

구조용 케이블의 축방향 피로거동

Axial Fatigue Behavior of Structural Cables

서 정 인¹⁾ · 장 승 필²⁾

Suh, Jeong In Chang, Sung Pil

요 약 : 본 연구는 케이블의 피로실험에서 라틴방격법의 유용성을 입증하고, 현수교에서의 행어로서 사용되는 와이어로프의 축방향 피로거동을 보기 위하여 계획되었다. 평균 응력, 응력범위, 시편의 길이를 실험 인자로 선정하였다. 위에 선정한 인자의 효과는 응력 범위의 효과를 제외하고는 이론이 제기되고 있다. 각 인자에서는 3개의 수준이 사용되었다. 각 셀에서 자유도를 증가시키기 위하여 3번을 반복 수행하였다. 피로파괴의 주요 원인은 격자 접촉점에서의 접촉성 피로(fretting fatigue)였다. 선정된 3개의 인자는 모두 유의하였다. 응력범위의 효과는 예측된 바와 같았으며, 길이효과는 예상과 반대의 결과를 보여주었고, 응력수준의 효과는 채택된 응력수준에 따라 실험결과가 달라질 수 있음을 보여줬다. 그러므로 라틴방격법은 직교성이 갖춰진다면 피로거동에 영향을 미치는 인자들을 규명하는 데에 매우 효과적인 실험 방법임을 알 수 있다.

ABSTRACT : This study was planned to verify the usefulness of Latin square design method in fatigue tests of cables and to see the axial fatigue behavior of wire ropes being used as hangers in suspension bridges. Three parameters : mean stress, stress range, and specimen length, were adopted for verification. The effects of these parameters are in argument except for stress range. Three classes in each parameter were used. Triple replication was performed in each cell to increase the number of replication (or degree of freedoms). The major cause of fatigue failure was fretting fatigue at trellis contact point. Three chosen parameters were proved to be significant. It was verified that the effect of stress range was in agreement with expectation, but the effect of specimen length was contrary to the expectation. It was also observed that the effect of mean stress depended upon the chosen level. Therefore Latin square design method is effective for verifying the parameters that affect fatigue behaviour under orthogonality conditions.

핵 심 용 어 : 케이블, 와이어로프, 라틴방격법, 접촉성 피로, 직교성

KEYWORDS : Cable, Wire Rope, Latin Square Design, Fretting Fatigue, Orthogonality

1) 정희원, 우석대학교 토목공학과 전임강사
2) 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

본 논문에 대한 토의를 1999년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

케이블은 횡에 대해서는 무시할 만큼 작은 저항능력을 지닌 유연한 인장부재이다. 케이블은 또한 높은 중량 대비 강도를 지니고 있고, 다양한 분야에 적용되는 부재이다. 최근 들어 해양 및 육상구조물에 사용하기 위해 와이어 로프와 스트랜드의 인장피로에 대한 관심이 일고 있다. 강재 케이블은 현수교에서 행어와 주케이블로서, 사장교에서는 사장재 케이블로서 사용되고 있다.

케이블 구조물의 설계에서 주기적인 하중 하에서의 케이블의 피로 저항성을 중요하게 취급하고 있다. 모든 구조물은 비록 어떤 구조물에서는 하중변동범위가 무시할 만큼 작기도 하지만, 여러 형태의 주기적인 하중을 받게 된다. 케이블 지지교량에서의 피로 하중의 주요 원인은 트럭 또는 열차에 의해 발생하는 응력변동범위이다. 이러한 수많은 응력변동을 교량의 내용년한 동안에 겪게 될 것이다.

차량에 의해 발생하는 응력범위의 크기는 교량을 통과하는 트럭이나 열차의 중량뿐만 아니라 보강형이나 바닥판의 자중에도 좌우된다. 중량이 큰 보강형이나 바닥판은 큰 케이블을 요구하게 된다. 일반적으로 현수교는 강재 보강형으로, 사장교는 콘크리트 보강형으로 되어 있다. 따라서 행어에서의 응력범위가 사장교의 사재에서의 응력범위보다 크다. 그러므로 활하중의 비율도 행어에서 더 크다.

영국의 세번현수교 (Severn Suspension Bridge)의 경사행어시스템은 연직으로 된 행어로 된 전통의 현수교에서는 없는 트러스 액션을 일으킨다. 결과적으로 통과 차량에 의해 발생하는 응력범위는 중앙경간에서 상대적으로 크다. 그러므로 피로 문제는 다른 부재에서보다 행어에서 발생할 가능성이 크다 하겠다.

현재 건설 중인 영종대교의 중앙경간에서의 가장 짧은 행어는 직경 84mm로 소켓과 소켓사이의 길이가 7.2m 정도로 단지 13 lay length(피

치)밖에 되지 않는다. 대개 10배의 lay length를 단부 효과를 합리적으로 배제할 수 있는 바람직한 길이라고 연구자들은 밝히고 있다. 이 길이는 소켓에서 소켓까지의 길이기 때문에 최소길이를 규명하는 일이 필요하다고 하겠다.

이 실험은 또한 평균응력의 크기를 규명하는 데에도 초점을 두었다. 실험은 다양한 실험계획법을 조사를 통해 경제적인 측면을 고려하여 채택하였다.

2. 배 경

피로실험에서 와이어 로프는 일반적으로 일정 진폭의 사인(sine)곡선 형상의 하중을 받게 된다. 응력범위와 평균응력수준 외에 피로거동에 영향을 미치는 많은 인자들이 있는데, 이들은 다음과 같다. 케이블 형태, 강선의 규격, 강선의 품질, 운환제, 피로 파괴의 기준, 사전하중의 크기, 단부의 형태와 품질, 실험하중재하 주기, 시편의 길이 등이다.

플레밍(Fleming)은 직접적인, 주기적인 인장 하중 하에서 구조용 스트랜드의 피로 특성을 규명하기 위하여 실험을 수행하였다. 그는 하중범위가 증가함에 따라 피로 수명이 감소한다고 보고하였다. 이에 덧붙여 최대 또는 최소 하중의 효과는 인장강도의 90%까지도 영향이 거의 없는 것으로 보고하였다. 홉스와 가바미 (Hobbs and Ghavami)는 최소응력으로 공칭 극한강도(S_u)의 10%와 30%를, 다소 임의적인 S_m (평균응력)과 R 를 사용하였다. 여기서 $R = (S_{min}/S_{max})$ 로 정의한다. 그들은 축방향 피로수명이 평균축방향 하중에 거의 독립적인 것으로 보고하였다. 그러나 그들의 주장은 다른 연구자들의 실험결과와 의해 입증되지 못했다. 다른 연구 결과는 케이블의 축방향 피로수명은 응력범위뿐만 아니라 응력수준의 함수라고 밝히고 있다. 적어도 현재로서는 케이블의 피로 파괴의 정의가 다소 임의적이다. 굿맨(Goodman)과 거버(Gerber)의 도표는 다양한

평균하중 하에서 보통 시편의 축방향 피로 데이터를 보여주는 데에 유용하게 사용된다. 그러나 이것도 케이블의 피로에 대해서는 제대로 설명하지 못하고 있다.

1992년 스페인에서 개최된 IABSE 워크숍은 케이블에 대한 피로실험에서 길이효과라는 아주 특정한 의문을 주제로 하였다. 그 때까지 대부분의 연구자들은 시편의 길이가 피치의 6배 이상일 경우의 실험 결과를 받아들여 왔었다. 그러나 시편길이에 대한 이론이 있었다. 채플린(Chaplin)은 매우 짧은 로프의 인장피로에서 길이효과는 무의미하다고 보고하였다. 치엔(Chien)은 실스트랜드(Seale Strand) 형태의 와이어 로프에서 유효길이(effective length)는 피치의 1.18배라고 제시하였다. 유효길이는 회복길이(recovery length)라고도 하는데, 케이블에서 파단된 강선이 인접 강선의 마찰력에 의해 하중을 완전히 부담하게 되는 길이로 정의된다. 따라서 최소시편길이는 이론적으로 계산하면 로프 피치의 2.36배보다 길어야만 한다. 그러나 와이어트(Wyatt)는 단부효과 영향부가 케이블 길이의 약 15%, 즉 각각의 끝으로부터 피치의 2.6배라는 것을 발견하였다. 그러므로 피치의 5배 길이는 단부효과로부터 자유로운, 중앙부분을 갖지 않는 길이이다. 파파니콜라스(Papanikolas)는 다층의 스트랜드에 대해서는 피치의 8배 길이가, 라우프(Raoff)와 홉스(Hobbs)는 10배의 길이가 최소의 바람직한 길이라고 제시하였다.

층사이의 강선 간의 접촉성 피로(fretting fatigue)가 변동하중을 받는 스트랜드 형태 케이블의 피로파괴의 기본적인 메카니즘임이 일반적으로 받아들여져 왔다. 그러므로 내부파단을 발견하는 능력이 피로실험 시나 공용 시에 케이블의 성능을 평가할 때 중요하다. 우드워드(Woodward)는 직경 35mm에서 70mm의 와이어 로프와 다층의 스트랜드, 록트코일(locked coil)의 피로 상태를 관찰하기 위하여 AE(Acoustic Emission) 기법을 사용하였다. 전체 강선 파단의 개수에 대

한 사건(Acoustic Event)의 평균 비율은 다층 스트랜드의 경우에는 0.99, 로프는 0.38이고, 록트코일은 2.43이었다. 따라서 AE기법은 록트코일과 와이어 로프에 대해서는 성공적이 못했다. 더욱이 AE기법은 초기 캘리브레이션이 필요하고, 잡음의 제거를 위한 필터링, 강선이 파단될 때의 사건을 추출하기 위한 특별한 소프트웨어가 필요하므로 매우 복잡하다. 가속도계를 사용하면 강선의 파단을 쉽게 알 수 있다. 가속도계는 가속도에 비례하는 전기적 출력을 주는 전기-기계식 변환기이다. 이전의 연구 결과는 가속도계가 강선의 파단을 인지하는 데에 적합함을 보여준다. 정적시험은 현재의 강성을 알기 위하여 사용되었다. 강성은 가속도계나 AE기법을 사용할 때처럼 강선 파단의 순간을 인지할 수는 없지만 피로 손상의 척도가 될 수 있다.

3. 실험 설계

일반적으로 기술자들은 실험을 계획할 때에 직관에 의존하는 경향이 있다. 실험을 하는 기본적인 이유는 아직 알려지지 않은 어떤 것을 발견하는 데에 있다. 실험은 적은 횟수의 실험결과로부터 전체에 대한 추론을 하도록 설계된다. 그러므로 실험을 적합하게 설계한다면 좋은 결과를 기대할 수 있다. 구조용 케이블의 피로 거동에 영향을 미치는 많은 요인들이 있다. 그러므로 실험의 각 단위는 각 요인의 효과를 검출하는 데에 필요하다. 유감스럽게도 시간과 비용 문제가 실험을 계획할 때에 반드시 고려되어야 한다.

3.1 피로 실험의 기본 원칙

피로 실험을 계획하는 데에는 6가지의 기본 원칙이 있다. 이 6가지 기본원칙은 반복, 랜덤화, 블록화, 시편의 할당, 정량적인 인자 수준의 간격의 광역화와 요인배치(또는 직교성의 사용)이다. 각각을 설명하면 다음과 같다.

(1) 반복의 목적은 실험오차를 예측할 수 있게 하는 데에 있다. 즉 데이터의 편차를 통계적으로 예측하는 것이다. 반복의 횟수를 증가시킴으로써 정밀도를 개선시킬 수 있다.

(2) 통계이론을 적용하는 데에는 항상 랜덤 표본을 가정한다.

(3) 이질적인 처리나 실험 동안 환경이나 시간에 따른 변화에 의한 바람직하지 않은 변동성을 고립 또는 제거하기 위하여 실험 프로그램에서 블록화를 사용한다.

(4) 2개 이상의 정량적인 처리 효과를 비교할 때, 예측의 정도는 일반적으로 각 효과에 대한 시편의 개수를 같게 함으로써 극대화될 수 있다.

(5) 효과의 여부를 보기 위하여 정량적인 처리 효과의 경우에는 간격을 광역화하여야 한다. 선형인 경우에는 효과의 보다 정확한 예측을 위하여 사용한다.

(6) 다양한 처리 효과의 독립적인 예측과 그들의 교호작용이 실험을 통해 얻을 수 있어야 한다. 요인배치의 방법이 이러한 성질을 가지고 있다.

3.2 라틴방격법

많은 실험 계획법이 있는데, 이 중에서 실험 목적에 적합한 방법을 선택하는 것이 필요하다. 예를 들어서 각 블록화된 변수와 관련된 변동에서 실험오차를 제거하기 위하여 랜덤화된 완전 블록 설계에서 2개의 블록 변수를 동시에 사용하는 것이 가능하다. 완전블록설계에서 2개의 블록 변수를 전부 다 사용하는 것은 너무 많은 실험단위를 필요로 한다. 비용 문제로 이러한 것이 불가능할 수도 있다. 그러나 실험오차의 분산을 충분히 줄이고, 실험주제가 합리적인 다양성을 갖도록 하기 위해서 여전히 정도와 변동범위를 고려할 필요가 있을 수 있다. 이런 상황 하에서는 불완전 블록 설계가 유용할 수도 있다. 그런 설계에서는 두 블록 변수의 모든 블록이 사용될 수 있다. 그러나 각 블록이 모든 처리를 포함하지는 않는다. 그런

한 설계가 바로 라틴방격법이다. 이런 검토를 걸쳐서 본 연구에서는 라틴방격법을 채택하였다.

라틴방격법은 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

(1) r 을 실험의 자유도라고 할 때, r 개의 처리를 갖고 있다.

(2) 2개의 블록 변수를 갖는다. 각각은 r 개의 등급을 갖고 있다.

(3) 설계 행렬에서의 각 행과 열은 모든 처리를 포함하고 있다. 즉 각 블록 변수의 등급은 반복을 구성한다.

라틴방격법은 다음과 같은 장점이 있다.

(1) 두 블록 변수의 사용은 종종 하나의 블록 변수만을 사용할 때의 실험오차의 변동성을 크게 줄일 수 있다.

(2) 처리 효과를 소규모 실험으로부터 얻을 수 있다.

(3) 처리의 순서 효과를 고려하는 반복적인 측정 실험에 종종 유용하다.

그러나 다음과 같은 단점을 또한 내포하고 있다.

(1) 각 블록 변수의 등급의 개수가 처리의 개수와 같아야 한다.

(2) 모델의 가정이 제한적이다. (즉, 블록 변수나 처리 사이의 교호작용이 검출되지 못한다.)

(3) 블록 변수들이 다른 등급의 개수를 가질 수 없다.

(4) 랜덤화에 대한 요구 조건이 다른 실험 계획법에 비해 까다롭다.

라틴방격법은 3개의 변수 사이에 교호작용이 없다고 가정하는 모델로서, 가법 모델이다. 고정된 처리와 블록 효과의 경우에 모델은 다음과 같다.

$$Y_{ij(k)} = \mu \dots + \rho_i + x_j + \tau_k + \epsilon_{ij(k)} \quad (1)$$

ρ_i 는 행블록변수의 주요 효과, x_j 는 열블록변수의 주요 효과이고, 처리효과는 τ_k 이다. 여기서 $\mu \dots$ 는 상수이고, ρ_i, x_j, τ_k 는 $\sum \rho_i = \sum x_j = \sum \tau_k = 0$ 과 같은 제한을 갖고 있는 상수이다. $\epsilon_{ij(k)}$ 는 $N(0, \sigma^2)$ 의 분포를 갖는다. i, j, k 는 1

에서 r 의 차원을 갖는다.

라틴방격법은 각 처리마다 r 번의 반복 횟수를 갖는다. 예측을 할 때 너무 작은 횟수라고 생각될 때에는 각 셀 내의 반복을 수행하여 반복 횟수를 증가시킨다. F 검정이 처리효과를 조사하기 위해 수행된다.

3.3 하중재하장비와 실험 설비

실험은 현대건설기술연구소에 설치되어 있는 서보 타입 동적 가력기와 MTS사에서 만든 Flex II_m 시스템을 사용하여 수행되었다. 실험설비를 그림 1에 보였다. 이 설비는 임의의 케이블 길이를 수용할 수 있도록 베이스 프레임의 어느 위치에나 놓일 수 있다. 수평으로 놓인 시편은 가력기를 하중제어 모드로 제어하여 재하하였다. 가력기는 500kN의 용량과 250mm의 스트로크를 갖고 있다. 가동단부의 하중재하판은 실험을 하는 동안에 로프의 비틀력에 의해 발생하는 회전을 방지하기 위하여 사용된다.



그림 1. 케이블 피로 실험 설비

3.4 데이터의 획득

극한인장강도의 80%에 상응하는 한번의 초기 과재하중을 시편의 단부가 소켓에 완전히 밀착되도록 하기 위해 재하하였다. 일정 진폭의 사인

(sine) 곡선 형태의 주기 하중을 일정한 평균하중까지 재하한 후 재하를 시작한다. 축방향 피로 실험을 하는 동안 하중범위, 정적하중, 하중재하 횟수, 재하속도를 실험 시스템의 제어판으로부터 직접 얻는다. 시편의 강성 손실을 일정 간격으로 정적 시험을 함으로써 결정하는데, 본 실험에서는 1000번마다 한번씩 측정하였다. 이 때 정적 시험은 최소와 최대 하중 사이에서 수행하였다. 정적 시험 시에 취득한 데이터는 시험을 행할 당시의 하중재하횟수와 하중의 크기, 변위들이다.

3.5 실험 시편의 준비

소켓팅은 몰드 내에서 부채살 모양으로 펼쳐진 케이블의 주위에 고온으로 가열된 정착 재료를 부음으로써 행해진다. 전통적인 소켓팅 재료는 고온의 액체 상태의 순수 아연으로 구성된다. 사용된 시편에 대한 상세는 표 1에 주어지 있다. 시편의 구분은 LS10_20-1과 같은형태로 주어지 있는데, 여기서 10, 20, 1은 각각 시편의 길이, 응력범위, 같은 종류의 실험 순서를 나타낸다.

표 1. 실험에 사용된 시편의 규격

로프의 형태	6×W(19) IWRC, Warrington type. 7×7+6×(1+6+(6+6)), RHO, zinc coated
실제 로프 직경	12.75mm
실제 단면적	78mm ²
로프의 피치	88.8mm (로프 직경의 7배)
실제 인장강도	1572MPa
실제 파단력	122.625kN

3.6 실험에 사용된 라틴방격

본 실험에 사용된 3개의 요인은 평균응력수준, 응력범위, 시편의 길이이다. 많은 라틴방격 중에서 채택된 라틴방격은 다음과 같다.

	A_1	A_2	A_3
B_1	C_1	C_2	C_3
B_2	C_2	C_3	C_1
B_3	C_3	C_1	C_2

여기서,

A_i ($i=1,2,3$) : 각각 10, 20, 30 배의 lay length,

B_i ($i=1,2,3$) : 각각 15%, 40%, 65%의 UTS에 해당하는 평균응력 수준,

C_i ($i=1,2,3$) : 각각 20%, 24%, 28% of UTS에 해당하는 응력범위이다.

각 셀(cell) 내에서 자유도를 증가시키기 위해 3번의 반복을 수행하였다.

4. 결과와 논의

하중재하 속도는 4Hz 범위 내로 하여, 로프의 외부 온도가 실험하는 동안 35°C 내로 유지되도록 하였다. 실험하는 동안 시편의 온도 변화를 관찰하였다. 그림 2와 3에 하중재하속도를 4Hz와

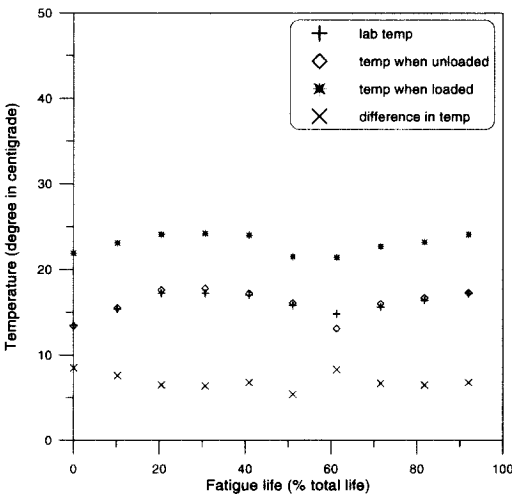


그림 2. 하중재하속도 4Hz에서의 시편의 온도 변화

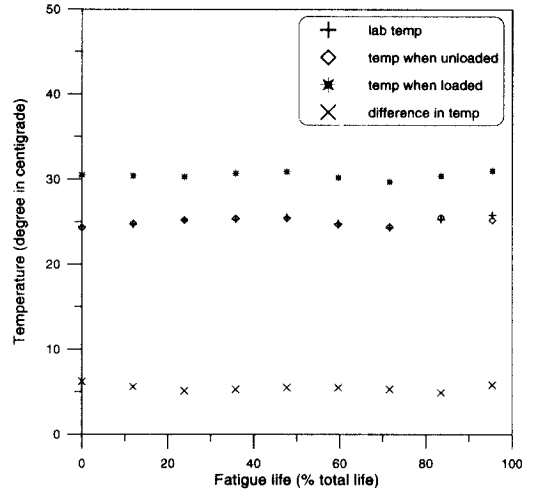


그림 3. 하중재하속도 2.5Hz에서의 시편의 온도변화

2.5Hz로 했을 때의 시편의 온도에 있어서 최대 온도차를 나타낸 경우를 보여주고 있다. 시편이 4.0Hz와 2.5Hz로 재하하였을 때의 최대 온도차는 각각 8.5°C와 6.2°C이었다. 이 온도차는 실험실의 온도와 하중재하속도에 기인하는 것으로 관찰되었다. 스트랜드의 층 사이의 접촉점에서의 온도는 측정된 것보다 더 높을 것으로 예상되지만, 적당한 장치가 없어 로프 내부의 온도를 측정할 수 없었기 때문에, 시편의 외부 온도만을 기록하였다. 하중재하속도가 2.5Hz에서 4.0Hz의 범위에 있을지라도, 하중재하속도가 시편의 피로거동에 크게 영향을 미쳤다고는 생각되지 않는다.

에스링거(Esslinger)는 600MPa에서 800MPa의 높은 응력범위에서 150mm 길이의 강선을 사용하여 실험을 수행하였다. 그 결과는 하중재하속도에 매우 민감한 결과를 나타냈다. 시편이 매우 높은 응력범위에서 실험되었기 때문에 이런 결과를 예측할 수 있었다. 이는 더 작은 하중재하속도에서 나타난 큰 소성변형 범위가 피로수명을 더 짧게 했다는 것을 의미한다. 이런 효과는 응력범위가 피로 한도에 접근할 때에 사라졌다고 언급하였다. 본 실험에서의 하중재하속도는 하중재하속도와 응력범위가 크지 않기 때문에 시편의 피로거동에 영향을 거의 미치지 않았다고 판단할 수 있다.

강선의 변화, 주기적 변위(cyclic displacement), 로프의 신장량으로 실험 결과를 기록하였다. 강선의 파단 위치는 실험이 끝난 후에 시편을 해체함으로써 기록하였다. 해체 결과를 표 2에 나타냈다. 표에서 #1, #2, ...는 가동부로부터 순서

를 부여하였다. 강선의 파단은 다소간 차이는 있지만, 단부와 자유장 부분에서 고르게 분포하였다. 대부분의 강선의 파단은 인접 스트랜드 사이에서 일어났다. 이 격자점에서의 접촉성 피로(fretting fatigue)가 와이어로프의 주요 피로

표 2. 시편에서의 강선의 파단 개수

구 분	하중재하횟수	해체		#1	#2	#3	#4	#5
LS10_20-1	378,000	전		5	9	2	5	5
		후	강연선	13	16	8	16	5
			IWRC	0	0	0	0	0
LS10_24-1	480,600	전		1	4	10	4	3
		후	강연선	38	24	18	16	9
			IWRC	0	0	0	0	0
LS10_24-3	761,000	전		-	-	-	-	-
		후	강연선	38	24	18	16	9
			IWRC	0	0	0	0	0
LS10_28-1	3,000,000	전		0	3	7	1	3
		후	강연선	2	3	23	7	6
			IWRC	35	7	49	42	42
LS10_28-3	495,000	전		2	0	0	0	0
		후	강연선	7	0	0	0	0
			IWRC	18	16	16	3	19
LS20_20-1	4,600,000	전		0	0	0	0	2
		후	강연선	8	7	10	7	7
			IWRC	0	1	0	0	0
LS20_20-2	3,000,000	전		0	0	0	1	0
		후	강연선	3	4	6	2	2
			IWRC	0	0	0	0	0
LS20_24-1	280,200	전		-	-	-	-	-
		후	강연선	48	74	34	24	63
			IWRC	49	4	6	4	3
LS20_24-2	673,300	전		2	3	3	2	1
		후	강연선	12	11	6	4	8
LS20_28-1	320,300	전		0	1	1	2	0
		후	강연선	123	147	87	132	76
			IWRC	0	2	0	1	0
LS30_20-1	17,00,000	전		0	1	1	2	0
		후	강연선	1	6	4	3	1
			IWRC	0	2	0	1	0
LS30_20-2	6,000,000	전		1	0	1	1	1
		후	강연선	1	2	2	2	2
			IWRC	0	0	0	2	0
LS30_20-3	12,500,000	전		0	2	1	1	2
		후	강연선	2	3	3	2	2
			IWRC	0	2	1	1	0
LS30_24-1	2,000,000	전		0	0	0	0	0
		후	강연선	0	0	1	0	0
			IWRC	7	12	11	7	20

LS30_24-2	1,800,000	전		5	9	2	5	5
		후	강연선	13	16	8	16	5
LS30_24-3	800,000	전		1	4	10	4	3
		후	강연선	38	24	18	16	9
LS30_28-1	273,200	전		-	-	-	-	-
		후	강연선	38	24	18	16	9
LS30_28-2	419,000	전		0	3	7	1	3
		후	강연선	2	3	23	7	6
			IWRC	12	21	11	14	1

파괴원인임을 알 수 있었다. 적은 개수의 강선이 파단된 시편의 경우, 초기 강선의 파단이 단부에 집중되지 않았음을 관찰할 수 있었다. 그러므로 실험에서 얻은 모든 결과를 데이터의 평균에 사용할 수 있었다. 외부 표면의 강선의 파단 개수가 와이어로프의 피로파괴 기준으로 사용되어 왔다. 그러나 강선의 파단 개수가 해체 전·후에 상당히 다르므로, 외부 표면의 강선 파단 개수는 와이어로프의 피로파괴 기준이 될 수 없음을 의미한다.

시편의 강성 손실은 일정 간격으로 정적 시험을 행함으로써 알 수 있다. 본 실험에서 강성의 변화를 모니터링하기 위한 정적 시험은 1000번의 하중재하마다 수행되었다. 대표적인 시험 결과를 그림 4와 5에 나타냈다. 하중과 변위를 두 축으로 나타낸 그래프에서의 기울기가 로프의 강성이 되는데, 이는 선형 회귀분석을 수행하여 결정하였다. 첫번째 정적시험 전에 최대 피로하중까지 5번 재하하였다. 로프의 강성의 변화는 첫번째 정

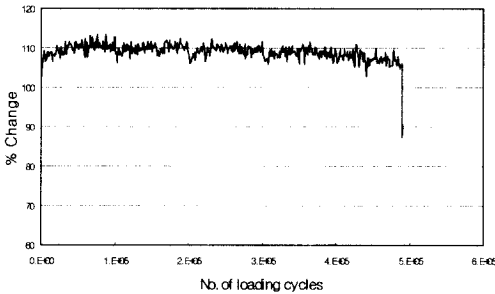


그림 4(a). 시편 LS10_24-1의 강성 변화

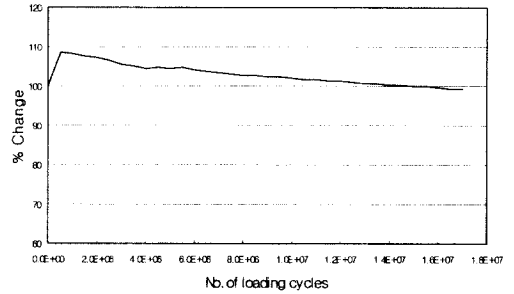


그림 5(a). 시편 LS30_20-1의 강성 변화

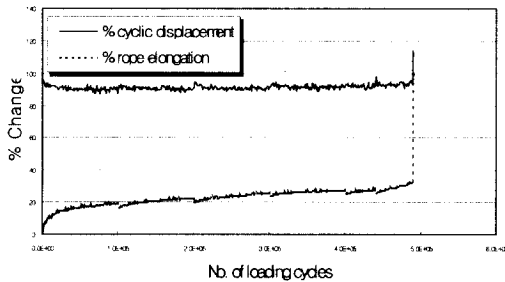


그림 4(b). 시편 LS10_24-1의 주기적 변위 및 로프 신장량

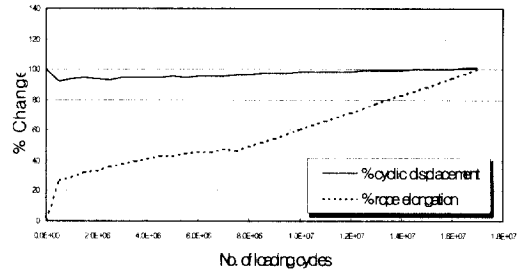


그림 5(b). 시편 LS30_20-1의 주기적 변위 및 로프 신장량

적시험에서 얻은 값과의 비로 나타났다. 주기적 변위는 Flex II 시스템에 의해 얻은 주기적 변위를 초기 로프의 길이로 나눈 등가의 변형도로 표현하였다. 이 또한 첫번째의 정적시험에서 얻은 값과의 비율로써 제시하였다. 이 때 초기 로프의 길이는 콘을 소켓에 완전히 밀착시키기 위하여 하중을 재하한 후에 측정된 길이를 사용하였다. 로프의 신장은 등가의 변형도로 환산하여 나타났다. 이 값은 최대변형도에 대한 비율로 제시되었다.

대부분의 경우에 강성은 실험이 진행됨에 따라 상당한 손실이 일어났는데, 이런 경향이 피로파괴 기준을 유도하기 위한 손상의 척도로서 사용될 수 있다. 강성의 손실에도 불구하고 몇몇의 시편은 강성이 빠르게 손실되는 모양을 보여주는 결과를 얻지 못하였는데, 이는 가력기가 파괴 후에 충분한 정적시험을 행할 수 있을 만큼의 충분한 스트로크를 갖지 못하였기 때문이다. 이에 덧붙여 3개의 시리즈에서는 강선이 동시에 파단되는 모습을 보여주지 않았다. 이는 시편들이 강선의 파단과 더불어 강성의 손실이 일어나기 때문이다. 최대 피로 하중이 증가함에 따라 외측에서 내부의 강선을 조이는 힘(clenching force)이 증가된다. 그러므로 비교적 큰 최대피로하중을 받는 시편의 경우에는 강선이 하나 파단되었을 때 곧 바로 강성의 손실로 이어지지 않았다. 그러나 비교적 낮은 최대 피로 하중이 작용하는 경우에는 곧 바른 강성의 손실로 이어졌다. 또한 강선과 소켓팅 재료 사이의 미끄러짐을 보기 위하여 소켓팅 상태를 점검하였는데, 특별한 징후를 보여 주지 않았다.

시편 LS30_24-3은 실험 완료 후에 IWRC (Independent Wire Rope Core)에서 오직 하나의 강선만이 파단되었다. 역사적으로 5%에 해당하는 개수의 강선의 파단을 많은 연구자들이 피로파괴기준으로 사용하였다. 이전에 언급한 바와 같이, 매우 작은 강선으로 이루어진 IWRC에만 파단이 발생한 경우가 있었다. 추가적으로 하나의 동일한 강선에 여러 번의 파단이 발생하는 현상이 있었다. 그러므로 5% 강선의 파단을 피로파괴규

준으로 고려하는 것은 불합리하다고 생각된다. 5% 강선의 파단을 기준으로 적용하는 것은 시편의 길이에도 좌우된다. 예를 들어 100m 길이의 케이블에서의 5%의 강선의 파단이 2m 길이의 케이블에서의 5% 파단보다 덜 심각하다. 그러므로 강성의 손실이 충분히 피로파괴기준의 대안이 될 수 있다. 최대 강성과 완전 파괴 이전 또는 파괴 시에 측정된 강성과의 차이를 표 3에 제시하였다. 차이는 대부분 2%에서 10% 사이에 있다. 몇몇의 시편은 LS30_20 시리즈의 경우처럼 특별한 강성의 감소를 나타내지 않았다.

이 시리즈는 완만한 강성의 손실을 보여 주었다. 그러므로 데이터의 일관된 처리를 위한 어떤 기준이 필요하게 된다. 여기서는 실험 중에 보여주는 최대 강성에서 10%의 강성 손실을 보이는 시점을 피로 파괴의 기준으로 삼았다. 이 기준은 실험에서 얻은 모든 데이터를 평가에 사용할 수 있고, 안전측에 위치하기 때문에 합리적인 것으로 생각된다. 표 3에 보여 준 피로 파괴 시까지의 하중재하횟수는 10%의 강성 손실에 해당한다. 본 연구에서 고려된 주요 인자는 응력 범위, 평균 응력수준과 시편의 길이이다.

실험 결과는 피로수명에 로그를 취하여 분석하였다. 첫째로, 사용된 가법 모델이 적합한지 보기 위하여 F 검정을 수행하였다. 여기서 0.01의 신뢰수준에서 F 값이 6.01보다 작기 때문에, 가법 모델이 적합함을 확인할 수 있었다. 이 모델은 실험결과를 결정계수 0.82의 값을 가지고 대표하고 있다. 와이어로프의 피로수명(로그를 취한 값)은 콜모고로브-스머노프(Kolmogorov-Smirnov) 검정에서 8.2%의 신뢰 수준에서 정규분포에 의해 표현될 수 있음을 확인할 수 있었다. 그러므로 와이어로프의 피로 수명은 대수-정규분포에 의해 합리적으로 모델링될 수 있다.

비록 실험결과가 응력수준과 응력범위 사이의 교호작용이 예상될지라도, 3개의 인자들은 모두 유의한 것으로 판명되었다. 각 인자에 대한 F 값은 표 4에 주어져 있다.

표 3. 시편의 피로수명

구 분	강성 차	피로수명	길이 피치	평균응력 (%UTS)	응력범위 (%UTS)
LS10_20-1	6.5%	374,000	10	65%	20%
LS10_20-2	3.1%	577,000			
LS10_20-3	6.0%	939,000			
LS10_24-1	7.2%	489,000	10	40%	24%
LS10_24-2	7.4%	501,000			
LS10_24-3	9.1%	761,000			
LS10_28-1	20.8%	1,669,000	10	15%	28%
LS10_28-2	10.0%	372,000			
LS10_28-3	18.5%	289,000			
LS20_20-1	13.3%	4,196,000	20	15%	20%
LS20_20-2	10.9%	2,856,000			
LS20_20-3	10.9%	2,816,000			
LS20_24-1	2.9%	280,000	20	65%	24%
LS20_24-2	3.6%	673,000			
LS20_24-3	3.7%	316,000			
LS20_28-1	9.1%	319,000	20	40%	28%
LS20_28-2	9.0%	304,000			
LS20_28-3	10.0%	402,000			
LS30_20-1	10.2%	16,836,000	30	40%	20%
LS30_20-2	10.1%	5,865,000			
LS30_20-3	10.2%	12,434,000			
LS30_24-1	13.0%	1,894,000	30	15%	24%
LS30_24-2	26.0%	1,528,000			
LS30_24-3	13.1%	632,000			
LS30_28-1	2.0%	273,000	30	65%	28%
LS30_28-2	3.7%	419,000			
LS30_28-3	2.0%	401,000			

표 4. 분산분석

요인	자유 도	Sum of Squares	Mean Square	F Value	$P_r > F$
A	2	0.97987681	0.48993840	7.97	0.0029
B	2	1.30236773	0.65118387	10.59	0.0007
C	2	3.20058217	1.60029108	26.02	0.0001

각 인자의 효과에 대한 상세 사항을 다음에 기술하였다. 길이 효과는 피로수명이 시편의 길이가 증가함에 따라 감소하리라는 예상과는 반대의 결과를 보여 주었다. 이 결과를 그림 6에 나타냈다. 시편의 길이가 증가함에 따라 상당한 피로수명의 증가를 볼 수 있다. 실험결과로부터 짧은 길이의 시편들은 실험 후의 시편을 해체한 결과에서 확실한 증거를 보여주지 않고 있을지라도, 단부의 영향을 많이 받고 있음을 예측할 수 있다. 분산효과 또한 이유가 될 수 있다. 즉 와이어 로프의 전체

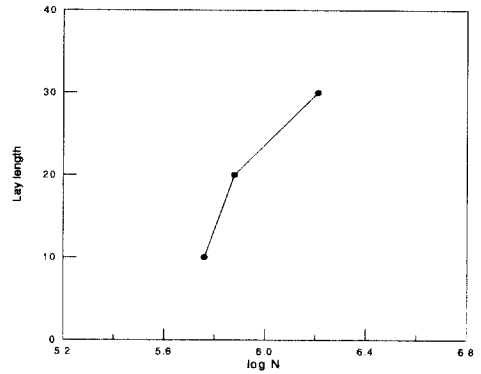


그림 6. 길이효과

적인 피로거동은 단부효과와 약한 연결고리 효과 (Weak-Link Effect)가 결합되어 나타난다고 할 수 있다. 이번의 실험결과에서 보면 기존의 연구 결과에서 언급된 단부의 영향권이 더 확대되어야 한다는 것을 알 수 있다. 그러나 이에 대한 확실한 결론을 내리기 위해서는 보다 많은 연구가 필요함을 알 수 있다.

평균응력수준효과는 평균응력이 증가함에 따라 피로 수명이 감소하리라는 예상과 잘 일치하고 있다. 그런데 평균응력 15% UTS와 40% UTS 사이에는 거의 차이가 없는 반면에 그림 7에서와 같이 65% UTS에서는 상당한 피로수명의 감소가 발생했다. 그러나 이 값은 실제 구조물에서는 거의 사용되지 않는 응력수준이다. 단지 실험전략 상 사용된 값이다. 실험결과에 따라 평균응력수준이 15% UTS와 40% UTS사이에서는 평균응력

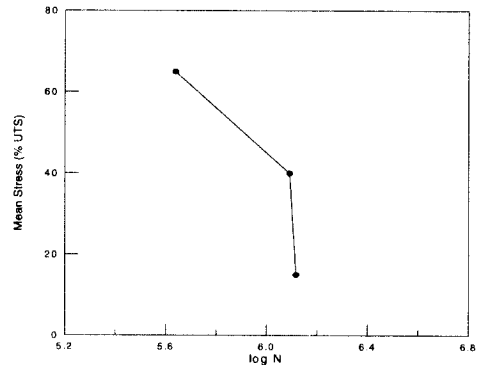


그림 7. 평균응력수준효과

수준효과를 배제할 수 있음을 확인할 수 있다. 이 결과는 평균응력수준이 어느 범위 이내에 있을 경우 평균응력의 효과가 검출될 수 없음을 암시한다고 할 수 있다. 이는 또한 이전의 피로 데이터의 그룹화를 가능하게 한다. 그러나 이 또한 그룹화를 위한 평균응력수준의 한계를 갖기 위하여 보다 많은 실험이 요구된다.

응력범위효과는 그림 8에 보여준 것처럼 매우 두드러진다. 이는 피로설계 시에 가장 흔히 사용되고 있는 S-N 곡선의 효용을 보여준다고 하겠다. 실험결과에서 보는 것처럼 응력범위 20% UTS에서의 피로수명이 아주 크게 증가하기 때문에 피로한계(Fatigue limit)의 존재 가능성을 내포하고 있다고 할 수 있다. 이는 곡선이 위에 오목하게 보이는 형태에서도 예측될 수 있다.

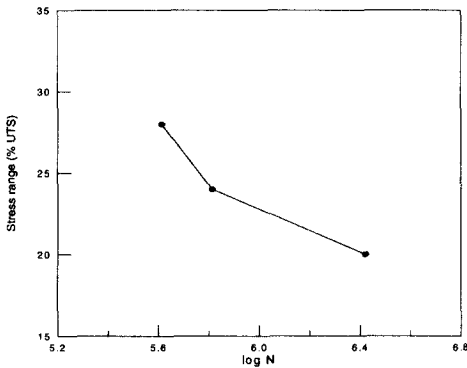


그림 8. 응력범위효과

5. 결 론

(1) 자유장 내에서의 강선의 파단은 각 스트랜드 사이의 격자 접촉점에서의 국부적인 접촉성피로(fretting fatigue)의 결과이다.

(2) 평균응력수준의 효과가 유의한 것으로 나타나지만, 15% UTS와 40% UTS 사이에는 거의 차이를 보이지 않는다.

(3) 길이효과는 시편의 길이가 증가할 때 피로수명이 감소하리라는 초기 예상과 다른 결과를 나타냈다. 따라서 단부효과가 배제될 수 있는 최소

시편의 길이를 검출하는 데에 보다 많은 실험이 필요하다.

(4) 응력범위효과가 와이어로프의 피로성능에 가장 유의하다. 이는 S-N 곡선이 실험 시편의 단부효과를 배제할 수 있는 결과에서 유도되었다면, 설계에서 매우 유용하게 사용될 수 있음을 검증하고 있다.

(5) 본 연구에서 채택된 라틴방격법은 각 인자들간에 직교성이 확보되도록 한다면, 비용과 시간을 절감할 수 있는 방법이기 때문에 피로실험에 아주 유용함이 판명되었다.

감사의 말

본 연구는 POSCO 석좌 교수 연구 기금 지원에 의해 수행된 연구임을 밝힙니다. 기금을 지원해 주신 POSCO, 실험에 협조해 주신 현대건설 기술연구소, 고려제강에 감사의 말씀을 전합니다.

참 고 문 헌

- (1) Flint, A. R. and Smith, B. W. 'Strengthening and refurbishment of Severn Crossing-Part 5: other background research and development.' Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings, Vol. 94, 1992, pp. 51-60
- (2) Fleming, J.F. 'Fatigue of cables.' Research Report No. SETEC CE 74-079 for the American Iron & Steel Institute, School of Engineering, University of Pittsburgh, 1974
- (3) Hobbs, R. E. and Ghavami, K. 'The Fatigue of Structural Wire Strands.' International Journal of Fatigue, 1982, pp. 69-72
- (4) Chaplin, R. 'Tensile fatigue of very short samples of stranded wire rope.' Proceedings of IABSE, Vol. 66, Spain, 1992
- (5) Chien, C. and Costello, G.A. 'Effective

- length of a Fractured wire in a wire rope.' *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 111, No. 7, 1985, pp.952-961
- (6) Wyatt, T. A. 'Internal damping in 38mm (nominal) specimens.' Imperial College, Department of Civil Engineering, CESLIC Report SC2, 1978
- (7) Papanikolas, P. 'Axial fatigue of multi-layered wire strand.' Ph.D. Thesis, University of Alberta, 1995
- (8) Raoof, M. and Hobbs, R. E. 'Analysis of axial fatigue data for wire ropes.' *International Journal of Fatigue*, Vol. 16, Oct., 1994
- (9) Woodward, R.J. 'Detecting fractures in steel cables.' *Wire Industry*, Vol. 56, No. 667, pp.401-405
- (10) Little, R. E. and Jebe, E. H. 'Statistical design of fatigue experiments.' John Wiley & Sons, N.Y., 1975, 280pp.
- (11) John, N. et al. *Applied linear statistical models*. R D Irwin, 1982
- (12) Casey, N.F. and Waters, D.M. 'Fatigue behavior of large diameter wire ropes.' *Wire Industry*, Vol. 55, No. 653, 1987, pp. 371-378
- (13) Esslinger, V. 'Experimental execution and results of fatigue test with prestressing steel.' *Proceedings of IABSE*, Vol. 66, Spain, 1992
- (14) 서정인, 구조용 로프의 피로거동, 서울대학교 공학박사 학위논문, 1998

(접수일자 : 1998년 8월 28일)