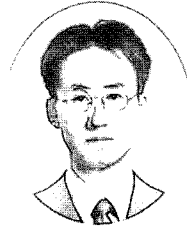


프리스트레스트 콘크리트 구조물의 해석기법

- Structural Analysis of Prestressed Concrete Structures -



전세진*
Jeon, Se Jin



김수만**
Kim, Su Man

1. 머리말

프리스트레스트 콘크리트(Prestressed Concrete ; 이하 PSC) 기술의 발전은 구조적 효율성을 획기적으로 증대시켜 구조물의 형상에 큰 변화를 가져왔다. PSC 기술은 장대 교량의 외관을 날렵하고 수려하게 변모시켰으며, 대공간 구조물 즉, 셸(shell)이나 절판(folded plate)구조 등에도 널리 응용되고 있다. 한편 원자력 발전소 격납건물이나 유체 저장 탱크 등에도 성공적으로 적용되어 구조적 저항성 및 안전성을 극대화하였다.

구조물의 해석시에 오늘날 가장 널리 쓰이고 있는 방법은 유한요소법(Finite Element Method ; FEM)이다. PSC 구조물의 유한요소해석시 프리스트레싱 텐던의 모델링은 구조거동을 올바르게 예측하기 위해 필요한 핵심적인 사항이라고 볼 수 있다. 따라서, 텐던의 모델링 기법은 많은 연구자들의 관심을 끌어왔던 분야이며, 현재 많은 범용 구조해석 프로그램에서도 방법의 차이는 있지만 텐던을 고려할 수 있도록 하고 있다.

PSC 구조물의 해석과 관련하여 수많은 주제가 논의될 수 있겠지만, 본고에서는 RC 구조물의 해석과 가장 차별화 될 수 있는 사항으로서 유한요소해석의 범주 안에서 프리스트레싱 텐던을 모델링하는 방법에 대해 고찰해 보고자 한다. 본고의 성격상 가급적 복잡한 수식은 배제하고, 모델링 개념의 비교 및 장단점 분석에 중점을 두었다.

2. 프리스트레싱 텐던의 모델링 기법

2.1 모델링 방법의 비교분석

〈표 1〉에는 유한요소해석시 국내외의 기존 연구자들이나 범용 구조해석 프로그램에서 채택한 텐던의 모델링 방법이 비교되어 있다. 다만, 텐던 강성의 고려에 있어 2.4절에서 설명할 discrete 모델은 텐던을 위한 특별한 모델링 방법이라기보다는 통상적인 유한요소를 활용한 것이므로 〈표 1〉에 따로 표시하지 않았다.

〈표 1〉의 각 항목에 대해서는 2.2 ~ 2.5절에서 따로 좀 더 자세히 다루었다.

2.2 곡선 텐던의 형상

〈표 1〉을 참조하면 한 모요소(텐던이 묻혀 있는 콘크리트 요소 : host element 또는 mother element)내의 곡선 텐던 세그먼트의 형상을 다루는 방법에는 크게 2가지가 있다. 첫째, 보간(interpolation) 또는 기타 수학적식을 통하여 곡선 텐던의 형상을 실제에 가깝게 유지하려는 접근법이 있으며, 둘째, 곡선 형상을 직선이나 층으로 근사화할 수도 있다.

〈그림 1〉을 참조하면 직선 근사화의 영향을 뒤에서 다룰 등가하중법의 관점에서 분석해 볼 수 있다. 즉, 곡선 텐던을 직선들의 조합으로 보는 것은 곡선 텐던의 곡률을 따라 실제로 콘크리트에 작용하고 있는 분포된 등가하중을 근사화된 텐던이 꺾이는 점들에 작용하는 일련의 집중하중들로 치환한 효과를 나타내게

* 정회원, 대우건설기술연구소 선임연구원

** 정회원, 수원대학교 토목공학과 교수

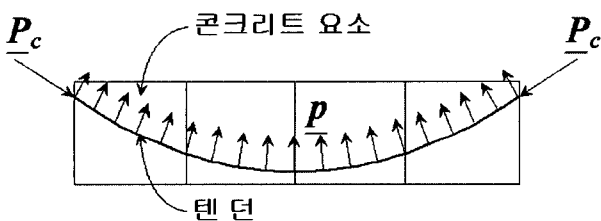
표 1. 유한요소해석에서 텐던의 모델링

	모요소 내의 곡선 텐던 형상	프리스트레싱의 효과	텐던 강성의 고려	모요소 (콘크리트 요소)	자동 생성	비고
Kang ¹⁾	선형화	등가하중	smeard 모델	2차원 보요소	미사용	
Jirousek 외 ²⁾	보간 곡선	등가하중	무시	사각형 셀요소	미사용	
Greunen 외 ³⁾	선형화	등가하중	smeard 모델	삼각형 셀요소	미사용	
Hofstetter 외 ⁴⁾	엄밀한 곡선	등가하중	무시	삼각형 셀요소	사 용	
Kang ⁵⁾	선형화	등가하중	smeard 모델	2차원 보요소	사 용	
Roca 외 ^{6,7)}	보간 곡선	등가하중 초기응력	embedded 모델	사각형 셀요소	사 용	
Figueiras 외 ⁸⁾	보간 곡선	초기응력	embedded 모델	사각형 셀요소	사 용	
Sprenger 외 ⁹⁾	선형화	등가하중	embedded 모델	입체요소	사 용	
Wu 외 ¹⁰⁾	엄밀한 곡선	초기응력	embedded 모델	평면응력요소	미사용	
이상진 ¹¹⁾	층상화	초기응력	smeard 모델	사각형 셀요소	미사용	
김태훈 외 ¹²⁾	층상화	초기응력	smeard 모델	사각형 셀요소	사 용	
Oh 외 ^{13,14)}	보간 곡선	등가하중	무시	사각형 셀요소	사 용	
ABAQUS ¹⁵⁾	선형화	초기응력	embedded 모델 smeard 모델	모든 요소	미사용	상용 프로그램
DIANA ¹⁶⁾	선형화	초기응력	embedded 모델 smeard 모델	모든 요소	사 용	상용 프로그램
MIDAS ¹⁷⁾	선형화	등가하중	등가의 콘크리트	보요소	사 용	상용 프로그램
SAP2000 ¹⁸⁾	포물선화	등가하중	무시	보요소	미사용	상용 프로그램

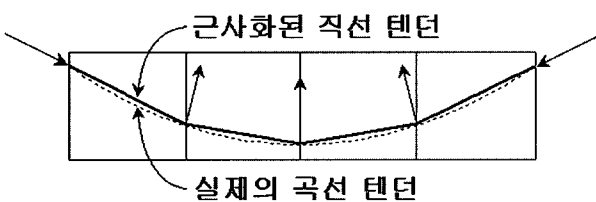
된다. 이때 직선 근사시의 단점으로 주의할 점은 콘크리트 모요소들의 유한요소 메시(mesh)가 조밀하지 않을 경우 텐던 형상 근사화에 따른 오차가 커질 수도 있다는 점이다. 한 예로서 <그림 1(b)>에서 콘크리트를 보요소로 가정한다면 실제로는 곡선 텐던에 의해 곡선 형상의 휨모멘트도가 산출되지만, 근사화된 직선 텐던은 꺾인 형상의 휨모멘트도를 산출하게 된다.

2.3 프리스트레싱의 효과

콘크리트 구조물의 유한요소 모델링에 있어 철근과 프리스트레



(a) 원래의 곡선 텐던 및 등가하중



(b) 근사화된 직선 텐던 및 등가하중

그림 1. 곡선 텐던의 직선 근사화

싱 텐던의 가장 큰 차이점은 텐던에는 프리스트레싱 효과가 도입되어야 한다는 점이다. <표 1>을 참조하면 프리스트레싱을 도입하는 방법은 크게 2가지, 즉, 초기응력법(initial stress method)과 등가하중법(equivalent load method)이 있다.

2.3.1 초기응력법

유한요소 정식화 과정 중 초기응력은 기타 외력과 같이 유한요소 절점에 작용하는 등가절점하중을 산출하게 된다¹⁹⁾. 초기응력법의 핵심적인 사항만을 간략히 소개하면 다음과 같다. 한 개의 콘크리트 요소에 묻혀 있는 한 개의 텐던 세그먼트를 예로 들기로 한다. 단면적 A_p 의 텐던 세그먼트에 프리스트레스 σ_p 가 도입될 때 그 콘크리트 요소에 발생하는 등가절점하중 벡터 P_p 는 다음과 같다.

$$P_p = A_p \int_{l_p} B_p^T \sigma_p dl \quad (1)$$

위의 적분은 텐던 세그먼트의 길이 l_p 를 따라 행해진다. 텐던 세그먼트의 형상은 2.2절의 설명과 같이 원래대로의 곡선 형상을 유지할 수도 있으며, 수식 전개의 편의상 직선으로 근사화할 수도 있다. 한편, 위에서 텐던의 변형률-변위 변환 행렬 B_p 는 텐던의 축방향 변형률 ϵ_p 의 유도로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon_p = B_p d \quad (2)$$

여기에서 d 는 변위(자유도) 벡터이며, 2.4절의 설명에서와

같이 d 의 변위는 텐던의 변위가 될 수도 있으며(discrete 모델), 또는 콘크리트 요소의 변위가 될 수도 있다(embedded 모델). 텐던에 초기응력(프리스트레스)을 주는 대신 초기변형률(프리스트레인)을 주어도 동등한 결과를 산출한다. 한편, 초기응력이나 초기변형률을 고려할 수는 없지만 온도는 고려할 수 있는 프로그램의 경우 다음과 같이 원하는 프리스트레스를 발생시키는 온도차 ΔT 를 주는 방식도 가능하다. 여기에서 E_p 는 텐던의 탄성계수, α_p 는 텐던의 열팽창계수이다.

$$\sigma_p = E_p \alpha_p \Delta T \quad (3)$$

2.3.2 등가하중법

등가하중법은 프리스트레싱 텐던에 의해 콘크리트에 작용하는 하중을 외력처럼 다루는 방법이며, 초기응력법과 비교할 때 텐던에 의해 구조물에 작용하는 힘의 분포를 한눈에 명확히 파악할 수 있는 장점이 있다. <그림 1(a)>를 참조할 때 등가하중은 크게 2가지로 나눌 수 있다. 첫째, 텐던의 곡률을 따라 발생하는 등가 분포하중 (p), 둘째, 텐던이 꺾인 곳이나 텐던의 끝(정착부)에서 발생하는 등가집중하중 (P_c)이다. 등가분포하중은 텐던 축에 직각방향으로 작용하며, <그림 2>와 같은 텐던 미소요소의 힘의 평형으로부터 그 크기가 $p_n = P/R$ 로 유도된다. 여기에서 P 는 프리스트레싱 힘, R 은 곡률 반경이다. 일반적인 곡선 텐던의 경우 곡률 반경은 텐던축을 따라 변한다. <그림 2>는 텐던에 작용하는 하중 입장에서 표현한 것이며, 콘크리트에 작용하는 하중은 <그림 2>의 하중과 크기는 같고 방향은 반대가 된다. 한편 등가 집중하중은 텐던이 꺾인 곳의 경우 힘의 평형에서 구할 수 있고, 텐던의 끝의 경우 프리스트레싱 힘만큼 접선방향으로 작용하는 것으로 보면 된다. 이렇게 구한 등가하중들은 일반적인 외력을 등가절점하중으로 바꾸는 통상적인 유한요소 정식화 절차에 따라 등가절점하중으로 변환할 수 있다.

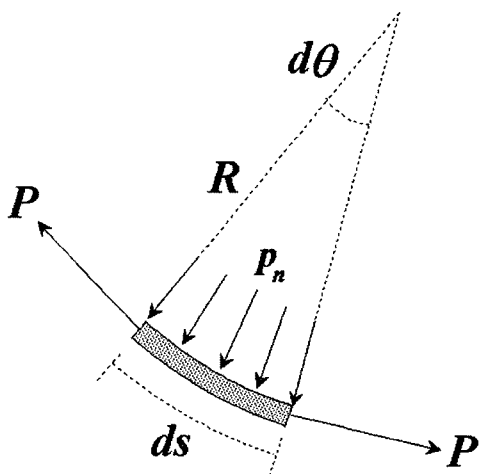


그림 2. 텐던 미소요소의 자유물체도

2.4 텐던 강성의 고려

강성에 대한 고려에서 텐던과 철근은 큰 차이가 없으므로 이하의 설명은 철근의 유한요소해석에도 동일하게 적용될 수 있다. 보통 부착된 텐던의 강성은 콘크리트 요소만으로 산정한 강성에 추가적으로 더해지는 것이 일반적이지만, 연구자에 따라서는 좀 더 정밀성을 추구하여 텐던이 차지하고 있는 부피 만큼 콘크리트 요소의 강성에서 빼 주기도 한다⁹⁾. 콘크리트 요소가 보요소일 경우 탄성계수의 차이를 이용해 텐던을 등가의 콘크리트로 환산하여 콘크리트 요소의 단면상수에 포함시킬 수도 있다¹⁷⁾. 한편 포스트텐서닝의 경우 시공단계를 엄밀히 고려한다면 비록 부착 텐던이라 하더라도 긴장되어 정착되기 이전에는 그라우팅을 통해 텐던과 쉬스가 부착되지 않았으므로, 덕트의 단면적 만큼 콘크리트의 강성에서 제외하는 것이 바람직하다.¹⁷⁾

텐던을 개별적으로 모델링하고 2.3절의 초기응력법을 적용할 경우에는 텐던의 B_p 를 이용하여 식 (4)에 의해 텐던의 강성을 산정할 수 있다. 한편 등가하중법의 경우 프리스트레싱의 영향에 의한 등가절점하중을 산정하는데 있어서는 B_p 가 필요하지 않지만, 텐던의 강성을 고려하기 위해서는 결국 B_p 를 따로 산정하여야 하는 번거로움이 수반된다.

$$K_p = \int_{l_e} B_p^T E_p B_p A_p dl \quad (4)$$

식 (2)에서의 설명과 일맥상통하지만, 식 (4)에서 K_p 가 텐던의 변위에 대해 유도되었으면 discrete 모델, 콘크리트 요소의 변위에 대해 유도되었으면 embedded 모델로 볼 수 있다.

좀 더 방법을 세분화하여 텐던의 강성을 고려하는 기법에 대해 서술하면 다음과 같다. 이 중 discrete 모델이나 embedded 모델은 개별적인 텐던의 형상을 모델링할 수 있으므로 텐던의 기하적인 형상 면에서 smeared 모델보다 우수하다. <그림 3>

2.4.1 Discrete 모델

Discrete 모델에서는 텐던을 요소(보통 트러스요소 또는 보요소)처럼 고려하며 텐던에 대한 특별한 고려사항이 없는 프로그램에서도 쉽게 응용 가능한 방법이다. 이때 텐던 요소는 자체적으로 절점을 가지고 있으므로 어떠한 방식으로든 콘크리트 요소 절점과의 연결이 필요하게 된다.

가장 고전적이면서도 알기 쉬운 방법은 콘크리트 요소와 텐던 요소의 절점을 일치시키는 것이다. 하지만, 이를 위해서는 텐던의 기하 형상에 맞추어 콘크리트 요소의 메시를 조정해야 하는 번거로움이 수반되며 특히 대규모 콘크리트 구조물의 경우 수많은 텐던을 엄밀히 고려하기 위해서는 콘크리트 메시를 필요 이상으로 너무 조밀하게 구성해야 되므로 해석 효율면에서 불리하다.

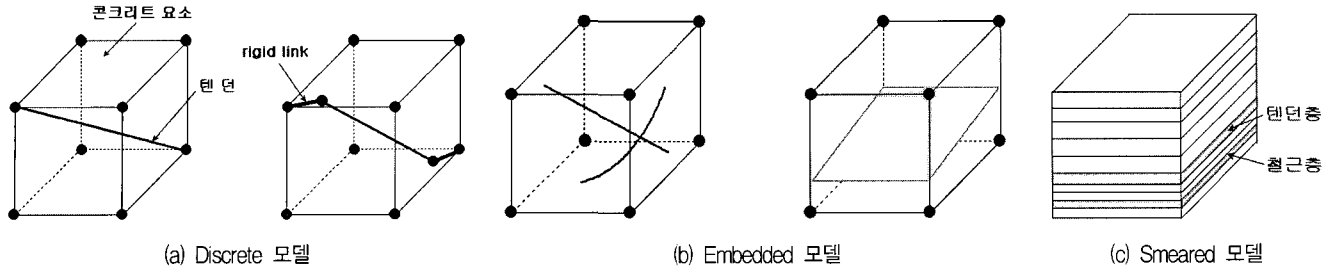


그림 3. 텐던 강성의 모델링 방법

만약 텐던과 콘크리트의 절점을 일치시키지 않고자 한다면, 텐던 절점과 주변 콘크리트 절점을 묶어주는 장치가 필요하다. 부착 텐던의 경우 강성이 큰 연결요소(rigid link)를 사용하거나 또는 프로그램상에서 가능할 경우 두 절점의 변위가 같다는 제한 조건을 적용시키는 방식도 가능하다. 비부착 텐던의 경우 텐던과 주변 쉬스와의 마찰을 고려하여 적절한 물성을 가진 스프링 요소로 텐던 절점과 콘크리트 절점을 연결하는 방식도 빈번히 쓰인다. 하지만 이 경우에도 역시 서로 관련되는 텐던 절점과 콘크리트 절점이 어느 정도 가까이 위치해야 해석의 정확도가 향상되므로 콘크리트 메시 구성에 어려움이 있으며, 일일이 관련되는 절점들을 묶어주는 작업도 상당한 어려움을 수반한다.

또 다른 방법으로서 요소의 변에 추가 절점이 있는 콘크리트 요소의 경우 메시에 상관없이 텐던 형상을 정의하면, 변에 위치한 절점을 텐던과 만나는 점으로 자동적으로 이동시켜 절점을 일치시키는 방식을 제안한 연구자도 있다.²⁰⁾

2.4.2 Embedded 모델

Embedded 모델은 개별 텐던 및 분포되어 배치된 텐던에 모두 사용가능한 방법이며, 텐던의 변위가 콘크리트 요소의 변위로 나타내어진다는 것이 핵심적인 사항이다. 이를 위하여 텐던의 축방향 변형률을 콘크리트 요소 변위의 미분값들의 관계로 나타내는 과정이 필요하다. 따라서 텐던축의 좌표계와 콘크리트 요소 좌표계(또는 전체 좌표계) 간의 좌표변환이 수행되어야 한다⁸⁾. 비록 수식의 유도과정이 다소 복잡하지만, 전체 콘크리트 구조물의 자유도가 텐던에 의해 더 이상 증가하지 않으므로 연립방정식을 풀 때 소요되는 시간의 증가를 최소화 할 수 있다는 장점이 있다. 또 한가지의 큰 장점은 텐던들의 배치 형상에 관계없이 자유롭게 콘크리트 메시지를 구성할 수 있다는 점이며 이는 유한요소 모델링시 해석자에게 큰 편의를 제공한다.

일반적으로 embedded 모델의 큰 애로점은 콘크리트 요소내에 위치한 텐던 세그먼트의 기하적인 형상을 콘크리트 요소마다 일일이 지정해 주어야 한다는 점인데, 이에 대한 해결책으로 2.5절에서 설명할 자동 생성 기법도 유력하지만 최근에는 discrete 모델과 embedded 모델을 혼합한 형태도 사용되고 있다¹⁵⁾. 즉, discrete 모델의 장점을 활용하여 텐던 기하 형상을 편리하게 정

의하고 임의로 분할한다. 그리고 콘크리트 요소의 메시 내에 텐던을 위치시키면 일반적으로 텐던 절점과 콘크리트 절점은 일치하지 않게 되는데, 텐던 절점 변위와 그 텐던 절점이 속한 콘크리트 요소의 절점 변위들을 프로그램 내에서 거리 비례 등을 이용하여 자동적으로 관련짓게 된다. 결과적으로 텐던 절점에 의해서 더 이상 자유도의 증가는 없으므로 해석 효율이 뛰어난 embedded 모델의 형태를 띠게 되는 것이다. 추가적인 장점으로 텐던 절점의 변위도 discrete 모델을 사용한 경우와 같이 산출된다. <그림 4>는 원자력 발전소 격납건물의 해석에 이러한 기법을 활용한 예로서, <그림 4(a)>에서 텐던을 discrete 모델로 모델링한 후 <그림 4(b)>와 같은 콘크리트 요소에 묻어서 embedded 모델처럼 다루었다.

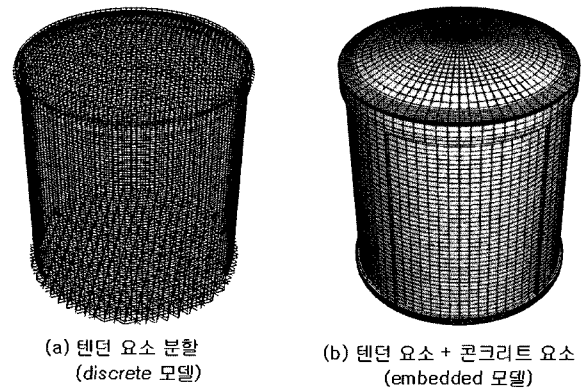


그림 4. Discrete 모델과 embedded 모델의 혼합 기법

2.4.3 Smeared 모델

보요소나 셸요소의 경우 층상화(layered) 모델을 사용하는 경우가 있다. Smeared 모델은 그러한 층들 중 철근이나 텐던 위치에 해당하는 층을 철근층 또는 텐던층으로 정의하는 방식이다. 일반적으로 철근은 텐던에 비해 더욱 밀집하여 배치되므로 모든 철근을 개별 철근으로 다룰 경우 입력파일 작성이 번거로워지고 계산 효율성이 현저히 떨어진다. 따라서 철근은 embedded 모델 중 분포된 층이나 또는 smeared 모델로 근사화하는 경우가 많다. 그러나 곡선 텐던의 경우 이를 smeared 모델에 의해 콘크리트 요소마다 한 개의 층으로 표현할 경우 기하 형상의 근사화가

심하게 되는 단점이 있으므로 충분히 세분화된 콘크리트 메시가 아니라면 권장하지 않기도 한다.^{20,21)}

2.5 자동 생성

〈표 1〉과 같이 다양한 콘크리트 요소에 다양한 텐던 모델링이 적용되어 왔지만, 콘크리트 요소 내에 텐던 세그먼트를 올바르게 위치시키는 것은 PSC 구조물 해석을 위한 가장 기본적인 사항이다. 이를 위해 Embedded 모델의 경우 텐던에 관련된 입력 자료 작성시 각 텐던이 지나는 콘크리트 요소, 텐던과 콘크리트 요소들이 만나는 점 등을 정의해야 한다. 그러나 곡면 셸(shell)요소나 입체(solid)요소를 사용하여 복잡한 형상의 콘크리트 구조물을 모델링할 경우 텐던과 콘크리트 요소들의 교차점을 일일이 수계산으로 찾아서 입력하는 것은 매우 번거로운 일이며 오류가 발생할 여지도 크다. 이에 대한 해결책으로 매우 유용한 방법이 텐던의 전체 형상만 정의하면 해석시 필요한 텐던 관련 자료들을 자동적으로 생성하는 자동 생성 기법이다¹³⁾.

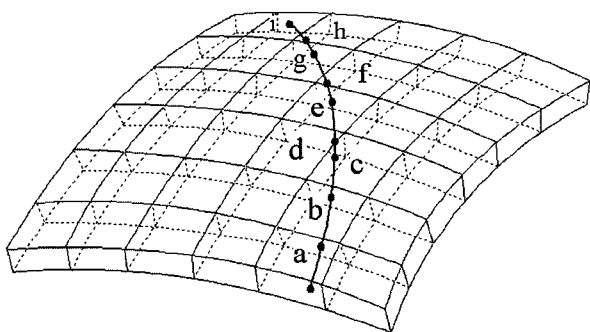


그림 5. 텐던 입력 자료의 자동 생성

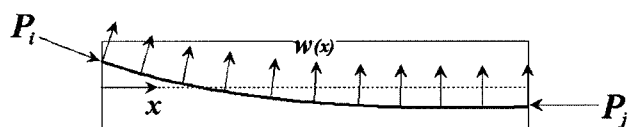
〈그림 5〉는 이러한 자동 생성 기법을 곡면 셸요소에 적용한 예로서 곡선 텐던의 전체 형상을 보간식이나 수학적식으로 정의하면 텐던이 지나는 콘크리트 요소(알파벳으로 표시) 및 텐던과 콘크리트 요소 면과의 교차점(점으로 표시)을 소정의 알고리즘을 통하여 자동으로 찾게 된다. 프로그램마다 PSC 구조물의 해석 방식에 차이가 있지만 실제 다수의 텐던이 배치된 대규모의 복잡한 구조물에 대한 적용성을 평가하는 것은 세부적인 텐던 모델링 차이보다도 자동 생성 기능 등 해석 편의성의 제공에 의존하는 경우도 많다.

3. 등가하중법의 응용

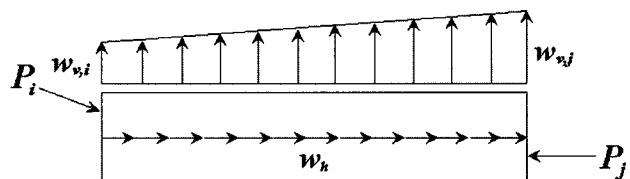
2.3절에서 언급한 등가하중법은 텐던의 유한요소 정식화 방법의 하나로서도 중요하지만, PSC 부재의 실용적인 설계 및 해석에 있어서도 유력한 방법이 될 수 있다. 등가하중의 크기 및 분포는 텐던의 형상에만 의존할 뿐 텐던이 배치된 구조물의 형상에

는 의존하지 않는다. 즉, 등가하중법은 정정, 부정정 여부에 관계없이 보 구조, 골조 구조, 슬래브 구조, 셸 구조 등에 다양하게 응용될 수 있다. 등가하중법을 적용함에 있어 가장 정확한 방법은 〈그림 1(a)〉 및 2.3절에서 구한 등가하중들을 그 크기 및 방향, 그리고 텐던축을 따른 위치를 변형시키지 않고 그대로 해석하는 것이다. 유한요소해석시에는 이러한 과정이 큰 어려움을 유발하지는 않지만, 실용적인 수계산에 있어서는 이처럼 엄밀한 해석을 수행하는 것이 매우 어렵다. 따라서, 해석을 매우 용이하게 할 수 있는 근사화된 등가하중법들이 다수 제안되었다²²⁾. 몇몇 구조해석 프로그램들은 엄밀한 등가하중이 아닌 이처럼 근사화된 등가하중 시스템에 근거하고 있다^{1,3,5,9,17,18)}. 근사화된 등가하중법에는 각 시스템마다 많은 흥미로운 이론적인 배경들이 있지만, 그 중에서 한가지만을 소개하자면 텐던의 자체평형(self-equilibrium)의 성질을 이용한 방식이 있다^{17,23)}. 즉, 한 텐던에 작용하고 있는 등가분포하중 및 등가집중하중들은 자체적으로 평형을 이루어야 하는 성질이 있으므로 이를 역으로 응용하여 등가집중하중으로부터 근사화된 등가분포하중을 추정하는 것이다.

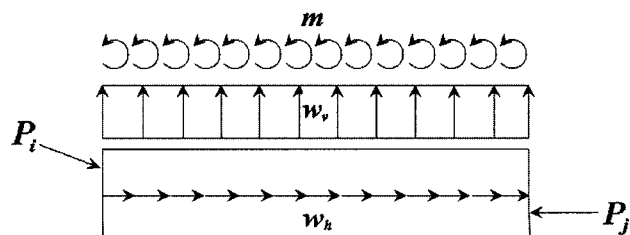
〈그림 6(a)〉에서 원래의 등가분포하중 $w(x)$ 는 부재축 x 를 따라 그 크기와 작용방향이 변하는 하중이며, 〈그림 6(b)〉 및 〈그림 6(c)〉는 근사화된 등가하중 시스템의 예이다. 〈그림 6(b)〉 및 〈그림 6(c)〉에서 w_h 는 수평방향의 힘의 평형에서 구할 수 있으며, 〈그림 6(b)〉의 $w_{v,i}$ 및 $w_{v,j}$, 그리고 〈그림 6(c)〉의 w_v 및 m 은 수직방향 힘의 평형 및 모멘트의 평형으로부터 구



(a) 원래의 등가하중



(b) 근사화된 경우 1



(c) 근사화된 경우 2

그림 6. 여러 가지 등가하중 시스템

할 수 있다. 여기에서, 프리스트레싱 힘 P_i 및 P_j 는 프리스트레스의 손실 등에 의해 서로 다른 값을 가질 수 있다.

4. 기타 고려사항

4.1 비부착 텐던의 모델링

앞서 제시했던 수식들은 주로 부착(bonded) 텐던에 적용되는 사항으로서 이 경우 콘크리트 모요소와 텐던의 변위장이 일치한다는 성질을 이용하여 비교적 용이하게 수식을 유도할 수 있다. 그러나 비부착(unbonded) 텐던의 경우 이러한 조건이 더 이상 유효하지 않으므로 강성의 유도나 텐던 응력의 변화에 대한 적절한 이론을 도출하는 것이 부착 텐던보다 더 어렵다. 범용 구조해석 프로그램에서는 discrete 모델을 쓰지 않는 한 비부착 텐던을 별도로 고려할 수 없는 경우도 많다.

비록 비부착 텐던은 정착부 위치의 구속이나 쉬스와의 마찰에 의해 전체 구조물 강성에 어느정도는 기여하지만 그 크기는 부착 텐던에 비해 작은 경우가 많다. 연구자에 따라 강성을 아예 무시하거나^{1,8)} 부착 텐던과 같은 강성으로 고려하기도 하며⁶⁾, 또는 부착 텐던의 강성에 적절한 감소계수를 곱하여 사용하기도 한다⁶⁾. 마찰 작용에 대한 좀 더 정밀한 모델링을 추구하는 경우 콘크리트와 텐던 사이에 스프링을 사용하는 방식도 있다.^{10,20,24)}

4.2 프리스트레싱 단계별 해석의 중요성

PSC 구조물 시공시 단계별로 나누어 프리스트레싱을 실시하는 경우가 많으며, 이때 시공단계별 해석을 엄밀히 실시해야 실제적인 구조거동을 예측할 수 있음은 주지의 사실이다. PSC 교량의 경우에는 단계별 해석의 중요성이 어느 정도는 인식되어 있다고 판단된다. 그러나, 아직도 기존 설계 자료를 검토해 보면 단계별로 프리스트레싱을 가했음에도 불구하고 전체 완성계 구조물에 전체 프리스트레싱에 의한 하중을 가하는 경우도 빈번히 발견된다. 이는 실제의 엄밀한 시공단계별 해석과의 차이가 비교적 작을 때 허용될 수 있는 실용적인 근사해석이라는 점을 명확히 해야 한다. 요소의 생성이나 소멸 등 시공단계별 해석을 고려할 수 있는 프로그램의 경우 비교적 손쉽게 해석을 수행할 수 있지만, 그렇지 않은 경우 선형해석의 가정하에 각 시공단계에 해당 하는 해석들을 수행하여 결과를 중첩해야 할 수도 있다.

한 예로서 LNG 저장탱크 벽체의 기존 시공 사례들을 살펴보면 프리스트레싱을 포함한 시공 순서에 차이가 나타나는데, 그러한 차이가 발생시키는 단면력의 변화에 대해 간략히 비교 고찰해 보고자 한다. 해석에는 축대칭 쉘요소를 사용했으며, 벽체의 원 환방향 텐던에 의한 영향을 등가하중으로 처리하였다. <그림 7(a)>의 시공방식 A는 바닥판, 벽체, 링빔, 지붕을 모두 시공하고 벽체 원환방향 텐던을 긴장하는 방식이다. 한편, <그림 7(b)>

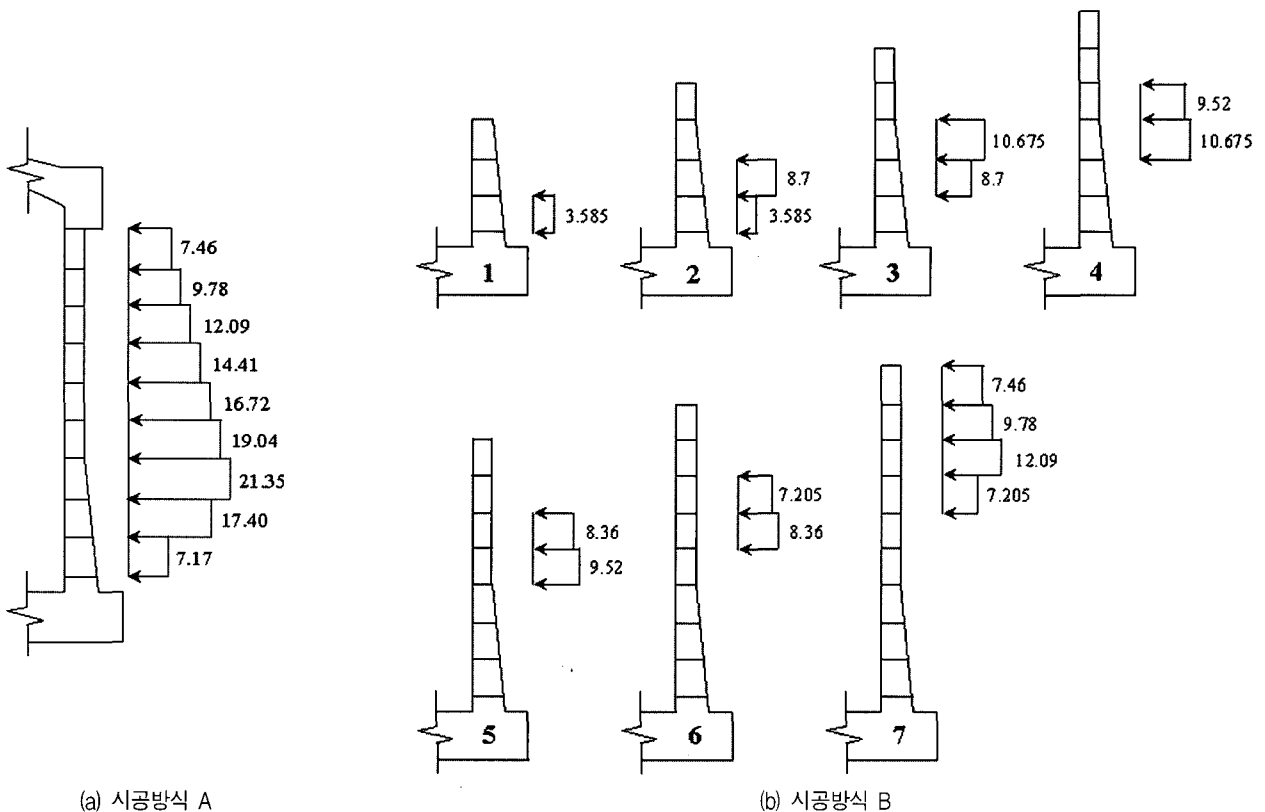


그림 7. LNG 저장탱크 벽체 프리스트레싱의 시공단계별 해석(단위 : t/m²)

의 시공방식 B는 벽체를 단계별로 시공하면서 동시에 프리스트레싱을 수행하는 방식으로 프리스트레싱에 의한 하중의 총합은 시공방식 A와 같다. <그림 8>은 각 시공방식에 따른 벽체의 수직 방향 모멘트 분포를 보여주고 있으며, 일부 부위에서 차이가 나타나고 있다. 이처럼 엄밀한 단면력을 구하기 위해서는 각 시공의 프리스트레싱 단계를 올바르게 고려해야 한다.

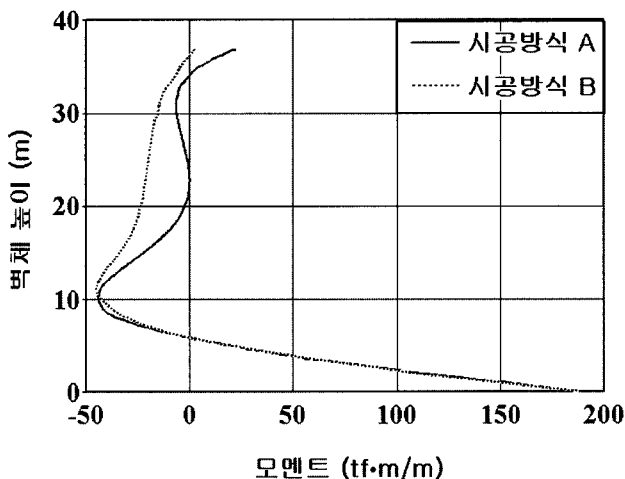


그림 8. 시공방식에 따른 벽체의 모멘트

4.3 프리스트레싱의 손실의 모델링

<표 1>에 소개된 많은 해석 프로그램들이나 연구자들이 프리스트레싱의 단기 및 장기 손실을 고려하고 있다. 하지만 일부 프로그램에서는 그러한 손실이 자동적으로 고려되지 못하므로, 별도로 손실을 계산하여 프리스트레싱의 분포를 구하고 그 값을 텐던 부위별로 구분하여 입력해야 하는 경우도 있다.

한가지 언급하고 싶은 바는 프리스트레싱의 손실 중에서도 탄성변형으로 인한 손실이 해석자가 의도하지 않게 발생할 수도 있으므로 주의해야 한다는 점이다. 예를 들면 2.3절의 초기응력법으로 텐던을 모델링한 경우, 텐던의 초기응력에 의해 텐던과 콘크리트 구조물이 함께 변형하고 평형상태를 찾아가는 과정에서 콘크리트 구조물에 프리스트레싱이 도입되게 된다. 그런데 이 과정에서 텐던의 길이가 변형에 의해 어느정도 축소되어 애초에 가했던 초기응력(프리스트레싱)이 약간 줄어드는 결과가 나올 수 있다. 이처럼 해석 프로그램 상에서 탄성변형에 의한 손실이 자동적으로 고려될 경우 이를 별도로 계산하여 입력하면 손실이 중복되어 고려되는 것이므로 주의해야 한다.

때로는 탄성변형에 의한 손실을 배제해야 하는 경우도 있다. 예를 들면, 포스트텐셔닝에서 텐던들을 일시에 긴장하는 경우이다. 초기응력법을 사용하고 있는 몇몇 프로그램들은 이러한 모델링을 위해 텐던에 가한 초기응력이 일정하게 유지되면서 평형상태를 찾아가도록 하는 옵션을 가지고 있으므로 필요시 활용토록 한다.

5. 맺음말

PSC 구조물의 유한요소해석시 프리스트레싱 텐던의 모델링은 구조거동을 올바르게 예측하기 위해 필요한 핵심적인 사항이라고 볼 수 있다. 본고에서는 텐던 형상의 모델링, 프리스트레싱의 구현 방법, 텐던 강성의 평가 등 프리스트레싱 텐던의 모델링 방법에 중점을 두어 각 방법을 비교 고찰하고 장단점에 대해 언급하였다.

범용 구조해석 프로그램의 텐던 모델링 기능도 크게 발전하고 사용이 용이해져 프로그램에 내재된 이론에 대해 깊은 지식을 가지고 있지 않더라도 다양한 PSC 구조물의 해석을 수행할 수 있게 되었다. 하지만 대규모 PSC 구조물의 정밀 해석을 위해 텐던이나 철근을 모델링하는 것은 많은 시간을 요하는 작업이며, 특히 곡선 형상을 갖는 텐던의 경우 기하 형상에 대한 올바른 입력 자료를 작성하는 데 더욱 주의를 요한다. 앞서 살펴보았듯 각 프로그램에서 채택하고 있는 텐던의 모델링 방식에는 차이가 있으며, 또한 텐던 관련 자료의 자동 생성 기능 등 모델링 시의 용이성 면에서도 차이가 있다. 텐던과 관련하여 프로그램이 제공하는 다양한 기능들 중 해석 목적에 최적으로 부합하면서도 용이하게 모델링할 수 있는 방법을 찾고자 하는 노력이 필요하다 생각된다. 이에 부가하여 사용하고 있는 프로그램 상에서 어떠한 방식으로 텐던이 모델링되고 있는지 파악하고 있으면 해석결과와의 검증 시 큰 도움이 될 수 있을 것이다. □

참고문헌

1. Kang, Y. J., "Nonlinear Geometric, Material and Time Dependent Analysis of Reinforced and Prestressed Concrete Frames," PhD dissertation, UC-SESM Report No.77-1, University of California, Berkeley, 1977.
2. Jirousek, J., Bouberguig, A., and Saygun, A., "A Macro-element Analysis of Prestressed Curved Box-girder Bridges," Computers and Structures, Vol.10, 1979, pp. 467~482.
3. Greunen, J. V. and Scordelis A. C., "Nonlinear Analysis of Prestressed Concrete Slabs," Journal of Structural Engineering, Vol.109, No.7, 1983, pp.1742~1760.
4. Hofstetter, G. and Mang, H. A., "Work-equivalent Node Forces from Prestress of Concrete Shells," Finite Element Methods for Plate and Shell Structures, Hughes, T. J. R. and Hinton, E., Ed., Pineridge Press, Swansea, 1986, pp.312~347.
5. Kang, Y. J., "SPCFRAME-Computer Program for Non-linear Segmental Analysis of Planar Prestressed Concrete Frames," UCB/SEMM-89/07, University of California, Berkeley, 1989.
6. Roca, P. and Mari, A. R., "Numerical Treatment of

Prestressing Tendons in the Nonlinear Analysis of Prestressed Concrete Structures," Computers & Structures, Vol.46, No.5, 1993, pp.905~916.

7. Roca, P. and Mari, A. R., "Nonlinear Geometric and Material Analysis of Prestressed Concrete General Shell Structures," Computers and Structures, Vol.46, No.5, 1993, pp.917~929.
8. Figueiras, J. A. and Póvoas, R. H. C. F., "Modelling of Prestress in Non-linear Analysis of Concrete Structures," Computers and Structures, Vol.53, No.1, 1994, pp.173~187.
9. Sprenger, W. and Wagner, W., "On the Formulation of Geometrically Nonlinear 3D-rebar-elements Using the Enhanced Assumed Strain Method," Engineering Structures, Vol.21, 1999, pp.209~218.
10. Wu, X. H., Otani, S., and Shiohara, H., "Tendon Model for Nonlinear Analysis of Prestressed Concrete Structures," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.127, No.4, 2001, pp.398~405.
11. 이상진, "격납건물 해석프로그램 NUCAS", 원전 격납건물 벽체 인장 공개실험 및 워크샵, 2001.
12. 김태훈, 김석중, 최정호, 신현목, "프리스트레스트 콘크리트 셸 구조의 비선형 유한요소해석", 대한토목학회논문집, 제22권, 제4-A호, 2002, pp.769~778.
13. Oh, B. H. and Jeon, S. J., "Advanced Automatic Generation Scheme of Prestressing Tendons for Efficient FE Analysis of PSC Shell Structures," Finite Elements in Analysis and Design, in press.
14. Oh, B. H. and Jeon, S. J., "Consistent Numerical Formulation of Eccentric Follower Loads Applied to Shell Structures. Part II: Application to the Analysis of Prestressed Concrete Shell Structures," KSCE Journal of Civil Engineering, Vol.7, No.3, 2003, pp.295~303.
15. "ABAQUS/Standard 6.3-User's Manual," Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 2002.
16. "DIANA User's Manual-Element Library," Release 7, TNO Building and Construction Research, 1998.
17. "http://www.midasuser.com/," : (주)마이다스아이티 홈페이지
18. "SAP2000-Analysis Reference," Computers and Structures, Inc., 1996.
19. Bathe, K. J., "Finite Element Procedures," Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1996.
20. El-Mezaini, N. and Çitipitioglu, E., "Finite Element Analysis of Prestressed and Reinforced Concrete Structures," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.117, No.10, 1991, pp.2851~2864.
21. Hofstetter, G. and Mang, H. A., "Computational Plasticity of Reinforced and Prestressed Concrete Structures," Computational Mechanics, Vol.17, 1996, pp.242~254.
22. 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.
23. 김우중, "프리스트레싱의 이해", 제5회 MIDAS/CIVIL 토목 구조 기술세미나, 2002.
24. Yonezawa, K. et al., "Ultimate Capacity Analysis of 1/4 PCCV Model Subjected to Internal Pressure," Nuclear Engineering and Design, Vol.212, 2002, pp.357~379.

"콘크리트진단 및 유지관리"

◆ 소개

이 책은 콘크리트구조물의 안전진단 및 유지관리에 관하여 이해하기 쉽고, 현장적용에 도움이 되도록 노력했으며, 이는 관련 분야에 종사하고 있는 실무기술자들의 참고서로 뿐만 아니라 관련자격시험 등에 필요한 필독서로도 유용할 것이다.

· 제 목 : 콘크리트진단 및 유지관리

· 저 자 : 한국콘크리트학회 편

· 출판일 : 2003년 4월

· 정 가 : 25,000원

· 출판사 : 기문당

· 페이지 : 578쪽

· ISBN : 89-7086-490-3

콘크리트진단 및 유지관리

한국콘크리트학회 편

한국콘크리트학회