

# 퍼지-FMEA기법을 이용한 차량탑재형 고소작업대 사고의 주요 유해위험요소 위험우선순위 결정

오세윤<sup>1</sup> · 이강돈<sup>2</sup> · 신재호<sup>3</sup> · 임재용<sup>4\*</sup>

## Determination of Critical Hazard Factors in Vehicle-Mounted MEWP using Fuzzy-FMEA

Seyoon Oh<sup>1</sup> · Kangdon Lee<sup>2</sup> · Jaeho Shin<sup>3</sup> · Jae-Yong Lim<sup>4\*</sup>

### <sup>1</sup>Corresponding Author

Jae-Yong Lim

Tel : +82-2-970-6388

E-mail : jaeyong.lim@gmail.com

Received : October 13, 2022

Revised : November 23, 2022

Accepted : November 24, 2022

**Abstract** : In this study, we aimed to identify the important hazard factors and determine their criticality in causing serious accidents in vehicle-mounted mobile elevated work platforms (MEWPs). Fuzzy failure modes and effects analysis (FMEA) was performed using accident data and a survey of experts. To determine the hazard factors, the accident data for the last 10 years were used and a questionnaire survey was designed. The questionnaire survey was sent to four experts in the field of occupational safety to determine the severity, occurrence, and detectability of serious accidents in MEWPs. Furthermore, objective RPN scores and risk priority were obtained using fuzzy FMEA. Finally, the criticality of hazard factors in descending order was found to be overloading, non-installation or defective installation of outriggers, breakage due to wire rope aging, and illegal remodeling of vehicle structures. The results were verified by comparing the occurrence data of serious disasters.

**Key Words** : FMEA, fuzzy-FMEA, risk priority assessment, vehicle-mounted mobile elevated work platforms(MEWP), hazard factors

Copyright©2023 by The Korean Society  
of Safety All right reserved.

## 1. 서론

차량탑재형 고소작업대는 건물 외벽공사, 간판 설치·보수공사, 전선 보수 작업 등 고층 작업 현장에서 높은 효율성과 편의성으로 인해 널리 사용되고 있다<sup>1)</sup>. 그러나 사용이 증가하면서 차량탑재형 고소작업대로 인한 사고 또한 꾸준히 발생하고 있다. 한국산업안전보건공단에서 발행한 고소작업대 안전관리 매뉴얼에 의하면 2012~2020년 동안 고소작업대 작업으로 사망한 근로자는 172명이고 그 중 차량탑재형 고소작업대 작업 관련 사망자가 102명으로 전체의 약 59%를 차지하고 있다. 또한 개인 차주가 소유·사용하는 경향으로 인해 10인 이하 사업장 비율이 가장 높았으며, 사망재

해는 주로 떨어짐, 작업대 넘어짐 형태로 발생하였다<sup>2)</sup>.

이러한 위험성으로 인해 차량탑재형 고소작업대는 산업안전보건법상 위험기계기구로 분류되어 제조·사용단계의 안전을 보장하기 위해 2009년 안전인증 제도, 2016년 안전검사 제도 등을 시행중이지만 사망 재해는 꾸준히 발생하는 실정이다. 재해를 예방하기 위해서는 사업장에서 위험성평가를 필수적으로 실시하고, 위험성평가 시 물리적 요인뿐만 아니라 관리적, 작업적 요인 등 가능한 모든 위험에 대하여 고려하는 것이 중요하다<sup>3,4)</sup>. 하지만 차량탑재형 고소작업대는 보편적으로 중·소규모 사업장에 많이 사용되기 때문에 사업장에서 체계적인 위험성평가를 실시하기에는 어려운 실정이다. 더 큰 문제는 중·소규모 사업장은

<sup>1</sup>서울과학기술대학교 글로벌안전공학과 석사과정 (Department of Global Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

<sup>2</sup>삼성EHS전략연구소 안전팀 부장 (Samsung EHS Strategy Institute)

<sup>3</sup>경일대학교 기계자동차학부 교수 (School of Mechanical and Automotive Engineering, Kyungil University)

<sup>4</sup>서울과학기술대학교 안전공학과 교수 (Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

2022년 1월 27일부터 시행된 중대재해 처벌 등에 관한 법률(중대재해처벌법)의 적용범위인 상시근로자 50인 이상 사업장이나 공사금액 50억 이상 사업장에 대부분 포함되지 않는다. 상시근로자 5인 이상 50인 미만 사업장은 현재 중대재해처벌법 적용 유예중인데 이 경우도 2024년이나 시행될 예정이다. 따라서 중대재해처벌법의 사각지대에 속하는 중·소규모 사업장에서 차량탑재형 고소작업대로 인하여 발생하는 중대재해를 예방하기 위한 대책의 필요성이 보다 빠르게 요구되고 있다.

과거부터 위험성이 높은 차량탑재형 고소작업대와 관련하여 다양한 측면에서 연구가 수행되고 있다. 그러나 기존의 선행연구들은 설비 안전성을 위한 결함 예방에 초점을 두거나 재해 예방을 목적으로 사고사례를 분석하고 설문조사 결과를 바탕으로 안전대책을 제시하는 등 사고 요인에 대해 단편적으로 접근하였다.

Cho<sup>5)</sup>는 차량탑재형 고소작업대 중대재해사례를 분석하고 운전원, 사용 근로자, 안전관리자, 관리감독자를 대상으로 설문조사를 실시하여 고소작업대 사용실태와 문제점을 파악하였다. Han<sup>6)</sup>은 국내외 고소작업대 관련 제도를 조사하고 국내 고소작업대 사용실태와 문제점을 파악하기 위해 재해사례 분석과 설문조사를 실시하여 안전대책을 제시하였다. Yoo 등<sup>7)</sup>은 차량탑재형 고소작업대의 기계 구조적 취약구조 부위를 파악하여 제작사별, 연식별, 규격별, 부위별 결함 점유율을 분석하였으며 취약구조 부위를 파악하기 위하여 차량탑재형 고소작업대 355대를 대상으로 육안검사, 비파괴검사 등 안전점검을 실시하였다. Lee<sup>1)</sup>는 차량탑재형 고소작업대에서 자주 발생하는 사고사례를 4가지 유형으로 분류하여 유형별 사고사례를 분석하였고, 분석 결과를 통하여 안전대책을 제시하였다. Choi 등<sup>8)</sup>은 고소작업대 선회대 고정볼트 피로파손여부와 피로수명에 유한요소해석을 진행하여 고소작업대에 반복하중이 작용하는 선회대 고정볼트의 파손을 예방하기 위한 대책을 제시하였다.

따라서 본 연구에서는 사고의 주요 유해위험요소를 18개로 정리하고 주요 유해위험요소의 우선순위를 결정하는 방법으로 널리 쓰이는 고장 모드 영향 분석(Failure Mode and Effects Analysis, 이하 FMEA)에 객관성을 높이고자 퍼지이론을 적용한 퍼지-FMEA기법을 사용하였다. 유해위험요소 선정을 위하여 2011년부터 2020년까지 발생한 중대재해사례를 분석하였고, 유해위험요소의 위험등급 평가를 위해 산업안전 전문가 4명을 선정하여 설문조사를 실시하였다. 다음으로 전문가 평가 결과를 정량화하여 위험우선순위를 결정하였

고, 중대재해사례에서 파악한 유해위험요소의 발생데이터를 대입하여 도출된 위험우선순위와 비교한 결과 퍼지-FMEA기법의 신뢰성을 검증하였다. 마지막으로 연구수행 내용을 바탕으로 결론을 도출하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 유해위험요소 분류 방법

유해위험요소를 분류하기 위해 한국산업안전보건공단에서 조사한 2011년부터 2020년까지 발생한 고소작업대 관련 중대재해사례 202건을 수집하였다. 그 중 차량탑재형 고소작업대 관련 중대재해사례 126건을 분석한 후 재해발생원인으로 기재된 유해위험요소 중 비슷하거나 중복되는 내용을 정리하여 Table 1과 같이 18개로 분류하였다. KS B ISO 12100:2010<sup>9)</sup>에는 상해의 잠재적 요인을 위험요인(hazard)로 정의하고 있으나 본 논문에서는 상해의 잠재적 요인을 확장해서 관리적, 작업적 부분도 포함하여 유해위험요소(hazard factors)라고 지칭하였다.

Table 1. Hazard factors of vehicle-mounted MEWP

No.	Hazard factor
F1	No work instructions
F2	Inappropriate work method
F3	Failure to wear protective equipment
F4	Unimplemented safety certification and inspection
F5	Non-installation or defective installation of safety guard rails
F6	Inexperienced in driving a vehicle-mounted aerial work platform
F7	Damage caused by defects in vehicle structural parts
F8	Insufficient vehicle inspection management
F9	Illegal remodeling of vehicle structures
F10	No supervisor
F11	To operate due to arbitrarily canceling the protective equipment function
F12	Exceeding rated load
F13	Non-installation or defective installation of outriggers
F14	No protective equipment installed
F15	Inadequate vehicle tripping prevention measures
F16	Exceeding the maximum working radius of the equipment
F17	Breakage due to wire rope aging
F18	Side brake not engaged

### 2.2 전문가 설문조사 방법

FMEA방법은 주로 4~10명 내외로 팀을 구성하여 진행되는 프로세스로 구성원들의 의견을 반영하여 반복적으로 위험요인을 도출한다<sup>10)</sup>. 하지만 본 연구에서는 전문가들의 각기 다른 평가 결과를 퍼지이론을 통하여

논리적으로 종합하여 정량적으로 도출하고자 개별 설문조사를 실시하였다. 설문조사는 인터넷을 활용하여 진행하였다. 설문조사 대상은 산업안전기사 자격증을 보유하고 안전인증·검사기관에서 5년 이상 근무한 종사자 중 경력, 경험과 전공 등을 종합적으로 고려하여 산업안전 전문가(Subject Matter Expert) 4명을 선정하였다. 선정 방법으로는 전문가 검토 방법론 중 하나인 Staticized groups research 방법을 적용하였다<sup>11-13</sup>. 전문가 평가점수의 가중치는 비슷한 경력, 경험과 전공을 가진 전문가들로 선정하였기에 동일하게 설정하였다.

### 2.3 퍼지-FMEA 설계

기존 FMEA는 위험 발생 시 피해정도인 심각도 (Severity, S), 위험 발생 가능성인 발생도(Occurence, O), 위험 검출 정도인 검출도(Detectability, D)를 통해 위험도(Risk Priority Number, 이하 RPN)를 계산한다<sup>14</sup>.

그러나 평가항목이 정성적이고, 심각도, 발생도, 검출도의 중요도가 동일하게 평가되며, 같은 RPN 값은 동일한 위험우선순위로 평가된다. 또한 전문가집단의 주관적인 평가에 의존하기 때문에 결과의 신뢰성이 보장되지 않는다. 따라서 이러한 단점들을 보완하기 위해 퍼지이론은 FMEA방식에 많이 적용되고 있다<sup>15</sup>.

퍼지-FMEA는 기존 FMEA와 다르게 인간의 사고를 기반으로 하는 방법론으로 위험도를 언어변수로 변환하여 현상의 불확실한 상태를 표현할 수 있으며, 평가과정에서 정해진 언어규칙에 따라 정량화하여 퍼지 연산을 이용한 퍼지-RPN 값을 도출한다<sup>14</sup>.

Tables 2~4는 심각도, 발생도, 검출도의 위험 수준에 대한 언어적 변수를 나타낸 것이다. 심각도, 발생도, 검출도의 위험 수준은 표준화된 기준이 없기 때문에 본 연구에서는 5단계로 정의하였다<sup>16</sup>.

Table 2. Risk level and linguistic expressions for severity

Level	Category	Description
S	L1	Very low Safety
	L2	Low Not serious injury
	L3	Moderate Minor injury
	L4	High Severe injury
	L5	Very high Death

Table 3. Risk level and linguistic expressions for occurrence

Level	Category	Description
O	L1	Very low Essentially zero
	L2	Low Likely occurred once
	L3	Moderate Moderate probability
	L4	High High probability
	L5	Very high Extremely high probability

Table 4. Risk level and linguistic expressions for detectability

Level	Category	Description
D	L1	Very low Remote chance
	L2	Low Low chance
	L3	Moderate Moderate chance
	L4	High High chance
	L5	Very high Very high chance

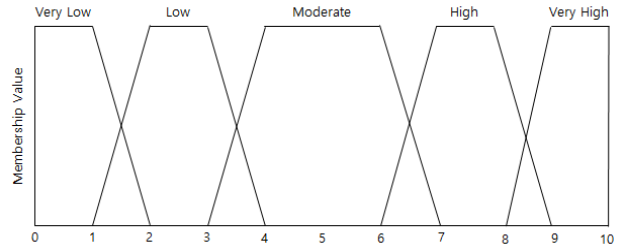


Fig. 1. Membership function plot of S, O and D.

Table 5. Numericalize linguistic terms with fuzzy numbers

Linguistic term	Fuzzy number
Very low	(0, 0, 1, 2)
Low	(1, 2, 3, 4)
Moderate	(3, 4, 6, 7)
High	(6, 7, 8, 9)
Very high	(8, 9, 10, 10)

Fig. 1은 평가과정에서 퍼지 언어규칙[Very high, High, Moderate, Low, Very low]에 따라 수치화하는 방법으로 사다리꼴 소속 함수로 나타낸 것이며, Table 5는 전문가가 평가한 점수를 수치화하기 위해 퍼지 숫자로 나타낸 것이다.

전문가 집단의 평가에 따라 퍼지연산을 통해 심각도와 발생도, 검출도는 식 (1)~(3)과 같이 주어진다.

$$\tilde{S}_i = (S_{iL}, S_{iM1}, S_{iM2}, S_{iR}) = \left\{ \sum_{j=1}^m (S_{iL}, S_{iM1}, S_{iM2}, S_{iR}) \right\} / m \quad (1)$$

$$\tilde{O}_i = (O_{iL}, O_{iM1}, O_{iM2}, O_{iR}) = \left\{ \sum_{j=1}^m (O_{iL}, O_{iM1}, O_{iM2}, O_{iR}) \right\} / m \quad (2)$$

$$\tilde{D}_i = (D_{iL}, D_{iM1}, D_{iM2}, D_{iR}) = \left\{ \sum_{j=1}^m (D_{iL}, D_{iM1}, D_{iM2}, D_{iR}) \right\} / m \quad (3)$$

$$i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m$$

식 (1)에서 전체 전문가 평가자 수가  $m$ 일 때  $m$ 번째 전문가가 평가한 경우,  $\tilde{S}_i$ 는  $i$ 번째 유해위험요소에 대한 퍼지 값을 나타내고,  $(S_{iL}, S_{iM1}, S_{iM2}, S_{iR})$ 는  $\tilde{S}_i$ 에 대한 사다리꼴 퍼지연산자 값의 하한값, 중심값 1~2, 상한값을 나타낸다. 식 (2)~(3)도 동일한 방법으로 계산된다.

선행 연구에서는 S,O,D 범위에 대한 RPN 도출방법으로 Zadeh의 팽창이론에 따른  $\alpha$ -level 알고리즘을 이용한 RSD(Risk Space Diagram)를 이용하였다<sup>17-18)</sup>. 본 연구에서도  $\alpha$ -level 알고리즘을 이용하여 하한값과 상한값을 식 (4)~(9)와 같이 표현한다.

$$S_{iL}^{\alpha} = S_{iL} + \alpha(S_{iM} - S_{iL}) \quad (4)$$

$$S_{iR}^{\alpha} = S_{iR} + \alpha(S_{iR} - S_{iM}) \quad (5)$$

$$O_{iL}^{\alpha} = O_{iL} + \alpha(O_{iM} - O_{iL}) \quad (6)$$

$$O_{iR}^{\alpha} = O_{iR} + \alpha(O_{iR} - O_{iM}) \quad (7)$$

$$D_{iL}^{\alpha} = D_{iL} + \alpha(D_{iM} - D_{iL}) \quad (8)$$

$$D_{iR}^{\alpha} = D_{iR} + \alpha(D_{iR} - D_{iM}) \quad (9)$$

$$0.0 < \alpha \leq 1.0$$

$[S_{iL}^{\alpha}, S_{iR}^{\alpha}]$ 는  $0.0 < \alpha \leq 1.0$ 일 때  $i$ 번째 유해위험요소의 심각도 구간을  $\alpha$ -level 알고리즘으로 표현한 것이다.  $[O_{iL}^{\alpha}, O_{iR}^{\alpha}]$ 와  $[D_{iL}^{\alpha}, D_{iR}^{\alpha}]$  또한 같은 알고리즘에 의해 표현된다.

Fig. 2는 하나의 좌표계에서 위험인자와 RPN의 구성 및 상호관계를 보여준다. 좌표축은  $i$ 번째 유해위험요소의 위험인자  $S_i, O_i, D_i$ 를 나타낸다. RSD에서  $RPN_{iL}^{\alpha}$ 는  $S_{iL}^{\alpha}, O_{iL}^{\alpha}, D_{iL}^{\alpha}$ 의 결합에 의해  $RPN_i$ 의 하한값으로 나타낸다. 마찬가지로  $RPN_{iR}^{\alpha}$ 은  $\alpha$ -level에 의해  $RPN_i$ 의 상한값을 나타낸다.

Fig. 2를 바탕으로 RPN을 도출하기 위해서는 기존 FMEA에서 사용하는 [S, O, D]값을 각각 곱하는 형태로

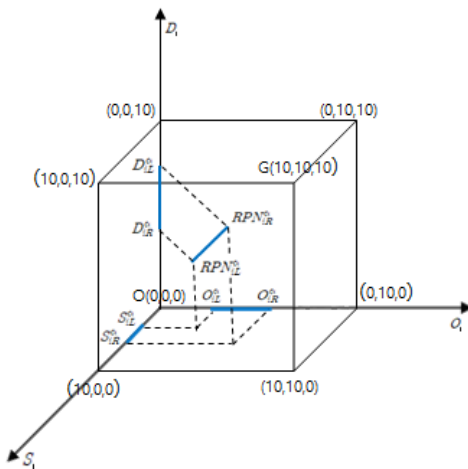


Fig. 2. Risk space diagram of  $i$ th failure mode.

표현하면 RPN의 범위가 커지고 복잡해져 명확한 비교가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 2에서 점  $O$ 와 점  $G$  선상의 RPN의 상대적 위치를 유클리드 거리 공식을 사용하여 나타내고  $RPN_i$ 는 아래 식 (10)~(12)과 같이 표현한다. Fig. 2에서 점  $O$ 와 점  $G$  선상의 RPN의 상대적 위치를 유클리드 거리 공식을 사용하여 나타내고  $RPN_i$ 는 식 (10)~(12)과 같이 표현한다.

$$RPN_{iL}^{\alpha} = \sqrt{\sum_{k=1}^n W_k^2 (x_{iL}^{\alpha} - x_{imin}^{\alpha})^2} / \sqrt{\sum_{k=1}^n W_k^2 (x_{imax}^{\alpha} - x_{imin}^{\alpha})^2} \quad (10)$$

$$RPN_{iR}^{\alpha} = \sqrt{\sum_{k=1}^n W_k^2 (x_{iR}^{\alpha} - x_{imin}^{\alpha})^2} / \sqrt{\sum_{k=1}^n W_k^2 (x_{imax}^{\alpha} - x_{imin}^{\alpha})^2} \quad (11)$$

$$RPN_i = (RPN_{iL}, RPN_{iM1}, RPN_{iM2}, RPN_{iR}) \quad (12)$$

$W_k$ 는 위험인자의 가중치( $k = S, O, D$ )를 나타내며 본 연구에서는 가중치 정규화 고유벡터인 [0.5396, 0.2970, 0.1634]를 사용한다<sup>19)</sup>.  $x$ 값은 평가요소인 S,O,D를 나타내고,  $x_{imin}$ 은  $x_i$ 의 최소 인덱스를 나타낸다. Fig. 2에 따르면  $x_{imin}$ 은 0이고,  $x_{imax}$ 은 최대 인덱스인 10을 나타낸다.  $RPN_i$ 는 퍼지  $RPN_i$ 의 소속 함수이다.

마지막은 퍼지  $RPN_i$ 를 역퍼지화 번호로 순위를 매기는 중요한 절차이다. 소속 함수에 따라 퍼지  $RPN_i$ 를 계산하기 위해 식 (13)과 같이 함수의 중심 값을 역퍼지화 값으로 선택하는 무게 중심법을 사용한다.

$$\tilde{x}_0(RPN_i) = \frac{1}{3} [RPN_{iL} + RPN_{iM1} + RPN_{iM2} + RPN_{iR} - \frac{RPN_{iR} \cdot RPN_{iM2} - RPN_{iL} \cdot RPN_{iM1}}{(RPN_{iR} + RPN_{iM2}) - (RPN_{iL} + RPN_{iM1})}] \quad (13)$$

## 2.4 퍼지-FMEA 신뢰성 검증

본 연구에 사용된 퍼지-FMEA기법의 신뢰성을 검증하기 위해 재해통계자료에서 유해위험요소의 발생빈도를

Table 6. Analysis of Vehicle-mounted MEWP occurrence accident data

No.	Number of cases	Rate(%)	No.	Number of cases	Rate(%)
F1	66	50.24	F10	2	1.6
F2	15	11.9	F11	4	3.2
F3	96	76.2	F12	10	7.9
F4	2	1.6	F13	4	3.2
F5	52	41.3	F14	4	3.2
F6	4	3.2	F15	9	7.1
F7	21	16.7	F16	9	7.1
F8	23	18.3	F17	9	7.1
F9	2	1.6	F18	1	0.8

수집하였다. 수집 결과 유해위험요소의 발생빈도 값은 Table 6과 같다.

전문가 평가 결과 중 유해위험요소의 발생도 값에 재해통계자료의 발생빈도를 대입하여 새로운 RPN 값과 위험우선순위를 도출한 후 기존에 결정된 RPN 값과 위험우선순위 간 유의미한 차이가 발생하는지 비교한다. 발생도 값 대입을 위한 재해통계자료는 유해위험요소 분류에 사용된 2011년부터 2020년까지 발생한 차량탑재형 고소작업대 관련 중대재해사례 126건을 이용한다.

### 3. 연구결과 및 토의

#### 3.1 전문가 설문조사 평가 결과

분류된 유해위험요소의 심각도, 발생도, 검출도의 위험등급 평가를 위해 사전 기준에 따라 선정된 전문가 4명을 대상으로 이메일을 활용한 설문조사를 실시하였다. 설문기간은 2022.09.01.~2022.09.14.(2주)로 이메일 발송 4건에 대해 4건의 설문지가 모두 회신되었다. 설문결과 전문가들이 평가한 유해위험요소별 위험등급 점수는 Table 7과 같다.

Table 8은 평가 점수를 퍼지 연산을 위해 유해위험요소별 소속 함수로 정리하여 나타낸 것이다. 왼쪽부터 순서대로 하한값, 중심값 1~2, 상한값을 표현한다.

Table 7. Scores on hazard factors by experts

No.	SME1			SME2			SME3			SME4		
	S	O	D	S	O	D	S	O	D	S	O	D
F1	H, H, L	H, H, L	VL, M, VL	M, M, VL								
F2	VH, H, L	H, L, M	H, M, L	H, H, M								
F3	H, H, L	H, M, L	M, H, VL	VH, M, VL								
F4	VH, VH, VH	VH, L, L	H, L, VL	VH, M, VL								
F5	H, H, M	H, L, L	VH, L, VL	VH, H, VL								
F6	L, M, L	M, L, M	VH, L, L	H, H, H								
F7	L, M, L	VH, VL, L	H, L, L	VH, H, M								
F8	M, H, L	L, H, VH	VH, M, L	M, M, H								
F9	VH, M, L	VH, VL, L	VH, VL, L	VH, H, H								
F10	H, H, L	H, M, L	M, M, L	H, L, L								
F11	VH, H, VH	VH, M, L	H, L, L	VH, H, L								
F12	VH, H, VH	VH, L, L	VH, L, L	VH, H, VL								
F13	VH, H, L	VH, L, M	VH, L, VL	VH, H, M								
F14	VH, H, L	VH, H, L	H, L, VL	VH, H, L								
F15	VH, H, L	VH, H, L	H, M, VL	VH, M, L								
F16	H, M, L	VH, L, L	VH, L, L	VH, H, VL								
F17	VH, H, L	VH, VL, L	VH, M, L	VH, M, H								
F18	L, L, L	L, VL, VH	H, L, VL	H, L, VL								

Table 8. Membership function of scores on hazard factors

No.	S	O	D
F1	VL, M, H, H	M, M, H, H	VL, VL, L, L
F2	H, H, H, VH	L, M, H, H	L, L, M, M
F3	M, H, H, VH	M, M, H, H	VL, VL, L, L
F4	H, VH, VH, VH	L, L, H, VH	VL, L, M, VH
F5	H, H, VH, VH	L, L, H, H	VL, VL, L, M
F6	L, M, H, VH	L, L, M, H	L, L, M, H
F7	L, H, VH, VH	VL, L, M, H	L, L, L, M
F8	L, M, M, VH	M, M, H, H	L, L, H, VH
F9	VH, VH, VH, VH	VL, VL, M, H	L, L, L, H
F10	M, H, H, H	L, M, M, H	L, L, L, L
F11	H, VH, VH, VH	L, M, H, H	L, L, L, VH
F12	VH, VH, VH, VH	L, L, H, H	VL, L, L, VH
F13	VH, VH, VH, VH	L, L, H, H	VL, L, M, M
F14	H, VH, VH, VH	L, L, H, H	VL, L, L, L
F15	H, VH, VH, VH	L, L, M, H	VL, L, L, L
F16	H, VH, VH, VH	L, L, M, H	VL, L, L, L
F17	VH, VH, VH, VH	VL, M, M, H	L, L, L, H
F18	L, L, H, H	VL, L, L, L	VL, VL, L, VH

유해위험요소별 소속 함수는 Table 5와 식 (1)~(3)에 의해 퍼지 언어규칙에 따라 수치화되어 사다리꼴 퍼지 연산자 값으로 표현되고 Table 9와 같이 나타난다.

Table 9. Fuzzy membership function of S, O and D of hazard factors

No.	S	O	D
F1	(3.75, 4.5, 5.75, 6.75)	(4.5, 5.5, 7, 8)	(0.5, 1, 2, 3)
F2	(6.5, 7.5, 8.5, 9.25)	(4.5, 5, 6.25, 7.25)	(2, 3, 4.5, 5.5)
F3	(5.75, 6.75, 8, 8.75)	(4.5, 5.5, 7, 8)	(0.5, 1, 2, 3)
F4	(7.5, 8.5, 9.5, 9.75)	(3.5, 4, 5, 5.75)	(3, 3.75, 5, 5.75)
F5	(7, 8, 9, 9.5)	(3.5, 4.5, 5.5, 6.5)	(1, 1.5, 2.75, 3.75)
F6	(4.5, 5.5, 6.75, 7.5)	(2.25, 3.75, 5, 6)	(2.25, 2.75, 4, 5)
F7	(5.75, 6.75, 7.75, 8.25)	(2.5, 3.25, 4.5, 5.5)	(1.5, 2.5, 3.75, 4.75)
F8	(3.75, 5.5, 6.25, 7)	(4.5, 5.5, 7, 8)	(4, 5, 6, 6.75)
F9	(8, 9, 10, 10)	(2.25, 2.75, 4, 5)	(2.25, 3.25, 4.25, 5.25)
F10	(5.25, 6.25, 7.5, 8.5)	(3.25, 4.25, 5.75, 6.75)	(1, 2, 3, 4)
F11	(7.5, 8.5, 9.5, 9.75)	(4, 5, 6.25, 7.25)	(2.75, 3.75, 4.75, 5.5)
F12	(8, 9, 10, 10)	(3.5, 4.5, 5.5, 6.5)	(2.5, 3.25, 4.25, 5)
F13	(8, 9, 10, 10)	(3.5, 4.5, 5.5, 6.5)	(1.75, 2.5, 4, 5)
F14	(7.5, 8.5, 9.5, 9.75)	(3.5, 4.5, 5.5, 6.5)	(0.75, 1.5, 2.5, 3.5)
F15	(7.5, 8.5, 9.5, 9.75)	(2.75, 3.75, 5, 6)	(0.75, 1.5, 2.5, 3.5)
F16	(7.5, 8.5, 9.5, 9.75)	(2.75, 3.75, 5, 6)	(0.75, 1.5, 2.5, 3.5)
F17	(8, 9, 10, 10)	(3, 3.75, 5.25, 6.25)	(2.25, 3.25, 4.25, 5.25)
F18	(3.5, 4.5, 5.5, 6.5)	(0.75, 1.5, 2.5, 3.5)	(2, 2.25, 3.25, 4)

### 3.2 퍼지-FMEA 분석 결과

퍼지 연산자 값은 식 (4)~(9)에 의해 심각도, 발생도, 검출도의 하한값(Left-hand)과 상한값(Right-hand)으로 표현하고, 식 (10)~(13)을 이용하여 RPN 값(이하 F-RPN)과 위험우선순위 결과를 계산하여 Table 10에 나타냈다. 위험우선순위는 값이 클수록 해당 유해위험요소로 인해 중대재해가 발생할 영향이 크다.

분석 결과 18가지 유해위험요소의 F-RPN 평균 중심 값은 0.707로 나타났다. F12(정격하중 초과 적재)와 F13(아웃트리거 미설치 또는 불량설치)은 F-RPN의 중심 값이 각각 0.823, 0.822로 평균 중심 값과 큰 차이를 보였으며, 가장 높은 위험우선순위 결과로 나타났다. F17(와이어로프 노후 등으로 인한 파단)과 F9(차량 구조 불법 개조)의 F-RPN 중심 값 또한 0.818과 0.807로 높은 위험우선순위를 나타냈다. 나머지 위험우선순위 결과는 F11(방호장치 기능 임의해제 등으로 인한 작동 불능) > F14(방호장치 미설치) = F4(안전인증 · 검사 미 실시) > F15(차량 전도방지조치 불량) = F16(장비 최대 작업 반경 초과하여 사용) 등으로 나타났다. 위험우선순위 결과를 자세히 분석하면 다음과 같다.

첫째. 가장 중요한 유해위험요소로 정격하중 초과 적재가 결정된 이유는 차량탑재형 고소작업대의 경우 간판, 자재 등을 운반하여 고층에서 설치 · 보수하는 작업이 많이 사용되기 때문으로 추측할 수 있다. 따라

서 근로자들이 최대한 많은 자재를 적은 횟수로 운반하기 위하여 작업대 적재하중을 감지하는 방호장치인 로드셀의 기능을 임의 해제하거나 탈거하는 경우 반복하중에 의한 선회부 볼트 파단, 와이어로프 파단 등 설비 결함의 원인이 되고, 작업대가 넘어지는 등 재해로 연결될 가능성이 크다. 또한 정격하중을 초과하여 자재를 적재하는 경우 작업대 공간 부족과 작업자 시야 방해로 인하여 근로자가 불편하게 이동 및 작업하여 추락할 가능성이 크다. 따라서 해당 유해위험요소로 인하여 다른 유해위험요소가 발생할 가능성이 크고 이는 중대재해로 연결되는 연쇄작용을 한다고 볼 수 있다.

둘째. 아웃트리거와 와이어로프와 관련한 유해위험요소도 위험우선순위가 모두 높게 나타났다. 아웃트리거의 경우 작업 특성상 사전에 충분한 작업공간을 확보하지 못해 최대로 확장하여 설치하지 않는 경우가 많고, 지반 침하 정도와 차량 수평도를 확인하지 않아 아웃트리거를 최대로 확장했음에도 장비가 전도되는 경우가 있다. 또한 와이어로프의 경우 대부분이 붐대 프레임 안에 있어 육안으로 보이지 않아 손상상태를 확인하기 힘들어 교체시기를 누락하여 파단되는 경우가 있다. 따라서 해당 유해위험요소가 발생할 경우 차량 구조부의 파손과 차량 전도 등의 근본원인으로 작용하고, 중대재해로 연결될 가능성이 크다.

Table 10. F-RPN calculation and ranking of hazard factors

No.	Severity		Occurrence		Detection		F-RPN		Centriod F-RPN	Ranking
	Left-hand	Right-hand	Left-hand	Right-hand	Left-hand	Right-hand	Left-hand	Right-hand		
F1	4.125	6.25	5	7.5	0.75	3	0.420	0.639	0.529	17
F2	7	8.875	4.75	6.75	2.5	5	0.636	0.825	0.730	11
F3	6.25	8.375	5	7.5	0.75	2.5	0.579	0.793	0.686	12
F4	8	9.625	3.75	5.375	3.375	5.375	0.705	0.864	0.784	6
F5	7.5	9.25	4	6	1.25	3.25	0.663	0.836	0.749	10
F6	5	7.125	3	5.5	2.5	4.5	0.451	0.666	0.558	16
F7	6.25	8	2.875	5	2	4.25	0.548	0.725	0.636	13
F8	4.625	6.625	5	7.5	4.5	6.375	0.470	0.681	0.575	15
F9	8.5	10	2.5	4.5	2.75	4.75	0.733	0.881	0.807	4
F10	5.75	8	3.75	6.25	1.5	3.5	0.519	0.743	0.631	14
F11	8	9.625	4.5	6.75	3.25	5.125	0.714	0.883	0.798	5
F12	8.5	10	4	6	2.875	4.625	0.747	0.900	0.823	1
F13	8.5	10	4	6	2.125	4.5	0.746	0.899	0.822	2
F14	8	9.625	4	6	1.125	3	0.703	0.865	0.784	6
F15	8	9.625	3.25	5.5	1.125	3	0.695	0.858	0.776	8
F16	8	9.625	3.25	5.5	1.125	3	0.695	0.858	0.776	8
F17	8	10	3.375	5.75	2.75	4.75	0.740	0.896	0.818	3
F18	4	6	1.125	3	2.125	3.625	0.347	0.487	0.441	18

### 3.3 퍼지-FMEA 신뢰성 검증을 위한 비교 결과

퍼지-FMEA기법의 신뢰성을 검증하기 위해 기존 전문가가 평가한 점수 중 심각도와 검출도, 실제 재해통계자료에서 분석한 유해위험요소의 발생도 값을 대입하여 새로운 RPN 값(이하 D-RPN)과 위험우선순위를 도출하였다. 이에 따른 결과 값은 Table 11과 같다.

분석 결과 18가지 유해위험요소의 D-RPN 평균 중심 값은 0.678로 나타났다. F12(정격하중 초과 적재)와 F17(와이어로프 노후 등으로 인한 파단)이 D-RPN이 각각 0.7901, 0.790으로 평균 중심 값과 큰 차이를 보였으며, 가장 높은 위험우선순위 결과로 나타났다. F9(차량 구조 불법 개조)와 F13(아웃트리거 미설치 또는 불량설치)의 D-RPN 중심 값 또한 0.789와 0.788로 높은 위험우선순위로 나타났다. 나머지 위험우선순위 결과는 F15(차량 전도방지조치 불량) = F16(장비 최대 작업 반경 초과하여 사용) > F4(안전인증·검사 미실시) > F11(방호장치 기능 임의해제 등으로 인한 작동불능) 등으로 나타났다.

재해통계자료를 분석한 결과에서는 F3(개인보호구 미착용), F1(작업계획서 미작성)과 F5(작업대 안전난간대 미설치)의 발생도가 가장 높게 나왔으나 퍼지-FMEA 분석 결과 D-RPN 값과 위험우선순위는 다른 유해위험요소보다 비교적 낮게 나타났다. 이는 산업안전 전문가

Table 11. D-RPN and ranking of hazard factors based on accident data

No.	D-RPN		Centriod D-RPN	Ranking
	Left-hand	Right-hand		
F1	0.427	0.588	0.507	16
F2	0.599	0.764	0.681	12
F3	0.638	0.796	0.717	11
F4	0.683	0.827	0.755	7
F5	0.664	0.811	0.737	10
F6	0.428	0.614	0.521	15
F7	0.547	0.691	0.619	13
F8	0.417	0.591	0.504	17
F9	0.723	0.856	0.789	3
F10	0.488	0.683	0.585	14
F11	0.683	0.826	0.754	8
F12	0.724	0.855	0.7901	1
F13	0.722	0.822	0.788	4
F14	0.678	0.818	0.748	9
F15	0.678	0.819	0.7485	5
F16	0.678	0.819	0.7485	5
F17	0.723	0.856	0.790	2
F18	0.343	0.516	0.429	18

Table 12. Comparison of F-RPN Ranking and D-RPN Ranking

No.	F-RPN Ranking	D-RPN Ranking	No.	F-RPN Ranking	D-RPN Ranking
F1	17	16	F10	14	14
F2	11	12	F11	5	8
F3	12	11	F12	1	1
F4	6	7	F13	2	4
F5	10	10	F14	6	9
F6	16	15	F15	8	5
F7	13	13	F16	8	5
F8	15	17	F17	3	2
F9	4	3	F18	18	18

들은 다른 유해위험요소보다 재해예방 측면에서 심각도와 검출도를 낮게 평가하였기 때문인데 작업 전 충분한 사전점검이나 작업 중 관리감독을 통하여 충분히 예방할 수 있고, 해당 유해위험요소가 중대재해를 발생시키는 근본원인보다는 재해가 발생할 경우 위험성을 낮추기 위한 안전대책의 개념이라고 해석하고 있음을 추측할 수 있다.

본 연구에 적용한 퍼지-FMEA기법의 신뢰성 검증을 위하여 전문가 평가결과 도출한 F-RPN의 위험우선순위와 실제 재해 데이터를 대입하여 도출한 D-RPN의 위험우선순위를 비교한 내용은 Table 12와 같다. 비교 결과 F-RPN과 D-RPN 모두 F12(적재하중 초과 적재)가 가장 높은 위험우선순위로 나타났다. 또한 대부분의 유해위험요소의 위험우선순위도 기본적으로 유사하게 나타났다. 따라서 퍼지-FMEA 모델의 효과 및 정확성, 실용성을 다시 입증하였다. 그러나 F11(방호장치 기능 임의해제 등으로 인한 작동불능), F14(방호장치 미설치), F15(차량 전도방지조치 불량), F16(장비 최대 작업 반경 초과하여 사용)에서 유의미한 차이가 발생했는데, 그 원인으로서는 두 가지가 있다.

첫째, 심각도, 발생도, 검출도의 가중치 선정에 따른 영향이다. 본 연구에서는 사망사고 예방에 초점을 두고 Carmignani<sup>19)</sup>의 연구에서 쌍별 비교를 통해 도출된 가중치 정규화 고유벡터 [0.5396, 0.2970, 0.1634] 값을 적용하여 심각도를 발생도보다 약 2배, 검출도보다 약 3배 중요하게 평가하였기 때문에 중대재해사례에서 도출한 발생도를 대입한 결과가 D-RPN 값과 위험우선순위에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 추측할 수 있다.

둘째, 재해통계자료 수집을 10개년으로 선정하였기에 해당 기간 동안 F15(차량 전도방지조치 불량), F16(장비 최대 작업 반경 초과하여 사용)이 다른 위험요소보다 많이 발생하여 단순하게 위험우선순위 상승을 나타낸 것으로 추측할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 차량탑재형 고소작업대 관련 주요 유해위험요소의 위험우선순위를 결정하기 위해 기존 FMEA의 단점을 보완한 퍼지-FMEA기법을 이용하였다. 그리고 퍼지-FMEA기법의 신뢰성을 검증하기 위해 실제 사고데이터를 대입하여 도출한 위험우선순위 결과와 비교하였다. 연구결과 적재하중 초과 적재, 아웃트리거 미설치 또는 불량설치, 와이어로프 노후 등으로 인한 파단, 차량 구조 불법 개조 순으로 유해위험요소의 위험우선순위가 높게 나타났다.

본 연구를 통해 결정된 주요 유해위험요소의 위험우선순위는 향후 차량탑재형 고소작업대 중대재해 예방을 위한 안전대책을 수립하는 경우 우선으로 예방해야 할 순서를 제시하는 중요한 정보로 제공될 수 있고, 중·소규모 사업장 현업 종사자들에게 기초자료로 활용될 수 있다. 또한 퍼지-FMEA기법은 재해예방 측면에서 차량탑재형 고소작업대 뿐만 아니라 다양한 위험기계기구등에 적용하여 유해위험요소의 위험우선순위를 결정할 수 있을 것이다.

본 연구의 목적은 안전관리가 미흡한 중소규모 사업장의 재해예방이므로 기본적인 가이드라인을 제시하고자 산업안전기사 자격증을 보유한 안전인증·검사기관에서 5년 이상 근무한 현업종사자들을 대상으로 전문가를 선정하여 평가결과에 동일한 가중치를 부여하였다. 따라서 목적에 따라 전문가 선정기준과 전문가 평가결과 등이 달라질 경우 위험우선순위 결과도 달라질 수 있고, 정부기관 및 사업체 등에서 다양한 관점과 목적으로 재분석 시 결과가 더 명확하고 세분화될 수 있을 것이다. 또한 유해위험요소간의 연계성은 배제하고 유해위험요소 고유의 위험성만을 평가하여 위험우선순위를 결정하였기에 추후 연구에서는 유해위험요소간의 연계성, 작업환경 등을 복합적으로 고려하는 방향이 필요할 것으로 판단된다.

**Acknowledgement:** This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. NRF-2021R1F1A1059207).

#### References

1) J. H. Lee, "Review of Safety Measures through Analysis of Accidents on the Vehicle-mounted MEWP(mobile Elevated Work Platforms)", Journal of the Korea Institute

of Construction Safety, Vol. 1, No. 1, pp. 47-56, 2018.

2) Korea Occupational Safety & Health Agency, "The Mobile Elevated Work Platform Safety Management Manual", 2022.

3) K. D. Lee, J. H. Shin and J. -Y. Lim, "Critical Hazard Factors in the Risk Assessments of Industrial Robots: Causal Analysis and Case Studies", Safety and Health at Work, Vol. 12, No. 4, pp. 496-504, 2021.

4) Office for Official Publications of the European Communities Luxembourg, "Guidance on Risk Assessment at work", 1996.

5) J. H. Cho, "A Empirical Study on Safety Improvement for Vehicle-mounted Elevated Work Platform", Dept. of Industrial and Management Engineering, Graduate School Myongji University Doctor Thesis, 2014.

6) M. C. Han, "A Study on Securing Safety to Prevent Safety Related Accident of MEWP (Mobile Elevated Work Platform)", Dept. of Safety Engineering, Graduate School Seoul National University of Science and Technology Master Thesis, 2014.

7) Y. T. Yoo, S. E. Seo, H. J. You and S. K. Kang, "A Study on the Safety Improvement of Structural Weakness Using Accident Analysis for Vehicle-Mounted MEWP", Journal of the Korea Safety Management & Science, Vol. 19, No. 1, pp. 15-25, 2017.

8) D. H. Choi and J. H. Kim, "A Fatigue Analysis Study on the Fractured Fixing Bolts of Mobile Elevated Work Platforms", J. Korean Soc. Saf., Vol. 34, No. 5, pp. 1-6, 2019.

9) Korea Agency for Technology and Standards, "KS B ISO 12100:2010", 2010.

10) R. E. Mcdermott, The Basics of FMEA, Productivity, 1996.

11) K. D. Lee, "A Study on the Development and Application of Risk Assessment Model for Collaborative Tasks of Robots", Dept. of Safety Engineering, Graduate School Seoul National University of Science and Technology Doctor Thesis, 2022.

12) A. López-Arquillos, J. C. Rubio-Romero, M. Suárez-Cebador and M. del Carmen Pardo-Ferreira, "Comparative risk assessment of Vehicle Maintenance Activities: Hybrid, Battery Electric, and Hydrogen Fuel Cell Cars", International Journal of Industrial Ergonomics, Vol. 47, pp. 53-60, 2015.

13) M. R. Hallowell and J. A. Gambatese, "Qualitative Research: Application of the Delphi Method to CEM



- Research” Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 136, No. 1, pp. 99-107, 2010.
- 14) S. H. Na, G. E. Lee and J. M. Koo, “Risk Analysis for the Rotorcraft Landing System Using Comparative Models Based on Fuzzy”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 36, No. 2, pp. 49-57, 2021.
  - 15) Y. M. Wang, K. S. Chin, G. K. K. Poon and J. B. Yang, “Risk Evaluation in Failure Mode and Effects Analysis using Fuzzy Weighted Geometric Mean”, Expert Systems with Applications, Vol. 136, No. 2, pp. 1195-1207, 2009.
  - 16) Stamatis D. H, Failure Mode and Effect Analysis, ASQ, 2003.
  - 17) Z. Yang, B. Xu, F. Chen, Q. Hao, X. Zhu and Y. Jia, “A New Failure Mode and Effects Analysis Model of CNC Machine Tool using Fuzzy Theory”, The 2010 IEEE International Conference on Information and Automation, pp. 582-587, 2010.
  - 18) J. H. Park, C. S. Park and S. E. Ahn, “Aircraft Operational Risk Assessment Model using Fuzzy-FMEA”, Journal of The Korean Institute of Plant Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 67-75, 2016
  - 19) G. Carmignani, “An Integrated Structural Framework to Cost-based FMECA: The Priority-cost FMECA”, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 94, No. 4, pp. 861-871, 2009.