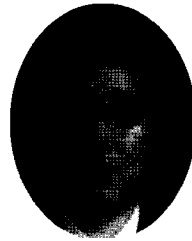


케이블의 역학적 특성 및 인장실험

Mechanical Characteristics and Tension Test of Cables



박 강 근*
Park, Kang-Geun



이 장 복**
Lee, Jang-Bog



김 재 봉***
Kim, Jae-Bong

1. 케이블재의 물리적 특성

케이블은 인장응력을 받을 목적으로 제작 및 시공되는 부재를 말하며 그 전형예로서 와이어 로프를 들 수 있다. 케이블은 일반 구조용 강재에 비해 매우 독특한 성질을 갖고 있다. 케이블은 다른 강재에 비해 현저히 높은 인장강도를 가지면서 유연하다는 2가지 특징을 갖고 있다. 케이블의 소선은 열처리와 신성가공으로 고강도를 얻기 때문에 파단시의 신장은 몇 퍼센트에 지나지 않고 통상의 구조용 강재에 비해 케이블의 연성은 1/5 정도이다. 또한 다수 소선의 집속체인 케이블은 소선의 결점을 분산하는 효과를 갖고 있고, 각 소선의 변형도가 서로 거의 독립적이므로 파단 크랙의 진전이 자동적으로 저지되는 장점이 있다. 대공간 구조의 보급과 현대 건축의 디자인적인 경향에 따라 케이블 구조부재로 사용하는 건축이 증가추세에 있지만 이와 같은 건축물을 구조 설계할 경우에는 일반적인 구조부재와는 다른, 케이블의 고유성질과 문제점을 고려해야

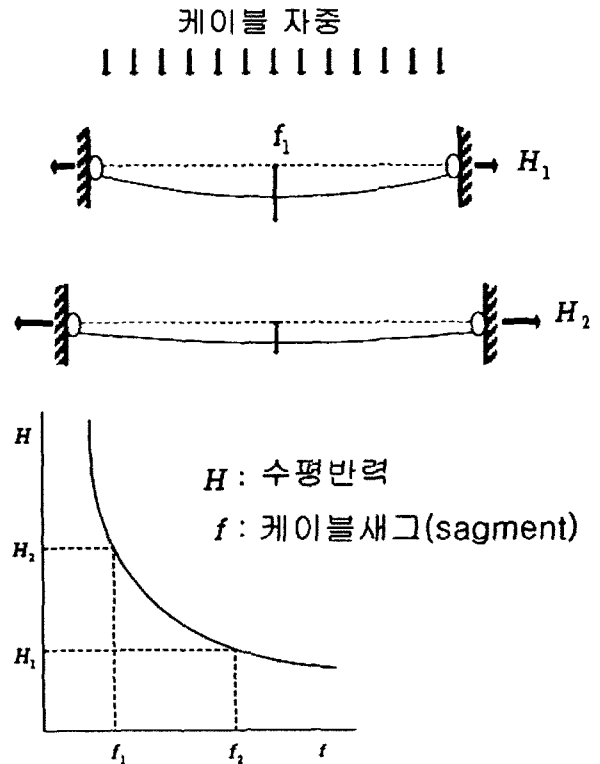
한다. 케이블의 고유성질과 문제점의 예로는 다음과 같은 것을 들 수 있다. ①케이블은 인장력이 일반 강재에 비해 현저히 고강도이다. 한편 강성은 일반 강재 비해 낮다. ② 케이블은 그 종류에 따라 신장 강성이 일정하지 않다. 또, 안정된 강성을 얻기 위해서는 프리스트레칭이 필요하다. ③케이블은 압축력, 전단력 및 휨에 저항할 수 없다. ④ 케이블을 포함하는 구조 시스템은 케이블에 프리스트레스를 도입함으로써 안정성과 강성의 면에서 현저하게 다른 거동을 나타내는 경우가 있다. 또한 케이블의 장력이 이완되지 않는 범위에서 압축력에 저항할 수 있다. 케이블을 포함하는 구조 시스템은 대변형을 유발시키는 경우가 있다. 이 경우에는 일반 구조물에 사용되는 미소변형의 가정과 중첩의 원리가 성립되지 않는다. 설계단계에서 고려되어야 할 케이블의 제작, 운반과 시공상의 특징으로 다음과 같은 것들이 있다. ① 케이블의 단부에는 특별한 정착기구가 필요하다. ② 길이가 매우 긴 경우에도 케이블은 릴에 감아서 운반할 수 있다 ③ 현장에서의 조립 및 세우기 방법이 일반 구조부재의 경우와 현저하게 다르다. 구조요소로서의 케이블에는 다음과 같은 구성요소들이 있다.

* 정회원, 부산대학교 산업건축과 교수, 공학박사
** 정회원, (주) 동아피앤에스 대표이사
*** 부산대학교 건축공학과, 박사과정 수료

〈표 1〉 케이블 구성 요소

① 와이어 로프	스트랜드 로프
	스파이럴 로프
	록 코일 로프
② 평행선 케이블	에어 스피닝
	프리패브 평행선 스트랜드
③ PC꼬임 강선	

와이어 로프는 보통 직경 1~수 mm의 고장력, 고탄소 소선을 몇 개 또는 수십 개를 꼬아 엮어 만든다. 엮는 방식과 소선의 단면형에 따라 3 종류로 분류되는데 유연성은 앞에서 서술한 순서대로 스트랜드 로프가 가장 유연하며, 반대로 신장강성은 스트랜드 로프가 다른 2 종류에 비해 작다. 평행선 케이블은 직경이 수 mm인 고장력 강선을 평행하게 묶어 구성한 인장부재이다. 에어 스피닝은 강선을 한 개씩 걸어서 문자 그대로 공중에서 묶어 구성한 인장부재이다. 에어 스피닝은 강선을 한 개씩 걸어서 문자 그대로 공중에서 묶어 가는 방법이다. 이에 대해 프리패브 평행선 스트랜드(PWS)는 공장에서 수십 가닥~수 백 가닥 정도의 강선을 엮어 만든 것이다. 평행선 케이블은 와이어 로프에 비해 신장 강성과 인장강도가 모두 크다. PC 강선은 원래 프리스트레스 콘크리트용으로 제조된 것이나 최근에는 케이블 구조용 재료로 사용하게 되었다. 구조부재로서 케이블의 역학적 특성은 채축 방향의 인장력만으로 힘이 전달된다는 점이며, 재료적 특징은 다음과 같다. ① 강도가 높고 경량이다. ② 유연성이 풍부하며 형상의 자유도가 높다. ③ 부재 길이에 대한 제한이 없고 운반이 용이하다. 이러한 장점을 갖는 케이블 재료는 단독으로 또는 다른 구조 요소와 조합되어 건축 구조에 적용될 수 있다. 대스팬 구조와 자유형상의 실현뿐만 아니라 인장응력이 큰 부위에 케이블을 사용하면 경제성이나 조형성의 면에서도 건축구조의 가능성을 한층 넓혀 줄 수 있다. 일반 강재와 비교할 경우, 구조부재로서의 케이블을 사용할 때 다음과 같은 사항에 유의하여야 한다. 이완된 상태의 평행선 케이블은 케이블에서는 구조부재로서의 성능을 기대하기 어렵다. 케이블이 안정된 인장강성을 확보하기 위해서는 케이블에 적절한 인장 응력이 발생되거나 또는 도입되어야 하고 특히 꼬임 로프의



〈그림 1〉 케이블의 자중을 고려한 장력과 새그의 관계

경에서는 저응력 상태에 따른 낮은 초기강성이 구조 거동에 미치는 영향에 주의하여야 한다. 무응력 상태의 케이블을 직선상태로 적절한 위치에 설치하는 것은 일반적으로 곤란하다. 특히 부가하중에 저항하는 것을 주목적으로 하는 자중이 큰 케이블에 대해서는 고정 하중시의 응력 레벨의 검토가 필요하다.

케이블을 설치할 때 길이 또는 정착 철구 위치에 작은 오차가 발생하여도 케이블 자체와 접속되는 다른 구조의 응력과 변형에 큰 영향을 줄 수 있다. 따라서 구조 전체의 시스템, 상세와 시공법 등 계획전반에 걸친 상호 계획적인 검토가 필요하다. 케이블의 유연성을 이용한 절선형태를 고려할 수 있지만, 절곡점에서의 고정 철구가 가지는 구속력(마찰력)에 충분히 유의하여 계획한다.

단순 인장형식이라는 것은 케이블이 가지는 경량성 및 대경간을 이용한 것으로 케이블의 한 쪽 단부에 작용하는 힘을 다른 쪽 단부로 전달하는 것을 목적으로 한다. 즉 케이블 재특에 직각인 성분을 가지는 중간하중이 작용하지 않도록 하는 경우로, 케이블은 직선상태로 사용된다. 여기에서의 케이블 형상

의 직선성은 부재단면의 크기(자중), 지점간 거리 및 인장 응력의 상관관계로 정해지나 일반적으로 고정 하중시의 인장 응력이 부가하중시의 인장 응력과 비교했을 때 현저히 작은 경우에는 고정하중시의 케이블의 직선성이 상실되는 경향이 있음에 주의해야 한다. 단순 인장형식에서는 재축에 직각 성분을 가진 중간하중이 존재하지 않으므로 재축의 변화는 있다고 해도 자중만 고려하면 된다. 그러나 케이블의 신장변형은 이것에 접속하는 다른 주 구조에 대해 매우 큰 영향을 준다. 따라서 자중으로 인한 처짐을 고려하는 일과 꼬임선 특유의 단면 구성상의 기계적 신장(초기신장)을 제거하는 일을 포함해서, 케이블의 설치 및 조정에 관한 시공순서 및 PS의 도입방법에 충분한 고려가 요구된다. 케이블 자신의 응력과 변형도 온도변화와 지점이등(정착부의 이완을 포함)에 대해서 매우 민감하다는 사실에 주의하여야 한다. 특히 평판·셀·절판·스페이스 프레임 등의 구조물을 매다는 사장 형식과 장현 보 형식 등의 케이블구조 형식(B)에서는 구조물과 사장 케이블과의 하중분담을 어떻게 균형 있게 설정하는가가 매우 중요하다. 케이블의 배치·분포·강성, 그리고 PS력의 크기·분포·도입 순서 등 모든 것이 상대 구조물의 형상, 강성, 강도로 대표되는 구조특성뿐만 아니라, 그 구조의 시공공정, 조립 순서 등과도 밀접한 관련이 있다.

집중하중에 대해서는 절선형, 분포하중에 대해서는 곡선(카테너리·포물선 등)과 같이 하중분포의 모드에 대응하여 새로운 평형형상으로 이행한다. 이들 중간하중에 대한 케이블 형상이 구조역학에서의 연력도에 대응하는 것은 잘 알려져 있다. 이것은 자중에 의한 평형형상(고정 하중시의 케이블 형상) 및 부가하중에 의한 평형형상(변형상태)을 구하는 일이 매우 중요하다는 것을 시사한다. 특히 부가하중의 모드가 고정하중의 모드(일반적으로 분포)와 다르고, 편심 분포 및 집중하중이 예상되는 경우에는 신장이 없는 변형(링크운동 또는 강제 운동)을 포함한 큰 형상변화가 발생하기 쉽다는 것에 유의해야 한다.

케이블 재단의 미소한 이동이 케이블 전체변형에 미치는 영향, 중간부(교점부)의 정착철패에 의한 힘의 전달 등에 대한 검토도 중요한 계획상의 요점이 된다. 케이블의 형상과 지점 반력과의 관계를 파악

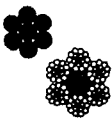
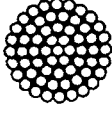
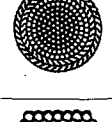
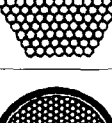
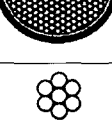
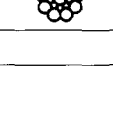
하는 일도 계획상 중요하다. 일반적으로 케이블의 새그가 커지면 양 지점 반력이 작아지고 또 새그를 일정하게 유지한 채 케이블에 경사를 주면 양단 반력의 하중분담이 변화하여 결국에는 한쪽 단부의 지점 반력이 아래쪽으로 향하게 되는 경우도 있다. 양 케이블에 도입되는 프리스트레스의 설정은 초기곡면의 결정과 함께 현수 지봉의 강성을 확보하기 위한 중요한 설계변수이다. 더구나 프리스트레스에 의한 보강은 응력레벨의 증대에 의존하고 있다는 점에서 자중에 의한 보강과 공통점이라 할 수 있다. 따라서 프리스트레스로 필요 이상의 값을 부여하면 경계 구조에 대대 어느 정도의 유용성을 못 가지게 악영향을 미칠 수 있다는 점에서도 설계상의 균형을 취하기 어렵게 된다. 프리스트레스의 존재는 특히 2 방향으로 역대칭 성분을 가진 하중분포 또는 국부적인 분포의 하중에 대해서 그 변형을 제어하는 효과가 현저하다. 프리스트레스 양에 대한 목표의 하나로 장력소실 한계를 취하는 경우가 있다. 즉 지봉면에 거의 일정하게 분포하는 하중에 대해 장력변화에 의한 케이블 장력이 소실되지 않도록 하는 것이다. 예를 들면, 적설하중에 대해서는 누름 케이블의 장력이, 또 풍 하중에 의한 불어 올리는 하중에 대해서는 매달리는 케이블의 장력이 각각 상실되지 않게 하는 것을 프리스트레스의 목표로 한다. 프리스트레스의 양을 PS 계수로 나타낸다. 이 PS 계수라는 것은 누름 케이블의 장력과 곡률로부터 생기는 환산 연직하중 성분을 [자중 + 설하중]에 대한 백분율로 읽은 값이다. 현수 지봉면의 새그(현수 케이블의 연직방향 처짐량) 및 라이즈(sfma 케이블의 처짐량)의 현수 방향의 경간 및 누르는 방향의 경간에 대한 비율을 각각 새그비·라이즈비 라고 부른다. 실제로는 새그비·라이즈비 모두 0.05~0.10 정도의 값을 취하는 경우가 많다. 새그·라이즈의 증가에 따라 넓은 면적에 분포하는 하중에 대해서는 처짐 제어 효과가 현저하다. 국부적인 하중에 대한 효과는 크지 않다. 지봉재 자중 등에 의한 초기하중은 현수 케이블의 장력만을 증대시키는 것으로 1 방향 케이블에서는 앞에서 기술한 것과 같은 보강효과를 기대할 수 있다. 새그비와 라이즈비가 같은 경우에는 초기하중의 처짐 제어에 대한 효과는 적지만, 그 비가 커지면 효

파가 향상되는 경향이 있다. 프리스트레스 및 외력에 의해 케이블에 생기는 장력은 경계점에서 큰 수평성분을 가지는 것이 현수 지붕구조의 특징이다. 일반적인 형태를 가진 현수지붕의 경우 경계에서 처리되어야 할 수평장력의 합은 지붕 전하중의 2~3배 되는 경우가 많다. 수평장력 처리문제는 조형적·경제적 평가를 포함하여 케이블 현수 지붕의 성격을 지배하는 중요한 설계 테마가 된다.

케이블 재료에는 ① 구조용 스트랜드 로프 ② 구조용 스파이럴 로프 ③ 구조용 록코일 로프 ④ 평행선 스트랜드 ⑤ 피복 평행선 스트랜드 ⑥ PC강선과 같은 것이 있다. 테이블 재료는 기계적 성질이 강선을 꼬임 효과를 내는 소위 로프류의 ①~③과 접속 또는 꼬임 효과의 영향을 무시할 수 있는 ④~⑥으로 대별 할 수 있다. ①~④는 소선에 아연도금을 하여 1차 부식방지를 기본으로 하지만 아연도금을 하지 않고 피복이 없는 로프를 사용한 예도 있다. 그러나 실적이 많지 않지만, 가는 선으로 구성된 것을

고려한다면 피복 없는 로프를 사용할 경우에는 부식 방지법을 충분히 검사해야만 한다. 피복 평행선 스트랜드는 구조용 케이블 규격으로서는 아연도금강선의 사용을 전제로 하고 있지만 아연도금을 하지 않은 PC강선을 사용한 실적도 있다. PC꼬임강선은 원래 피복이 되어 있지 않지만 케이블 재료로 사용하는 경우는 부식방지 대책이 필요하다. PC강선의 PC꼬임강선은 아연도금을 하지않고 방청재 및 플라스틱으로 피복하여 방지하는 것을 기본으로 한다. PC꼬임강선을 다시 합쳐 여러 겹으로 꼬아서 만든 PC꼬임강선을 케이블 재료로 사용하는 경우도 있는데 기계적 성질은 ①의 구조용 스트랜드 로프와 같이 고려하지 않으면 안된다. 즉, PC꼬임강선의 7 가닥이나 19 가닥 꼬임과는 다르며, 꼬임의 영향을 무시할 수 없다. PC강재에서는 ⑤ 및 ⑥외에 KS D 3505 (PC강봉)에 규정된 PC강봉 및 KS D 7009 (PC경강선)에 규정된 PC경강선이 있고, 또 구조용 인장재료로서 타이-로드라 칭하는 강봉이 있

<표 2> 케이블 재료의 특징

케이블 재료	단면도(예)	구조	유의사항
구조용 스트랜드 로프 (stranded rope)		원칙적으로 외곽 스트랜드는 6 가닥이다. 외곽 스트랜드의 구성과 동일한 스트랜드를 중심에 배치한 공심형과 7×7로프 중심으로 배치한 CFRC형이 있다.	유연성이 풍부. 신장이 큼.
구조용 스파이럴 로프 (spiral rope)		심선 주변에 여러 층의 선을 꼬아 만든 것으로, 넓은 의미로는 록 코일 로프를 포함하지만 좁은 의미로는 둥근 소선만으로 된 것이다. 형상은 스트랜드 로프의 1개의 스트랜드와 동일하다.	유연성이 약함. 신장이 적음.
구조용 록코일 로프 (locked coil rope)		둥근 소선의 스파이럴 로프를 중심에 배치하고, 최외층 2~5층은 이형 선으로 배치하여 구성된 로프. 이형 와이어는 Z형과 사다리꼴이고, 원칙으로 1층씩 교대로 역방향을 가짐.	유연성과 신장은 스파이럴 로프와 동일함. 또한 수밀성이 우수함.
평행선 스트랜드 (parallel wire strand)		둥근 소선을 묶어서 외곽단면을 6 각형으로 만든 것으로 주로 경간이 장대한 교량의 메인 케이블에 사용한다.	인장특성은 가장 우수하나 유연성이 가장 낮다.
피복 평행선 스트랜드 (non-grout type PWS)		둥근 소선을 묶어서 완만한 피치로 비틀은 외곽단면이 원형으로서 사장교의 메인 케이블에 사용하며, 원칙적으로 플라스틱을 피복하지만 피복하지 않은 것도 사용할 수 있다.	인장특성은 평행선 스트랜드와 유사하나, 유연성은 평행선 스트랜드에 비해 아주 우수함.
PC 꼬임강선 (prestressing strand)		피복PC 꼬임강선을 복수로 묶어서 관에 투입한 것과 PC 꼬임강선을 7 가닥 또는 19 가닥으로 꼬아 플라스틱을 피복 한 것이 있다.	인장특성과 유연성 모두 피복 평행선 스트랜드와 유사.

지만 선재로 이용되는 케이블을 대상으로 하고 이러한 PC강재는 제외한다. 케이블 재료는 강선을 꼬아 엮거나 또는 평행하게 결속하여 집합체를 구성한 것이기 때문에 다음과 같은 장점이 있다. ① 강선 자체는 인발 가공에 의한 성유상 조직을 갖고 있으므로 다른 강재에 비해 인장강도 및 피로강도가 높다. ② 가는 선의 집합체이기 때문에 외관상 같은 직경의 강봉에 비해 훨씬 유연성이 풍부하여 구부러 사용하기도 하고, 털 등에 감아서 운반할 수도 있기 때문에 길이에 제한을 많이 받지 않는다. ③ 여러 개의 강선으로 구성되기 때문에 부분적인 손상이나 흠집에 대한 위험이 분산된다. 이상과 같은 장점을 갖고 있는 반면, 신장, 크리프가 크고 비틀림이 생길 수 있다. 방청·방호처리가 필요한 점등을 설계시에 고려해야만 한다.

2. 케이블의 역학적 특성

2.1. 케이블의 인장강도 및 파단하중 계산 방법

시험으로 파단하중을 구하는 경우에, 시험편의 양단을 백금속 또는 아연등으로 원형에 고정하거나 이것을 대신할 적당한 방법으로 인장시험기에 설치한다. 그런 다음 이것에 천천히 인장력을 가하면서, 파단에 이를 때까지의 최대하중을 파단 하중으로 한다. 시험편 고정단 간격은 그 직경의 40배 이상으로 한다. 그리고 그 길이가 2m를 초과한 경우, 2m로 해도 좋다. 또한 그 시험에 대해서 시험편이 고정단 부위에서 파단할 때는 재시험을 실시할 수 있다. 또한 평행선

스트랜드는 결속하기 전의 소선으로, 그 외의 케이블 재료는 출하전의 제품으로 각각 파단하중이 확인될 수 있으므로 통상 설계시의 파단하중은 규격에 표시된 값으로 설정한다. 일반 재료의 프아송 비에 준하여 로프류에 하중비 R% [파단하중에 대한 비율]가 작용할 때 축방향 변형도를 ϵ , 로프직경의 감소율을 λ 라 할때 식 $\nu_r = \lambda/\epsilon$ 으로 프와송 비를 구할 수 있다.

2.2. 케이블의 파단하중 계산방법

케이블 재료의 파단 하중 F_{tb} 는 다음 식으로 계산한다.

$$F_{tb} = A_s \times (1 - \alpha) \times \beta \times \sigma_{tb}$$

단, A_s : 케이블 재료와 동일한 단면을 갖는 도형의 면적.

α : 공극 계수.

β : 꼬임 효율.

σ_{tb} : 강선의 공칭 인장강도

<표 3> 케이블의 공극계수(α) 및 꼬임효율(β)

케이블 재료	α	β
구조용 스트랜드 로프(공심형)	0.39	0.87
구조용 스트랜드 로프(CFRC)	0.34	0.83
구조용 스파이럴 로프	0.24	0.88
구조용 록 코일 로프	0.18	0.90
평행선 스트랜드	0.10	1.0
피복 평행선 스트랜드	0.19	
PC꼬임강선 (7가닥 꼬임)	0.23	
PC꼬임강선 (19가닥 꼬임)	0.16	

<표 4> 케이블의 공칭강도

케이블 재료	종류	공칭인장강도	
		kgf/mm ²	(N/mm ²)
구조용 스트랜드 로프 및 구조용 스파이럴 로프	ST 1470	150	((1,470))
	ST 1570	160	(1,570)
	ST 1670	170	(1,670)
구조용 록 코일 로프	-	150	(1,470)
평행선 스트랜드	ST1570	160	(1,570)
	ST 1770	180	(1,770)
피복 평행선 스트랜드	-	160	(1,570)
PC꼬임강선 (7가닥 꼬임)	A종	175	(1,720)
	B종	190	(1,860)
PC꼬임강선 (19가닥 꼬임)	-	185	(1,810)

2.3. 프리스트레싱 후의 탄성계수 및 크리이프 변형도 측정기법

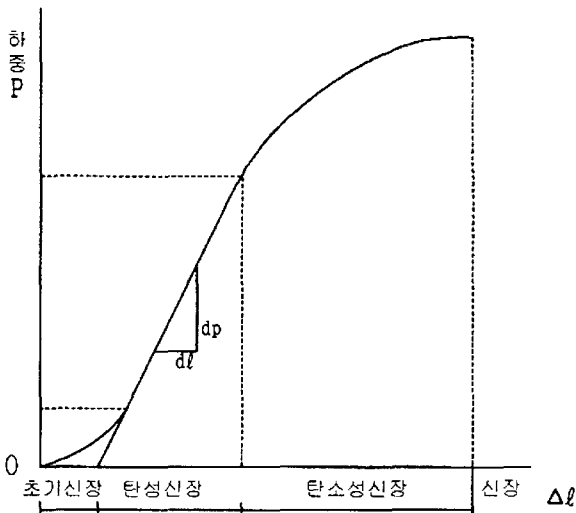
스파이럴 로프의 경우 파단시의 신장은 3~6%로서 소선의 신장에 비해 약간 크다. 로프류가 여러개의 강선을 꼬아 합친 구조체이므로 초기신장이 발생하는 것과 파단 직전에는 반드시 모든 소선이 하중을 균등히 분담하지 않고 특정 소선이나 또는 특정 스트랜드에 응력이 집중되어 신장이 증대하고, 남아 있는 소선 또는 스트랜드에 부하가 분산되어 신장이 조장되기 때문이다.

로프류가 일반 강재에 비해 특징적인 것은 저하중역에서 초기신장이 생긴다는 것이다.

로프류는 여러개의 강선을 꼬아서 구성된 구조체로 저하중역에서는 소선들이 충분히 접촉되어 있지 못하고 개별 코일스프링의 집합체로 거동하고 있기 때문에 초기신장이 생긴다. 따라서 소선의 수가 많고 로프의 구성이 복잡할수록 초기신장은 커진다.

〈표 5〉 프리스트레칭 후의 초기신장

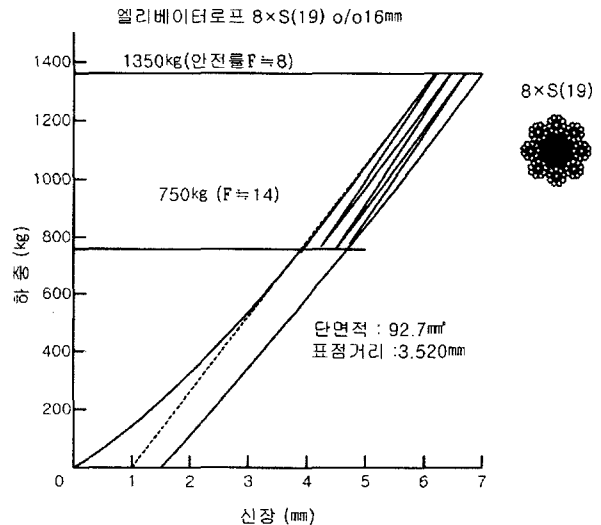
케이블 재료	초기신장(%)
구조용 스트랜드 로프	0.1 ~ 0.2
구조용 스파이럴 로프	0.05 ~ 0.1
구조용 록 코일 로프	
평행선 스트랜드* 피복 평행선 스트랜드* PC 꼬임강선 (7 가닥 꼬임, 19 가닥 꼬임)*	0



〈그림 2〉 모델화한 하중-신장 선도

즉, 스파이럴 로프 및 록트코일 로프에 비해 스트랜드 로프의 초기신장이 크다.

와이어 로프에 일단 부하를 주면 원래의 상태로 되돌아가지 않고 완전히 제하 하여 하중이 0이 되어도 어느 정도의 잔류변형이 생긴다. 엘리베이터용의 와이어 로프에 일정한 하중을 여러번 반복 가력한 경우의 이력을 <그림 3>에 표시하였다. 단, 이 실험은 안전율 F가 8~14로 작은 응력 범위에서 실시한 것으로 안전율이 작은 경우에는 이력루프가 커진다. 프리스트레칭은 강선의 밀착도를 높이는 효과가 있으므로 초기신장은 프리스트레칭으로 감소시킬 수 있다. <그림 4>는 하중이력에 따른 하중-신장 관계를 표시한 것인데, 프리스트레칭에 의해 하중이력의 중기(곡선b)와 같은 거동을 나타내면 충격흡수능력(곡선과 횡축으로 둘러싸인 면적)이 과소평가 되므로 좋지 않다. 따라서 프리스트레칭 하중은 와이어

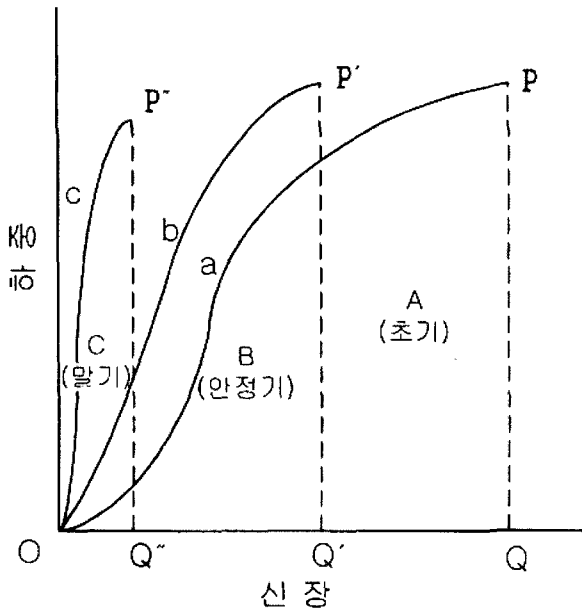


〈그림 3〉 반복하중에 의한 신장 이력

〈표 6〉 프리스트레칭 후의 탄성계수

케이블 재료	탄성계수	
	kgf/mm ²	(N/mm ²)
구조용 스트랜드 로프	14,000	(140,000)
구조용 스파이럴 로프	16,000	(160,000)
구조용 록 코일 로프		
평행선 스트랜드* 피복 평행선 스트랜드*	20,000	(200,000)
*PC꼬임강선 (7 가닥 꼬임, 19 가닥 꼬임)	19,000	(190,000)

* 프리스트레칭의 효과를 갖는 열처리에 의해 초기신장을 제거하는 효과를 가짐.



〈그림 4〉 사용이력에 의한 하중-신장 선도의 변화

〈표 7〉 DIN 1880에 따른 탄성계수

케이블 재료		탄성계수 (N/mm^2)
스트랜드 로프(CFRC)	6×7 그룹	120,000
	6×19 그룹	110,000
	6×37 그룹	100,000
스파이럴 로프		150,000
록 코일 로프		160,000
평행선 스트랜드*		200,000

〈표 8〉 케이블 재료의 크리프 변형도

케이블 재료	크리프 변형도(%)	용력 수준
구조용 스트랜드 로프	0.025	장기 허용 인장력 이하
구조용 스파이럴 로프	0.015	
조용 록 코일 로프		
평행선 스트랜드	0.007	
피복 평행선 스트랜드 PC꼬임강선		

로프의 파단하중의 40~50%가 적당하다. ASTM A 603-38 "Standard Specification for Zinc-Coated Steel Structural Wire Rope" 에서는 프리스트레칭 후의 구조용 스트랜드에 대한 탄성계수의 최소치를 $140\text{ GPa}=140000\text{ N/mm}^2$ 로 규정하고 있다. ASTM A 586-86 "Standard Specification for Zinc-Coated Parallel and Helical Steel Wire Structural Strand" 에서는 프리스트레칭의 구조용 스파이럴 로프의 탄

〈표 9〉 공칭 인장강도(σ_{tb})

케이블 재료	종류	공칭인장강도	
		kgf/mm^2	N/mm^2
구조용 스트랜드 로프 및 구조용 스파이럴 로프	ST 1470	150	(1,470)
	ST 1570	160	(1,570)
	ST 1670	170	(1,670)
구조용 록 코일 로프	-	150	(1,470)
평행선 스트랜드	ST1570	160	(1,570)
	ST 1770	180	(1,770)
피복 평행선 스트랜드	-	160	(1,570)
	-	-	-
PC꼬임강선 (7가닥 꼬임)	A종	175	(1,720)
	B종	190	(1,860)
PC꼬임강선 (19가닥 꼬임)	-	185	(1,810)

성계수의 최소치를 로프직경 12.70~65.09mm에 대해서 $165,500\text{ GPa}(N/mm^2)$, 로프직경이 66.67mm를 초과할 경우에 $165,500\text{ GPa}(N/mm^2)$ 로 규정하고 있다. PC꼬임강선의 탄성계수는 $195,000\text{ kgf/mm}^2$ 로 하고 또한 여러 겹으로 꼬인 PC꼬임강선은 구조용 로프처럼 $14000\text{ kgf/mm}^2\sim 160000\text{ kgf/mm}^2$ 으로 설정하는 것이 타당하다.

2.4. 프리스트레싱 후의 온도 및 선팅창 계수

와이어 로프의 선팅창 계수에 관한 실험 예를 표 4.10에 표시하였다. $20^\circ\text{C}\sim 80^\circ\text{C}$ 의 온도범위에서 측정된 소선의 선팅창 계수 $11.4\sim 11.6\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 와 거의 같다. 또 DIN 18 800에는 각종의 강재의 선팅창 계수를 $12\times 10^{-6}/\text{K}$ 로 하고 있어 어느 쪽이나 소재로 쓰이는 철과 같게 간주하고 있다.

〈표 10〉 와이어 로프의 선팅창 계수

공시 로프	측정온도의 범위($^\circ\text{C}$)	선팅창 계수 ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)
6×9 O/O 12mm 탄소함유량 : 0.55%	19.1 - 77.5	11.4
	19.1 - 80.0	11.3
	19.1 - 80.4	11.5
	19.1 - 81.5	11.4

3. 케이블 재의 인장시험 결과

3.1. 케이블 재의 인장시험 방법

케이블재의 인장시험은 단부에 지그를 설치해야만 인장 시험이 가능하다. 그리고 시험체의 길이가

길고 인장 파괴시에 케이블이 휘날리는 관계로 안전 조치가 필요하며 시험 시에 수평인장력을 가하여 시험하는 방법을 많이 선택한다. 케이블은 기계, 건설, 선박, 어업, 임업, 광업, 엘리베이터 등의 일반 용과 항공기 조정용, 의료기계, 계측기계, 원자로, 운동기구, 기계 기구 조작용 등이 있다. 이러한 케이블은 일반적인 철과는 달리 열처리 후에 수회의 냉간 인발 가공과정을 통하여 강철조직을 입상조직에서 섬유상 조직으로 변화시키기 때문에 다른 어떤 금속보다도 강도와 인성이 우수하다. 이처럼 이용도가 매우 광범위하고 유용한 케이블은 작용인장력과 반복하중, 주위환경에 의한 부식, 진동을 받게 되면 국부적인 마모와 단선등이 유발된다. 케이블은 사용 전에 반드시 어떠한 단말처리가 가해진다. 대표적인 단말처리 가공에는 소켓고정, 클립고정, 쇄기고정, 아이 스프라이스 고정, 싱크로크 압축고정, 토요록 압축고정 등이 있다. 로프의 신장은 장력에 의해서 발생하는 정적신장 외에, 반복 사용되는 사이에 발생하는 시간의 경과에 따른 신장 크리프 신장이 있다. 케이블의 하중-신장 곡선은 로프의 구조, 피치 등에 따라 다르므로, 정확한 하중 신장 곡선은 인장 시험에 의해서 구할 수 있다. 케이블의 파단 하중은 15~20% 하중 점과 50~60%의 하중 점을 경계로 해서, 초기변형 영역, 탄성변형, 및 소성 변형의 신장으로 구분된다. 여기에서 케이블의 경우에는 일반강재와 달리, 초기변형 영역에서는 로프의 조임에 따른 구조상의 신장이 크게 나타나고, 명료한 항복점이 인식되지 않는다. 또한 탄성계수도 그 시점의 하중에 따라 변해서 일정하지 않으므로 단순히 후크의 법칙에 의해서 구할 수 없다.

3.2. 케이블의 정착부

케이블의 정착부는, 케이블이 축력만을 전달하는 특성을 고려하여, 구조물에 정착시킬 필요가 있다. 그 정착부의 정착물에는 다양한 종류가 있지만 여기에서 규정하는 정착방법은 케이블의 파단하중을 보증하는 케이블 소켓 정착물, 압축정착물과 현재 일반적으로 많이 사용되고 있는 아이 압축 정착물이 많이 사용된다.

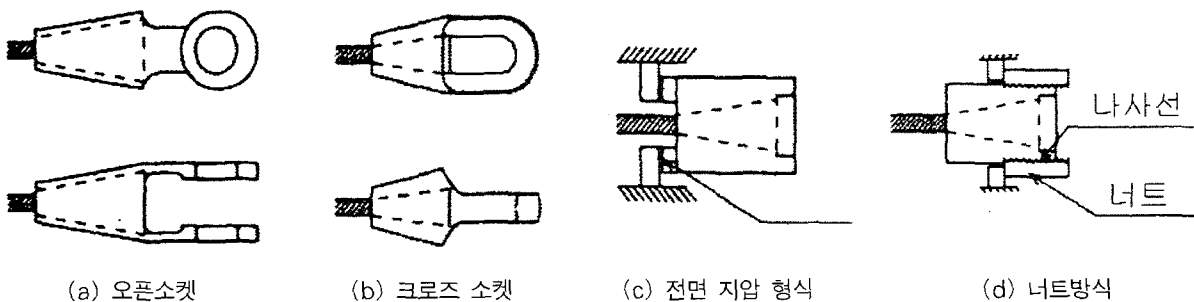
압축 및 아이 압축정착물에 관해서는, 업체의 규격이 다르더라도 일반적으로 파단하중의 95~100% 정도가 보장된다.

간단한 구조물이나 가설물의 경우에는 보다 간단한 정착방식인 크리프 정착, 녹 방지 정착, 마찰정착물이 자주 사용된다. 이것은 작업이 간단해서 현장에서 길이를 조정할 수 있는 이점이 있지만 응력 집중에 의한 강도저하가 생길 가능성이 있어 설계·시공관리에 의한 검사가 필요하다.

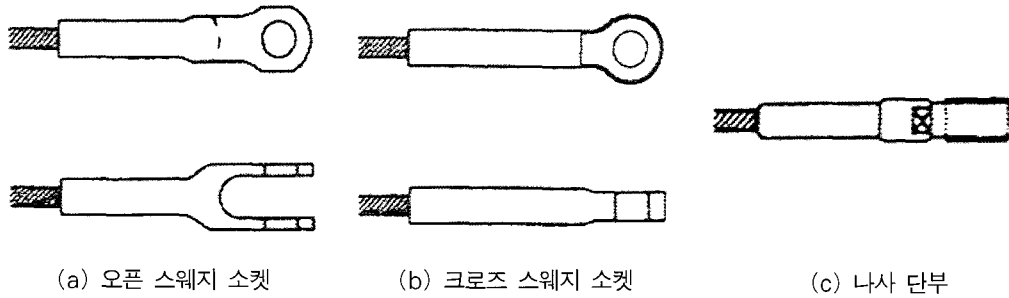
소켓 정착은 소켓 정착철구의 원추내부에 와이어 로프의 소전을 벌려, 아연-동 합금을 녹여 넣은 것이다. 녹여 넣은 서선의 탈지·세정·도금을 충분히 관리하여 가공하여야 한다. 힘의 전달 방식으로는

〈표 11〉 케이블 정착방식

케이블 재료	정착방식
구조용 스트랜드 로프	소켓 정착·압착 정착·아이 압착 정착
구조용 스파이럴 로프	소켓 정착·압착 정착
구조용 록코일 로프	소켓 정착
평행선 스트랜드	소켓 정착
피복 평행선 케이블용 스트랜드	소켓 정착
PC강선	압축 정착



〈그림 5〉 소켓의 일반적인 형상



〈그림 6〉 압축정착의 일반적 형상

〈표 12〉 소켓 재료

규격번호	규격명	기 호
KS D 3752	기계 구조용 탄소강 강재	S 25 C-14 C
KS D 4101	탄소강 주강품	SC 450-480
KS D 4108	용접 구조용 주강품	SCW 450-550
KS D 3752	구조용 고장력 탄소강 및 저 합금강 주강품	SCMn 2 A

소선과 아연-동 합금과 소켓 원추내부는 면압과 마찰력에 의해 힘이 전달된다.

압축 정착은 케이블에 정착 철구를 장착하고 프레스와 로타리스렛지 등으로 정착 철구를

압착하여 압착시에 발생하는 정착 철구 내면과 케이블 표면과의 용융에 의해 정착력을 확보 하는 기구이다. 이 방식은 주로 스트랜드 로프에 많이 사용되지만, 소켓방식에 비해서 소형화가 가능한 이점이 있기 때문에 스파이럴 로프에도 널리 적용되고 있다.

아이 압축정착은 스트랜드 로프에 적용되는 것으로 단부를 꺾어 돌려 루프를 형성하여 알루미늄 합금이나 철제 슬리브를 압축하여 정착하는 방법으로 정착 기구는 압축 정착 방식과 동일하다. 직경 30mm가 한계 범위이다.

소켓의 모든 재료는 탄소 강재이고, 일반적으로 널리 사용되는 재료이다. 부식환경에서 사용될 경우에는 도금·도장 등의 방식처리가 필요하다. 방청 특성상, 철구 등에 스테인레스강을 사용하는 경우에는 다른 종류의 강재와의 접촉에 의한 부식이 발생하지 않도록 대책을 강구해야만 한다.

소켓의 주입 재료로서는 납계통 합금·아연계통 합금이 사용될 수 있다. 소켓의 주입재료는 부착력이 클 것, 용융점이 낮고 유동성이 우수할 것, 그리

〈표 13〉 소켓재의 장기 허용 응력도

재 료	장기허용응력도(kgf/mm ²)		
	인장	압축	전단
S 25 C	16	16	9
S 30 C	17	17	10
S 35 C	19	19	11
S 40 C	20	20	12
S 45 C	21	21	13
SC 450	14	14	8
SC 480	17	17	10
SCW 450	14	14	8
SCW 480	17	17	10
SCMn 2 A	19	19	11

고 크리프 변형이 적어야 한다는 조건이 있다. 간단한 케이블의 단말소켓에는 작업성이 좋은 납계통 합금이나 주석계통의 합금이 사용될 수 있지만, 크리프 변형이 크기 때문에 본 기준에서는 크리프 변형에 대해 저항성이 높고 우수한 기계적 특성을 갖는 아연-동(98%:2%)합금을 사용하는 것을 표준으로 하고 있다. 단 아연계 합금은 용점이 높기 때문에 보통의 주입온도 460℃ 선소가 열팽창을 받기 쉬우므로, 주입온도, 소켓철구의 열 등에 관해 신중하게 관리하는 일이 중요하다.

순아연은 합금에 비해 크리프 특성이 약간 열등하나 안전율이 크다. 또 단기간의 가설구조에 사용되는 경우에는 실용적으로 충분히 견디는 아연-동 합금을 사용하지 않은 예도 있다. 아연-동 합금을 사용하지 않은 예로는 에폭시 수지를 기본으로 하는 수지 주입이다. 이것은 수지 자체의 질량이 작고 일상 온도에서 주입할 수 있기 때문에 열팽창을 받지 않는다는 이점 등이 있다. 한편 수지특유의 경화 시간의 관계에서 가공작업이 길고 충격에 대해 균

열이 발생한다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 소켓입구에는 수지를 사용하여 주입합금에 의한 열팽창을 피하고 강도재로서 아연-동 합금을 이용하는 방식이 있다.

개량방안으로서 에폭시 수지·아연분말·강구(鋼球)를 사용한 주입방법이 독일에서 개발되어 높은 응력진폭에 견딜 수 있는 것이 있다. 또한 선소 단부를 헛팅가공한 에폭시 수지와 병용한 고정방법도 실용화되고 있다.

주입재료에 아연-동 합금을 사용한 경우는 그 허용 압축 응력도를 $4kg/mm^2$ 로 할 수 있다. 주입재료로서의 아연-동 합금($98\pm 2\% : 2\pm 0.2\%$)은 크리프 특성이 우수하여 허용 압축 응력도의 범위 내에 있으면 크리프 변형은 무시할 수 있다.

크리프 및 압축강도를 특성으로 제한하면 알루미늄·아연·동합금이 가장 우수하지만 부식의 우려가 있어서 사용할 수 없다.

주입재료의 부착 응력도는 <표 14>에서 보는 바와 같다.

<표 14> 주입재료의 부착 응력도

부 위	장기 허용 부착 응력도
주입재료-선소	$0.6 kgf/mm^2$

합금의 부착력은 재하속도와 부착면적에 좌우된다. 재하속도가 낮으면 크리프와 같은 현상이 일어날 수 있다. 미소한 부착면적에서 재하속도가 빠른 경우 높은 부착력을 보여준다. 노출된 강선, 아연도금 강선에 대해 충분한 관리를 하여 수행된 실험에서는 부착력이 $4kg/mm^2$ 의 부착력을 발휘한다는 보고가 있다.

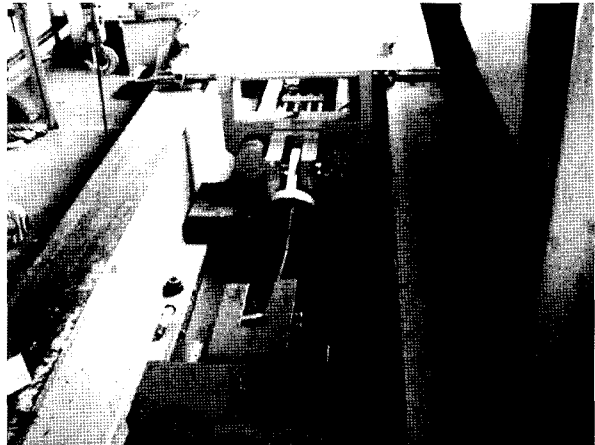
소켓 내면과 주입재의 마찰계수는 <표 15>에서 보는 바와 같다.

<표 15> 주입재료의 부착 응력도

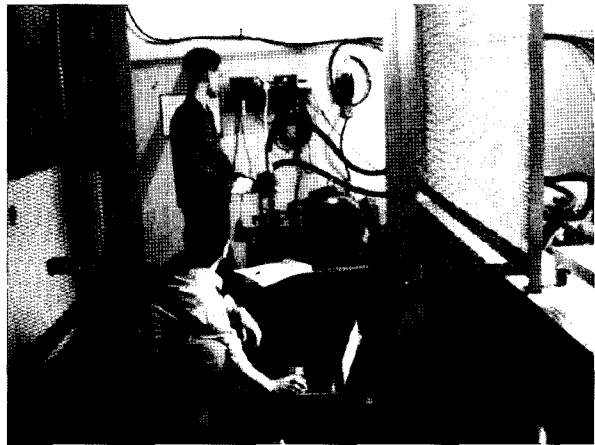
부 위	장기 허용 부착 응력도
주입재료-선소	$0.6 kgf/mm^2$

소켓 내면에 슬릿을 붙여 변형도 게이지로 측정

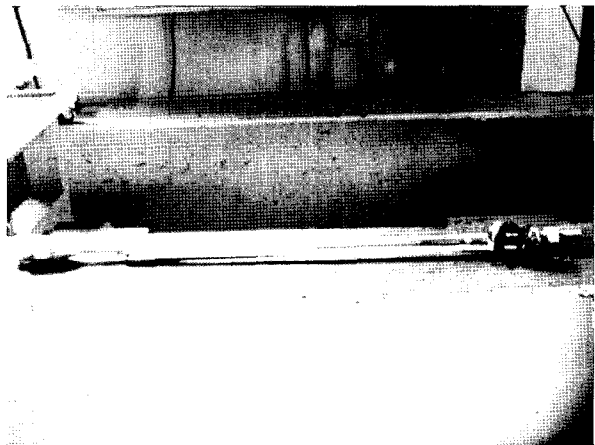
한 실험치에서 마찰계수를 산출한 예가 있지만 슬릿에 의한 두께의 변화로부터 힘 응력이 발생하여, 정확한 값을 구할 수 없지만 여러 보고서의 결과를 고려하여 0.2로 한다.



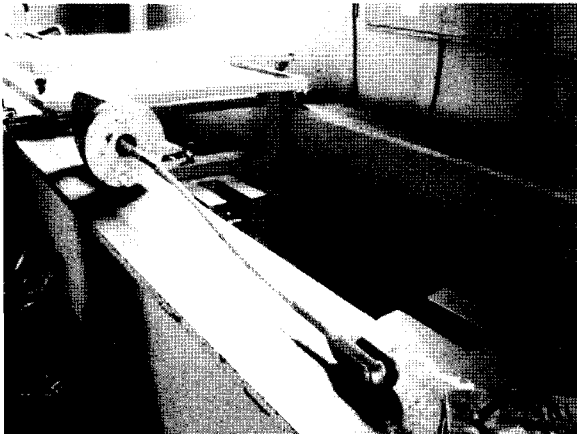
<그림 7> 케이블의 인장실험 장치



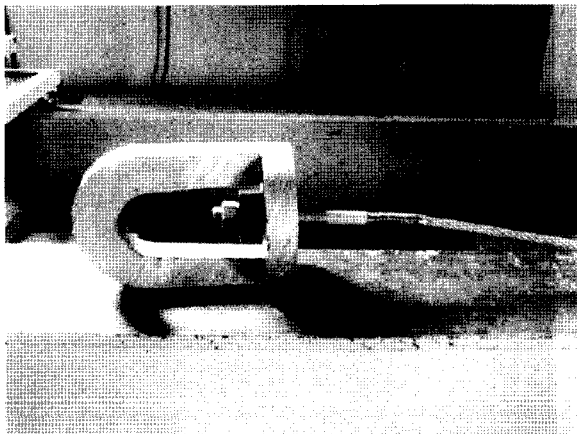
<그림 8> 케이블의 인장실험 측정 장치



<그림 9> 케이블의 인장실험을 위한 단부 소켓 장치



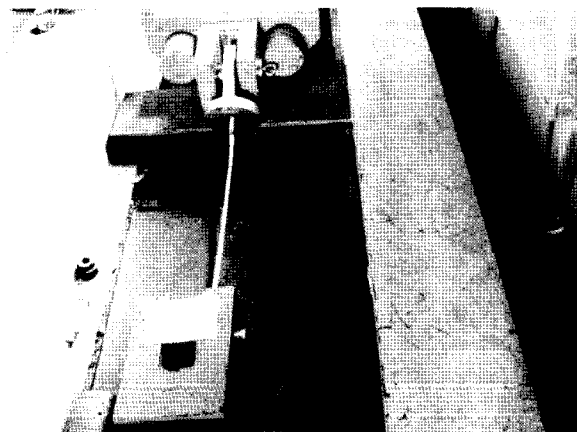
〈그림 10〉 케이블의 인장시험을 위한 단부 소켓 고정 장치



〈그림 11〉 케이블의 인장시험을 위한 단부 볼트 압축 고정 장치

3.2. 케이블 시험체 Cable 01 인장시험 결과

케이블 Cable 01 단부 소켓을 제외한 시험체 순길이는 660mm 시험체의 직경은 16.6mm이다. 인장 시험을 위한 단부 고정은 한쪽은 소켓 고정 장치이

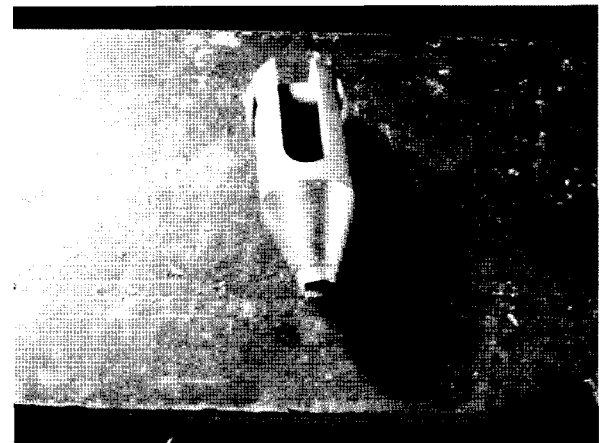


〈그림 12〉 케이블 시험체 Cable 01의 인장시험 장치

고 다른 한쪽은 볼트 고정 장치로 하였다. 시험결과에서 본 시험체는 케이블이 끊어지지 않고 소켓 고정부에서 큰 형태로 파괴되었다. 최대내력은 14.1톤이고 최대변위는 18.45mm로 주어졌다.

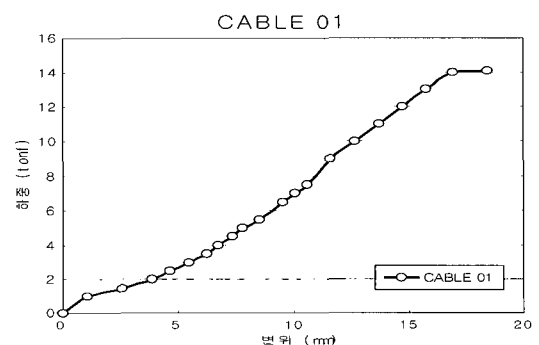


〈그림 13〉 케이블 시험체 Cable 01의 인장시험 결과



〈그림 14〉 케이블 시험체 Cable 01의 단부 소켓의 파괴

Cable 01 : 케이블 순길이가 = 660mm
 시험체 직경 = 16.6mm
 파단위치: 단부소켓 파괴

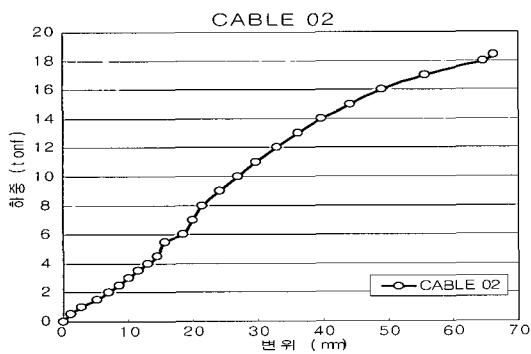


〈그림 15〉 케이블 시험체 Cable 01의 하중-변위 곡선

3.3. 케이블 시험체 Cable 02 인장시험 결과

케이블 Cable 02 단부 고정장치를 제외한 시험체 총길이는 2380mm 시험체의 직경은 15mm이다. 인장시험을 위한 단부 고정은 볼트 고정 장치로 하였다. 시험결과에서 본 시험체는 케이블이 파단 되었다.

Cable 02 : 케이블 순길이 = 2380mm
 시험체 직경 = 15.0mm
 파단위치: 케이블 파괴

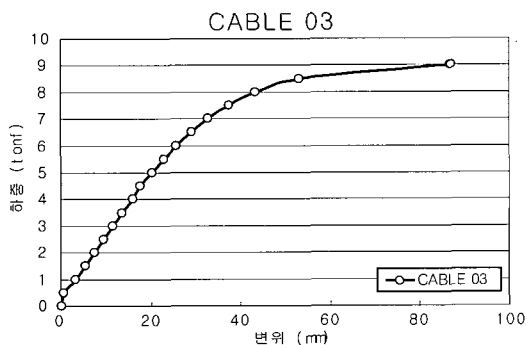


〈그림 16〉 케이블 시험체 Cable 02의 하중-변위 곡선

3.4. 케이블 시험체 Cable 03 인장시험 결과

케이블 Cable 03 단부 고정장치를 제외한 시험체 총길이는 2270mm 시험체의 직경은 11mm이다. 인장시험을 위한 단부 고정은 볼트 고정 장치로 하였다. 시험결과에서 본 시험체는 케이블이 파단 되었다.

Cable 03 : 케이블 순길이 = 2270mm
 시험체 직경 = 11.0mm
 파단위치: 케이블 파괴

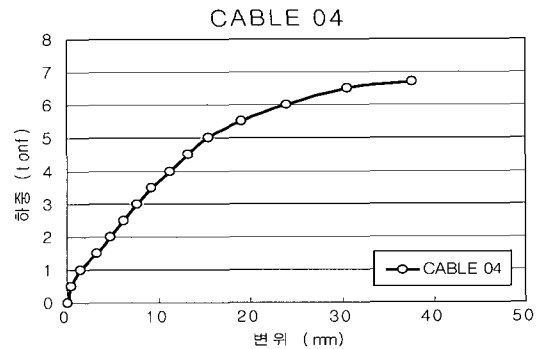


〈그림 17〉 케이블 시험체 Cable 03의 하중-변위 곡선

3.5. 케이블 시험체 Cable 04 인장시험 결과

케이블 Cable 04 단부 고정장치를 제외한 시험체 총길이는 15150mm, 시험체의 순길이 960mm, 시험체의 직경은 10mm이다. 인장시험을 위한 단부 고정은 볼트 고정 장치로 하였다. 시험결과에서 본 시험체는 볼트부분이 파단 되었다.

Cable 04 : 시험체 총길이 = 1,515mm
 케이블 순길이 = 960mm
 시험체 직경 = 10.0m
 파단위치: 볼트부분 파괴

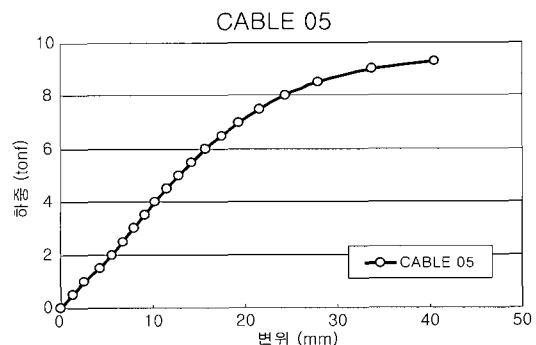


〈그림 18〉 케이블 시험체 Cable 04의 하중-변위 곡선

3.6. 케이블 시험체 Cable 05 인장시험 결과

케이블 Cable 05 단부 고정장치를 제외한 시험체 총길이는 1625mm, 시험체의 순길이 1020mm, 시험

Cable 05 : 시험체 총길이 = 1,625mm
 케이블 순길이 = 1,020mm
 시험체 직경 = 12.0mm
 파단위치: 케이블 결속부 파괴



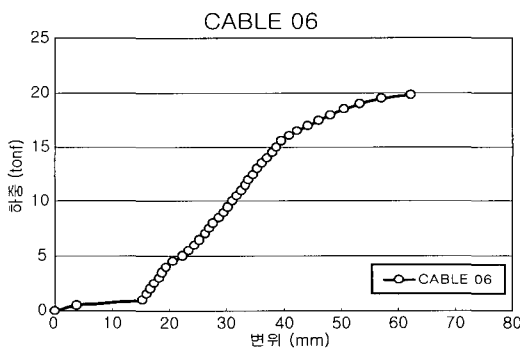
〈그림 19〉 케이블 시험체 Cable 05의 하중-변위 곡선

체의 직경은 12mm이다. 인장시험을 위한 단부 고정은 볼트 고정 장치로 하였다. 시험결과에서 본 시험체는 케이블 결속부 부분이 파단 되었다.

3.7. 케이블 시험체 Cable 06 인장시험 결과

케이블 Cable 06 단부 고정장치를 제외한 시험체 총길이는 1530mm, 시험체의 순길이 860mm, 시험체의 직경은 16mm이다. 인장시험을 위한 단부 고정은 볼트 고정 장치로 하였다. 시험결과에서 본 시험체는 나사산이 뭉개 지면서 볼트가 파단 되었다.

Cable 06 : 시험체 총길이 = 1,530mm
 케이블 순길이 = 860mm
 시험체 직경 = 16.0mm
 파단위치: 초기 1-2t 구간에서 볼트 나사산 뭉개짐, 최종 볼트 파괴

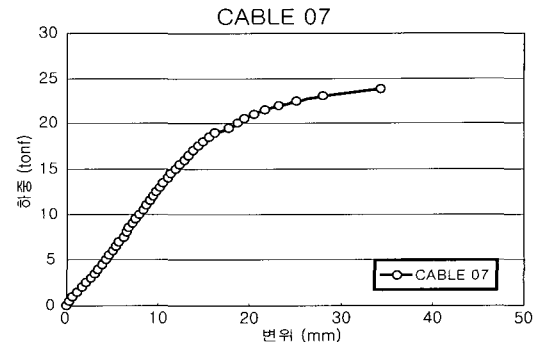


〈그림 20〉 케이블 시험체 Cable 06의 하중-변위 곡선

3.8. 케이블 시험체 Cable 07 인장시험 결과

케이블 Cable 07 단부 고정장치를 제외한 시험체 총길이는 1450mm, 시험체의 순길이 580mm, 시험체의 직경은 18mm이다. 인장시험을 위한 단부 고정은 볼트 고정 장치로 하였다. 시험결과에서 본 시험체는 케이블이 파단 되었다.

Cable 07 : 시험체 총길이 = 1,450mm
 케이블 순길이 = 580mm
 시험체 직경 = 18.0mm
 파단위치: 케이블 결속부 파괴

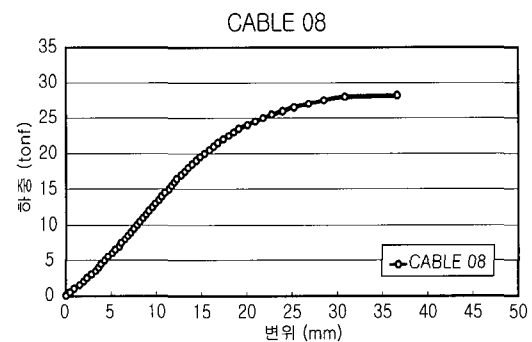


〈그림 21〉 케이블 시험체 Cable 07의 하중-변위 곡선

3.9. 케이블 시험체 Cable 08 인장시험 결과

케이블 Cable 08 단부 고정장치를 제외한 시험체 총길이는 1500mm, 시험체의 순길이 660mm, 시험체의 직경은 20mm이다. 인장시험을 위한 단부 고정은 볼트 고정 장치로 하였다. 시험결과에서 본 시험체는 케이블의 결속부가 파단 되었다.

Cable 08 : 시험체 총길이 = 1,500mm
 케이블 순길이 = 660mm
 시험체 직경 = 20.0mm
 파단위치: 케이블 결속부 파괴

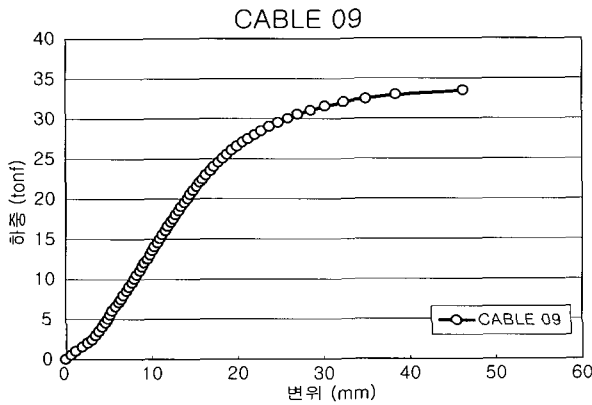


〈그림 22〉 케이블 시험체 Cable 08의 하중-변위 곡선

3.10. 케이블 시험체 Cable 09 인장시험 결과

케이블 Cable 09 단부 고정장치를 제외한 시험체 총길이는 1500mm, 시험체의 순길이 660mm, 시험체의 직경은 22mm이다. 인장시험을 위한 단부 고정은 볼트 고정 장치로 하였다. 시험결과에서 본 시험체는 케이블의 결속부가 파단 되었다.

Cable 09 : 시험체 총길이 = 1,500mm
 케이블 순길이 = 660mm
 시험체 직경 = 22.0mm
 파단위치: 케이블 결속부 파괴

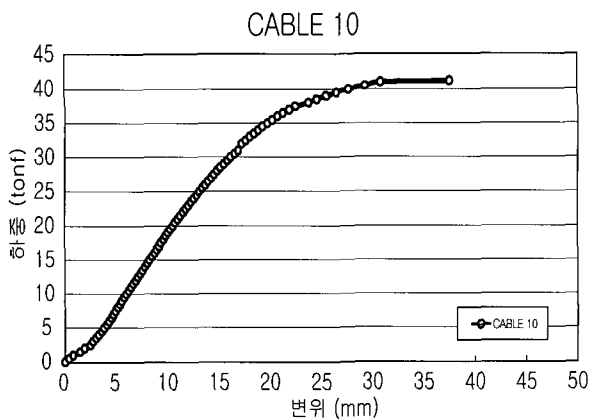


〈그림 23〉 케이블 시험체 Cable 09의 하중-변위 곡선

3.11. 케이블 시험체 Cable 10 인장시험 결과

케이블 Cable 10 단부 고정장치를 제외한 시험체 총길이는 1500mm, 시험체의 순길이 540mm, 시험체의 직경은 25mm이다. 인장시험을 위한 단부 고정은 볼트 고정 장치로 하였다. 시험결과에서 본 시험체는 케이블의 나사산이 파단 되었다.

Cable 10 : 시험체 총길이 = 1,500mm
 케이블 순길이 = 540mm
 시험체 직경 = 25.0mm
 파단위치: 케이블 나사산이 파괴



〈그림 24〉 케이블 시험체 Cable 10의 하중-변위 곡선

4. 결 론

본 연구에서는 케이블 인장 및 단부 소켓 부분의 인장력을 체크하기 위한 시험체 만들어 이장 시험을 수행 하였다. 케이블의 인장 시험에서 케이블에서 최종 인장 파괴가 일어나도록 설계 되어야 하지만 시험체의 일부가 단부 고정부 소켓에서 인장 파괴가 발생하였다. 케이블의 인장내력의 안정성 평가에서 케이블의 단부 소켓 및 볼트 부분에 대한 특별한 설계가 필요하다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호 #’06 R&D B03)에 의해서 수행되었습니다.

참고문헌

1. 대한건축학회, 강구조한계상태설계 기준, 대한건축학회, 1995
2. 한국강구조학회, 강구조 한계상태 설계법, 한국강구조학회, 1997
3. 한국강구조학회, 강구조의 설계, 구미서관, 2000
4. 한국강구조학회, 콘크리트 충전 강관구조 설계 및 시공지침, 한국강구조학회, 2001
5. S.M Hwang and M.S. Joun. "Analysis of Hot Strip Rolling by a Penalty Rigid Viscoplastic Finite Element Method", Int. J. Mech. Sci., Vol.34. pp.971-984, 1997
6. M.S Joun and M.C. Lee, "Quadrilateral Control for Metal Forming Simulation", Int. J.Num. Methods Eng., Vol.40, pp.4059-4075, 1997
7. P.S Timoshenko and J.N Goodier, Theory of Elasticity, London, 1982
8. W.Johnson and P.B Mellor. Engineering Plasticity, 1980.
9. J.A.Schey, "Tribology in Metal Working, Friction, Lubrication and Wear", ASM, Ohio, 1983

10. Holger Jarleborg : "Deformation Hardening of Austenitic Stainless Steel in wire Drawing WIRE and WIRE Products", 1966.
11. BETZALEL AVITZUR, "Analysis of Wire Drawing and Extrusion Through Conical Dies of Small Cone Angle Journal of Engineer for Industry", 1963