

조경시공 · 관리에서 사다리 안전사고 예방을 위한 전도 안정성 평가

- 국내에서 사용되고 있는 삼각지지형 이동식 사다리를 대상으로 -

Evaluation of Overturning Stability for Preventing Safety Accidents Caused by Ladder Work in Landscape Construction and Management

- For the Tripod Support Portable Ladders Used in Korea -

김은일*, 권윤구**, 이기열**

*전남대학교 조경학과 교수, **전남대학교 조경학과 부교수

Kim, Eun-Il*, Kwon, Yoon-Ku**, Lee, Gi-Yeol**

*Professor, Dept. of Landscape Architecture, Chonnam National University

**Associate Professor, Dept. of Landscape Architecture, Chonnam National University

Received: July 31, 2023

Revised: August 14, 2023

Accepted: August 25, 2023

3인인명 심사필

Corresponding author :

Gi-Yeol Lee

Associate Professor,

Dept. of Landscape Architecture,

Chonnam National University,

Gwangju 61186, Korea

Tel.: +82-62-530-2108

E-mail: gylee@jnu.ac.kr

국문초록

본 연구는 조경시공 및 관리분야에서 수목관리, 전지 등과 같은 고소부위 작업을 위해 주로 사용하는 삼각지지형 이동식 사다리의 전도 안정성을 평가한 것이다. 산업현장에서 사용 빈도가 높은 이동식 사다리에 포함되는 삼각지지형 이동식 사다리는 작업 특성에 따라 바닥지지 형태가 일반적인 A형의 사면지지가 아닌 삼각지지 방식이고, 작업 높이도 이동식 사다리와 비교하여 2배 이상 높기 때문에 떨어짐과 함께 작업자의 안전을 위협하는 전도 발생 가능성이 매우 높다고 할 수 있다. 따라서, 국내에서 사용되고 있는 삼각지지형 이동식 사다리를 대상으로 관련 기준인 ANSI-ASC A14.7과 EN 131-Part 7에서 규정하고 있는 전도 안정성 평가를 기반으로 하여 작업 높이에 따른 전도모멘트와 저항모멘트를 계산할 수 있는 수식을 각각 유도하여 계산한 후, 이 값을 상호 비교하여 전도에 대한 안전을 및 전도 방향에 따른 안정성을 평가하였다. 각 기준에 따른 전도 안정성 평가 결과, EN 131-Part 7의 규정을 적용하면 후면방향 8단과 측면방향으로 6단 이상의 삼각지지형 이동식 사다리는 전도에 대해서 불안정한 것으로 평가되었으나, ANSI-ASC A14.7의 규정에 의하면 방향에 상관없이 모든 단수에서 전도에 대한 안정성을 확보하고 있는 것으로 평가되었다.

주제어: 안전율, 전도모멘트, 저항모멘트, 전지작업, 추락사고

ABSTRACT

This study evaluated the overturning stability of portable tripod ladders used for high-altitude work such as tree management and pruning work in landscaping construction and management. Portable tripod ladders, which are included in general mobile or portable ladders frequently used in industrial sites, are supported in a triangular support structure, not a 4-point support like common A-type Ladders. In addition, since the working height is more than twice that of a mobile or portable ladder, the possibility of an overturning accident that threatens the safety of workers with a fall accident is high. Therefore, based on the overturning stability test specified in ANSI-ASC A14.7 and EN 131-Part 7, which are related standards for about 130 types of portable tripod ladders sold and used in Korea. An equation to calculate each moment according to working height was derived. Then, each calculated moment was compared to evaluate the safety factor for overturning and stability. As a result of the overturning stability evaluation according to each standard, when the provisions of EN 131-Part 7 were applied, portable tripod ladders with 8 steps in the rear direction and 6 steps or more in the side direction were evaluated as unstable against overturning, but according to ANSI-ASC A14.7 regulations. It was evaluated that the stability against overturning was secured in all directions and number of steps.

Keywords: Safety Factor, Overturning Moment, Resistance Moment, Pruning Work, Fall Accident

1. 서론

1.1 연구 배경과 목적

조경사공 및 관리분야에서 고소부위 작업에 주로 사용하는 삼각지지형 이동식 사다리(이하 삼각지지형 이동식 사다리)를 포함한 이동식 사다리는 작업자의 인력에 의해 휴대 및 운반이 가능하고, 산업안전보건법의 산업안전보건기준에 관한 규칙 제24조 규정에 따라 작업 위치로의 이동을 위한 승·하강 통로의 기능을 주 목적으로 한다(고용노동부, 2022). 이와 함께 이 규정에 의하면 사용이 금지되어 있으나 고소 부위 작업에 따른 발디딤을 위한 발판(상부작업대)과 같은 부가적인 기능도 있다. 이와 같은 목적으로 이동식 사다리를 사용하는 작업현장에서는 사다리의 전도나 미끄러짐에 의한 추락재해가 가장 많이 발생하며, 이 외에도 사다리를 구성하는 디딤대와 같은 부재의 파손에 따른 재해도 발생하고 있다. 조경공사를 포함하여 사다리를 주로 사용하는 건설업, 제조업 및 서비스업에서 2022년 발생한 사망재해 분석 결과에 따르면, 전체 사고사망자 736명 중에서 사다리를 기인물로 하는 재해 사망자의 약 42%에 해당하는 368명이 떨어짐에 의한 것으로 나타났다(안전보건공단, 2023). 이와 같은 이동식 사다리에서의 추락재해를 예방하기 위하여 2019년 3월 고용노동부에서는 조경용 사다리(삼각지지형 이동식 사다리)를 포함하는 ‘이동식 사다리 안전작업지침 개선방안’을 공고하였다(고용노동부, 2019). 그러나, 이 방안은 현행 법규의 규정에 대한 구체적인 적용과 이에 따른 감독을 강화하였으나, 실제 산업현장에서 이뤄지는 사다리 작업을 적절히 반영하지 못하고 단순히 규제만을 위한 실효성이 부족한 대책으로 평가되고 있다(황종문과 신성우, 2020). 이에 따라 이동식 사다리를 이용하는 현장의 실제적인 작업 환경과 조건들을 종합적으로 반영한 대책의 보완이 요구되는 실정이다.

수목, 원예 및 과수에 주로 사용되는 삼각지지형 이동식 사다리는 일반적인 이동식 사다리를 대표하는 LS사다리와 비교하여 작업높이가 높고, 펼침 형태도 A형이 아닌 삼각(tripod)이므로 사다리의 높이와 바닥 면 지지길이에 의해 결정되는 전도 위험성이 커지므로 사다리 작업의 안전성이 상대적으로 취약하다고 할 수 있다. 특히, 10단 이내를 주로 사용하는 LS사다리와 비교하여 국내에서 조경사공 및 관리용으로 판매 및 이용되고 있는 삼각지지형 이동식 사다리는 최대 26단까지로서 작업높이가 2배 이상 높고, 삼각지지형 사다리 구조 및 작업 특성에 따라 LS사다리에 적용하고 있는 전도방지대(outtrigger)의 설치가 용이하지 못하므로 전도의 위험성이 더욱 높다고 할 수 있다. 이와 같은 조경사공 및 관리분야에서 주로 사용하고 있는 삼각지지형 이동식 사다리 작업의 위험성에도 불구하고 사다리의 구조, 전도 안정성 및 작업 위험요인 분석 등과 관련된 연구는 없는 실정이며, 건설업이나 제조업 분야를 중심으로 이동식 사다리와 관련된 작업 위험요인 분석(황종문과 신성우, 2021)과 추락재해 예방대책(황종문과 신성우, 2020), 안전작업기준 및 안전모델(김형석 등, 2009; 최승주와 정기효, 2021; 민승남과 이경선, 2022)과 관련된 연구가 주로 진행되었다.

이상과 같이 이동식 사다리 작업에 따른 높은 사고사망률과 삼각지지형 이동식 사다리의 구조 및 작업환경에 따른 전도 불안정성에 대하여 관련 기준의 규정에 의한 체계적인 검토가 필요하다고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 삼각지지형 이동식 사다리를 포함하는 이동식 사다리 관련 기준의 전도 안정성 평가에 대한 규정을 이용하여 국내에서 조경사공 및 관리를 목적으로 판매 또는 이용되고 있는 모든 높이(단수)의 삼각지지형 이동식 사다리에 대한 전도 및 저항모멘트 계산 식을 각각 유도하고, 이 식에 의한 계산 결과로부터 삼각지지형 이동식 사다리의 전도 안정성 평가 방법의 도출과 적용을 목적으로 한다.

1.2 연구 방법

본 연구의 목적인 조경사공 및 관리분야에서 사용하는 삼각지지형 이동식 사다리의 전도 안정성 평가를 위해서는 관련 기준의 규정에 따라 사다리에 작용하는 하중과 제원에 의한 전도 및 저항모멘트를 각각 계산하여야 한다. 그러나, 삼각지지형 이동식 사다리가 포함된 이동식 사다리의 전도 안정성 평가를 규정하고 있는 국내 기준이 없는 실정이므로, 본 연구에서는 국제적으로 통용되고 있는 대표적인 국외 기준인 유럽연합의 EN 131-Part 7(2013)과 미국의 ANSI-ASC A14.7(2012)에서 규정하는 전도 안정성 평가 방법을 이용하였다. 이들 기준에서는 이동식 사다리에서 전도가 발생할 수 있는 방향에 따라 전면(front)과 후면(rear) 및 측면(side)으로 각각 구분하고, 방향에 따라 규정된 기준 하중의 크기와 위치 및 높이를 이용하여 전도모멘트(overturning moment)와 저항모멘트(resistance moment)를 각각 계산하여 이동식 사다리의 전도 안정성을 평가하도록 규정하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 삼각지지형 이동식 사다리의 디딤대 단수에 따라 작업자의 경사작업에 의해 유발되거나 풍하중 등 외부 환경요인에 의해 이동식 사다리에 작용하는 수평하중(horizontal load)과 사다리의 높이를 이용한 전도모멘트, 사다리 무게에 의

한 자중(self weight) 및 작업하중(working load)에 의한 수직하중과 사다리가 지지되는 하부 폭 또는 깊이에 따른 방향별 저항모멘트를 각각 계산하였다. 그리고, 이 계산 결과를 이용하여 디딤대 단수에 따른 전도모멘트와 저항모멘트의 비교를 실시한 후, 삼각지지형 이동식 사다리의 전도 안정성 및 안전율(safety factor)을 평가하였다(그림 1 참조).

2. 삼각지지형 이동식 사다리 현황 및 관련 기준 분석

2.1 삼각지지형 이동식 사다리 현황

현재 조정사공 및 관리를 목적으로 국내에서 판매 또는 사용 중인 그림 2(a)와 같은 제원의 일반적인 삼각지지형 이동식 사다리는 국내 B사, P사, S사, Y사 등 사다리 전문업체에서 제조하거나 외국에서 수입한 제품 등 약 130종이 온라인(www.ydladder.co.kr; www.syladder.com; www.seoulladder.co.kr; www.sadarishop.com; www.ladder-shop.com)과 오프라인을 통해 판매 및 현장에서 사용되고 있다. 이들 삼각지지형 이동식 사다리의 디딤대 단수와 전도 안정성에 영향을 주는 변수들인 작업 최대높이, 무게, 폭 및 깊이와의 관계를 선형 회귀분석 결과와 함께 그림 2(b)~(e)에 각각 정리하였다. 그림 2(b)에 정리한 사다리 최대높이와의 관계는 그림 2(a)에 보인 디딤대 간격을 그대로 유지하여 단수에 따라 오차가 거의 없이 0.3m씩 비례하여 증가함을 확인할 수 있다. 그러나, 그림 2(c)에 정리한 사다리 무게는 높이와 다르게 약 10단 이상부터 단수에 따라 차이가 발생하였다. 이러한 이유는 단수가 증가함에 따라 전도 안정성을 확보하기 위해서 무게를 증가시킨 사다리가 있는 반면에, 작업자 인력에 의해 휴대 및 이동이 가능한 이동식 사다리 특성에 부합하도록 단수의 증가와 무관하게 경량화가 우선된 사다리의 차이로 판단된다. 다음으로 최대 작업높이나 무게에 비해 제조사 또는 판매사에서 제공하는 제원이 상대적으로 부족한 하단 폭과 깊이에 대해서는 각각 76종 및 36종의 사다리를 대상으로 분석하였다. 이들 결과를 정리한 그림 2(d)와 2(e)를 살펴보면, 사다리의 단수 증가에 직접적으로 비례하지는 않지만 하단의 폭과 깊이도 함께 증가하였으며, 하단의 폭보다는 양 버팀대 사이의 거리에 해당하는 깊이를 더 길게 확보하고 있음을 확인할 수 있다. 이 결과는 삼각지지형 이동식 사다리의 전도 발생 가능성에 있어서 하단 깊이를 변수로 하는 정면 또는 후면보다 하단 폭을 변수로 하는 측면 방향의 저항모멘트가 작아지므로 전도의 위험성이 상대적으로 크다는 것을 의미한다.

2.2 이동식 사다리 관련 기준 분석

삼각지지형 이동식 사다리가 포함된 이동식 사다리 관련 국내 기준은 산업안전보건기준에 관한 규칙 제24조에서 사다리의 구조를 규정하고 있으며, 한국산업표준(KS) 중 알루미늄 합금제 사다리(KS G 3701)(2021)에서 품질, 구조, 치수 및 재료특성과 함께 사다리 강도 시험 등 7가지 항목에 대한 시험 및 검사를 규정하고 있으나 전도 안정성 평가 또는 이를 위한 시험 등은 규정하고 있지 않다. 또한, 고용노동부에서 고시한 이동식 사다리 안전작업 지

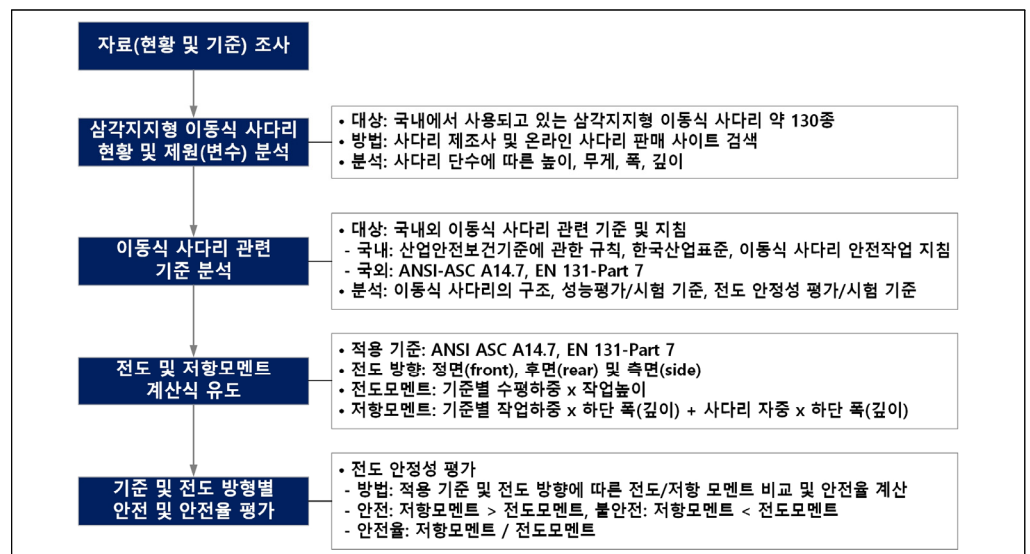


그림 1. 연구 흐름도

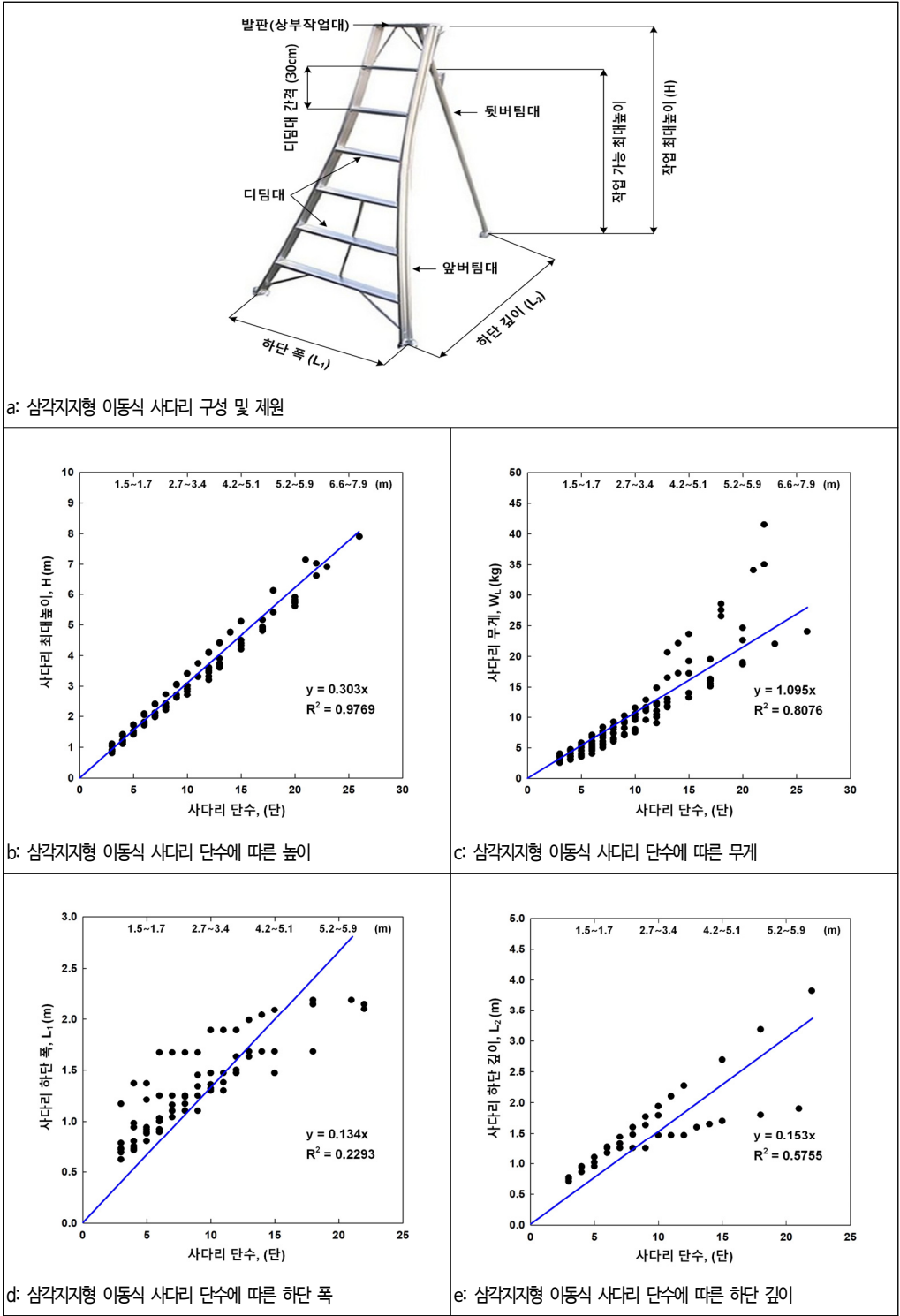


그림 2. 삼각지지형 이동식 사다리의 구조 및 단수에 따른 제원별 관계

침에서는 발판(상부작업대) 및 디딤대에서 작업을 금지하고 오르내리는 이동통로로만 사용하도록 하였으며, 작업 최대높이는 3.5m 이하이며, 작업 높이에 따른 2인 1조 작업과 상부작업대에서의 작업금지 등 안전작업 지침을 규정하고 있다. 그러나, 이 지침에서도 사다리의 전도를 방지하기 위하여 전도방지대 설치 등에 의한 조치는 권고하였으나, 전도 안정성 평가와 관련된 내용이나 지침은 제시하지 않았다.

이와는 다르게 유럽연합과 미국 등 국외에서는 삼각지지형 이동식 사다리가 포함된 이동식 사다리를 대상으로 하는 별도의 기준이 있다. 유럽연합의 경우에는 사다리 기준인 EN 131의 Part 7 Mobile Ladders with Platform에서 이동식 사다리의 설계에 필요한 재료 및 제원에 대한 조건과 함께 본 논문의 목적인 그림 3(a)와 같은 전도 안

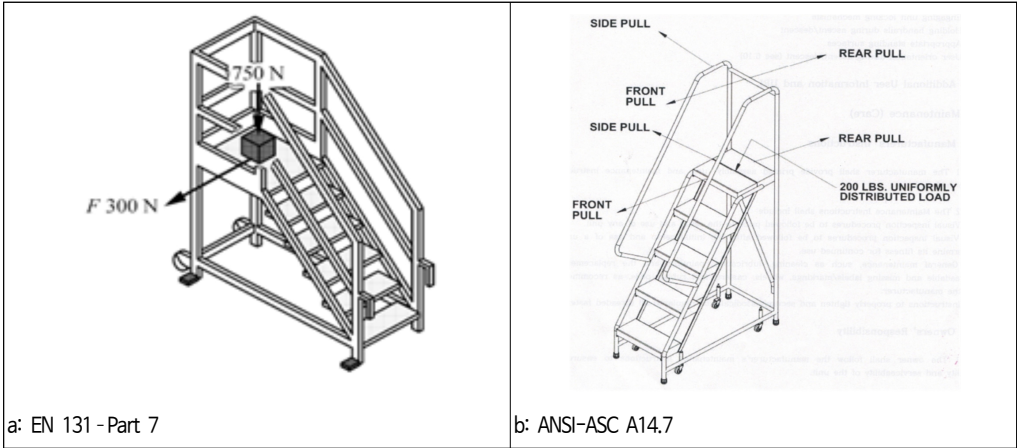


그림 3. 기준별 전도 안정성 시험 규정

정성을 포함하여 휠, 비틀림, 강성 등 14가지 항목의 소요 성능에 대한 시험 및 사다리에 반드시 부착해야 하는 각종 표식에 대해서 규정하고 있다. 미국의 경우에는 국가 표준인 ANSI-ASC의 A14.7 American National Standard for Mobile Ladder Stands and Mobile Ladder Stand Platforms에서 EN 131-Part 7과 마찬가지로 이동식 사다리의 설계에 필요한 재료, 부속, 제조에 따른 상세 조건 및 제원에 대한 조건과 함께 본 논문의 목적인 전도 안정성에 대해서 그림 3(b)와 같이 측면, 전면 및 후면으로 상세하게 구분하여 소요 성능을 규정하고 있다. 이와 함께, 이동식 사다리의 하중 저항 성능에 대해서 구성 요소인 디딤대 또는 작업대, 손잡이와 난간 등에 대한 소요 성능과 함께 사다리에 부착되는 표식에 요구되는 성능과 유지관리 등을 규정하고 있다. 각 기준의 전도 안정성 시험 항목에서 규정하고 있는 하중 종류 및 크기를 표 1에 각각 정리하였다.

표 1에 정리한 기준별 전도 안정성 시험 하중은 경작업(light work)에 필요한 도구를 포함한 작업자 1인에 의해 유발되는 작업하중 및 수평하중이라고 할 수 있다. 이 크기를 자세히 살펴보면, 작업하중의 경우에는 EN 131-Part 7에서는 성인 남성의 표준 체중에 해당하는 약 75kg만을 고려하고 있으나, ANSI-ASC A14.7에서는 성인 남성 작업자 1인과 함께 경작업용 도구 무게를 포함한 것으로 판단된다. 수평하중의 경우에는 작업자에 의한 경사작업과 이동식 사다리가 주로 사용되는 고소 및 야외작업 특성의 반영 여부에 따라 EN 131-Part 7에서는 높이 2.5m를 기준으로 풍하중 등의 영향에 의한 차이를 1.5배로 반영하고 있음을 알 수 있다. 이와는 다르게 이동식 사다리 구조에 따른 하단지지 특성의 차이에 따라 ANSI-ASC A14.7에서는 후면(정면)과 측면 방향 차이를 1.1배로 다르게 적용하고 있음을 알 수 있다.

삼각지지형 이동식 사다리를 포함한 이동식 사다리의 전도 안정성은 작업하중보다 수평하중의 크기가 상대적으로 중요하며, 이 수평하중은 작업자가 디딤대에서 경사지게 작업함으로써 유발되는 수평방향 분력 및 야외작업에 따른 풍하중의 크기를 적절하게 반영하여야 한다. 이와 같은 조건에 따라 삼각지지형 이동식 사다리에서 주로 발생하는 경사 작업의 형태 및 높이에 따른 풍하중의 크기를 고려하였을 때, ANSI-ASC A14.7에서는 수평하중의 크기를 과소평가하고 있으며, EN 131-Part 7에서 규정하고 있는 수평하중의 크기가 적절한 것으로 판단된다.

3. 평가방법

3.1 전도 안정성 평가 개요

본 연구의 목적인 삼각지지형 이동식 사다리의 전도 안정성 평가를 위하여 앞 절에서 분석한 EN 131-Part 7과

표 1. 기준별 전도 안정성 시험 하중

기준 \ 하중	EN 131-Part 7		ANSI-ASC A14.7	
	정면(front) / 후면(rear)	측면(side)	정면(front) / 후면(rear)	측면(side)
작업(수직)하중	750N		900N	
수평하중	300N ($H \leq 2.5m$) 450N ($H > 2.5m$)		110N	100N

ANSI-ASC A14.7에서 규정하고 있는 후면(정면)과 측면방향의 전도 및 저항모멘트 계산에 필요한 하중과 길이 및 높이를 이용하였다. 삼각지지형 이동식 사다리의 저항모멘트 M_R 은 이동식 사다리 안전작업 지침에 따라 그림 4에 보인 바와 같이 사다리 발판(상부작업대) 바로 아래의 디딤대 중앙부에 작용하는 작업하중 W_W 와 사다리 자중 W_L 과 바닥 면에서의 수평거리의 곱으로 계산한다. 그리고, 전도모멘트 M_O 는 저항모멘트와 마찬가지로 그림 4에 보인 바와 같이 후면(정면)과 측면 방향으로 각각 정의된 수평하중 $W_{H, rear}$ 과 $W_{H, side}$ 가 수평하중이 작용하는 높이 H 의 곱으로 계산한다. 본 연구에서 후면과 측면 방향을 고려한 이유는 삼각지지형 이동식 사다리의 구조 특성에 따라 전도에 저항하는 지지길이가 짧고, 뒷버팀대에 의한 바닥 지지조건이 상대적으로 불안하기 때문이다. 각 설계기준에서 규정하는 작업하중 W_W 와 수평하중 W_H , 제조사 또는 판매사에서 제공하는 사다리 단수에 따른 무게 W_L , 하단 폭 L_1 과 하단 길이 L_2 및 높이 H 를 이용하여 전도모멘트 M_O 와 저항모멘트 M_R 의 계산 및 이 결과들을 이용한 전도 안정성 평가 과정을 다음 절에서 순서대로 제시하였다.

3.2 전도모멘트 계산

관련 설계기준에서 규정하는 수평하중 W_H 에 의해 삼각지지형 이동식 사다리에서 발생하는 전도모멘트 M_O 는 전도가 발생하는 방향인 후면 또는 측면에 상관없이 수평하중 W_H 가 작용하는 최상단 아래 발판으로부터 사다리가 지지되는 하부 지지 면까지의 높이로 정의할 수 있다. 그런데, 삼각지지형 이동식 사다리의 단 사이 간격은 국내 제조사 및 판매사에서 제공하는 제원과 그림 2(b)에 정리한 바와 같이 0.3m이므로 전도모멘트 계산 시 이 간격을 고려할 필요가 있다. 따라서, 삼각지지형 이동식 사다리의 전도모멘트 M_O 는 수평하중과 하단 지지 면으로부터 수평하중이 작용하는 최상단 바로 아래 단까지의 높이를 곱한 다음 식 1로부터 계산할 수 있다.

$$M_O = W_H \times (H - 0.3) \quad (\text{식 1})$$

여기서, W_H 는 표 1에 정리한 각 기준에서 규정하는 전도 방향별 수평하중(N)이며(단, EN 131-Part 7에서는 외부 작업에 따른 풍하중의 영향을 고려할 수 있도록 사다리 높이에 따라 수평하중의 크기가 다름), H 는 삼각지지형 이동식 사다리의 하단 지지면으로부터 최상단까지의 최대 높이(m)이다.

식 1과 표 1에 정리한 수평하중을 이용하여 삼각지지형 이동식 사다리 단수(높이)에 따른 기준별 전도모멘트 계산 결과를 전도가 발생할 수 있는 후면과 측면 방향으로 구분하여 그림 5에 비교하였다. 이 그림을 살펴보면, 전도 방향과 무관하게 야외작업에 따른 풍하중의 영향 등을 고려할 수 있도록 사다리의 높이에 따라 수평하중의 크기를 각각 300N과 450N으로 정의하고 있는 EN 131-Part 7에 의한 전도모멘트가 사다리 높이와 상관없이, 전도 방향별로 각각 100N과 110N으로 정의하고 있는 ANSI-ASC A14.7에 의한 전도모멘트보다 크게 발생함을 확인할 수 있다. 특히, EN 131-Part 7에서 경사 작업이나 풍하중 등의 영향을 고려하기 위하여 수평하중의 크기를 1.5배 크

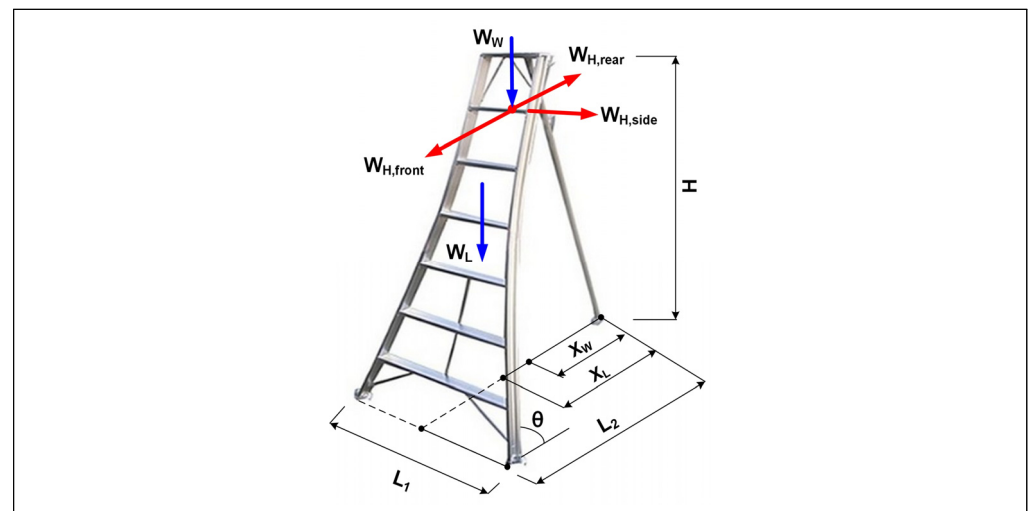


그림 4. 삼각지지형 이동식 사다리의 전도 및 저항모멘트 계산을 위한 변수(하중, 길이 및 높이)

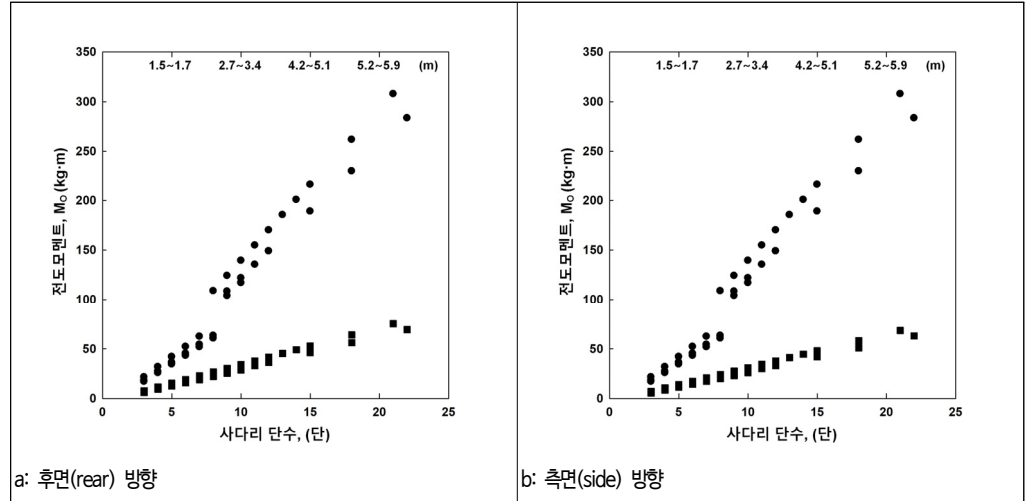


그림 5. 삼각지지형 이동식 사다리 단수(높이)에 따른 전도모멘트
범례: ■ ANSI-ASC A14.7, ● EN 131-Part 7

게 규정하고 있는 8단(높이 2.5m) 이상의 삼각지지형 이동식 사다리에서 단수가 증가함에 따라 전도 방향에 상관 없이 기준별 전도모멘트의 차이가 최대 6배까지 크게 발생하고 있음을 알 수 있다. 이 결과에 따르면, 현실적인 수평하중의 크기로 간주할 수 있는 EN 131-Part 7에서 규정하는 하중이 작용하였을 때, 8단 이상의 삼각지지형 이동식 사다리에서 전도 위험성이 크게 증가하므로 작업 시 안전조치 및 주의가 요구된다.

3.3 저항모멘트 계산

앞 절에서 정의한 식 1로 계산되는 전도모멘트에 대응하여 삼각지지형 이동식 사다리의 전도 안정성을 확보하는 저항모멘트 M_R 은 표 1에 정리한 관련 기준에서 규정하는 작업하중 W_W 와 사다리 자중 W_L 이 하단 지지 면에 작용하는 위치(작용점)를 기준으로 전도가 발생하는 방향에 따라 서로 다른 크기로 정의된다. 사다리 뒷버팀대쪽 후면방향으로 발생하는 저항모멘트 $M_{R, rear}$ 는 작업하중 W_W 와 이 하중의 작용점으로부터 뒷버팀대까지의 거리 X_W 의 곱과 사다리 자중과 W_L 이 하중의 작용점으로부터 뒷버팀대까지 거리 X_L 을 곱하여 식 2와 같이 계산할 수 있다.

$$M_{R, rear} = W_L \times X_L + W_W \times X_W \quad (\text{식 2})$$

여기서, 사다리 자중의 작용점으로부터 뒷버팀대까지의 거리 X_L 은 삼각지지형 이동식 사다리가 투영된 하단의 삼각형 면적의 도심으로 간주할 수 있으므로, 하단 깊이 L_2 의 2/3가 된다. 또한, 작업하중의 작용점으로부터 뒷버팀대까지의 거리 X_W 는 이동식 사다리 안전작업지침에 따라 최상단의 발판(상부작업대)아래의 단까지만 작업이 가능하므로 하단 깊이 L_2 에서 디딤대가 있는 오름면 하부에서 수직으로 투영된 길이 $0.3/\tan\theta$ 만큼을 차감한 거리이다.

이상과 같이 정의된 각 하중의 작용점으로부터 뒷버팀대까지의 거리를 식 2에 대입하면, 후면방향에 대한 저항모멘트 $M_{R, rear}$ 는 식 3과 같이 변환할 수 있다.

$$M_{R, rear} = W_L \times \frac{2}{3} L_2 + W_W \times \left(L_2 - \frac{0.3}{\tan\theta} \right) \quad (\text{식 3})$$

그런데, 식 3의 $\tan\theta$ 는 하단 지지 면과 앞버팀대와의 경사이므로 삼각지지형 이동식 사다리 앞, 뒷버팀대의 펼침 폭이 동일하다고 가정하면, 각 버팀대가 하단에 투영된 길이는 하단 깊이 L_2 의 1/2이 되고 높이는 H 이므로 식 4와 같이 정의할 수 있다.

$$\tan\theta = \frac{2H}{L_2} \quad (\text{식 4})$$

따라서, 식 4로 정의한 $\tan\theta$ 를 식 3에 대입하면 후면방향의 저항모멘트 $M_{R, rear}$ 는 식 5로 계산할 수 있다.

$$M_{R, rear} = W_L \times \frac{2}{3} L_2 + W_W \times \left(L_2 - \frac{0.3L_2}{2H} \right) \quad (\text{식 5})$$

다음으로, 측면방향에 대한 저항모멘트는 작업하중과 사다리 자중의 작용점이 하단 깊이방향으로 동일한 축에 위치하므로, 모멘트의 회전중심이 되는 하단에 지지되는 앞버팀대 양쪽 끝까지의 거리를 곱하여 계산할 수 있다. 그런데, 작업하중과 사다리 자중의 작용점이 하단 폭방향의 중앙이므로, 모멘트 거리는 하단 폭 L_1 의 1/2이 된다. 따라서, 측면방향으로의 저항모멘트 $M_{R, side}$ 는 식 6으로 계산할 수 있다.

$$M_{R, side} = (W_W + W_L) \times \frac{L_1}{2} \quad (\text{식 6})$$

이상과 같이 후면과 측면방향에 대한 저항모멘트를 계산할 수 있도록 각각 유도한 식 5, 식 6, 표 1에 정리한 작업하중 및 사다리 제원에 따른 사다리 무게와 거리들을 이용하여 삼각지지형 이동식 사다리 단수(높이)에 따른 기준별 저항모멘트 계산 결과를 후면과 측면 방향으로 구분하여 그림 6에 비교하였다.

이 그림을 살펴보면, 삼각지지형 이동식 사다리의 전도에 대한 저항모멘트 크기는 후면보다 측면이 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 이와 같은 차이는 삼각지지형 이동식 사다리의 제원에 의한 것으로서, 사다리가 지지되는 하단 폭 L_1 에 비해 깊이 L_2 의 길이가 더 크기 때문에 하단 깊이를 모멘트 길이로 이용하는 후면의 저항모멘트가 측면보다 크게 발생한다고 할 수 있다. 이와는 다르게 관련 기준에 따른 차이는 크게 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 단, 후면방향에서 사다리의 단수가 증가할수록 저항모멘트의 차이가 발생하는데, 이는 같은 단수의 사다리라도 제조사마다 무게가 서로 다르기 때문으로 판단된다. 이 결과에 따르면, 삼각지지형 이동식 사다리에서는 측면방향에 대한 저항모멘트가 후면에 비해 작게 발생하므로 전도에 대한 위험성도 높다고 할 수 있다.

4. 연구결과

4.1 전도 안정성 평가

앞 장에서 유도한 삼각지지형 이동식 사다리에서 발생하는 전도 및 저항모멘트 계산 식과 관련 기준에서 규정하는 하중과 사다리의 제원들을 적용하여 전도 방향에 따른 전도모멘트 M_O 와 저항모멘트 M_R 의 계산 결과를 상관 관계로 하여 전도 안정성을 평가할 수 있도록 그림 7과 그림 8에 각각 방향별로 정리하였다. 먼저 EN 131-Part 7의 규정에 의해 전도 안정성을 평가한 그림 7을 살펴보면, 삼각지지형 이동식 사다리의 뒷버팀대에 의해 지지되는 후면방

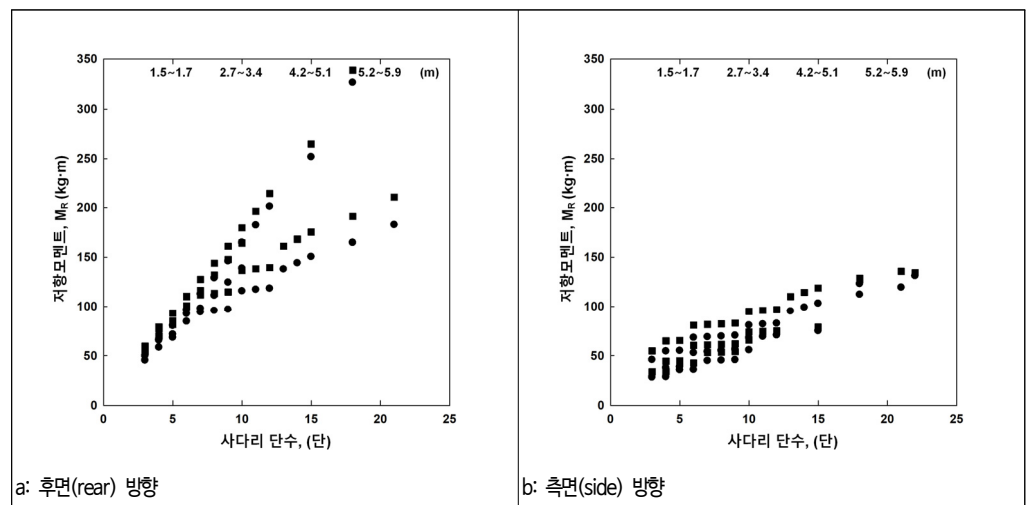


그림 6. 삼각지지형 이동식 사다리 단수(높이)에 따른 저항모멘트
범례: ■ ANSI-ASC A14.7, ● EN 131-Part 7

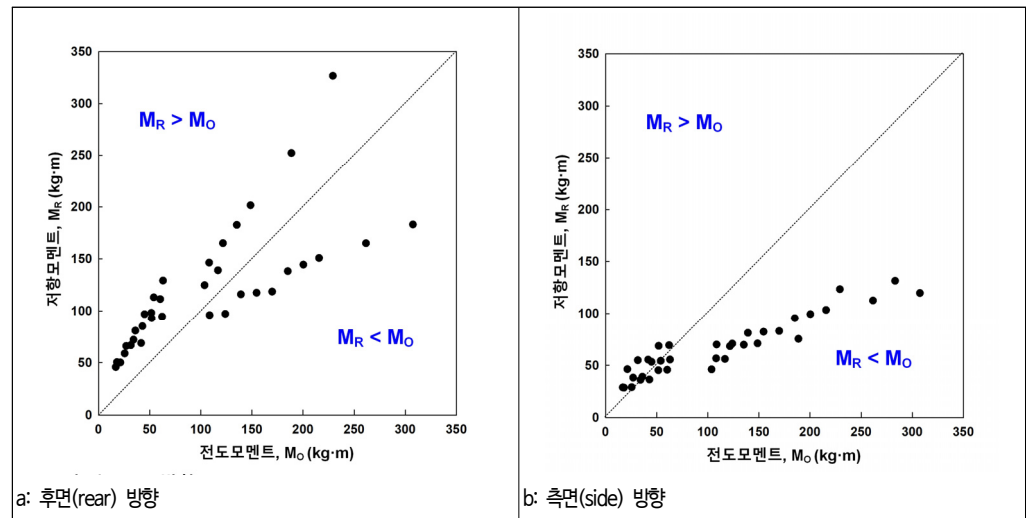


그림 7. EN131-Part 7에 의한 삼각지지형 이동식 사다리의 저항모멘트와 전도모멘트 상관 관계

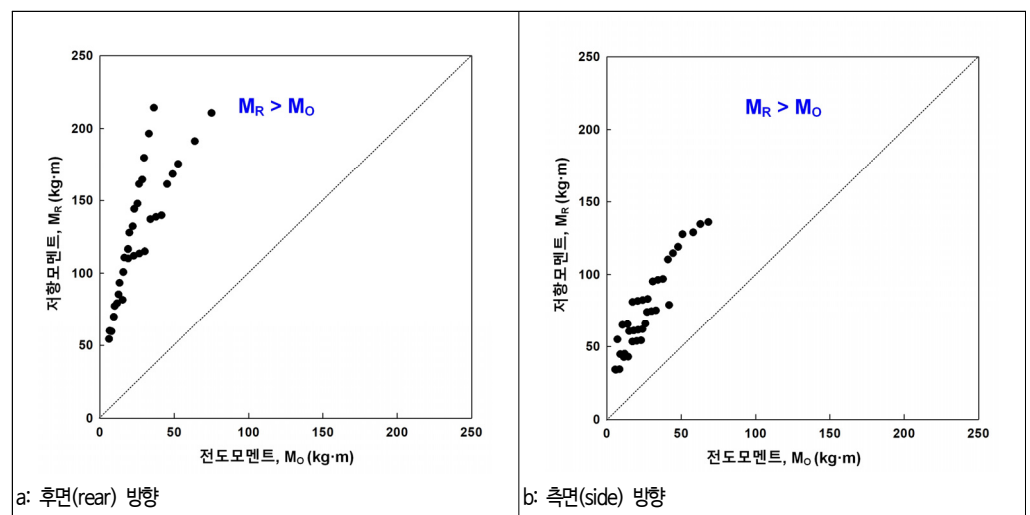


그림 8. ANSI-ASC A14.7에 의한 조삼각지지형 이동식 사다리의 저항모멘트와 전도모멘트 상관 관계

향에 대한 전도 안정성은 약 $100\text{kg} \cdot \text{m}$ 의 전도모멘트를 기준으로 이 크기보다 작을 때는 전도에 대해 모두 안정성을 확보하는 것으로 나타났다. 그러나, 그 이상의 전도모멘트에서는 사다리 제원에 따라 저항모멘트의 크기가 상이하여 전도에 대한 안정과 불안정이 혼재되어 있음을 알 수 있다. 이와는 다르게 측면방향에 대한 전도 안정성은 약 $60\text{kg} \cdot \text{m}$ 의 전도모멘트를 기준으로 이 크기보다 작을 때는 전도에 대해 안정성을 확보하고 있으나, 그 이상의 전도모멘트가 발생하는 경우에는 사다리 제원에 상관없이 전도에 대해서 불안정한 것으로 나타났다.

따라서, 실제 사다리 작업환경을 반영하고 있는 것으로 판단되는 EN 131-Part 7의 규정에 의한 삼각지지형 이동식 사다리의 전도 안정성은 후면과 측면방향에서 낮은 크기의 전도모멘트가 발생하는 경우에는 안정하다고 할 수 있으나, 사다리 단수가 높아짐에 따라 전도모멘트가 증가할수록 불안정하므로 전도방지대 설치 등 추가적인 조치가 필요하다고 할 수 있다. 다음으로 ANSI-ASC A14.7의 규정에 의한 전도 안정성을 평가한 그림 8을 살펴보면, 사다리 제원과 전도 방향에 상관없이 모두 전도모멘트보다 저항모멘트가 크게 발생하고 있으므로 전도 안정성을 확보하였다고 할 수 있다. 그러나, 앞 절에서 언급한 바와 같이 ANSI-ASC A14.7에서 규정하는 수평하중은 EN 131-Part 7의 규정과 비교하여 현장에서 진행되는 작업조건 및 환경에 의해 발생하는 수평하중을 상당히 과소평가하고 있으므로 사용 시 주의가 필요하다고 할 수 있다.

4.2 전도 안전율

이동식 사다리의 전도 안정성에 대한 정량적 평가를 위하여 앞 절과 마찬가지로 국외 기준인 EN 131-Part 7과 ANSI-ASC A14.7의 규정과 본 연구에서 유도한 삼각지지형 이동식 사다리의 후면 및 측면방향에 대한 전도모멘트와 저항모멘트 계산 식을 이용하여 사다리 단수에 따른 전도 안전율을 산정하고 그 결과를 그림 9와 그림 10에 각각 비교하였다. 삼각지지형 이동식 사다리의 전도 안전율은 기준에서 규정하는 작업하중 및 사다리 자중에 의한 저항모멘트와 수평하중에 의한 전도모멘트의 비로 정의되며, 이 값은 전도에 대한 안전 여유의 정도를 의미한다고 할 수 있다. 삼각지지형 이동식 사다리의 전도 안전율은 기준에서 규정하는 작업하중 및 사다리 자중에 의한 저항모멘트와 수평하중에 의한 전도모멘트의 비로 정의되며, 이 값은 전도에 대한 안전 여유의 정도를 의미한다고 할 수 있다. EN 131-Part 7의 규정에 의하여 전도 방향별로 사다리 단수에 따라 정리한 그림 9를 살펴보면, 전도 안전율은 후면방향에서 0.5-3.0, 측면방향에서 0.4-2.2로 나타났다. 그리고, 전도에 대한 안전을 확보하였다고 간주할 수 있는 안전율 1.0 이상을 확보하는 사다리 단수는 측면 방향에서 6단 이하, 후면 방향에서 8단 이하는 모두 1.0 이상인 반면에, 8단 이상에서는 사다리 제품에 따른 무게의 차이로 인하여 전도에 불안정한 상태인 안전율 1.0 이하가 혼재되어 있음을 확인할 수 있다. ANSI-ASC A14.7의 규정에 따른 전도 방향별 사다리 단수에 따른 전도 안전율을 정리한 그림 10을 살펴보면, EN 131-Part 7과 다르게 방향과 단수에 상관없이 모두 2.0 이상의 안전율을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

이와 같은 차이는 앞 절에서 밝힌 바와 같이 기준에서 규정하는 수직하중과 수평하중의 크기가 서로 다르기 때문으로서, ANSI-ASC A14.7이 EN 131-Part 7에 비하여 저항모멘트를 결정하는 수직하중은 1.2배 크고, 전도모멘트를 결정하는 수평하중은 0.28-0.37배로 작아서 기준에 따른 전도 안전율에 큰 차이가 발생하였다.

이상과 같은 삼각지지형 이동식 사다리에 대한 전도 안정성 평가 결과, 관련 기준에 따라 안전율은 큰 차이가

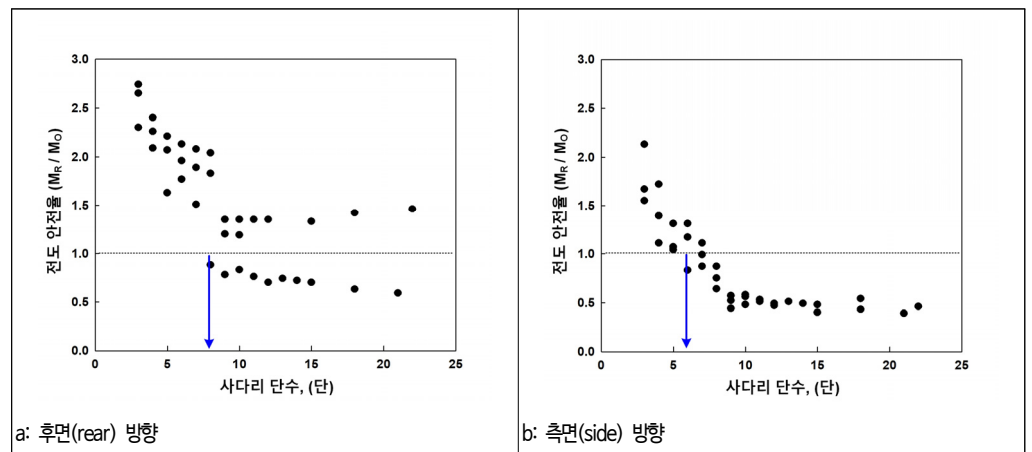


그림 9. EN131-Part 7 규정에 의한 삼각지지형 이동식 사다리의 전도 안전율

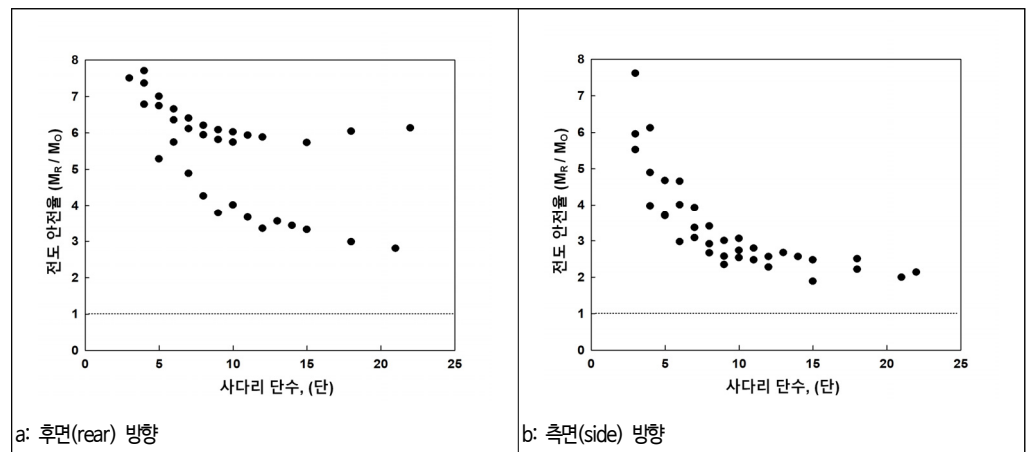


그림 10. ANSI-ASC A14.7 규정에 의한 삼각지지형 이동식 사다리의 전도 안전율

발생하였으며 후면보다 측면방향으로 전도 위험성이 큰 것으로 나타났다. 또한, EN 131-Part 7에서 규정하는 하중이 사다리를 이용한 실제 작업환경을 현실적으로 반영하고 있으므로, 이 결과를 근거로 하면 국내에서 판매 또는 사용되고 있는 삼각지지형 이동식 사다리는 후면방향으로 8단 이상, 측면방향으로 6단 이상에서 전도에 대한 안전성을 확보하지 못하고 있으므로 작업 시 주의가 필요하며, 아웃트리거와 같은 전도방지대를 추가로 설치하거나 디담대가 있는 앞버팀대의 하단 폭을 확대할 필요가 있다.

5. 결론

본 연구에서는 조정사공 및 관리분야에서 주로 사용하는 삼각지지형 이동식 사다리를 포함하는 이동식 사다리 관련 국외 기준인 EN 131-Part 7과 ANSI-ASC A14.7의 전도 안정성 시험 규정을 이용하여 뒷버팀대에 의해 지지되고 하단 폭이 높이에 비해 상대적으로 짧은 삼각지지형 이동식 사다리의 구조적 특성에 따라 후면방향과 측면 방향을 대상으로 전도 안정성 평가를 실시하였다. 이를 위하여 국내에서 판매되고 있는 삼각지지형 이동식 사다리의 현황을 조사하고, 작업하중 및 사다리 자중과 뒷버팀대까지의 하단 길이에 의한 저항모멘트와 수평하중과 작업 높이에 의한 전도모멘트를 사다리 단수에 따라 계산할 수 있는 식을 유도하였다. 그리고, 이 식으로부터 각 모멘트를 계산한 후 전도 방향에 따른 전도 저항성능 및 전도에 대한 안전율을 기준별로 비교·분석을 실시하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 국내에서 판매 및 사용되고 있는 삼각지지형 이동식 사다리는 최대 26단과 작업높이 7.9m까지이며, 전도 안정성에 영향을 주는 중요한 변수인 뒷버팀대까지의 하단 깊이보다 앞버팀대의 하단 폭이 상대적으로 짧아서 측면 방향으로의 전도 위험성이 더 큰 것으로 나타났다.

둘째, 삼각지지형 이동식 사다리를 포함하는 이동식 사다리의 전도 안정성 시험 및 그에 따른 평가를 규정하고 있는 국외 기준인 EN 131-Part 7과 ANSI-ASC A14.7은 전도모멘트를 유발하는 수평하중과 저항모멘트를 결정하는 수직하중을 각각 규정하고 있으며, 삼각지지형 이동식 사다리의 구조와 야외 및 경사작업 등의 환경을 고려하였을 때 EN 131-Part 7에서 규정하는 하중이 전도 안정성 평가에 적절한 것으로 분석되었다.

셋째, 뒷버팀대에 의해 삼각형 구조를 갖는 삼각지지형 이동식 사다리의 특성에 따라 전도 안정성에 대한 검토가 필요한 방향은 뒷버팀대로 지지되는 후면방향과 함께 앞버팀대 간격인 하단 폭에 의해 지지되는 측면방향이며, 이들 방향에 대해서 사다리 구조와 관련 기준의 규정에 의하여 전도모멘트와 저항모멘트를 계산할 수 있는 식을 각각 유도하였다.

넷째, 유도된 식을 이용하여 관련 기준 및 전도 방향에 따른 전도모멘트와 저항모멘트를 각각 계산하고 이 결과로부터 전도 및 저항모멘트의 크기를 상호 비교하였으며, 정량적인 전도 안정성 평가를 위하여 저항모멘트와 전도모멘트 비로 정의되는 전도 안전율을 산정하였다.

다섯째, 전도 안정성 평가 결과, EN 131-Part 7의 규정에 의하면 후면방향으로 8단, 측면 방향으로 6단 이하에서 저항모멘트가 전도모멘트보다 큰 전도 안전율 1.0 이상을 확보하는 것으로 평가되었으며, 그 이상의 단수에서는 전도에 대해서 불안정한 것으로 나타났다. 이와는 반대로, ANSI-ASC A14.7의 규정을 적용한 경우에는 모든 방향과 단수에서 전도 안전율 1.0 이상을 확보하는 것으로 평가되었다. 여섯째, 삼각지지형 이동식 사다리의 구조 및 실제 작업환경을 종합적으로 고려하였을 때 EN 131-Part 7의 규정을 적용하는 것이 현실적으로 타당하다고 판단되며, 이에 따라 삼각지지형 이동식 사다리를 이용하여 측면 7단, 후면 9단 이상의 작업을 할 경우에는 전도가 발생하지 않도록 작업자와 관리자의 각별한 주의 및 별도의 안전 조치를 반드시 실시하여야 한다.

이와 함께, 본 연구를 통하여 도출된 결과들은 삼각지지형을 포함한 이동식 사다리 안전작업지침과 국가건설기준의 조정유지관리공사 시방서 코드에 추가되거나, 이동식 사다리 안전교육 및 안전관리 프로그램에 반영될 수 있을 것으로 판단된다.

그러나, 본 연구에서 수행한 조정사공 및 관리분야에서 주로 사용되고 있는 삼각지지형 이동식 사다리의 전도 안정성 평가에 있어서 국내에서 사용되고 있는 사다리를 모두 포함하지 못하였으므로 이에 대한 보완이 필요하며, 전도 안정성을 확보할 수 있는 대책에 대한 추가적인 연구를 수행할 필요가 있다.

References

1. 고용노동부(2019) 이동식 사다리 안전작업지침.
2. 고용노동부(2022) 산업안전보건기준에 관한 규칙.

3. 김형석, 이석원, 정원제, 류보혁(2009) 이동식 사다리를 중심으로 한 제조업에서의 추락재해 예방대책 연구. 한국안전학회지 24(6): 136-143.
4. 민승남, 이정선(2022) 이동식 사다리 안전작업기준 비교 및 안전작업절차 개발. 대한인간공학회지 41(5): 347-355.
5. 안전보건공단(2023) 통계로 보는 2022년 산업재해.
6. 최승주, 정기효(2021) 이동식 사다리 중대재해 통계 분석 및 이동식사다리와 안전모 실시간 탐지 기계학습 모델 개발. 대한안전경영과학회지 23(1): 9-15.
7. 한국표준협회(2021) 한국산업표준 알루미늄 합금제 사다리(KS G 3701, 2021) 산업통상자원부 국가기술표준원.
8. 황종문, 신성우(2020) 이동식 사다리 추락 재해 예방을 위한 안전 제도의 문제점과 개선 과제. 한국안전학회지 35(5): 86-94.
9. 황종문, 신성우(2021) 동시출현 기반 키워드 네트워크 기법을 이용한 이동식 사다리 추락 재해 위험 요인 연관 구조 모델링. 한국안전학회지 36(3): 50-59.
10. American National Standards Institute(2012) American National Standard Safety Requirements for Mobile Ladder Stands and Mobile Ladder Stand Platforms (ANSI-ASC A14.7-2011). Chicago: American Ladder Institute.
11. Comite European de Normalisation(2013) Ladders Part 7: Mobile Ladders with Platform. European Committee for Standardization.
12. <http://www.ydladder.co.kr>
13. <http://www.syladder.com>
14. <http://www.seoulladder.co.kr>
15. <http://www.sadarishop.com>
16. <http://www.ladder-shop.com>