

위험물질 취급 기계부품 제조현장에서의 공정 잠재위험 분석법 선정에 관한 연구

임채윤, 김채수*
동아대학교 산업경영공학과

A Study on the Selection of Process Risk Assessment Method for Machine Parts Manufacturing Companies Handling Hazardous Materials

Chae-Yoon Lim, Chae-Soo Kim*
Industrial & Management Systems Engineering, Dong-A University

요약 우리나라는 1995년부터 공정안전관리(PSM: Process Safety Management) 제도를 도입하여 시행하고 있으나 제조 공정에서의 화재, 폭발, 유독물질 누출 등의 사고는 크게 줄어들지 않고 지속적으로 발생하고 있다. 이는 중대사고 위험성이 큰 제조공정에서 발생 가능한 잠재위험성의 사전 파악이 미흡한 것도 중요한 요인으로 알려져 있다. 공정의 잠재위험성을 사전에 평가하기 위하여 산업안전보건법에서는 11가지의 공정위험성 분석법을 제시하고 있는데, 아쉽게도 분석방법이 업종별 특성을 고려하여 분류되어 있지 않음에 따라 분석자 본인의 개인적 선호도 혹은 활용 경험 여부에 따라 분석방법을 임의적으로 선택하여 실시하므로 업종별로 제조공정에 내재된 잠재위험의 특성이 충분히 반영되지 못하는 결과를 초래하고 있다. 본 연구는 산업유해 위험물질을 취급하는 기계부품 제조 현장에서의 중대사고 예방을 위해서 어떤 분석방법이 종합적인 관점에서 더 효과적인가를 실증분석하였다. 평가를 위하여 다기준의사결정방법(AHP: Analytic Hierarchy Process)분석을 활용하였다. 국내 소재 기계부품 제조업에서 안전관리 업무를 직간접적으로 수행한 경험자를 대상으로 총 60부의 설문지를 배포하여 27부를 회수하였으며, 이를 평가한 결과는 공정위험분석법(33.4%)이 가장 높은 가중치를 보였고, 그 다음은 원인결과분석법(17.7%), 그리고 이상위험도분석법(14.8%) 순이었다.

Abstract The Process Safety Management (PSM) system has been introduced and implemented in Korea since 1995. But, accidents such as fires, explosions, and leaks of toxic substances during the manufacturing process have not significantly decreased and are continuously occurring. An important factor affecting this increase is the insufficient understanding of the potential risks in the manufacturing process. The Occupational Safety and Health Act suggests 11 process risk analysis methods to evaluate the potential risks of a process in advance. Unfortunately, these analysis methods are not classified according to the characteristics of each manufacturing process. In this study, the Analytic Hierarchy Process (AHP) method was used, and the 'awareness of the possibility of occurrence' and 'awareness of severity' functions that each analysis method may have, and the 'derivation of improvement plan' function for the prevention of serious accidents were used as the evaluation criteria. A total of 60 questionnaires were distributed to the safety management personnel in companies manufacturing machinery parts, and 27 copies were collected back. The evaluation results indicated that the PHR (Process Hazard Review) method showed the highest (33.4%) weight, followed by the CCA (Cause and Consequence Analysis) method (17.7%) and the FMECA (Failure Modes Effects and Criticality Analysis) method (14.8%).

Keywords : Industrial Hazardous and Dangerous Materials, Safety Management, AHP, PSM, Accident Risk Assessment

*Corresponding Author : Chae-Soo Kim(Dong-A Univ.)

email: cskim@dau.ac.kr

Received September 3, 2021

Accepted November 5, 2021

Revised October 12, 2021

Published November 30, 2021

1. 서론

우리나라는 1995년부터 공정안전관리(PSM: Process Safety Management) 제도를 도입하여 시행하고 있으나 제조 공정에서의 화재, 폭발, 유독물질 누출 등의 사고는 크게 줄어들지 않고 지속적으로 발생하고 있다. 이는 중대사고 위험성이 큰 제조공정에서 발생 가능한 잠재위험성의 사전 파악이 미흡한 것도 중요한 요인으로 알려져 있다. 공정의 잠재위험성을 사전에 평가하기 위하여 산업안전보건법에서는 11가지의 공정위험성 분석법을 제시하고 있는데, 아쉽게도 분석방법이 업종별 특성을 고려하여 분류되어 있지 않음에 따라 분석자 본인의 개인적 선호도 혹은 활용 경험 여부에 따라 분석방법을 임의적으로 선택하여 실시하므로 업종별로 제조공정에 내재된 잠재위험의 특성이 충분히 반영되지 못하는 결과를 초래하고 있다. 특히 최근 산업시설의 다양화 및 융복합화로 산업 현장에서 취급하는 유해 위험 물질들도 매우 다양해지고 있다. 첨단 제품의 생산일수록 이런 물질의 활용이 증가하므로, 반도체 관련 산업이 성장하는 우리나라를 비롯한 중국, 대만 등에서도 이러한 물질의 저장, 운반, 사용, 폐기 등에 대한 세심한 취급이 요구되고 있다 [1]. 우리나라도 중화학공업이나 첨단 전자산업이 발전하면서 이러한 유해 위험물질이 대량으로 필요한 산업현장이 많아졌으며, 이에 따라서 취급상의 화재, 폭발, 누출 사고가 끊임없이 발생하고 있다[2].

이러한 중대 산업사고를 예방하고자 국제사회는 관련 법규 및 지침을 마련하여 적용하고 있는데, 공정안전관리(PSM: Process Safety Management) 제도가 중대 산업사고를 예방하는 대표적인 국제 표준이다. 이들 위험물질을 관리하는 IPCS(International Program Chemical Safety)를 비롯한 국제기구들은 중대 산업재해 예방 프로그램과 지침을 준비하였고, 세계 주요 국가들은 예방관리 체계를 도입하게 되었다[3]. 우리나라도 1995년 1월 5일 PSM 제도를 도입(산업안전보건법 제 49조)하여 1996년 1월부터 시행하고 있으나, 여전히 제조현장에서는 유해 위험물질 취급으로 인한 중대사고가 끊이지 않고 지속적으로 발생하고 있다. 이 같은 PSM 제도를 시행하고 있는에도 중대사고가 발생하는 이유 중에는 공정의 잠재 위험성 요인에 대한 분석이 충분하지 못하다는 지적과도 연관성을 갖는다[4].

이 같은 연구 한계에 따라 본 연구에서는 업종별로 취급하는 유해 위험물질의 종류와 양이 각기 다르며 공정의 특성 또한 매우 상이하다는 관점에서, 공정의 잠재 위

험성 분석은 업종별로 분류하여 실시하는 것이 요구된다. 따라서 공정 잠재위험 분석 단계에서 사용하는 다기준의 사결정 방법의 적용을 통해 기계부품 제조 공정을 대상으로 한 AHP 기반의 공정위험성 분석방법을 적용할 필요가 있다.

이러한 필요성에 따라 AHP법을 적용한 7가지의 공정 잠재위험 분석 방법에 대한 가중치를 산출하여 유해위험 물질 취급 기계부품 사업장에 가장 적합한 분석방법을 선정하여 산업적 시사점과 학제적 의의를 제안하는 데 본 연구의 목적을 갖는다.

2. 문헌고찰

2.1 공정안전관리(PSM)

PSM은 유해 위험물질의 화재, 폭발, 독성물질 누출 등으로 인한 사업장과 인근지역의 큰 피해를 줄 수 있는 중대 산업사고를 예방하기 위한 차원의 공장 내 12가지 물질, 인적, 관리적 요소에 대한 체계적인 안전관리활동으로 정의된다. 유해 위험물질 취급 사업장은 물질 취급 시에 각종의 사고위험이 잠재되어 있으며, 이들 사고는 발생빈도는 낮지만 심각도가 커서 중대 산업사고가 될 가능성이 높기 때문에 이를 예방 및 관리하여 중대 산업사고가 되지 않도록 하는 것이 PSM 제도의 목적이다[5]. PSM 제도는 중대 산업사고 위험성이 큰 유해 위험설비 보유 사업장에 대해서는 안전 이행계획서인 공정 안전보고서를 작성하도록 하고, 사업장의 최고경영자를 포함한 해당 시설의 모든 구성원이 보고서의 내용을 이행하도록 함으로써 자율적이고 체계적으로 중대 산업사고를 예방할 수 있다[6].

현재 공정안전관리(PSM) 제도를 적용하고 있는 위험물질 취급제조현장에서는 공정안전보고서의 구성과 공정 안전자료를 활용케 되는데 고용노동부의 산업안전보건법에 따르면 공정안전보고서는 크게 공정안전자료, 공정 위험성평가, 안전운전계획, 비상조치계획으로 구성된다. 여기서 공정안전자료는 해당 사업장에서 사용하는 모든 유해위험 물질의 관리에 관련되는 정보를 기록하는 것을 말하며, 상세 요구 항목은 다음과 같다.

- ① 제출대상 유해위험물질의 목록과 물질안전보건자료
- ② 동력기계목록과 장치, 설비, 배관 등의 명세서
- ③ 공정설명과 공정흐름도, 공정 배관 계장도
- ④ 건물 전체 및 설비의 배치도면 등과 내화구조, 소화설비·화재탐지 및 경보·가스누출감지 경보기 등

의 설치계획, 세척·세안 시설 및 안전 보호장구 설치계획, 국소배기장치 설치계획

- ⑤ 폭발위험지역 구분 및 전기 단선도
- ⑥ 안전설계 제작 및 설치관련 지침서 등[2].

2.2 공정위험성 분석방법 및 활용

공정위험성분석은 신규공정 및 기존공정의 잠재위험성과 운전상의 문제점을 찾아내어 위험요소를 줄이기 위한 개선대책을 제시하고, 이를 이행하여 공정 안정성을 확보하기 위함이다[7]. 공정위험성분석 결과를 사업장의 잠재적 위험 요소를 확인하여 안전운전을 위한 안전운전계획을 세우는데, 활용된다. 본 분석을 위해 운전 지침서, 설비 점검 및 유지보수 계획, 안전작업허가, 가동 전 점검 지침, 변경요소 관리 계획 등 안전운전에 필요한 모든 사항을 작성하여 분석한다. 또한 비상 상황 발생을 대비하여 비상조치계획도 수립해야 하는데, 비상조치를 위한 장비와 인력보유현황, 그리고 사고 발생 시 비상 연락체계와 비상조치를 위한 조직의 임무와 수행 절차 등을 보고서에 포함한다[8].

이 같은 공정위험성분석은 공정에 존재하는 위험에 대하여 평가하는 것으로, 크게 두 가지의 접근 방법이 있다. 첫째는 경험과 규정을 따르는 접근 방법으로서 수년간의 경험으로부터 최적이라고 증명된 절차와 규정을 따르는 것이다. 이는 지금까지의 사고 상황들을 분석하여 얻은 결과이기 때문에 위험을 확인하고 조절하기 위해서는 매우 중요한 단계이다. 둘째, 예측 위험요소 평가 방법은 새로운 공정이나 설계, 설비 또는 절차가 도입되는 경우에 필요한 단계로써 기존의 경험이 없기 때문에 사건의 발생 확률과 그 사건의 영향도 등을 평가한다[9].

현재 산업안전보건법에서 정의하고 있는 공정 위험성 평가 방법은 업종 및 사업장의 규모, 작업의 종류 등에 따라 가장 적절한 방법을 선택하도록 하고 있으며[10], 본 연구분석을 위해 공정위험분석법(PHR: Process Hazard Review)의 기존설비 또는 공정안전보고서를 제출하여 심사 받은 설비에 대하여 설비의 설계, 건설, 운전 그리고 정비의 경험을 바탕으로 위험성을 평가하고 분석하는 방법을 적용하여 분석하고자 한다.

2.3 위험물질 취급 기계부품제조업에서의 잠재위험성 분석적용

상기의 공정위험성분석 방법이 존재하고, 국내에서는 PSM이 적용되고 있음에도 불구하고 사고는 Table 1과

같이 지속적으로 발생하고 있으며, 이를 꺾은선 그래프로 표시하면 Fig. 1과 같다. 2016년에 PSM이 도입 적용되었으나 재해율은 도입 이전과 비교하여 거의 차이가 없으며, 근로자 1만 명 당 사망자 수를 나타내는 사망만인율은 2016년 이후 오히려 증가 추세로 보인다. 이러한 추이가 발생하는 이유는 여러 측면으로 해석될 수 있으나, 많은 전문가들은 공정의 잠재적 위험성을 분석하는 단계에서 위험 요소가 제대로 파악되지 못하였거나 위험물질별 성상을 분리한 분석이 불충분한 것으로 해석한다[4,8-10].

Table 1. Accidents and mortality by year

Year	Number of workers	Number of casualties	Number of deaths	Accident rate	Mortality per 10000 persons
2005	11,059,193	84,411	2,493	0.77	2.25
2006	11,688,797	89,910	2,453	0.77	2.1
2007	12,528,879	90,147	2,406	0.72	1.92
2008	13,489,986	95,806	2,422	0.72	1.8
2009	13,884,927	97,821	2,181	0.7	1.57
2010	14,198,748	98,645	2,200	0.69	1.55
2011	14,362,372	93,292	1,860	0.65	1.3
2012	15,548,423	92,256	1,864	0.59	1.2
2013	15,449,228	91,824	1,929	0.59	1.25
2014	17,062,308	90,909	1,850	0.53	1.08
2015	17,968,931	90,129	1,810	0.5	1.01
2016	18,431,716	90,656	1,777	0.49	0.96
2017	18,560,142	89,848	1,957	0.48	1.05
2018	19,073,438	102,305	2,142	0.54	1.12
2019	18,725,160	109,242	2,020	0.58	1.08
2020	18,974,513	108,379	2,062	0.57	1.09

Source: Ministry of Employment and Labor

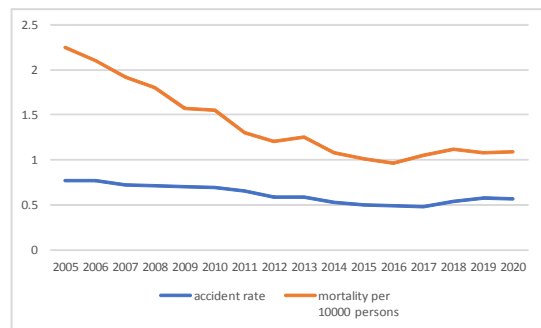


Fig. 1. Accidents and mortality trend by year

3. 연구방법

3.1 다기준의사결정방법(AHP: Analytic Hierarchy Process, 이하 AHP)

AHP(Analytic Hierarchy Process) 분석이란 의사결정계층을 구성하여 상위계층에 속하는 하위 요인들 간의 상대적 중요도를 평가하여 하위 요인들 간의 우선순위를 도출하여 의사결정을 하는 다기준 의사결정 기법으로 1970년대 초반에 [11]에 의해서 개발되었다. AHP 분석은 4가지 공리를 기반으로 전개되는데, 첫째로는 역수성(reciprocal)으로 동일 계층에 있는 두 요인은 짝을 지어 비교가 가능해야 하며, 선호의 강도가 표현 가능해야 한다. 만약 A가 B보다 x 배 선호된다면 B는 A보다 $(1/x)$ 배 선호된다고 볼 수 있다. 두 번째는 동질성(homogeneity)에 관한 것으로, 중요도는 제한된 범위 내에서 정해진 척도에 의해 표현된다. 세 번째는 한 계층의 요소들은 인접한 상위계층에 종속되어야 한다는 종속성(dependency)이며, 네 번째는 의사결정의 목적과 관련된 사항을 계층이 완전히 포함한다고 가정하는 기대성(expectation)이다.

공정위험성 분석을 효과적으로 수행하기 위해서는 흐름생산공정, 제관용접공정, 기계가공 공정 등과 같이 공정의 특성에 따라서 잠재위험 요인이 차별화될 수 있으므로, 이러한 관점에서 제조업종별로 적합한 공정위험성 분석법을 알아내고 해당 업종에 맞추어 선택적으로 사용하는 것이 효과적이다. 따라서 본 연구에서는 AHP법을 적용하여 여러 유형의 공정위험성 분석방법 중에서 기계부품 제조 사업장에 가장 적합한 공정위험성분석법을 선정하였다.

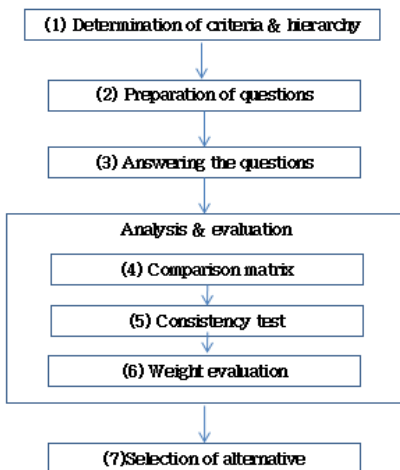


Fig. 2. AHP deployment procedure

AHP법을 전개하는 일반적인 절차인 Fig. 2와 같은 순서로 진행한다.

3.2 평가기준과 계층도

(1) 평가기준(criterion)

평가 대상인 7가지의 평가방법 각각이 위험성평가라는 관점에 상대적으로 ‘좋다’ 혹은 ‘좋지 않다’를 판단하는 평가기준으로서는 평가방법들이 가지는 중대사고의 ‘발생가능성 인지’ 및 피해의 ‘심각성 인지’ 기능, 그리고 중대사고 예방을 위한 ‘개선안 도출’ 기능을 선정하였다.

첫 번째 기준은 평가자가 해당 평가방법을 이용하여 평가를 시행하는 과정이나 결과분석을 통하여 해당 공정에 중대 사고가 발생할 가능성 여부를 얼마나 잘 인지할 수 있는지를 판단하는 것이고, 두 번째 기준은 사고가 발생할 경우에 그 사고로 인한 피해의 정도를 얼마나 잘 인지할 수 있는지를 판단하는 것이며, 마지막 기준은 평가를 통하여 개선방안이 도출될 가능성이 얼마나 있는가를 판단하는 것이다.

(2) 계층도

산업안전보건법에는 전술한 바와 같이 11가지의 다양한 평가방법이 정의되어 있지만, 그 중에는 특성이 유사한 평가방법도 있으며, 특정 방법론은 현실적으로 적용하기 어려운 분석법도 있으므로 본 연구에서는 소개된 11가지의 평가방법을 Table 2와 같이 7가지로 제한하여 분류하였고, 이를 평가대상 분석법으로 선정하여 계통도를 나타내면 Fig. 3과 같다.

Table 2. Process risk assessment method

Evaluation alternatives	Contraction
Dow and mond indices	DMI
Preliminary hazard analysis	PHA
Precess hazard review	PHR
Hazard and operability studies	HAZOP
Failure modes effects and criticality analysis	FMECA
Cause-consequence analysis	CCA
Human error analysis	HEA

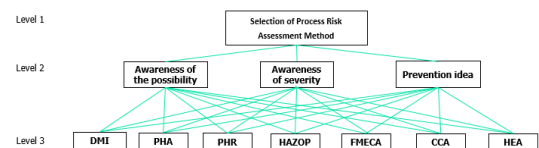


Fig. 3. AHP deployment procedure

Table 3. Demographic characteristics of respondents

Variables		Frequency	Ratio(%)
Gender	Male	26	96.3
	Female	1	3.7
Age	Under 30s	0	0
	30s	5	18.5
	40s	13	48.1
	Over 50s	9	33.3
Occupation	Construction manager	3	11.1
	Safety manager	6	22.2
	Foreman	5	18.5
	HG Safety management team	3	11.1
	Process manager	10	37
Career	Less than a year	0	0
	1 to 10 years	3	11.1
	10 to 20 years	14	51.9
	More than years	10	37

3.3 설문조사 및 쌍대비교행렬

설문조사는 2020년 12월 20일부터 12월 30일까지 실시되었으며, 유해 위험설비를 보유한 국내의 기계부품 제조 기업에 재직하였거나 재직 중인 안전관리 직무 경험자를 대상으로 실시하였다. 제조현장 부서는 생산책임자, 작업반장, 그리고 공정담당자가 포함되었고, 안전관리 부서는 안전관리책임자와 안전관리자가 포함되었다. 설문지는 총 60부 배포하여 27부를 회수하였고, 응답자의 일반현황을 Table 3과 같이 성별, 연령, 직종, 경력별로 층별 하였다. 안전관리 업무의 특성상 대다수가 남자 응답자였고, 40~50대의 경력 10년 이상자의 응답 비율이 높았다.

계층도에 표시된 평가기준과 평가대상 각각의 상대적 중요도(가중치)를 평가하기 위하여 계층별로 쌍대비교를 수행하기 위한 설문지를 개발했으며, Fig. 4는 평가기준인 '발생가능성인지'와 '심각성인지'를 쌍대비교하기 위한 설문지인데, 쌍대비교 결과를 계량화하기 위한 평가 척도로 Table 4의 9점 척도를 활용하였으며, '발생가능성인지' 평가기준이 '심각성인지' 평가기준에 비하여 조금 더 중요하다는 의미이다.

Question	Which of 'awareness of the possibility,' and 'awareness of severity,' criterion do you think is more important(better) for process risk assessment?									
awareness of the possibility	5	4	3	2	1	2	3	4	5	awareness of severity

Fig. 4. Sample questionnaire

Table 4. Scale for pairwise comparisons

Relative important	Definition	Explanation
1	Equal value	Two requirements are of equal value
3	Slightly more value	Exprience slightly favours one requirement over another
5	Essential or strong value	Exprience strongly favours one requirement over another
7	Very storong value	A requirement is strongly favoured and its dominance is demonstrated in practice
9	Extreme value	The evidence favouring one over another is of the highest possible order of affirmation
2,4,6,8	Intermediate values between two adjacent judgments	When compromise is needed
Reciprocals	Reciprocals for inverse comparison	

응답자별로 동일 계층의 설문 응답 결과들을 종합하면 쌍대비교행렬로 표현할 수 있으며, 아래의 쌍대비교행렬(A)은 본 연구에서 실시한 계층 2에 대한 특정 응답자의 설문 응답결과를 쌍대비교행렬로 표현한 예시이다.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{3} & 1 & 3 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

3.4 일관성검증

회수된 설문지의 응답 내용에 대한 논리적인 모순을 분석하기 위하여 일관성(Consistency) 검증이 필요하며, 이는 AHP 분석 결과의 신뢰성 확보를 위해 꼭 필요한 과정이다. 일관성 검증의 지표로는 일관성 비율(Consistency Ratio: CR)을 사용하는데, 일관성 지수(Consistency Index : CI)를 평균 무작위지수(Random Index : RI)로 나눈 값이다. 만약 CR의 값이 0이라면 응답자가 쌍대비교 수행 시 완전한 일관성을 유지하였음을 의미하는 것이고, 일반적으로는 CR이 0.1 미만일 경우 응답자의 판단에 일관성이 있다고 판단하고,

현업에서는 0.2미만이면 일관성이 있다고 허용하는 추세이다. 만약 CR이 0.2 이상이라면 응답에 일관성이 부족한 것으로 판단하고 재검토 혹은 추가 설문하거나, 여의치 않을 경우는 분석에서 제외한다.

일관성검증을 위하여 본 연구에서는 고유치 근사법(Approximated Eigen Value Method)을 적용하였고 구체적인 절차는 다음과 같다.

(1) 쌍대비교행렬의 각 열의 합을 구한다.

n개의 행과 열로 구성된 쌍대비교행렬의 i번째 행과 j번째 열의 원소를 a_{ij} 로 나타내면, 열(column) j의 원소 합 t_j 는 다음 벡터의 원소로 표시된다.

$$t_j = \begin{bmatrix} 23 & 13 & 9 \\ 15 & 3 & 9 \end{bmatrix} \quad (2)$$

(2) 표준화행렬(normalized matrix)을 구한다.

쌍대비교행렬의 각 원소인 a_{ij} 를 각 열의 합계(t_j)로 나눈 값을 표준화행렬 원소 v_{ij} 라고 하면, 표준화행렬(V)은 같이 계산된다.

$$V = \begin{pmatrix} \frac{15}{23} & \frac{9}{13} & \frac{5}{9} \\ \frac{5}{23} & \frac{3}{13} & \frac{1}{9} \\ \frac{3}{23} & \frac{1}{13} & \frac{1}{9} \end{pmatrix} \quad (3)$$

(3) 가중치 벡터를 구한다.

표준화행렬 i행의 원소의 평균인 w_i 가 가중치이며, w_i 는 다음 가중치벡터의 원소가 되고 각 가중치의 합은 1이 된다.

$$W = \begin{pmatrix} 0.634 \\ 0.260 \\ 0.106 \end{pmatrix} \quad (4)$$

(4) 가중치 합 벡터를 구한다.

쌍대비교행렬(A)에 가중치벡터(W)의 전치행렬(transpose matrix)을 곱하면 아래와 같이 가중치 합 벡터(S)를 구할 수 있다.

$$S = AW = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.634 \\ 0.260 \\ 0.106 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.943 \\ 0.789 \\ 0.319 \end{bmatrix} \quad (5)$$

(5) 최대 고유치를 추정한다.

아래와 같이 가중합벡터의 원소를 대응되는 가중치로 나누어서 평균을 구하면 최대 고유치의 추정치인 $\lambda_{\max}$ 가 된다.

$$\begin{aligned} \lambda_{\max} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{w_i} \\ &= \frac{1}{3} \left(\frac{1.943}{0.634} + \frac{0.789}{0.260} + \frac{0.319}{0.106} \right) = 3.038 \end{aligned} \quad (6)$$

(6) 일관성지수

쌍대비교행렬 A의 일관성지수 CI(Consistency Index)는 다음과 같이 계산된다.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{3.038 - 3}{3 - 1} = 0.019 \quad (7)$$

(7) 일관성비율

응답 내용으로부터 계산된 일관성지수와 확률지수(RI, Random Index)와의 비율을 일관성비율(CR, Consistency Ratio)이라 하고, 다음과 같이 계산된다.

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.019}{0.58} = 0.033 \quad (8)$$

여기서 RI는 응답을 질문 문항에 상관없이 임의적으로 수행했을 때의 CI 값을 의미하며 Saaty가 n이 3일 때 실험한 RI값이 0.58로 주어져 있으므로 이를 대입하면 CR값이 0.033으로 계산되어 1보다 적게 계산되어 진다. 따라서 설문결과는 “일관성있다”고 할 수 있다.

본 연구의 계층도는 3계층으로 구성되어 있으므로 설문 대상자별로 계층2에서 1개, 계층3에서 3개의 쌍대비교행렬이 수집되었고, 각 쌍대비교행렬에 대한 일관성검증을 용이하게 하기 위하여 Excel 매크로를 기반으로 한 간단한 소프트웨어를 활용하였다. 일관성검증이 실패한 설문결과는 쌍대비교행렬 과정을 재검토하여 입력 오류를 확인해 본 다음, 일부는 재설문하고 재설문이 용이하지 않은 설문대상자의 경우는 설문내용을 폐기하고 일관성 있는 정보만으로 데이터를 구성하였다.

3.5 가중치 계산 결과

다수 응답자로부터 수집된 일관성 검증된 설문결과로부터 응답자별 가중치를 구하고 이를 기하평균하여 대표치를 구하였으며, 그 결과는 Table 5와 같다. 공정위험분석법(PHR)이 33.4%의 가중치를 보이면서 7개 평가방법 중 가장 높게 평가되었으며, 그 다음으로는 원인결과분석법(CCA)이 17.7%, 이상위험도분석법(FMECA)이 14.8%, 위험과운전분석법(HAZOP)이 13.2%로 각각 나타났다. 그리고 예비위험분석법(PHA)이 8.3%, 상대위험순위결정법(DMI)이 6.7%, 그리고 작업자실수분석법(HEA)이 5.9%로써, 모두 10% 미만의 상대적으로 낮은 가중치를 보였는데, 이 3가지 평가방법은 유해 위험물질을 취급하는 기계부품 제조 현장의 공정 위험성분석에는 적절하지 않다는 의미로 해석된다.

Table 5. Comprehensive results of weight and priority

Factor	Weight	Priority
DMI	0.067	6
PHA	0.083	5
PHR	0.334	1
HAZOP	0.132	4
FMECA	0.148	3
CCA	0.177	2
HEA	0.059	7

4. 논의 및 결론

본 연구에서는 기계부품 제조현장이 갖는 제조 공정상의 특성이 반영되어 공정의 잠재 위험성을 분석하기 위하여 분석방법으로 어떤 방법이 더 효과적인가를 평가하였다. 안전관리 업무 종사자 및 전문가를 대상으로 설문하고 AHP법으로 평가한 결과를 Fig. 5에 도식화 하였다.

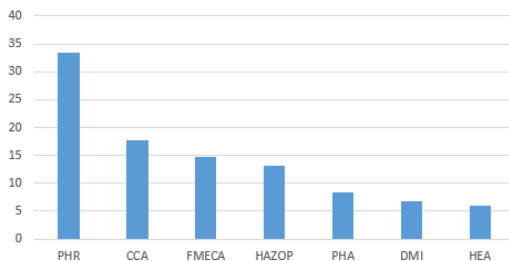


Fig. 5. Weight comparison

공정위험분석법(PHR)의 가중치가 33.4%로 계산되어 단연 우수한 평가방법으로 분석되었고, 원인결과분석법(CCA)과 이상위험도분석법(FMECA), 그리고 위험과운전분석법(HAZOP)은 가중치가 15% 내외로써 보편적인 평가방법으로 구분될 수 있으며, 나머지 평가방법은 유해 위험물질을 취급하는 기계부품 제조 현장의 공정 위험성평가에는 적절하지 않은 것으로 분석되었다.

이 같은 결과를 종합해보면 보다 효과적이고 적절한 공정위험성 분석방법은 공정의 잠재위험을 용이하게 발견하는데 기여하고, 위험인자가 노출될 경우의 사고피해를 경감하는데도 기여함과 동시에 위험인자의 제거와 경감을 위한 개선안 도출에도 도움이 됨을 시사한다. 특히 본 연구 결과, 공정위험분석법(PHR)이 산업유해위험물질을 취급하는 기계부품 제조 공정의 위험성분석에 가장 적합한 방법으로 본 평가방법을 활용하여 공정위험성을 평가한다면 중대사고 예방과 성공적인 PSM제도 정착에 효용이 높을 것으로 기대된다.

향후 추가되어야 할 연구 주제로써는 산업유해 위험물질 취급 제조현장 중에서 기계부품이 아닌 또 다른 업종에 적합한 공정위험성 분석방법을 비교 분석하는 것과 본 연구 결과에서 가중치가 높게 평가된 PHR과 CCA 평가법의 장점을 상호 결합한 새로운 평가방법을 제안하고 PHR 혹은 CCA 방법과 비교 분석하고자 한다.

그 동안 공정위험성 평가는 공정 안전관리의 중요한 수단인 하나로 위험성 평가라는 개념이 익숙하지 않던 시절부터 PSM 적용 사업장에서는 중요한 안전관리 기법으로 활용되어 왔으나 2013년 산업안전보건법이 개정되어 모든 사업장에서 일반 위험성평가가 법적 의무로 도입되어 시행되고 있는 현 시점에서, PSM 적용 사업장에서조차 위험성평가 제도의 예외를 인정한 간주규정, 작업 위험성평가 관련 규정의 모호성, 그리고 실무에서의 위험성평가 관련 지식의 부족과 업무 과중에 따른 문서작업화 현상의 불균형 발생 등으로 인해, 기존에 여타 사업장에 비해 선제적으로 위험성 평가를 사업장 안전관리에 활용해 오고 있던 PSM 적용 사업장에서 이제는 오히려 위험성평가의 실효성에 의문이 제기되고 있는 현실에서 그 유용성이 입증된 점에서 본 연구의 의의를 갖는다.

따라서 이 같은 결과를 바탕으로 PSM 적용 사업장에서 실시하고 있는 위험성평가가 일반 위험성평가의 요건과 범위를 충족하는지를 지지하는 한편, PSM 적용 사업장에서 현재 실시하고 있는 위험성평가가 얼마나 실효성 있게 운영되고 있는지 등에 대해 살펴보고 그 문제점에 대해서는 해결방안을 적극 모색할 필요가 있다.

향후 추가되어야 할 연구 주제로 산업유해 위험물질 취급 제조현장 중에서 기계부품이 아닌 또 다른 업종에 적합한 공정위험성 분석방법을 비교 분석하는 것과 본 연구 결과에서 가중치가 높게 평가된 PHR과 CCA 평가 방법의 장점을 상호 결합한 새로운 평가방법을 제안하고 PHR 혹은 CCA 방법과 비교 분석할 것을 기대해본다.

References

- [1] S. H. Min, S. W. Kim, "A Study on the Efficient Operation of Self-audit in Large-scale PSM Workplace", *Fire Science and Engineering*, Vol.27, No.6, pp.115-121, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2013.27.6.115>
- [2] D. Y. Park, 2020 Process Safety Report Preparation Example Book, Technical Report, The Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA), Korea.
- [3] B. J. Ahn, "Understanding of Process Safety Management(PSM)", *Journal of OHS Research brief*, Vol.5, No.10, pp.14-21, 2011.
- [4] H. S. Park, The Improvement of PSM Transition Level and Understanding of Management Supervision System, Metropolitan City Center for the Prevention of Critical Industrial Accidents, Korea.
- [5] H. G. Kwon, O. Y. Lee, Technical Guidelines for Regular Process Hazard Analysis Technical Report, The Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA), Korea.
- [6] T. H. Kim, "A Study on the Introduction of Hazard Analysis Methods", *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol.1, No.3, pp.2-5, 2000.
- [7] K. M. Park, D. K. Lee, J. M. Lee, W. S. Ahn, "Qualitative Hazard Analysis for a Batch Radical Reaction Process using HAZOP Method", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol.20, No.2, pp.385-393, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.2.385>
- [8] J. H. Yoo, *A Study on Management of Change Based on Risk Assessment and Drawing Information System*, Ph.D dissertation, Kwangwoon University, Seoul, Korea, 2007.
- [9] J. W. Jung, "A Study on Problems and Improvement Measures of Occupational Safety and Health Law Policies in Korea: Focused on Administrative Rules and Guidelines", *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, Vol.28, No.1, pp.18-34, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2018.28.1.18>
- [10] T. O. Kim, P. R. Cho, S. I. Chang, C. G. Lee, J. B. Baek, G. S. Park, H. I. Yoo, A Study on Reforming

Threshold Quantities and the Overlapping Regulation of Toxic Substances in Process Safety Management(PSM), Research Report, Occupational Safety and Health Research Institute (OSHR), Korea.

- [11] T. L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, 1980.

임 채 윤(Chae-Yoon Lim)

[정회원]



- 2014년 2월 : 동아대학교 산업공학과 (공학사)
- 2016년 8월 : 동아대학교 산업경영공학과 (공학석사)
- 2017년 2월 ~ 현재 : 동아대학교 산업경영공학과 박사과정
- 2021년 10월 ~ 현재 : 진례 농협 이사

<관심분야>

산업안전관리, 품질관리, 생산관리

김 채 수(Chae-Soo Kim)

[정회원]



- 1985년 2월 : 동아대학교 공업경영학과 (공학사)
- 1991년 2월 : KIST 산업공학과 (공학석사)
- 1999년 2월 : KAIST 산업공학과 (공학박사)
- 2013년 7월 ~ 현재 : 동아대학교 산업경영공학과 교수

<관심분야>

물류시스템 설계, OR, TRIZ 응용