

## PSC 강연선 인장성능평가를 위한 인장시험 방법에 관한 연구

박연철<sup>1\*</sup> · 박민석<sup>2</sup> · 유웅희<sup>3</sup> · 김철영<sup>4</sup>

<sup>1</sup>연구조교수, 서울대학교, 건설환경종합연구소, <sup>2</sup>박사과정, 명지대학교, 토목환경공학과,  
<sup>3</sup>석사과정, 명지대학교, 토목환경공학과, <sup>4</sup>교수, 명지대학교, 토목환경공학과

### Testing Methodology for Tensile Strength Evaluation of PSC Strands

Park, Yeun Chul<sup>1\*</sup>, Park, Min Seok<sup>2</sup>, Yoo, Woonghee<sup>3</sup>, Kim, Chul-Young<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Assistant Research Professor, Institute of Construction and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

<sup>2</sup>Ph.D. Candidate, Depart. of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin-si, 17058, Korea

<sup>3</sup>Ms.D. Candidate, Depart. of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin-si, 17058, Korea

<sup>4</sup>Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin-si, 17058, Korea

**Abstract** - The factors that may influence the tensile strength measurement of steel 7-wire strand was investigated. Various standards and guidelines for testing strands were reviewed and found that free span length, loading rate, and type of gripping devices could affect the tensile strength measurement. Tensile test was conducted to verified the effect of these factors. It was found that loading rate and free span length do not influence the tensile strength measurement. Gripping device, however, significantly influenced the measurement. All specimens which anchor type grip were applied presented the tensile strength lower than the nominal. On the other hand, all specimens which grip type were applied presented the tensile strength higher than the nominal strength.

**Keywords** - Strand, Wire, Tensile test, Tensile strength, PSC bridge

### 1. 서론

강연선은 프리스트레스트 콘크리트(prestressed concrete, PSC) 구조물의 주요 부재로 규격화된 제원의 재료이나 인장시험을 통해 성능을 검증할 필요가 있다. 일반적으로 강연선은 두 개 이상의 강선을 꼬아서 만들며, 일반적으로 일곱 개의 소선을 꼬아서 만든 강연선을 주로 사용한다. 이러한 특징으로 인해 일반적인 금속체의 인장시험방법을 적용할 수 없는 경우가 있다. 특히 강연선의 표면은 Fig. 1과 같이 소선 사이에 골이 있으므로 강연선 전체를 일정한 압력으로 잡는 것이 쉽지 않다. 각 소선에 일정한 압력이 가해지지 않으면 각 소선에 가해지는 인장력이 다르게 될 수 있으므로 실제 강연선의 인장강도와 다른 인장성능 평가 시 낮

은 성능을 보일 수 있다. 따라서 일반적인 금속체의 인장시험과는 다른 시험 방법이 필요하다.

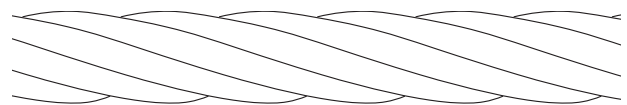


Fig. 1. Side view of a typical 7-wire strand

Preston<sup>[1]</sup>은 7연선 인장 및 릴랙세이션 시험을 위한 다양한 장비 및 시험 방법을 검토하고 American Society for Testing and Materials(ASTM)<sup>[2]</sup>에서 제안하는 시험 방법의 이론적 근거를 제시하였다. Kim *et al.*<sup>[3]</sup>은 인장강도가 2,200 MPa와 2,400 MPa인 초고강도 강연선의 인장시험을 위한 일곱 종류의 앵커 타입에 대한 해석 및 실험연구를 통해 최적의 앵커를 제안한 바 있다. Walsh and Kurama<sup>[4]</sup>는 편심률과 하중재하속도가 7연선과 앵커의 내진 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구에서는 강연선의 인장시험 시 인장성능평가에 영향을 미칠 수 있는 인자들을 문헌조사를 통해 구분하고 이들에 대한 비교실험을 수행하여 합리적인 강연선 인장성능 평가 방법을 제안하고자 한다.

Note.-Discussion open until April 30, 2020. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on December 31, 2018; revised September 30, 2019; approved on September 30, 2019.

Copyright © 2019 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-2-880-1538 Fax. +82-2-880-1081

E-mail. ryan1886@gmail.com

## 2. 강연선 인장시험 관련 국내외 기준

강연선 인장시험 관련 국내외 기준으로는 한국산업표준<sup>[5],[6]</sup>, ASTM<sup>[2]</sup>, International Organization for Standardization(ISO)<sup>[7]</sup>, Post-Tensioning Institute(PTI)<sup>[8]</sup>, Korea Concrete Institute (KCI)<sup>[9]</sup>, Fédération Internationale du Béton (fib)<sup>[10]</sup> 등이 있으며 Table 1에 정리되어있다. 이들 문헌들을 분석한 결과 강연선 인장성능평가에 영향을 줄 수 있는 요인들은 다음과 같다.

- (1) 시험체의 길이
- (2) 시험 장비 및 부속 장치
- (3) 시험 방법 및 절차
- (4) 인장성능 평가 방법

각 문헌에서 제시하는 강연선 인장시험 관련 사항들을 분석하였다.

**Table 1.** References related to tensile testing of steel strands

| Reference                       | Title   |
|---------------------------------|---|
| KS D 7002 <sup>[5]</sup>        | PC wires and PC strands   |
| KS B 0802 <sup>[6]</sup>        | Method of tensile test for metallic materials                               |
| KCI-PS101 <sup>[9]</sup>        | Performance tests of anchorage and couplers for prestressed concrete tendon |
| fib Bulletin 30 <sup>[10]</sup> | Acceptance of stay cable systems using prestressing steels                  |
| ISO 15630-3 <sup>[7]</sup>      | Testing of prestressing steel   |
| ASTM A1061 <sup>[2]</sup>       | Standard test method for testing multi-wire steel prestressing strand       |
| PTI DC45.1 <sup>[8]</sup>       | Recommendations for stay cable design, testing, and installation            |

### 2.1 시험체 길이 관련 주요 내용

시험체 길이에 대한 규정은 각 문헌마다 상이하다. 먼저 시험체 길이를 한국산업표준<sup>[5]</sup>과 fib<sup>[10]</sup>에서는 물림부 사이의 간격을 각각 600 mm와 500 mm 이상으로 정하고 있다. 반면에 PTI<sup>[8]</sup>에서는 시험체 길이를 최소 1,000 mm 이상 확

보하도록 규정하고 있다. ISO<sup>[7]</sup>와 ASTM<sup>[2]</sup>에는 시험체 길이에 관련한 규정이 따로 없으나 ASTM<sup>[2]</sup>에서는 인장변위계의 길이가 600 mm 이상일 것을 요구하므로 간접적으로 시험체의 길이가 600 mm 이상이 되도록 정하였다.

이와 같이 시험체의 최소 길이를 정한 것은 물림부 사이의 거리를 충분히 확보하고 강연선의 양 단이 일직선이 되지 못하여 발생할 수 있는 휨의 영향을 최소화하기 위함인데 이를 위해서는 한국산업표준<sup>[5]</sup>이나 fib<sup>[10]</sup>와 같이 물림부 사이의 최소 거리를 명시하는 것이 합리적으로 보인다. 그 이유는 시험체의 길이를 명시할 경우 인장시험기에 강연선을 고정하는 물림장치의 종류와 크기에 따라서 물림부 사이의 거리를 충분히 확보하지 못할 수도 있기 때문이다.

### 2.2 시험 장비 및 장치 관련 주요 내용

PTI<sup>[8]</sup>와 fib<sup>[10]</sup>를 제외한 나머지 기준들은 강연선에 대한 시험 장비가 아닌 금속체 인장시험 표준 시험방법을 제시하고 있다. 한국산업표준<sup>[5]</sup>의 경우 KS B 5521<sup>[11]</sup>을 만족하는 인장시험기를 사용하도록 제시하고 있고, ISO<sup>[7]</sup>의 경우 ISO 7500-1<sup>[12]</sup>과 ISO 9513<sup>[13]</sup>을 만족하는 인장시험기와 인장변위계를 사용하도록 한다. ASTM<sup>[2]</sup>은 ASTM E4<sup>[14]</sup>와 E83<sup>[15]</sup>을 만족하는 인장시험기와 인장변위계를 사용하도록 규정하고 있다. 이들 기준들은 금속체의 인장시험에 대한 일반적인 사항들이 제시되어 있으므로 추가적으로 물림부에서 발생하는 파단을 방지하기 위한 적절한 물림부 설계를 하도록 권고하고 있으나 ASTM<sup>[2]</sup>을 제외한 나머지는 별도로 물림부 장치에 대한 구체적인 내용을 제시하고 있지 않다. ASTM<sup>[2]</sup>에서는 톱니 모양의 이빨이 있는 V자 홈 형태의 그립을 사용할 경우 시험체에 홈이 패이는 것을 방지하기 위해 강연선과 그립 사이에 완충재를 넣도록 한다. 실린더 형태의 부드러운 면을 가지는 그립을 사용할 경우에는 그립과 시험체 사이에 미끄러짐이 발생하지 않도록 연마재질의 슬러리를 넣도록 한다. 그러나 일반적으로 PSC 교량의 정착구에 사용되는 웨지와 소켓을 사용하는 것은 허용하지 않는다.

### 2.3 시험 방법 및 절차 관련 주요 내용

시험 방법 및 절차에 관련해서는 ISO<sup>[7]</sup>와 한국산업표준<sup>[5]</sup>은 일반적인 금속체 인장시험방법을 준용하도록 하며 한국산업표준<sup>[5]</sup>은 하중 재하속도만 따로 규정하고 있다. 반면에

ASTM<sup>[2]</sup>에서는 하중재하속도에 관련된 내용은 없지만 물림부에서 발생할 수 있는 미끄러짐과 실험오차를 줄이기 위한 상세한 절차가 제시되어 있다. 특히 하중재하, 변위계 설치, 데이터 기록 순서 등을 상세하게 제시하고 있으므로 가장 합리적일 것으로 판단된다. ASTM<sup>[2]</sup>에서 제시하는 시험 순서를 따르되 하중재하속도의 영향을 확인할 필요가 있다.

### 2.4 인장 성능 평가 관련 주요 내용

모든 기준에서 한 개 이상의 소선 파단으로 강연선이 파단되었다고 간주한다. 한국산업표준<sup>[5]</sup>을 제외한 모든 국외 기준들에서 물림부에서 파단이 발생하는 경우 해당 시험을 무효로 간주한다. 특히 ASTM<sup>[2]</sup>과 ISO<sup>[7]</sup>에서는 파단 위치가 물림부로부터 각각 6 mm와 3 mm 이내인 경우도 무효로 간주한다. 따라서 시험 방법에 따라 파단이 발생하는 위치가 어떻게 다른지 확인하고 파단 위치에 따른 인장성능이 어떻게 평가되는지 확인할 필요가 있다.

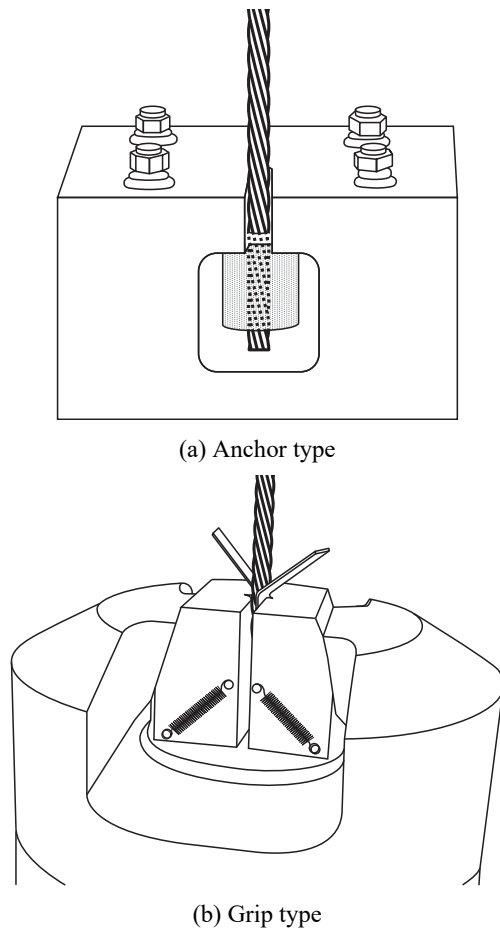


Fig. 2. Two types of gripping devices

한국산업표준<sup>[5]</sup>을 제외하고는 인장강도 및 연신율을 평가하는 방법은 제시되어 있지 않다. 그러나 한국산업표준<sup>[5]</sup>에서도 인장강도 및 연신율은 실험중 측정된 최대하중 및 최대 변위를 이용하여 정의 하므로 일반적인 금속체 인장시험 시 강도 및 연신율 평가 방법과 다르지 않다.

## 3. 강연선 인장시험

### 3.1 실험 개요

문헌조사를 통해 강연선 인장강도 평가에 영향을 줄 수 있는 요인들 중 인장시험을 통해 확인할 수 있는 요인들은 자유경간길이, 하중재하속도 그리고 물림장치 종류이다. 이들 세 가지 요인들을 각각의 조합으로 시험을 수행하면 너무 많은 시험체가 필요하므로 앵커타입(Fig. 2(a)와 Fig. 3)을 적용하여 자유경간길이와 하중재하속도의 영향을 확인하고, 이들 중 인장강도에 영향을 미치지 않는 자유경간길이와 하중재하속도를 적용하여 그립타입(Fig. 2(b)와 Fig. 4) 물림부에 대한 실험을 수행하였다. 인장시험은 명지대학교 하이브리드구조실험센터의 5,000 kN 용량의 동적 UTM(Fig. 3과 Fig. 4)과 공칭인장강도가 327 kN (2,360 MPa)인 50개의 D중 7연선을 사용하였다.



Fig. 3. Photograph of 5,000 kN UTM and installed anchor type gripping device

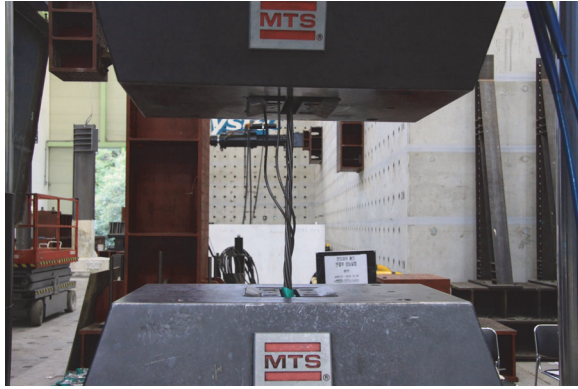


Fig. 4. Photograph of tensile test using anchor type gripping device

### 3.2 자유경간 길이에 따른 인장 시험 결과

Table 2에 자유경간 길이에 따른 시험결과를 보여준다. 하중재하 속도는 14 mm/min이었고 앵커타입의 물림부를 적용하였다. 문헌조사 결과 자유경간 길이를 500 mm에서 1,000 mm까지 제시하고 있으므로 시험체의 자유경간 길이를 400 mm부터 1,000 mm까지 200 mm 차이를 두어 각 길이 별로 5개의 시험체에 대해 인장시험을 실시하였다.

Table 2. Average measured tensile strength per free span length

| Span length | Average measured tensile strength |
|-------------|-----------------------------------|
| 400 mm      | 320.6 kN                          |
| 600 mm      | 321.5 kN                          |
| 800 mm      | 321.2 kN                          |
| 1,000 mm    | 323.5 kN                          |

실험 결과에서 볼 수 있듯이 대부분의 경우 공칭인장강도보다 낮은 강도가 나타난 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과가 나온 이유가 강연선 자체의 문제인지 아니면 하중 재하 속도 또는 물림부 형식에 따른 문제인지 다음 실험으로 확인하였다. 그러나 자유장 길이에 따른 유의미한 차이는 발견할 수 없었다. 따라서 fib<sup>[10]</sup>에서 제안하는 최소 자유장 길이인 500 mm보다 짧은 길이의 시험체로도 일정한 인장강도가 발현되는 것을 확인하였다.

### 3.3 하중 재하 속도에 따른 인장 시험 결과

한국산업표준<sup>[5]</sup>에서는 하중 재하 속도를 20 %/min - 80

%/min을 제시한다. 본 실험에서는 하중재하속도에 따른 차이를 확인하기 위해 분당 변위 변화를 14 mm(20 %/min), 35 mm(50 %/min), 그리고 56 mm(80 %/min)로 바꿔 실험을 수행하였다. 물림부 형식은 앵커 타입이었으며 자유경간 길이는 1,000 mm이었다.

Table 3. Average measured tensile strength per loading speed

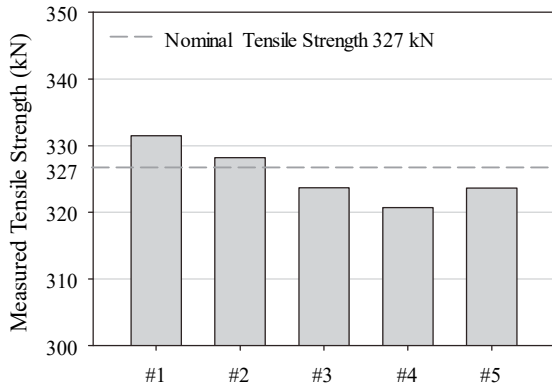
| Loading speed | Average measured tensile strength |
|---------------|-----------------------------------|
| 14 mm/min     | 323.5 kN                          |
| 35 mm/min     | 325.5 kN                          |
| 56 mm/min     | 321.3 kN                          |

인장시험 결과는 Table 3에 제시되어있다. 실험결과 하중재하속도에 따른 유의미한 차이는 확인하지 못하였다. 그리고 모든 경우에서 공칭인장강도보다 낮은 강도가 발현되었다. 따라서 한국산업표준<sup>[5]</sup>에서 제시하는 하중재하속도 범위 내에서는 일정한 시험결과를 얻을 수 있는 것을 확인하였다.

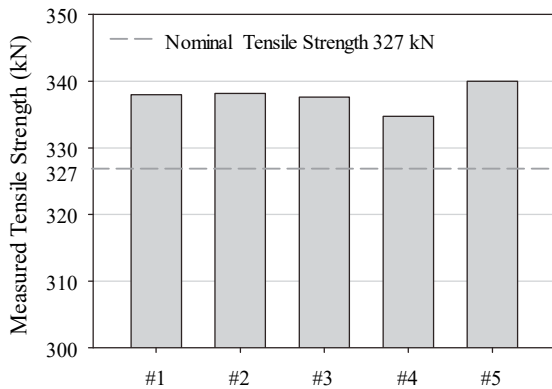
### 3.4 물림 장치 종류에 따른 인장 시험 결과

자유경간 길이 1,000 mm, 하중재하속도 35 mm/min으로 동일한 조건에서 물림장치 형식이 앵커 타입과 그립타입으로 다른 경우의 시험 결과가 Fig. 5에 제시되었다. 물림장치가 앵커타입인 경우에는 한 개의 시험체를 제외하고는 모두 공칭 인장강도보다 낮은 강도가 발현되었고, 그립타입인 경우에는 모든 시험체가 공칭 인장강도 이상의 강도가 발현된 것을 확인하였다. 이러한 시험 결과는 앞서 제시한 자유경간 길이와 하중재하속도에 대한 시험결과가 공칭인장강도보다 낮은 이유가 앵커 타입의 물림장치 때문이었음을 보여준다. 따라서 물림장치에 따라 인장강도가 다르게 측정될 수 있다는 것을 의미한다. Fig. 6는 앵커 타입 물림장치를 사용한 인장시험에서 파단된 강선의 단면을 보여준다. 파단된 3개의 강선 중 하나의 강선 표면에서 톱니 자국이 발견되었다. 따라서 앵커 내부의 톱니로 인해 강선에 손상이 발생하여 강선의 파단이 발생한 것으로 보인다. 반면에 Fig. 7에서와 같이 그립타입의 물림부를 사용한 경우에는 강연선을 알루미늄 패드로 보호할 수 있어 강선 표면에 손상이 발생하지 않았다. 그러므로 앵커타입의 물림부는 강선에 손상을 발생시켜 인장강도를 낮게 평가할 수 있으므로 그립타입의

물림부를 사용하는 것이 실제 인장강도에 더 가까운 강도를 측정할 수 있다고 판단된다.



(a) Tensile test results of anchor type gripping device



(b) Tensile test result of grip type gripping device

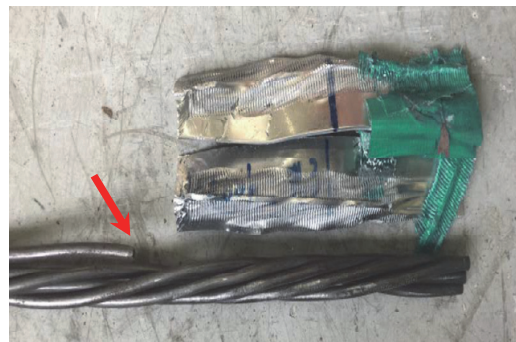
Fig. 5. Tensile test results per gripping devices



Fig. 6. Configuration of fractured wires of the tensile test using anchor type gripping device



(a) Inside of grip



(b) In front of grip

Fig. 7. Wire failure location

### 3.5 강연선 파단 위치

강연선의 모든 소선이 파단된 경우는 없었고 대부분 한 개 또는 두 개의 소선이 파단되어 인장시험이 종료되었다. 소선의 파단위치는 매우 다양했으며 공칭 인장강도를 상회하는 강도가 발현된 그립타입의 실험결과만 확인하면 Fig. 7과 같다. Fig. 7(a)는 파단 위치가 그립 내부인 강연선과 Fig. 7(b)는 그립 앞에서 파단된 경우를 보여준다. 그러나 모든 강연선들이 ASTM<sup>[2]</sup>에서 제시하는 그립 앞 6 mm 또는 ISO<sup>[7]</sup>에서 제시하는 그립 앞 3 mm보다 먼 위치에서 파단되지 않았다. 본 연구에서는 50개의 강연선 모두 그립 내부 또는 그립에서 매우 인접한 위치에서 파단이 발생했으므로 ASTM<sup>[2]</sup>이나 ISO<sup>[7]</sup>에서 제시하는 파단 위치에 따른 유효 파단 판정 기준은 합리적이지 않은 것으로 판단된다. 대부분의 강연선 인장 시험은 강연선 자체의 인장강도를 확인하기보다는 강연선이 공칭인장강도를 만족하는지를 확인하는데 목적이 있으므로, 강연선에 손상이 발생하여 응력집중 등으로 실제 강도보다 낮게 평가된 강도가 공칭강도보다 크다면 실제 강연선의 인장강도는 공칭인장강도보다 클 것으로 판단하는 것

이 합리적이다. 그러므로 강연선의 인장강도 평가시 파단 위치에 따른 판정을 하지 않는 한국산업표준<sup>[5]</sup>의 방식이 타당하다고 판단된다.

#### 4. 결론

강연선의 인장시험에 영향을 주는 요인들을 문헌 및 인장시험을 통해 확인하였다. 문헌조사로 인장강도에 영향을 주는 요인들은 자유장길이, 하중재하속도, 물림부 형식인 것을 확인하였으나 인장시험 결과 자유장길이나 하중재하속도가 인장강도 측정에 미치는 영향은 미미한 것을 확인하였다. 그러나 강연선의 인장강도는 물림부 형식에 따라 큰 차이를 보였다. 물림부가 앵커 타입인 경우에는 모든 시험체가 공칭강도보다 낮은 강도를 보였고 그립 타입인 경우에는 모든 시험체에서 공칭강도보다 높은 강도가 확인되었다. 따라서 앵커타입의 경우 실제 강도보다 낮게 평가할 수 있는 위험성이 있는 것으로 판단된다. 한국산업표준을 제외한 해외 기준에서는 강연선의 파단이 물림부의 내부 또는 인접한 위치에서 발생할 경우 무효로 판정하도록 하나, 본 연구에서 수행한 50개의 인장시험체 모두 물림부 내부 또는 인접한 위치에서 파단이 발생하였으므로 이러한 판정 기준은 합리적이지 못한 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(19CTAP-B132920-03)에 의해 수행되었으며, 명지대학교 하이브리드구조실험센터의 실험자원을 활용하였습니다. 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌(References)

[1] Preston, H.K. (1985) Testing 7-Wire Strand for Prestressed Concrete – The State of the Art, *PCI Journal*, Precast/Prestressed Concrete Institute, Vol.30, No.3, pp. 134-155.

[2] American Society for Testing and Materials (2016) *Standard Test Methods for Testing Multi-Wire Steel Pre-*

*stressing Strand* (ASTM A1061/A1061M - 16), USA.

[3] Kim, J.K., Seong, T.R., Jang, K.P., and Kwon, S.H. (2013) Tensile Behavior of New 2,200 MPa and 2,400 MPa Strands According to Various Types of Mono Anchorage, *Structural Engineering and Mechanics*, Techno-Press, Vol.47, No.3, pp.383-399.

[4] Walsh, K.Q., and Kurama, Y.C. (2012) Effects of Loading Conditions on the Behavior of Unbonded Post-Tensioning Strand-Anchorage Systems, *PCI Journal*, Precast/Prestressed Concrete Institute, Vol.57, No.1 pp. 76-96.

[5] Korean Agency for Technology and Standards (2011) *Uncoated Stress-Relieved Steel Wires and Strands for Prestressed Concrete* (KS D 7002: 2011), Korea (in Korean).

[6] Korean Agency for Technology and Standards (2003) *Method of Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0802: 2003), Korea (in Korean).

[7] International Organization for Standardization (2019) *Steel for the Reinforcement and Prestressing of Concrete – Test Methods, Part 3: Prestressing Steel* (ISO 15630-3: 2019), Switzerland.

[8] Post-Tensioning Institute (2012) *Recommendations for Stay Cable Design, Testing, and Installation* (PTI DC45.1), USA.

[9] Korea Concrete Institute (2010) *Performance Tests of Anchorage and Couplers for Prestressed Concrete Tendon* (KCI-PS101: 2010), Korea (in Korean).

[10] fib Task Group 9.2 (2005) *Acceptance of Stay Cable Systems Using Prestressing Steels*, fib Bulletin No. 30, Fédération Internationale du Béton, Switzerland.

[11] Korean Agency for Technology and Standards (1992) *Tensile Testing Machines* (KS B 5521: 1992), Korea (in Korean).

[12] International Organization for Standardization (2018) *Metallic Materials – Calibration and Verification of Static Uniaxial Testing Machines, Part 1: Tension/Compression Testing Machines – Calibration and Verification of the Force-Measuring System* (ISO 7500-1: 2018), Switzerland.

[13] International Organization for Standardization (2012) *Metallic Materials – Calibration of Extensometer Systems Used in Uniaxial Testing* (ISO 9513: 2012), Switzerland.

[14] American Society for Testing and Materials (2016) *Standard Practices for Force Verification of Testing Ma-*

*chines* (ASTM E4 - 16), USA.

[15] American Society for Testing and Materials (2016)

*Standard Practice for Verification and Classification of Extensometer Systems* (ASTM E83 - 16), USA.

---

**요 약**: 강연선의 인장시험에 영향을 주는 요인들을 문헌 및 인장시험을 통해 확인하였다. 문헌조사로 인장강도에 영향을 주는 요인들은 자유장길이, 하중재하속도, 물림부 형식인 것을 확인하였으나 인장시험 결과 자유장길이나 하중 재하속도는 영향을 미미한 것을 확인하였다. 그러나 강연선의 인장강도는 물림부 형식에 따라 큰 차이를 보였다. 물림부가 앵커 타입인 경우에는 모든 시험체가 공칭 강도보다 낮은 강도를 보였고 그립타입인 경우에는 모든 시험체에서 공칭강도보다 높은 강도가 확인되었다. 따라서 앵커타입의 경우 실제 강도 낮게 평가할 수 있는 위험성이 있는 것으로 보인다.

**핵심용어**: 강연선, 인장강도, 인장시험, PSC 교, 소선

---