

가속 열화 모형을 이용한 엘리베이터 와이어 수명 예측

김상부 *† · 김승호 **

* 창원대학교 산업조선해양공학부

** 한국승강기대학교 승강기공학부

Estimation of Elevator Wire Life Using Accelerated Degradation Model

Kim, Sang Boo *† · Kim, Seung Ho **

* School of Industrial Engineering and Naval Architecture, Changwon National University

** School of Lift Engineering, Korea Lift College

ABSTRACT

Purpose: This study is to estimate the life of elevator wire rope by using the accelerated degradation test with two accelerating variables of applied load and corrosion.

Methods: Linear regression method is used to find the pseudo life of elevator wire rope at each combination of accelerating variables and the median life of elevator wire rope at use condition is estimated under the assumption that the life of elevator wire rope follows lognormal distribution.

Results: The particular case study demonstrated that the results of the elevator wire life estimation by using the proposed method can provide the better solutions than existing methods.

Conclusion: It can be economical to use accelerated degradation model for estimating the life of elevator wire rope.

Key Words: Elevator Wire Rope, Accelerated Degradation Model, Pseudo Life, Regression

● Received 24 July 2015, 1st revised 30 July 2015, accepted 31 July 2015

† Corresponding Author(sbkim@cwnu.ac.kr)

© 2015, The Korean Society for Quality Management

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-Commercial use, distribution, and re-production in any medium, provided the original work is properly cited.

* 이 논문은 2013~2014년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

1. 서론

국내에 설치된 엘리베이터는 2013년 2월 기준으로 47만대를 넘어섰으며, 이는 보유대수 기준으로 세계 9위에 해당한다. 엘리베이터는 24시간 불특정다수가 이용하는 주요 생활 안전 제품이기 때문에 유지 및 보수가 매우 중요하며, 특히 엘리베이터의 하중을 견디는 와이어로프의 수명은 사용자의 안전과 밀접한 관계가 있다. 또한 엘리베이터 와이어로프의 교체는 많은 비용을 수반하기 때문에 와이어로프의 교체시기를 놓고 관리 주체와 유지보수업체 간에 이견이 존재하기도 한다. 이러한 상황은 비단 엘리베이터 경우 뿐 만 아니라 다른 분야에서 사용되는 와이어로프에서도 유사하게 발생한다. 실제로 와이어로프의 고장은 심각한 안전 문제를 야기할 수 있으므로 와이어로프의 고장이 후 수리나 교체는 큰 의미가 없으며 와이어로프의 고장 발생 이전에 교체가 이루어져야 한다. 따라서 엘리베이터 와이어로프의 고장 시간 또는 수명에 대한 정확한 예측은, 엘리베이터 와이어로프에 대한 보다 효율적인 사전 준비를 가능케 할 뿐 아니라 경제적인 면에서도 이득을 가져올 수 있다. 결론적으로 엘리베이터 와이어로프의 교체 시기는 와이어로프에 대한 수명 예측 결과에 기반을 둘 수밖에 없으며 이에 대한 많은 연구가 진행되어 오고 있다.

굽힘과 인장하중을 동시에 받는 엘리베이터 와이어로프의 경우 일반적으로 내구수명은 굽힘(Bending) 사이클 수로 측정한다. 와이어로프의 수명을 나타내는 굽힘 사이클 수에 가장 중요하게 영향을 미치는 항목은 와이어로프 인장하중 S 와, 로프 직경(d)에 대한 시브(Sheave, Figure 2 참조) 직경(D)의 비 D/d 로 알려져 있다. 이에 따라 많은 연구들이 굽힘 사이클 수에 대한 인장하중 S 와 직경비 D/d 의 영향을 찾아내기 위한 시험과 시험 결과로부터 내구성 공식을 구하는 문제를 다루었다. 와이어로프의 시험을 통해 얻은 데이터를 이용하여 와이어로프의 수명과 관련 변수 간의 함수를 구하였는데 이에 관한 연구가 주로 두 그룹으로 진행되어 왔다 (Feyrer 2007).

와이어로프의 내구수명을 굽힘 응력과 인장 응력 합인 함수로 나타내는 그룹 (Rossetti 1975, Pantucek 1977, Meeuse 1976)에서는 적은 수의 시험으로 결과를 얻을 수 있지만, 상대적으로 작은 범위의 인장하중과 직경비 D/d 에 대해서만 유효하다고 알려져 있다. 반면에 특정 인장하중 S/d^2 과 직경비 D/d 의 함수를 이용하는 다른 그룹 (Woernle 1934, Giovanozzi 1967, Feyrer 1995)에서는 많은 굽힘 시험에 대한 데이터로부터 회귀 관계식을 구하여 상대적으로 큰 범위의 인장하중과 직경비에 대한 굽힘 사이클 수에 대한 추정이 가능하다. Yusurf et al. (2012)은 Feyrer (1995)의 공식을 최소제곱법을 이용한 선형회귀분석법으로 재해석하고 시험 결과와 비교 분석하였다. 그러나 대부분의 시험을 통한 와이어로프 수명 관계식에 관한 연구는 와이어로프의 실제 사용 조건에서 시험을 수행하므로 매우 오랜 기간과 비용이 소요되는 단점이 존재한다.

엘리베이터용 와이어로프는 Figure 2와 같이 권상기(Traction Machine)의 시브에 감기면서 반복적으로 굽힘 하중을 받고 로프 한 쪽 끝단에 카(Car)가 매달리고 다른 한쪽 끝단에는 균형추가 매달려서 인장하중을 받는 구조로 되어 있다. 이로 인해 엘리베이터용 와이어로프는 인장하중 및 반복 굽힘 하중이 결합하여 발생하는 BOS (Bending over Sheave) 피로로 인한 와이어로프 마모 때문에 소선 파단 수 증가 및 로프 직경의 감소가 발생하여 열화가 진행되는 고장 메커니즘을 갖는다. 또한 와이어로프의 시험을 통해 관련 변수와 와이어로프의 수명에 대한 함수를 구하는 것은 모든 와이어로프와 모든 사용 환경 조건을 포함하여 구한 것이 아니다. 따라서 기존의 와이어로프 수명 추정 방법의 대안으로 가속열화모형(Accelerated Degradation Model)을 사용하여 사용 조건에서의 와이어로프 내구 수명을 추정하는 방안을 고려할 수 있다.

이 연구에서는 엘리베이터 와이어로프 수명에 대한 가속열화모형 (Accelerated Degradation Model)을 구성하고 김성호 (2014)의 와이어로프 시험 데이터를 이용하여 와이어로프의 사용 조건에서의 수명을 추정하는 방법에 대하여 다루었다.

2. 엘리베이터용 와이어로프

2.1 와이어로프 구성 및 종류

권상식 엘리베이터에서 와이어로프는 권상기(Traction Machine) 시브의 회전운동을 카(Car) 또는 균형추의 직선 운동으로 변환시켜 주면서 전체 엘리베이터 하중을 지탱하도록 해주는 매우 중요한 부품이다. 따라서 주어진 하중의 규격한계 내에서 쉽게 끊어지지 않도록 충분한 파단강도를 가져야 하며, 마모가 급속하게 발생하지 않도록 도르래와 와이어로프 사이에 적절한 마모성능을 가져야 한다. 아울러 권상식 엘리베이터에서는 도르래와 로프 사이에 슬립이 발생되지 않도록 권상능력을 동시에 확보하고 있어야 한다.

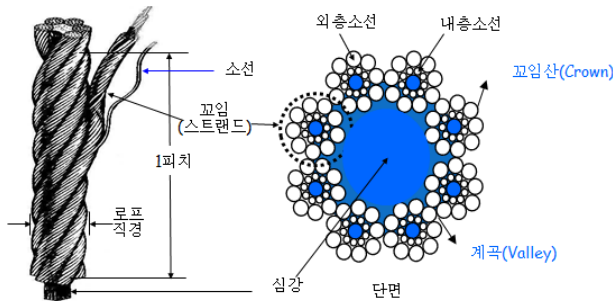


Figure 1. Structure of Wire Rope (8x19 Type)

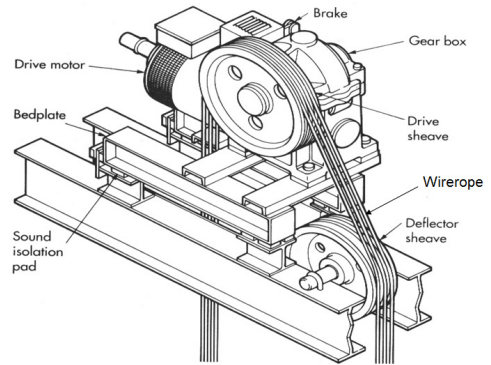


Figure 2. Sheave and Wire Rope

일반적으로 엘리베이터에 적용하는 와이어로프는 단면의 구성에 따른 종류가 많이 있으나 일반적으로 Figure 1과 같은 구성을 가지고 있으며, 소선의 재료는 KS D 3559(경강 선재)규격에 정한 HSWR 52~82의 선재를 사용하며, E중용 소선 및 삼각심용 환선, 필러선에는 HSWR 37~47을 사용하기도 한다. 또한 이 연구에서 다룬 시험에서 사용된 와이어로프는 비도금선으로, 비도금선은 고탄소강 소재를 선선 가공하여 끈 것이며 인장강도, 피로수명, 내마모성이 우수하여 사용빈도가 많은 제품군이다. 반면에 도금선은 비도금선에 아연도금을 한 것으로 내식성이 좋아 수산용 및 비교적 장기간 사용되는 용도로 적합하다.

2.2 와이어로프의 수명

엘리베이터용 와이어로프는 정적인 인장하중이 반복적인 굽힘 하중과 결합하여 발생하는 BOS(Bending Over Sheave) 피로로 인해 마모가 발생하고 이로 인한 소선의 파단, 직경의 감소 등으로 처음보다 파단강도가 떨어지게 되어 일정기간이 지나면 와이어로프를 교체해주어야 한다. 와이어로프의 수명에 영향을 미치는 인자는 매우 다양하며, 와이어로프와 시브 직경비(D/d), 시브의 홈 형상, 인장하중, 권부각 (Angle of Wrap), 굽힘 길이, 굽힘 종류에 따른 풀리 개수 (단순 굽힘 및 역방향 굽힘), 윤활, 와이어로프의 구성 및 등급 등이 중요한 인자라고 할 수 있다.

엘리베이터 와이어로프는 엘리베이터의 사용에 따라 BOS(Bending Over Sheave) 피로로 인해 마모가 발생하면

서 소선의 파단 개수가 증가하고, 와이어로프의 직경이 감소하는 대표적인 열화(Degradation) 부품으로 볼 수 있다. 따라서 와이어로프의 고장 정의는 열화의 정도가 주어진 역치(Threshold)를 넘는 경우 발생한다고 정의하며, 이 열화의 정도는 주로 소선 파단 개수 및 직경의 감소 정도로 판단한다.

국내 승강기 검사 기준은 Table 1과 같이 국민안전처(2015)에서 제시한 와이어로프 폐기 기준을 채택하고 있으며, 해외 기준 가운데 독일의 DIN 15020-2 (1974)에서는 Table 2와 같이 와이어 파단 개수에 의한 와이어로프 폐기 기준을 정의하고 있다. 그러나 한국 승강기 안전 기술원에서 2004년에 와이어로프 불합격(조건부 합격포함)으로 판정된 2,710대의 국내 엘리베이터에 대한 원인 분석을 실시한 결과에서 볼 수 있듯이, 실제로 와이어로프 직경이 90%이하로 마모되어 불합격 판정된 경우는 10대 밖에 없기 때문에 와이어로프의 고장 판정은 거의 대부분은 소선의 파단으로 인해 발생한다고 말할 수 있다 (이한수 2006).

이 연구에서는 독일 규격인 DIN 15020-2를 기준으로, 와이어로프 시험에서 적용한 Load Bearing 와이어 수 101~120(8xS19 FC), Drive Group 4m, Cross Lay 및 30d (30x10=300mm, d:로프 직경)의 길이에 해당하는 파단개수 19를 고장 기준으로 삼았다. 또한 와이어로프의 시편 Stroke가 1.2m이기 때문에 고장 판정 기준이 되는 소선 파단 개수는 76개(19x4)로 판단한다.

Table 1. Discarding Criteria for Wire Ropes (MPSS)

마모 및 파손상태	기 준
소선의 파단이 균등하게 분포되어 있는 경우	1구성 꼬임(스트랜드)의 1꼬임 피치 내에서 파단 수 4 이하
파단 소선의 단면적이 원래의 소선 단면적의 70% 이하로 되어 있는 경우 또는 녹이 심한 경우	1구성 꼬임(스트랜드)의 1꼬임 피치 내에서 파단 수 2 이하
소선의 파단이 1개소 또는 특정의 꼬임에 집중되어 있는 경우	소선의 파단총수가 1꼬임 피치 내에서 6꼬임 와이어로프이면 12 이하, 8꼬임 와이어로프이면 16 이하
마모부분의 와이어로프의 지름	마모되지 않은 부분의 와이어로프 직경의 90% 이상

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

Number of load bearing wires in the outer strands of the wire rope n	Number of visible wire breaks which justifies discarding							
	Drive groups 1 Em, 1 Dm, 1 Cm, 1 Bm, 1 Am				Drive groups 2m, 3m, 4m, 5m			
	Cross lay		Long lay		Cross lay		Long lay	
	on a length of 6d		on a length of 30d		on a length of 6d		on a length of 30d	
up to 50	2	4	1	2	4	8	2	4
51 to 75	3	6	2	3	6	12	3	6
76 to 100	4	8	2	4	8	16	4	8
101 to 120	5	10	2	5	10	19	5	10
121 to 140	6	11	3	6	11	22	6	11
141 to 160	6	13	3	6	13	26	6	13

3. 와이어로프 가속열화시험

이 연구에서 사용한 시험 데이터는 김성호(2014)에서 인용하였으며, 엘리베이터 와이어로프에 대한 시험 개요는 다음과 같다.

3.1 와이어로프 시험 방법

와이어로프 시험에서는 와이어로프의 열화를 가속하기 위하여 두 가지 가속 변수를 사용하였는데, 염수를 이용한 부식과 와이어로프에 가하는 인장하중이다. 먼저 엘리베이터 와이어로프에 대한 부식은 와이어로프에 대한 염수 분무 시간을 기준으로 시험 수준을 나누었다. 전혀 부식이 없는 와이어로프의 시편과 5일, 15일, 30일 동안 염수 속에서 부식을 시킨 와이어로프 시편을 이용하여 일정 사이클 수만큼 굽힘 피로시험을 실시한 후 소선의 파단 수를 측정하였으며, 굽힘 피로시험 후 소선의 파단이 집중된 부위를 1m 길이로 절단하고 인장 시험기를 이용하여 Fracture Strength를 측정한다. 가속열화시험에 사용한 엘리베이터 와이어로프는 내마모성 및 고강도 유지에 좋은 KS D 3559(경강선재)의 SWRH37A재로 8xS(19)+SS의 직경 10mm인 것을 선택하였고 Grade는 E등급이다.

와이어로프의 부식을 위해 시험에 사용된 장치는 염수분무시험기이고 일반적인 부식시험에서 사용하는 KSD9502(염수분무시험방법)의 중성염수분무시험 방법에 따라 실시하였다. 가속열화시험을 하는 데 사용된 굽힘 피로 시험기의 형상은 Figure 3과 같다. 가속열화시험 후 파단 하중시험을 위한 인장 시험기는 인장용량이 150kN이며, 인장 시험 시 크로스헤드의 속도는 50mm/min로 실시하였다.

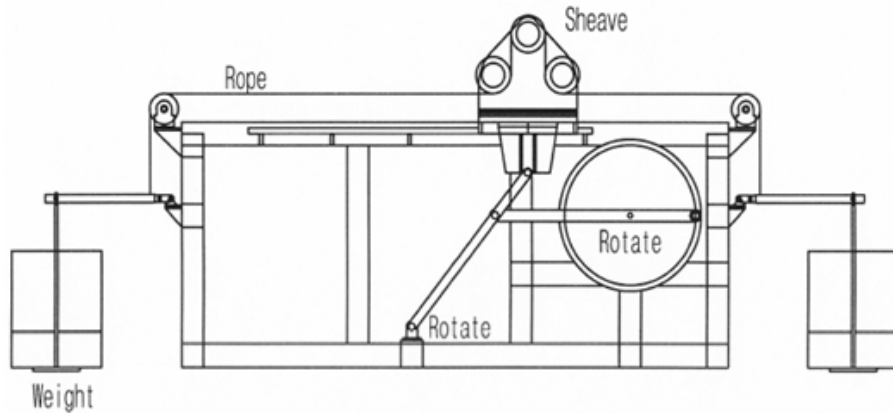


Figure 3. Bending Fatigue Tester

와이어로프 가속열화시험에 사용된 두 가지 스트레스는, 굽힘 피로시험기의 와이어로프 시편에 부가되는 인장하중 및 인공 부식 조건이다. 엘리베이터 와이어로프의 사용 조건은 승강기검사 기준에서 와이어로프 안전율을 10으로 정한 기준에 따라 인장하중의 10%를 부가한 하중상태 및 인공 부식 전의 상태로 가정한다. 가속조건은 각 시편을 5일, 15일, 30일 염수 분무하여 인공적으로 부식한 후 각각 인장하중의 15%, 20%, 25%를 부가한 상태로 시험한다. 시브(D)와 로프직경(d)의 비 D/d는 와이어로프의 마모정도를 빠르게 진행하기 위하여 승강기검사기준에서 최소로

규정되어 있는 40배 보다 1/2정도로 줄인 20배로 시험하였으며, 시편의 길이는 6.5m이다. 또한 와이어로프가 메인 시브와 접하는 시브에 대해 동일방향으로 굴곡을 받는 편굽힘은 반대방향으로 굴곡을 받는 역굽힘보다 수명이 더 길기 때문에 본 시험에서는 역굽힘 조건으로 시험하였다. 실제 시험 절차는 아래와 같다.

- ① 5일 동안 부식 과정을 거친 시편 1을 인장 시험기를 이용하여 Fracture Strength를 측정한다.
- ② 5일 동안 부식 과정을 거친 새로운 시편 2를 굽힘 피로시험기에서 정해진 첫 번째 사이클 수만큼 운행시키고 운행 Stroke 1.2m내의 로프 소선의 파단수를 계수한 후 파단이 집중된 부위를 1m 길이로 절단하여 인장 시험기에서 Fracture Strength를 측정한다.
- ③ 5일 동안 부식 과정을 거친 새로운 3번 시편부터 6번 시편까지 ②의 시험 절차 중에서 측정 사이클 수를 바꿔 가면서 반복 측정한다.
- ④ 15일, 30일 동안 부식 과정을 거친 각각의 와이어로프 시편에 대해 ②와 ③의 과정을 반복하여 측정한다.

3.2 와이어로프 시험 데이터

염수분무방식을 이용하여 5일, 15일, 30일 동안 와이어로프에 대한 부식을 진행시킨 후, 인장하중의 15%, 20%, 25%를 부가한 상태로 가속열화시험을 한 김성호(2014)의 시험결과를 정리하면 Table 3과 같다.

Table 3. Accelerated Degradation Test Data of Wire Rope

% of Applied Load Corrosion	6.2 kN (15%)		8.2 kN (20%)		10.2 kN (25%)	
	Cycle	No. of Broken Wires	Cycle	No. of Broken Wires	Cycle	No. of Broken Wires
5 days	8,000	1	5,000	0	5,000	9
	9,000	4	6,000	6	6,000	21
	10,000	23	7,000	8	7,000	58
	11,000	53	8,000	35	8,000	125
	12,000	71	-	-	9,000	139
15 days	8,000	1	5,000	0	5,000	11
	9,000	10	6,000	15	6,000	17
	10,000	27	7,000	24	7,000	68
	11,000	34	8,000	44	8,000	67
	12,000	81	9,000	99	9,000	138
30 days	6,000	5	4,000	8	3,000	2
	7,000	20	5,000	23	4,000	9
	8,000	34	6,000	41	5,000	83
	9,000	61	7,000	96	6,000	131
	10,000	75	-	-	-	-

실제로 김성호 (2014)는 엘리베이터 와이어로프에 대한 수명을 다음과 같은 방법으로 추정하였다. 우선 와이어로프에 대한 인공적인 부식이 없고 10%의 인장하중 조건인 사용조건에서 시험을 수행하여 얻은 시험 데이터를 적합시

킨 모형을 구하고 폐기기준인 소선의 파단수를 80으로 가정하여 현재의 실험 조건에서의 와이어로프 수명을 약 30,000사이클로 추정하였다. 그리고 이같이 구한 와이어로프 수명 30,000사이클에 대해 다음의 사항들을 고려하여 최종적인 정상 사용조건에서의 와이어로프 수명을 계산하였다. 즉, 현재 시험 조건에서 한 스트로크(Stroke)에 시브 회전수가 4회전이므로 $30,000 \times 4$ 회전=120,000사이클이 되고, 1사이클에 3회가 굽혀지므로 $120,000 \times 3=360,000$ 회전하며, 역굽힘 경우보다 편굽힘의 수명이 60% 더 길다고 보고 실제 사용조건은 편굽힘의 경우이므로 엘리베이터 와이어로프의 정상 사용조건에서 수명은 $360,000 \times 1.6=576,000$ 사이클로 추정한 것이다. 그러나 이러한 와이어로프 수명 추정 과정은 가속 변수들의 영향을 제대로 반영하지 못하고 있으며, 단순하고 주관적인 데이터 적합을 시도하고 있다. 따라서 이 연구에서는 위의 시험에서 고려한 두 가지 가속변수의 영향을 반영하는 가속열화모형을 구하여 와이어로프의 정상 사용조건에서 수명을 추정하고자 한다.

4. 가속열화모형을 이용한 와이어로프 수명 추정

이 연구에서 적용한 엘리베이터 와이어로프에 대한 수명 추정 방식은 Meeker and Escobar (1998)에서 다룬 가수명을 이용한 가속열화모형을 사용하였다. 우선 두 가지 스트레스, 즉 인장하중과 부식 변수의 조합 조건에서 시험한 가속 열화 데이터 (Table 3)를 이용하여 각각의 가속 조건에서 가수명 (Pseudo Life)을 추정하고, 총 9가지의 가속 조건에서 추정된 가수명 값을 이용하여 와이어로프의 수명에 대한 회귀모형을 구한 후 최종적으로 엘리베이터 와이어로프의 정상 사용조건에서 수명을 추정하였다.

4.1 와이어로프 가수명 추정

인장하중과 부식 변수의 조합 조건에서 시험하여 얻은 가속 열화 데이터 (Table 3)에 대한 그래프를 그려보면 Figure 4와 같다. Figure 4에서 볼 수 있듯이 대부분의 조건에서 사이클 수에 따른 소선 파단 개수가 선형적으로 증가함을 볼 수 있다. 따라서 와이어로프의 고장을 소선 파단 개수 76을 기준으로 할 때 각 변수 조합에서 단순 선형 회귀모형을 이용하여 가수명을 쉽게 추정할 수 있다. 또한 염수 분무에 따른 부식 변수의 수준별 차이가 그래프 상에 나타나는데, 인장하중의 수준에 상관없이 30일 부식의 경우가 다른 두 경우인 5일과 15일에 비해 데이터들이 상대적으로 떨어져 있음을 알 수 있다.

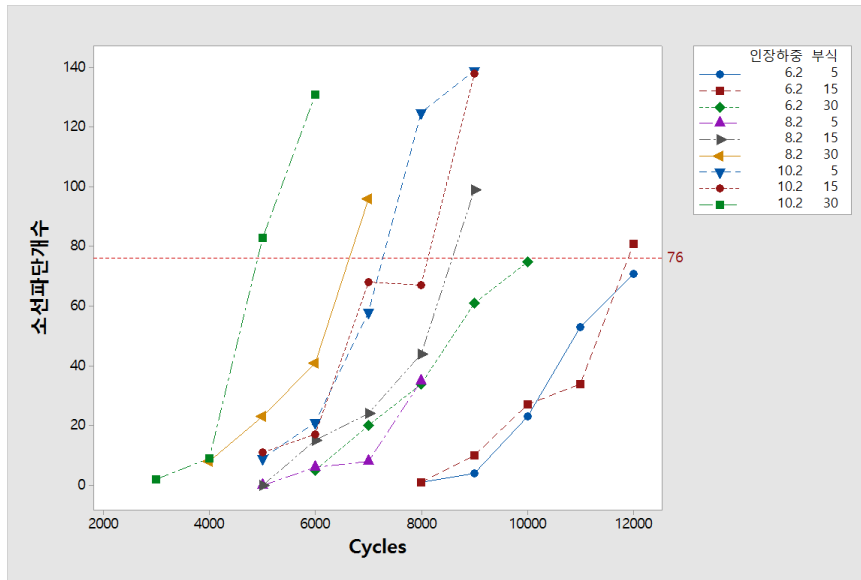


Figure 4. Number of Broken Wires vs. Cycles

다음의 Table 4는 와이어로프의 고장 기준을 소선 파단 개수 76으로 하고, Table 3의 데이터를 이용하여 인장하중과 부식 두 변수의 조합에서 단순 선형 회귀모형을 적용하여 구한 가수명 값과 R² 값이다.

Table 4. Pseudo Life of Wire Rope for Each ADT Condition (Cycles)

인장하중	6.2kN	6.2kN	6.2kN	8.2kN	8.2kN	8.2kN	10.2kN	10.2kN	10.2kN
부식	5일	15일	30일	5일	15일	30일	5일	15일	30일
가수명	12,413	12,467	10,044	12,458	8,745	6,706	7,154	7,520	4,928
R ²	94.6%	87.6%	98.6%	79.0%	87.1%	89.7%	94.3%	88.5%	92.6%

4.2 가수명을 이용한 와이어로프 수명 추정

가속열화 시험 데이터로부터 얻은 가수명을 이용하여 회귀분석을 통해 와이어로프의 사용조건에서의 수명을 예측한다. 스트레스 변수와 수명과의 관계는 선형 관계를 가정하였고 수명분포는 대수정규분포를 가정하였다. 회귀모형에서 반응변수는 와이어로프의 가수명을 나타내는 사이클 수가 되며 독립변수는 스트레스 변수인 인장하중과 부식이다. 스트레스 변수 부식의 경우, 변수의 수준이 실제 부식의 정도를 나타내는 양이 아니라 기간으로 설정되어 있으나 염수 분무 기간과 부식의 정도가 정비례한다는 가정 하에 기간을 수준으로 사용하였다.

와이어로프의 수명 T가 위치모수가 μ 이고 척도모수가 σ 인 대수정규분포를 따르는 경우, 주어진 가속변수 X_1 (인장하중), X_2 (부식) 수준에서 와이어로프의 100p번째 백분위수 t_p 에 대한 회귀식은 아래와 같이 주어진다. 단, 가속변수의 반응변수에 대한 영향은 독립적이라 가정한다.

와이어로프의 수명을 나타내는 사이클 수가 따르는 대수정규분포는 위치-척도 분포군 (Location-Scale Family)에 속해 있으므로,

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

이며, 따라서

$$\ln t_p = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \Phi^{-1}(p)\sigma \tag{1}$$

이다. 단, $\Phi(\cdot)$ 는 표준정규분포함수이다.

Table 4의 가수명 데이터를 이용하여 식 (1)의 파라메타들을 추정하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$\ln t_p = 10.5584 - 0.1474X_1 - 0.0164X_2 + \Phi^{-1}(p)0.0939 \tag{2}$$

식 (2)의 계수 추정은 미니탭 17의 'Regression with Life Data' 모듈을 이용하여 구하였다. 추정된 모든 계수는 Table 5의 미니탭 회귀분석 결과에서 보듯이 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의하며, 척도모수 σ 의 추정 값은 0.0939이다. 와이어로프의 사용조건, 즉 인장하중 $X_1=4.1$, 부식 $X_2=0$ 에서 중앙 수명 값 $t_{0.5}=21,037$ 이 된다. 이 추정 값은 김성호(2014)에서 추정된 30,000 사이클보다 작으며 정상 사용조건으로 환산하면 403,910 사이클이 된다. 김성호(2014)의 엘리베이터 와이어로프 수명에 대한 추정 값과 이 연구에서 사용한 가속열화시험을 통한 수명 추정 값의 비교는, Feyrer(2007)가 여러 엘리베이터 와이어로프에 대하여 실험을 통하여 구한 수명 관계식을 기준으로 수행할 수 있다. Feyrer(2007)가 모든 엘리베이터 와이어로프에 대하여 모든 환경을 고려한 실험의 결과로부터 엘리베이터 와이어로프에 대한 수명 추정 식을 구한 것은 아니지만, 이 연구에서 활용한 실험과 동일한 조건의 경우를 포함하는 관계식을 제공하고 있으므로 이를 기준으로 비교하였다.

Table 5. Regression with Pseudo Life Data

Regression Table						
Predictor	Coef	Standard			95.0% Normal CI	
		Error	Z	P	Lower	Upper
Intercept	10.5584	0.168187	62.78	0.000	10.2287	10.8880
X_1	-0.147386	0.0191761	-7.69	0.000	-0.184971	-0.109802
X_2	-0.0163707	0.0030479	-5.37	0.000	-0.0223445	-0.0103969
Scale	0.0939436	0.0221427			0.0591884	0.149107

Figure 3과 같은 굽힘 피로 시험 모델에서 인장하중의 10%(4.1 kN)가 작용할 때 Feyrer(2007, 265-297)가 제안한 계산식을 이용하여 와이어로프 폐기 기준에 따른 와이어로프의 평균수명 사이클(\bar{Z}_A) 값을 계산하면 다음과 같다. 먼저, Feyrer(2007)가 제안한 식 (3)과 Table 6의 값을 이용하여 평균 굽힘 사이클(\bar{N}_A)을 계산하면 $\bar{N}_A=207,629$ 이다.

$$\lg \bar{N}_A = b_0 + (b_1 + b_4 \cdot \lg \frac{D}{d}) \cdot (\lg \frac{S}{d^2} - 0.4 \cdot \lg \frac{R_0}{1,770}) + b_2 \cdot \lg \frac{D}{d} + b_3 \cdot \lg d + \frac{1}{b_5 + \lg \frac{l}{d}} \tag{3}$$

이 계산 값은 로프의 내구수명이 반영되지 않은 편굽힘에 대한 계산 결과이므로 로프 윤활, 로프 구성 및 홈 형상 등에 관한 내구 수명 계수를 반영하여 계산한 평균 편굽힘 사이클 보정값($\overline{N}_{Asim \cdot cor}$)은 164,027이다. 또한 Figure 3의 장치는 편굽힘이 아닌 역굽힘이기 때문에 역굽힘으로 치환하면 평균 역굽힘 사이클($\overline{N}_{Arev \cdot cor}$)은 51,160이 되며, Palmgren-Miner Rule (Feyrer 2007)을 이용하여 최종적으로 평균수명 사이클(\overline{Z}_A)을 계산하면 19,498(Cycles)을 얻게 된다. 따라서 이 연구에서 제안한 가속열화모형을 이용하여 구한 엘리베이터 와이어로프의 중앙수명 21,037(Cycles)가 김성호(2014)의 추정 값 30,000(Cycles)보다 Feyrer(2007)의 추정 값에 충분히 더 가깝다고 말할 수 있다.

Table 6. Constants and Values for Elevator Wire Rope Bending Fatigue Test

Definition	Symbol	Value & Unit
Sheave Diameter	D	200 mm
Nominal Rope Diameter	d	10 mm
Rope Tensile Force for 4.1 kN	S	4,746 N
Nominal Tensile Strength	R_0	1,320 N/mm ²
Bending Length	l	485 mm
Constants b_i for Wire Ropes (Wire Rope 8xS19 FC, sZ, E Grade)	b_0 for \overline{N}_A	-2.611
	b_1	1.887
	b_2	8.567
	b_3	-0.32
	b_4	-2.894
	b_5 for \overline{N}_A	1.2

5. 결 론

엘리베이터 와이어로프의 수명 추정은 안전과 관련하여 매우 중요하지만 실제 사용 조건에서 엘리베이터 와이어로프의 수명 시험은 많은 시간과 비용이 들게 된다. 이 연구에서는 엘리베이터 와이어로프의 수명을 추정함에 있어 보다 경제적으로 추정을 할 수 있는 방안으로 가속열화모형을 이용하여 추정하는 방안을 제안하였다.

엘리베이터 와이어로프의 수명에 큰 영향을 미치는 인장하중과 부식의 두 가지 가속변수를 적용한 가속열화시험을 통하여 시험데이터를 구하고, 회귀분석을 이용하여 두 가지 가속변수의 모든 수준 조합에서 가수명을 추정하였다. 그리고 엘리베이터 와이어로프의 수명이 대수정규분포를 따르고, 수명과 가속변수와의 관계가 선형이라는 가정 하에서 가수명 데이터를 이용하여 엘리베이터 와이어로프의 수명과 가속변수들 간의 관계식을 구하였다. 적용 사례를 보면, 가속열화 모형을 이용한 엘리베이터 와이어로프의 정상 사용조건에서 중앙 수명에 대한 추정이 기존의 방식으로 추정한 결과 (김성호 2014)보다 Feyrer(2007)가 제안한 와이어로프 추정 함수 값에 더 가깝게 추정됨을 알 수 있다. 가속열화시험을 통한 엘리베이터 와이어로프 수명 추정을 폭넓게 활용하기 위해서는, Feyrer(2007) 등이 제시하고 있는 실험데이터를 바탕으로 한 와이어로프 수명 추정과 가속열화시험을 통한 수명 추정 간의 비교 분석 연구도 향후 수행되어야 할 것으로 생각된다.

REFERENCES

- DIN 15020-2. 1974. Lifting Appliances, Principles Relating to Rope Drives; Supervision During Operation.
- Feyrer, K. 1995. "Endurance Calculation of Wire Ropes Running over Sheaves." WIRE 45(2):99-103.
- Feyrer, K. 2007. Wire Ropes: Tension, Endurance, Reliability. New York: Springer.
- Giovannozzi, R. 1967. Report on the Research of the Fatigue of Wire Ropes. OIPEEC Bulletin 8. Torino.
- Kim, Sungho. 2014. "A Study on the Evaluation of Structural Integrity Considering Fatigue for Wire Rope." Ph.D. diss., Yeungnam University.
- Lee, Hansu. 2006. "A Study on Life-time Evaluation of Elevator Wire Ropes for Buildings." MS Thesis. University of Seoul.
- Meeker, William Q., and Escobar, Luis A. 1998. Statistical Methods for Reliability Data. New York: John Wiley & Sons.
- Meeuse, G. C. 1976. The Reference Machine REFMA. OIPEEC Bulletin 29. Torino.
- Ministry of Public Safety and Security. 2015. Lift Inspection Criterion for Electric Elevator : ANNEX XI.
- Pantucek, P. 1977. Pressung von Seidraht unter Statischer und Dynamischer Beanspruchung. Universitat Karlsruhe.
- Rosseti, U. 1975. Nouvelle Methode D'interpretation des Resultats des Essais de Fatigue sur Cables. OIPEEC Bulletin 26. Torino.
- Woernle, R. 1934. Drahtseilforschung. Z, VDI78 52.
- Yusuf, A., and Erdem, C. 2013. "Experimental Determination of Degradation Influence on Bending over Sheave Fatigue Life of Steel Wire Ropes." Indian Journal of Engineering & Materials Sciences 20:14-20.

