비부착 포스트텐션 바닥 시스템의 설계 및 시공에 관한 특성과 적용사례

- Unbonded Post-Tensioning Floor System Technology -

정광량*
Chung, Kwang Ryang

1. 개 요

포스트텐션(post-tensioning)공법은 최근에 급격한 성장세를 보이고 있는 비교적 신기술 신공법이라 할 수 있다. 처음 포스트텐션 공법을 사용한 예는 1949 ~ 1950년 미국 필라델피아 Walnut Lane Bridge 이며, 1960년 캘리포니아를 시작으로 교량의 박스거더 등에 폭 넓게 사용되어 왔다. 건물의 비부착 포스트텐션 시스템(unbonded post-tensioning) 사례는 1950년대 리프트 슬래브(lift-slab) 공법으로 지붕 슬래브를 시공하면서 처음 사용되었다.

어느 신기술과 마찬가지로 초기 포스트텐션 시스템의 성장은 저조하였으나, 1960년 후반과 1970년대 이르러 기하급수적인 성장세를 보이면서 도약하기 시작했다. 〈그림 1.1〉에서 보는 것처럼 PTI(Post-Tensioning Institute)가 설립된 1970년대 중반 이후로 포스트텐션 시스템 생산물량이 1,000 % 이상 증가하였다. 이러한 고성장은 최근까지도 이어지고 있으며 지난 10년전 보다 역시 두 배의 성장세를 보이고 있다. 이러한 포스트텐션 시스템의 성장은 ACI 기준에도 변화를 주고 있다. 1985년 PTI는 "Specification for Unbonded Single Strand Tendons"를 처음 출간하였으며, 두 번째 판은 2000년에 출간되었다. 이와 비슷한 내용으로 2001년 ACI 기준에 채택된 포스트텐션 관련사항은 정식기준이 아닌 ACI 423.6-01로 출간되었다. 그러나 포스트텐션 시스템의 성장과 더불어 ACI는 ACI 318-02를 통하여 포스트텐션 관련 사항을 정식으로 기준에 포함시키게 되었다.[3)]

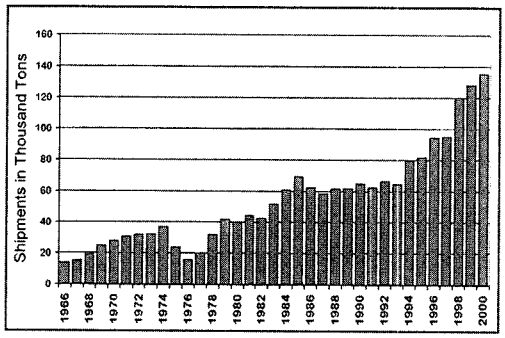


그림 1. 북미지역 포스트텐션 생산량

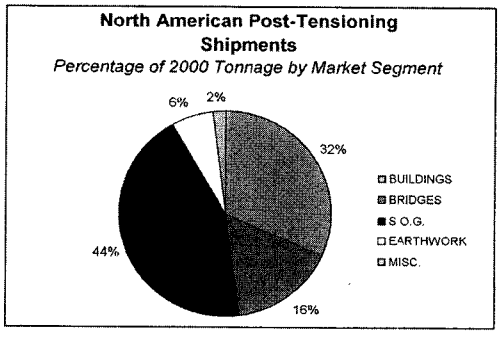


그림 1.2 용도별 포스트텐션 적용 비율

포스트텐션은 교량과 건물에 국한되어 사용된다는 일반적인 생각과는 달리 포스트텐션 시스템 개발 초기 이후 그 적용 폭을 점점 넓혀 토목 분야뿐만 아니라 건축구조물에의 상당히 다양한 영역으로까지 확대 적용되어지고 있다. 〈그림 1.2〉에서 보는 바와 같이 포스트텐션 사용의 절반 이상을 주택의 지중기초와 토목공사(프리스트레스 앵커)가 차지하고 있다. 포스트텐션 공법의 다른 적용 사례로는 오피스 건물, 콘도미니엄, 호텔, 프리스트레스 물탱크, 지반앵커, 방벽, 주차시설, 포장도로, 댐, 핵물질 저장시설, 스타디움, 사일로 등이 있다. 이처럼 포스트텐션 공법은 독립시스템으로 적극 활용될 뿐만 아니라 복합 구조 시스템에도 사용된다. 예를 들어, 포스트텐션은 다양한 구조재료 - 철근, 벽돌, 목재 등 - 의

* 정회원, (주)동양구조안전기술 대표이사

강도를 높이는데 사용되기도 하며, 또한 프리캐스트(precast concrete) 기술과 결합되어 프리텐션(pre-tension) 요소를 더 강화할 수도 있다.[3)]

2. Post-Tensioning Technology for Design

2.1 장 점

최근에는 거의 모든 구조물에서 포스트텐션을 적용하고 있음을 알 수 있다. 건물 시공에 있어 포스트텐션은 장스팬, 얇은 슬래브, 보 개수의 감소 그리고 더 세장한 구조 부재를 가능하게 한다. 슬래브 두께가 감소할수록 콘크리트 양의 감소 폭은 늘어나고 층고 절감을 통한 구조물 전체 높이를 줄이는 장점도 제공한다. 포스트텐션 구조물은 동일 층수를 가지는 일반적인 RC 구조물에 비해 구조물 중량 감소 및 층고절감 효과가 뛰어나고 이는 기초하중을 감소소켜 지진구역에 적합한 구조물이 될 수 있다. 구조물 높이의 감소는 비용 절감 및 구조 시스템의 효율성을 높일 수 있다. 포스트텐션 시스템의 다른 장점으로는 보와 슬래브의 일체성으로 이는 구조적 효율성의 향상에 크게 기여한다.

또한 포스트텐션은 평면 가변성 등이 뛰어나다는 장점이 있어 설계 유연성이나 독창성 등이 필요한 시설에 적합한 시스템이며, 지내력이 낮은 지역에서 포스트텐션이 적용된 지중 슬래브나 매트 기초는 부등 침하와 균열로 인한 문제를 제거할 수 있다. 이외에도 포스트텐션은 터널 구조물의 어스 앵커용으로도 적용될 수 있고, 지하 터파기 시 버팀벽 형성에도 사용된다. 포스트텐션 시스템은 물탱크 구조 같은 무균열 콘크리트 구조물에도 적용 가능하다.[5,8)]

2.2 개 념

〈그림 2.1〉은 외부하중이 작용하기 이전에 긴장된 고장력 철선(tendon, 긴장재)을 이용하여 콘크리트에 미리 압축응력을 도입

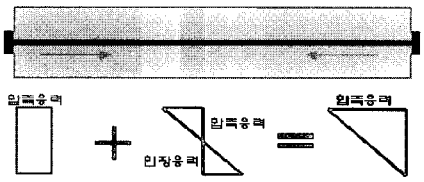


그림 2.1 포스트텐션 개념도

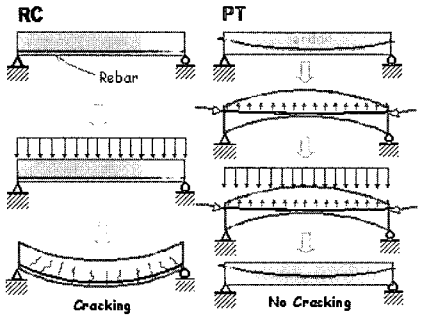


그림 2.2 RC와 포스트텐션의 비교

함으로써 외부하중 작용 후에도 콘크리트 단면 내에 인장응력이 전혀 발생하지 않고 압축응력만이 존재하게 된다. 이러한 상태에서 콘크리트 구조물의 취약점인 균열발생이 최소화되며, 처짐 또한 일반 콘크리트 구조물에 비해 적게 발생한다.

시공순서를 간단하게 살펴보면 비부착 방식(unbonded)은 고장력철선(strand, 강선)과 강선 피복제인 시스(sheath)로 구성된 긴장재(tendon)를, 부착 방식(bonded)은 다수의 철선으로 구성된 덕트(duct)를 콘크리트 내부에 매설한다. 콘크리트를 타설하고 경화된 후 콘크리트 내부에 압축응력을 도입하기 위하여 긴장장치(stressing jack)을 이용하여 긴장재에 긴장력을 부여하고 정착장치(anchor)를 이용하여 긴장재를 정착시킨다.

일반적인 RC 구조에 있어 보에 하중이 작용할 경우 보 하부의 작은 인장력만으로도 균열을 일으킬 수 있다. 철근은 이러한 균열의 폭을 줄이기 위해 인장 보강재로서 콘크리트 속에 설치된다. 보통 포스트텐션 시스템에서 철근은 콘크리트가 균열이 발생하기 전까지는 어떠한 역할도 수행하지 않는 관계로 2차 보강재라 한다. 이와 반대로 긴장재는 1차 보강재로 고려된다. 긴장재에 긴장력이 부여되기 때문에, 콘크리트가 균열을 보이기 전이라도 보강재로서 유효한 역할을 수행하게 된다. 포스트텐션 구조물은 최대 하중 작용 상태에서 최소한의 처짐과 균열을 보이도록 설계된다. 〈그림 2.2〉는 일반 RC구조와 포스트텐션 구조의 비교를 도식화 한 것이다.

2.3 슬래브밴드

등분포 바닥 슬래브에서 어떤 한 방향의 스팬이 직각 방향 보다 훨씬 길 때, 더 긴 스팬이 슬래브 두께를 지배한다. 포스트텐션 슬래브 시스템에서는 일반적으로 긴장재가 스팬이 긴 방향으로 배치되고, 긴장재의 고점과 저점사이의 높이차를 크게 설계하여 긴장재에 의한 상향력이 증가되도록 하여 긴 스팬에 따른 단점을 제거한다.

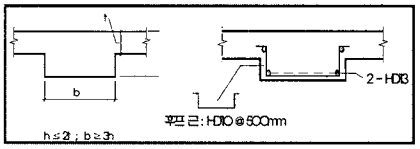


그림 2.3 슬래브밴드 기준치수와 배근상세

슬래브밴드란 〈그림 2.3〉처럼 집중배치 긴장재(banded tendons)에 피복을 제공할 목적으로 설계된 슬래브 하부의 두터워진 부분이다. 슬래브 강성을 크게 증가시키지 않으면서 2방향 거동이 유지되도록 슬래브밴드의 치수는 조절된다. 추천치는 〈그림 2.3〉에 나타나 있다. 긴 스팬 방향으로 슬래브밴드를 사용할 경우, 슬래브 두께의 기본 가정을 할 경우 스팬 대 슬래브 두께 비에서 짧은 방향의 스팬을 적용하여 산정한다. 〈그림 2.3〉의 추천치를 사용한 슬래브밴드는 밴드 사이의 순 간격 즉 짧은 스팬 방향으로는 적절한 강성을 제공하지 않는다. 또한 슬래브밴드 두께로 인한 전단응력 집중 현상은 슬래브밴드 내에 배근된 긴장재의 상향력에 의해 보완되므로 슬래브밴드 내에서는 추가적인 후프근 배근이 필요 없다. 기준에 의하면 슬래브밴드는 하중 흐름 부재가 아니라 긴장재를 보호하고 피복을 제공하기 위한 목적으로만 고려하면 된다. 따라서 〈그림 2.3〉의 배근 상세는 강성 보강용 배근 상세가 아니고 균열을 줄이기 위한 것이다.

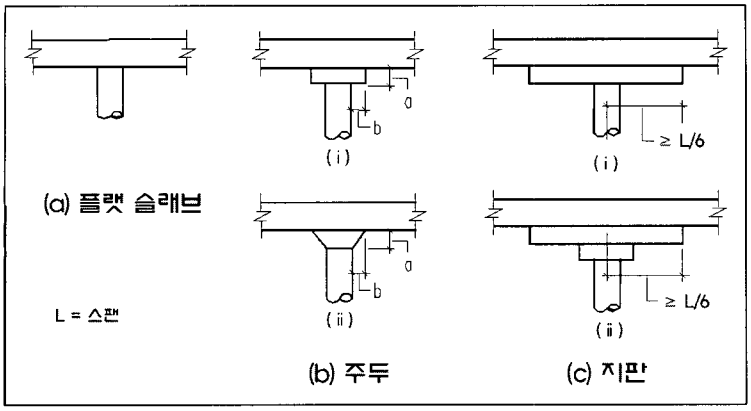


그림 2.4 기둥 및 슬래브 접합부

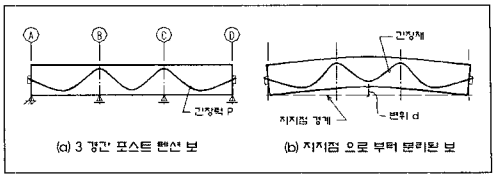


그림 2.5 포스트텐션 하중에 종속된 보

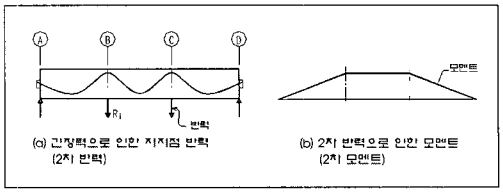


그림 2.6 2차반력과 모멘트

2.4 주두와 지판

지지점(기둥 또는 벽체)의 강도를 증가시킬 필요가 있는 경우, 〈그림 2.4〉처럼 지지점 주위의 슬래브 두께와 넓이를 두껍게 하여 국부적인 성능을 향상시킨다. 일반적으로 주두와 지판의 차이는 ACI 기준에 따라 스팬 쪽으로 확장된 너비가 스팬 길이의 1/6 이하일 경우 주두라 정의하고 1/6 이상일 경우 지판이라 한다. 일반적으로, 포스트텐션 시스템에서 기둥 주위에 주두와 지판을 사용하는 이유는 두 가지로 다음과 같다.

(1) 주두 : 기둥/슬래브 접합부에서 펀칭전단 성능 향상
(2) 지판 : 접합부 휨모멘트 능력 증가, 슬래브 처짐 감소, 펀칭전단 성능 향상

ACI-318 기준에 따른 주두나 지판의 치수 제한 및 일반적으로 사용되는 주두와 지판의 형상은 〈그림 2.4〉와 같다. 〈그림 2.4c(ii)〉처럼 기둥/슬래브 접합부는 주두와 지판이 동시에 설치될 수 있다. 다음은 ACI에서 제시하는 주두와 지판에 대한 일반적인 설계 지침이다.

(1) 처짐과 모멘트는 주두/지판의 고려 없이 슬래브 두께의 강성만을 고려하여 산정된다.
(2) 응력과 사용성 계산의 경우 실제 부재 형상에 근거하여 산정된 모멘트를 실제 단면의 응력 검토에 적용한다.
(3) 강도 산정에 있어 스팬 쪽으로 최소 L/6 거리만큼 확장된 지판의 두께가 모멘트 산정의 유효 춤이 된다.

2.5 긴장력

대부분의 포스트텐션 바닥 시스템의 해석과정에 사용되는 하중산정법은 물론이고 특히 균형재하법(balanced loading)에서 긴장력은 슬래브에 작용하는 하중으로 간주된다. 긴장력에 의한 하중은 상향력에 의해 휨을 발생시키는 요소와 슬래브 길이 방향으로 압축력을 일으키는 요소로 구분된다. 이 두 요소의 거동 결과는 독립되어 있다고 가정한다. 바닥 시스템에서 휨을 초래하는 상향력 요소는 슬래브의 모멘트와 전단력 산정에 영향을 주고 긴장력에 의한 압축응력 휨 해석으로부터 구한 휨 응력에 부과된다.

긴장력을 슬래브에 작용하는 등가하중으로 고려하는 하중산정법은 대부분의 조건에서 적절하다. 불규칙적인 조건에 따른 응력손실과 시간에 의한 영향이 지배적인 곳 그리고 교량 건설 등과 같은 경우에는 좀 더 엄격한 해석이 요구된다.[1,2,5]

2.6 2차 거동(hyperstatic actions)

2.6.1 정의

2차 거동은 부재의 구속에 따라 긴장력으로 인해 부재에서 발생한다. 긴장된 부재가 자유롭게 움직일 수 있다면 정정 구조물이나 긴장재가 설치되지 않은 부재와 마찬가지로, 2차 거동은 발생하지 않는다. 그러나 긴장된 부재의 움직임이 지지점에서 구속되는 대부분의 포스트텐션 시공에서 2차 거동은 매우 중요하고 따라서 설계시 반드시 고려되어야 한다.

2.6.2 2차 거동과 단면 강도

〈그림 2.5〉와 같이 긴장재 설치 전에 콘크리트가 타설 되고 그 후 긴장력을 부여한 3스팬 포스트텐션 보의 이론적인 경우를 살펴본다. 여기서 자중에 의한 영향력은 무시되고 긴장력은 〈그림 2.5b〉에서 보는 것처럼 보의 휨작용에 의해 캠버가 유발된다.

〈그림 2.5a〉에 나타난 것과 같이 지지점에서 보가 고정되기 위해서는 긴장재의 상향력과 반대방향으로 힘이 가해져야 한다. 이렇게 발생된 반력을 2차 거동에 의한 2차 반력이라 하며 보를 고정된 위치에 유지하기 위해 필요한 지지점의 힘이 되고 이러한 2차 반력으로 인해 유발된 모멘트를 2차 모멘트라 한다. 〈그림 2.6a〉는 단순 지지된 보의 2차 반력과 지지점에 접합된 보의 자유 물체도를 도식화 한 것이다.

보에 작용하는 유일한 하중인 지지점 반력은 평형이 유지되는 시스템을 형성하여야 한다. 즉, 2차 거동의 반력과 모멘트의 총합은 0이 되어야 한다.

$$\sum R_{hyp} = 0 \qquad (2.6.2\text{-}1)$$

$$\sum M_{hyp} = 0 \qquad (2.6.2\text{-}2)$$

여기서, R_{hyp} : 2차 반력

M_{hyp} : 2차 모멘트

〈그림 2.7a〉는 긴장력과 2차 반력에 따른 부재 단면 내 모멘트와 전단력을 도식화 한 것으로 보의 정적 자유도 상태로부터 2차 모멘트와 전단력의 관계는 다음과 같다.

$$V_{hyp} = \sum R_i \qquad (2.6.2\text{-}3)$$

$$M_{hyp} = \sum R_i \times X_i \qquad (2.6.2\text{-}4)$$

〈그림 2.7〉과 같이 2차 전단과 모멘트는 단면의 콘크리트와 철근에 의해 발달된 힘에 의해 유지 및 균형을 이룬다. 강도한계상태에서 모멘트는 〈그림 2.7b〉에서 볼 수 있듯이 압축영역과 긴장재 인장력에 의해 저항된다고 가정되며 다음의 관계가 적용된다.

$$C = T \qquad (2.6.2\text{-}5)$$

$$M_{hyp} = TZ = CZ \qquad (2.6.2\text{-}6)$$

여기서, C : 전체 압축력

T : 긴장재와 철근에 의한 복합 인장력

Z : 단면의 내부 모멘트 팔

전술한 바와 같이 강도한계상태에서 단면 내에서 2차 모멘트에 저항하기 위한 내부 저항력이 발생되어야 한다. 내부 저항력은 자중과 적재하중 같은 다른 하중과 함께 거동하게 된다. ACI 와 AASHTO는 포스트텐션 거동이 탄성 이론을 사용하여 산정될 경우, 2차 거동은 모든 강도 산정용 하중조합에 계수 1.0을 가지고 포함되어야 한다고 말하고 있다. 예를 들어, 중력조건일 경우 ACI에 규정된 강도 하중조합은 다음과 같다.

$$M_n = \frac{(1.4M_d + 1.7M_l + M_{hyp})}{\phi} \qquad (2.6.2\text{-}7)$$

여기서, M_n : 단면의 공칭강도;

M_d : 고정하중에 의한 모멘트;

M_l : 적재하중에 의한 모멘트;

ϕ : 강도 감소 계수

2차 모멘트의 하중계수가 1.0인 이유에는 여러 가지가 있다. 첫째, 하중 값을 지배하는 요소가 고정과 적재하중과는 달리 분명하고 자세하게 밝혀져 있다. 둘째, 대부분의 경우 2차 모멘트는 고정과 적재하중에 의한 모멘트와 반대방향이고 보수적인 설계관점에서 볼 때 하중계수 1.0을 적용하는 것이 타당하다.

2.7 긴장력과 시간 종속적 영향

2.7.1 긴장재의 마찰과 정착에 따른 응력손실

포스트텐션에서 긴장재가 시스와의 마찰력에 의해서 응력을 받고 있는 동안, 긴장재를 따라서 긴장력은 긴장정착부(stressing anchor)의 최대 값으로부터 고정정착부(dead anchor)의 최소 값으로 떨어진다. 긴장력에 의한 상향력이 정해진 값에 도달하면, 대부분의 경우 긴장재는 톱니모양의 쐐기를 사용함으로써 긴장재의 잠김이 달성된다. 따라서 응력을 받을 때, 즉각적인 응력상실에는 두 가지 요소가 존재하게 된다. 하나는 마찰에 의한 것이고, 다른 하나는 쐐기의 안착에 의한 것이다. 즉각적인 안착 후의 긴장재의 최종 응력도가 〈그림 2.8〉에 나타나 있다.

마찰 손실은 첫째 긴장재의 길이방향을 따라 각이 변화하는 위치에서와 둘째 설치하는 동안 발생하는 예기치 못한 긴장재와 시스의 접촉으로 인해 일어난다. 일반적으로, 긴장재의 길이가 길수록, 단부에서 응력손실은 커진다.

정형 건물 시공에서 긴장재의 길이가 35 m를 초과하면, 마찰력에 의한 응력손실이 중요하게 고려된다. 이 경우, 단부에서 응력을 증가시키기 위해 처음 긴장이 완료된 후 긴장재는 단부에서 재 긴장된다. 양 단부에서 당겨진 긴장재에 대한 응력분포가 〈그림 2.9〉에 나타나있다. 비부착 긴장재의 경우 반드시 양 단부에서 동시에 응력이 가해질 필요는 없다. 설계관점에서 단부의 긴장재 응력이 계산되고 설

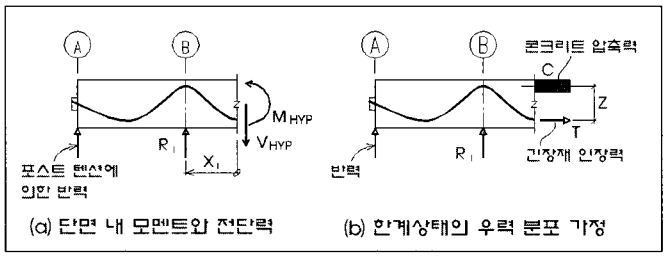


그림 2.7 단면 거동과 한계상태의 힘의 내부분포

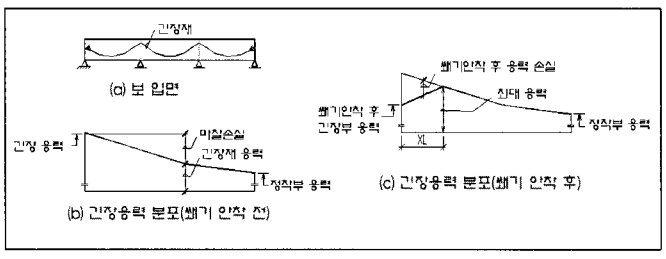


그림 2.8 마찰 손실 응력도

표 1. 슬래브 응력 손실에 대한 기여도 백분율

항 목	백분율(%)
수축(SH)	66
크리프(CR)	11
탄성 수축(ES)	7
온도(T)	16
합 계	100

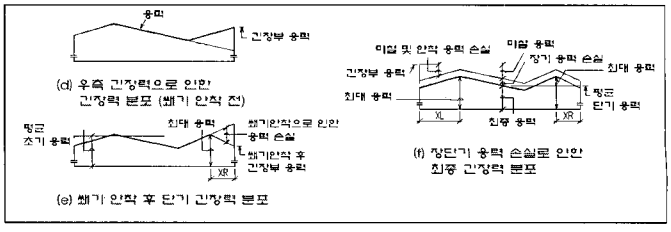


그림 2.9 마찰 및 장기응력 손실도

계 요구치에 적절하다는 것이 확인되면, 양끝에서 35 m 이상의 긴장재에 응력을 가하는 것을 의무적으로 할 필요는 없다. 양끝의 응력은 긴장재 사용의 경제적인 고려에 의해 주로 유도된다.

2.7.2 장기 응력손실

긴장재가 정착한 후에 발생하는 추가적인 응력손실을 장기 응력 손실이라고 한다. 건물 시공에서 장기응력손실은 부재의 탄성 수축, 크리프, 수축(shrinkage), 긴장재의 응력 완화에 기인한다. 캘리포니아에서 비부착 포스트텐션으로 시공된 정형 바닥 슬래브에 있어 장기응력손실에 대한 상기 요소들의 기여는 〈표 1〉에 나타나 있다. 연속적인 긴장재 시공에 있어 연속되는 긴장재의 응력은 슬래브에 추가적인 수축을 일으키고 따라서 이미 응력을 받고 있는 긴장재의 긴장력을 감소시킨다. 먼저 응력을 받은 긴장재는 이러한 현상 때문에 나중에 응력을 받은 긴장재 보다 더 많은 응력을 잃게 된다.

2.8 긴장재의 허용 응력

건물에서 사용되는 포스트텐션 부재는 여러 요구조건들 중에서도 최대 균열폭의 허용한계를 충족하면 사용 가능한 것으로 고려된다. ACI는 부재의 균열 폭이 허용한계 내에 있다는 것을 보장하기 위해 인장응력의 값을 제한한다. 콘크리트는 초기 긴장력을 전달할 때 더 낮은 균열 강도를 갖기 때문에, 초기 허용응력은 완전한 강도(full strength)의 콘크리트에 대해 허용되는 응력 보다 더 낮다. 완전한 강도의 콘크리트(사용성 조건)와 초기 허용인장응력의 두 값은 ACI 기준에 나타나 있는데, 그 중 하나는 일방향 부재에 대한 것이고 나머지 하나는 이방향 부재에 대한 것이다. 현재의 ACI 기준의 허용값은 〈표 2〉에 나타나 있다.

캐나다 기준 「CSA Std. A23-3, 1994」와 영국기준 「BS1101, 1985」는 인장응력 부분에 한계치를 부여하지 않고 있는데 이는 예상 균열폭을 평가하고 적절한 철근과 균열제어를 위한 상세를 제공하는 것으로써 대체하고 있기 때문이다. 이처럼 최대 인장응력의 한계를 없애기 위한 논의가 현재 ACI 기준 위원회에서 진행 중이다.[1),2),5),7)]

2.9 평균 선압축력과 균형하중

평균 선압축력(precompression)이란 긴장력으로 인한 단면의 평균압축응력이다. 일반적으로, 〈그림 2.10〉과 같이 선압축력의 정도는 긴장재 앵커 부근에서 가장 크고 슬래브 내부에서는 고르게 분산되어 균일한 크기가 된다. 일반적으로, 받아들일 수 있는 평균 선압축력의 최저치는 일반 슬래브의 경우 1.0 Mpa 정도이고 지붕 슬래브는 1.4 Mpa 이다. 대부분의 구조물에서, 설계의 경제성은 1.7 ~ 2.0 Mpa에서 극대화된다.

슬래브의 적절한 설계 선압축력을 결정하기 위한 요소로는 균열 발생 가능성과 방수성능 등이 있다. 선압축력의 증가는 슬래브의 방수성을 향상시키는 것으로 간주하나 실제로는 선압축력이 국부적으로 콘크리트의 방수성을 향상시킬 뿐 이것이 방수시스템에 대한 전반적인 성능향상을 보장하지는 않는다. 거의 모든 포스트텐션 슬래브와 특히 기초에 근접한 층(1 ~ 4층)에서는 미세하지만 어느 정도의 균열이 발생한다. 슬래브가 기초에 근접할수록, 균열 가능성은 커진다. 따라서 선압축력이 방수의 유일한 수단으로 간주될 수 없다. 또한 높은 선압축력은 크리프의 경향을 더 크게 해서 더 큰 균열 가능성을 초래한다. ACI 423에서는 선압축력이 3.4 Mpa를 초과할 경우 설계자는 지점에서 발생할 수 있는 구속에 의한 충격을 검토해야 한다고 규정하고 있다.

균형하중은 T.Y.Lin(Lin and Burns, 1981)에 의해 도입되었고 포스트텐션 부재를 해석하기 위한 적절한 절차이다. 가장 간단하게 이 개념을 설명하기 위해 〈그림

표 2. 허용 응력 제한치

	최대압축강도 (MPa)	최대인장강도 (MPa)
Initial Stress Condition	$0.60 f_{ci}'$	$0.25\sqrt{f_c'}$
Service Condition	$0.45 f_{ci}'$	$0.50\sqrt{f_c'}$ (이방향) $1.00\sqrt{f_c'}$ (일방향)

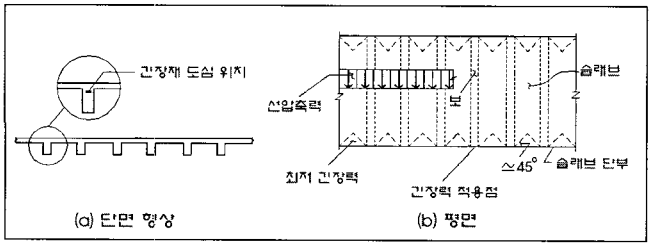


그림 2.10 보-슬래브의 선압축력 분포도

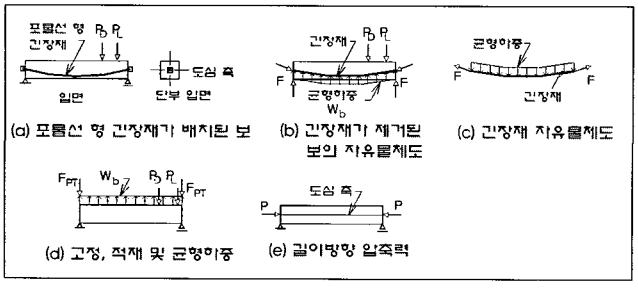


그림 2.11 균형하중 개념도

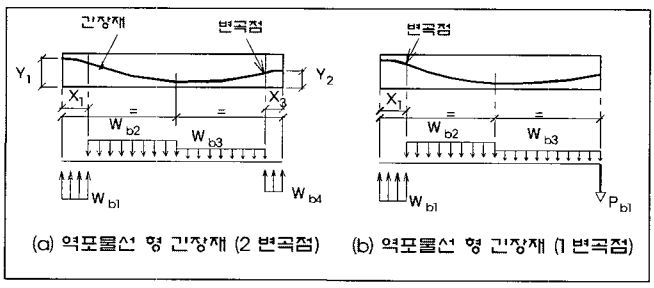


그림 2.12 균형하중 예

2.11)과 같은 포스트텐션 보가 언급된다. 균형하중은 〈그림 2.11b〉와 〈그림 2.11c〉처럼 긴장재가 제거된다면 긴장재가 배치된 위치에서 구조물에 작용하는 하중으로 간주된다. 해석의 목적상, 구조물의 포스트텐션 긴장력은 두 부분으로 나누어진다. 부재에 수직으로 작용하는 W_b와 긴장재의 각도변화가 있을 경우 발생하는 집중하중 F_{PT}가 부재의 도심을 따라 작용한다.

보 부재에 작용하는 하중들을 정리하면 〈그림 2.11d, e〉와 같다. 부재에 수직인 상향력이 균형하중(W_b)이고 보의 길이방향을 따라 작용하는 힘(P)은 긴장력으로 인한 축방향 압축력의 분력이다. (P)에 의한 축하중은 균형하중으로부터 구해지는 응력에 추가적인 균일한 압축력을 발생시킬 것이다.

균형하중은 긴장재의 종단면 형상과 긴장력 같은 요소에 따라 달라진다. 〈그림 2.12〉는 2가지 긴장재의 종단면 형상에 따른 구조물에 작용하는 긴장력을 도식화하고 있다. 그림에 나타난 분포에서, 상·하향력의 합은 0이 된다. 보통 설계과정에서는 스팬 전체에 대해서 상향력의 평균을 구하고 이 값을 부재의 자중에 대한 비율로 표현되는 일반적이다. 일반적으로 균형하중은 위험 스팬(가장 긴 스팬)의 경우 자중의 50 ~ 80 %의 범위로 산정될 때 슬래브의 경제적 설계가 가능해 진다. 더 짧은 스팬은 더 낮은 비율로 균형하중을 맞추어야 할 것이다. 보의 경우 일반적으로 고정하중의 70 ~ 100 %가 보 설계에 대한 좋은 초기값이다.[1),2),5),6)]

3. Post-Tensioning Technology for Construction

3.1 포스트텐션 긴장재의 선택

포스트텐션은 긴장재의 종류에 따라 부착 긴장재(bonded post-tensioning tendon) 및 비부착 긴장재(unbonded post-tensioning tendon) 두 가지로 나누어 볼 수 있다.

첫째는 〈그림 3.1〉의 부착방식으로 원형 또는 장방향 타원형의 금속 또는 플라스틱 덕트 내에 여러 개의 강선(multi-strand)이 들어있는 형태로 긴장재의 긴장 및 정착 후에 덕트 내부를 모르타르 등으로 그라우팅 하는 방식이다. 이 시스템은 교량, 대구조물의 트랜스퍼 거더 등 큰 하중이 작용하는 부재에 적당한 방식으로 주로 토목 공사에 사용된다.

둘째는 〈그림 3.2〉의 비부착 방식으로 보통 원형 플라스틱 보호관(sheath, 시스) 내에 7개의 와이어(wire)로 구성되고 부식 방지용 윤활유로 코팅된 하나의 강선(mono-strand)이 들어있는 형태이다. 비부착방식이란 긴장재의 긴장 및 정착 후에 시스 내부를 별도로 그라우팅 하지 않는 방식이다. 비부착 단일 긴장재는 프리스트레스를 받지 않은 철근과 조합되어 응력전달 시스템을 형성하고 이는 주로 건축구조물의 슬래브 및 보에 사용되며 공사가 간편하다는 장점이 있다.

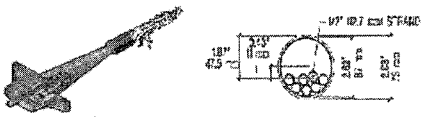


그림 3.1 Bonded Post-Tensioning System

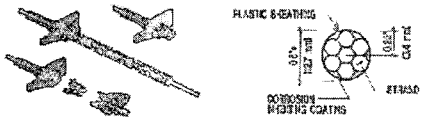


그림 3.2 Unbonded Post-Tensioning System

비부착 포스트텐션에 있어 응력을 받는 긴장재에서의 힘은 일차적으로 단부에 제공되는 〈그림 3.3〉와 같은 정착구(anchor)에 의해 콘크리트에 전달된다. 비부착 긴장재에서 강선은 필연적으로 단부의 정착장치에 의해 저항되기 때문에, 비부착 긴장재의 전 수명기간 동안의 이 장치의 장기간 보전이 아주 중요해진다.

ACI와 PTI 시방서는 강선에 대하여 ASTM 기준에 따라 제작되어야 한다고 규정하고 있다. ASTM은 1,860 MPa과 1,720 MPa 두 가지의 강선을 제시하고 있으나 대부분 1,860 MPa 강선을 사용한다. 강선의 종류는 일반이완강선(normal relaxation)과 저이완강선(low relaxation) 두 가지가 있다. 일반이완강선은 1960년부터 1970년대에 이르기까지 많이 사용되었으나, 1980년 이래로 저이완강선이 사용되고 있다. 이러한 변화의 주요원인은 경제적인 이유로, 저이완강선을 사용하는 경우 10 % 정도 긴장재 양을 절감할 수 있고 더불어 콘크리트에 초기 긴장력이 크게 작용하는 것을 방지하게 된다.

가장 많이 사용되는 강선의 규격은 지름 12.7 mm와 15.2 mm 이다. 12.7 mm는 건물에 많이 사용되며, 더 가볍고 더 유연하여 시공에 용이하며 설치장비 또한 가볍다. 15.2 mm는 주로 미국과 캐나다 지역에서 많이 사용되고 있으며, 12.7 mm 보다 작은 강선은 주로 보수용으로 사용된다. KS에서 제시하는 강선 규격별 역학적 성질은 〈표 3〉과 같다.

표 3. 단일 긴장재의 강선 규격

등급 \ 규격		표준 지름	단위 무게	인장 하중	항복 하중
		mm	kgf/m	KN	KN
KS D7002	SWPC 7B 또는 SWPR 7AL	9.5	432	102	86.8
		11.1	580	138	118
		12.7	774	183	156
		15.2	1101	261	222

강선을 코팅하는 이유는 크게 부식을 방지하는 것과 응력을 가하는 동안의 마찰을 줄이기 위한 것이다. ACI와 PTI 시방서에서는 "적당한 습기 제거와 부식 방지가 되도록" 요구하고 있다. 왁스와 아스팔트 계열의 물질이 초기 단일 긴장재 강선에 사용되었으나, 최근에는 미네랄 오일 수지(grease)가 주로 사용되고 있다. 또한 ACI와 PTI 시방서는 또한 강선 제조와 설치과정에서 코팅제가 녹거나 흐르는 것을 방지하기 위해 고온에 대한 안전성을 요구하고 있다.

ACI와 PTI 시방서에서는 강선의 플라스틱 피복에 대하여 방수가 가능할 것을 요구한다. 대부분의 피복은 고밀도 폴리에틸렌으로 만들어지며, 최소 1.3 mm의 두께로 만들어진다. 1985년 PTI 시방서에서는 보통 환경에서 0.6 mm 두께를 제시하고 있으며, 극한환경에 대해서는 1.0

mm로 제한하던 것을 1993년 PTI 시방서에서는 모든 환경에 대하여 1.0 mm 로 제한하고 있다. 2000년 PTI 시방서에서는 1.3 mm 로 더 증가하였다. 플라스틱 피복의 주된 기능은 첫째 부착성능의 향상, 둘째, 기계적인 취급시 손상에 대한 보호막 제공 셋째, 습기와 화학물질의 침입에 대한 보호막 형성이다.

비부착 포스트텐션 시공을 위해 미국에서 가장 흔히 쓰이는 일반적인 정착장치는 〈그림 3.3〉과 같이 대략 127 mm × 57 mm, 570 g 정도의 주형 철물로 ASTM A 536에 의해 제작된다. 앵커의 형상은 직사각형 플레이트 중앙부에 쐐기를 위한 두꺼운 단면에 원뿔 형태의 홀이 있다. 12.7 mm용 앵커는 127 × 57 mm 크기로 베어링 면적은 대략 7,100 mm^2 이며, 15.2 mm용 앵커는 140 × 70 mm 크기로 베어링 면적은 대략 9,000 mm^2 이다. 앵커의 최소 인장강도는 550 MPa, 최소 항복강도는 380 MPa, 그리고 6 %의 연성을 가져야 한다. 정착구의 종류는 다음 세 가지이다.

(1) 고정(fixed end)정착구 : 공장에서 강선 단부에 부착되어 제작된다.
(2) 긴장(stressing end)정착구 : 현장에서 콘크리트가 충분한 강도를 낸 후 부착되어 긴장재에 긴장력을 부여한다.
(3) 중간(intermediate)정착구 : 시공줄눈이나 연속된 콘크리트 슬래브 사이에 놓인 정착구

강선은 톱니자국이 있는 반원추형의 쐐기(wedge) 의해 고정된다. 기본 쐐기는 끝을 자른 원뿔 모양의 두 개 조각으로 구성되어 있다. 쐐기의 표면은 강선을 효율적으로 잡기위해서 단단하게 되어있는 반면에 내부는 앵커 구멍에 맞추기 위해서 충분히 부드럽게 되어 있다. ACI에서는 비부착 포스트텐션 긴장재의 정착장치와 쐐기에 대해서 적어도 강선 극한강도의 95 % 이상을 견디도록 하고 있다. 1989년 기준에서는 강선 강도의 100 %를 요구하였으나, 강선의 그립에서 응력상승(stress-riser) 효과를 고려하여 95 %로 저감하였다.[1),2),4),5)]

3.2 긴장재 배치와 종단면도

3.2.1 긴장재 배치

포스트텐션의 배치에는 두 가지 방법이 있다. 첫째는 집중배치(banded tendon)이고 둘째는 분산배치(distributed tendon)이다. 집중배치에서 모든 긴장재는 일정한 간격을 유지한 채 서로 평행하게 납작한 다발(flat bundles)형태로 묶여진다. 집중배치 긴장재는 지지점을 따라서 통상 폭 1.2 m 정도의 띠(band)를 형성한다. 분산배치 긴장재는 1 ~ 4개로 이루어진 다발(bundle)을 이루며 각 다발간 동일한 간격으로 설계 영역의 전체 폭에 걸쳐서 배치된다.

설계 영역에서 각각의 긴장재는 〈그림 3.4a〉와 같이 다양한 형태로 배치하여 사용되어 질 수 있으며, 그림에서 언급된 4가지 형태는 모두 동일한 강도 능력을 보유하는 것으로 판단된다. 이중 〈그림 3.4a-b〉와 같은 양방향 집중배치는 ACI에서 허용되지 않으며, 가장 선호되는 배치는 〈그림 3.4a-a〉와 같은 집중배치와 분산배치의 조합형이다. 조합형의 시공 장점은 양 방향 긴장재가 서로 엮이지 않는다는 것이다. 지지점 바로 위에 먼저 분산배치 긴장재가 설치되어 안정성을 확보한 다음 모든 집중배치 긴장재가 배치된다. 그 후 지지점 이외의 분산배치 긴장재들이 배치하게 된다. 이 결과 지지점 바로 위의 2개의 분산배치 긴장재를 제외하고는 상·하부 지점에서 모든 긴장재들이 서로 교차하지 않게 된다. 〈그림 3.4b〉는 실제 긴장재가 조합형으로 배치된 시공사진이다.

3.2.2 긴장재 종단면도

긴장재의 측면 종단면 형상은 일반적으로 포물선 부분과 직선으로 구성된다. 분산배치와 보의 경우에는 〈그림 3.5a〉처럼 변곡된 포물선형이 채택된다. 집중배치의 경우는 〈그림 3.5b〉와 같이 부분 포물선형이 흔히 사용된다. 실제로는, 지지점 상부의 집중배치 긴장재의 꺾임 형상은 이루어지지 않는다.

3.2.3 긴장재 배치 상세

A. 지지점 위 최소 긴장재 수

ACI에 의하면, 각 방향에 최소 2개의 긴장재가 각각의 긴장재가 얼마나 많은 강선을 가지고 있는지에 관계없이 각 지지점 위를 직접 통과해야 한다. 비부착 단일 긴장재의 경우 총 2개의 긴장재가 양 방향에서의 지지점 위를 통과해야만 한다.

B. 긴장재 최대 간격

2개의 긴장재 사이의 최대 간격은 〈그

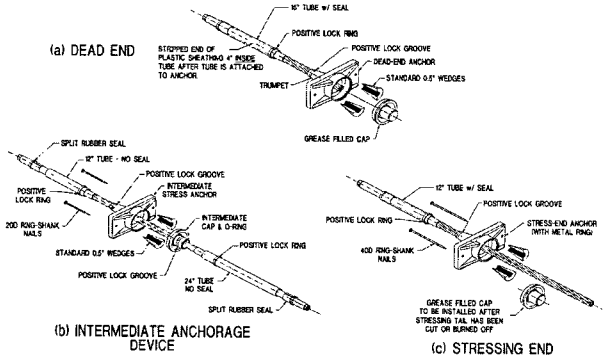


그림 3.3 비부착 긴장재의 정착구

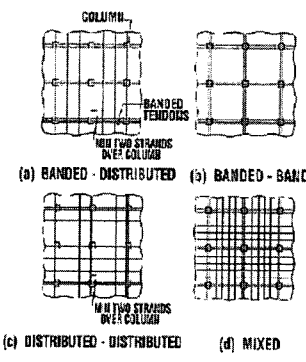
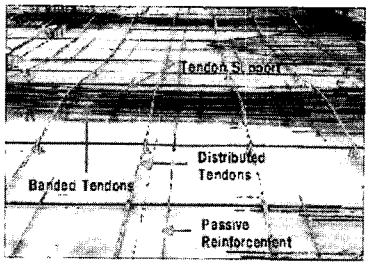


그림 3.4 (a) 긴장재 배치 종류



(b) 긴장재 조합형 배치

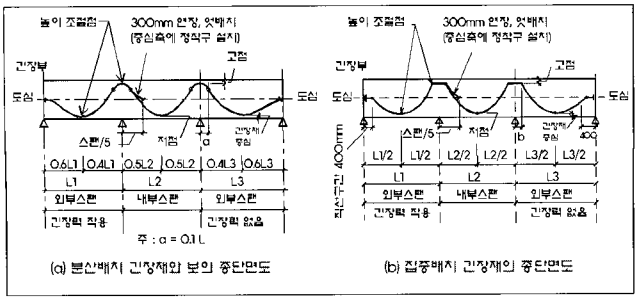


그림 3.5 긴장재 종단면도

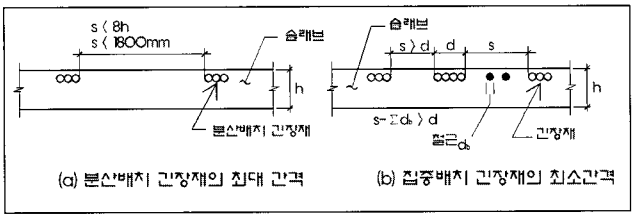


그림 3.6 긴장재 간격

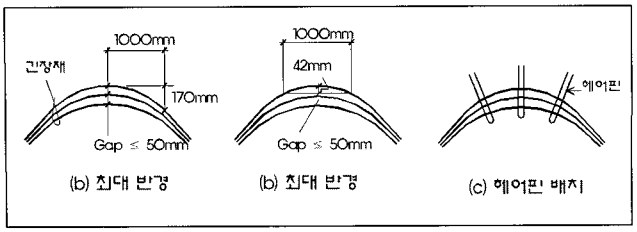


그림 3.7 긴장재 수평 곡률

림 3.6a)와 같이 슬래브 두께의 8배와 1.8 m 중 작은 값이고 이러한 제한은 집중배치 긴장재에 적용되지 않는 조합형 배치에 대해서는 예외이다.

C. 긴장재 최소 간격

긴장재의 최소간격은 〈그림 3.6b〉와 같이 긴장재 묶음다발(bundle)의 수평 폭(d)과 각 다발들 사이에 놓인 모든 철근의 폭(d_b)의 합을 합한 것보다 큰 간격(s)으로 배열되어야 한다. 이 값은 하나의 단일 긴장재의 경우 25 mm 이하이고 4개의 다발로 구성된 긴장재의 경우 50 mm 이상까지 변한다. 그러나 어떠한 경우에도 긴장재는 동일한 위치에서 2개의 인접한 철근 사이에 허용되는 최소간격 보다 더 가까워질 수는 없다.

D. 비부착 단일 긴장재의 다발 기준

시공의 편의상, 몇 개의 비부착 단일 긴장재를 함께 다발로 만드는 것이 실용적이다. 다발로 만들어진 긴장재는 정착구 부분에서 퍼지게 된다. 납작한 다발 당 4개의 긴장재가 바닥 슬래브 시공에 실용적으로 사용되는 추천치이다. 다발 주위의 콘크리트가 약해질 가능성과는 별도로, 이 제한에는 2가지의 이유가 있다. 우선, 더 많은 강선이 함께 다발로 묶일 경우 상·하부가 분리될 가능성이 높아지고 두 번째로는, 내부 긴장재 위에 외부 긴장재가 올라타기 때문에 수평곡률의 위치에서 결함이 발생될 가능성이 커진다.

E. 긴장재의 곡률

긴장재의 최대 곡률은 2가지 이유로 제한된다. 일직선이 아닌 기둥 배근을 따르거나 오프닝을 피하기 위해 수평으로 휘는 긴장재는 끊어질 위험성이 존재한다. 이런 위험은 긴장재의 곡률이 〈그림 3.7〉에 도식화된 것보다 더 작으면 최소화 될 수 있다. 더 큰 수평 곡률에 대해서는, 〈그림 3.7c〉처럼 적절한 위치한 헤어 핀(hair-pin)을 사용하여야만 한다. 그림의 상세는 12mm 공칭직경의 비부착 긴장재일 경우 긴장재 곡률로 인해 콘크리트에 부과되는 횡압력이 3 MPa를 초과하지 않는다는 전제하에 일반적인 슬래브 시공에 적용될 수 있다. 따라서 곡률반경은 적어도 3 m 이상 이어야 한다.

두 번째로는, 날카로운 곡률을 긴장재에 가하는 것은 강선에 휨응력을 야기하고, 곡률이 클 경우에는 중요한 문제가 될 수도 있다. 비부착 긴장재에 대해서, CEB(1992)는 수평곡률 반경이 강선 공칭직경의 20배가 넘지 말아야 강선이 완전히 규정된 인장응력을 발휘할 수 있다고 제안하고 있다.

F. 긴장재 지지용 철근의 간격

긴장재 지지용 철근은 지정된 위치에 긴장재를 고정시키고 안전성을 보장해 주기 위해 사용된다. 이 지지용 철근은 일반적으로 D13을 사용한다. 30 mm 보다 높이 배치된 긴장재의 경우 지지 철근은 통상 중심에서 1,200 mm 간격으로 배치된 받침대(chair) 위에서 설치한다. 30 mm 이하의 긴장재에 대해서는 일반적인 슬래브 받침대가 사용된다. 지지 철근의 간격은 긴장재 종류와 종단면도에 따라 다르지만, 통상 1,500 mm를 초과하지는 않는다.

G. 긴장재의 배치위치에 대한 허용오차

도면에 표기된 긴장재의 배치와 실제 시공상의 배치에 따른 허용오차는 다음과 같고 철근의 배치와 겹칠 경우 긴장재의 배치를 우선으로 한다.

(1) 수직방향의 허용오차

두께 200 mm 까지의 부재

: 수직 측면형상에서 6 mm

200 mm ~ 600 mm 사이의 부재

: 10 mm

600mm 이상의 부재 : 12 mm

(2) 수평 방향의 허용오차

ACI와 PTI에서는 수평 허용오차에 대해서는 정확한 수치를 언급하고 있지 않다. ACI에서는 곡선 반지름의 오차로 나타내고 있으나 현장에서 적용하기에는 어려움이 있고, 〈그림 3.8〉과 같이 PTI의 현장지침서에서 제시하고 있는 긴장재 배치도로부터 길이대 수평 편차 비율을 1/12보다 작게 한다는

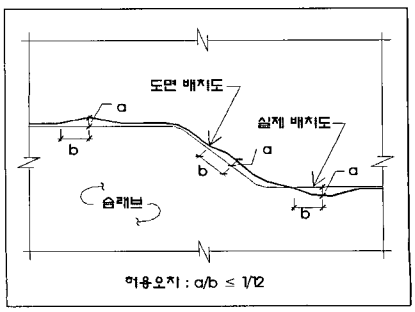


그림 3.8 긴장재 배치의 수평 허용오차

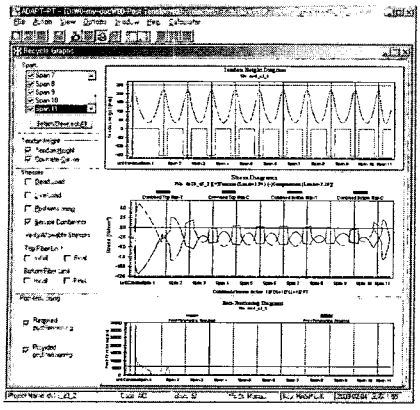


그림 4.4 ADAPT-PT 프로그램에 의한 해석 결과

제한이 더 유용하게 사용된다.

3.2.4 긴장재 설치 검사와 정착장치의 포켓(pocket) 보수

많은 코드에서 긴장재 설치 검사에 대하여 특별검사요원을 고용하도록 되어있다. 검사 요원은 배치를 포함한 긴장재 설치 외관, 콘크리트의 타설, 긴장재 응력 등을 검사한다. 긴장재의 배치에 대한 검사는 긴장재 수와 더불어 긴장재 위치의 높이 - 상부지점과 하부지점 - 를 검사하여야 한다. 긴장재의 형상은 부드러운 포물선의 형상을 하되 역곡선이 나와서는 안된다. 검사는 긴장재 검사 후 이동의 문제를 고려하여 가능한 설비덕트 시공 후에 하도록 한다. 밀집지역에 대해서는 더 세밀한 검사를 요한다.

긴장재 외장은 project specification에 따라 보수와 손상 정도를 검사해야 한다. 극한 환경에 노출된 긴장재의 경우 손상을 입은 곳에 코팅을 복원하고 외피를 다시 씌어야 한다. 일반적인 환경에 대해서는 손상된 면적이 적을 경우 보수하지 않아도 된다.

ACI와 PTI 시방서에서 포켓 보수에 사용되는 물질로는 수축하지 않는 비금속성의 물질을 요구하며, 강선에 유해한 것으로 알려진 염화물과 다른 화학물질을 포함하지 않아야 한다. 또한, 콘크리트 또는 앵커 재료와도 반응해서도 안된다. 이러한 보수 재료는 두 번째 보호막으로 부식 방지의 결정적인 역할을 한다.[1),2),4),5),8)]

4. 국내 설계 적용사례

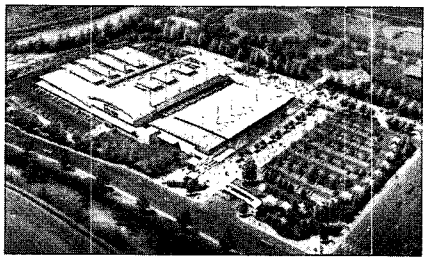


그림 4.1 김해 농수산물 센터 조감도

현재 국내의 경우 부착 방식을 적용하여 교량 등 토목 구조물에 적용된 설계사례는 다수 있는 실정이나 비부착 방식을 사용한 건축 구조물에의 설계 적용사례는 거의 찾아볼 수 없으며 이와 함께 비부착 방식의 설계 기술 역시 미국이나 일본 등 선진국을 제외하고 비부착 포스트텐션 공법이 꽤 활성화 된 동남아시아 일부 나라와 비교해도 뒤쳐져 있는 상황이다. 그러나 현재 다수의 건설 및 설계회사들이 점차 비부착 포스트텐션 공법에 대한 관심의 폭을 넓혀가고 있으며 더불어 각 연구소의 연구 활동 역시 활발히 추진되고 있다. 이에 따라 국내에서도 조만간 포스트텐션 공법의 활성화가 기대된다고 할 수 있겠다. 본서에서는 실제 설계에 적용된 김해 농수산물 센터와 설계 계획단계에서 기존 설계와의 공사비 및 시스템 비교 분석을 위해 기본 설계된 구조물을 소개하고자 한다.

4.1 김해 농수산물 센터

김해 농수산물 센터는 P건설에서 시공을 맡고 있으며 (주)동양구조안전기술에서 바닥슬래브에 대해 포스트텐션 공법을 적용하여 미국 ADAPT 포스트텐션 전문 설계회사에 기본 및 실시 설계를 의뢰하여 설계가 마무리되어 곧 시공에 들어갈 예정이다. 미국의 ADAPT라는 포스트텐션 전문 설계회사는 Dr. Bijan O Aalami 라는 미국 내 포스트텐션 관련 최고 권위자가 소장으로 있으며 2001년부터 본 사와 기술제휴 관계를 맺고 본 사에 다양한 포스트텐션 관련 설계 및 시공 기술에 대한 자문 역할을 수행해 오고 있다.

4.1.1 건물 개요

해당 건물의 개요는 다음과 같고 〈그림 4.1〉과 〈그림 4.2〉에 조감도와 평면도를 도식화하였다. 포스트텐션 슬래브의 적용층은 지상 1층 슬래브로서 건물의 좌측부

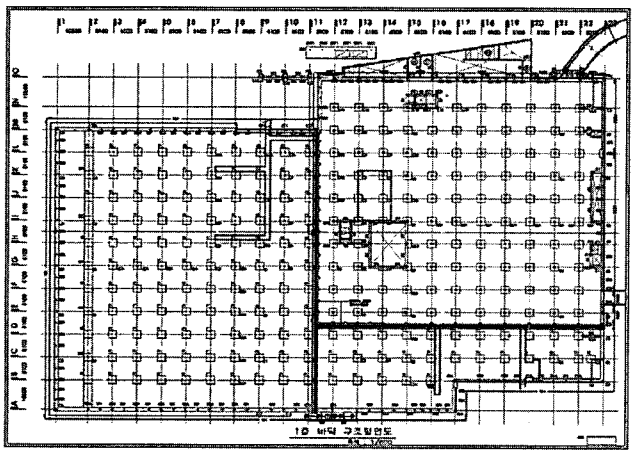


그림 4.2 평면도

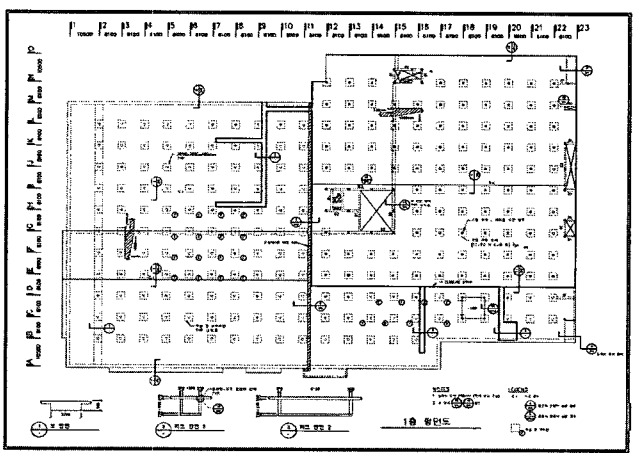


그림 4.3 콘크리트 도면

분은 지하층 없이 파일 기초 상부 슬래브에 사용되었고 우측부분은 지하층 콘크리트 기둥이 지지점이였다.

- 건물 명 : 김해 농수산물 센터
- 용도 : 농수산물 종합 유통시설
- 사용 재료 : 철근콘크리트, 철골
- 건물 층수 : 지상 2층 지하 1층
- 건물 너비 : 180.6 m × 118.2 m
- 스팬 : 8.1 m, 10.5 m

4.1.2 설계 특징 및 상세도

대상 구조물은 스팬이 8.1 m로 포스트텐션 공법을 적용하여 플랫슬래브로 설계하기에 적당하고 구조물의 용도에 따라 고정하중(600 kg/m^2)의 2배에 가까운 적재하중이 적용되었고 이로인해 슬래브의 두께는 250 mm가 되었다. 하중 적용이 크게 5구역으로 세분화 되었고 이에 따라 슬래브의 두께도 180 mm ~ 250 mm로 다양하게 설계 결과는 도출되었으나 시공의 편의성을 고려하여 전 지역 하중분포에 상관없이 250 mm로 적용되었다. 〈그림 4.3〉은 포스트텐션이 적용된 1층 슬래브의 콘크리트 도면이고 〈그림 4.4〉는 미국 ADAPT 사에서 자체 제작하여 현재 미국 내에서 널리 사용되고 있는 ADAPT-PT 라는 포스트텐션 구조물 전용 설계 프로그램에 의한 해석 결과이다.

1층 슬래브의 좌측부분은 파일 기초와 직접 연결되는 구조이고 파일 캡이 슬래브의 펀칭전단 지지용으로서 일반 기둥지지 구조에서 볼 수 있는 지판의 역할로 설계되었다. 또한 긴장재에 긴장력을 적용시킬 때 파일과 슬래브의 모든 접합부를 고정접합으로 처리할 경우 접합부에 균열이 예상되었고 이를 방지하기 위해 일부 구역에서만 고정접합 상세를 취하고 나머지 접합부는 힌지접합으로 설계되었다. 〈그림 4.5〉와 〈그림 4.6〉는 슬래브와 파일과의 접합부 상세도이며, 〈그림 4.7〉은 슬래브와 지하벽의 접합 상세도를 도식화 한 것이다.

1층 좌우 부분을 균열제어용 폐쇄구간(closure strip)을 설치하여 긴장에 따른 균열을 최소화 하였다. 폐쇄구간 좌우 부분의 콘크리트를 선 타설 한 후 긴장력을 부여하고 선 타설 콘크리트가 어느 정도 경화 후 폐쇄구간에 대한 타설이 진행되도록 설계되었다. 〈그림 4.8〉은 균열제어용 폐쇄구간의 상세도 이다. 또한 대상 구조물의 형

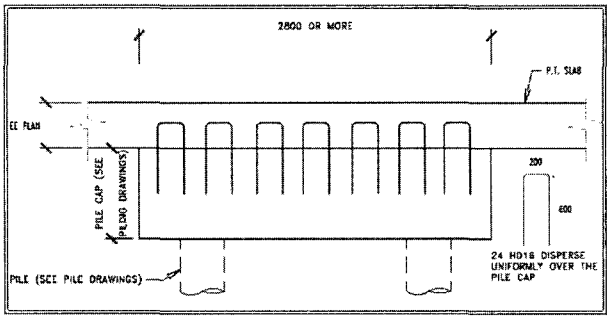


그림 4.5 슬래브-파일 고정접합 상세도

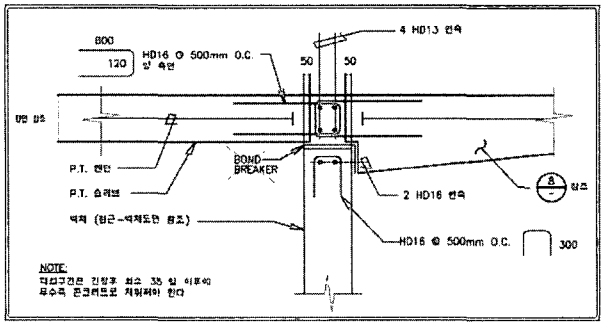


그림 4.7 슬래브-지하벽 접합 상세도

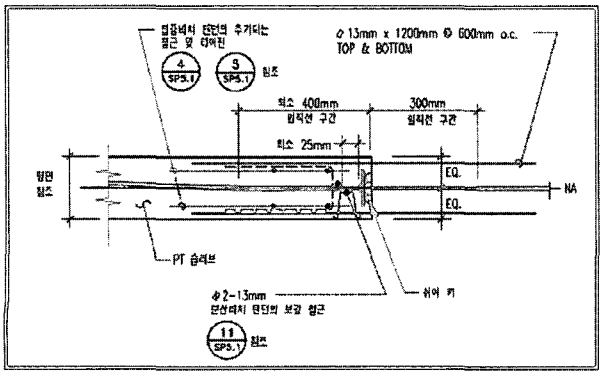


그림 4.9 중간 긴장이 있는 시공줄눈 상세도

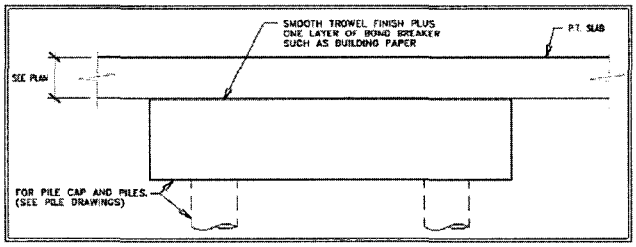


그림 4.6 슬래브-파일 힌지접합 상세도

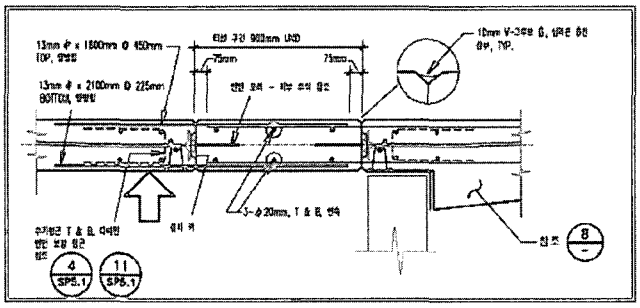


그림 4.8 균열제어용 폐쇄구간 상세도

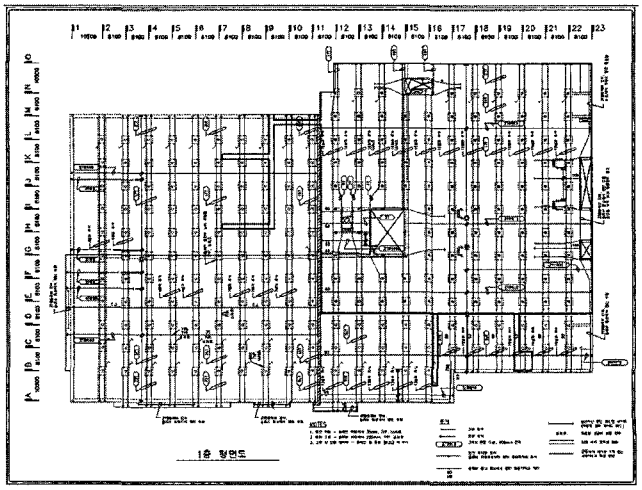


그림 4.10 긴장재 배치도

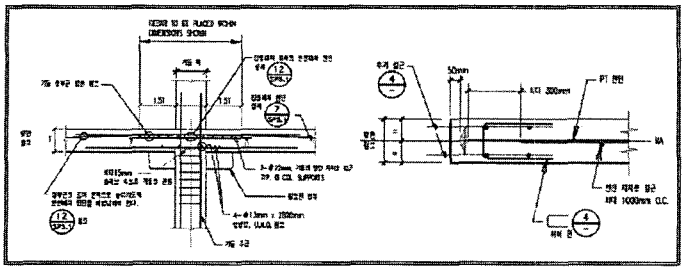


그림 4.11 (a) 내부기둥 상세도 (b)고정 정착구 상세도

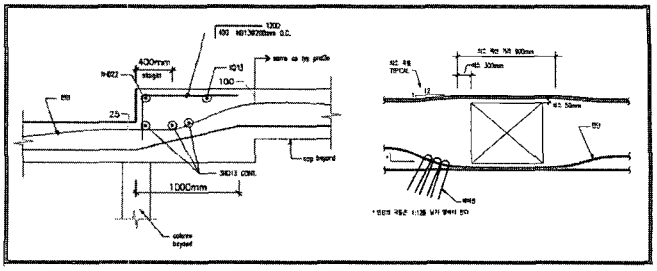


그림 4.12 (a) 슬래브 단차 상세도 (b) 개구부 상세도

상이 X방향으로 180 m에 이를 정도로 길고 따라서 분산배치 긴장재의 경우 그 설치 길이가 증가하게 되었다. 이 경우 ACI에서 제시하는 기준에 따라 시공줄눈 부위에 〈그림 4.9〉와 같이 중간 긴장부를 두어 긴장재의 길이에 따른 응력 손실을 최소화하였다.

긴장재의 배치는 〈그림 4.10〉에서 보는 것처럼 집중배치와 분산배치의 조합형으로 설계되었고 10.5 m 스팬이 적용된 Y방향으로 집중배치 긴장재를 설치하였고 그 직각인 X방향으로 분산배치 긴장재가 배치되었다. 긴장재 수는 집중배치 구간에 15 ~ 17개 전 구간에 설치되고 양 단부 10.5 m 스팬구간에는 18 ~ 58개의 긴장재를 추가로 설치하였다. 분산배치의 경우 평균 3개의 긴장재를 900 mm 간격으로 설계하였다. 긴장력 작용 위치는 균열제어용 구간을 지나는 긴장재의 경우 고정정착구를 설치하고 그 반대쪽에서만 긴장하는 방식을 취하였고, 그렇지 않은 경우에는 양 단부 모두 긴장하도록 설계되었다. 〈그림 4.11a〉와 〈그림 4.11b〉는 집중배치 긴장재의 내부 기둥 주위의 철근이 포함된 상세도와 고정 정착구 상세도이다.

대상 구조물의 경우 1층 슬래브 일부 구역에 단차가 지고 또한 배수를 위한 드레인(drain)이 설치가 예정되어있고 이를 위해서 〈그림 4.12a〉와 같이 긴장재 배치도 및 보강 철근에 관한 상세도를 설계하였다. 또한 계단실 및 각 종 설비를 위한 슬래브 내에 발생하는 오프닝을 위해 〈그림 4.12b〉와 같이 개구부에 따른 긴장재 배치 상세 및 헤어핀 상세를 설계하게 되었다.

4.1.3 경제성 분석

대상 구조물의 경제성 분석을 위해 총 3가지의 시스템을 비교 및 분석하였고 그 결과는 〈표 4〉와 같다. 3가지 시스템은 첫째, 포스트텐션 플랫슬래브이고 둘째 일반 RC 플랫슬래브, 셋째는 RC 보로 이루어진 슬래브 시스템이다. 첫 번째 포스트텐션 플랫슬래브 시스템이 다른 두 가지에 비해 각각 20, 50 % 정도 공사비 절감 효과가 있음을 알 수 있다. 대상 구조물의 경제성 분석은 콘크리트 물량 감소에 따른 공사비 및 거푸집 물량 및 인건비 감소의 영향을 고려하지 않고 단순히 철근과 긴장재의 물량 변화에 따른 분석으로 콘크리트와 거푸집의 절감 효과 및 이에 따른 공기 절감 효과까지 고려하면 그 절감 폭은 더 커질 것으로 판단된다.

표 4. 김해 농수산물 센터 경제성 분석

항목	물량 및 금액	Case 1	Case 2	Case 3
		Flat slab + PT	Flat slab + RC	RC beam + slab
철근	물량(kgf/m^2)	7.20	50.2	65.1
	물량(tonf)	136.64	951.48	1235.12
	단가(원)	550,000	500,000	500,000
	공사비(원)	75,152,000	475,740,453	617,561,385
긴장재	물량(kgf/m^2)	5.73	-	-
	물량(tonf)	108.67	-	-
	단가(원)	2,980,000	-	-
	공사비(원)	323,836,600	-	-
총 공사비		398,988,600	475,740,453	617,561,385
비 율		1.00	1.19	1.55

4.2 S 판매시설

S 판매시설은 현재 국내에서 급격하게 시장규모가 커지고 있는 할인판매장 용도의 건물로 장스팬에 따른 대공간 및 층고 절감을 통한 경제성 창출 이라는 관점에서 포스트텐션 공법이 적용되기에 적당한 구조물이라 할 수 있다.

4.2.1 건물 개요

해당 건물의 개요는 다음과 같고 〈그림 4.13〉에 평면도를 도식화 하였다. 포스트텐션 슬래브의 적용 층은 기준층 슬래브로서 기존 설계는 일반 RC 보-기둥 시스템으로 구성되었다.

건물 명 : S 판매시설
용도 : 종합 유통시설
사용 재료 : 철근 콘크리트
건물 층수 : 지상 4층 지하 1층
건축 면적 : 만 2,087 m^2
스팬 : 8.0 m, 10.0 m
층고 : 5.4 m

4.2.2 설계 주안점

대상 구조물은 스팬이 8.0 m × 10.0 m로 기준층 기본 RC 거더의 사이즈는 400 × 800이고 슬래브 두께는 150 ~ 200 mm로 설계되었다. 포스트텐션 공법으로 슬래브를 적용하는데 있어 두 가지 방법이 있다. 하나는 플랫 슬래브로서 이방향 슬래브를 설계하는 것이고 다른 하나는 슬래브밴드 또는 폭 넓은 보(wide beam)을 사용하여 일방향 슬래브로서 적용하는 것이다. 대상 구조물의 경우 두 가지 시스템으로 모두 설계하여 비교 하였다. 〈그림 4.14〉은 이방향 플랫슬래브를 적용하였을

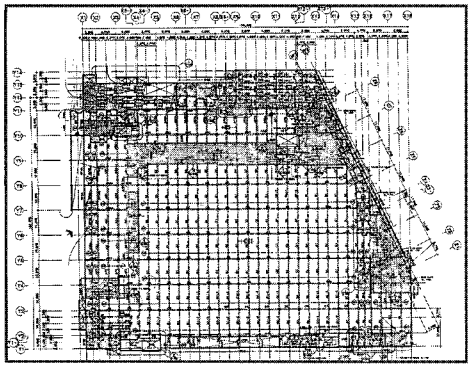


그림 4.13 S 판매시설 평면도

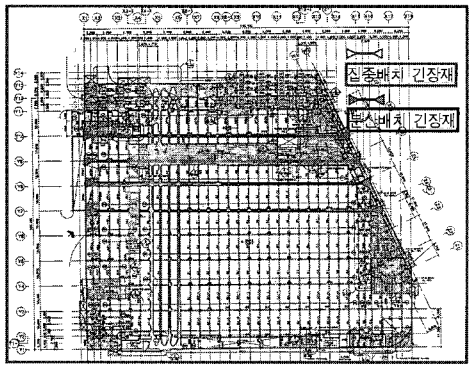


그림 4.14 S 판매시설 이방향 플랫슬래브의 긴장재 배치도

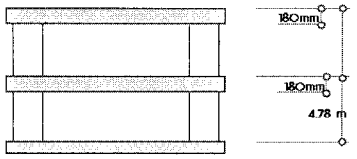


그림 4.15 이방향 플랫슬래브 층고 및 슬래브 두께

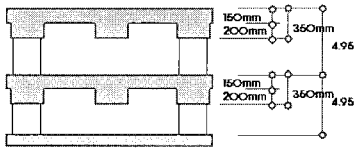


그림 4.16 일방향 슬래브 층고 및 슬래브 두께

경우의 긴장재 배치도를 간략하게 도식화 한 것이다. 스팬이 10.0 m 인 장변 방향으로 집중배치 긴장재를 설치하고 단변 방향으로 긴장재를 분산배치하여 조합형의 배치로 설계되었다.

일방향 폭 넓은 보를 적용하여 설계할 경우 슬래브 두께는 150 mm에 보 춤 200 mm로 전체 슬래브 두께는 350 mm 이고, 이방향 플랫슬래브로 설계할 슬래브 두께는 180 mm로 설계되었다. 각 시스템별 소요되는 긴장재와 철근의 물량은 이방향이 긴장재 5.20 kg/m^2 이고 철근이 4.64 kg/m^2 이며, 일방향 슬래브의 경우 긴장재와 철근이 각각 3.61 kg/m^2 와 2.94 kg/m^2 이다. 〈그림 4.15〉와 〈그림 4.16〉는 각 시스템별 층고 및 슬래브 두께를 도식화 한 것이다. 그림에서 보듯이 각 시스템의 층고 절감 효과는 62 cm 와 45 cm 임을 알 수 있다.

4.2.3 경제성 분석

대상 구조물의 경우 포스트텐션 공법 간의 비교를 위하여 기존 설계와의 비교는 배제하였다. 일방향과 이방향 시스템별 비교 결과는 〈표 5〉와 같다. 일방향 시스템이 이방향 시스템 보다 공사비에서 약 15 % 정도 절감됨을 알 수 있다. 대상 구조물의 경제성 비교 역시 김해 농수산물 센터와 마찬가지로 거푸집 물량 및 인건비에 따른 영향을 고려하지 않고 단순 물량 변화만을 고려하였다. 따라서 거푸집 설치 및 철근 배근 등에 있어 이방향에 비해 일방향 시스템의 시공 복잡성을 고려할 경우 전체 공사비는 비슷하게 산출될 것이라 추정된다.

표 5 S 판매시설의 경제성 분석

항목	물량	Case 1 Flat Slab	Case 2 Wide Beam
콘크리트	물량(m^3)	2271.7	2550.48
	단가(원)	63,000	65,000
	공사비(원)	143,117,100	165,781,200
철근	물량(tonf)	58.54	37.09
	단가(원)	550,000	550,000
	공사비(원)	32,197,000	20,399,500
긴장재	물량(tonf)	65.64	45.55
	단가(원)	2,980,000	2,845,000
	공사비(원)	195,607,200	129,589,750
총 공사비 (원)		370,921,300	315,770,450
면적당 공사비 (원)		29,390	25,020
비 율		1.00	0.85

5. 결 론

이상에서 살펴본 바와 같이 포스트텐션 시스템 특히 비부착 방식의 공법은 현재 구조물의 초고층화, 벽식 구조의 점진적 소멸 , 기둥-보 시스템의 확장 그리고 인건비의 빠른 상승 등 국내 건설 환경에 비추어 볼 때 건축 계획적 측면에서의 가변성, 시공 측면에서의 단순성과 편리함 또한 경제적 측면에서의 층고 절감에 따른 임대면적 증가, 공기단축 그리고 공사비 절감 등 다양한 측면에서 건축 구조물에 적용하기에 아주 적당한 시스템이라 할 수 있겠다.

아직까지 국내의 적용사례는 찾아보기 힘들만큼 보편화 되어있지 않지만 이미 일부 건설회사와 산하 연구소 등에서는 도입을 위한 기초 연구를 활발히 진행하고 있는바 빠른 시일 내에 국내에서도 미국 등 선진국과 마찬가지로 급격히 보편화 되고 활성화 될 것이라 판단된다.

참고문헌

1. ACI 318-95(1995), "Building Code Requirements for Reinforced Concrete", ACI.
2. PTI(Post-Tensioning Institute)5th, 2000, "Post-Tensioning Manual", PTI.
3. Theodore L. Neff, "Changing the Face of the Post-Tensioning Institute", Concrete international. January, 2003, pp.100~103.
4. Gail S. Kelley, "A Guide to the Components of an Unbobded Post-Tensioning System", Concrete international. January, 2003, pp.71~77.
5. Bijan O Aalami, Allan Bommer, "Desing Fundamentals of Post-Tensioned Concrete Floors", PTI.
6. Bijan O Aalami, "Load Balancing : A Comprehensive Solution to Post-Tensioning", ACI Structural Journal, V.87, November-December 1990, pp.662~670.
7. Bijan O Aalami, "Hyperstatic (Secondary) Actions In Prestressing and Their Computation", PTI Technical Notes, December 1998, pp.1~10.
8. PTI Guide Specification, "Desing, Construction and Maintenance of Cast-In-Place Post-Tensioned Concrete Parking Structures", PTI, 2001.