

특 집

|| 최신 프리스트레스트 콘크리트 ||

프리스트레스트 콘크리트 구조물의 활용현황과 전망

- State-of-the-arts of Prestressed Concrete(PSC) Structures -



오병환*

Oh, Byung Hwan



최영철**

Choi, Young Cheol

1. 서 론

20세기 산물인 프리스트레싱의 개념은 구조공학의 역사 중 가장 중요한 방향을 제시하였다. 그것은 공학자에게 구조물의 거동을 통제하는 능력을 주었고 건설에 대해 깊게 생각할 수 있도록 하였다. 프리스트레스트 콘크리트 구조물은 제2차 세계대전으로 인한 강재의 부족 등의 이유로 유럽을 중심으로 발전하였으며, 이후 급속한 발전을 거듭해 현재는 다른 형태의 구조물보다 비교적 폭 넓게 사용되고 있다. 프리스트레스트 콘크리트는 철근 콘크리트가 가지는 균열의 발생과 이로 말미암은 철근의 부식 등에 의한 내구성이 저하되는 약점을 보완할 수 있고, 부재의 단면도 철근 콘크리트보다 작게 구조물의 요구와 구조적 성능을 조화시켜 장대교량, 초고층 빌딩, 주차장, 격납구조물 등 폭 넓은 분야에 사용될 수 있다.

세계 각국의 추세를 보면 프리스트레스트 콘크리트 구조물은 안전성, 미관성, 사용성, 경제성, 유지관리성, 자연 및 환경과의 조화 등에서 탁월한 구조물로 받아들여지고 있다. 따라서 본고에서는 프리스트레스트 콘크리트의 발전과정과 기본적인 개념 및 PSC 구조물의 공학적 장점에 대해 기술하고, 세계적인 PSC 구조물의 건설현황과 함께 최근의 관심사인 PSC 구조물의 내구성에 대해 고찰하였다. 본고의 내용은 주로 실제 발표된 자료를 바탕으로 그대로 인용하여 객관적으로 작성하여 기술하였다.

2. 프리스트레스트 콘크리트

2.1 프리스트레스트 콘크리트의 발전과정

프리스트레싱의 기본원리는 수세기전 나무통(wooden barrel)을 만들 때 나무판에 "돌림띠(metal band)"를 두를 때부터 이용되어 왔다. 즉 <그림 1>과 같이 돌림띠에 의해 인장응력을 받는 상태가 되며, 목판 상호의 사이에는 압축응력이 작용하여 내부에 액체를 넣을 경우에 일어나는 후프텐션에 저항할 수 있게 된다. 이것이 가장 원시적 프리스트레싱 이론의 응용이다.

프리스트레스트 콘크리트는 강재에 미리 인장력이 가해진 철근 콘크리트의 일종이다. 강재의 인장력에 의해 도입되는 콘크리트의 압축력은 강도나 연성면에선는 훌륭하지만 인장력에 대해서 약하고 깨지기 쉬운 단점이 있는 콘크리트의 특성을 보완하여 콘크리트가 외부 하중에 대해 더 잘 견디도록 해준다. 프리스트레

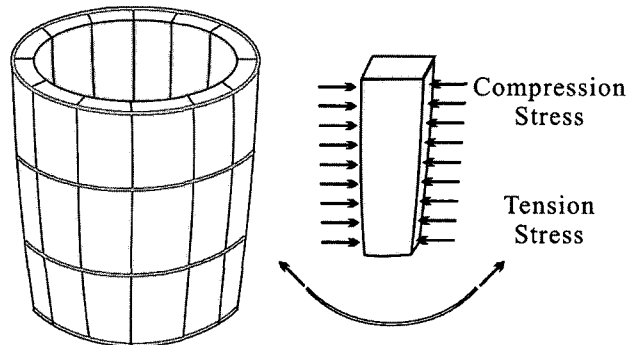


그림 1. Prestressing principle in circular prestressing

* 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 서울대학교 토목공학과 박사과정 수료

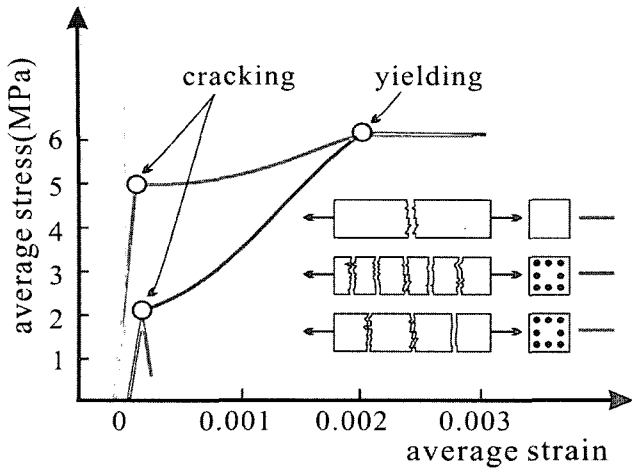


그림 2. Response of plain concrete, reinforced concrete and prestressed concrete

스트 콘크리트는 <그림 2>와 같이 구조물의 인장력에 대한 저항성을 크게 향상시켜 균열하중을 크게 증가시킬 수 있으므로 구조물의 사용성 면에서 상당한 장점을 지닌다. 그러나 1886년까지 앞에서 말한 원리는 콘크리트에 응용되지 않았다. 이 해에 P. H. Jackson은 바닥판에 사용하여 석재와 콘크리트 아치 사이에 배치한 강재를 긴장하는 방법으로 특허를 얻었으며, 1888년 C. E. W. Doehring은 Jackson과는 달리 슬래브에 하중을 가하기 전에 인장응력을 준 금속재료를 보강된 콘크리트 부재에 관한 특허를 얻었으나 특허에 준하는 시공법은 성공하지 못했다. 이는 최초로 주어진 강재의 인장응력이 작은 것이었으므로 콘크리트 건조수축, 크리프에 의해 미리 주어진 강재의 인장응력이 상쇄되었기 때문이다. 콘크리트의 건조수축, 크리프에 의해 일어나는 콘크리트의 구조물의 변형은 강재의 신장 보다 커질 때가 많다. 즉 처음에 일어난 강재의 신장 변형은 시간이 지남에 따라 감소되어 마침내 소멸된다. 결국 강재는 최초로 주어진 인장응력이 없어져 무응력 상태가 되어 콘크리트 부재에서는 처음에 주어진 압축응력이 없어진다. 1907년에 독일의 Koener, Lundt는 설계하중이 작용되었을 때 콘크리트 보의 인장응력이 허용응력 이하가 되도록 미리 볼트에 인장력을 주어 프리스트레스트 콘크리트 보를 제작하여 시험을 수행하였다. 제작 직후 실험 결과는 균열하중도 커졌으나 수 개월 지난 후의 실험결과에서는 균열하중의 증가가 거의 발생하지 않았다.

1908년에 미국의 C. R. Steiner는 콘크리트의 건조수축이 끝난 다음에 볼트를 다시 긴장시켜 인장응력을 보충하는 방법을 제안하였으며, 1925년에 네블스카의 Dill은 고강도 강재 볼트를 사용하여 콘크리트와의 부착이 일어나지 않도록 피복하여 콘크리트 부재속에 매입한 후에 인장응력을 볼트에 주었다. 이것을 너트에 의해 콘크리트 부재단에 정착하는 방법을 생각했다. 그러나 그 당시에는 주로 경제적인 이유로 실용화되지는 않았다.

최근의 프리스트레스트 콘크리트의 발전은 1928년에 프랑스

의 Eugene Freyssinet가 프리스트레스트 콘크리트를 위해 고강도 철근을 사용했을 때 시작되었다고 말할 수 있다.

고강도 철근은 프리스트레싱 과정에서 부재의 0.7% 정도까지 늘릴 수 있다. 크리프와 수축으로 인해 0.1% 정도 수축한다고 해도 0.6% 정도가 강재에 프리스트레싱 되어 있기 때문에 프리스트레스트 콘크리트의 역할을 충실히 수행할 수 있었다. 크리프와 수축으로 인한 손실을 줄이고 프리스트레싱을 높은 수준으로 유지하기 위해 Freyssinet는 고강도 철근뿐 아니라 고강도 콘크리트를 선택하였으며, 이러한 프리스트레스트 콘크리트의 잠재성을 증명하기 위해 Freyssinet는 1936년 런던에서 프리스트레스트 콘크리트 파이프에 물을 가득 채워 14 MPa의 내부압력을 받도록 하는 실험을 하였으며 그 결과 프리스트레스트 콘크리트 파이프는 고품질의 일반 철근 콘크리트 파이프에 비해 10배나 큰 내부압력을 받을 수 있음이 증명되었다. Freyssinet는 "A Revolution in the Technique of the Utilisation of Concrete" 이라는 제목의 논문에서 이러한 사실들을 발표하였다. Freyssinet은 PS 강재와 콘크리트의 부착에 의한 프리스트레스트를 준 프리텐셔닝의 방법에 대해서 말하고 있지만, 이것을 최초로 응용한 것은 독일의 E. Hoyer이다.

프리스트레스트 콘크리트가 광범위하게 이용된 것은 1939년에 Freyssinet가 정착용 콘 및 PS 강재를 긴장시키기 위한 책을 고안하고 나서였다. 즉 이들의 이용으로 경제적인 프리스트레싱이 가능하게 되었던 것이다. 1940년에 벨기에의 G. Magnel은 2개의 PS 강재를 동시에 긴장시켜 이것을 강재의 뼈기로 정착했다. 이 해부터 프리스트레스트 콘크리트의 중요성이 인정되었으며 특히 유럽에서 제2차 대전으로 강재가 부족하여 상당히 발전하게 되었다.

프랑스, 벨기에가 프리스트레스트 콘크리트 발전의 개발자이였지만 계속해서 독일, 영국, 폴란드, 스웨덴 등에서도 각각 독특한 방식의 프리스트레스트 콘크리트가 발달하게 되었다. 조사자료에 의하면 1949~1953년 사이에 독일에서 건설된 약 500 개의 콘크리트 교량 중 350 개의 교량이 프리스트레스트 콘크리트 교량이고 나머지가 철근 콘크리트 교량이다.

북미지역의 경우 이러한 발전과정을 거친 후 프리스트레스트 콘크리트 산업은 어마어마하게 성장했고 최근에는 연간 세계소비량의 25%인 20만 톤의 PS 강재가 북미지역에서 사용된다. 현

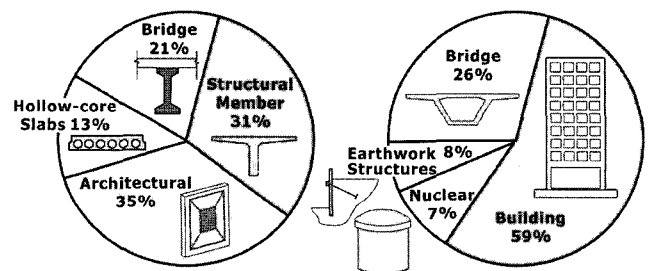


그림 3. Application of prestressed concrete in North America

재 북미지역에서 프리스트레싱 철근의 2/3는 프리캐스트, 프리텐션 부재에 쓰이고, 1/3은 포스트텐션 부재에 쓰이고 있다. <그림 3>에 나타나 있듯이 프리캐스트 구조물의 65%는 빌딩이나 교량과 같은 구조물에 쓰이고, 나머지는 예술작품에 쓰이고 있다. 또한 포스트텐션 강재의 59%는 빌딩에 쓰이고 26%는 교량에 쓰이고 있다. 북미지역을 제외한 세계 다른 지역에서는 66%가 교량건설에 쓰이는 등 다른 패턴을 나타낸다.

우리나라의 경우 프리스트레스트 콘크리트를 처음 알게 된 것은 외국의 문헌과 외국 시찰을 통해서이며, 1950년 초부터 논의되기 시작했다. 당시 RC 침목의 개발에 주력해 오던 교통부는 PSC 침목 제작에 눈을 돌리게 되어 PSC 침목을 제작하였다. 그 이후 프리스트레스트 콘크리트가 현저하게 발전하였으며 특히 교량에 대한 적용은 놀라운 추세를 나타내고 있다.

2.2 프리스트레스 콘크리트 기본 개념

철근 콘크리트의 기본개념은 인장응력이 발생할 곳에 철근을 배근하는 것이다. 프리스트레스트 콘크리트는 고강도 강재가 사용되고, 이러한 강재는 외부하중이 주어지기 전에 미리 인장을 가한다. 이렇게 강재에 미리 가하는 인장력은 주변 콘크리트에 미리 압축력을 가하게 되어 콘크리트가 균열 전에 더 큰 하중에 견딜 수 있게 해준다.

<그림 4>는 프리스트레스트 콘크리트와 철근 콘크리트의 거동을 비교하고 있다. 일반적으로 철근 콘크리트는 외부 하중이 주어지기 전에 철근이나 콘크리트에 어떠한 응력도 가하지 않았기 때문에 프리스트레스트 콘크리트에 비해 상대적으로 작은 외부하중에 의해 균열이 시작되고 균열 발생시에 철근에 가해지는 인장응력과 콘크리트에 가해지는 압축응력은 매우 작다. 일단 균열이 발생하면 철근의 인장응력은 급속히 증가하고 하중이 증가할수록 비례하여 증가한다. 파괴 시에는 철근에는 비교적 높은 인장응력이, 콘크리트에는 비교적 높은 압축응력이 작용한다.

<그림 4>에서 보듯이 프리스트레스트 콘크리트는 프리스트레싱에 의해 강재와 콘크리트 사이의 응력 평형을 이루어 강재에 큰 인장응력을 발생시키고 콘크리트에는 그에 해당하는 압축응력이 발생하게 된다. 외부하중이 주어지기 전에 큰 압축응력이 콘크리트에 존재하기 때문에 철근 콘크리트 부재보다 상당히 큰 외부하중에 의해 균열이 발생한다.

철근 콘크리트는 부과된 응력을 단지 수동적으로 수용해야 하지만 프리스트레스트 콘크리트는 엔지니어에 의해 강재의 응력과 구조물의 변형을 주도적으로 조절할 수 있는 특징이 있다.

2.3 프리스트레스트 콘크리트의 장점

프리스트레스트 콘크리트는 강재와 콘크리트가 모두 높은 응력 상태에 있기 때문에 고강도 재료를 사용한다. 또한 프리스트레스

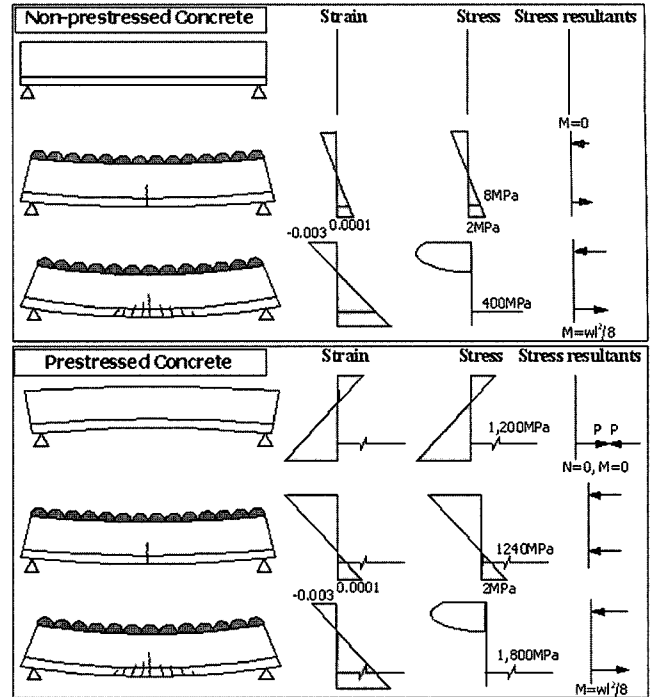


그림 4. Behavior of non-prestressed and prestressed concrete

트 콘크리트는 외부하중에 대해 단면 전체를 유효하게 이용할 수 있어 인장측의 콘크리트를 무시하는 철근 콘크리트와 현저하게 다른 점이다.

PS 강재를 구부러 배치하거나 곡선으로 배치한 경우 콘크리트 단면에 작용하는 전단력을 현저하게 감소시킬 수 있고, 또 부재 축 방향으로 작용하는 프리스트레세에 의한 사인장응력을 상당히 줄일 수 있어 철근 콘크리트에 비교해서 복부의 단면치수를 줄일 수 있다.

철근 콘크리트에서는 고강도 콘크리트의 사용은 단면을 줄일 수 있으나 철근량이 증가하여 비경제적이 되지만 프리스트레스트 콘크리트에서는 고강도 강재의 큰 허용응력을 이용할 수 있어 철근량 및 전체적인 부재의 단면을 줄일 수 있게 된다.

다음은 철근 콘크리트에 대한 프리스트레스트 콘크리트의 장점을 개략적으로 정리한 것이다.

- 1) 프리스트레스트 콘크리트에서는 균열이 발생하지 않도록 설계되어 있으며 강재 부식의 위험성이 적으므로 내구성이 크며, 균열이 발생하여도 철근 콘크리트보다 훨씬 탄성적이고 복원성이 크므로 하중을 제거시키면 균열은 완전히 없어져 사용성에 있어 상당한 장점을 지니며 충격하중, 반복하중 등에 대한 저항력도 철근 콘크리트에 비해 크다.
- 2) 프리스트레스트 콘크리트에서는 전 단면을 유효하게 이용하므로 단면치수는 현저하게 작아져 얇게 함으로써 미적 요구를 만족시킬 수 있다.
- 3) 프리스트레스트 콘크리트의 처짐량은 작고, 프리스트레싱에 의한 솟음 때문에 사하중을 받을 때의 처짐도 적다. 이

는 특히 내민 부분을 갖는 구조물의 경우 상당한 장점이 된다. 또 균열이 발생하지 않으므로 단면 2차 모멘트는 균열을 발생한 단면의 경우에 비교해서 2~3배 되므로 활하중에 의한 처짐도 작아진다.

- 4) 프리스트레스트 콘크리트 구조물은 안전도가 크다. 프리스트레스트 콘크리트에서는 프리스트레싱 때에 최대응력을 콘크리트와 강재가 받는다. 프리스트레싱 작업은 실재로 응력을 도입하도록 재하한 것이므로 이 때 안전하게 하였다면 보통의 사용하중 범위 내에서는 충분히 안전하다고 볼 수 있다.
- 5) 프리스트레스트 콘크리트 부재는 파괴전의 특징이 뚜렷하다. 이것은 구조물의 안전도에서는 중요한 성질이다.

2.4 프리스트레스트 콘크리트의 분류

프리스트레스트 콘크리트 구조물은 설계 및 시공 방법에 따라서 다음과 같이 분류할 수 있다.

2.4.1 내적 또는 외적 프리스트레싱

보통 사용되는 것은 주로 내적 프리스트레싱 방법, 즉 내부 부착 텐던(internal tendon)을 콘크리트 부재 속에 배치하여 긴장하여 정착하는 방법이다. 그리고 <그림 5>과 같이 콘크리트 부재 외부에 외부 부착텐던(external tendon)을 배치하여 프리스트레싱을 도입하는 방법을 외적 프리스트레싱이라고 한다. 외적 프리스트레싱은 처음에는 기존 구조물의 보강에 주로 사용되어 왔지만, 최근에는 외부 부착텐던만으로 프리스트레스트를 도입하여 구조물을 만드는 경우도 많아졌다. 또한 내부 긴장재와 외부 긴장재를 병용하는 경우도 있다.

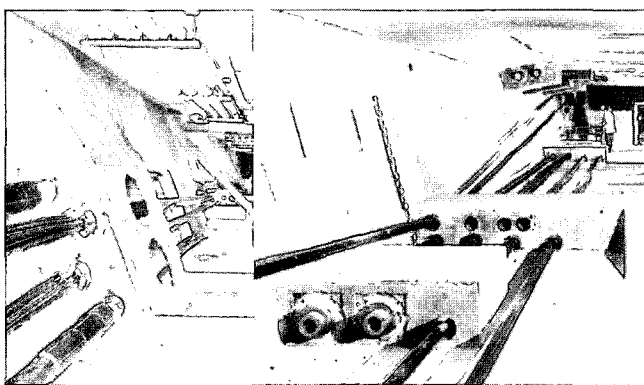


그림 5. External tendon

2.4.2 프리텐셔닝과 포스트텐셔닝

프리텐셔닝이란 <그림 6>에서 같이 콘크리트를 치기 전에 PS 강재를 긴장시켜 두는 경우이다. 따라서 일시적으로 PS 강재를 긴장시켜 두기 위한 아버트먼트(abutment) 또는 인장받침대가 필요하다. 이러한 설비를 사용하여 PS 강재를 긴장시켜 놓고 콘

크리트를 타설하고 충분한 강도에 달했을 때 인장받침대 또는 아버트먼트와 PS 강재의 정착을 풀어서 콘크리트에 프리스트레스트를 도입한다. 이 방법은 프리캐스트 공장에서 주로 사용되는 것이지만 현장에서 PS 강재를 긴장시켜 두는 아버트먼트가 경제적으로 건설할 수 있을 때는 현장에서도 이용된다. 포스트텐셔닝은 콘크리트가 경화된 다음 긴장재를 긴장하는 방법이다. 따라서 프리스트레싱은 경화된 콘크리트에 대해서 실시되며, 긴장재는 프리스트레싱을 준 직후 콘크리트 부재에 정착된다. 이 방법은 프리캐스트 부재에도 또 현장타설 부재 어느 것에도 적용할 수 있다.

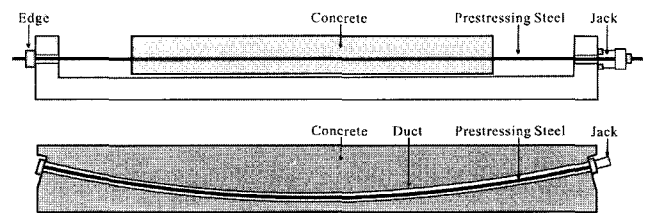


그림 6. Pre-tensioning and post tensioning

2.4.3 단정착장치가 있는 프리스트레싱 또는 단정착장치가 없는 프리스트레싱

포스트텐셔닝은 일반적으로 긴장재에 프리스트레스트를 주기 위해 그 양단에서 기계적 정착 장치에 의해 콘크리트 부재에 정착되는 것이다. 이러한 긴장재를 단정착장치가 있는 긴장재(enchanchored tendon)라고 하고, 이러한 부재를 단정착이 있는 부재라고 한다. 때로는 프리스트레싱 직후에 기계적 단정착장치를 사용하여 고정시킨 후 그라우팅을 실시해서 긴장재를 부착시켜 콘크리트에 정착시킨 후 단정착장치를 제거하는 경우도 있다.

프리텐셔닝에서는 PS 강재와 콘크리트와의 부착으로 콘크리트에 정착되며 이에 필요한 길이를 전달길이(transfer length)라고 한다(<그림 7>). 이 경우 정착 유효성은 PS 강재의 직경, 표면 상황, 콘크리트의 압축강도, PS 강재의 인장응력 등에 관계되는 것이다. 일반적으로 가는 PS 강재의 경우에 한정된다.

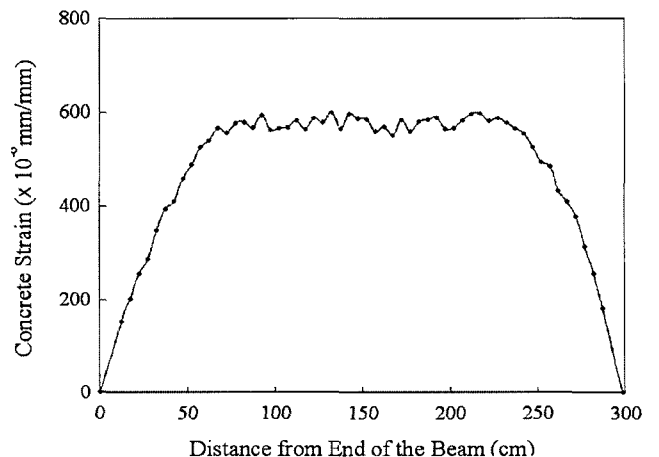


그림 7. Transfer of prestressing in pre-tensioned member

2.4.4 부착 프리스트레스트 콘크리트 및 비부착

프리스트레스트 콘크리트

부착 프리스트레스트 콘크리트란 긴장재가 길이에 따라서 콘크리트와 부착하는 경우를 말한다. 단정착장치를 사용하지 않은 프리텐션 부재는 필연적으로 부착시킨 부재라고 할 수 있다. 단정착장치를 사용하는 프리스트레싱에 의하는 경우, 긴장재를 콘크리트에 부착시키기도 하고 부착시키지 않을 때도 있다. 부착시킬 때는 그라우팅을 실시하고, 부착이 없을 때는 긴장재의 녹방지에 대해서 충분히 고려할 필요가 있다. 일반적으로 비부착 프리스트레스트 콘크리트는 부착이 있는 경우에 비교해서 파괴 휨모멘트가 적다.

2.4.5 완전 프리스트레싱과 부분 프리스트레싱

콘크리트 부재에 주는 프리스트레스의 정도에 따라서 완전 프리스트레싱과 부분 프리스트레싱으로 분류된다. 사용하중을 받을 때 전단면에 대해 인장응력이 생기지 않도록 프리스트레스를 주는 경우 완전 프리스트레싱이라고 한다. 하지만 전체 사용하중이 작용했을 때는 완전 프리스트레싱이 되지만, 프리스트레스를 도입한 직후에 자중뿐인 경우는 상연에 작은 인장응력역을 일으키는 경우도 있으며, 이와 같은 경우에는 일시적으로 부분 프리스트레싱의 상태에 있다. 하지만 이러한 경우에도 완전 프리스트레싱으로 하는 것은 비경제적이기 때문에 전체 사용하중이 작용한 다음에 완전 프리스트레싱이 되게끔 설계하는 것이 바람직하다. 이와 같이 프리스트레스를 준 직후 일시적으로 짧은 기간만 부분 프리스트레싱이 되는 것을 허용하며, 이 때 일어나는 작은 인장응력을 받기 위해서는 철근을 배치하는 경우가 있다.

이상과 같은 이유로 완전 프리스트레싱, 부분 프리스트레싱의 구별을 하나의 구조물에 대해서 명확하게 하는 것이 곤란한 경우가 있다. 또 보통의 사용하중에 대해서는 완전 프리스트레싱 일지라도 특별히 큰 하중이 작용할 때는 부분 프리스트레싱이 되도록 설계를 할 때도 있다. 특히 부분 프리스트레싱으로 부재의 인장응력이 주어진 허용응력을 넘지 않도록 설계한 경우에는 제한 부분 프리스트레싱이라고 한다. 물론 부분 프리스트레싱이라고 해서 무제한으로 인장응력을 허용하면 대단히 큰 균열을 발생하게 되어 프리스트레스트 콘크리트로서의 의의가 없어진다.

완전 프리스트레싱, 부분 프리스트레싱의 설계는 최대 사용하중이 작용하는 빈도, 구조물의 사용 목적, 구조물의 경제성 등에 관계되는 것으로 이러한 점을 고려하여 설계를 하여야 한다.

3. 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 내구성

전세계적으로 해수, 제설제, 황산염 및 오염물질 같은 열악한 환경에 노출된 콘크리트 구조물에 대한 내구성에 대한 관심이 높아지고 있다. 부식 환경에서 프리스트레스트 콘크리트 구조물은 <그림 8, 9>에서와 같이 철근 뿐만 아니라 텐던의 부식을 야기할

수 있다. 이러한 텐던의 부식은 구조물의 사용성 뿐만 아니라 안정성에도 영향을 미치므로 이에 대한 대책연구가 절실히 필요한 상태이다. 또한 <그림 9>에서와 같이 시공상의 문제로 그라우팅이 제대로 이루어지지 않아 공극이 생기면 이는 텐던의 부식 등 여러 문제를 야기할 수 있으므로 상당히 신경을 써야 되는 부분이다. 1989년 미국 ACI Building Code는 내구성에 대한 새로운 장을 만들었으며, 비부착 텐던에 대한 부식 방지 기준을 제시

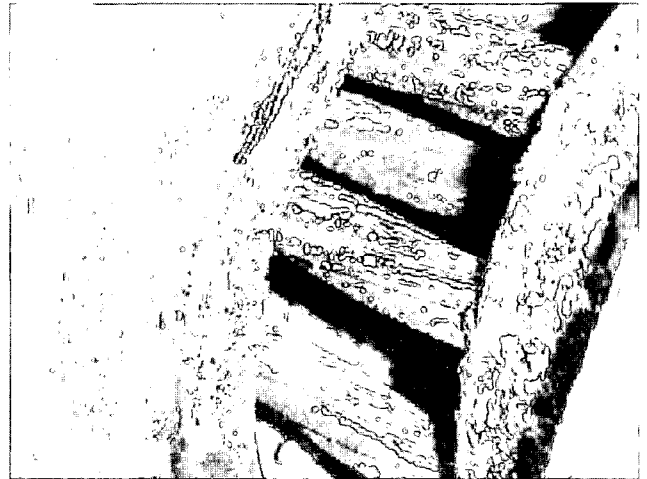


그림 8. Corrosion of tendon and anchorage

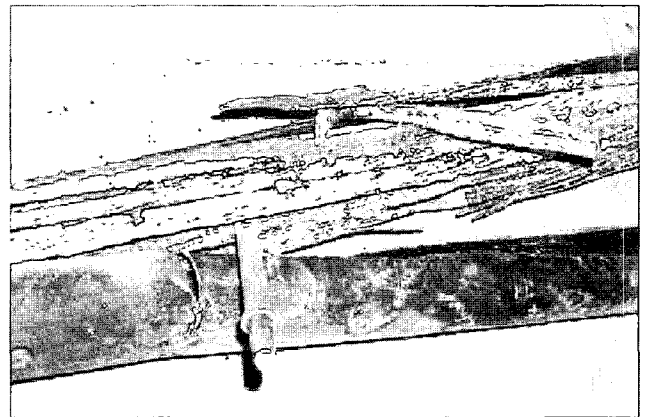


그림 9. External tendon corrosion

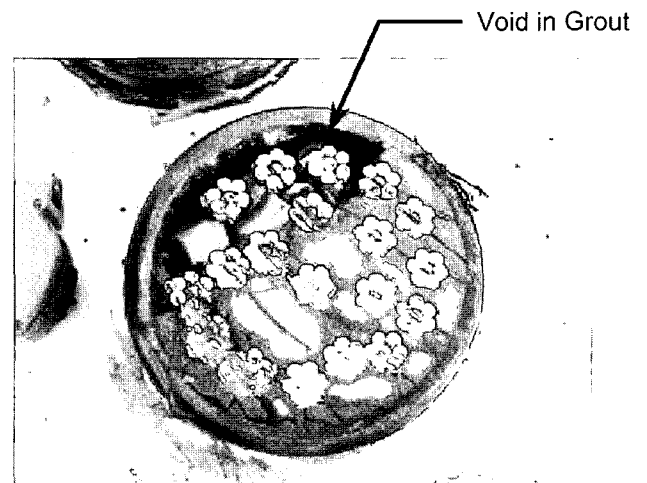


그림 10. Void in grout

하였다. 부식되기 쉬운 환경에서 사용되는 비부착 텐던은 캡슐화 시켜 그리스(grease) 등에 의해서 보호되어야 한다. 그리고 Canadian Standard Association은 주차 구조물의 내구성에 대해 엄격한 기준을 마련했다.

프리스트레스트 콘크리트의 부식에 대한 방지는 초기에 콘크리트의 질을 향상시켜 부식에 대한 저항성을 높이고자 하였으나 전기적으로 절연된 텐던, 플라스틱 덕트(duct) 및 향상된 그라우팅의 사용으로 장기적인 측면의 유지관리 비용을 줄일 수 있다고 보고되고 있다. Schupack과 Suarez는 절연플라스틱으로 정착구 및 텐던을 캡슐화 시키는 방법을 개발하였으며 주차구조물에 적용하였다. 그는 정착구 및 텐던을 캡슐화하여 부식에 대한 피해를 없애는 비용이 전체 건축비용의 1%에 불과하여 장기적인 유지관리 측면으로 볼 때 경제적으로 상당히 매력적이라고 보고했다.

최근의 괄목할만한 발전은 Florida Wire and Cable Company의 에폭시 수지로 코팅된 강연선을 개발하고 상용화 시킨 것이다. 이러한 에폭시 코팅은 그리트(grit)를 만들어 부착 특성을 향상시켜 일반 강연선보다 정착길이(development length) 및 전달길이(transfer length)에 대해 보다 나은 특성을 발휘 할 수 있다.

최근의 NCHRP 연구 결과는 에폭시 코팅된 강연선은 크리프(creep)에 대해서 상당히 뛰어난 특성을 가지며 프리텐션 및 포스트텐션 구조물에 대해서 부식에 대해서 상당히 뛰어난 장점이 있다고 보고하고 있다. 에폭시 코팅된 강연선은 일반 강연선에 비해서 두 배의 비용이 들지만 부식에 대해서 열악한 환경에 대해서는 매우 유용하며, 대량 생산이 이루어진다면 그 비용은 점차적으로 줄어들 것이다. 하지만 에폭시 코팅은 높은 온도하에서는 그 기능을 제대로 발휘하지 못하므로 열을 많이 받는 구조물에 대해서는 제한 할 필요가 있다.

4. 프리스트레스트 콘크리트의 건설현황

4.1 교량 구조물에서 프리스트레스트 콘크리트

전 세계적으로 프리스트레스트 콘크리트 교량의 건설은 낮은 초기 비용과 관리비용으로 지속적으로 증가하고 있다.

미국의 경우 GNP 대비 도로 건설비용의 비중은 황금기였던 1960년대에 비해 훨씬 떨어졌으나 교량건설에 들어가는 비용은 점점 늘어나고 있다. <그림 11, 12>는 교량 건설에 있어서 다른 타입에 비해 프리스트레스트 콘크리트 교량건설이 건설되는 교량의 약 50% 정도를 차지할 정도로 현저하게 증가하고 있음을 보여 준다. 최근 프리스트레스트 콘크리트 교량 장점을 이용하여 보통의 경간길이나 어느 정도 장대교량의 철근교량을 프리스트레스트 콘크리트 교량으로 대체해 나가고 있다.

이에 대한 최고의 예는 Ontario's Burlington Skyway Bridge<그림 13>으로 새로운 프리스트레스트 콘크리트 교량이 기존

의 철근 교량 옆에 쌍둥이처럼 시공되었다. 북미에서는 교량에 대한 몇 가지 새로운 흥미로운 구조 개념이 개발되었다. Arthur Anderson 박사에 의해 최초로 소개된 bulb-T형 단면 <그림 14>이 적당한 경간 길이에서 AASHTO 단면과 비교할 때, 휨 효율성을 개선한 최적의 PCI 단면으로 보고되고 있다. <그림 15>에서 보면 bulb-T 단면이 경간길이 25m에서 45m에서는 AASHTO 단면에 비해 건설비용에 상당히 경제적인 것을 알 수 있다.

프리스트레스트 콘크리트 교량의 구조시스템에서 가장 주목해야 할 점은 세크멘탈 교량과 사장교의 증가 현상이다. 이러한 교량

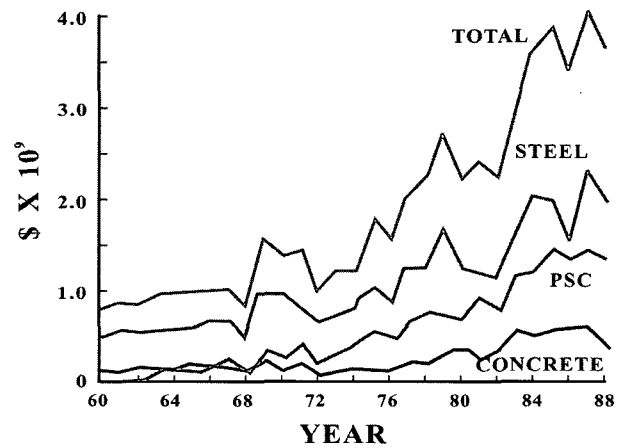


그림 11. Bridge construction cost in the United States

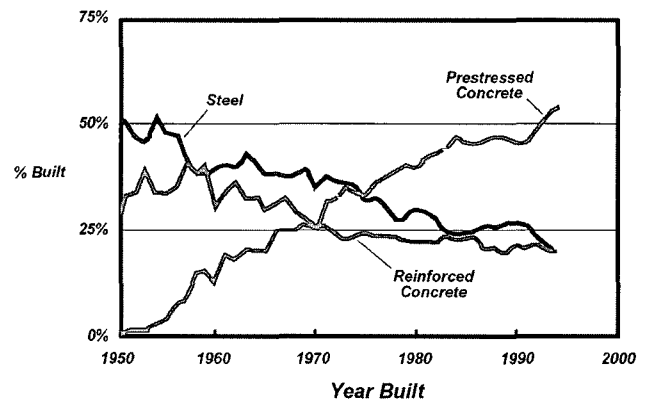


그림 12. Percentage of bridges built annually with three major construction materials

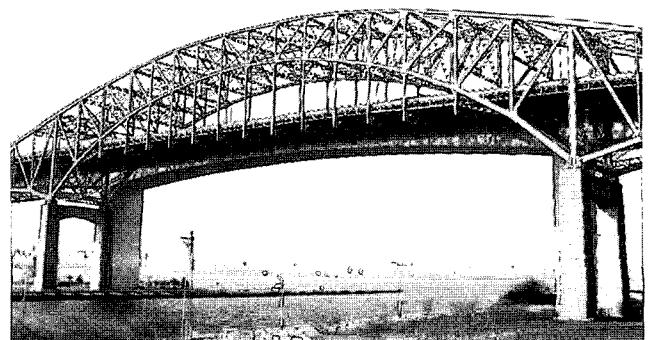


그림 13. Ontario's Burlington Skyway Bridge

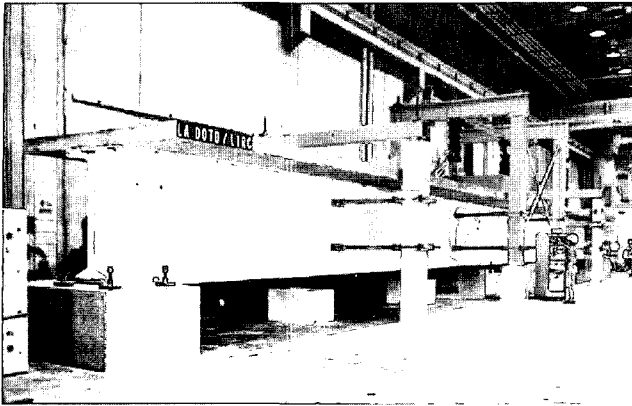


그림 14. Bulb-T type girder

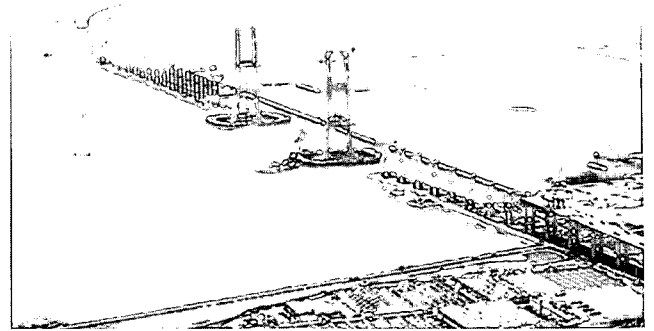


그림 16. Seohae grand bridge

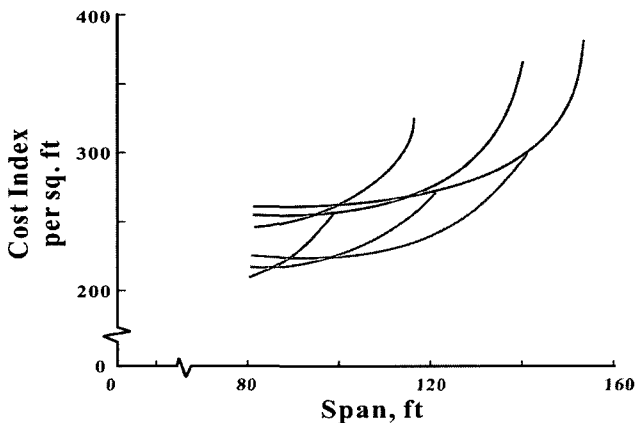


그림 15. Bulb-T cost comparison

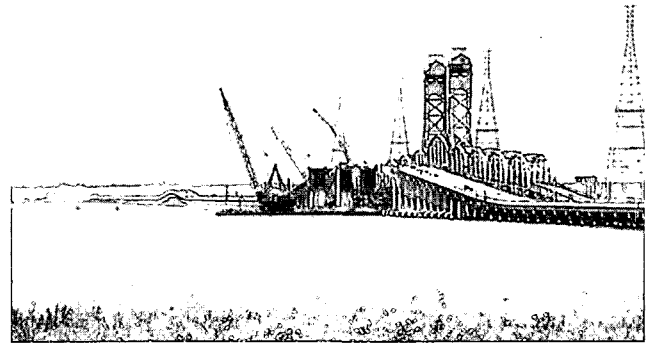


그림 17. James River Bridge

형식에 대한 구조 개념과 시공방법은 상당한 발전을 이루었다.

미국의 경우 ASBI(American Segmental Bridge Institute)라는 새로운 기관이 설립하여 설계 및 건설 기술발전을 촉진시키며 설계, 시공업자들에게 정보은행 같은 역할을 하고 있다. 그리고 PTI(Post Tensioning Institute)에 의해 이해하기 쉽고 새로운 설계 및 시공 가이드라인, 세그멘탈 콘크리트 교량에 대한 설계 및 시공 규정 등을 개발하여 AASHTO에 잠정적인 표준에 적용되어 이러한 기술에 대한 갈등과 혼선을 많이 줄였다.

우리나라의 경우 최근에 시공된 교량 중 대표적인 예는 서해대교(그림 16)이다. 서해대교의 교량형식은 주탑을 중심으로 세워지는 사장교와 미리 만들어진 콘크리트 상판을 차례로 얹어 있는 PSM교(연속 콘크리트 상자형교), FCM교(장경간 콘크리트 상자형교) 등 3개의 건설공법이 혼합되어 있다. 다리의 총 길이 중 사장교는 990 m이고, PSM교 5,820 m, FCM교 500 m이다. 서해대교는 주변의 경관과 잘 어우러져 미관의 아름다움과 함께 경제성을 고려한 대표적인 프리스트레스트 콘크리트 교량이라고 할 수 있다.

외부긴장재(external tendon)는 교량에 다양하게 적용될 수 있다. 최근의 많은 프로젝트들은 콘크리트 구조물의 연성을 개선하고 지진에 대한 저항성을 증가시키기 위해 외부와 내부 긴장재를 동시에 사용한다. 이러한 개념으로 시공된 교량은 Richmond의

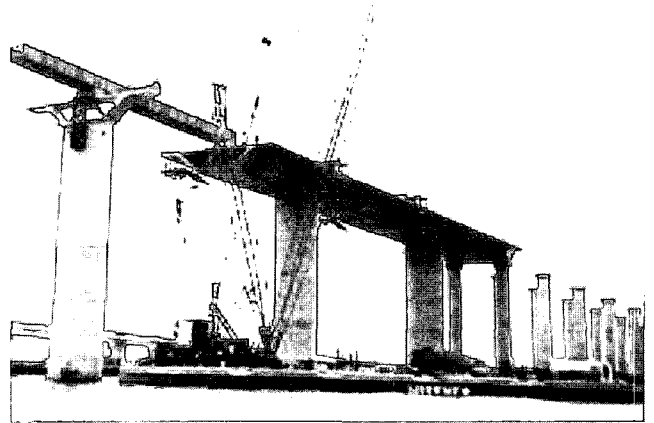


그림 18. Erection of The Sunshine Skyway bridge

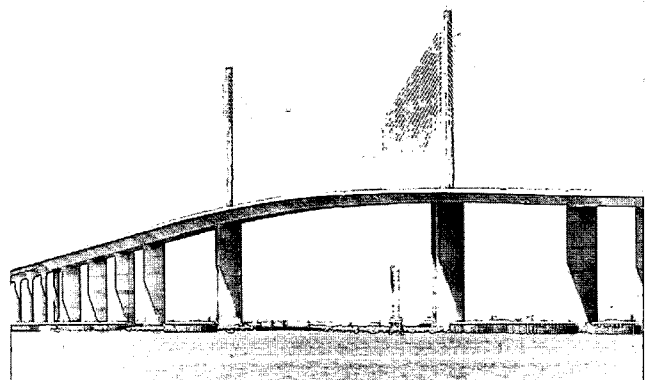


그림 19. The front view of The Sunshine Skyway bridge

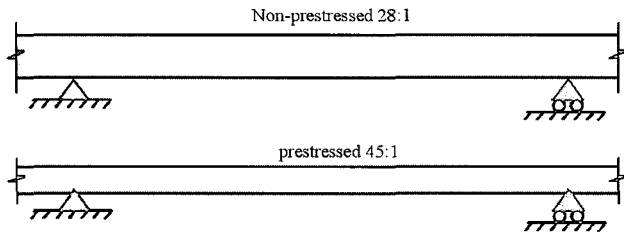


그림 20. Typical span-to-depth ratios of prestressed and non-prestressed one-way slabs

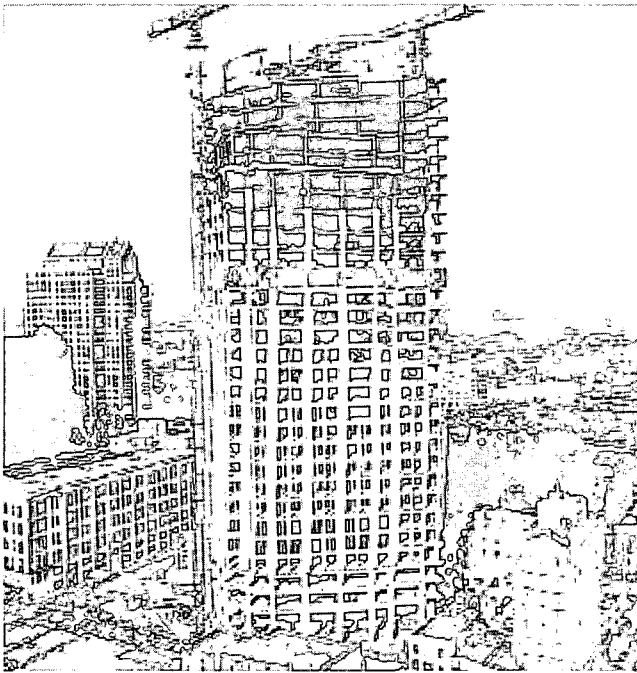


그림 21. JLL Financial Center and Parking Structure using precast, prestressed concrete

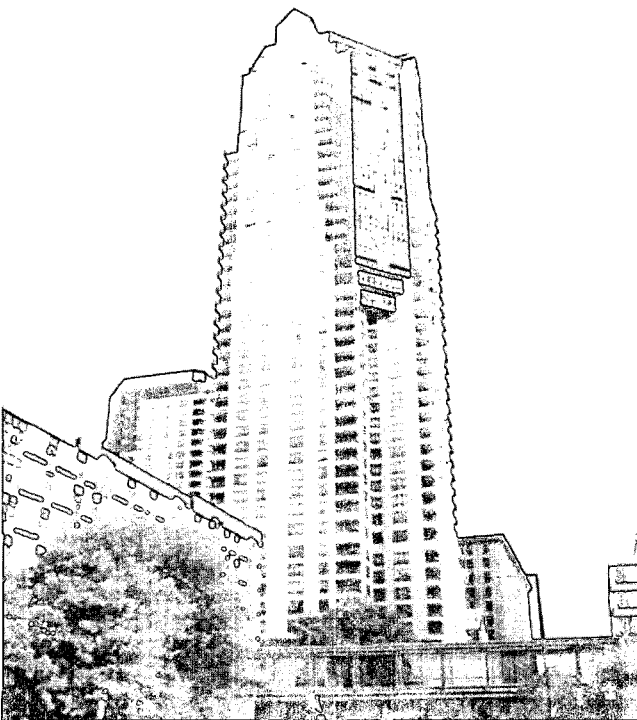


그림 22. Galtier Plaza, Minneapolis, a 30-story apartment tower, a 46-story condominium tower, and parking and commercial areas of post-tensioned floor slabs

James River Bridge <그림 17>이다. 이 교량은 프리캐스트 콘크리트 단 박스거더가 시공되고 이후 프리캐스트 콘크리트 델타 프레임에 의해 연결하여 케이블 지주 평면에 부착되는 시스템이다.

플로리다 서쪽 해안의 The Sunshine Skyway Bridge <그림 18, 19>는 Figg Muller Engineers에 의해 설계되었는데, 이는 진정한 아름다움과 구조적인 효율성이 결합된 멋진 예이다. 이 교량은 미국의 주요관광지에 속할 만큼 광범위한 관심을 받고 있다.

4.2 빌딩 구조물에서의 프리스트레스트 콘크리트

프리스트레싱은 사용하중 상태에서 균열을 최소화하고, 처짐을 제어하기 위해서 사용하기 때문에 더욱 슬랜더 (slender)한 건축물을 가능하게 해준다. 프리스트레스트 일방향 슬래브는 일반 철근 콘크리트의 길이-깊이 비인 28 : 1 보다 60%나 더 큰 45:1의 비율을 가질 수 있다(그림 20). 따라서 타설할 때 프리스트레스트 슬래브는 철근 콘크리트에 비해 2/3 정도 적은 양을 사용하므로 자중을 줄일 수 있으며 미적효과도 높일 수 있다.

대부분의 주차시설물은 부식환경하에 있기 때문에 균열을 조절할 수 있는 건축재료가 필요하다. 프리캐스트 프리스트레스트 건축재료는 공장제작의 특성 때문에 규격을 미세하게 조절할 수 있는 고품질의 콘크리트 구조물을 생산할 수 있어 주차구조물에 많이 사용되고 있는 상태이다. <그림 21>은 프리스트레스트 콘크리트의 최신 기술을 접합시켜 만든 주차시설을 보여주고 있다.

건축물에 대한 프리스트레스트 콘크리트는 품질과 경제성뿐만 아니라 중요한 미적인 면에서도 어필할 수 있는 장점이 있다. Bristol Towers Condominium <그림 22>은 이러한 점을 보여주는 좋은 예이다. 이 빌딩은 기초, shoring tie-back, 빔, 슬래브 및 flat plate에 포스트텐셔닝을 이용하여 제작하였으며 프리캐스트 프리텐션 중공 슬래브와 70 MPa의 압축강도를 갖는 기둥을 결합하여 건축적으로 미적요구와 구조적인 장점을 지닌 구조물이라 할 수 있다.

4.3 다른 구조물에서의 프리스트레스트 콘크리트

일반 철근 콘크리트 건축물은 극한하중을 받기 전에 심각한 변형을 발생시키지만 프리스트레스트 콘크리트 구조물은 심각한 변형 없이 하중을 받을 수 있다. 프리스트레싱은 엔지니어가 하중의 분배와 건축물의 변형을 주도적으로 조절할 수 있기 때문에 어려운 기초문제를 해결하는데 광범위하게 사용되어왔다. 1936년에 Freyssinet는 프리스트레스트 콘크리트로 만든 실린더모양의 구조는 누수 없이 상당한 내부압력을 버틸 수 있음을 보여주었다. 이러한 이론을 뉴욕의 Preload Company가 채용하여, 포스트텐셔닝 프리스트레스트 콘크리트 탱크를 만들기 위해 특별히 wire-winding 기계를 개발했다. 그리하여 2,000개가 넘는 프리

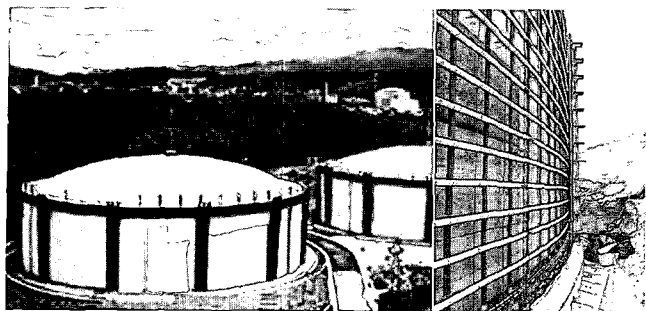


그림 23. Water storage tank and prestressing

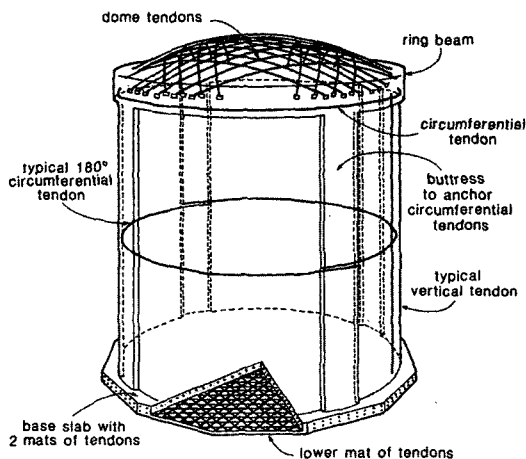


그림 24. Prestressed concrete containment structure for nuclear power plant

스트레스드 콘크리트 탱크(그림 23)가 건설되었고 현재 물탱크는 원주방향으로 포스트텐션되거나 프리텐션 된 콘크리트 재료를 사용해 건설된다. 프리스트레스드 콘크리트는 큰 압력에 견딜 수 있기 때문에 원자로의 안전격납고(그림 24)에 사용되고 있다.

이러한 프리스트레스드 콘크리트 구조물은 방사능 사고가 발생했을 때 최후 방어선으로 사용된다.

텔레비전 방송이나 라디오방송, 극초단파 수신에 사용되는 길고 가는 탑들에 사용되는 프리스트레스드 콘크리트는 앞에 사용된 것과는 사뭇 다른 종류이다. 토론토에 있는 CN 타워(그림 25)의 경우 450 m 길이의 포스트텐션 긴장재를 약 3 m 정도 신장시켜 프리스트레싱을 도입하여 사용하였고, 이 탑에는 약 1,000 톤의 포스트텐셔닝 강재가 사용되었다. 또한(그림 26)은 스탠드와 스탠드 하부를 프리캐스트 프리스트레스드 콘크리트를 이용하여 건설한 수원 월드컵 경기장이다.

천연가스나 석유를 시추하려면 해안에서 떨어진 곳에 플랫폼(그림 27)을 건설해야 한다. 북해에서는 그러한 40여개의 플랫폼이 100 m가 넘는 깊이의 바다 가운데 서있고, 이 중 약 15개는 프리스트레스드 콘크리트를 사용한 플랫폼이다. 이 플랫폼은 330 m가 넘는 깊이의 물에서도 사용할 수 있게 설계되었다. 또한 이런 플랫폼들은 정해진 장소에 떠있어야 하기 때문에 일반 철근 콘크리트로 만든 플랫폼보다 무게면에서 장점을 가지고 있다. 그래서 이러한 곳에는 고강도 콘크리트와 고강도 철근이 사

용된다. 이러한 플랫폼은 상대적으로 비교적 적은 숫자가 건설되었지만 각 플랫폼에 들어간 비용만큼은 엄청나다. 예를 들어 Gullfaks C(그림 28)를 지지하는 24개의 하부 돔의 경우 각각 1,500 m³의 콘크리트를 사용하고, 600 톤의 일반 철근과 70 톤의 프리스트레싱 강재를 사용하고 있다. 전체 플랫폼으로 따져보면 25만 m³의 콘크리트를 사용했다.

5. 결 론

본 소고는 최근 건설이 늘어나고 있는 PSC 구조물의 발전과정과 기본적 개념 및 RC 구조물에 대한 상대적인 장점을 기술하였고 세계적인 건설현황과 최근 관심사인 PSC 구조물의 내구성에 대해 기술하였다. 또한 본고에서는 최근의 세계 주요국가의



그림 25. CN Tower

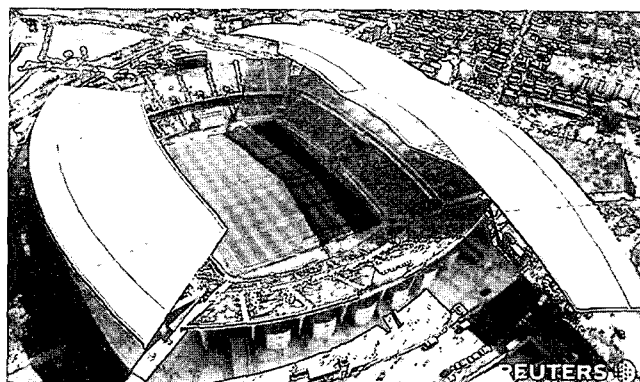


그림 26. Suwon worldcup stadium

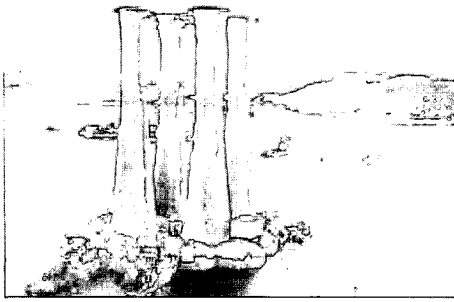


그림 27. Tow-out of the concrete structure of a Condeep platform

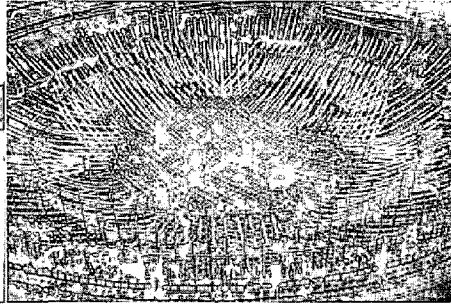


그림 28. Construction of one of the lower domes

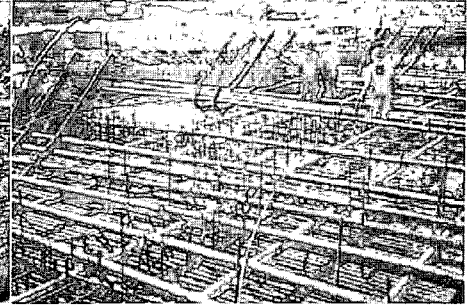


그림 29. Cables in bottom slab and loop ducts for cables in struts

PSC 구조물의 현황과 추세를 살펴보았다. 외국의 발표자료에 의하면 미국, 유럽 등에서는 프리스트레스트 콘크리트 교량이 꾸준히 증가하고 있다. 최근 미국에서는 전체교량의 75% 이상이 프리스트레스트 및 철근 콘크리트 교량으로 건설되고 있는 것으로 보고되고 있다.

빌딩 구조물 즉 건축물에서도 미적효과와 구조적으로 탁월한 성능을 조합시켜 고층건물 등의 건설에 프리캐스트 프리스트레스트 구조물의 사용이 증가하고 있다. 특히 열악한 환경 하에 있는 주차장등의 구조물에 건설에는 설계자가 균열을 제어할 수 있는 프리스트레스트 구조물의 사용이 급속히 늘고 있다. 또한 높은 안전성을 요구하는 원자로의 격납고 및 LNG 탱크 등에 프리스트레스트 콘크리트의 사용이 계속적으로 증가하고 있다.

프리스트레스트 콘크리트 구조물은 안전성, 미관성, 사용성, 경제성, 유지관리성 및 자연 및 환경과의 조화에서 탁월한 성능을 지니고 있어 세계적으로 건설이 증가하고 있으며 여러 분야에서 폭 넓게 사용되고 있는 것으로 사료되며, 우리나라에서도 세

계 추세에 발맞추어 이에 대한 기술축척 및 진보를 해야 할 것으로 사료된다. □

참고문헌

1. 오병환, "PSC 교량의 세계 건설 현황 및 장점", 콘크리트학회지, 13권 5호, 2001. 9.
2. 오병환, "PSC박스거더 교량의 건설공법별 설계 및 시공특성", 동부건설주식회사, 1994. 12.
3. 과학기술, "PC의 설계 및 시공", 2001. 1.
4. Michael P. Collins and Denis michell, "Prestressed concrete structure," PRENTICE HALL, 1991.
5. John E. Breen, "Prestressed concrete : The state of the art in north america," PCI Journal, Vol.35, No.6, 1990.
6. Billington, D. P., "Historical Perspective on Prestressed Concrete," PCI Journal, Vol.21, No.5, 1976.

새로나온 책 - "콘크리트 구조설계기준 해설"

◆ 소개

"... 건축·토목 분야 콘크리트 전문가들(교수, 연구원, 건설업체 중진 기술자 등)로 구성된 위원회에서 1999년 5월에 건설교통부 제정 「콘크리트 구조설계기준」이 발간되었으며, 2000년 9월에 본 학회에서는 「콘크리트 구조설계기준」을 실무에 사용하는 설계기술자들이 설계기준의 배경을 이해하고, 이를 실제 설계에 적합하게 적용할 수 있도록 「콘크리트 구조설계기준 해설」을 발간하게 되었습니다. 그러나 통합 제정 당시의 설계기준에서 몇몇 오류가 발견되고 또 그 동안의 연구결과를 반영하기 위해 2003년 4월에 「콘크리트구조설계기준」을 개정하였으며, 이 개정판에 대한 해설집을 이번에 발간하게 되었습니다..."(머리말 중)

- 제목 : 콘크리트 구조설계기준 해설
- 출판사 : 기문당
- 정가 : 28,000원

- 저자 : 사단법인 한국콘크리트학회
- 출판일 : 2004년 2월
- ISBN : 89-7086-573-X

