

모델링 기반 사고 대응 절차 수립 방법에 관한 연구

설지우 · 채충근 · 이경진 · 문명환 · 고재욱[†]

광운대학교 화학공학과
01897 서울특별시 노원구 광운로 20
(2016년 11월 10일 접수, 2016년 12월 28일 수정본 접수, 2017년 1월 5일 채택)

A Study on Development of Functional Recommendation for Planning Emergency Response Using Model-Based Approach

Ji Woo Seol, Chung Keon Chae, Kyung Jin Lee, Myong Hwan Moon and Jae Wook Ko[†]

Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University, 20, Kwangwoon-ro, Nowon-gu, Seoul, 01897, Korea
(Received 10 November 2016; Received in revised form 28 December 2016; accepted 5 January 2017)

요 약

사고 대응 가이드라인은 사고 발생 시 그 영향을 줄이기 위한 수단으로 중요한 역할을 한다. 유용한 사고 대응 가이드라인의 개발을 위하여 개발 절차에 공학적 방법론의 적용이 필요하다. 본 논문에서는 기존에 존재하는 사고 대응 가이드라인 작성 방법론에 Bow-Tie 기법, 사고 전개 모델, 위험 대응 의사결정 등 위험 관리 기법을 적용하였다. 이러한 방법으로 일반화된 사고 대응 가이드라인 작성 절차를 제안하였으며, 직접적으로 활용할 수 있도록 Sheet를 개발하고, 특정 Case를 적용하여 Sample Guide를 작성하였다.

Abstract – Emergency response guidelines play an important role which reduce consequence of accident. For development of useful emergency response guidelines, engineering methodology should be applied to the development procedures. In this study accident propagation model, bow-tie methods, emergency response decision methods were applied to existing emergency response guideline develop procedure. In this way, this study suggest generalized emergency response guideline develop procedures. Also a sheet was developed using suggested procedures to make sample guidelines for a case.

Key words: Emergency response, Guideline, Accident model, Business continuity plan

1. 서 론

화학공장에서는 사고를 예방하기 위해 많은 노력을 들이고 있지만, 현실적으로 모든 사고를 방지한다는 것은 불가능에 가깝다. 이 때문에 사고가 발생했을 경우, 이에 대처하기 위해 각각의 사업장에서는 사고 대응 계획(emergency response plan, ERP)을 자체적으로 수립하고 유지 관리하고 있다. 또한 국내 산업안전보건법 등 관련법에서도 비상조치계획을 수립할 것을 의무화하고 있다.

사고 대응 계획을 잘 운영하기 위해서는 최초에 잘 작성하는 것 뿐만 아니라, 지속적인 유지보수과정을 통해 공정, 가용 인력 및 관련 장비의 변화 등을 지속적으로 반영하고, 효과적인 사고 대응 계획이 될 수 있도록 하여야 한다. 그러나 현재 사고 대응 계획은 구

체적인 모델링이 되어 있지 않아, 요소의 구분, 연결관계 등을 명확하게 제시하고 있지 못하다. 이 때문에 사고 대응 계획은 체계적인 작성 방법 및 유지보수방법이 존재하지 않으며, 각각의 사고 대응 계획의 작성 및 각각의 계획의 유효성 판단을 경험에 의존하여야 하는 결과를 초래한다. 또한 일관성 있는 수립 과정이 존재하지 않으므로 담당자 변화에 따른 혼선이나 유지보수과정에서 기존 자료 활용 문제, 기존 가이드라인과 새로 작성된 가이드라인 사이의 유기적 연결을 기대할 수 없는 등 문제가 많다. 이러한 문제를 해결하기 위해 기존 연구들에서는 사고 대응 계획을 수립하기 위한 방법론[1], 사고의 흐름의 모델링[2], 기존의 위험성 평가 방법론을 사고 대응 계획에 적용하려는 연구[3] 등 사고 대응 계획을 체계화 하려는 시도는 여러 번 있어왔다. 이 연구에서는 이러한 배경 연구들을 기반으로, 사고와 사고 대응 계획 사이에 몇몇 가정을 도입하여 모델링 및 관계를 정의하고, 사고 대응 계획을 작성하기 위한 하나의 sheet를 제시하고, 특정 상황을 적용하여 sample 가이드를 작성하는 과정을 통해, 체계적인 사고 대응 계획 작성법을 제안하고자 한다.

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jwko@kw.ac.kr

[‡]이 논문은 광운대학교 한 춘 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.

2. 기존 사고 및 리스크 대응 방법론

미국 Federal Emergency Management Agency (FEMA)에서는 다양한 형태의 사고에 대해 대응하기 위하여, 사고 대응 가이드라인 작성 절차를 제시하고 있다[1]. FEMA에서 제시하는 절차에 따르면, 사고 대응 가이드라인은 유해위험요인 분석 및 위험성 평가 결과에 따라 작성되어야 하며, 목표 수행 시간을 설정하여 행동 절차가 수립되어야 한다. 또한 사고 대응 가이드라인이 지속적으로 유효한 내용이 될 수 있도록 사전에 진행되어야 할 교육/훈련에 관한 내용이나, 유지보수에 관한 계획 등을 사전에 수립하여 명시하도록 되어있다. 이러한 방법론은 총 6개의 절차로 나누어 정리되었으며, Fig. 1은 이를 도식화한 것이다.

한편, Li는 지하철 내 화재사고에 대한 사고 대응 계획을 수립하는 과정에 있어, Petri Net Diagram을 사용하는 방법을 제시하고 있다[2].

Petri net diagram은 어떤 사건이 진행이 될 때, 사전에 설계된 내용에 따라 어떠한 형태로 사고가 진행될지를 예측하는 도식화된 모델링 방법이다. Li는 이를 사용하여 사고 대응 계획을 작업(task),

자원(resources), 시간(time), 타 작업과의 관계(relation)의 네 가지 요소를 가지고 있다고 정의 하였다.

또 Girard는 위험성 평가 기법을 활용하여 국지적 사고 대응 계획의 유효성을 검증하려는 시도를 하였다[3]. Girard는 이러한 시도를 통해 LERP 평가를 제시하였다. LERP 평가는 결과적으로 Fault Tree Analysis (FTA)와 유사한 형태로 각각의 사고 대응 계획에 대한 평가를 수행하게 된다. Fig. 2은 Girard가 제시한 LERP 평가의 적용 결과를 도식으로 나타낸 것이다.

영국의 재무부(HM Treasury)는 Management of Risk를 발간하여, 리스크의 식별부터 이를 어떻게 관리할 수 있는지 등에 대해 다루고 있다[4]. 이에 따르면, 리스크는 수용(tolerate), 처리(treat), 이전(transfer), 종료(terminate), 새로운 기회발굴(take the opportunity)의 다섯가지 방안으로 대응할 수 있으며, 처리는 다시 예방(preventive control), 교정(corrective control), 방향수정(directive control), 감지(detective control)등의 제어 방법을 동원할 수 있다고 하였다.

ISO-22301에서는 IT 및 금융권에서 개발 및 시행되어온 BCM (business continuity management) 기법 기반 위기 대응 절차에 대

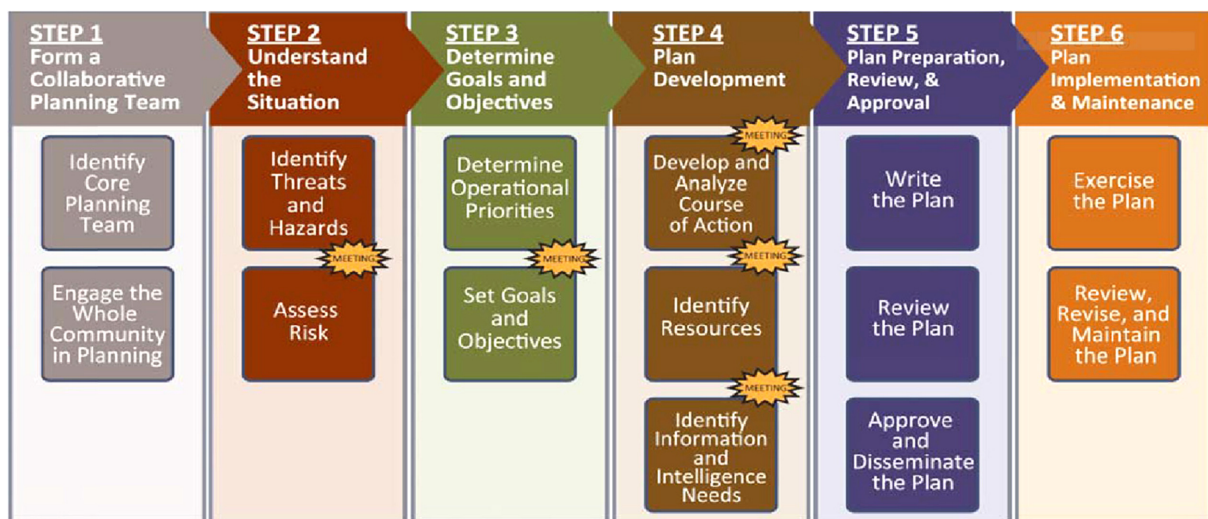


Fig. 1. FEMA's procedures of emergency response guidelines.

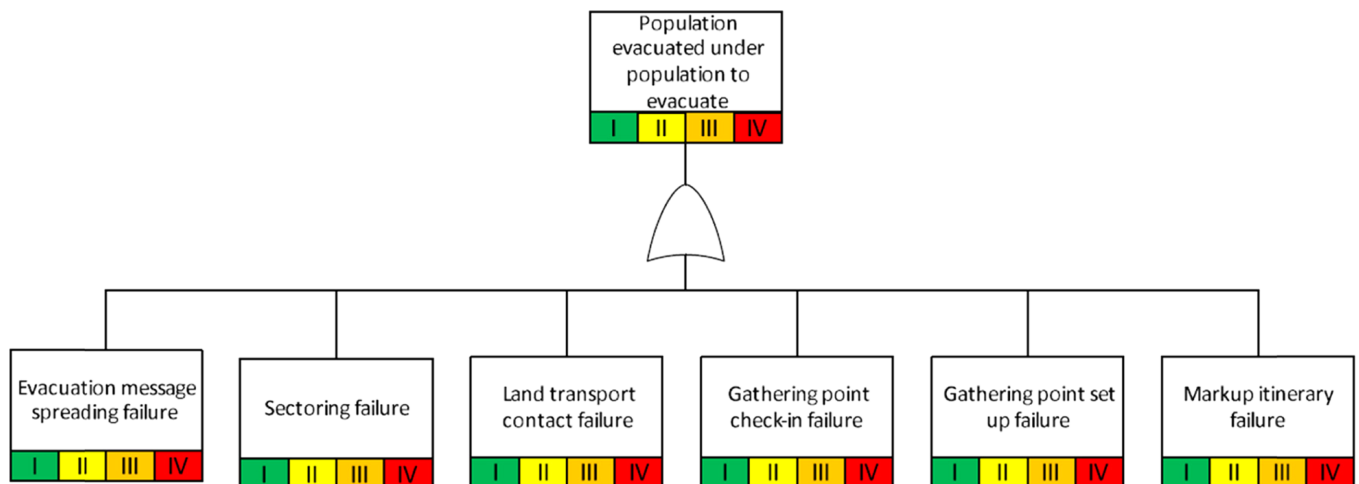


Fig. 2. Diagram of LERP assessment about evacuation systems.

하여 다루고 있다[5]. 이는 기업의 손실을 최소화하는 것을 목적으로 PDCA (Plan, Do, Check, Action) 사이클에 따라 5가지의 단계를 적용하여 위기에 대한 대응을 수행하도록 되어있으며, 각각의 내용은 아래와 같다.

2-1. Signal detection(징후 감지)

어떤 위기상황이 발생하기 전에 발견되는 징후를 추적 및 분석하여 모니터링 한다.

2-2. Preparation/prevention(예방과 대비)

위기상황을 해결하기 위하여 사전에 시스템의 약점을 확인하고, 이에 대해 평가한다. 그리고 훈련 및 장비의 테스트를 통해 위기상황에 대한 대응을 준비한다.

2-3. Damage limitation(피해 제한)

위기상황이 발생했을 경우, 피해의 확대를 막고, 온전한 부분이 위기상황에 영향 받지 않도록 한다.

2-4. Recovery(복구)

위기상황에 의해 손실된 주요 기능 및 세부 기능을 복구하고, 위기상황 이전의 상태로 회복되도록 조치를 수행한다.

2-5. Learning(교훈)

위기상황이 종료 된 후, 위기상황에 발생하였던 상황들을 반영하여, 다음에 찾아올 위기상황에 대비하기 위한 행동을 취한다.

ISO-22301에서는 각각의 구성요소에 대해 측정 가능한 것, 책임자가 있어야 할 것 등 세부적인 요소까지 제시하고 있는 것을 확인할 수 있다.

3. 리스크 대응모델 구축

3-1. 모델 수립

사고 대응 가이드라인을 작성하기 위해서는 사고가 어떻게 발생하고, 진행되어 사고 피해자를 유발하는지에 대하여 모델링할 필요가 있다. Leveson은 인적 오류를 포함한 사고들을 발생시키는 치명적인 요소가 무작위적으로 발생하지 않는다고 하였으며, Rasmussen의 사고 모델에 의해 예측 가능하고, 제어가 가능할 것이라고 하였다[6]. Rasmussen은 사고가 여러가지 근본 원인이 사고가 될 수 있는 과정을 통해 치명적인 사건(critical event)을 유발하고, 치명적인 사건이 사고 흐름에 따라 확대/전달되어 목표한 희생자를 발생한다고 하고 있다[6,7]. Heinrich는 사고가 발생하는데 5가지의 요소의 연쇄 조합에 의해 발생한다고 하였다[8]. 사고 대응 가이드라인은 Heinrich의 5가지 요소 중 immediate cause에 대하여 작용한다고 할 수 있을 것이다. Fig. 3은 Heinrich와 Rasmussen이 제시한 사고 모델과 사고 대응 가이드라인 사이의 관계를 도식화한 것이다.

조합된 사고 모델은 bow-tie analysis의 event-consequence와 구조와 구성요소에서 많은 유사점을 가지고 있으며, bow-tie의 구성요소 중 하나인 escalation factor 및 escalation control을 사고 대응 가이드라인처럼 사용할 수 있을 것이라고 생각되었다. escalation factor 및 escalation control을 사고 대응 가이드라인으로 만들기 위하여 다음과 같은 가정을 도입하였다.

- 1) 사고 대응 가이드라인은 치명적 사건 이후로만 작용한다.
- 2) 사고는 사고 흐름에 의해서만 진행되며, 그 과정이 task에 의해 차단될 경우, 해당 사고 흐름은 종료된다.
- 3) 각각의 상황에 존재하는 위험이 발현되는 것을 사고의 흐름으로 정의한다.
- 4) 각각의 위험을 차단하기 위한 대응 방법은 예방, 경감, 감지의



Fig. 3. Accident propagation models with emergency response guidelines.

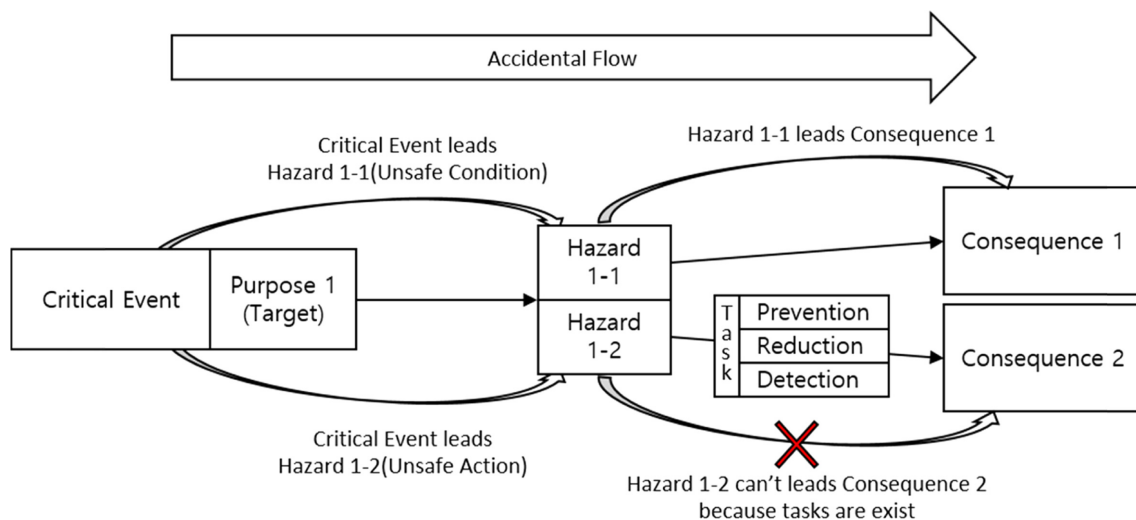


Fig. 4. Relation of accident model and emergency response guidelines.

Table 1. Example of object and critical process for accident response

Object	Critical process	Order	Description
Minimize accident propagation	Ensure power supply	1	Prevention accident propagation by In-process shutdown
	Ensure cooling water/steam supply	2	Prevent equipment failure, fire and explosion by changes in process temperature
	Ensure flow	4	Prevention equipment failure and accident propagation by ensure flow
	Storage tank management	3	Analyze the impact to the storage tank and Predict consequence when storage tanks were failed
Rescue people	Traffic control	8	Traffic control for activity of rescue team and evacuation of casualties.
	Scen management	6	Prevent further casualties by access control
	Management equipment and relief supplies	7	Management receipt and distribute of supplies
Recover	Decontamination	9	Decontamination by using appropriate removal tool and neutralizer
	Remove debris	10	Remove debris made by fire and explosion
etc	Additional support management	5	Establish criteria of request additional support and hold contact of the agency

Table 2. Level of emergency

Level	Type	Definition	Response
Level 1	Non-surety emergency	Events are likely to occur or have occurred that may be perceived as a chemical agent material emergency	Review possibility that another accident caused by an accident Check normal operation of key processes
Level 2	Limited area emergency	Events are likely to occur or have occurred that involve agent release outside engineering controls or approved chemical storage facilities with chemical effects expected to be confined to the chemical limited area	Operate response team Check normal operation of critical processes Perform life-saving activities
Level 3	Post only emergency	Events are likely to occur or have occurred that involve agent release with chemical effects beyond the chemical limited area	Operate response team Perform life-saving activities Maintain the function of critical process Evaluation accident scale
Level 4	Community emergency	Events are likely to occur or have occurred that involve agent release with chemical effects beyond the installation boundary	Operate response team Perform life-saving activities Maintain the function of critical process Request additional support Evaluation accident scale

세가지 방법을 사용할 수 있다.

5) 유해위험요인은 각각의 목표를 수행하는데 있어 실패 또는 수행 불가능한 상황에 빠지게 하는 불안정한 상태, 불안정한 행동 등을 찾아내는 것으로 하였다.

Fig. 4은 가정을 적용하여 사고 모델과 사고 대응 가이드라인 간의 관계를 도식화한 것이다.

3-2. BCP 기법 적용

기존 연구 결과로부터 유해위험요인의 예시 및 핵심 프로세스의 분석 및 사고 대응 등급 부여 등의 절차를 참조하였다. Table 1은 화학공장에 대하여 BCP를 적용하여 도출한 목표 및 세부 내용의 예시를 나타낸 것이다[9].

또한 위험등급(Level of emergency)을 4단계로 나누어 각각의 task에 단계를 부여할 수 있도록 하였다.

3-3. Sheet 개발

모델링된 사고 대응 가이드라인의 형태를 기반으로, 사고 대응 가이드라인을 작성하기 위한 sheet를 개발하였다. sheet는 다음 흐름에 따라 작성할 수 있도록 하였다[10-12].

1) 사고 대응의 큰 흐름을 네 가지 단계로 나누고(사고 확대 방지, 인명 구조, 사고 상황의 종결, 사후 조치의 계획 및 실행) 이를 사고 대응의 최종목적으로 정의

2) 최종목적을 달성하기 위한 활동과, 이를 방해할 수 있는 상태, 행동 등을 방지하는 항목들을 분석하고, 이를 사고 대응의 목표로 정의

3) 각각의 목표별로 수행할 수 있는 모든 행동들을 임무로 정의

4) 임무에 필요한 자원들(최대 수행 시간, 최소 수행 인원, 필요

장비) 정의

5) 최소 수행 인원을 교육 및 훈련을 받은 인원과, 그렇지 못한 인력으로 구분

6) 각 유해위험요인을 도출하기 위한 가이드 워드로 주 임무(main task), 불안전 상태(unsafe condition), 불안전 행동(unsafe action) 세가지의 키워드를 사용

7) 각 task를 결정하기 위하여 예방(prevent (eliminate)), 경감(reduce), 감지(detect)의 세가지 키워드를 guideword로 사용

3-4. 사례적용 결과

개발된 sheet를 임의의 case에 적용하여 사고 대응 가이드라인을 작성하였다. 작성 결과는 Table 3과 같다[13,14].

4. 결 론

이 연구에서는 사고 대응 가이드라인 작성 방법을 제시하기 위하여 사고의 진행 모델을 수립하고, 이 모델로부터 가이드라인을 수립하는 방법과 실제 사용을 위한 Sheet를 제시하였다. 이 연구의 결과물을 통해 사고 대응 가이드라인의 절차적 수립 방안을 제시함으로써 일관된 수준의 사고 대응 가이드라인을 개발 또는 유지보수 할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 각각의 가이드라인 구성 요소가 독립적으로 평가 가능한 단위로 분리가 되기 때문에, 사고 대응 가이드라인의 효과를 정량적으로 평가하는데 사용할 수 있을 것이다. 한편으로는 현재 작성된 절차는 각각의 위험에 대하여 필요한 행동 목표를 제시하는 것뿐이기 때문에 가이드라인의 적용 시점, 가이드라인 사이의 연관성을 도출할 수는 없다는 한계가 존재하였다.

Table 3. Emergency response guidelines developing sheet and sample guideline for a tank truck accident on highway

No.	Procedures							Resources (minimum)		
	Purpose	Object	Task	Sequence	Level	Order	Time	Trained Person	Total Person	Equipment
1	Prevent propagation of accident	Traffic accident	Set guide on road	Divide hot/warm/cold zone with barricade and agent	1	1	15 min	1	3	temporary barricade (tapes etc.)
		Fire & Explosion	Remove ignition sources	Do not turn on/off electric equipment in affect zone (hot/warm)	1	N/A	while operation	N/A	N/A	N/A
		Material Release	Limit liquid release	Install temporary dike	2	2	1 hr	1	3	Temporary dike
			Remove material from tank	Transport remaining material to other tank	3	3	1~4 hr	2	2	Other tanktruck
			Limit gas release	Spray water on tank	3	3	while operation	2		water supply wagon
			Identify agent	Identify agent with devices, comprehensive sources etc.	1	1	10 min	1		Identification Kit, chemical detector etc.
		Field protection	Wear PPEs	Identify PPE leves form agents Rescuer wear PPEs	1	2	5 min	N/A	N/A	PPEs
			Rescuer decontamination	Set decontamination & support area	1	3	30 min	1	4	water supply wagon decontamination
2	Save lives	Escape	Save drivers	First aid victims	2	1	5 min			First aid kit
				rescue drivers with proper way	2	2	20 min	2		Stretcher
			Escape community	Escape community included affect zone	4	2	1 hr	1	1	Communication equipment etc.
		Transport	Secure route	Secure site that can be park ambulance	2	3	10 min		1	
				Identify hospitals that can be cure	2	4	5 min	1		Communication equipment
		Medical Treatment	Cure victims	Cure victims with hospital cure procedures	2	5	N/A	N/A	N/A	
3	Terminate an accident situation	Remove Truck	Remove truck that can't drive	Remove truck with crane and dump truck	2	6	N/A	2	2	Crane, dump truck
			Remove truck that can drive	Remove truck with wrecker	1	6	N/A	1		Wrecker
		Remove spilled material	Remove spilled liquid	Remove liquid with form or absorbing foil	2	3	while operation	N/A	N/A	Absorbing foil Form
4	Plan&Implement follow-up actions	Post treatment to victims	treatment of post syndrome		2	7	N/A	N/A	N/A	

감 사

이 연구는 2015년도 지식경제부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20132010500030).

Reference

1. Craig Fugate, W., Developing and Maintaining Emergency Operations Plans, 2nd ed., FEMA(2010).
2. Q. Li et al., "Modeling and Analysis of Subway Fire Emergency Response : An Empirical Study," *Safety Science*, **85**, 171-180(2016).
3. C. Girard et al., "Emergency Response Plan : Model-based Assessment with Multi-state Degradation," *Safety Science*, **85**, 230-240 (2016).
4. HM Treasury, The Orange Book-Management of Risk-Principles and Concepts, HMSO, Norwich, Norfolk(2004).
5. ISO Central Secretariat, ISO 22301 Societal Security-Business continuity management systems-Requirements(2012).
6. Leveson, N., "A New Accident Model for Engineering Safer Systems," *Safety Science*, **42**(4), 237-270(2004).
7. Rasmussen, J. and Svedung, I., Proactive Risk Management in a Dynamic Society, Statens räddningsverk(2010).
8. Heinrich, H. W., Industrial Accident Prevention : A Safety Management Approach, 5th ed. McGraw-Hill, New York, NY(1980).
9. J. M. Yang et al., "A Method to Develop for Emergency Response Guidelines using Business Continuity Plan in Chemical Plant," *Korean Chem. Eng. Res.*, **52**(6), 743-749(2014).
10. NATO Civil Protection Group, Guidelines for First Response To a cbrn incident, 2nd ed., NATO Graphics & Printing, Brussel(2014).
11. EPA, EPA QA/G-6 Guidance for preparing standard operating procedures(SOPs), EPA, Washington, D. C.(2007).
12. Catino, C. A. and Ungar, L. H., Model-Based Approach to Automated Hazard Identification of Chemical Plants, *AIChE Journal*, **41**(1), 97-109(1995).
13. Department of Homeland Security, Writing guide for Standard Operating Procedures, SafecomProgram, Washington, D. C. (2016).
14. <https://chemm.nlm.nih.gov/>.