons in the circular wall thus to minimize the errors.

1. 서 론

원자력발전소 격납구조물이나 LNG 저장탱크와 같은 원형탱크구조물에는 구조적 효율성을 위하여 프리스트레싱 텐던이 널리 쓰여져 왔다. 유한요소법 등의 컴퓨터 해석기법의 발전으로 그러한 프리스트레스트콘크리트(PSC) 구조물의 해석시 철근이나 텐던을 실제의 배치형상과 최대한 가깝게 모델링하는 것도 가능하게 되었다. 그러나, 텐던의 대략적인 배치형태를 결정하는 예비설계단계부터 이처럼 상세한 모델링을 수행하는 것은 비효율적인 경우가 많으며, 이 경우 실용적으로 널리 쓰이는 텐던의 해석법이 등가하중법이다.

등가하중법(Equivalent load method)⁽¹⁾은 프리스트레싱 텐던의 영향을 구조물에 작용하는 외력으로 고려하는 것으로 프리스트레싱의 효과를 명확히 하고 해석을 단순화시켜주는 유력한 방법론이다. 일반적으로 등가하중법은 PSC 보의 해석에 있어 널리 쓰여져 왔으나, 그 적용범위는 매우 넓으며 본 논의대상 구조물인 원형탱크와 같은 PSC 셸 구조물의 해석에서도 유용하게 쓰일 수 있다.

본 연구에서는 등가하중법의 관점에서 원형탱크 벽체의 원환텐던(Hoop or Circumferential tendon) 및 수직텐던(Vertical tendon)(그림 1 참조)의 배치가 구조물에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 주로 텐던의 편심배치의 영향을 고찰하였으며, 이와 관련하여 기존의 설계예에 있어서의 오류를 지적하고 올바른 접근법을 제시하였다.

* 정회원, 대우건설기술연구소, 주임연구원

** 정회원, 대우건설기술연구소, 책임연구원

*** 정회원, 대우건설기술연구소, 수석연구원

2. 원환텐던

2.1 원환텐던의 역할

원환텐던은 원형탱크 구조물에 있어서 주요 설계하중인 내압이나 유체압을 상쇄하는 1차적인 중요성을 가진다. 시방서에서는 원환텐던에 의해 주요 설계하중을 상쇄하고 추가의 원환방향 압축응력이 도입되도록 규정하는 경우가 많으며, 이는 건조수축이나 온도 변화 등에 대비한 것이다. 예를들어 ACI 373⁽²⁾에서는 14 kgf/cm² (200 psi)의 여유압축응력을 규정하고 있다.

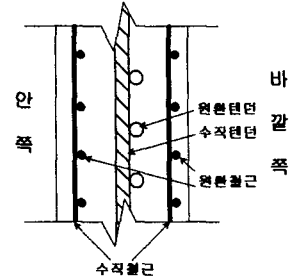


그림 1 원형탱크 벽체의 텐던 배치

2.2 원환텐던의 편심배치

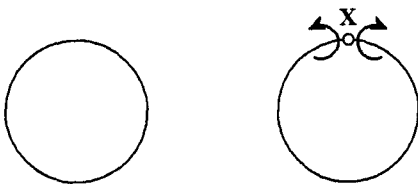
원환텐던은 그림 1과 같이 수직텐던에 접하여서 벽체 중심에 가깝게 배치될 수도 있으나 수직텐던이 없을 경우 벽체 바깥쪽의 수직철근에 접하여 시공되는 경우도 있다. 또한 벽체 바깥쪽으로 와이어나 스트랜드를 감는 시공방식의 경우 극단적으로 편심배치되게 된다.

본 연구에서는 이러한 원환텐던의 편심배치의 영향을 등가하중법 및 그러한 등가하중법과 밀접한 관계가 있는 텐던의 직선이동(Linear transformation)⁽¹⁾의 원리를 통하여 분석하였다. 등가하중법과 직선이동과의 관계는 참고문헌 3에서 자세하게 고찰되었다.

Nielsen⁽⁴⁾은 텐던의 직선이동에 대한 새로운 관점으로서, 직선이동시 식 (1)이 성립한다고 하였다. 여기에서 $\Delta M(x)$ 는 직선이동에 따른 2차 모멘트의 변화량이며, $\Delta e(x)$ 는 편심의 변화량이다. 따라서 좌변 첫째 항은 직선이동에 의한 1차 모멘트의 변화를, 둘째 항은 역시 같은 직선이동에 의한 2차 모멘트의 변화를 의미한다고 볼 수 있으며, 이 두 개의 항의 합이 0이라는 것은 직선이동에 의해 총모멘트의 변화가 없다는 것으로 해석할 수 있다. $\Delta M(x)$ 는 부정정반력에 의해 발생하는 모멘트 분포이므로 선형분포를 갖게 되며 또한 프리스트레싱 힘 $P(x)$ 는 손실을 무시할 때 텐던의 전길이에 있어 일정한 값이므로, 직선이동시 수반되는 편심의 변화량 $\Delta e(x)$ 는 선형일 수 밖에 없어 직선이동의 원리가 성립한다는 것이다.

$$P(x)\Delta e(x) + \Delta M(x) = 0 \quad (1)$$

여기에서는 Nielsen이 식 (1)을 통하여 분석했던 원형탱크 벽체 원환텐던의 편심배치 문제를 또다른 관점에서 재고찰해 보기로 한다. Nielsen은 x 를 벽체 원환방향의 좌표로 둘 때 그림 2(b)와 같은 부정정모멘트 X 는 원환방향으로 선형분포의 특수한 경우로 볼 수 있는 일정한 모멘트 $M(x)$ 를 발생시키므로 식 (1)이 성립하고 따라서 원환텐던의 편심배치 또한 직선이동의 일종으로 볼 수 있다고 결론지었다.



(a) 부정정구조물 (b) 정정구조물 및 부정정모멘트

그림 2 원환텐던을 가진 원형링 구조물의 해석

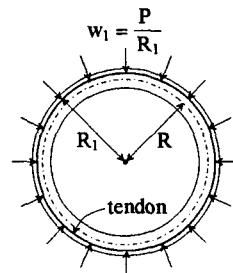


그림 3 원환텐던에 의한 등가하중

그러나 Nielsen은 특별한 부가설명 없이 식 (1)의 우변이 성립한다고 두었는데, 참고문헌 3에 근거하여 고찰할 때 그러한 가정이 성립하려면 원환텐던의 편심배치에 관계없이 텐던이 발생시키는 등가하중이 같아야 한다. 하지만 등가하중 w_1 의 크기는 그림 3과 같이 편심의 위치에 따라 약간씩 다른 값을 갖게 된다.

엄밀한 탄성체 문제에서 그림 3의 텐던의 위치 R_1 에 따라 벽체는 서로 다른 응력상태를 갖는다. 그러나, 일반적으로 등가하중법을 논의할 때 사용되는 뼈대구조물은 부재의 도심을 따라 모델링하게 되므로, 등가하중이 이러한 부재의 도심에 작용하지 않을 경우 계산된 등가하중을 보정없이 그대로 도심에 작용시킨다면 일관되지 않은 결과가 나올 수 있다. 예를 들어 그림 3을 뼈대로 모델링하고 w_1 을 그대로 작용시킬 때 축력은 프리스트레싱힘과 같은 P 가 아닌 $P(R/R_1)$ 로 산정되는 모순이 생긴다. 여기에서 R 은 원의 중심에서 벽체 중심까지의 거리이다. 따라서 w_1 을 뼈대해석시 축력 P 를 산출하게 되는 등가하중값으로 보정하는 것이 합리적인데 이러한 등가하중은 P/R 로 산정되며, 즉, 텐던의 위치를 벽체 중심으로 옮긴 것과 같은 효과이다. 요약하자면 뼈대구조물의 특성을 고려할 때 원환텐던은 편심에 상관없이 일정한 등가하중 P/R 를 발생시키는 것으로 보는 것이 합리적이며, 따라서 식 (1)의 우변은 임의로 편심배치된 원환텐던의 경우에도 역시 성립하는 것으로 볼 수 있다.

그 다음으로 식 (1)의 둘째 항인 2차 모멘트, 즉, 그림 2(b)의 부정정모멘트 X 에 의해 발생하는 모멘트 분포에 대해 논의하기로 한다. 부정정모멘트의 크기는 그림 4와 같이 대칭성을 이용하여 구조물의 1/2만을 모델링 했을 때 X 가 작용하는 곳에서의 회전을 0으로 만드는 적합조건에 의해 구할 수 있는데, 그림 4(b)에 의해서는 X 가 작용하는 위치에 회전이 발생하지 않으므로 부정정모멘트 X 의 크기도 0일 것으로 판단할 수 있다. 물론, X 에 의해 발생하는 2차 모멘트의 분포도 전체적으로 0이 된다. 따라서 Nielsen이 부정정모멘트가 일정 크기를 가진다고 예측했던 것과 본 논문의 관점은 차이가 있다.

마지막으로 식 (1)의 첫째 항인 1차 모멘트는 그림 4(b)에서 발생하는 모멘트로 볼 수 있는데 힘의 평형 관점에서 판단할 때 1차 모멘트는 부재의 전체에 있어 0인 것으로 볼 수 있다. Nielsen은 연속보 해석에 적용했던 식 (1)의 첫째 항을 이처럼 원형으로 폐합된 구조에도 적용할 수 있으며 원환텐던의 편심량에 따라 이 항이 영향을 받는다고 보았지만, 본 논문에서 판단하기에 폐합된 구조일 경우에는 식 (1)의 첫째 항은 의미가 없어질 것으로 보인다.

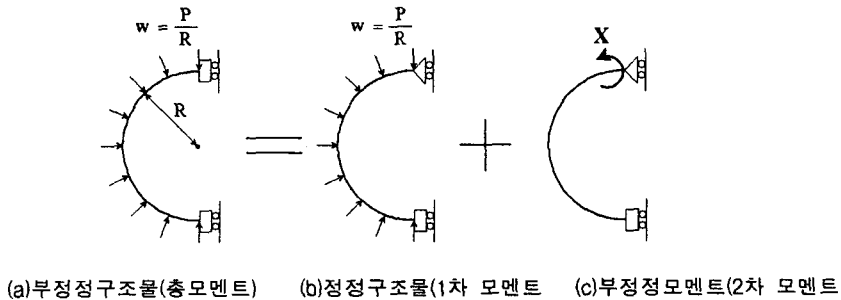


그림 4 원환텐던에 의해 유발되는 모멘트

결론적으로 원형탱크 벽체의 원환텐던을 편심배치시킬 때 뼈대해석을 수행하면 편심에 관계없이 동일한 등가하중 시스템을 산출한다는 면에서 텐던의 직선이동의 일종으로 볼 수 있을 것으로 판단되며, 이 점에서는 본 논문의 관점과 Nielsen의 견해가 같다. 이는 바꾸어 말하면 실제 구조물에 있어서 시공의 용이성이나 덮개규정 등을 만족하는 한 원환텐던을 어떻게 편심배치시키건 구조거동에 큰 차이는 없다는 것을 의미한다.

그러나, 식 (1)과 같이 텐던에 의해 발생하는 1차 및 2차 모멘트가 각각 변화하더라도 총모멘트는 일정하다는 것에 주안점을 둔 것이 직선이동의 원리라고 본다면, 이러한 원리는 연속보 구조 등에서는 유효하지만 원형링 구조와 같이 폐합된 형태에서는 성립한다고 보기 어려울 것으로 판단된다. 본 논문에서는 어떠한 편심에 텐던이 위치하더라도 1차 모멘트, 2차 모멘트, 총모멘트가 모두 0인 것으로 판단하였으므로, 이러한 관점과 편심배치에 따라 1차 및 2차 모멘트가 변동한다고 본 Nielsen의 견해는 차이가 있다.

3. 수직텐던

3.1 수직텐던의 역할

ACI 373⁽²⁾에 의하면 수직텐던에 의해서 프리스트레싱힘의 손실후에도 14 kgf/cm²(200 psi)의 압축응력이 높이 방향으로 도입되어야 한다고 규정하고 있다. 이를 통하여 설계하중이나 원환텐던에 의한 벽체의 휨에 의해 유발되는 휨인장응력을 허용치 이하로 감소시킬 수 있다. 그러나 시방서에는 또한 휨인장응력의 허용치가 규정되어 있으므로, 그에 의해 수직텐던에 의한 압축응력의 도입수준이 제한된다.

3.2 프와송비에 의한 2차 효과

엄밀히 해석할 때 수직텐던의 편심배치 여부에 관계없이 수직텐던은 벽체에 미소한 높이방향 휨을 유발한다. 이는 수직벽체가 높이방향 압축을 받을 때 프와송비에 의하여 원환방향으로 팽창하려는 것을 벽체 하부가 구속하고 있기 때문이다^{(5),(6)}. 쉘 구조물의 정밀해석에서는 이러한 효과가 자연스럽게 고려된다. 그러나 고전적인 방법론에 의해 원통형 쉘을 탄성지반위에 지지된 보로 대체시켜 해석할 경우에는 단순히 보의 축방향 압축으로서 휨을 유발하지 않게 되어 이러한 효과를 고려할 수 없음을 주의해야 한다(그림 5).

이러한 효과를 수계산으로 고려할 때는 구속이 없었을 경우 발생했을 벽체 하부의 반지름방향 변위를 계산하여 그러한 변위의 구속이 유발하는 모멘트를 구하는 방법론을 따르게 된다. 실용적으로 수직텐던에 의한 이러한 2차적인 효과는 무시하는 경우가 많지만, 이런 효과에 의해 적지 않은 휨모멘트가 발생되는 경우도 있으므로 주의를 요한다.



그림 5 수직텐던 및 프와송비에 의한 휨모멘트의 유발

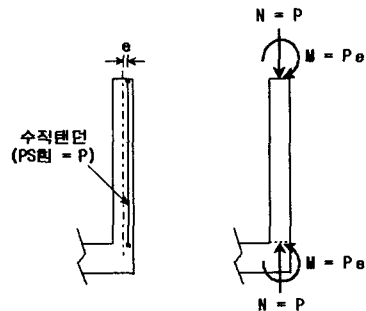


그림 6 편심배치된 수직텐던에 의한 등가하중

3.3 수직텐던의 편심배치

3.3.1 편심배치의 효과

수직텐던은 일반적으로 그림 1과 같이 벽체 중심에 가깝게 위치한다. 그러나 구조적인 목적이나 시공편의상 수직텐던이 벽체중심에 대하여 편심배치되는 경우도 있는데 이러한 편심배치의 효용성에 대한 연구가 비교적 최근까지도 이루어져 왔다^{(5),(6)}.

Nielsen⁽⁶⁾은 탱크의 설계하중에 의해 발생하는 벽체의 높이방향 휨모멘트를 수직텐던의 편심배치를 통하여 해결하려는 것이 오랜 관례였으나 실제로는 큰 효과가 없음을 지적하였다. 이것 또한 등가하중법 관점에서 고찰할 때 명확하다. 편심배치된 수직텐던은 양단 정착부에서 편심재하되는 집중하중을 발생시키며 이러한 하중은 벽체 중심에 재하되는 집중하중 및 모멘트로 치환할 수 있다(그림 6). 여기에서 P 는 벽체의 원환방향 단위길이당의 프리스트레싱힘이며, 편심배치의 영향은 정착부에서의 모멘트 $M=Pe$ 의 영향으로 볼 수 있다.

벽체설계에서 가장 문제가 되는 것은 설계하중이 작용할 때 강성이 큰 바닥판에 의해 구속되는 벽체 하부에서 발생하는 높이방향의 모멘트이다. 그러나 그림 6의 수직텐던에 의한 벽체 하부의 모멘트는 고정단에 작용하는 하중과 같아서 실제 벽체의 거동에는 거의 영향을 미치지 못한다. 한편 그림 6은 벽체 상부가 자유단인 경우인데 이때 벽체 상부의 모멘트의 영향은 원통형 쉘의 특성상 하부로 갈수록 급속히 줄어드는 것이 보통이므로 벽체의 주요한 높이에 있어서는 큰 영향을 미치지 못한다. 이러한 점들로부터 미루어 수직텐던의 편심배치는 설계하중에 의한 벽체의 휨을 완화시켜주는 역할을 한다고 보기는 힘들다고 판단된다.

그러나 공칭강도면에서 평가하면 수직텐던의 편심배치가 유리할 수도 있다. 예를들어 벽체의 휨거동에 있어 인장응력의 영역에 수직텐던이 편심배치된다면 강도설계법에 의한 벽체의 공칭모멘트강도계산시 수직철근과 비슷하게 공칭강도에 기여하게 된다.

3.3.2 편심배치의 잘못된 해석에

기존의 PSC 관련 문헌^{(1),(7)}이나 설계도서에서 이러한 수직텐던의 편심배치 문제를 잘못 해석한 예를 찾을 수 있으며, 특히 그림 6과 같은 경우 수직텐던의 편심에 의한 1차 모멘트 $M=Pe$ 만을 고려하여 벽체의 모든 높이에서 휨응력을 $\sigma=Pec/I$ 로 산정하는 것이 가장 빈번한 오류이다. 여기에서 I 는 벽체 원환방향 단위길이당의 단면이차모멘트, c 는 벽체 중심으로부터의 두께방향 거리이다. 이는 원통형 벽체를 정정구조물로서의 캔틸레버로 보았을 때 성립한다. 그러나 그림 6의 원통형 벽체는 탄성지반위에 지지된 캔틸레버로 보는 것이 옳바르며 이는 정정구조물이 아닌 부정정구조물임이 자명하다.

PSC 구조물이 부정정일 경우 1차 모멘트 이외에도 부정정반력에 의한 2차 모멘트를 고려해야 하며, 이러한 1차 및 2차 모멘트를 합산한 총모멘트로 휨응력을 산정하는 것이 올바른 절차이다. 그러나 이러한 방법론을 원통형 벽체에 똑같이 적용시켰을 경우 탄성지반에 해당하는 개별 스프링의 힘이 모두 반력이 되므로 2차 모멘트를 구하는 절차가 매우 복잡하고 비실용적이 된다.

따라서 개념적으로 좀 더 명확하고 해석을 단순화시켜 오류를 최소화시킬 수 있는 방법은 역시 등가하중법이며, 이는 앞서 설명하여듯 텐던이 구조물에 작용시키는 힘을 그림 6과 같이 일반 외력으로 다루어서 원통형 쉘의 해석을 수행하는 것이다.

3.4 변단면 벽체의 수직텐던

LNG 저장탱크와 같은 액체 저장탱크의 경우 벽체 하부에서 모멘트가 크게 발생하므로 변단면을 사용하는 것이 효율적인 경우가 많다. 통영이나 인천의 지상식 LNG 저장탱크의 경우 그림 7과 같이 벽체 상부의 1/2은 등단면, 하부의 1/2은 변단면의 형상을 갖는다. 변단면에서의 수직텐던 및 원환텐던의 배치는 그림 7과 같이 벽체 바깥면에서 일정한 거리를 유지하는 방식으로 시공되었다. 따라서 등단면

과 변단면이 만나는 곳에서 수직텐던이 꺾이는 형상을 가지게 되며, 변단면 구간에서 수직텐던은 벽체중심에 대하여 편심을 가지게 된다.

이러한 형상의 텐던에 대해서도 3.3.2절의 오류를 포함하여 잘못 해석한 예를 찾을 수 있으며, 역시 바람직한 방법은 텐던에 의해 발생하는 등가하중에 대하여 원통형 쉘의 해석을 수행하는 것이다. 정착부에서 발생하는 모멘트 및 집중하중에 대한 논의는 그림 6에서와 같으나, 텐던이 절곡되는 부분에서 발생하는 등가의 집중하중 P_c 의 영향이 변단면 벽체의 설계시 흔히 간과되어 왔다. 벽체의 바깥면이 절곡되는 각도를 θ 라 했을 때, 그림 7로부터 P_c 의 수평성분은 $P \sin \theta$, 수직성분은 $P(1 - \cos \theta)$ 로 계산된다.

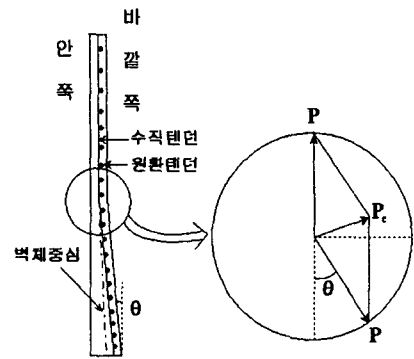


그림 7 LNG 저장탱크 벽체의 형상 및 텐던 절곡부위의 등가집중하중

4. 결론

원형탱크구조물 벽체의 수직텐던 및 원환텐던의 배치에 대한 영향을 등가하중법의 관점에서 고찰하였으며, 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 직선이동의 개념을 도입하여 원환텐던의 편심배치가 구조적인 관점에서 미치는 영향을 분석하였다. 편심에 관계없이 동일한 등가하중 시스템을 산출한다는 면에서는 텐던의 직선이동의 일종으로 볼 수 있으며, 이는 편심량이 달라져도 구조거동에 큰 차이는 없다는 것을 의미한다. 그러나 원형탱크 벽체와 같이 폐합된 구조에서는 편심배치시 1차 및 2차 모멘트가 변동하지는 않을 것으로 판단되며, 이 점에서는 연속보의 직선이동 문제와 차별화된다.
- (2) 수직텐던의 편심배치시 발생하는 모멘트는 벽체의 휨거동에 큰 영향을 미치지 못하므로, 편심배치로써 설계하중에 의한 벽체의 휨을 완화시켜준다고 보기는 어렵다. 그러나, 적절한 편심은 수직텐던을 수직철탄근과 같이 공칭모멘트강도에 기여하게 하는 장점이 있다.
- (3) 기존의 수직텐던의 설계 및 해석에 있어서 간과하거나 잘못된 점들에 대해 고찰하였다. 프와송비의 효과에 의해 벽체 중심에 배치된 수직텐던도 휨을 유발할 수 있다. 또한 수직텐던의 편심배치에 의한 모멘트 효과를 잘못 산정한 예에 대해 올바른 해석법을 제시하였다. 개념적으로 명확한 등가하중법을 통하여 원형탱크 벽체의 텐던 해석시 오류를 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Lin, T. Y. and Burns, Ned H., "Design of Prestressed Concrete Structures," 3rd Edition, John Wiley & Sons, 1981.
2. ACI 373R-97, "Design and Construction of Circular Prestressed Concrete Structures with Circumferential Tendons," American Concrete Institute, 1997.
3. 오병환, 전세진, "등가하중법 관점에서 분석한 프리스트레싱 텐던의 직선이동," 콘크리트학회 논문집, 심사중.
4. Brøndum-Nielsen, T., "Linear Transformation of Center of Gravity of Steel Line in Statically Indeterminate Prestressed Concrete Structures," *ACI Structural Journal*, Vol. 89, No. 2, March-April 1992, pp.139-140.
5. Ghali, A., "Circular Storage Tanks and Silos," 2nd edition. E & FN Spon. 2000.
6. Brøndum-Nielsen, T., "Prestressed Tanks," *ACI Structural Journal*, Vol. 82, No. 4, July-Aug. 1985, pp.500-509.
7. Nawy, E. G., "Prestressed Concrete: A Fundamental Approach," Prentice Hall, 1989.