

# 케이블 피로 수명 해석 통계 모델 비교

Comparison of Statistical Models for Analysis of Fatigue Life of Cable

서 정 인\*

Suh, Jeong-In

유 성 원\*\*

Yoo, Sung-Won

## Abstract

The cable in the cable-supported structures is long, therefore it can be reasonable to apply the different models, compared with those used for general steel elements. This paper compares the statistical models with existing cable fatigue data, after deriving the cdf(cumulative distribution function) with modifying the log-normal distribution, the existing extremal distributions so as to include length effect. The paper presents the appropriate model for analyzing and assessing the fatigue behavior of cable which is being used for actual structures.

## 요 지

케이블 구조물에 사용되는 케이블은 길이가 길다는 특징을 갖고 있으므로 케이블의 피로 데이터 처리를 위해서는 일반적으로 구조물을 구성하는 강재 요소에 적용되는 통계모델과는 다른 모델을 적용하는 것이 합리적이라 할 수 있다. 즉 케이블과 같이 길이가 긴 요소에서 피로수명에 크게 영향을 미치는 시편의 길이를 포함할 수 있는 모델, 즉 대수정규분포모델과 기존의 극치분포모델을 길이효과를 고려할 수 있도록 유도하여 기존의 케이블 피로 실험 데이터에 적용해 봄으로써, 케이블이 사용되고 있는 실제 구조물에서 케이블의 피로거동을 예측 또는 평가하는 데에 적합한 모델을 제시한다.

**Keywords :** cable, statistical models, cdf, length effect, fatigue behavior

**핵심 용어 :** 케이블, 통계모델, 길이효과, 피로거동

\* 정희원, 우석대학교 토목공학과 조교수

\*\* 정희원, 우석대학교 토목공학과 조교수

E-mail : offsubji@woosuk.ac.kr 011-678-8314

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 2004년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

케이블로 지지되는 장대교량이 국내외에서 최근 들어 많이 설계·건설되고 있다. 케이블 교량의 대표적 형식으로는 현수교, 사장교, 최근에 많이 채택되고 있는 Extradosed교 등을 들 수 있다. 이런 형식에 적용되는 케이블은 주로 평행한 강선으로 구성된 스트랜드를 주로 사용하여 왔는데, 이러한 교량 형식에서는 케이블이 주부재로서 사용되기 때문에 오래 전부터 케이블의 피로에 대한 설계를 중요하게 여겨왔다. 현수교의 주케이블이나 사장교의 사장재, 해안구조물이나 배 등의 정착장치에 사용되는 케이블의 피로 성능 평가는 주로 피로실험을 통해 이루어지는 것이 일반적이다.

피로실험에 사용되는 스트랜드 시편의 길이는 1m-5m 정도에 불과하여, 실제 교량이나 다른 구조물에서 사용되는 케이블 길이에 비하여 아주 짧은 편이라 할 수 있다. 연구자들의 여러 실험 결과로부터 케이블의 주요 파손 원인이 정착장치 내에 있다고 생각하였다.<sup>(1)</sup> 그러나 이러한 결론은 실제 케이블의 경우 주요 파손 원인이 정착장치 내가 아닌 케이블의 자유장(free length) 내에 주로 있다는 사실과 거리가 있다고 할 수 있다. 이런 점에서 보면 실제 사용되는 케이블의 피로 수명은 자유장에서의 파괴와 훨씬 더 큰 관련이 크다는 것을 알 수 있다.

자유장에서의 파괴 가능성은 긴 케이블의 자유장 내에 존재할 수 있는 결함의 개수가 증가함에 따라 높아진다. 이런 점을 반영하고, 케이블의 구성요소인 한 개의 스트랜드 시편의 피로거동과 긴 케이블의 피로거동 사이의 관계를 나타낼 수 있는 적합한 수학적 도구가 필요하게 된다. 실제 구조물에 사용된 긴 케이블의 피로 성능을 평가하기 위하여 실제와 같은 길이의 시편을 실험한다는 것은 거의 불가능하기 때문에, 짧은 시편의 실험 결과로부터 실제 케이블의 피로 수명을 예측할 수 있는 방법을 개발하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 따라서 길이의 효과를 고려할 수 있도록 확률론적 방법을 식의 변형을 통해 유도하고 그것을 실제 실험 결과와 비교하여 적용성을 살펴본다.

## 2. 케이블의 피로 수명 모델

케이블의 피로 수명은 주로 케이블의 제조, 보관 등의 과정에서 생겨난 결함에 좌우된다. 결함의 랜덤 분포가 케이블 길이에 따라 어떤 상관관계를 보이지 않는다면, 인접 부분의 피로 저항 성능을 독립적으로 고려할 수 있다. 따라서 피로 해석을 위해서 상호 독립적이라고 가정하는 것이 합리적이라고 볼 수 있다. 한편 상관관계를 보인다면 다른 부분과 상호 의존적이라 할 수 있으므로 이 의존 현상을 반드시 고려하여야 한다.

케이블의 피로 수명을 예측하기 위해서는 우선 케이블을 구성하는 개별 요소, 즉 강선의 피로 수명을 예측하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 강선 실험 시편으로부터 케이블의 피로 수명을 예측하기 위해서는, 시편의 수명 분포를 기술하기 위한 적당한 통계모델을 가정할 필요가 있다. 이러한 통계모델은 일반적으로 누적분포함수(cdf)로 표현한다. 따라서 이 절에서는 모델의 비교분석에 사용할 누적분포함수 식을 기술하고, 이 식을 변형하여 길이효과를 고려할 수 있도록 한다.

4개의 극치 통계모델을 제시하고, 이 모델들은 앵(Ang)과 스톨링(Stalling) 등의 연구 결과에 의해 케이블의 피로수명 기술에 적합하다고 가정할 수 있으며,<sup>(2),(3)</sup> 대수정규분포, 2개 매개변수 와이블 분포, 3개 매개변수 와이블 분포, 5개 매개변수 와이블 분포가 이 모델에 포함된다.

### 2.1 대수정규분포(log-normal distribution)

일반적으로 단일 응력분포에서 대수값으로 나타낸 피로수명은 정규분포한다고 가정한다. 선형 대수정규분포모델을 사용하기 위해서, 여러 응력범위에서의 피로수명분포에 대해서는 다음과 같은 가정을 한다.

- (1) 피로수명은 모든 응력범위에서 대수정규분포한다.
- (2) 피로수명의 중간값과 응력범위 사이에는 지수 법칙의 관계를 갖는다.
- (3) 피로수명의 대수값(logarithm of fatigue life)의 표준편차는 응력범위에 따라 변화하지 않는다.

선형 대수정규분포모델은 파울슨(Paulson)에 의해 사용되었다.<sup>(4)</sup> 이 선형모델은 아쇼토(AASHTO) 규정과 JCBD(Japanese Code for Bridge Design)와 같은 설계기준에서 피로설계 기준의 개발을 위해 광범위하게 사용되어 왔으며 우리나라도 같은 기준을 채택하고 있다.

피로수명의 중앙값은 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$\overline{\log N} = \log b - \rho_1 \log \Delta f \quad (1)$$

여기서,  $\overline{\log N}$ 은 피로수명의 평균값이고,  $\Delta f$ 는 응력범위,  $\log b$ 와  $\rho_1$ 은 상수이다. 다른 파괴 확률 직선은 다음과 같이 표현한 표준변수를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$z = (\log N - \overline{\log N}) / s' \quad (2)$$

여기서  $s'$ 은 선형회귀분석에서 결정된 예측값의 표준편차이다.  $z$ 값은 표준정규분포표로부터 구할 수 있다. 특정 확률의 파괴 직선을 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\log N = \log b - \rho_1 \log \Delta f + z s' \quad (3)$$

선형 대수정규분포 모델은 단일 요소의 피로 수명을 나타내는 데에 사용된다. 일반적으로 사용되는 시편 길이는 대략 0.2m-2m 정도이다. 그러나 행어 로프는 2m-100m, 사장재 케이블은 100m-200m, 현수교의 주케이블은 길게는 1km가 넘는다. 실제 구조물에서 사용되고 있는 케이블의 피로수명은 일반적으로 실험에 사용된 시편의 수명보다 작다. 이와 같이 피로 수명이 감소한 이유는 길이효과(약한 연결 고리 효과, weak-link effect) 때문으로 보고 있다. 이와 같은 길이 효과는 극치분포를 사용하여 모델링할 수 있다. 이런 극치분포를 복다노프(Bogdanof)와 코진(Kozin)<sup>(5)</sup>, 카스틸로(Castillo) 등<sup>(6)</sup> 이 케이블의 피로수명이나 피로강도를 연구하는 데에 사용하였다.

극치분포는 다음과 같은 형태로 표현할 수 있는데,

$$F_s(N) = 1 - (1 - F(N))^n \quad (4)$$

여기서  $F(N)$ 은 실험에 사용된 시편 피로수명의 누적분포함수이고,  $n$ 은 각 그룹에서의 실험 반복 횟수를 나타낸다. 대수정규분포의 선형모델과 관련된 길이효과는 (5)식으로 표현할 수 있다.

$$F_s(z) = 1 - (1 - F(z))^n \quad (5)$$

이 함수를 케이블의 길이효과를 모델링하는 데에 사용할 수도 있다. 즉 긴 케이블 피로수명의 분포함수를 나타내는 데에도  $n$ 을 다음과 같이 적용함으로써 (4)와 (5)식을 사용할 수 있다.

$$n = L/L_0 \quad (6)$$

여기서,  $L_0$ 는 실험 시편 길이이고,  $L$ 은 피로수명을 계산하고자 하는 케이블 길이를 나타낸다. 그런데 (5)식에서 길이비( $n$ )가 1이 아닌 경우의 대수정규분포에서 취한 최소값의 분포는 수학적으로는 대수정규분포가 되지 않는다. 다시 말하면 대수정규분포를 갖는 특정한 길이  $L_0$ 가 존재함을 의미한다고 할 수 있다.

$$\log N = \log b - \rho_1 \log \Delta f + z_s s' \quad (7)$$

여기서 변수  $z_s$ 는 표준정규분포에서 구한 최소값의 분포에서 구한 최소값이다.

길이효과는 길이효과계수  $\lambda$ 로 나타내는데, 다음과 같이 정의하는데, 이를 길이효과를 표현하는 데 사용하였으며, 다른 모델의 경우에도 같은 표현 방법을 사용한다.

$$\lambda = \frac{\mu N_L}{\bar{N}} \quad (8)$$

여기서  ${}_{\mu}N_L$ 은 파괴확률  $p$ 에서의 길이가 긴 요소의 피로수명이고,  $\widehat{N}$ 은 시편 피로수명의 중앙값이다.

$$\lambda = 10^{z_s s'} \quad (9)$$

## 2.2 2개 매개변수 와이블 분포 (two-parameter Weibull distribution)

2개 매개변수 와이블 분포의 누적분포함수는 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$F(N) = 1 - \exp[-(N/N_c)^k] \quad (10)$$

여기서 지수  $k$ 를 와이블 지수,  $N_c$ 는  $(1-1/e)$ 의 파괴확률에서의 특징피로수명이라고 한다. 이 분포의 변동계수는 와이블 지수의 선택에 좌우된다. 이 분포를 최소값의 접근적 분포라고 부른다. 접근적 분포는 2개 매개변수 와이블 분포가 한계를 갖지 않는 지수의 하한 꼬리를 갖는 피로수명 대수값의 분포로부터 취한 최소피로수명의 분포에 대한 상사로서 사용될 수 있다. 이 접근적 분포는 길이비인  $n$ 이 무한대에 접근함에 따라 최소피로수명의 분포로 수렴한다. 시편의 파괴 위치가 독립적이고 균등하다고 가정하면, 시편에 대한 길이효과는 무한히 크다고 생각할 수 있다. 따라서 시편의 피로수명의 분포는 최소피로수명의 접근적 분포로 표현할 수 있다.

시편에는 피로 균열의 시작을 유도하는 많은 수의 결함이 있다고 가정할 수 있는데, 이 가정은 파괴역학적인 측면에서도 합리적이라고 할 수 있다. 이러한 접근적 분포로 가정하는 것은 적절한 최소 시편 길이의 존재 가능성을 나타낸다고 할 수 있다. 최소 길이 개념은 켈리(Kelly)와 맥카트니(McCartney)<sup>(7)</sup>에 의해 논의되었다.

파괴에 대한 평균값과 파괴에 이르는 수명의 분산 사이에는 다음의 관계가 있다.

$$\overline{N} = N_c \Gamma(1 + 1/k) \quad (11)$$

$$s^2 = N_c^2 [\Gamma(1 + 2/k) - \Gamma^2(1 + 1/k)] \quad (12)$$

여기서  $\Gamma()$ 는 감마함수이다.

와이블 분포의 길이효과는 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$F_s(N) = 1 - \exp[-n(N/N_c)^k] \quad (13)$$

여기서  $n = L/L_0$ 이다.

이 모델에서는 상기한 식을 사용하여  $N_c$ 와  $k$ 를 계산하는 것이 쉽지 않다는 단점이 있다.

일정한 파괴확률을 가진 선형모델 식은 다음과 같다.

$$\log N = \log c - \rho_2 \log \Delta f + \log \left\{ (1/n)^{1/k} \right\} + \log \left[ \{-\ln(1-p)\}^{1/k} \right] \quad (14)$$

여기서  $p$ 는 긴 요소의 파괴확률이다.

모든 일정확률의 파괴 곡선은 직선이고 대수용지 상에서 평행하게 표시된다. 피로수명의 변동계수는 응력 범위에 따라 변화하지 않는데, 이는 곧 와이블 지수  $k$ 가 변화하지 않는다는 것을 의미한다. 길이효과계수는 대수정규분포와 같은 형태이며,  ${}_{\mu}N_L$ 은 다음 식으로 표현된다.

$${}_{\mu}N_L = (1/n)^{1/k} N_c [-\ln(1-p)]^{1/k} \quad (15)$$

비교를 위해서 이 논문에서는 길이효과계수를 사용하였기 때문에 중간값은 대수정규분포에서의 값을 그대로 사용하였다.

피로데이터에 대한 선형모델을 적용하기 위해서는 단일 응력범위에서의 피로수명으로 모든 데이터를 변환할 필요성이 있다. 이 변환에는 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$N_{Ti} = N_j \left[ \frac{\Delta f_j}{\Delta f_T} \right]^{\rho} \quad (16)$$

여기서  $N_{T_i}$ 는  $N_i$ 로부터 변환된 피로수명이고,  $\Delta f_T$ 는 변환할 응력범위이고,  $\Delta f_i$ 는 원래의 응력범위이다. 기울기  $\rho$ 는 대수정규분포의 선형모델에서의 중간값의 경우를 취하였다.

### 2.3 3개 매개변수 와이블 분포 (three-parameter Weibull distribution)

이 분포도 2개 매개변수 와이블 분포와 마찬가지로 점근분포이다. 이 분포에서 최소값은 0이 아닌 하한을 가진 초기분포로부터 취하였다. 누적분포함수는 다음과 같다.

$$F(N) = 1 - \exp[-\{(N - N_c)/(N_c - N_0)\}^k] \quad (17)$$

여기서  $k$ 는 와이블 지수이고,  $N_0$ 는 최소피로수명이고,  $N_c$ 는  $(1 - 1/e)$ 의 파괴확률일 때의 피로수명이다. 이 모델은  $N_0$ 를 추정할 때  $N_0$ 가 0보다 작은 값으로 추정되는 경우가 발생하는 단점을 갖고 있다. 이때에는  $N_0$ 를 0으로 취한다. 한편  $N_0$ 가 실제 측정된 최소값보다 클 경우도 발생하게 되는데, 이런 경우에는 굽벨이 제안한 식을 이용하여 와이블 지수  $k$ 를 다시 계산하여 결정한다.(8) 이로부터  $N_c$ ,  $N_0$ 를 다시 계산하면 항상 실제 측정된 최소값보다 작게 된다.

3개 매개변수 와이블 분포에서도 길이효과는 최소값의 정확한 분포를 사용하여 모델링할 수 있다. 그 식은 다음과 같다.

$$F(N) = 1 - \exp[-n\{(N - N_c)/(N_c - N_0)\}^k] \quad (18)$$

여기서  $n$ 은 길이비인  $(L/L_0)$ 를 의미한다. 요소  $N_0$ ,  $N_c$ ,  $k$ 는 모두 짧은 시편의 데이터에서 결정된다. 위의 식을 변형하여 다시 쓰면

$$F(N) = 1 - \exp[-\{(N - N_c)/(N_c' - N_0)\}^k] \quad (19)$$

여기서  $N_c' - N_0 = (1/n)^{1/k}(N_c - N_0)$ 이다. 선형모델의 누적분포함수는 다음과 같이 표현된다.

$$F_s(N) = 1 - \exp[-n\{(N/\bar{N}(\Delta f) - \xi_0)/\xi_{c0}\}^k] \quad (20)$$

와이블 지수  $k$ 는 응력범위에 대해 독립적이라고 가정한다. 모든 길이 요소의 일정파괴확률의 파괴직선은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \log N = & \log d - \rho_3 \log \Delta f \\ & + \log [\xi_{c0}(1/n)^{1/k}\{-\ln(1-p)\}^{1/k} + \xi_0] \end{aligned} \quad (21)$$

여기서도 길이효과계수는 동일한 형태로 표현되는데, 이 식에서  ${}_p N_L$ 은 다음과 같다.

$${}_p N_L = (1/n)^{1/k}\{-\ln(1-p)\}^{1/k}(N_c - N_0) + N_0 \quad (22)$$

### 2.4 5개 매개변수 와이블 분포 (five-parameter Weibull distribution)

이 모델은 카스틸로(Castillo) 등이 제안한 것으로 일명 카스틸로 모델이라고도 한다.<sup>(6)</sup> 통계적 모델은 안정성, 한도(limit), 적합조건식을 만족하여야 하며, 실험 데이터의 통계적 성질을 재현할 수 있어야 한다고 주장하였다. 이들은 또한 피로 데이터 분석에는 다음 조건들이 만족되어야 한다고 주장하였다.

- $\Delta f$ 의 함수로서 피로수명  $N$ 의 중앙값은 비선형이어야 한다.
- $\Delta f$ 의 함수로서 피로수명  $N$ 의 표준편차는  $\Delta f$ 가 감소할 때 증가해야 한다.

· 피로한도가 존재해야 한다.

이 모델의 길이  $L_0$ 에 대한 누적분포함수는 다음과 같다.

$$F(N) = 1 - \exp \left[ - \left\{ \frac{N - N_0(\Delta f, L_0)}{N_a(\Delta f, L_0)} \right\}^{b(\Delta f, L_0)} \right] \quad (23)$$

여기서  $N_0(\Delta f, L_0)$ ,  $N_a(\Delta f, L_0)$ ,  $b(\Delta f, L_0)$ 는  $\Delta f$ 와  $L_0$ 의 함수이다.

길이효과를 고려한 5매개변수 와이블 분포 모델은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & (\ln N - B)(\ln \Delta f - C) \\ & = D \left\{ -\frac{1}{n} \ln(1-p) \right\}^{1/A} + E \end{aligned} \quad (24)$$

여기서  $A$ 는 기울기 요소,  $B$ 는  $N$ 의 수렴값,  $C$ 는 피로한도,  $D$ 는 스케일 피팅 요소,  $E$ 는  $S-N$  문턱(threshold)을 정의하는 상수이다.

길이효과계수의 정의는 앞의 경우와 같고, 파괴확률  $p$ 에서 피로수명은 다음 식으로 계산된다.

$${}_p N_L = \exp \left[ \frac{D \left\{ -\frac{L_0}{L} \ln(1-p) \right\}^{1/A} + E}{\ln \Delta f - C} + B \right] \quad (25)$$

카스틸로 모델은 계산해야 하는 매개변수가 많아 사용자들이 사용하기에 불편한 단점이 있다. 그러나 실험 결과를 잘 모사하고, 실험 종료 시까지 파괴되지 않은 데이터를 함께 사용할 수 있는 장점이 있어 자동화 프로그램을 사용한다면 피로수명을 예측 평가하는데 무리없이 적용이 가능하다.

강선과 스트랜드에 대한 피로 데이터를 분석하여 보았다. 여기에 사용된 데이터는 워너(Warner)와 홀스보스(Hulsbos)<sup>(9),(10)</sup>에 의한 응력범위 730.8MPa에

서 지름 11.1mm, 길이 1,270mm의 스트랜드를 실험한 결과이다. 이 실험에서는 7개의 구성 강선 중 1개의 강선이 파단된 경우를 파괴로 간주하였다. 길이 효과는 강선과 스트랜드의 피로 데이터를 사용하여 중간값과 비교하였다.

Fig. 1, 2에서 실제 데이터는 x기호로 나타냈으며, 앞에서 제시한 모델들을 비교해 보기 위해 Fig. 1과 2에서 나타냈다. Fig. 1에서는 파괴확률이 0.05인 경우인데, 이 경우에는 모델들 사이에 약간의 차이를 나타내고 있다. 반면에 파괴확률 0.5에서는 3개의 선형 모델 사이에 거의 차이를 보이지 않았다.

또한, 비선형 모델인 Castillo 모델도 실험 결과를 잘 모사하고 있는 것을 알 수 있다.

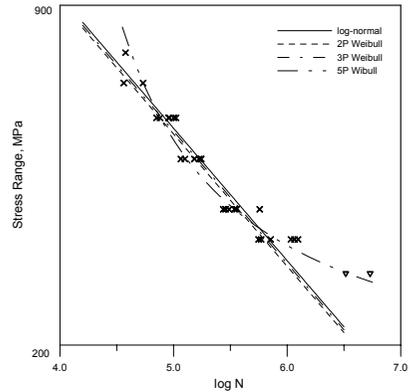


Fig. 1 통계모델의 비교( $p=0.05$ 일 때)

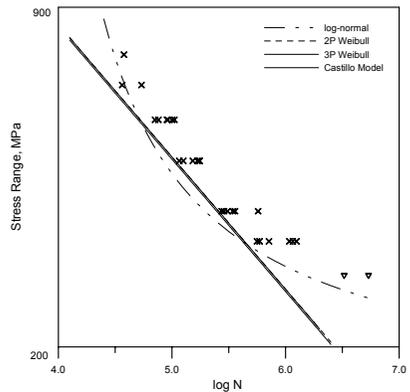


Fig. 2 통계모델의 비교( $p=0.5$ 일 때)

### 3. 통계 모델의 비교

Fig. 1과 2에서 실제 설계에서는 파괴확률이 작은 경우의 결과를 이용하게 되는데, 이 경우에는 채택 모델이 무엇인가에 따라 차이가 발생할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 3에 모델 비교를 위해 모델에 따른 길이효과계수를 나타냈다. 앞에서 언급한 바와 같이 길이효과계수는 길이에 따른 피로수명의 변화를 표현할 수 있다. Fig. 3에서 길이비가 1보다 조금 큰 경우에도 길이효과계수가 크게(1보다 상당히 작음) 감소함을 알 수 있다. 또한 모델로부터 예측된 긴 요소의 피로수명은 모델에 따라 상당한 차이를 나타내고 있다.

길이비가 대략적으로 50 이상인 경우에는 거의 수평 상태를 보이는데, 이로부터 와이블 분포의 경우 최소시편길이 존재 가능성을 발견할 수 있다. 대수정규 분포는 수학적으로 불안정하기 때문에 대수정규분포를 임의의 길이에 대해서 사용할 수 없지만, 실험 결과를 모사하는 데 있어서 크게 문제가 없으므로 실용적으로는 사용이 가능한 것으로 사료된다.

### 4. 길이효과를 고려한 실제 피로 데이터에의 모델 적용 예

기존의 피로 데이터 중에서 시편 길이가 변수로 사용된 예를 분석에 사용하였다. 에드워드(Edwards)와 피카드(Picard)는 지름 12.7mm이며, 길이가 255mm, 570mm, 890mm인 시편을 최소응력을 바꿔 가며 피로실험을 수행하였다. 이들은 시편마다의 피로수명을 제시하지는 않고, 평균값과 표준편차 등을 제시하였다.

PS강선의 데이터는 페르난데스 칸텔리(Fernandez-Canteli) 등에 의해 수행된 것을 사용하였는데, 사용된 시편 길이는 140mm, 1,960mm, 8,540mm이었다. Fig. 4에서 선형모델의 한 경우로서 대수정규분포와 비선형모델로서 카스틸로 모델만을 언급한 이유는 3장에서 언급한 바와 같이  $p=0.5$ 에서 선형모델들 사이에 큰 차이를 보이지 않았기 때문이다. Fig. 4~7에서는 짧은 길이 시편의 실험 결과로부터 앞에서 제

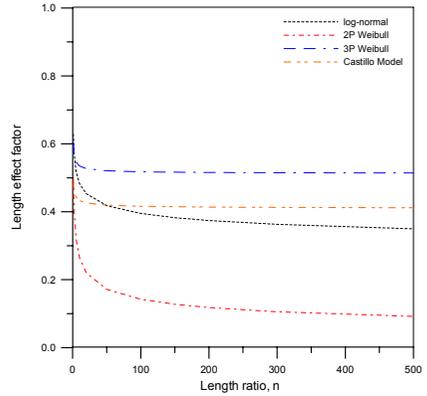


Fig. 3 길이효과계수 비교( $p=0.05$ 일 때)

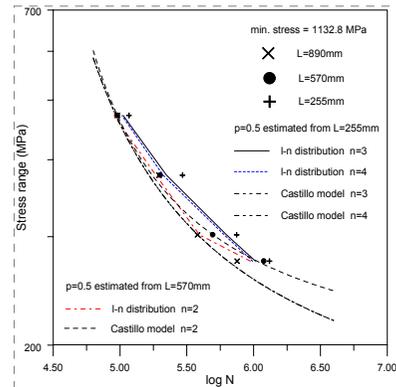


Fig. 4  $f_{min} = 1132.8$ MPa에서의 평균 피로수명과 예측수명

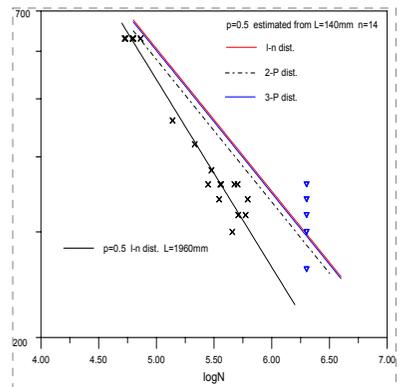


Fig. 5 L=1960mm 강선의 피로수명

시험 각 통계모델의 매개변수들을 구한 후, 그 매개변수들을 이용한 통계모델로부터 긴 시편에 대한 결과를 예측하여 보았다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 시편의 길이가 피로수명에 영향을 미침을 알 수 있다. 3장에서 비선형 Castillo 모델의 유용성은 입증하였으나, 앞서와 마찬가지로 Fig. 5~7에서 선형모델만을 나타낸 이유는 설계나 평가시에 선형모델이 사용자 측면에서 편리할 것으로 사료되었기 때문이다.

Fig. 5와 6을 비교하여 보면, 강선의 길이가 증가함에 따라 피로수명이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 일정파괴확률 직선의 기울기의 변화는 낮은 응력범위에서의 수명 사이의 편차가 더 크다는 사실에서 예측할 수 있다.

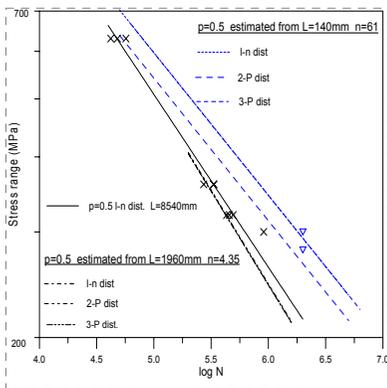


Fig. 6 L=8540mm 강선의 피로수명

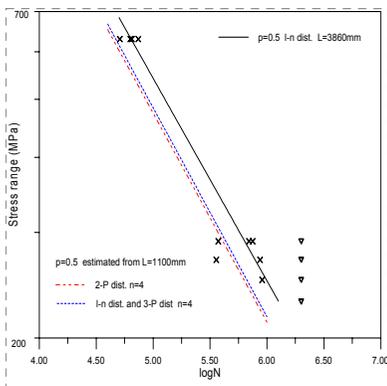


Fig. 7 L=3860mm 스트랜드의 피로수명

이런 결과에도 불구하고, 선형모델을 사용하는 경우에는 기울기 변화를 모델링할 수 없게 되는데, 이는 편리성과 정확성 중 어느 것을 채택할 것인지의 문제로 귀착된다. 이를 극복할 수 있는 방법 중의 하나는 응력범위의 크기에 따라 다른 기울기의 직선을 사용하는 것인데, 이는 많은 불편을 초래한다. Fig. 6에서는 8,540mm의 일정파괴확률 직선을 140mm의 시편을 피로 실험한 결과에서 계산한 매개변수들을 사용하여 예측하였는데, 길이효과가 실제보다 작게 예측되었음을 알 수 있다. 이런 부정확성의 원인은 선형모델의 한계와 강선이 파괴되지 않은 상태에서 실험을 끝낸 결과라고 생각된다. 따라서 실험을 수행할 때에는 가능하면 케이블이 일정한 파괴확률에 도달할 때까지 실험하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

## 5. 결론

앞서 살펴본 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

- 1) 대수정규분포모델은 수학적 불안정성을 갖고 있으며, 2개 변수 와이블 분포 모델과 카스틸로 모델은 매개변수( $N_c$ ,  $k$ )를 예측하는 데에 어려움이 발생하는 경우가 있고, 3개 매개변수 와이블 분포 모델은 0보다 작거나 관측된 값보다 큰 최소값( $N_0$ )을 주는 경우가 발생하여, 급별<sup>(8)</sup>이 제안한 식으로 다시 매개변수  $k$ 를 구하여 예측해야 하는 번거로움이 있다.
- 2) 제시한 모델들은 길이효과를 고려할 수 있고, 특히 카스틸로 모델의 경우는 해석시 특정 횡수까지 파괴되지 않은 데이터를 해석에 포함할 수 있다는 데 데이터 처리면에서의 장점을 갖는다.
- 3) 선형모델에서 파괴확률이 작을 때 모델 간에 차이를 보이며, 파괴확률이 커질수록 차이가 사라진다.
- 4) 자동화 프로그램을 사용하면 비선형 모델도 케이블 피로데이터 분석에 유용하게 사용할 수 있다.
- 5) 케이블의 길이가 증가함에 따라 피로수명이 감소한다.
- 6) 길이효과계수를 나타낸 결과로부터 실험을 수행할 경우 실험 데이터가 의미를 갖기 위해서는 최소시

- 편길이 이상을 사용해야 한다.
- 7) 길이 효과를 고려하지 않았을 경우 실제 케이블의 피로거동과 상이할 가능성이 크므로 길이효과를 고려한 모델로 분석하여야 한다.
  - 8) 케이블이 파괴되지 않은 상태에서 실험을 끝낸 결과를 이용하여 계산한 매개변수를 사용할 때에는 길이효과가 실제보다 작게 예측될 수 있으므로 가능하면 케이블 일정한 파괴확률에 도달할 때까지 실험한 결과를 사용하는 것이 바람직하다.
  - 9) 대수정규분포모델과 와이블 모델들은 각각 갖는 장점과 피로 데이터 특성을 고려하면 케이블 피로 데이터 분석에 유용하게 사용될 수 있다.

#### 감사의 글

이 논문은 우석대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 저자는 이에 감사합니다.

#### 참고문헌

1. Gabriel, K. and Nurnberger, U., (1992). Failure Mechanism in Fatigue, Proceedings of IABSE, Madrid, Spain, 51-72.
2. Ang, A. and Tang, W., (1975). Probability Concepts in Engineering and Design, John Wiley & Sons.
3. Stallings, J. M., (1991). Stay-Cable Fatigue Behavior, Journal of Structural Engineering, ASCE, 117(3).
4. Paulson, Conrad, Jr., Frank, Karl H., and Breen, John E., (1983). A Fatigue Study of Prestressing Strand, Research Report No. 300-1, Center for Highway Research, The University of Texas at Austin, 108pp.
5. Bogdanoff, J. L. and Kozin, F. (1987). Effect of Length on Fatigue Life of Cables. Journal of Engineering Mechanics., 113(6), 925-9403.
6. Castillo, E., Fernandez-Cantelli, A., Tolosa, J. R., and Sarabia, J. M., (1990). Statistical Models for Analysis of Fatigue Life of Long Elements, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 116(5), 1036-1049.
7. Kelly, A. and McCartney, L. N. (1981). Failure by stress corrosion of bundles of fibers. Proceedings of the Royal Society of London, A374, 475-489.
8. Freudenthal, A. M. and Gumbel, E. J., (1954). Minimum Life in Fatigue, Journal of the American Statistical Association, 49(267), 575-597.
9. Warner, R. F. and Hulsbos, C. L. (1966). "Fatigue Properties of Prestressing Strand." PCI Journal, 32-52.
10. 서정인. (1998). 구조용 로프의 피로거동, 박사학위 논문, 서울대학교, 219pp.

(접수일자 : 2003년 2월 6일)