

<응용논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.10.997>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

가속열화시험 데이터를 활용한 엘리베이터 와이어로프 수명 예측[§]

김승호* · 김상부**† · 김성호* · 함승훈***

* 한국승강기대학교 승강기공학부, ** 창원대학교 산업조선해양공학부,
*** 고려제강 기술개발연구원

Life Estimation of Elevator Wire Ropes Using Accelerated Degradation Test Data

Seung Ho Kim*, Sang Boo Kim**†, Sung Ho Kim* and Sung Hoon Ham***

* School of Lift Engineering, Korea Lift College,
** School of Industrial Engineering and Naval Architecture, Changwon Nat'l Univ.,
*** R&D Unit, KISWIRE LTD.

(Received February 3, 2017 ; Revised June 23, 2017 ; Accepted June 26, 2017)

Key Words: Elevator Wire Ropes(엘리베이터 와이어로프), ADT(Accelerated Degradation Testing) (가속열화 시험), Pseudo Life(가수명), Linear Regression(선형 회귀), Logistic Regression(로지스틱 회귀)

초록: 엘리베이터 와이어로프의 수명은 제품의 매우 중요한 특성 가운데 하나로서 사용자의 안전 및 장비의 정비 정책과 밀접한 관계가 있다. 엘리베이터 와이어로프의 수명을 사용조건에서 측정하는 것은 매우 비경제적이다. 이 연구에서는 엘리베이터 와이어로프 (8x19W-IWRC)의 가속열화시험 데이터를 활용하여 와이어로프의 수명을 추정하는 방법을 다루었다. 굽힘피로시험기를 이용하여 가속열화시험을 진행하였으며 가속변수로는 인장하중을 사용하였다. 와이어로프의 수명은 대수정규분포를 가정하였고, 선형회귀모형을 이용하여 가수명을 구한 후 가속수명모형을 이용하여 와이어로프의 수명을 추정하는 방법과 고장 확률에 대한 로지스틱 회귀모형을 이용하여 추정하는 방법을 제시하고 두 모형의 수명 추정 결과를 비교하였다.

Abstract: The life of elevator wire ropes is one of the most important characteristics of an elevator, which is closely related to the safety of users and its maintenance policy. It is not cost effective to measure the lifetime of elevator wire ropes during their use. In this study, the life estimation of elevator wire ropes (8x19W-IWRC) is considered using accelerated degradation test data. A bending fatigue tester is used to perform the accelerated degradation tests, incorporating the acceleration factor of tensile force. Assuming that the life of wire ropes is log-normally distributed, two life estimation methods are suggested and their results are compared. The first method estimates the life of wire ropes utilizing the accelerated life model with pseudo lives obtained from a linear regression model. The second method estimates the life using a logistic model based on failure probability.

- 기호설명 -

S : 인장하중(kN)

D/d : 로프 직경(d)에 대한 시브 직경(D)의 비(mm)

$\Phi(\cdot)$: 표준정규분포함수

t_p : 100p번째 백분위수

$\Phi^{-1}(\cdot)$: 표준정규분포의 역함수

§ 이 논문은 대한기계학회 2016년도 학술대회(2016. 12.14.-16., 강원랜드 컨벤션센터) 발표논문임.

† Corresponding Author, sbkim@cwnu.ac.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

엘리베이터의 종류 중 국내외에서 가장 많이

사용되고 있는 로프식 엘리베이터에 적용되는 와이어로프는 엘리베이터의 모든 하중을 건디기 때문에 그 수명이 사용자의 안전과 밀접한 관계가 있다. 엘리베이터용 와이어로프는 인장하중과 반복굽힘하중을 동시에 받는 구조로서, BOS(Bending Over Sheave) 피로로 인한 로프 마모 때문에 소선파단 수가 증가하고 로프 직경이 감소하는 열화 형태의 고장 메커니즘을 갖고 있다.

BOS 방식의 와이어로프 수명을 나타내는 굽힘 사이클 수에 가장 큰 영향을 미치는 항목은 와이어로프 인장하중 S 와 로프 직경(d)에 대한 시브 직경(D)의 비 D/d 로 알려져 있으며, 이러한 영향을 알아내기 위한 많은 연구들이 이루어지고 있다.⁽¹⁾

Giovanozzi,⁽²⁾ Feyrer⁽³⁾는 다양한 굽힘시험 데이터를 바탕으로 회귀관계식을 이용하여 수명을 추정하는 방법을 제안하였으며, Ridge 등⁽⁴⁾은 Feyrer⁽³⁾의 공식으로 추정된 값과 사용조건에서의 실제 시험 값을 비교하였다. Yusurf 등⁽⁵⁾은 Feyrer⁽³⁾의 공식을 최소제곱법을 이용한 선형회귀분석으로 재해석하여 비교분석하였다. 김성호 등⁽⁵⁾은 인장하중과 인공 부식의 수준에 따른 와이어로프 소선파단개수 및 파괴 강도와와의 관계를 연구하였다.

그러나 사용조건에서의 시험을 이용하여 와이어로프의 수명을 구하는 방식은 많은 시간과 비용이 소요된다. 김상부 등⁽⁷⁾은 김성호⁽⁸⁾의 와이어로프 시험 데이터를 이용하여 가수명을 추정하는 가속열화모형을 통해 사용조건에서 와이어로프의 수명을 추정하였다. 박우재 등⁽⁹⁾은 김성호⁽⁸⁾의 와이어로프 시험 데이터를 이용하여 로지스틱 회귀모형을 이용한 와이어로프의 수명을 추정하였다.

이 연구에서는 최근에 급격하게 수요가 증가하고 있는 8×19W-IWRC 방식의 직경 6mm 로프에 대해 시험시간과 비용을 줄이기 위해 실시한 가속열화시험 데이터를 이용하여 선형회귀모형으로 가수명을 구한 가속수명모형을 이용하는 방법과 로지스틱 회귀모형을 이용하는 방법을 사용하여 사용조건에서의 와이어로프 수명을 추정하고 두 모형의 수명 추정 결과를 비교한다.

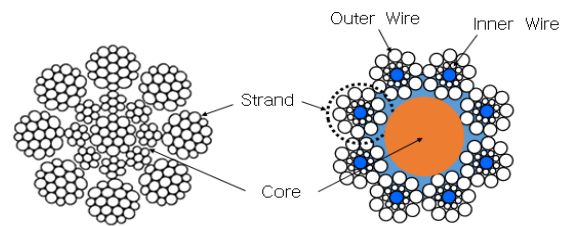
2. 와이어로프 특징과 수명기준

2.1 와이어로프 구성 및 특징

이 연구에서 사용된 엘리베이터 와이어로프는 Fig. 1(a)와 같은 구조로서, 8×19W-IWRC(Independent

Table 1 Specification of Wire Ropes(8×19W-IWRC)

Diameter of wire ropes	∅6mm
Construction	8×19W+8×7+1x16W
Number of load bearing wires in the outer strands	8x19=152
Breaking force	28.6 kN
Tensile strength(R_0)	1,770 N/mm ²



(a) 8x19W-IWRC (b) 8xS19-FC

Fig. 1 Structures of Wire Ropes

pendent Wire Ropes Core) 방식이다. 전통적으로 사용되고 있는 Fig. 1(b)와 같은 구조인 직경 10mm~12mm, 8×S19-FC(Fiber Core) 방식과는 구조가 틀리고, 특히 내부 심강(Core)이 섬유 심강이 아닌 스틸 심강이기 때문에 강도가 매우 높다.

특히, 8×19W-IWRC 방식의 직경 6mm 로프는 최근 10여년 사이에 로프식 엘리베이터가 기존의 기계실 방식에서 기계실 없는 방식으로 변화하면서 급격하게 증가 추세에 있으며 향후에도 계속 증가할 것으로 예상된다. 그러므로 8×19W-IWRC 방식의 와이어로프 수명에 대한 연구가 매우 필요한 상황이나 아직 이와 관련한 연구는 충분치 않기 때문에 굽힘피로시험장치를 제작하여 해당 와이어로프에 대한 시험을 실시하고 수명을 추정하였다. 시험에 적용된 로프 사양은 Table 1과 같다.

2.2 와이어로프 수명 기준

엘리베이터 와이어로프는 사용기간에 따라 BOS 피로로 인해 마모가 발생하면서 소선파단개수가 증가하고, 와이어로프 직경이 감소되는 대표적인 열화 부품으로 볼 수 있다. 와이어로프의 고장은 와이어로프의 열화 정도가 주어진 역치(Threshold)를 넘는 경우 발생한다고 정의한다. 이 연구에서는 Table 2와 같이 독일 규격인 DIN 15020-2⁽¹⁰⁾를 기준으로, 와이어로프 시험에서 적용한 Load Bearing 와이어 수 152개, Drive Group 4m, Cross Lay의 6d(6×6=36mm, d: 로프 직경)에서 소선파단개수 13개, 30d (30×6=180mm)에서 소

Table 2 Discarding Criteria for Wire Ropes (DIN 15020-2)

Number of load bearing wires in the outer strands of the wire ropes n	Number of visible wire breaks which justifies discarding			
	Drive groups 2m, 3m, 4m, 5m			
	Cross lay on a length of		Long lay on a length of	
	6d	30d	6d	30d
101 to 120	10	19	5	10
121 to 140	11	22	6	11
141 to 160	13	26	6	13

선파단개수 26개를 고장 기준으로 삼았다.

3. 와이어로프 가속열화시험

3.1 시험방법

이 연구에서 와이어로프 시험을 진행하기 위해 Fig. 2와 같이 직경 6mm 전용 유성치차 방식의 굽힘피로시험장치를 제작하였다. 시험 장치는 무리한 가속시험으로 사용조건과 가속조건의 고장 메커니즘이 달라지지 않도록 로프와 시브 직경의 비(D/d)는 국내승강기검사기준에 의거 최소기준인 40배(시브 직경 D=240mm)로 하였고, 역방향 굽힘이 아닌 단순 굽힘으로만 시험을 진행하였다.

굽힘피로시험장치는 6개의 시브로 구성되어 있어, 1회전 시 6회의 사이클이 발생하고 Fig. 2와 같이 4개의 시브가 동시에 마찰되는 구조이며 이때의 스트로크는 2,050mm로 구성된다. 시험장치의 회전 RPM은 14 RPM이다.

와이어로프 열화를 가속하기 위한 가속변수는 인장하중을 사용하였으며 로프 한쪽 끝단은 고정하고 반대측 끝단에 하중을 부가하였다. 가속변수 수준은 3수준으로 하여 파단하중의 15% (4.02kN), 20%(5.36kN), 25%(6.70kN)로 부가하였고, 와이어로프 시편 N_{ij} (i -인장하중 수준, j -시편번호)는 각 인장하중 수준 당 3개로 하여 총 9개를 시험하였다. 정상 사용조건은 파단하중의 10%인 2.68kN으로 가정하였다.

시험방법은 가속변수인 인장하중의 각 수준에서 시편 3개를 동시에 진행하며 일정 주기에 따라 시험을 멈추고 6d, 30d의 길이에 대해 로프의 소선파단개수를 관측한 후 시험을 계속 진행하였다. 시험은 6d와 30d 각각 고장 기준인 소선파단개수 13개 또는 26개에 도달하면 종료하였다. 시



Fig. 2 Bending Fatigue Tester

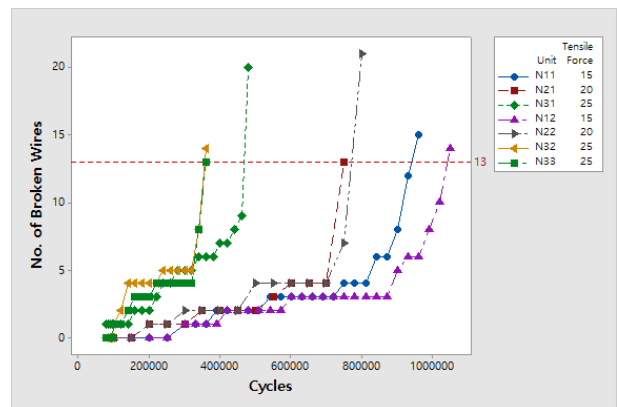


Fig. 3 Number of Broken Wires (6d)

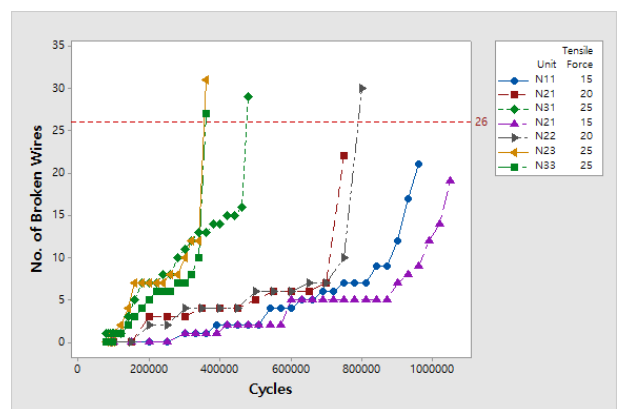


Fig. 4 Number of Broken Wires (30d)

험기간은 2015년 10월 5일부터 2016년 3월 22일까지 6개월 정도가 소요되었다.

3.2 가속열화시험 데이터

가속변수 3수준에 대한 각각의 시편 3개를 시험하여 총 9개의 시편 중 7개의 시편에 대한 누

적 소선파단개수를 굽힘사이클에 따라 그래프로 그린 결과가 6d의 경우 Fig. 3과 같고 30d의 경우 Fig. 4와 같다. 시험결과 시편 N13(15% 인장하중의 3번째 시편) 및 N23(20% 인장하중의 3번째 시편)의 경우는 시브가 아닌 인장하중 부가지점에서 파단이 일어나 시험이 중단되어 소선파단개수 데이터가 적었기 때문에 제외하였다.

4. 가속열화시험 데이터를 이용한 와이어로프 수명 추정비교

4.1 선형회귀모형을 이용한 와이어로프 수명 추정

가속열화시험 데이터의 선형회귀모형을 이용한 와이어로프의 수명 추정은 Meeker⁽¹¹⁾ 등이 다른 가수명을 이용한 가속열화모형을 이용한다. 이 모형은 가속열화시험 데이터를 이용하여 선형회귀식으로부터 가수명(Pseudo Life)을 구하고 가수명 데이터를 이용한 회귀분석을 통해 와이어로프 사용조건에서의 수명을 예측한다. 굽힘사이클 수에 대한 소선파단개수의 회귀모형으로부터, 주어진 소선파단개수의 역치(Threshold)를 넘는 시점을 고장으로 판단하고 그 시점의 해당 굽힘사이클 수를 가수명이라 한다. 가속변수와 수명과의 관계는 선형관계를 가정하였고 수명분포는 Feyrer⁽¹²⁾가 제시한 바와 같이 대수정규분포를 가정하였다.

가수명을 추정하기 위한 선형회귀모형은 설명변수가 X_3 와 X_3^2 인 다중선형회귀모형으로서 식 (1)과 같으며, 설명변수 X_3 는 굽힘사이클이다. 종속변수 Z_{ij} 는 i 번째 인장하중 수준 및 j 번째 시편의 소선파단개수이다.

$$\hat{Z}_{ij} = \hat{\gamma}_{0ij} + \hat{\gamma}_{1ij}X_3 + \hat{\gamma}_{2ij}X_3^2, \quad i=1,2,3, j=1,2,3 \quad (1)$$

모수 $\hat{\gamma}_{0ij}, \hat{\gamma}_{1ij}, \hat{\gamma}_{2ij}$ 는 최소제곱법(Least Square Estimation)을 이용하여 값을 추정한 값이다. Fig. 3의 6d 시험 데이터에서 시편 N11 (15% 인장하중의 1번째 시편)에 대해 가수명을 구하기 위한 다중선형회귀모형은 식 (2)와 같다.

$$\hat{Z}_{ij} = 2.18795 - (1.25625 \cdot 10^{-5})X_3 + (2.20895 \cdot 10^{-11})X_3^2 \quad (2)$$

Fig. 3의 6d 시험 데이터, Fig. 4의 30d 시험 데이터를 이용하여 7개의 시편과 인장하중의 조합

Table 3 Pseudo Life Using Linear Regression

Test units	Tensile force	6d(y=13)		30d(y=26)	
		Pseudo life (Cycles)	(adj) R-sq (%)	Pseudo life (Cycles)	(adj) R-sq (%)
N11	15%	1,039,552	80.4	1,159,086	89.2
N12	15%	1,195,097	79.1	1,364,702	85.1
N21	20%	866,388	68.1	955,480	60.1
N22	20%	796,954	61.3	899,518	61.1
N31	25%	481,580	78	556,975	88.5
N32	25%	424,505	74.3	398,598	72.2
N33	25%	419,929	76.2	417,452	71.5

Table 4 Regression Analysis with Pseudo Life Data

Predictor	Coef	S.E	Z	P
Intercept	15.4042	0.1855	83.06	0.000
X	-0.0946875	0.0088	-10.79	0.000
Scale	0.0967253	0.0256		

에 대해 선형회귀모형을 이용하여 구한 가수명 및 수정결정계수((adj)R-Sq) 값을 Table 3에 나타냈다. 수정결정계수는 관측 데이터로부터 적합시킨 회귀모형이 관측 데이터를 얼마나 잘 설명하는 가를 나타내는 값이다. 시편 N13(15% 인장하중의 3번째 시편)과 N23(20% 인장하중의 3번째 시편)의 경우에 시험 데이터가 충분하지 못하여 가수명을 추정하지 못하였다.

6d 시험 데이터의 경우는 소선파단개수 13을 고장 기준으로 적용하고 30d 시험 데이터의 경우는 26을 고장 기준으로 적용하여 각각의 선형회귀모형으로부터 고장 기준에 해당하는 굽힘사이클 수인 가수명을 구하였다.

Table 3에 나타난 가수명을 이용하여 인장하중 X 를 설명변수로 하는 와이어로프의 100p번째 백분위수 t_p 에 대한 회귀식은 식 (1)과 같이 주어진다. 단, 와이어로프의 수명 T 가 위치모수가 μ 이고 척도모수가 σ 인 대수정규분포를 따르는 경우를 가정한다. 와이어로프의 수명을 나타내는 굽힘사이클 수가 따르는 대수정규분포는 위치-척도분포군(Location-Scale Family)에 속해 있으므로

$$P(T \leq t) = F(t; \mu, \sigma) = \Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)$$

이며, 따라서

$$\ln t_p = \beta_0 + \beta_1 X + \Phi^{-1}(p)\sigma \quad (3)$$

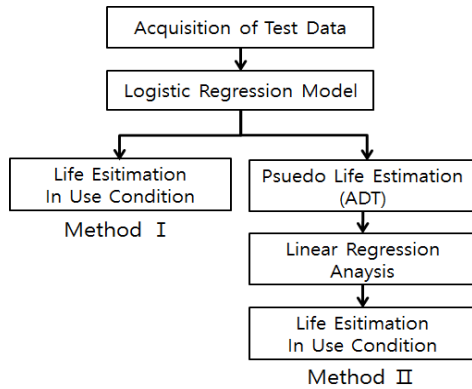


Fig. 5 Life Estimation Methods Using Logistic Regression Model

이다. 단, $\Phi(\cdot)$ 는 표준정규분포함수이고 $\Phi^{-1}(\cdot)$ 는 표준정규분포함수의 역함수이다.

Table 3의 6d 가수명 데이터를 이용하여 식 (3) 모수를 최우추정법에 따라 추정하면 식 (4)와 같은 결과를 얻을 수 있다. Table 4의 회귀분석 결과는 현재의 모형이 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의함을 보여준다.

$$\ln \hat{t}_p = 15.4042 - 0.0946875X + \Phi^{-1}(p)0.0967253 \quad (4)$$

식 (3)을 이용하여 6d 가수명 데이터와 30d 가수명 데이터에 대한 와이어로프의 사용조건(인장하중 X =파단하중의 10%, 2.68kN)에서 중앙수명 $t_{0.5}$ 를 구하면 각각 1,900,009 사이클과 2,282,379 사이클이 되며 중앙수명 $t_{0.5}$ 에 대한 95% 신뢰구간을 구하면 각각 (1,559,076, 2,315,495)와 (1,707,776, 3,050,314)이 된다.

4.2 로지스틱 회귀모형을 이용한 와이어로프 수명 추정

와이어로프의 굽힘피로시험으로 얻어지는 소선파단개수는 이산형 데이터로 분류할 수 있기 때문에 Fig. 5와 같이 로지스틱 회귀모형을 이용하여 직접 사용조건 수명을 추정하는 방식(Method I)과 로지스틱 회귀모형으로부터 가수명을 구하고 선형회귀모형을 이용하여 사용조건 수명을 추정하는 방식(Method II)을 모두 사용할 수 있다.⁽⁹⁾

4.2.1 로지스틱 회귀모형을 이용한 수명 추정 (Method I)

Method I의 경우 로지스틱 회귀모형의 설명변수로 인장하중(X_1), 굽힘사이클(X_2)을 고려하며,

Table 5 Deviance Table (6d Data)

Source	DF	AdjDev	Adj Mean	Chi-Square	P-Value
Regression	2	340.6	170.320	340.64	0.000
X_1	1	204.4	204.398	204.40	0.000
X_2	1	337.2	337.220	337.22	0.000
Error	143	123.4	0.863		
Total	145	464			

Table 6 Deviance Table (N11 Data of 6d)

Source	DF	AdjDev	Adj Mean	Chi-Square	P-Value
Regression	1	72.23	72.2337	72.23	0.000
X_3	1	72.23	72.2337	72.23	0.000
Error	25	10.33	0.4134		
Total	26	82.57			

와이어로프의 고장을 나타내는 반응변수 Y 는 0과 1의 두 가지 값만 갖는 이치형 변수(Dichotomous Variable)로 다음과 같은 관계식을 따른다. 단, p 는 와이어로프의 고장확률이다.

$$Y = \begin{cases} P(Y=1) = p \\ P(Y=0) = (1-p) \end{cases}$$

로지스틱 회귀모형을 이용한 Method I은 $Y=1$ 에 대하여 식 (5)와 같은 모형을 고려한다.⁽¹³⁾

$$p = \frac{e[\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2]}{1 + e[\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2]} \quad (5)$$

와이어로프 굽힘피로시험을 통해 얻은 와이어로프 가속열화시험 데이터를 이용하여 식 (5)의 모수 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 는 최우추정법(Maximum Likelihood Estimation)을 이용하여 값을 추정한다. Fig. 3의 6d 시험 데이터(N13, N23 데이터 제거)를 이용하여 구한 회귀 적합식은 식 (6)과 같다. Table 5의 편차표(Deviance Table)는 설명변수에 대한 우도비검정(likelihood ratio test) p 값을 보여주고 있다. 설명변수 X_1, X_2 의 p 값이 0.000이므로 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의하다.

$$p = \frac{e[-10.872 + 0.2403X_1 + 0.000005X_2]}{1 + e[-10.872 + 0.2403X_1 + 0.000005X_2]} \quad (6)$$

식 (6)의 회귀모형에 대한 수정결정계수 값은 72.98%이며, 소선파단개수를 기준으로 한 고장확률(p)이 13/152로 주어질 때 사용조건(파단하중의

10% 하중조건 -2.68kN)에서의 와이어로프 수명은 식 (6)로부터 1,219,895 사이클이다.

동일한 방법으로 Fig. 4의 30d 시험 데이터 (N13, N23 데이터 제거)를 이용하여 구한 회귀 적합식은 식 (7)과 같다.

$$p = \frac{e[-11.419 + 0.2839X_1 + 0.000005X_2]}{1 + e[-11.419 + 0.2839X_1 + 0.000005X_2]} \quad (7)$$

식 (7)의 회귀모형에 대한 수정결정계수 값은 72.31% 이며, 고장확률(p)이 26/152로 주어질 때 사용조건에서의 와이어로프 수명 곱힘사이클을 추정하면 1,400,363 사이클이다.

4.2.2 로지스틱 회귀모형과 가수명을 이용한 수명 추정(Method II)

로지스틱 회귀모형과 가수명을 이용하는 Method II는 인장강도의 수준에 따라, 곱힘사이클 수와 소선과단개수로부터 구한 고장확률을 이용하여 로지스틱 회귀모형을 적합시킨다. 적합시킨 로지스틱 회귀모형에서 고장을 나타내는 고장확률의 한계 값이 주어지면 인장강도의 시험 수준과 시편에 따라 가수명을 각각 추정한다. 이와 같이 추정된 가수명 데이터를 이용하여 와이어로프의 수명분포에 대한 가정과, 인장강도와 곱힘사이클 사이의 관계 모형으로부터 사용조건에서의 와이어로프 수명을 추정한다.

가수명을 추정하기 위한 로지스틱 회귀모형은 식 (8)과 같으며 설명변수 X_3 는 곱힘사이클이다. 와이어로프의 고장을 나타내는 반응변수 Y_{ij} 는 0 과 1의 두 가지 값만 갖는 이치형 변수(Dichotomous Variable)이며 i 는 인장하중 수준, j 는 시편 수준이다. 단, p_{ij} 는 i 번째 인장하중 수준, j 번째 시편 수준의 고장확률이다.

$$Y_{ij} = \begin{cases} P(Y=1) = p_{ij} \\ P(Y=0) = (1 - p_{ij}) \end{cases}, i=1, 2, 3, j=1, 2, 3$$

$$p_{ij} = \frac{e[\beta_{0ij} + \beta_{1ij}X_3]}{1 + e[\beta_{0ij} + \beta_{1ij}X_3]} \quad (8)$$

Fig. 3의 6d 시험 데이터에서 시편 N11 (15% 인장하중의 1번째 시편)에 대해 가수명을 구하기 위한 로지스틱 회귀모형은 식 (9)와 같으며 편차 표(Deviance Table) 분석결과는 Table 6과 같이 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의하다.

Table 7 Pseudo Life Using Logistic Regression

Test units	Tensile force	6d(y=13)		30d(y=26)	
		Pseudo life (Cycles)	(adj) R-sq (%)	Pseudo life (Cycles)	(adj) R-sq (%)
N11	15%	1,066,369	86.3	1,007,163	92.7
N12	15%	1,021,119	84.3	1,198,704	88.7
N21	20%	865,495	80.8	971,704	71.5
N22	20%	850,095	79.4	828,363	76.7
N31	25%	451,211	89.1	512,636	85.7
N32	25%	363,386	68.1	367,074	76.8
N33	25%	381,848	75.5	396,485	82.2

Table 8 Regression Analysis with Logistic Pseudo Life Data

Predictor	Coef	S.E	Z	P
Intercept	15.4594	0.3220	48.13	0.000
X	-0.0991942	0.01524	-6.51	0.000
Scale	0.167917	0.0449		

$$p_{11} = \frac{e[-6.635 + 0.000004X_3]}{1 + e[-6.635 + 0.000004X_3]} \quad (9)$$

식 (9)의 회귀모형에 대한 수정결정계수 값은 86.27% 이며 고장확률(p_{ij})이 13/152로 주어질 때 식 (9)를 이용하여 가수명을 구하면 1,066,369 사이클이다.

동일한 방법으로 Fig. 3의 6d 시험 데이터 및 Fig. 4의 30d 시험 데이터의 로지스틱 회귀모형을 구하여 Table 7과 같이 가수명을 추정하였다. 시편 N13, N23의 경우에는 시험 데이터가 충분하지 못하여 계산에서 제외하였다.

가속변수-수명 관계는 선형관계라 가정하며, 와이어로프 수명이 대수정규분포를 따를 때 Table 7의 6d 가수명 데이터에 대해 식 (3)을 이용하여 와이어로프 백분위수에 대한 회귀식은 식 (10)과 같이 구할 수 있으며, 분석결과는 Table 8과 같이 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의하다.

$$\widehat{\ln t_p} = 15.4594 - 0.0991942X + \Phi^{-1}(p)0.167917 \quad (10)$$

식 (10)을 이용하여 6d 시험 데이터에 대한 와이어로프의 사용조건에서 중앙수명 $t_{0.5}$ 를 구하면 1,903,869 사이클이며 95% 신뢰구간을 구하면 (1,421,154, 2,550,545)이 된다. 동일한 방법으로

Table 9 Life Estimations of Wire Ropes

Estimation method		Median Life(Cycles)	
		6d	30d
Linear regression model		1,900,009	2,282,379
Logistic regression model	Method I	1,219,895	1,400,363
	Method II	1,903,869	1,989,571
Feyrer		1,595,935	

Table 7의 30d 가수명 데이터를 이용하여 식 (11) 과 같이 와이어로프 백분위수에 대한 회귀식을 구할 수 있고 이 경우의 중앙수명 $t_{0.5}$ 는 1,989,571 사이클이며 95% 신뢰구간을 구하면 (1,411,418, 2,804,552)이 된다.

$$\ln \hat{t}_p = 15.1893 - 0.0859044X + \Phi^{-1}(p)0.218356 \quad (11)$$

4.3 와이어로프 수명 추정 결과 비교

가속열화시험 데이터로부터 Feyrer⁽³⁾가 제안한 식 (12)를 이용하여 내구수명계수를 반영한 평균 편굽힘 사이클 보정값($\bar{N}_{Asim \cdot cor}$)을 계산하면 1,595,935 사이클이다. 여기에서, 힘 계수는 무시하였으며, 굽힘 길이 $l = 550mm$, $b_0 = -2.015$, $b_1 = 1.588$, $b_2 = 8.058$, $b_3 = -0.32$, $b_4 = -2.577$, $b_5 = 1.2$ 로 계산하였다. 단, \ln 은 자연로그함수이다.

$$\ln \bar{N}_A = b_0 + (b_1 + b_4 \cdot \ln \frac{D}{d}) \cdot (\ln \frac{S}{d^2} - 0.4 \cdot \ln \frac{R_0}{1,770}) + b_2 \cdot \ln \frac{D}{d} + b_3 \cdot \ln d + \frac{1}{b_5 + \ln \frac{l}{d}} \quad (12)$$

Feyrer⁽³⁾의 공식을 이용하여 계산한 값과 이 연구에서 고려한 모형에서 구한 수명 추정 값들을 비교한 결과는 Table 9와 같으며 선형회귀모형을 이용한 결과와 로지스틱 회귀모형 Method II를 이용한 결과가 유사하게 나타나고 로지스틱 회귀모형 Method I의 결과는 다소 차이가 남을 알 수 있다. 또한 Feyrer⁽³⁾ 계산 값보다 선형회귀모형 및 로지스틱 회귀모형 Method II의 값이 더 크게 나타난다.

5. 결 론

최근 들어 수요가 급격하게 증가하고 있는 새로운 방식(8×19W-IWRC)의 와이어로프 수명을 전

용 굽힘피로시험기에 의해 가속열화시험을 실시하고 다양한 가속열화모형을 이용하여 사용조건에서의 와이어로프 수명을 추정하고 비교하였다.

와이어로프의 수명에 큰 영향을 미치는 인장하중을 가속변수로 하여 서로 다른 3수준의 인장하중을 적용한 가속열화시험 데이터를 구하였다. 와이어로프의 수명은 대수정규분포를 따른다고 가정하고 가속열화시험 데이터로부터 다중선형 회귀모형을 이용하여 가수명을 구하였다. 이 가수명을 이용하여 구한 선형회귀모형으로부터 사용조건에서 중앙수명 $t_{0.5}$ 을 구한 결과 6d 데이터에서 1,900,009 사이클, 30d 데이터에서는 2,282,379 사이클이었다. 고장확률을 적용한 로지스틱 회귀모형을 이용하여 추정하는 방식(Method II)으로 사용조건에서의 중앙수명 $t_{0.5}$ 을 계산한 결과는 6d 데이터에서 1,903,869 사이클, 30d 데이터에서는 1,989,571 사이클이었다. 이들 계산 결과와 Feyrer⁽³⁾ 방식으로 계산한 수명 값을 비교한 결과, 선형회귀모형을 이용하여 추정한 수명과 로지스틱 회귀모형 Method II를 이용하여 추정한 수명이 유사하게 나타남을 알 수 있다.

보다 정확한 사용조건의 와이어로프 수명을 예측하기 위해서는 더 많은 데이터 수집이 필요하며, 특히 고장이 많이 발생하는 구간의 간격을 좁혀서 시험을 설계하는 것이 필요하다.

참고문헌
(References)

- (1) Feyrer, K., 2007, Wire Ropes: Tension, Endurance, Reliability, Springer, New York, pp. 212~221.
- (2) Giovannozzi, R., 1967, Report on the Research of the Fatigue of Wire Ropes, OIPEEC Bulletin 8, Torino, pp. 9~10.
- (3) Feyrer, K., 1995, "Endurance Calculation of Wire Ropes Running over Sheaves," WIRE, Vol. 45, No. 2, pp. 99~103.
- (4) Ridge, I.M.L., Chaplin, C.R. and Zheng, J., 2001, "Effect of Degradation and Impaired Quality on Wire Rope Bending over Sheave Fatigue Endurance," Engineering Failure Analysis, Vol. 8, pp. 173~187.
- (5) Yusuf A.Q. and Impark, C.E., 2013, "Experimental Determination of Degradation Influence on Bending over Sheave Fatigue Life of Steel Wire Ropes," Indian Journal of Engineering & Materials Sciences,

- Vol. 20, pp. 14~20.
- (6) Kim, S.H., Ham, S.H. and Kwon, J.D., 2014, "Bending Fatigue Characteristics of Corroded Wire Ropes," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, No. 7, pp. 2853~2859.
- (7) Kim, S.B. and Kim, S.H., 2015, "Estimation of Elevator Wire Life Using Accelerated Degradation Model," *The Korean Society for Quality Management*, Vol. 43, No. 1, pp. 409~420.
- (8) Kim, S.H., 2014, "A Study on the Evaluation of Structural Integrity Considering Fatigue for Wire Rope," Ph.D. diss., Yeungnam University.
- (9) Park, W.J., Kim, S.H. and Kim, S.B., 2016, "Comparison of Elevator Wire-Rope Life Estimation Methods : Case Study," *Proceedings of the KIIE 2016 Spring Annual Meeting*, pp. 3257~3263.
- (10) DIN 15020-2, 1974, Lifting Appliances, Principles Relating to Rope Drives; Supervision During Operation.
- (11) Meeker, W.Q. and Escobar, L.A., 1998, *Statistical Methods for Reliability Data*, John Wiley & Sons, New York, pp. 336~339.
- (12) Feyrer, K., 2007, *Wire Ropes: Tension, Endurance, Reliability*, Springer, New York, pp. 137~139.
- (13) Cox, D.R. and Snell, E.J., 1989, *Analysis of Binary Data*, Chapman & Hall, London, pp. 1~24.