

구조방정식모형을 이용한 휴면에러 영향요인 분석

주영종* · 오 준* · 정태희* · 김병직** · 박교식**†

Analysis of Human Error Influencing Factor Using SEM (Structural Equation Modeling)

Youngjong Joo* · Jun Oh* · TaeHoi Jung* · Byungjik Kim** · Kyoshik Park**†

Corresponding Author

Kyoshik Park
Tel : +82-2-2408-7447
E-mail : hway21@empal.com

Received : April 12, 2021
Revised : April 30, 2021
Accepted : May 26, 2021

Copyright©2021 by The Korean Society
of Safety All right reserved.

Abstract : Human error is often in part in the cause of accidents and the result of various factors in an organization. Accidents should be investigated to elucidate all causes. Therefore, to reduce accidents, it is necessary to identify which factors affect human error within the organization. In this study, five groups of influencing factors on human error were selected using previous research, and operational definitions were made based on them. In addition, a questionnaire for measuring latent variables by operational definition was developed as an observation variable, and responses were received from employees of chemical companies in Ulsan. Based on SEM (structural equation modeling) analysis, 1) confirmatory factor analysis of variables in the human error model, 2) reliability and validity of latent variables, 3) correlations among latent variables, 4) influencing coefficients among influence factors, and 5) the verification results of the paths that these influencing factors have on human error are introduced in this study.

Key Words : human error, safety culture, SEM(structural equation modeling)

1. 서론

최근 고용노동부의 산업재해 통계에 따르면, 2019년도 재해자 수는 10만 9,242명으로 전년 대비 6.78% 증가하였다. 사고원인 분석결과, 사고로 인한 재해의 직접적인 원인으로 불안정한 상태 방치(34.93%), 복장 및 보호구 잘못 사용(19.57%), 감독 및 연락 불충분(18.25%) 순으로 나타나면서 불안정한 행동을 주된 원인으로 제시하고 있다¹⁾.

미국의 경우 McSween의 산업재해 통계분석 결과를 보면, 사고원인으로 불안정한 행동이 전체의 76%, 불안정 행동과 불안정 상태의 조합이 20%로 분석되어 불안정 행동의 비중이 전체의 96%를 차지하는 것으로 파악되었다²⁾.

이렇게 불안정 행동이 사고의 주된 원인으로 나타나면서 국내·외 많은 연구들이 휴면에러의 종류와 발생

과정을 규명하고자 하였다.

먼저 휴면에러의 종류에 대해 영국의 보건안전청(HSE)에서는 휴면에러를 비의도적인 것과 의도적인 것으로 구분하고 있다³⁾. 비의도적인 것에는 행동실수(slip), 기억실수(lapse), 규칙기반실수(rule based mistake) 그리고 지식기반실수(knowledge based mistake)가 있다. 행동실수에는 의도하지 않았지만 잘못된 실행으로 이어진 경우이고, 기억실수에는 과거의 기억 소환 실패로 인해 잘못된 실행으로 이어진 경우이다. 규칙기반실수는 과거의 일련의 경험을 바탕으로 미래를 잘못 예측하는 경우를 말한다. 지식기반실수는 상황에 대한 지식 부족으로 인해 잘못된 실행으로 이어진 경우를 말한다.

의도적인 에러는 일상적 위반(routine, Situational violation)과 상황적 위반(situational violation) 그리고 예외적 위반(exceptional violation)으로 분류된다. 일상적

*송실대학교 안전·보건융합공학과 박사과정 (Department of Health and Safety Convergence Engineering, Soongsil University)

**송실대학교 안전·보건융합공학과 교수 (Department of Health and Safety Convergence Engineering, Soongsil University)

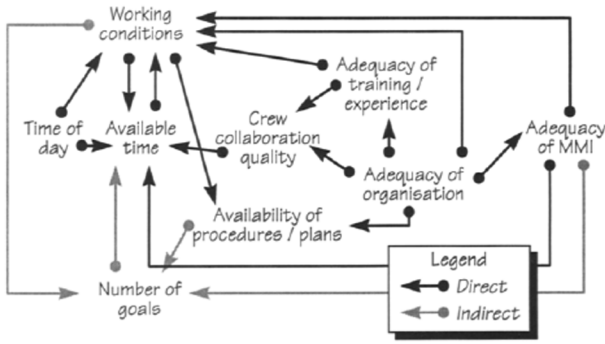


Fig. 1. Relationship among human error influencing factors.

위반은 반복된 위반으로 인해 위반의 잘못됨을 인식하지 못하고 같은 행위를 계속하는 것을 말한다. 상황적 위반은 상사의 지시 또는 동료들의 불안정한 행동에 심리적인 압박을 받아 발생하는 위반을 말한다. 마지막으로 예외적 위반은 다소 좋은 의도를 갖고 위반을 저지르는 경우를 가리킨다.

휴면예러의 발생과정에 대한 연구로 Reason은 사고가 발생하는 통합 영향모델(systemic model) 연구결과를 Swiss cheese model로 제시하고 있다. 이 모델은 조직의 잠재적인 결함으로 인해 개인의 실수가 발생하여 결국 사고로 이어지게 되는 영향관계를 보여주고 있다. 이를 통해 사고는 100% 개인의 실수에 의한 것이 아니라, 조직의 잠재적인 결함의 결과임을 제시하였다⁴⁾.

그리고 Hollnagel은 인지신뢰도 및 실수분석방법(CREAM; Cognitive Reliability and Error Analysis Method)을 개발한 바 있다. 이 모델에서는 수행조건, 조직의 적합성, 작업조건, 작업절차서 및 계획의 활용가능성, 작업시간, 교육 및 경험의 적합성 등이 Fig. 1과 같이 상호 영향을 미치면서 휴면예러에 영향을 미치는 것으로 제시하고 있다⁵⁾.

Fowler 등(2018)은 휴면예러를 유발하는 영향요인(PSF: Performance Shaping Factor)들 중 작업자의 비숙련, 작업시간의 촉박, 작업장 소음 그리고 작업장 설계 등을 주요한 휴면예러 영향요인으로 소개하였다⁶⁾.

국내 연구는 주로 휴면예러에 영향을 미치는 요인들을 파악하는데 중점을 두고 있다. 홍인기는 산업현장 근로자의 안전규정 위반행동이 발생하는데 경영진·관리감독자의 안전리더십, 안전자원 지원, 안전 의사소통, 안전규정·절차의 품질과 같은 안전문화 요인들이 유의한 영향을 미치고 있음을 제시한 바 있다⁷⁾.

문기섭은 경영가치, 안전소통, 안전규정/절차, 안전교육, 안전참여의 관찰변수로 구성된 안전분위기 요인이 안전행동(안전준수, 안전통제로 구성)에 영향을 주고 있음을 검증하였다⁸⁾.

마지막으로 박양기는 원자력발전소에서 조직요인(회사의 정책, 관리자의 태도, 교육훈련), 직무요인(규정/절차서, 업무 특성, 정보전달), 환경요인(기반시설, 환경, 장비), 인적요인(지식/경험, 심리적 상태, 신체적 상태)이 인적오류를 유발하고, 종사자의 근무기간, 업체의 참여기간과 작용하여 안전성과에 영향을 미치는 것을 검증하였다⁹⁾.

본 연구에서는 선행연구에서 제시한 휴면예러 영향요인들을 파악하였고, 이들 영향요인 간 관계를 구조방정식모형으로 분석하였다.

2. 연구 방법

본 연구를 위하여 우선 Fowler의 논문에서 제시하는 휴면예러 영향요인(PSF: Performance Shaping Factor)를 기초로 설문 문항 37개를 개발하였다. 이후 Hollnagel의 CREAM에서 제시한 휴면예러에 미치는 영향요인 분류를 기초로 안전문화, 작업환경, 작업조건, 관리감독, 개인의 상태 5개의 잠재변수로 반영하여 구조방정식모형 분석을 수행하였다. 이들에 대한 정의는 Table 1과 같다.

Table 1. Latent variables and their definitions

Latent variable	Definition	Sample questions
Safety culture	Management's leadership, Safety communication	Q1. Company management handles safety issues in the same way as production and quality. Q2. My supervisor listen to operators' safety issue.
Working condition	Nature of the work	Q1. During this work, I don't need to take care of more than 2 things at the same time. Q2. The number of alarm or information to monitor is appropriate during this work
Management	Working procedure, Resource allocation	Q1. Work procedure is easy to understand and who has to do what is clearly explained. Q2. Enough amount of time is given to me for safe operation.
Working environment	Lay out, Working environment	Q1. Operating mode at this work place is in line with my experience and common sense. Q2. The noise level is appropriate in this work place
Individual condition	Skill, Fatigue, Tension/Frustration	Q1. I know safe working and equipment operation method. Q2. I am not upset or frustrated during the work.
Human error	Slip, Lapse, Mistake, Violation	Q1. I forgot to do something even though I knew what to do. Q2. I violated the rule as my colleagues and senior also violated it.

본 연구를 위한 가설은 Reason의 Swiss Cheese model에서 제시하는 사고 발생 메카니즘(조직적 결함 → 부적절한 관리감독 → 불안정한 행동의 직접적 원인 → 작업자의 불안정한 행동 → 사고)과 Hollnagel의 CREAM에서 Fig. 1과 같이 제시하는 휴먼에러 영향관계를 기초로, 아래와 같이 수립하였다.

- 가설 1: 안전문화가 작업관리에 영향을 미친다.
- 가설 2: 안전문화가 작업환경에 영향을 미친다.
- 가설 3: 안전문화가 작업조건에 영향을 미친다.
- 가설 4: 작업관리가 작업자 컨디션에 영향을 미친다.
- 가설 5: 작업환경이 작업자 컨디션에 영향을 미친다.
- 가설 6: 작업조건이 작업자 컨디션에 영향을 미친다.
- 가설 7: 작업자 컨디션이 좋을수록 휴먼에러는 줄어든다.
- 가설 8: 안전문화가 작업관리를 매개로 작업자 컨디션에 영향을 미친다.
- 가설 9: 안전문화가 작업환경을 매개로 작업자 컨디션에 영향을 미친다.
- 가설 10: 안전문화가 작업관리를 매개로 작업자 컨디션에 영향을 미친다.
- 가설 11: 안전문화가 작업자 컨디션에 영향을 미친다.

각 잠재변수 간 영향관계를 Fig. 2와 같이 표시하였다. 설문조사 결과는 구조방정식모형 분석 프로그램인 JASP(Jeffreys's Amazing Statistical Program, 유의수준 95%)를 이용하여 분석하였다.

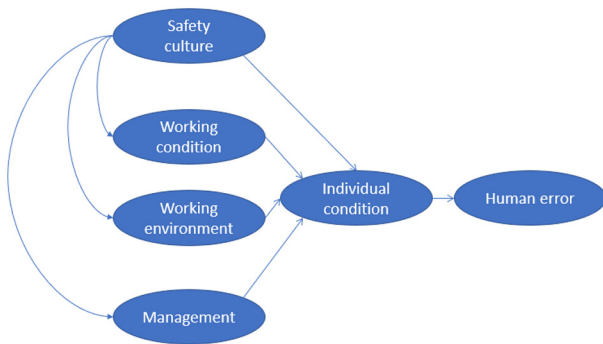


Fig. 2. Influencing relations among latent variables (hypothesis).

3. 연구 결과

3.1 설문조사

본 연구를 위해서 울산에 위치한 화학회사 직원 90명을 대상으로 설문조사를 실시하였다.

설문에는 총 90명이 참여하였으며, 근속 연수 10년 이상 작업자가 63%로 가장 많았고 5~10년 근속이 14%

였다. 따라서 5년 이상 근속 작업자의 전체 비율이 77%를 차지하여, 근속 연수는 전반적으로 높은 것으로 나타났다.

직군 분포는 생산 교대직 근무자 67%, 사무직을 제외한 현장 근무자 92%로 나타났다. 설문자 직종은 총 11가지로 분류하였다.

3.2 모형 적합도 분석

본 연구에서 사용한 측정도구는 X, M, W, Y가 있으며, 이들의 구성 체계에 대한 적합도를 확인하기 위해 확인적 요인분석(CFA: Confirmatory Factor Analysis)을 실시하였다. 모수치의 추정 방식은 최대우도법(ML: Maximum Likelihood)을 사용하였고, 모형의 적합도는 절대적합지수로 NC(Normed Chai-square), GFI, AGFI, RMR(SRMR), RMSEA를, 증분적합지수로 TLI, IFI, CFI, NFI를 참고하였다.

분석 도구는 독립변수(X tool: 안전문화), 1차 매개변수(M tool: 작업조건, 작업환경, 작업관리), 2차 매개변수(W tool: 작업자 컨디션) 그리고 종속변수(Y tool: 휴먼에러)로 나누어 JASP 프로그램을 이용하여 CFA를 분석하였다.

각 도구에서 최초 CFA 결과 일부가 모형 적합도 지수를 만족하지 못하였으나, 동일 요인 내 공분산을 설정하고 요인적재량(factor loading)에서 영향 계수 β 값을 만족하지 못하는 탐색변수를 제거함으로써, 모형 적합도 지수를 개선하였다. 자세한 적합도 지수는 다음 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Model CFA result

	Fitness	Criteria	Fit indices	Judgement
Absolute fit index	χ^2		83.50	
	df		45	
	p	<.05	< .001	
	NC(χ^2 /df)	<5.0	1.86	Good
	RMR(SRMR)	<.05(<.08)	0.071	Fair
	RMSEA	<.08	0.097	Fair
Incremental fit index	GFI	>.90	0.866	Fair
	NFI	>.90	0.878	Fair
	IFI	>.90	0.94	Good
	TLI	>.90	0.909	Good
	CFI	>.90	0.938	Good

3.3 타당도 분석

모형 적합도 분석을 통해 확보한 탐색변수에 대해서 요인적재량을 분석하였으며, 요인적재량 기준은 영향

계수(β value) 0.5 이상으로 하였다. 요인적재량 분석 결과, 모든 문항의 영향 계수(β value)가 0.5 이상으로 나타났다. 각 도구(X, M, W, Y 도구)의 자세한 요인적재량 분석 결과는 Table 3~6에 나타내었다.

아울러, Cronbach alpha, 평균 분산 추출(AVE: Average Variance Extracted), 개념 신뢰도(C.R: Construct Reliability)를 통해 신뢰도와 타당도 분석을 실시한 결과, 모두 기준을 충족하는 것으로 나타났다. 자세한 내용은 Table 7에 나타내었다.

Table 3. X tool factor loading

Factor	Observation variable	Standard error	p value	β value
Xsc	Xsl1	0.085	< .001	0.748
	Xsl2	0.112	< .001	0.537
	Xsl3	0.077	< .001	0.826
	Xsl4	0.095	< .001	0.68
	Xsc1	0.071	< .001	0.936
	Xsc2	0.115	< .001	0.639
	Xsc3	0.071	< .001	0.716
	Xsc4	0.101	< .001	0.623

Table 4. M tool factor loading

Factor	Observation variable	Standard error	p value	β value
Xmt	Xmp1	0.093	< .001	0.698
	Xmp3	0.081	< .001	0.637
	Xmr1	0.103	< .001	0.642
	Xmr2	0.097	< .001	0.826
	Xmr3	0.108	< .001	0.723
Xwe	Xmr4	0.097	< .001	0.679
	Xwe2	0.117	< .001	0.531
	Xws2	0.1	< .001	0.544
	Xws3	0.087	< .001	0.861
	Xws4	0.078	< .001	0.816
Xwc	Xws5	0.083	< .001	0.761
	Xwn1	0.131	< .001	0.545
	Xwn2	0.112	< .001	0.683
	Xwn3	0.106	< .001	0.704
	Xwn4	0.117	< .001	0.829
	Xwn5	0.124	< .001	0.709

Table 5. W tool factor loading

Factor	Observation variable	Standard error	p value	β value
Mic	Mif1	0.123	< .001	0.508
	Mif2	0.092	< .001	0.538
	Mif3	0.1	< .001	0.753
	Miu1	0.097	< .001	0.878
	Miu2	0.108	< .001	0.779
	Miu3	0.087	< .001	0.752

Table 6. Y tool factor loading

Factor	Observation variable	Standard error	p value	β value
Yhe	Yhs1	0.08	< .001	0.826
	Yhs2	0.082	< .001	0.896
	Yhl1	0.092	< .001	0.879
	Yhl2	0.085	< .001	0.947
	Yhv1	0.123	< .001	0.556
	Yhv2	0.127	< .001	0.511
	Yhv3	0.128	< .001	0.526

Table 7. Reliability, validity analysis result

	Cronbach α	AVE	C.R
Criteria	>0.7	>0.5	>0.7
Xsc	0.893	0.852	0.978
Xwc	0.781	0.806	0.953
Xmt	0.868	0.837	0.968
Xwe	0.829	0.846	0.964
Mic	0.87	0.834	0.967
Yhe	0.905	0.848	0.974

Xsc: Safety culture, Xwc: Working condition, Xmt: Management, Xwe: Working environment, Mic: Individual condition, Yhe: Human error

3.4 상관관계 분석

잠재변수 간 Pearson's Correlations 분석을 실시하였으며, 안전문화(Xsc)와 작업관리(Xmt) 사이 상관관계수가 0.761($p < .001$)로 나타나 가장 강한 상관관계를 나타내었다. 작업조건(Xwc)과 휴먼에러(Yhe) 사이에는 유의한 상관관계가 보이지 않았다. 작업자 상태(Mic)과 휴먼에러(Yhe) 사이에는 -0.447($p < .001$)로 가장 큰 음의 상관관계를 나타내었다. 또한 상관관계 분석 결과, 변수 간 공선성은 발견되지 않았다. 상관관계에 대한 자세한 내용은 Table 8에 나타내었다.

Table 8. Pearson's correlation among latent variables

Variable	Xwc	Xsc	Xmt	Mic	Xwe	Yhe
1. Xwc	—					
2. Xsc	0.362***	—				
3. Xmt	0.475***	0.761***	—			
4. Mic	0.534*	0.598***	0.699***	—		
5. Xwe	0.269*	0.539***	0.572***	0.608***	—	
6. Yhe	-0.08	-0.392***	-0.375***	-0.447***	-0.213*	—

* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

3.5 영향관계 분석

구조방정식모형을 통해 잠재변수 간 영향관계를 분석하여 직접효과와 간접효과를 파악하였다.

직접효과 분석결과, 안전문화(Xsc)가 작업관리(Xmt), 작업환경(Xwe) 그리고 작업조건(Xwc)에 유의미하게 ($p < .001$) 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그중에서 안전문화(Xsc)의 작업관리(Xmt)에 대한 영향 계수(β value)가 0.817로 가장 크게 나타났다. 또한 작업조건(Xwc), 작업환경(Xwe) 그리고 작업관리(Xmt)가 모두 작업자 조건(Mic)에 유의미하게($p < .001$) 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 그중에서 작업관리(Xmt)의 작업자 상태(Mic)에 대한 영향 계수(β value)가 0.417로 가장 크게 나타났다.

간접효과 분석결과는 다음과 같이 나타났다.

- 1) 안전문화(Xsc) → 작업관리(Xmt) → 작업자 상태(Mic) → 휴먼에러(Yhe) 경로 영향 계수(β value) -0.115($p < .05$)
- 2) 안전문화(Xsc) → 작업환경(Xwe) → 작업자 상태(Mic) → 휴먼에러(Yhe) 경로 영향 계수(β value) -0.06 ($p < .05$)
- 3) 안전문화(Xsc) → 작업조건(Xwc) → 작업자 상태(Mic) → 휴먼에러(Yhe) 경로 영향 계수(β value) -0.055 ($p < .05$)

다시한 영향요인 분석결과는 Table 9에 나타내었다.

Table 9. Influencing factor analysis

Influencing path	s.e	p	β value
Xsc → Xmt	0.131	< .001	0.817
Xsc → Xwe	0.137	< .001	0.628
Xsc → Xwc	0.141	0.002	0.437
Xwc → Mic	0.121	0.002	0.368
Xwe → Mic	0.131	0.007	0.311
Xmt → Mic	0.127	< .001	0.417
Mic → Yhe	0.125	0.005	-0.339
Xsc → Xmt → Mic → Yhe	0.051	0.016	-0.115
Xsc → Xwe → Mic → Yhe	0.034	0.036	-0.066
Xsc → Xwc → Mic → Yhe	0.028	0.038	-0.055

또한 Fig. 3에 각 잠재변수 간 영향요인을 표시한 구조방정식모형을 추가하였다.

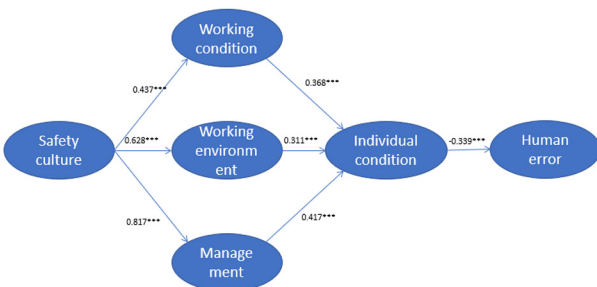


Fig. 3. Influencing relations among latent variables.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 휴먼에러에 미치는 영향요인을 조사하기 위해서 선행연구를 기초로 설문지를 개발하였으며, 국내 화학회사 직원 90명을 대상으로 설문조사를 하였다. 설문조사 결과는 JASP를 이용하여 구조방정식모형 분석을 하였다. 11개 가설에 대한 분석결과, 다음과 같이 10개가 채택되었고, 1개 가설이 기각되었다.

- 가설 1: 안전문화가 작업관리에 영향을 미친다. - 채택
- 가설 2: 안전문화가 작업환경에 영향을 미친다. - 채택
- 가설 3: 안전문화가 작업조건에 영향을 미친다. - 채택
- 가설 4: 작업관리가 작업자 상태에 영향을 미친다. - 채택
- 가설 5: 작업환경이 작업자 상태에 영향을 미친다. - 채택
- 가설 6: 작업조건이 작업자 상태에 영향을 미친다. - 채택
- 가설 7: 작업자 상태가 좋을수록 휴먼에러는 줄어든다. - 채택
- 가설 8: 안전문화가 작업관리를 매개로 작업자 컨디션에 영향을 미친다. - 채택
- 가설 9: 안전문화가 작업환경을 매개로 작업자 상태에 영향을 미친다. - 채택
- 가설 10: 안전문화가 작업관리를 매개로 작업자 상태에 영향을 미친다. - 채택
- 가설 11: 안전문화가 작업자 상태에 영향을 미친다. - 기각

본 연구를 통해 안전문화가 휴먼에러에 영향을 미치는 근본원인이라는 것이 확인되었다. 다만, 휴먼에러에 가장 직접적인 영향을 미치는 요소는 작업자의 상태인 것으로 나타났다. 다시 말해 안전문화가 작업관리, 작업조건 그리고 작업환경을 매개로 작업자의 상태에 영향을 미치고, 작업자의 상태는 휴먼에러의 직접적인 영향요인인 것으로 나타났다.

이는 Reason이 swiss cheese model을 통해 제시하는 사고 발생 메카니즘 (조직적 결함 → 부적절한 관리감독 → 불안정한 행동의 직접적 원인 → 작업자의 불안정한 행동 → 사고)를 상당히 뒷받침한다.

그러나, 다수의 선행 연구에서 안전문화가 근로자의 상태에 영향을 주고 결국 참여행동과 준수행동을 유발한다고 제시하고 있는데 반해, 본 연구에서는 안전문화와 근로자의 상태 사이에 작업환경, 조건, 관리감독 등의 매개 요인이 있는 것으로 나타났다.

안전문화가 근로자의 실수 또는 준수 행동에 어떤

경로를 통해 영향을 주는지는 좀 더 다양하고 많은 작업자들을 대상으로 연구가 필요할 것으로 사료된다.

References

- 1) Ministry of Employment and Labor of Korea, "Occupational Accident Statistics", 2019.
- 2) J. C. Park, "A Study on the Analysis of Human-errors in Major Chemical Accidents in Korea", Korea National University of Transportation, 2017.
- 3) Human Factors: Managing Human Failures (<https://www.hse.gov.uk/humanfactors/topics/humanfail.htm>).
- 4) Safety Institute of Australia Ltd, "Model of Causation: Safety", pp. 12-15, 2012.
- 5) E. Hollnagel, "Cognitive Reliability and Error Analysis Method", Elsevier, p. 113, 1998.
- 6) E. Fowler, "Critical Evaluation of Quantitative Human Error Estimation Methods in Light of Different Incident Causation Models and Hollnagel's Research on Performance Variability", Aberdeen University, p. 47, 2018.
- 7) I. G. Hong, "Analysis of Structural Model for the Safety Violation Behavior of Industrial Workers", Korea National University of Transportation, p. 65, 2016.
- 8) K. S. Moon, "Research on Predisposing Factor of Safety Climate and Safety Performance", Kyunghee University, p. 90, 2014.
- 9) Y. G. Park, "The Effect of the Factors to Induce Human Error on Safety Perceived by Maintenance Men - Focusing on Nuclear Power Plants", p. 44, 2011.
- 10) S. K. Lee et al., "Research about Researcher's Safety Ethnic Level and Improvement Extent of Safety Culture, Based on Organizational Safety Efforts", J. Korean Soc. Saf., Vol. 30, No. 3, pp. 123-134, 2015.
- 11) M. Jae and K. Han, "Development of A New Methodology for Evaluating Nuclear Safety Culture", J. Korean Soc. Saf., Vol. 30, No. 4, pp. 174-180, 2015.
- 12) I. G. Hong and J. B. Baek, "Towards an Effective Assessment of Safety Culture", J. Korean Soc. Saf., Vol. 31, No. 1, pp. 118-125, 2016.
- 13) H. S. Kwon and K. O. Lee, "A Study on the Characteristics of Safety Culture by Workplace Size and Work Type in the Group Company", J. Korean Soc. Saf., Vol. 32, No. 6, pp. 125-130, 2017.
- 14) K. S. Song et al., "The Effect of Safety Culture on the Safety Awareness and Safety Behavior of Manufacturing Workers", J. Korean Soc. Saf., Vol. 34, No. 6, pp. 65-75, 2019.
- 15) K. H. Wee et al., "Structural Relations Between Safety Leadership, Safety Observance, Safety Education, and Safety Culture - K Company Case Study -", J. Korean Soc. Saf., Vol. 36, No. 1, pp. 36-43, 2021.
- 16) D. H. Kim, "Study on Human Error Analysis of Chemical Plants", KOSHA Occupational Safety and Health Research Institute, 1999.