

달비계용 PP섬유로프의 야외노출에 따른 인장강도 변화 분석

강 성 윤* · 정 기 효*

*울산대학교 산업경영공학과

Analysis of Tensile Strength Changes by Outdoor Exposure of Scaffolding PP Fiber Rope

Sung-Yun Kang* · Kihyo Jung*

*Department of Industrial Engineering, University of Ulsan

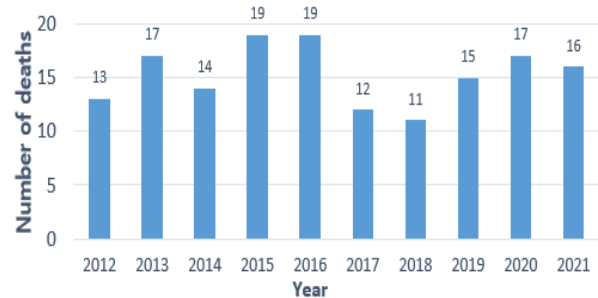
Abstract

The use of hanging scaffolding for exterior wall painting and cleaning in building construction and maintenance carries the inherent risk of fall accidents. While periodic rope replacement is crucial for preventing accidents resulting from rope breakage, current regulations lack specificity in determining appropriate disposal period for fiber ropes. This study analyzed the tensile strength of the most commonly used PP fiber ropes with different diameters (16 mm, 20 mm) in the domestic construction industry. Additionally, the effect of outdoor exposure was examined by measuring the tensile strength of new ropes and ropes exposing to outdoor conditions for 30 days and 90 days. The results showed that the new ropes and those exposed to outdoor for 30 days met the KS (Korean Standards) criteria for tensile strength. However, a significant decrease in tensile strength was observed in ropes exposed to outdoor for 90 days compared to both the new ropes and those exposed for 30 days. Furthermore, the ropes exposed for 90 days did not meet the KS criteria. These findings indicate the degradation of PP fiber ropes due to UV (Ultra Violet) radiation, highlighting the importance of considering this factor when determining the replacement period for fiber ropes used in scaffolding work.

Keywords : Scaffolding work, Fiber rope, Tensile test, Polypropylene, UV deterioration

1. 서론

2022년 국내 건설업 사고사망자의 53%가 떨어짐에 의해 발생하였다. 특히, 고층 건물의 외벽도장 및 청소작업에 주로 사용되는 달비계는 고정부분에 밧줄을 매달고 내려오는 작업 특성으로 추락에 의한 사고 발생 위험이 높다[7, 9, 12]. 달비계에 의한 사고를 예방하기 위한 다양한 노력에도 불구하고 사고사망 재해가 Figure 1과 같이 지속적으로 발생하고 있다. 최근 10년(2012년~2021년) 간 달비계 사고사망자는 153명이며, 이러한 통계는 연평균 15명의 사고사망자가 발생하고 있음을 시사하고 있다 [1].



[Figure 1] Number of deaths from scaffolding accidents

달비계 관련 사고사망 재해의 주요 원인은 Table 1에 나타난 것과 같이 작업로프 풀림(34.6%), 불안정한 행동(24.8%), 작업로프 끊어짐(22.2%), 고정점 결손(11.8%)

†이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1A2C1003282)

†Corresponding Author : Kihyo Jung, Department of Industrial Engineering, University of Ulsan, 93, Daehak-ro, Nam-gu, Ulsan, E-mail: kjung@ulsan.ac.kr

Received July 17, 2023; Revision September 18, 2023; Accepted September 18, 2023

으로 보고되고 있다. 이들 중에서 작업로프 끊어짐과 관련된 사고에 사용된 로프는 Table 2.a에 나타난 것과 같이 PP소재가 32건(94.1%)으로 대부분을 차지하고 있다. 또한, 작업로프 끊어짐에 대한 원인은 Table 2.b와 같이 노후 22건(64.7%)과 마모 9건(26.5%)이 대부분을 차지하고 있다.

<Table 1> Main causes of deaths by scaffolding accidents

Causes	Number of fatalities	Percent (%)
Rope loosening	53	34.6
Unsafe act	38	24.8
Rope breakage	34	22.2
Anchor point failure	18	11.8
Insufficient rope length	4	2.6

<Table 2> Material and causes of rope breakage accidents

(a) Number of cases by rope material

Material	Number of cases	Percent (%)
Polypropylene	32	94.1%
Manila	1	2.9%
Not confirmed	1	2.9%

(b) Number of cases by accident cause

Causes	Number of cases	Percent (%)
Aging	22	64.7%
Abrasion	9	26.5%
Fire	2	5.9%
Not confirmed	1	2.9%

달비계 작업 중 로프 끊어짐에 의한 재해는 대부분이 로프의 노후 및 마찰 때문에 발생한다[4, 8]. 특히 중소형 현장에서는 로프 관련 관리기준은 별도로 존재하고 있지 않아 교체 주기가 도래하더라도 작업자들은 달비계 작업용 로프와 작업대의 로프를 주기적으로 교체를 하지 않는다[2-6]. 따라서 다른 원인에 비해 사고 예방 대책을 명확하게 제시할 수 있다. 예를 들면, 주기적인 로프 교체와 로프 보호대 착용으로 로프 끊어짐에 대한 재해를 대부분 예방할 수 있다. 그로 인해, 국외(OSHA, HSE) 및 국내(산업안전보건기준에 관한 규칙) 기준에는 끊어지거나 꼬임이 심하게 손상된 섬유로프의 사용을 금지하고 있다[17-18]. 그러나 육안으로 확인되는 손상이 없더라도 섬유로프의 성능이 저하될 수 있어 섬유로프의 점검 및 관리 주기를 정하여 관리하도록 규정하고 있으며, 작업 전 확인이 필요하다[15-16].

본 연구는 야외노출 기간에 따른 달비계 작업용 PP소재 섬유로프(이하, 섬유로프)의 인장강도 저하 정도를 시험을 통해 분석하였다. 이를 위해 본 연구는 달비계 작업에 가장 많이 사용되는 두 가지 직경의 섬유로프에 대해 야외노출 기간을 변화시켜 섬유로프의 강도 변화를 인장 실험을 통해 측정하였다. 또한, 파단된 섬유로프 분석을 통해 파단의 발생 원인을 파악하였다. 본 연구의 시험 결과는 달비계 작업의 안전성을 확보하기 위한 섬유로프 안전관리 방안을 수립하는 데에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

2. 인장강도 실험 방법

2.1 실험 계획

본 연구의 실험은 삼원배치법으로 설계되었다. 독립변수는 섬유로프 제품(4수준: A제품, B제품, C제품, D제품), 섬유로프 직경(2수준: 16 mm (수직구멍줄), 20 mm (주로프)), 그리고 야외노출 기간(3수준: 신품, 30일 노출, 90일 노출)이다. 실험에는 건설 현장에서 달비계 작업에 가장 많이 사용하고 있는 두 가지 직경의 4개 제조사 제품을 사용하였다. 야외노출 기간은 자외선 노출에 따른 인장 강도의 저하 추세를 분석할 수 있도록 신품, 30일 노출, 90일 노출로 설정되었다. 본 연구는 실험 조건 조합(총 24 조건 = 제품 4 조건 × 직경 2 조건 × 노출 기간 3 조건)에 대해 5개의 섬유로프(5회 반복)를 실험하였다.

야외노출은 Figure 2와 같이 작업 현장의 상황을 고려하여 보통의 대기 환경에서 진행되었다. 또한, 인장 시험을 하기 전에 KS K ISO 139에 규정된 상태(20°C, 상대습도 65.0%)에 적어도 48시간 동안 시험편을 방치하였다. 로프의 기준 장력과 최소 절단 강도의 50% 사이에서 3회 반복하중(cyclic load)을 가한 후 등속 인장 시험을 진행하였으며, 시험 속도는 250 ± 50 mm/min으로 설정되었다[14].



[Figure 2] Fiber rope outdoor exposure

2.2 통계 분석 방법

본 연구의 통계 분석은 Minitab (v17, USA)에서 유의 수준 0.05를 적용하여 이루어졌다. 섬유로프의 인장강도가 KS 기준을 충족하는지 여부는 단일 표본 *t* 검정을 통해 분석되었다. 그리고 섬유로프의 인장강도가 제조사의 공시 인장강도와 같은지에 대해서는 대응 표본 *t* 검정이 사용되었다. 마지막으로, 섬유로프 직경과 야외노출 기간에 따른 인장강도의 변화는 이원분산분석(독립변수: 섬유로프 직경, 야외노출 기간)을 적용하여 분석되었다.

3. 실험 결과

3.1 인장 강도

3.1.1 신제품

신제품의 인장강도는 KS 기준을 통계적으로 충족하는 것으로 분석되었다(직경 16 mm: $t(19) = 15.01, p < 0.001$, 직경 20 mm: $t(19) = 16.58, p < 0.001$). 직경 16 mm 섬유로프의 평균 인장강도는 Table 3에 나타낸 것과 같이 33.87 kN으로 KS 기준인 24.2 kN을 초과하는 것으로 나타났다. 또한, 직경 20 mm 섬유로프의 평균 인장강도는 48.61 kN으로 KS 기준인 36.6 kN을 충족하는 것으로 파악되었다. 한편, 제조사별 16 mm 섬유로프의 인장강도 최솟값은 A 제품 34.3kN, B 제품 31.1kN, C 제품 29.4kN, D제품 34.5kN으로 나타나 KS 기준을 초과하였다. 또한, 20 mm 섬유로프의 인장강도 최솟값은 A제품 52.3kN, B제품 45.1kN, C제품 48.4kN, D제품 44.5kN으로 KS 기준을 충족하였다.

<Table 3> Tensile strength (kN) of new fiber ropes

Product	Diameter (mm)	Tensile strength (SD)				
		New	30 day	90 day	Mark	KS
A	16	35.8 (0.96)	33.5 (3.14)	21.9 (1.12)	37.2	24.2
	20	53.4 (0.82)	51.9 (0.75)	36.4 (2.29)	54.9	36.6
B	16	32.7 (1.25)	33.4 (0.85)	20.6 (0.54)	36.9	24.2
	20	46.7 (0.98)	45.3 (1.18)	33.3 (1.30)	56.8	36.6
C	16	30.4 (0.56)	28.7 (1.01)	19.4 (0.54)	32.3	24.2
	20	49.1 (0.62)	46.6 (0.75)	32.4 (1.32)	48.5	36.6

Product	Diameter (mm)	Tensile strength (SD)				
		New	30 day	90 day	Mark	KS
D	16	36.6 (2.33)	36.2 (1.49)	19.8 (0.99)	30.4	24.2
	20	45.3 (0.50)	46.0 (1.79)	29.0 (0.94)	45.1	36.6

섬유로프의 인장강도는 제품 제조사의 공시 강도보다 유의하게 낮은 것으로 나타났다($t(38) = -2.15, p = 0.038$). 섬유로프의 평균 인장강도와 제조사의 공시 인장강도는 평균 -1.527 kN (SD = 4.496) 차이가 있었다. 그리고 섬유로프의 인장강도는 A제품을 제외하고 KS 규격에 명시된 허용오차범위(±5%)를 벗어나는 것으로 나타났다. 예를 들면, B사의 16 mm 섬유로프(32.7 kN)는 공시 인장강도(36.9 kN)보다 -4.2 kN 작았으며, 이는 11.38%의 허용오차에 해당한다.

3.1.2 노광 30일

노광 30일 노출된 섬유로프의 인장강도는 KS 기준을 통계적으로 충족하는 것으로 분석되었다(직경 16 mm: $t(19) = 12.08, p < 0.001$, 직경 20 mm: $t(19) = 16.66, p < 0.001$). 직경 16 mm 섬유로프의 평균 인장강도는 32.95 kN으로 KS 기준인 24.2 kN을 충족하였다. 또한, 직경 20 mm 섬유로프의 평균 인장강도는 47.45 kN으로 KS 기준인 36.6 kN을 초과하였다. 한편, 제조사별 16 mm 섬유로프의 인장강도 최솟값은 A 제품 28 kN, B 제품 32.2 kN, C 제품 27.6 kN, D제품 34.1 kN으로 나타나 KS 기준을 모두 충족했다. 또한, 20 mm 섬유로프의 인장강도 최솟값은 A제품 50.8 kN, B제품 43.7 kN, C제품 45.5 kN, D제품 43.4 kN으로 KS 기준을 충족하였다.

3.1.3 노광 90일

노광 90일 섬유로프의 인장강도는 KS 기준을 통계적으로 충족하지 못하는 것으로 파악되었다(직경 16 mm: $t(19) = -5.58, p < 0.001$, 직경 20 mm: $t(19) = -13.72, p < 0.001$). 직경 16 mm 섬유로프의 인장강도는 평균 20.43 kN으로 KS 기준인 24.2 kN을 충족하지 못했다. 또한, 직경 20 mm 섬유로프의 인장강도는 평균 32.77 kN으로 KS 기준인 36.6 kN에 미달하였다. 한편, 제조사별 16 mm 섬유로프의 인장강도 최솟값은 A 제품 20.6 kN, B 제품 19.8 kN, C 제품 18.8 kN, D제품 18.8 kN으로 나타나 KS 기준에 모두 미달하였다. 또한, 20 mm 섬유로프의 인장강도 최솟값은 A제품 33.7 kN, B제

품 31.3 kN, C제품 30.1 kN, D제품 27.4 kN으로 KS 기준에 모두 미달하는 것으로 나타났다.

3.1.4 비교 분석

인장강도는 야외노출 기간에 따라 통계적으로 유의한 차이가 있는 것을 분석되었다($F(2, 114) = 328.94, p < 0.001$). 사후 분석 결과, 신제품(평균 41.24 kN)과 30일 야외노출 제품(평균 40.195 kN)의 인장강도는 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 반면, 90일 야외노출 제품(평균 26.598 kN)은 신제품 및 30일 야외노출 제품보다 유의하게 인장강도가 저하되는 것으로 파악되었다. Table 4를 예로 들면, 16 mm 신제품 A는 인장강도가 평균 35.8 kN이나, 야외 90일 노출 제품은 21.9 kN으로 -38.8% 인장강도가 저하되는 것으로 나타났다.

3.2 파단 특성

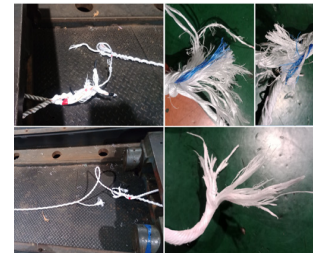
신제품 및 야외 30일 노출 섬유로프의 파단은 Figure 3.a에 나타난 것과 같이 매듭 부위에서 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 경향성은 기존 연구의 유한요소 해석 및 실험 결과[1]에서 파악된 것과 같이 인장 시 매듭 부위에 응력이 집중되어 파단이 가장 먼저 발생하는 것으로 해석할 수 있다[2]. 그러나 노광 90일 노출 섬유로프의 파단은 Figure 3.b와 같이 로프 중앙에서 발생하는 것으로 나타났다. 이는 신제품 및 야외 30일 노출 제품과 다른 특징을 보여주는 것으로 섬유로프의 강도가 약해져서 인장 시 로프 중앙에서 가장 먼저 파단이 발생하는 것으로 해석된다.

<Table 4> Comparison of tensile strength between new ropes and ropes exposed for 90 days to outdoor

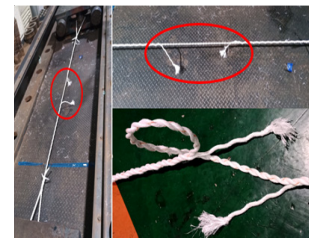
Product	Diameter (mm)	Classification	Tensile strength (kN)
A	16	New rope	35.8
		90 days*	21.9
		Decrease (%)	-38.8
	20	New rope	53.4
		90 days	36.4
		Decrease (%)	-31.8
B	16	New rope	32.7
		90 days	20.6
		Decrease (%)	-37.0
	20	New rope	46.7
		90 days	33.3
		Decrease (%)	-28.7

Product	Diameter (mm)	Classification	Tensile strength (kN)
C	16	New rope	30.4
		90 days	19.4
		Decrease (%)	-36.2
	20	New rope	49.1
		90 days	32.4
		Decrease (%)	-34.0
D	16	New rope	36.6
		90 days	19.8
		Decrease (%)	-45.9
	20	New rope	45.3
		90 days	29.0
		Decrease (%)	-36.0

* Fiber rope exposed for 90 days to outdoor



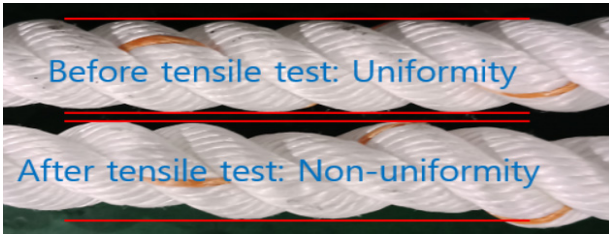
(a) New rope



(b) Rope exposed for 90 days to outdoor

[Figure 3] Failure characteristics of fiber rope after tensile strength test

인장 실험에서 2가지 파단 특성이 관찰되었다. 첫째, 섬유로프 인장 시험 후 로프의 표면은 시험 전에 균일한 꼬임을 보이지만, 인장 실험 후에는 Figure 4와 같이 꼬임이 불균일하게 됨이 확인되었다. 둘째, PP소재의 섬유로프는 자외선에 의해 영향을 받는 것이 실험을 통해 검증되었다. 신제품과 야외 30일 노출 섬유로프는 인장강도에 통계적인 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 야외 90일 노출 섬유로프는 유의하게 인장강도가 저하되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 자외선에 의해 섬유로프가 영향을 받고, 그 영향은 자외선에 일정 기간 노출되어야 가지적으로 나타난다고 해석될 수 있다.



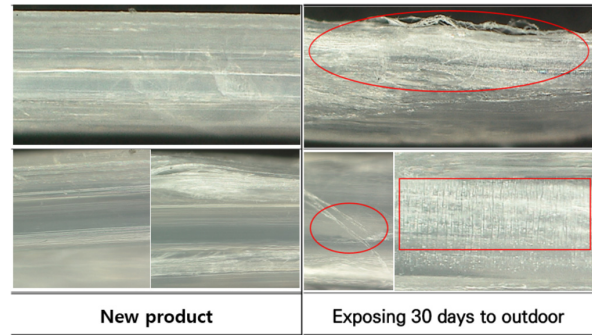
[Figure 4] Changes of fiber rope in surface uniformity after tensile strength test

4. 토의 및 결론

고층에 매달려 작업하는 달비계 작업은 추락 위험에 항상 노출되어 있고, 추락사고는 대부분 중대재해로 이어질 수 있어 안전에 특히 신경을 써야 한다[12]. 그러나 사고 예방을 위한 노력에도 불구하고 달비계 작업으로 인해 연평균 15명의 사고사망자가 발생하고 있다. 달비계 관련 재해 중에서 모서리와 로프의 마찰 또는 로프의 노후 등으로 인한 로프 끊어짐에 의한 사고사망자가 전체 사고사망자의 22.2%에 이른다. 달비계 작업에서 가장 많이 쓰이는 PP섬유로프는 재질 특성상 자외선에 취약하다. PP섬유로프가 자외선에 취약하다는 특성은 이미 여러 논문을 통해 알려져 있으나[10, 11], 자외선 노출에 따라 얼마나 로프가 취약해지는가에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구는 자외선이 가장 강한 하절기(6월 ~ 8월)를 포함한 기간에 로프를 야외에 노출하여 어느 정도 인장 강도가 감소되는지 실험적으로 규명하였다.

신품과 야외 30일 노출 섬유로프는 KS 기준을 충족하는 것으로 나타났다. 그러나 야외 90일 노출 섬유로프는 신품 및 야외 30일 노출 섬유로프보다 현저한 인장 강도의 저하 현상이 있는 것으로 분석되었다. 또한, 야외 90일 노출 섬유로프는 KS 기준을 충족하지 못하는 것으로 파악되었다. 이러한 결과는 자외선에 의해 PP 재질의 섬유로프가 열화됨을 시사하고 있다.

본 연구는 인장 시험 전후에 섬유로프의 소선을 현미경(3D Digital microscope, Hirox)을 통해 확인하였다. 본 연구의 인장 시험 결과에 따르면, 야외 30일 노출 섬유로프는 신품과 거의 유사한 인장 강도를 보였다. 그러나 야외 30일 노출 섬유로프는 섬유 소선에 상태 변화가 있었던 것으로 확인되었다. 신품과 야외 30일 노출된 섬유로프의 소선을 촬영한 Figure 5를 예로 들면, 야외 30일 노출 섬유로프는 소선 표면에 경화로 인한 주름 및 갈라짐 현상이 있었다.



[Figure 5] Comparison of fiber filaments for new and rope exposed for 30 days to outdoor

본 연구의 결과를 일반화하기 위해서는 2가지 후속 연구가 필요하다. 첫째, 본 연구는 자외선 지수가 가장 높은 여름(6월 ~ 8월)을 포함하는 기간에 이루어졌다. 따라서 본 연구의 결과를 우리나라의 4계절 기후에 일반화하기 위해서는 다른 계절에 대한 후속연구가 필요하다. 둘째, 본 연구는 자외선에 약한 PP섬유로프에 대해 야외노출 기간에 따른 인장강도 저하를 시험을 통해 파악하였다. 연구 결과에 따르면, 섬유로프를 야외에 90일 노출하면 인장강도가 KS 기준을 충족하지 못하는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구는 실제 달비계 작업에 사용 중인 섬유로프를 대상으로 하지 않았다. 따라서 달비계 작업의 안전성 확보를 위해 섬유로프 사용기간을 결정할 때는 실제 달비계 작업에 사용된 기간을 고려한 섬유로프의 인장 강도 변화를 확인하는 후속연구가 필요하다.

5. References

- [1] S. Y. Kang(2023), A study on improving the use safety of synthetic fiber rope for scaffolding work. Occupational Safety and Health Research Institute (OSHRI) Technical Report.
- [2] W. R. Park(2022), "Analysis and experimental study of strength change according to fixed knot method of fiber rope for high altitude work." Journal of the Korea Society of Safety, 37(3):1-8.
- [3] J. S. Oh(2021), "A comparative study on act of developed countries for the prevention of fall accidents in domestic construction site." Unpublished doctoral dissertation, University of Ulsan.
- [4] S. S. Yoo, S. Y. Kim(2021), A study of the improvement of the hanging-scaffolding working safety. Occupational Safety and Health Research Institute (OSHRI) Technical Report.

- [5] S. C. Jeong(2019), "Analysing disaster cases on contraction sites to prevent falling disaster of hangings scaffolding." Korea Journal of Construction Engineering and Management. 20(6):66-73.
- [6] D. H. Choi(2019), "Case study for preventing construction site fall accidents." Korea Journal of Construction Engineering and Management, 20(6): 81-88.
- [7] H. C. Lim(2019), "A study on the accident reduction method through survey of hanging scaffolding use in building construction." Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 20(9): 121-126.
- [8] S. J. Lee(2017), "A study on creep effect of synthetic fiber rope mooring system on motion response of vessel and tension of mooring line." Journal of Society of Naval Architects of Korea, 54(2): 151-160.
- [9] S. C. Jeong(2016), "A study on the accident prevention survey and improvement of the horse scaffolding in the construction site." Journal of Korea Safety Management & Science, 18(2):37-46.
- [10] V. Pinto(2015), "Creep and stress relaxation behaviour of PLA-PCL fiber-Alinear modelling approach." Procedia Engineering, 114:768-775.
- [11] J. H. Lee(2015), "A study on the effect of accelerated UV exposure on the polymer membrane for outdoor user." Journal of the Korea Society of Industrial and Engineering Chemistry, 26(3):326-330.
- [12] W. C. Shin(2014), "A study on the causal analysis of death accidents by the falls in the construction site." Journal of Korea Safety Management & Science, 16(4):63-69.
- [13] J. Y. Kim(2007), "Prediction model of mechanical properties in rope and braid using computer simulation." Journal of the Korea Fiber Society, 40(2):529-530.
- [14] ISO(2013), ISO 13934-1:2013(E) textiles-tensile properties of fabrics.
- [15] Cordage Institute(2004), CI 2001-04 fiber rope inspection and retirement criteria.
- [16] Cordage Institute(2019), CI 1401-19 recommended safety practices for use of fiber rope.
- [17] HSE(2001), Industrial rope access-Investigation into items of personal protection equipment.
- [18] OSHA(2001), 29 CFR Part 1926-Safety and health regulations for construction.

저자 소개



강성윤

충남대학교 기계공학 석사 취득.
현재 울산대학교 대학원 산업경영공학과 박사 과정 중.
관심분야: 산업안전, 스마트 팩토리 안전분야, 유해·위험기계기구 방호장치 등



정기효

포항공과대학교 산업경영공학과 박사 취득.
현재 울산대학교 산업경영공학부 교수 재직 중.
관심분야: 인간공학, 산업안전보건, 데이터 분석