

엘리베이터용 와이어로프와 CFRP UD의 벤딩 해석 비교

박성민*[†] · 신동우* · 권일준* · 유성훈** · 문완기***

Comparison between Wire Rope and CFRP UD on Bending Analysis

Sung-Min Park*[†], Dong-Woo Shin*, Il-Jun Kwon*, Sung-Hun Yoo**, Wan-Kee Moon***

ABSTRACT: With increasing population density and high-rise expansion of buildings in recent years, elevators have become to play a pivotal role in our everyday lives as most people take an elevator several times even in a day. The elevator penetration and distribution rates in Korea have increased dramatically every year, and the emergence of skyscrapers leads to accelerating the development of elevator industry. Carbon-fiber-reinforced plastics (CFRPs) exhibit better mechanical and thermal properties than steel suitable for uses as elevator wire ropes. In this paper, in order to analyze the properties of CFRPs, the tensile strength of unidirectional (UD) CFRP wire ropes was characterized and finite element analysis was conducted for bending simulation. Simulation results were compared.

초 록: 인구밀도가 증가하고 매년 고층건물의 수가 늘어나고, 대부분의 사람들이 하루에 엘리베이터를 이용하는 시간이 많아짐에 따라 일상생활 속에서 엘리베이터는 중요한 역할을 하고 있다. 매년 고층건물이 늘어남에 따라 고속·고층 승강기의 기술 요구 수준도 높아져 가고 있다. Carbon-fiber-reinforced plastics (CFRPs)는 높은 강성과 경량화 및 낮은 마찰력 등을 장점으로 하고 있으며, 엘리베이터용 wire rope에 매우 적합한 재료이다. 본 논문에서는 CFRP의 특성을 분석하기 위하여, wire rope와 CFRP UD의 인장 강도 및 수치 해석을 통한 벤딩 해석 비교를 진행하였다.

Key Words: 엘리베이터(Elevator), 복합레진(Composite resin), 탄소섬유복합재 로프(CFRP rope), 연신율(Tensile strength), 섬유강화 플라스틱(FRP), 섬유방향(Fiber orientation)

1. 서 론

엘리베이터는 20,000여개의 부품들이 유기적으로 결합하여 사람 및 화물을 수직 운송시켜 주는 기기이며 수많은 사람이 항상 이용하는 사회적 복지시설로 일상 생활 및 산업 활동에 필수적인 운송 기기이다. 최근 고층 빌딩에 대한 수요가 급증하는 한편 세계최고 수준의 엘리베이터를 개발하는 일이 필수적인 과제가 되었다. 현재까지 엘리베이터는 현수 장치의 기술적 제약으로 인해 단일 승강로 상에서 높이(양정거리) 600 m 이상의 수직 운송이 어려운 현실이

며 세계에서 가장 빠른 엘리베이터는 분속 1,080 m(초속 180 m)의 한계에 도달해 있다.

본 연구는 이러한 한계점을 극복하기 위해 기존에 사용하던 금속소재의 로프를 탄소섬유강화 복합재료(Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP)로 대체하는 것을 목표로 하고 있다. CFRP는 우수한 충격 내구성(Impact damage tolerance)과 충격에너지 흡수능(Impact energy absorption capacity)[7,8] 및 좋은 피로특성과 높은 감쇠 특성, 경량화 특성으로 인해 우주항공분야, 고급 레저 스포츠, 풍력발전, 고성능 자동차 등 일부분야에만 적용되었으나 최근 양

Received 4 November 2015, received in revised form 24 December 2015, accepted 27 December 2015

*[†]Korea Dyeing&Finishing Technology Institute, Daegu, Korea, Corresponding author (E-mail: aububa@dyetec.or.kr)

**Kyungpook National University, Daegu, Korea

***Hyundai Elevator, Seoul, Korea

산자동차에 적용되는 등 수요의 증가에 의한 원가절감으로 인해 일반산업 분야에도 폭넓게 적용되어 가고 있다.

승강기의 가장 많은 무게를 차지하는 금속로프의 경우 양정거리가 높아질수록 질량이 늘어나기 때문에 기존의 금속로프를 CFRP로 대체할 경우 승강기의 경량화뿐 아니라 구동하중이 낮아지기 때문에 승강높이와 속도를 높일 수 있을 것으로 예상된다.

하지만 CFRP를 적용한 승강기 로프는 그 사례가 많지 않기 때문에 탄소섬유의 인장강도, 수지의 강도, 피로성능 그리고 이에 대한 전산해석을 통해 CFRP 승강기 로프에 대한 안전성에 대한 검토를 연구하였다.

2. 재료 분석

2.1 원사

본 논문에서는 로프에 적용하기 위한 탄소섬유 원사는 수요자의 요구에 맞추어 각 제조사별로 사양에 맞는 후보군을 선정하여 Table 1과 같이 정리하였고, 이중 현수장지의 케이블의 특성을 고려하여, 높은 인장강도와 높은 신율, 제품의 품질의 편차를 고려하여 T700SC를 선정하였다.

원사를 기존의 와이어 로프(Wire Rope)로 제작했을 때와 압출을 통한 제품성형을 했을 때를 비교하기 위해 Fig. 1과 같이 인장실험을 진행하였고 인장시험을 바탕으로 신율과 탄성계수 등의 변화를 확인하기 위해 Fig. 2와 같이 stress-strain 그래프로 도식화하였다.

연구에 사용된 원사는 12K와 24K가 있으나 본 실험에서는 원사의 직경변화를 보다 정확히 관찰하기 위해 24K 원사를 통해 실험을 진행하였다. 실험은 원사와 원사를 1M 당 20회 꼬임을 준 것, (직경 7,000 mm × 4함) × 6개 × 12 strand로 제작한 로프를 비교 판단하였다. 위 시험을 통해 원사의 꼬임에 의해 신율과 탄성계수가 줄어듦을 확인할 수 있었으며, 물성예측이 비선형적으로 이루어 짐을 확인

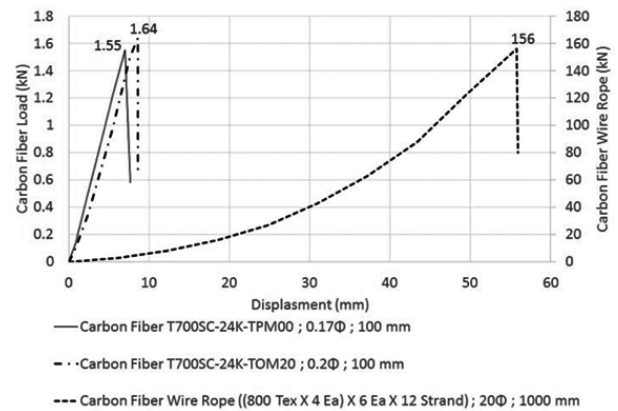


Fig. 1. Tensile strength of carbon fiber

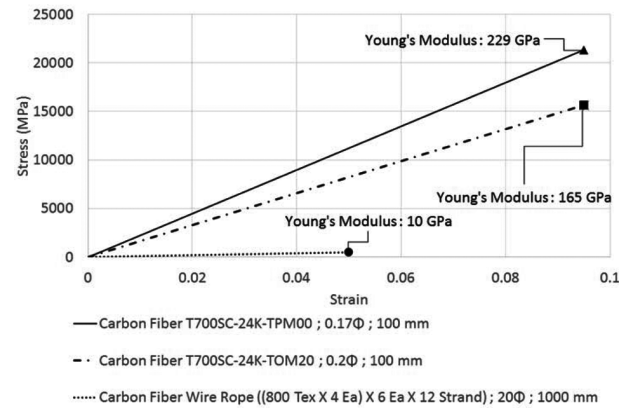


Fig. 2. Young's modulus of carbon fiber

할 수 있었다. 이러한 원인은 원사의 꼬임에 따라 원사끼리의 마찰, 접촉 등, 꼬임 장력의 변화에 의한 것으로 선형거동이 아닌 관계로 예측이 어렵다. 따라서 기존의 꼬임에 의한 로프제작 보다는 UD 복합소재의 압출이 더 효과 적인 것으로 판단되었다[9,10].

2.2 수지

압출 복합소재 구성을 위해 수지 후보군은 CFRP에 가장 많이 적용되고 있는 에폭시계와 불포화 폴리에스터계를 검토하였다. 가격과 기계적 강도는 불포화 폴리에스터 수지가 대체적으로 우수하나 경화과정에서 열수축이 심하게 발생하는 단점으로 인해 에폭시계열의 수지를 중심으로 4종의 후보군을 선정하였다.

4종의 수지를 선정하였고 수지의 강도를 높이기 위해 식 (1)에 따라 배합비를 달리하였다.

$$\text{Phr} = \text{AHEW}/\text{EEW} \times 100 \quad (1)$$

Phr: Recruitment stock

AHEW: Active hydrogen equivalent weight

EEW: Epoxy equivalent weight

Table 1. Mechanical properties of carbon fiber

	Designation	Number of filament	Tensile strength (Mpa)	Tensile modulus (Gpa)	Elongation (%)	Tex (g/1000m)	Density (g/cm³)	Structure
Torayca	T700SC-12000	12000	4900	230	2.1	800	1.8	
Torayca	T700SC-24000	24000	4900	230	2.1	1650	1.8	
Tobo	UT350-12K	12000	4900	240	2	800	1.8	
Tobo	UT350-24K	24000	5000	240	2.1	800	1.79	
MRC	TR 50S 12L	12000	4900	240	2	800	1.82	
MRC	TR 50D 12L	12000	5000	240	2.1	800	1.82	
Hyoosung	H2500 12K	12000	4900	250	2	800	1.78	
Hyoosung	H2500 24K	24000	4900	250	2	1650	1.78	
AKSA	A-49	12000	4900	240	2	800	1.79	
AKSA	A-42	24000	4900	240	2	1600	1.79	
AKSA	A-42	12000	4200	240	1.8	800	1.78	
AKSA	A-42	24000	4200	240	1.8	1600	1.78	
TaeKwang	TES-40	12000	4410	245	1.8	800	1.78	
SGL	C30 T050	50000	4000	240	1.7	3300	1.80	
Formosa	TC-35	12000	4000	240	1.6	800	1.8	

Table 2. Mixing ratio of composite resin

Single resin		Composite resin(Mix proportioning)			
Type	Equivalent weight	Epoxy (%)	DICY (%)	MCs (%)	2MI (%)
BPA-Novolac	200~220	63.88	6	30	0.120
Bisphenol-A	184~190	58.954	6.81	34.1	0.136
Bisphenol-F	170~180	55.452	7.4	37	0.148
Non-Halogen	270~300	72.91	4.5	22.5	0.090

에폭시 수지의 물성을 높이기 위해 경화제의 사용량 분석을 진행하였고, Single resin의 Type에 따라 화학당량(Equivalent weight)분석도 진행하였다. Epoxy는 왼쪽의 Single resin종류를 사용하였고, 실험에 사용된 경화제는 잠재성 경화제인 DICY(Dicyandiamine)로 상온에서 분말형으로 MCs(Methyl Cellosolve)에 용해시켜 사용하였고 반응촉진제로 2MI(2-Methylimidazole)를 이용하였다.

수지는 몰드와 Hot-Press를 통해 160°C에서 경화시키고 80°C에서 30분간 안정하였으며 KS M ISO 527-2의 규격시편으로 인장 속도는 10 mm/min로 시험을 진행하여 Fig. 3과 같은 인장실험 결과를 나타내었다.

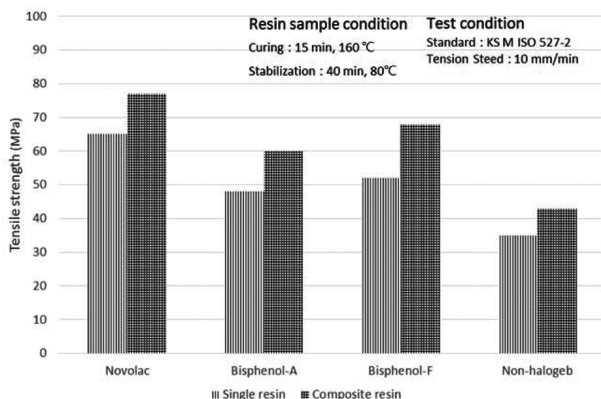
3. 전산해석

3.1 재료물성치

전산해석을 위한 재료물성은 Table 3과 같이 실험결과를 나타내었다. Fig. 3에서 스틸이 로프형태로 제작될 경우 탄

Table 3. Material property[9,10]

	Unit	CFRP UD	T700C-12K	Resin	Wire Rope 6×19PC	Steel
Cross Section	mm	2.440	0.110	104	22.40	250
Density	kg/m ³	1.5E-06	1.8E-06	1.16E-06	5.83E-06	7.85E-06
Max. Load	kN	220	0.8	3.08	252	0.0026
Gage Length	mm	1000	100	80	1000	1000
Modulus X	GPa	120	800	3.78	9	200
Modulus Y & Z	GPa	8.6	800	3.78	9	200
Poisson's Ratio X	-	0.3	0.3	0.35	0.4	0.3
Poisson's Ratio Y & Z	-	0.4	0.3	0.35	0.4	0.3
Stress Limit X	MPa	2000 (or -70)	4900	15	300	300
Stress Limit Y & Z	MPa	40	4900	15	300	300
Density	kg/m ³	1.5E-06	1.8E-06	1.16E-06	5.83E-06	7.85E-06

**Fig. 3.** Tensile strength

성계수가 많이 떨어지는 것을 확인할 수 있었으며, 복합소재는 UD 형태로 제작되었기 때문에 수지에 의한 탄성계수 감소만 일어난 것을 확인할 수 있었다. 또한 복합소재로 제작됨에 따라 방향별 물성이 다르게 나타남을 확인하였다. 본 실험값은 전산해석을 위한 물성치로 사용되었다.

3.2 전산해석 모델구성

복합소재와 와이어로프와의 전산해석 비교를 위한 모델 구성은 진행하였다. 통상적으로 복합소재의 모델구성은 큰 어려움이 없으나 와이어로프의 경우 Table 4의 Real Model과 같이 소선의 꼬임이 여러 번 발생하기 때문에 실제 모델을 구성하는데 많은 어려움이 있었다. 이러한 소선의 꼬임은 소선 간의 마찰, 접촉조건 등의 고려해야 하기 때문에 실제로 해석시간이 무한히 늘어나는 문제점이 있다. 따라서 Table 4와 같이 두 번의 간략화를 진행하였다. 첫 번째 간략화는 소선의 형상을 관재로 단순화 하였다. 봉재로 단순화 하였을 때 단면적, 극관성모멘트 등에서 매우 유사한 값을 획득할 수 있었다. 두 번째로 한번 단순화한 모델을 기반으로 다시 한번 관재로 단순화 하는 작업을 진행하였다. 단면 넓이는 어느 정도 정확한 값을 얻을 수 있었으나 극관성 모멘트값 IYY, IZZ에 대해서는 상하, 좌우의 값이 등방성이 아닌 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 원인은 원주방향으로 배치되어 있는 와이어의 간격사의 틈이 넓기 때문인 것으로 실제 와이어 로프의 단면은 등방성 모델로 가정하고 중간 값을 취하였다. 하지만 모델의 인장 등 소재의 값은 소선의 꼬임시 장력과, 횡수, 표면상태 등에 매우 많은 요건에 의해 변화됨으로 물성 값은 와이어로프의 실제 인장실험값인 Table 3의 실험값을 사용하였다.

전산해석을 위한 모델은 Fig. 4와 같이 구성되었다.

Table 4. Wire rope simple model [9,10]

	Unit	Real model	Simple model - 1	Simple model - 2
Rope	-			
Wire Cross Section	-			-
Wire Cross Section Area	mm ²	34	34	-
Wire Cross Section IYY	mm ² mm ²	103	103	-
Wire Cross Section IZZ	mm ² mm ²	103	103	-
Rope Cross Section	-			
Rope Cross Section Area	mm ²	-	202	204
Rope Cross Section IYY	mm ² mm ²	-	5415	4527
Rope Cross Section IZZ	mm ² mm ²	-	3982	4527

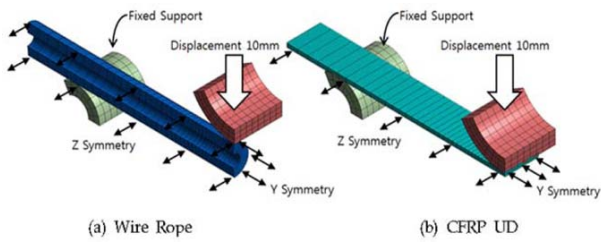


Fig. 4. Boundary condition

굽힘 해석의 경우 좌우, 전후방이 대칭이기 때문에 1/4만을 모델링하였고 경계면에는 대칭조건을 부여하였다.

전산해석의 위한 와이어 모델과 CFRP UD는 모두 Shell 요소를 적용하여 두가지 요소에 대한 비교가 가능하도록 구성하였다.

하중은 스펜(지지대의 간격)이 200 mm로 설정했으며 중간의 빔에 의해 강제변위로 10 mm 변위하는 조건으로 적용하였다.

3.3 전산해석 결과 및 분석

전산해석 결과를 von-Mises Stress를 통해 비교한 결과 Fig. 5와 같이 기존의 와이어 로프는 10 mm 변형시 소성거동이 발생하는 영역으로 넘어간 것을 확인할 수 있었으며, CFRP는 안전율이 13일 정도로 강도가 매우 높다.

강제변위를 통해 굽힘 반경을 계산한 결과와 최대응력을 Fig. 6과 같이 나타낸 결과 와이어 로프는 약 500 R의 반

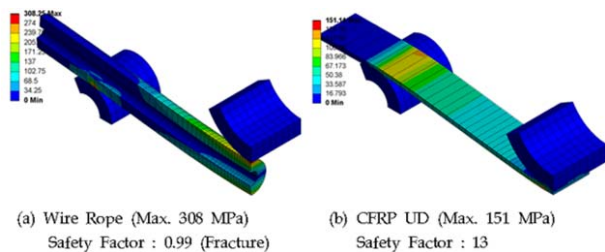


Fig. 5. von-Mises stress

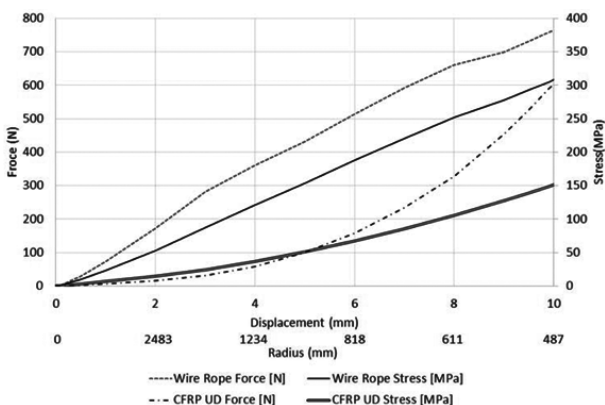


Fig. 6. von-Mises stress & radius

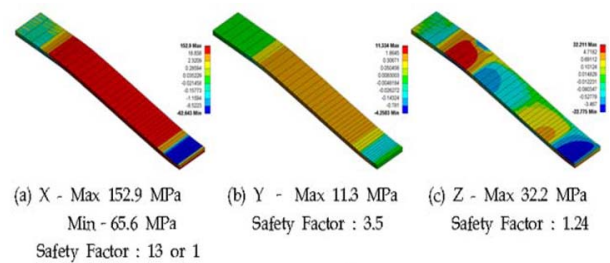


Fig. 7. Normal stress

경에 적합한 하중을 나타냈음을 확인할 수 있었으며, CFRP UD는 벤딩 반경값이 늘어날수록 하중이 비선형적으로 늘어남을 확인할 수 있기는 하였으나 와이어 로프 대비 더욱 안전한 벤딩 능력을 확인할 수 있었다.

하지만 CFRP의 특성상 인장, 압축, X, Y, Z 방향의 물성이 모두 다르기 때문에 이를 확인하기 위해 Fig. 7과 같이 X, Y, Z 방향의 Normal Stress를 확인하였다.

Fig. 7(a)의 X 방향의 Stress는 UD 방향의 응력으로 인장 응력으로는 매우 높은 안전율 (13)을 나타냈지만 롤러와의 접촉부분에서의 발생된 압축응력이 매우 높은 것으로 확인되었다. 비록 안전율이 1의 값이 나오기는 했지만 피로 성능을 고려한다면 향후 개선이 필요할 것으로 판단되며 본 해석에서는 마찰에 대한 영향을 적용하지 않았기 때문에 그 효과는 실제로 더욱 클 것으로 예상된다.

Fig. 7(b)는 소재의 두께방향으로의 응력을 나타낸 것으로 소재의 두께, 폭 방향으로의 소재의 인장, 압축이 똑같은 효과를 냄으로 압축과 인장 중 가장 높은 값을 취하여 비교하였다. 소재 두께방향으로의 응력은 비교적 안정적인 안전율 3.5의 값을 나타내었다.

Fig. 7(c)는 복합소재의 폭 방향 응력을 나타낸 것으로 안전율 1.24를 나타내기는 하였으나 피로성능을 고려한다면 좀 더 보완이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 해석을 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- CFRP UD는 기존의 와이어 로프에 비해 경량화 고강성을 획득할 수 있을 것으로 예상된다.

- 와이어 로프는 소선을 감는 하중, 횡수, 마찰특성 등 다양한 특성에 의해 물성 값이 바뀔 수 있으며 이러한 값이 모두 비선형적인 거동을 나타내기 때문에 실제 물성을 예측하는데 매우 어려우나 CFRP UD는 물성예측이 가능하고 좀더 높은 강성을 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.

- 전산해석을 통해 와이어 로프와 CFRP UD의 벤딩 물성을 비교해본 결과 CFRP가 더욱 높은 안정성과 벤딩 능력을 나타냄을 확인하였다.

- 복합소재의 방향별 물성을 확인한 결과 롤러와의 접촉

부의 압축응력, 폭 방향의 인장 등에 의해 CFRP UD의 피로파괴가 예상된다.

- 이러한 특성은 마찰조건을 적용하였을 때 더욱 크게 나타날 것으로 판단되며, 이에 따라 CFRP UD의 인장압축 피로실험, In-plane 전단 피로실험이 필요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Rhiner, M. and Heling, K., "Understanding Elevator Rope: Performance, Endurance and Longevity are Addressed in this Examination of Rope", *Elevator world*, Vol. 57, No. 4, 2009, pp. 95-101.
2. Franz, Andreas, Stahr, Konrad, "Elasticity Behavior of Elevator Ropes", *Elevator World*, Vol. 63, No. 7, 2015, pp. 86-118.
3. Molkow, M. and Scheunemann, W., "Wire Rope for Elevator Suspension", *Elevator World*, Vol. 51, No. 5, 2003, pp. 100-117.
4. Kwon, D.J., Wang, Z.J., Gu, G.Y., and Park, J.M., "Reinforcement, Thermal and Fire Retardant Improvement of Phenolic Composites by Surface Treatment of CFRP Chip", *Journal of Adhesion and Interface*, Vol. 13, No. 2, 2012.
5. Giannis, S. and Hansen, K., "Investigation on the Joining of CFRP-to-CFRP and CFRP-to-Aluminium for a Small Aircraft Structural Application", *Proceeding of the American Society for Composites Technical Conference*, Vol. 25, No. 1, 2010, pp. 333-346.
6. Herroelen, B., Brosens, K., and Van Cemert, D., "CFRP Roof Repair: A Large Scale Repair Using CFRP Laminates", *Concrete Engineering International*, Vol. 2, No. 3, 1998, pp. 55-56.
7. Kwon, J.B., Choi, J.Y., and Huh, H., "Evaluation and Prediction of Tensile Properties of CFRP Considering Strain Rate Effect", *The Korea Society of Automotive Engineers*, Vol. 2, No. 5, 2013.
8. Kang, M.S., Park, H.S., Koo, J.M., and Seok, C.S., "Prediction of the Fracture Strength of CFRP Laminates according to Fiber Orientation", *The Korea Society of Mechanical Engineers*, No. 10, 2011, pp. 184-189.
9. Kim, S.H., *A Study on the Evaluation of Structure Integrity Considering Fatigue for Wire Rope*, Ph.D Thesis, Yeungnam University, Korea, 2014.
10. <http://www.wire74.com>, Tension capacity, 2015.11.03