

## AHP를 활용한 안전밸브(PSV) 고장모드의 Cause Factors 우선순위 분석

김명철\* · 이미정\* · 이동건\*\* · 백종배\*\*\*†

한국교통대학교 안전공학과  
27469 충북 충주시 대소원면 대학로 50  
(2021년 12월 8일 접수, 2022년 2월 8일 수정본 접수, 2022년 3월 23일 채택)

## Priority Analysis of Cause Factors of Safety Valve Failure Mode Using Analytical Hierarchy Process

Myung Chul Kim\*, Mi Jeong Lee\*, Dong Geon Lee\*\* and Jong-Bae Baek\*\*\*†

Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation, 50, Daehak-ro, Daesowon-myeon,  
Chungju-si, Chungcheongbuk-do, 27469, Korea

(Received 8 December 2021; Received in revised from 24 February 2022; Accepted 23 March 2022)

### 요 약

안전밸브(PSV)는 다양한 원인으로 발생하는 압력이 설정 압력에 도달하면 자동적으로 스프링이 작동하면서 분출되고 일정 압력 이하가 되면 정상상태로 복원되는 안전장치이다. 안전밸브는 압력상승 등 비정상 상태에서 정상 작동할 수 있도록 주기적인 검사와 모니터링 이행이 필수적이다. 그러나 현행 안전검사는 정해진 주기에만 수행되고 있어 정상작동 여부의 안전성을 확보하는 데 어려움이 있다. 따라서 안전관리에 필요한 안전밸브의 고장모드와 원인요소를 찾아 평가항목을 개발하였다. 그리고 항목의 우선순위를 도출하여 안전성 확보를 위한 의사결정 정보를 제공하고자 한다. 이를 위해 15명의 전문가를 대상으로 안전밸브(PSV)의 Failure Mode Cause Factor(FMCFs)와 관련하여 중요하다고 판단되는 평가요인을 도출하기 위해 3차례에 걸친 델파이(Delphi) 조사를 수행하였다. 그 결과 안전밸브의 6개 고장모드와 그 하위요인 22개의 평가요인을 선정하였다. 이와 같이 선정된 평가요인들의 우선순위를 분석하기 위해 계층구조를 도식화하였고 우선순위 계산에는 계층적 의사결정 방법(AHP)을 적용하였다. 분석결과 FMCFs의 고장모드 우선순위는 'Leakage'(0.226), 'Fail to open'(0.201), 'Fail to relieve req'd capacity'(0.152), 'Open above set pressure'(0.149), 'Spuriously open'(0.146), 'Stuck open'(0.127) 순으로 확인하였다. FMCFs의 하위 우선순위는 'PSV component rupture'(0.109), 'Fail to PSV size calculation'(0.068), 'PSV Spring aging'(0.065), 'Erratic opening'(0.059), 'Damage caused by improper installation and handling'(0.058), 'Fail to spring'(0.053) 등의 순으로 확인하였다. 우선순위가 결정된 FMCFs 효율적인 관리를 통해 안전밸브의 취약점을 파악하고 안전성을 향상하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract** – The safety valve (PSV) is a safety device that automatically releases a spring when the pressure generated by various causes reaches the set pressure, and is restored to a normal state when the pressure falls below a certain level. Periodic inspection and monitoring of safety valves are essential so that they can operate normally in abnormal conditions such as pressure rise. However, as the current safety inspection is performed only at a set period, it is difficult to ensure the safety of normal operation. Therefore, evaluation items were developed by finding failure modes and causative factors of safety valves required for safety management. In addition, it is intended to provide decision-making information for securing safety by deriving the priority of items. To this end, a Delphi survey was conducted three times to derive evaluation factors that were judged to be important in relation to the Failure Mode Cause Factor (FMCFs) of the safety valve (PSV) targeting 15 experts. As a result, 6 failure modes of the safety valve and 22 evaluation factors of its sub-factors were selected. In order to analyze the priorities of the evaluation factors selected in this way, the hierarchical structure was schematized, and the hierarchical decision-making method (AHP) was applied to the priority calculation. As a result of the analysis, the failure mode priorities of FMCFs were 'Leakage' (0.226), 'Fail to open' (0.201), 'Fail to

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jbaek@ut.ac.kr

\*이 논문은 광운대학교 교재목 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

relieve req'd capacity' (0.152), 'Open above set pressure' (0.149), 'Spuriously' 'open' (0.146) and 'Stuck open' (0.127) were confirmed in the order. The lower priority of FCMFs is 'PSV component rupture' (0.109), 'Fail to PSV size calculation' (0.068), 'PSV Spring aging' (0.065), 'Erratic opening' (0.059), 'Damage caused by improper installation and handling' (0.058), 'Fail to spring' (0.053), etc. were checked in the order. It is expected that through efficient management of FCMFs that have been prioritized, it will be possible to identify vulnerabilities of safety valves and contribute to improving safety.

Key words: Safety valve, Analytical hierarchy process (AHP), Failure mode cause factors (FCMFs)

## 1. 서 론

다양한 산업에서 산업재해의 지속적인 발생으로 인해 안전에 대한 민감도가 높아졌다. 이러한 산업재해 가운데 중대 산업사고는 산업용 보일러, 공기 저장 탱크, 철도와 선박 유조선, 화학 공장에서 안전밸브 고장(작동불능, 누출, 유지보수 불량 등)의 원인으로 발생했다[1]. 이런 사고를 예방하기 위해 법적 의무조치로, 고압 취급설비에는 다양한 안전장치를 설치토록 하고 있다. 그중에서 안전밸브(Safety valve)는 이상화학 반응, 밸브의 막힘 등의 이상 상태로 인한 압력상승으로부터 설비의 안전을 확보하기 위한 최후의 수단이다. 안전밸브의 고장은 1차적으로 설비의 손상을 발생시키며 공정 손상까지 확대시킬 수 있다. 따라서 안전밸브의 작동성능을 주기적으로 검사하도록 관련법으로 정하고 있다[2-4]. 증기나 유체가 팽창할 수 있는 시스템과 압축공기를 사용하여 제어하는 공정에서 다양한 원인으로 초과 압력이 발생할 수 있다. 그러므로 안전밸브가 항상 작동될 수 있도록 유지하는 것은 무엇보다 중요하다. 주요성능을 신뢰할 수 있어야 하며 재산과 생명을 보호하는 기능이 상실되어서는 안 된다[5].

안전장치로서 기능을 유지하기 위해 산업안전기준에 관한 규칙(1990. 7. 23. 공포)에 따라 안전밸브 검사(직접검사, 위험기반검사(RBI), 간접검사)를 하고 있다. 그러나 검사주기는 산업안전보건법, 고압가스안전관리법, 에너지이용합리화법에서 각각 달리 규정하고 있다. 통일되지 않은 검사주기는 안전밸브 검사주기 해석과 법령간의 중복규제로 수급자들이 많은 어려움을 겪고 있다. 이에 따라 검사주기 개선과 점검방법 개선을 위한 여러 연구가 진행되었다. 국내 석유·석유화학 사업장 압력방출장치(PSV) 검사주기의 합리적인 개선을 위한 연구(이영순 외, 2011)에서 법제화된 검사주기 연장방안의 타당성과 안전밸브 고장으로 인한 다양한 사고사례 등을 검토하고 재발 방지를 위한 전문가 의견 등을 기술하였다. 석유화학단지 내 안전밸브 고장에 대한 위험성 평가(장유리 외, 2017), 안전밸브 성능점검 자료 분석을 통한 운전 중 점검방법 도입의 필요성 고찰(장유리 외, 2017)에서는 6,000개의 안전밸브 중 470여개의 안전밸브는 설정 압력, 분출정지압력, 기밀상태 등이 성능검사기준에 부합하지 않는 결과를 분석하였다. 이는 정해진 주기에만 수행되는 현행 안전밸브의 성능점검기준과 방법의 문제점을 지적하고 있다[6]. 또한, Mike Moosemiller(2001)는 위험기반검사(RBI)를 통해 분석한 6가지 안전밸브 고장모드 유형을 Process Plant Safety Symposium에서 발표하였다[29]. 이와같이 선행연구를 확인한 결과, 안전밸브의 검사주기와 검사방법의 문제점을 제시할 뿐 안전밸브의 고장요인에 관한 연구는 확인할 수 없었다.

이 연구의 목적은 안전밸브의 고장요인을 찾아내고 효율적인 안전관리를 위한 요인들의 우선순위를 결정하는 데 있다. 연구방법으로는 문헌 고찰을 통해 안전밸브 고장모드와 Cause Factor에 대한 기초 분석 자료로 활용하였다. 또한, 전문가 심층 인터뷰, 델파이

(Delphi) 조사를 통해 설치된 안전밸브 고장 원인이 되는 요인을 도출하였다. 그리고 AHP분석 기법을 이용하여 도출된 요인들의 우선순위 정하고 Risk management에 활용가능한 의사결정 정보를 제시하였다.

## 2. 안전밸브 검사방법과 표준화 현황

### 2-1. 안전밸브 개요와 성능 검사방법

안전밸브는 유체를 사용하는 설비나 계통에 설치되어 압력이 설계상 허용되는 설정 압력(Set pressure) 이상으로 높아질 때 완전히 개방되는 장치이다. 즉, 과도한 압력을 안전하게 외부로 방출시켜 계통의 압력을 정상압력 이하로 감압시킴으로써 압력용기, 저장 탱크 및 배관의 파열을 방지하여 안전을 확보한다[5]. 이를 위해 주기적으로 안전밸브의 작동성능을 점검하고 정상작동 여부를 확인하는 것이 중요하다고 할 수 있다[6]. 안전밸브의 성능검사 방법에는 직접검사, 간접검사, 위험기반검사(RBI) 등이 있다. 직접검사는 유체의 압력만을 이용하여 안전밸브의 성능을 검사하는 방법이다. 가장 대표적인 방법으로는 시험 작업대(test bench)를 이용한 방법이다. 이 방법은 안전밸브의 설정 압력까지 압축성 유체를 가압하여 popping 후 성능을 기록한다. 간접검사는 안전밸브가 설비나 계통에 설치된 상태에서 계통압력(System pressure)을 설정 압력까지 가압하지 않고 안전밸브 스템(Stem)의 인위적 인양장치(Safety Valve Lifting Device)를 사용하는 방법이다. 즉, 계통압력과 차이를 측정하는 방법이다. 즉, 설정압력을 산출하는 방법은 교정된 유압 또는 공압 보조 장치들을 사용하여 설정 압력을 확인한다.

ASME PTC 25, Part III. In-service and Bench testing 표준은 간접검사의 가이드라인을 제시하여 시험 절차를 인정하고 전 세계적으로 on-line 시험 장비를 개발하여 사용할 수 있도록 하고 있다[6].

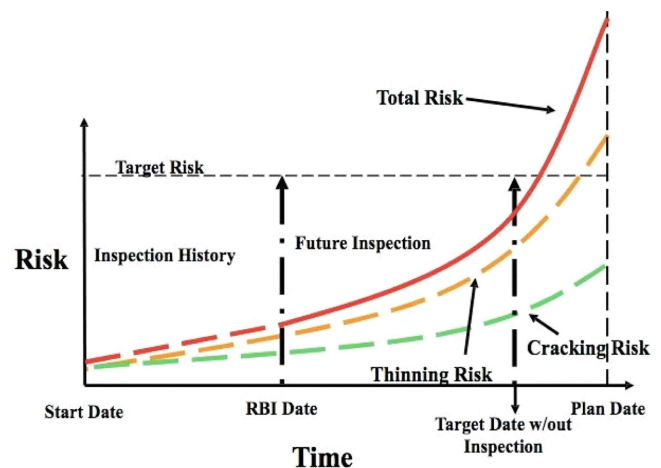


Fig. 1. Schematic presentation of risk-based inspection planning procedure (API 580/581) [7-8].

위험기반검사(RBI)는 유지·보수 계획의 수립, 관리, 시행에 위험성 평가를 이용하는 것이다. 운전시간이 지속될수록 부품의 고장 가능성이 증가하게 된다. 하지만, 허용 위험 수준을 정하여 필요한 조치를 하게 되면 고장 가능성이 낮은 상태에서 운전할 수 있다. 한편, Fig. 1과 같이 검사주기가 너무 짧으면, 허용 위험 수준 이하에서 위험관리가 수행되어 과도한 유지보수가 이루어지게 된다. 그리고 필요 이상의 설비관리를 수행하여 인적·물적 자원이 낭비될 수 있다. 또한, 검사주기를 너무 길게 수립하면 위험 수준을 초과한 상태에서 설비가 관리되므로 최악의 경우에는 설비가 파손되어 막대한 손해를 초래할 것이다. 그러므로 설비의 사용조건 및 상태에 따라 검사주기는 위험수준을 고려하여 손실이 발생하지 않도록 해야 한다.

## 2-2. 국내·외 안전밸브 표준화 현황 비교

Table 1은 표준에서 정하고 있는 안전밸브의 성능을 요약한 것이다. ASME VIII 표준은 사용하는 유체의 종류에 따라 과압을 설정압력의 10% 내로 정하고 있으며 일부 불발화 압력 용기(unfired pressure vessel)에 적용된다. EN ISO 4126에서는 안전밸브의 과압을 설정압력의 10% 또는 0.1 bar 중 큰 값을 초과하지 않도록 정하고 있다. Table 2는 국가별 안전밸브 관련 표준으로 모든 표준에서 안전밸브를 설치하도록 요구하고 있다. 주로 보일러와 압력용기에 적용되는 안전밸브의 표준이 여기에 해당한다. 국내의 경우 KS B 6216에서 보일러와 압력용기에 적용되는 안전밸브의 표준을 제공한다. 또한, 산업안전보건기준에 관한 규칙 제261조(안전밸브 등의 설

**Table 1. Safety valve performance summary**

Standard	Overpressure	Fluid	Blowdown
A.D. Merkblatt A2	Standard 10% full lift 5%	Steam	10%
	Standard 10% full lift 5%	Air or gas	10%
	10%	Liquid	20%
ASME	I	Steam	2~6%
		Steam	7%
	VIII	Air or gas	7%
	10% (see Note 2 below)	Liquid	
EN ISO 4126	Value stated by manufacturer but not exceeding 10% of set pressure or 0.1 bar whichever is greater.	Compressible	Minimum 2%, Maximum 15% or 0.3 bar whichever is greater.
		Incompressible	Minimum 2.5%, Maximum 20% or 0.6 bar whichever is greater.

Notes : 1. ASME blowdown values shown are for valves with adjustable blowdown. 2. 25% is often used for non-certified sizing calculations and 20% can be used for fire protection for storage vessels.

**Table 2. Country standardization status of pressure safety valve[9-10]**

Country	Standard No.	Description
Korea	KS B 6216	Spring loaded safety valves for steam boiler and pressure vessels
USA	ASME I	Boiler Applications
	ASME II	Nuclear Applications
	ASME VIII	Unfired Pressure Vessel Applications
	ANSI/ASME PTC 25.3	Safety and Relief valves-performance test codes
	API RP 520	Sizing selection and installation of pressure-relieving devices in refineries Part 1 Design Part 2 installation
	API RP 521	Guide for pressure relieving and depressurizing systems
UK	API STD 526	Flanged steel pressure relief valves
	API STD 527	Seat tightness of pressure relief valves
	BS 6759	Part 1 specification for safety valves for steam and hot water Part 2 specification for safety valves for compressed air and inert gas Part 3 specification for safety valves for safety valves for process fluids
European Economic Area	EN ISO 4126	Safety devices for protection against excessive pressures
		EN ISO 4126 is a harmonized European Standard and has replaced many National Standards of which British Standard BS 6759 and the French Standard AFNOR NFE-E 29-411 to 416 and 421 are examples.
Germany	AD-Merkblatt A2	Pressure Vessel Equipment safety devices against excess pressure-safety valves
	TRD 421	Technical Equipment for Steam Boilers Safeguards against excessive pressure-safety valves for steam boilers of groups I, III & IV
	TRD 721	Technical Equipment for Steam Boilers Safeguards against excessive pressure-safety valves for steam boilers of groups II
France	AFNORNFE-E 29-411 to 416	Safety and relief valves
	NFE-E-29-421	Safety and relief valves
Japan	JIS B 8210	Steam boilers and pressure vessels-spring loaded safety valves
Australia	SAA AS1271	Safety valves, other valves, liquid level gauges and other fitting for Boilers and unfired pressure vessels

치)에서는 과압에 따른 폭발을 방지하기 위하여 안전밸브 또는 과열 판을 설치하도록 규정하고 있다. 국외에서는 BS 6759 Part3, API RP 520에서는 안전밸브와 과열판을 직렬로 연결하도록 요구하고 있다. 또한, ANSI/ASME PTC 25.3 Safety and Relief valves-performance test codes를 명시하고 있다. 이처럼 국내외 표준에서 과압에 따른 폭발방지를 위한 안전밸브의 설치, 유지보수, 검사 등의 가이드라인을 규정하고 준수하도록 하고 있다.

### 3. 연구방법과 내용

#### 3-1. 문헌과 델파이(Delphi) 조사 활용

고장 원인 분석에는 안전밸브의 직접 검사결과 통계자료와 문헌 자료를 활용하였다. 7년간(2010년~2016년) 6,000개 이상의 안전밸브 검사결과 자료에 의하면 열림 불량 33.00%, 닫힘 불량 37.48%, 열림 및 닫힘 동시 불량 23.31%로 분석되었다[6]. 만약 이 두 가지 고장이 서로 독립적이라면 동시 불량률은 약 12.37% 여야 한다. 따라서 열림과 닫힘 고장 사이에는 비교적 강한 종속성이 있음을 연속 마르코프 프로세스(continuous Markov process) 모델 방법을 통해 검증한 연구도 있다[12]. 그러나 이 연구에는 FMCFs 구성요인에는 상호 간의 종속성을 고려하지 않았다.

안전밸브의 고장모드에 대한 원인요소 도출은 전문가 의견을 반영하였다. 조사대상자는 관련 학계와 전문기관의 종사자 15명으로 구성되었다. 구성된 전문가를 대상으로 연구의 목적과 방법을 설명한 뒤 심층 인터뷰를 수행하였고, 3차례에 걸쳐 연구에 필요한 설문을 진행하였다. 전문가의 일반적 특성은 Table 3과 같다. 델파이(Delphi) 조사의 일반적인 절차는 전문가 집단구성과 반복되는 설문 조사로 진행되며, 1차 델파이 조사는 비구조화된 설문지를 활용하여 전문가의 자유로운 의견을 반영하며, 2차와 3차는 구조화된 설문지로 Likert 5점 척도를 사용하여 평가하도록 하였다. 즉, 1차 설문 조사에서 전문가의 자유로운 의견을 정리하는 과정을 거치게 되며, 2차 3차 설문 조사를 통해 각 전문가의 의견을 수렴하는 과정을 활용했다. 여기서 전문가들의 의견이 타당성이 있는지를 확인하기 위하여 Lawshe(1975)의 이론에 근거한 의견의 일치 정도를 확인하기 위하여 내용타당도 비율(CVR)을 계산하였다[30].

$$CVR = \frac{n_e - \frac{N}{2}}{\frac{N}{2}} \quad (1)$$

여기서, N은 전문가 의견 표본 수,  $n_e$ 는 Likert4(타당함)와 Likert5

(매우 타당함)에 응답한 인원수를 합한 수를 의미한다. 그리고 결과의 공정성과 전문성을 확보하기 위하여 도출된 모든 요인에 대해 평균과 내용타당도 비율(CVR : Content Validity Ratio)로 검증하였다. 또한, 요인에 대한 신뢰도는 Cronbach's  $\alpha$  계수를 산출하여 분석에 활용하였다. 최종 선정된 요인들에 대해 우선순위를 검증하기 위하여 계층적 의사결정 방법(AHP)을 활용하였으며, AHP 분석에는 Expert Choice 2000 프로그램을 활용하였다.

#### 3-2. AHP (Analytical Hierarchy Process)

AHP는 목표값 사이의 중요도를 계층적으로 파악함으로써 각 대안의 중요도를 산출하는 기법이다. 이 방법은 다수의 목표, 평가기준, 의사결정 주체가 포함된 의사결정 문제를 계층화하여 해결하는 데 활용된다[28]. 전략적 의사결정 방법은 의사결정 트리(Decision Tree), 판단분석(Judgment Analysis: JA), 스윙(Swing weighting method: SW), 계층화 분석(Analytic Hierarchy Process: AHP), 네트워크 분석(Analytic Network Process: ANP)등 다양하다. 가중치 추출 기법 중 국내의 의사결정 분야 연구에서 가장 폭넓게 사용되고 있는 것은 AHP 기법이다[13]. 이 방법은 유연성 계산 단순성 및 다른 기술과의 통합할 수 있는 효과적이고 선호되는 방법이다. AHP 기법의 가장 중요한 장점 중 하나는 균형 잡힌 계층구조에서 목표 및 관련 기준에 관한 결정을 제시하고 기준 사이의 우선순위를 결정한다는 것이다. 또한, 의사 결정자는 자신의 문제에 대해 가장 정확하고 적절한 결정을 내리는 데 매우 편리하다[14]. AHP 기법은 산업 안전, 보건, 물류, 농업, 임업, 건설 등과 같은 여러 부문에서 널리 활용되고 있다[16-21].

AHP의 절차는 Table 4와 같다. 첫 단계에서는 의사결정 문제 정의와 목표를 설정한다. 두 번째 단계는 계층구조를 신중하게 구성한다. 계층구조는 목표에 영향을 미치는 요소를 기술하는 상위 기준과 하위 기준들로 구성된다. 계층구조를 구성한 후에 쌍대비교를 한다. 이때, Saaty Scale의 상대적 중요성 척도를 사용하여 비교할 수 있다. Table 5와 같이 척도는 5단계로 구성된다[25]. 각 기준 쌍에 대해 의사결정자가 수행한 평가와 비교에 따라 각 기준에 대한 가중치를 계산한다[11]. 마지막 단계는 우선순위를 분석하고 대안을 결정한다.

#### 3-3. 계층 구조 구축

계층구조는 안전밸브 FMCFs 구성 요소 간의 상호작용과 이러한 상호작용이 전체 시스템에 미치는 영향을 조사하기 위해 전문가의 지식과 경험을 기반으로 구성된다. 전문가의 심층 인터뷰 내용을 반영하여 3차례의 델파이(Delphi) 조사로 수렴된 6개의 상위 고장요인과 22개의 하위 고장요인을 도출되었으며 결과는 Table 6과 같다. 도출된 안전밸브의 FMCFs의 계층구조는 Fig. 2에 보여진다.

#### 3-4. 쌍대 비교 행렬 계산

계층구조의 요인들의 중요도 계산에 사용된 수식은 Table 4에 제시된다. 쌍대 비교 행렬구성은 식 (2)를 적용하여 쌍대 비교 행렬(A)을 구성한다. 행과 열에 비교 기준을 배치하여 형성된 차원 행렬은 정사각형 행렬이 된다[22]. 쌍대 비교 행렬(A)의 최대고유값과 일치하는 고유 벡터를 계산하기 위한 행렬 A의 특성함수는 식 (3)과 같이 구성된다. 그리고 정확한 측정이 불가능한 경우에는 측정의 일관성을 결정해야 한다.

행렬 A ( $\lambda_i$ )의 각 고유 벡터는 식 (4)와 같이 계산된다. 여기서 w는

Table 3. General Characteristics of Expert Group for Delphi Analysis

Classification		Frequency (N)	Percent (%)
Professions	Mechanical	2	13.3
	Electrical	4	26.7
	Chemical	2	13.3
	Safety	7	46.7
Experience	10-15 years	5	33.3
	15-20 years	4	26.7
	More than 20 years	6	40.0
Age	40 group	10	66.7
	50 group	5	33.3
Total		15	100.0

**Table 4. The AHP process and applied formulas**

AHP process		Applied method and formulas	Remark
Step	Explanation		
1	Problem Formulation	Focus group interview, Question investigation	Expert Intervention
2	AHP Hierarchy Construction		
3	Pair Wise comparison matrix	Pairwise comparison matrix (A) is $A = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1n} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \dots & \alpha_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \dots & \alpha_{nn} \end{bmatrix}$ (2)	AHP Calculation
4	Pair Wise comparison Synthesis Eigenvalue / Eigenvector	Characteristic function of matrix A is $A = \begin{bmatrix} \alpha_{11}-\lambda & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1n} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22}-\lambda & \dots & \alpha_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \dots & \alpha_{nn}-\lambda \end{bmatrix}$ (3)	
		Eigenvectors of matrix A ( $\lambda_i$ ) is $(A-\lambda_i)w_i = 0$ (4)	
		The eigenvector (w) corresponding to the maximum eigenvalue ( $\lambda_{\max}$ ) is $Aw = \lambda_{\max}W$ (5)	
		The elements of the normalized pairwise comparison matrix are obtained as: $b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}$ (6)	
		The elements of the eigenvector corresponding to the maximum eigenvalue, taking the average of the row elements of the normalized matrix A is calculated as: $W_i = \frac{\sum_{j=1}^n b_{ij}}{n}$ (7)	
		Maximum eigenvalue ( $\lambda_{\max}$ ) is calculated as: $\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{W_i}$ (8)	
5	Consistency Check (CR<0.1) Ranking Results	Consistency index (CI) for acceptance of the consistency ratio of the comparison matrix A is calculated as $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ (9)	
		The consistency ratio (CR) is calculated as $CR = \frac{CI}{\text{Random average CI}} = \frac{CI}{RI^*}$ (10)	
6	Ranking Analysis Judgment		Decision Making

\*RI is the average CI value of a matrix generated by randomly generating a pairwise comparison matrix [11].

Size of matrix (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Random average CI (RI)	0	0	0.52	0.89	1.11	1.24	1.35	1.40	1.45	1.49

**Table 5. Pairwise comparison scale for AHP preferences**

Intensity (importance)	Priority	Explanation
1	Equal	Same importance
3	Moderate	Element moderately favored than other
5	Strong	Element strongly favored than other
7	Very strong	Element very strongly favored than other
9	Extreme importance	Element extreme important than other
2, 4, 6, 8	Intermediate-values	When compromise is needed

고유 벡터이고 최대고유값( $\lambda_{\max}$ )에 해당하는 고유 벡터(W)가 식 (5)로 계산된다[23-24]. 이 연구에서는 평가요인들을 유사한 속성끼리 분

류, 구조화하고 델파이 조사를 통해 도출된 평가요인의 중요도에 대한 전문가의 주관적인 판단을 정량화할 수 있는 T.L. Saaty 방법을 적용하여 고유 벡터와 고유값을 계산하였다[25]. 비교 행렬의 각 값은 열 요소의 합으로 나뉘고, 정규화된 쌍대 비교 행렬의 요소는 식 (6)을 이용하여 계산된다. 정규화된 행렬 A의 행 요소의 평균을 취하는 최대고유값에 해당하는 고유 벡터의 요소는 제시한 식 (7)과 같이 계산하고 최대고유값( $\lambda_{\max}$ )은 식 (8)과 같이 계산된다.

### 3-5. 일관성 비율 확인

쌍대 비교에서 올바른 결정을 내리는 것은 허용 가능한 일관성 비율과 관련이 있다. 또한, 비교 행렬 A의 일관성 비율을 수용하기 위

Table 6. Final Delphi Analysis Results

Questionnaire question		M*	SD**	CVR***
Fail to open	Fail to spring	4.53	.83	.87
	Normal aging	4.13	.64	.73
	Deterioration and corrosion	4.40	.83	.87
	Physical damage	4.07	.88	.60
	Insufficient maintenance	4.40	.63	.87
Stuck open	Fail to reset	4.20	.41	1.00
	PSV spring aging	4.53	.52	1.00
	Jamming of treated material	4.20	.68	.73
Spuriously open	PSV component rupture	4.27	.80	.60
	External damage	4.07	.59	.73
Open above set pressure	Fail to set pressure	4.33	.72	.73
	Fail to PSV size calculation	4.40	.63	.87
	PSV body damage	3.93	.70	.67
Fail to relieve req'd capacity	Fail to capacity design	4.60	.63	.87
	Fail to control	4.47	.52	1.00
	Open bellows set pressure	4.13	.74	.60
	Fails to completely reset	4.13	.52	.87
Leakage	Erratic opening	4.33	.62	.87
	Corrosion	4.40	.63	.87
	PSV quality Issues	4.00	.65	.60
	Damaged internal sealing	4.07	.70	.60
	Damage caused by improper installation and handling	4.33	.82	.87

\*M - Mean, \*\*SD - Standard Deviation, \*\*\*CVR - Content Validity Ratio

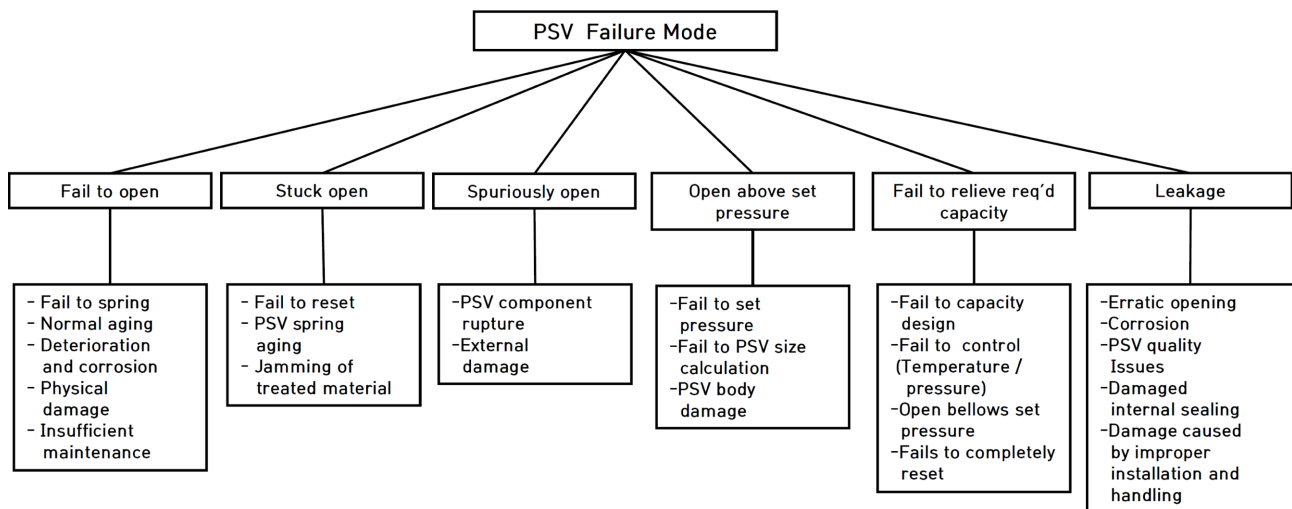


Fig. 2. Hierarchical structure of failure mode cause factors.

한 일관성 지수 (CI)는 Table 4에 제시한 식 (9)로 계산한다. 그리고 CI를 RI(Random Index)로 나누어 CR(Consistency Ratio)을 식 (10)으로 계산한다. 일반적으로 CR이 0.1보다 작으면 일관성이 있다고 판단하고, 0.2보다 작으면 허용 가능하다고 판단한다[20,26,28]. 랜덤 인덱스(RI)는 Table 4에 보여지며, 행렬의 크기에 따라 결정된다.

#### 4. 결과 분석

AHP 방법으로 안전밸브의 FMCFs의 우선순위를 분석하였다. Delphi 신뢰도 검사를 통해 6개의 상위 고장요인과 22개의 하위 고장요인을 도출하였다. 분석결과 모든 항목에서 Cronbach's  $\alpha$ 값이 0.6

이상으로 신뢰도가 검증되었다. 그리고 전문가 의견을 비교 행렬 식 (2)로 열의 합을 계산하였다. 또한, 정규화된 쌍대 비교 행렬은 식 (6)을 이용하여 계산하였다. 계산된 값의 상위중요도는 식 (7), 최대 고유값( $\lambda_{\max}$ )은 식 (8)로 계산하였다. 안전밸브의 6개 고장모드는 Fig. 3과 같으며 상위요인에 대한 상대적 중요도와 우선순위는 'Leakage'(0.226), 'Fail to open'(0.201), 'Fail to relieve req'd capacity'(0.152), 'Open above set pressure'(0.149), 'Spuriously open'(0.146), 'Stuck open'(0.127) 임을 확인하였다. CR(Consistency Ratio)은 0.002로 0.1보다 낮아 일관성이 검증되었다. 여기서 CR 측정은 제시된 식 (10)에 의해 계산하였으며, 행렬의 크기가 6이므로 임의지수 RI는 1.24를 적용했다.

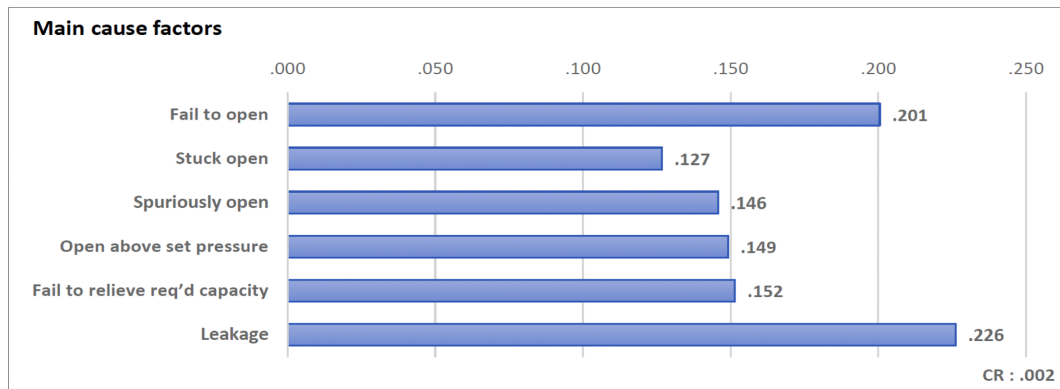


Fig. 3. Priority ranking of main cause factors.

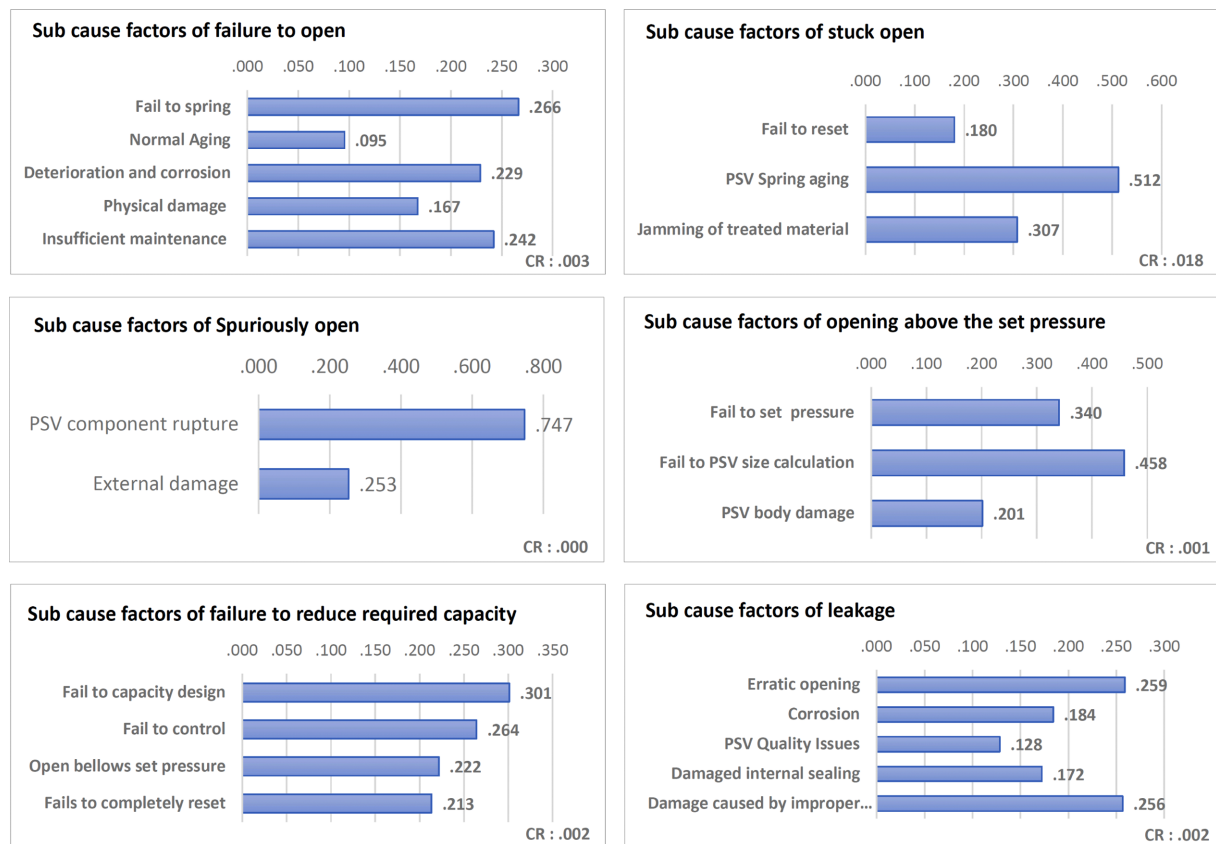


Fig. 4. Priority ranks of sub-cause factors in main cause factor.

상위요인에 대한 하위요인의 우선순위를 결정하기 위해 동일한 방법으로 하위 기준을 쌍대 비교하여 우선순위를 결정했다. 하위요인에 대한 상대적 중요도와 우선순위는 다음과 같다(Fig. 4 참조).

• Fail to open의 하위요인에 대한 상대적 중요도와 우선순위는 'Fail to spring'(0.266), 'Insufficient maintenance '(0.242), 'Deterioration and corrosion'(0.229), 'Physical damage '(0.167), 'Normal aging'(0.095) 순으로 확인하였다.

• Stuck open의 하위요인에 대한 상대적 중요도와 우선순위는 'PSV spring aging'(0.512), 'Jamming of treated material'(0.307), 'Fail to reset'(0.180) 순으로 확인하였다.

• Spuriously open의 하위요인에 대한 상대적 중요도와 우선순위는 'PSV component rupture'(0.747), 'External damage'(0.253) 순으로

확인하였다.

• Open above set pressure의 하위요인에 대한 상대적 중요도와 우선순위는 'Fail to PSV size calculation'(0.458), 'Fail to set pressure'(0.340), 'PSV body damage'(0.201) 순으로 확인하였다.

• Fail to relieve req'd capacity의 하위요인에 대한 상대적 중요도와 우선순위는 'Fail to capacity design'(0.301), 'Fail to control'(0.264), 'Open bellows set pressure'(0.222), 'Fails to completely reset'(0.213) 순으로 확인하였다.

• Leakage의 하위요인에 대한 상대적 중요도와 우선순위는 'Erratic opening'(0.259), 'Damage caused by improper installation and handling'(0.256), 'Corrosion'(0.184), 'Damaged internal sealing'(0.172), 'PSV quality Issues'(0.128) 순으로 확인되었다. 하위요인



Table 7. Overall importance and priority (before and after correction)

Main cause factors	Relative importance	Rank	Sub cause factors	Correction (before)		Correction (after)	
				Relative importance	Rank	Relative importance	Rank
Fail to open	.201	2	Fail to spring	.053	6	.069	3
			Normal aging	.019	22	.025	19
			Deterioration and corrosion	.046	9	.059	5
			Physical damage	.034	17	.044	12
			Insufficient maintenance	.049	8	.063	4
Stuck open	.127	6	Fail to reset	.023	21	.018	22
			PSV spring aging	.065	3	.051	9
			Jamming of treated material	.039	14	.030	18
Spuriously open	.146	5	PSV component rupture	.109	1	.056	6
			External damage	.037	15	.019	21
Open above set pressure	.149	4	Fail to set pressure	.051	7	.039	14
			Fail to PSV size calculation	.068	2	.053	8
			PSV body damage	.030	19	.023	20
Fail to relieve req'd capacity	.152	3	Fail to capacity design	.046	10	.047	11
			Fail to control	.040	12	.041	13
			Open bellows set pressure	.034	16	.035	16
			Fails to completely reset	.032	18	.034	17
Leakage	.226	1	Erratic opening	.059	4	.076	1
			Corrosion	.042	11	.054	7
			PSV quality Issues	.029	20	.038	15
			Damaged internal sealing	.039	13	.050	10
			Damage caused by improper installation and handling	.058	5	.075	2

중요도 분석결과 CR이 0.1 보다 낮아 일관성이 검증되었다.

고장모드인 상위요인을 고려한 하위요인의 종합중요도와 우선순위는 ‘PSV component rupture’(0.109), ‘Fail to PSV size calculation’(0.068), ‘PSV spring aging’(0.065), ‘Erratic opening’(0.059), ‘Damage caused by improper installation and handling’(0.058), ‘Fail to spring’(0.053) 등의 순으로 확인되었다. 그러나 이렇게 산출된 종합중요도는 각 영역 내에서의 우선순위만 제시할 뿐 전체 요소들 중의 우선순위에 대해서는 제시하지 못한다. 그리고 종합중요도를 산출함에 있어서 상위 고장요인에 속한 하위 고장요인의 개수 영향을 받는다. 따라서 각 영역별 개수가 많은 정도에 따라 종합중요도의 차이가 발생하게 된다. 이를 보정하기 위해 각 계층의 영역별 요인의 개수를 곱한 뒤 모두 더한 값으로 나눠 영역 내 요인의 개수를 보정하여 최적의 우선순위를 결정하였다[27]. 보정된 종합중요도 순위는 ‘Erratic opening’(0.076), ‘Damage caused by improper installation and handling’(0.075), ‘Fail to spring’(0.069), ‘Insufficient maintenance’(0.063), ‘Deterioration and corrosion’(0.059), ‘PSV component rupture’(0.056) 등의 순으로 확인되었다. 확인된 보정 전·후 종합중요도와 우선순위는 결과는 Table 7과 같다.

## 5. 결 론

안전밸브에 대한 FMCf의 항목을 개발하고 가중치를 산출하여 고장 원인에 대한 우선순위를 결정하였다. 결정된 ‘Leakage’, ‘Fail to open’ 등의 고장요인과 ‘Erratic opening’, ‘Damage caused by improper installation and handling’, ‘Fail to spring’ 등과 같은 하위요인을 우선적으로 관리함으로써 안전밸브의 안전성을 높일 수 있다. 결정된 우선순위 정보는 Risk management에서 중요한 역할을

한다. 또한, 현행 정해진 주기에만 수행되는 안전밸브의 검사와 방법의 문제 등을 보완하고 법령 간의 형평성 향상을 위한 기초자료로 활용 가능하다. 우선순위가 결정된 FMCf의 효율적인 관리를 통해 안전밸브의 취약점을 파악하고 안전성을 향상하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

그러나 안전밸브 고장 원인에 대한 우선순위 결정만으로 공정 전체의 안전관리를 하는 데는 한계가 있을 수 있다. 향후 추가적인 연구로 신뢰도 자료를 활용한 안전밸브 리스크 분석을 통해 직접적인 영향을 미치는 요인에 대한 안전관리가 필요할 것으로 판단된다.

## 감 사

이 연구는 2022년 환경부 주관 「화학물질 안전관리 전문인력 양성사업」의 화학물질 특성화대학원 지원을 받아 수행하였음.

## References

1. Flowstar company, “Technical Data,” UK, [https://www.flowstar-valveshop.com/pages/safety-relief-valves\(2021\)](https://www.flowstar-valveshop.com/pages/safety-relief-valves(2021)).
2. Korea Ministry of Government Legislation, “Occupational Safety and Health Act and Enforcement Regulations of the Act,” (2021).
3. Korea Ministry of Government Legislation, “Regulations for Occupational Safety and Health,” (2021).
4. Korea Ministry of Government Legislation, “High Pressure Gas Safety Control and Enforcement Rules of the Act,” (2021).
5. Daniel A. Crowl, Joseph F. Louvar, “Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications, 4th Edition,” 379-406(2019).
6. Jang, Y. R., Kim, J. H., Kim, S. H. and Kwak, Y. H., “The Neces-



- sity of Introducing the In-service Test based on Analysis of Performance Test Result of Pressure Safety Valve,” *KIGAS*, **21**(6), 15-22(2017).
7. API 580 American Petroleum Institute, “Risk-based Inspection,” Washington, D.C.: API Publishing Services(2002).
  8. API 581 American Petroleum Institute, “Risk-based Inspection Technology,” Washington, D.C.: API Publishing Services(2008).
  9. American Petroleum Institute, “API-520 Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refineries Part I - Sizing and Selection,” (2000).
  10. European Committee for Standardization, “Safety Devices for Protection Against Excessive Pressure - Part1: Safety Valves (ISO 4126-1:2013),” (2013).
  11. Saliha Unver, Ibrahim Ergenc, “Safety Risk Identification and Prioritize of Forest Logging Activities Using Analytic Hierarchy Process (AHP),” *Alexandria Engineering Journal* **60**, 1591-1599 (2021).
  12. CHoi, S. H., “Modeling Partially Dependent Double Failure States of Pressure Safety Valves,” *KIGAS* **22**(6), 40-43(2018).
  13. Kim, Y.-J. and Shim, J.-S., “A Comparison of Weight Elicitation Techniques:Focusing on AHP, JA, and SW,” *Institute of Public Policy and Administration*, **21**(1), 5-34(2007).
  14. Vaidya, O., Kumar, S., “Analytic Hierarchy Process: an Overview of Applications,” *Eur. J. Oper. Res.*, **169**(1), 1-29(2006).
  15. Subramanian, N. and Ramanathan, R., “A Review of Applications of Analytic Hierarchy Process in Operations Management,” *Int. J. Prod. Econ.*, **138**(3), 215-241(2012).
  16. Ishizaka, A. and Labib, A., “Analytic Hierarchy Process and Expert Choice: Benefits and Limitations,” *OR Insight*, **22**(4), 201-220(2009).
  17. Chemweno, P., Pintelon, L., Van Horenbeek, A., Muchiri, P., “Development of a Risk Assessment Selection Methodology for Asset Maintenance Decision Making: An Analytic Network Process (ANP) Approach,” *Int. J. Prod. Econ.*, **170**, 663-676(2015), <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.03.017>.
  18. Zavadskas, E. K. and Podvezko, V., “Integrated Determination of Objective Criteria Weights in MCDM,” *Int. J. Inform. Technol. Decis. Making*, **15**, 267-283(2016), <https://doi.org/10.1142/S0219622016500036>.
  19. Jovicic, S., Prusa, P. and Nikolicic, S., “Evaluation Criteria of the Belt Conveyor Using the AHP Method and Selection of the Right Conveyor by Hurwitz Method,” *Adv. Sci. Technol. Res. J.*, **12**(2), 137-143(2018), <https://doi.org/10.12913/22998624/92092>.
  20. Seong, J. H. and Byun, Y. S., “A Study on the Weights of the Condition Evaluation of Rock Slope used in Entropy and AHP Method,” *KOSOS*, **31**(5), 61-66(2016).
  21. Kim, J. M., Lee, J. B. and Chang, S. R., “Risk Level Analysis of Architectural Work Using AHP,” *KOSOS*, **32**(5), 96-102(2017).
  22. Davoodi, A., “On Inconsistency of a Pairwise Comparison Matrix,” *Int. J. Industr. Math.*, **1**(4), 343-350(2009).
  23. Cabala, P., “Using the Analytic Hierarchy Process in Evaluating Decision Alternatives,” *Operations Research and Decisions*, Wroclaw University of Technology, Institute of Organization and Management **1**, 1-23(2010).
  24. Han, Y., Wang, Z., Lu, X., Hu, B., “Application of AHP to Road Selection,” *Int. J. Geo-Inf.*, **9**(86), 1-21(2020), <https://doi.org/10.3390/ijgi9020086>.
  25. Saaty, T. L., “How to Make a Decision: the Analytic Hierarchy Process,” *Eur. J. Oper. Res.*, **48**, 9-26(1990).
  26. Eskander, R. F. A., “Risk Assessment Influencing Factors for Arabian Construction Projects Using Analytic Hierarchy Process,” *Alexandria Eng. J.*, **57**(4), 4207-4218(2018).
  27. Kang, E. J., Jang, S. M. and Kil, T. S., “A Study on the Priorities in the Roles of Community Pharmacists in Aged Society Using AHP,” *JKCA* **19**(6), 402-411(2019).
  28. An, J. S., “Developing Evaluation Criteria for Historic Gardens Preservation Condition by Applying Delphi Technique and Analytic Hierarchy Process,” *Sungkyunkwan University*, 38-60(2011).
  29. John Reynolds, Hal Thomas, Mike Moosemiller, “Predicting Relief Valve Reliability—Results of the API Risk-Based Inspection and AIChE/CCPS Equipment Reliability Database Groups,” *Process Plant Safety Symposium, Pressure Relief Systems* (Session T5a12), 1-6(2001).
  30. Lawshe, C. H., “A Quantitative Approach to Content Validity,” *Personnel Psychology*, **28**(4), 563-575(1975).

#### Authors

**Myung Chul Kim:** Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea; bestpoem@nate.com

**Mi Jeong Lee:** Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea; pslab@ut.ac.kr

**Dong Geon Lee:** Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea;ehdrjs9894@naver.com

**Jong-Bae Baek:** Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea; jbbak@ut.ac.kr