

Information Construction for Predicting Accident Risks in Vulnerable Facilities in Prevention of Chemical Terrorism and Accidents

Hee Jang^{1#}, Ga Young Jung², Ha Eun Go², Min Su Kim³, Chang Bock Chung¹⁺

¹ Department of Chemical Engineering Chonnam National University, 77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju, Korea

² School of Chemical Engineering Chonnam National University, 77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju, Korea

³ National Institute of Chemical Safety, 90 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

Abstract

Despite changes in public perception and continuous revision of laws related to chemical accidents, chemical accidents are continually occurring and the damage scale is not decreasing. In order to effectively cope with chemical accidents, it is required to strengthen the response system for chemical accidents, which quickly obtains information on chemical processes and responds accordingly. The purpose of this study is to develop safety information cards which describe the chemical processes of major hazardous chemicals. A total of nine substances were selected based on the accident history in South Korea. In addition, the accident risk factors and related information for 51 chemical processes and facilities were determined. By reconstructing and summarizing the results, we then produced the "chemical accident response card" for each chemical process containing key process information, preventive measures, and response methods. These cards can serve as useful materials for business sites dealing with hazardous materials and emergency agency staff.

Key words: chemical accident, provision system, response system, chemical process, chemical accident response card

1. 서론

2012년 구미 불산 누출사고 이후 화학사고에 대한 중요성이 커지면서 환경부를 비롯한 각 부처에서는 화학물질 관련 법을 개정하고 관리규정을 강화하였다. 그럼에도 불구하고 2018년 8월 경북 칠곡 황산누출 사고, 2018년 9월 경기 이산화탄소 누출사고 등 화학사고는 최근까지도 끊임없이 발생하고 있으며, 피

해규모도 감소하지 않고 있다. 2016년도 화학물질 통계조사 결과에 따르면 2014년도 대비 12.6%의 화학물질 유통량이 증가하였으며, 유해화학물질은 8.5%가 증가하였다(MOE Press, 2018). 이처럼 해마다 화학물질 유통량 및 배출량이 증가하고 있으며, 그에 따라 화학사고 발생 가능성도 높아지고 있다. 특히 여수, 울산 등 대규모 석유화학단지가 위치하고 있는 지역에서는 대량의 화학물질을 취급하고 다양한 유해·위험

The 1st author: Hee Jang, Tel. +82-62-530-0774, Fax. +82-62-530-0252, e-mail. koshajang@gmail.com

+ Corresponding author: Chang Bock Chung, Tel. +82-62-530-1884, e-mail. chungcb@jnu.ac.kr

물질을 다루는 시설이 배관 등으로 연결되어 있기 때문에, 사고발생과 그 피해에 대한 우려의 목소리는 높아질 것으로 예상된다. 따라서 사고발생건수와 피해 규모를 줄이기 위해 취급물질, 취급시설 등에 따른 적합한 정보를 제시하여 화학사고에 효율적으로 대응하는 방법을 마련할 필요가 있다.

지역 주민과 공장 주변 환경에 끼치는 심각한 피해를 줄이기 위해 화학사고 발생 시 초기에 신속하게 대응하는 것은 매우 중요하다. 사고현장에 정확한 방재 정보와 대응방법을 신속하게 제공하기 위해서는, 기존의 MSDS와 사고대비물질 키인포가이드 등 물질 특성 위주의 정보뿐만 아니라 해당 물질의 취급시설에 관한 정보도 필요하다. 또한 사고 발생 시 빠른 대피를 위해 대략적인 사고영향범위 또한 제공할 필요가 있다. 그러나 화학사고 대응기관에서 보유하고 있는 정보는 주로 물질에 관한 유해성과 물리적 특성, 획일적인 방재정보 등에 머물고 있어 취급물질에 따른 시설별·공정별 구체적인 정보를 제공하는 데에는 한계가 있다.

이에 본 연구는 화학사고 발생 빈도가 높은 각 물질에 대하여 취급시설별 위험요인을 도출하고, 그에 따른 안전조치사항과 사고대응방안, 사고영향범위 등과 같은 화학사고 예방·대비·대응정보를 마련하여 신속하고 체계적인 사고 대응 체계를 제시하는 것을 목적으로 한다. 또한 연구를 통해 마련한 다양한 정보를 토대로 화학사고 대비·대응을 위한 안전조치 정보카드를 마련·제시하고자 한다.

II. 화학사고 취약 물질·공정 선정

화학사고 취약 물질 및 공정을 선정하기 위해 화학물질안전원의 화학안전정보공유시스템을 이용해 국내 화학사고 사례를 수집·분석하여 사고발생 빈도가 높은 물질과 주요 사고형태를 도출하였다. 도출된 사고사례 결과를 활용하여 연구대상 물질 9종을 선정하였으며, NICS(2018)와 NICS & United Safety Consulting

Inc.(2017) 등을 참조하여 각 물질을 취급하는 세부공정을 분석하여 연구대상 공정 51종을 선정하였다.

1. 국내 물질별 화학사고 사례 분석

2014년 1월부터 2018년 10월까지의 국내 화학사고 사례를 화학안전정보공유시스템을 통해 수집하여, 물질별 사고 발생건수를 주요물질 위주로 다음 <Table 1>과 같이 정리하였다. 이 표에서 CAS No.가 표시되지 않은 물질은 수용액 상태의 물질이다. 통계자료 조사결과를 참고하여 사고발생건수가 가장 많은 물질 8종(질산, 암모니아, 염화수소, 황산, 포름알데하이드, 톨루엔, 염소, 불화수소)에 구미 불산 누출사고로 인해 이슈화된 불화수소의 수용액 상태인 불산을 추가하여, 총 9개 물질을 연구대상물질로 선정하였다.

다음, 공정별 위험요인을 사고 형태별로 분류할 수 있도록 연구대상물질의 주요 발생사고 형태를 <Table 2>와 같이 정리하였다. 누출, 화재, 폭발 외의 기타사고는 이상반응 혹은 복합사고 등을 의미한다. 질산, 암

Table 1. The Current chemical accidents by substance

No.	Chemicals (CAS No.)	Number of occurrences
1	Nitric acid (7697-37-2)	50
2	Ammonia (7664-41-7)	40
3	Hydrogen chloride (7647-01-0)	40
4	Sulfuric acid (7664-93-9)	31
5	Formaldehyde (50-00-0)	15
6	Toluene (108-88-3)	12
7	Chlorine (7782-50-5)	10
8	Hydrogen chloride (Hydrogen chloride)	10
9	Hydrogen fluoride (7664-39-3)	9
10	Hydrogen peroxide (7722-84-1)	8
11	Sodium hydroxide (Sodium hydroxide)	8
12	Ammonia (Ammonia)	6
13	Non-verifiable chemicals (Non-verifiable chemicals)	6
14	Waste acid (Waste acid)	6
15	Nitric acid (Nitric acid)	5

※ Source: Chemistry Safety Clearing-house(<http://csc.me.go.kr/>)

Table 2. Chemical accidents by substance

No.	Chemicals	Accident patterns					Total
		Leak	Fire	Explosion	etc	The rest	
1	Nitric acid (7697-37-2)	36	1	5	6	2	50
2	Ammonia (7664-41-7)	38	-	2	-	-	40
3	Hydrogen chloride (7647-01-0)	31	-	1	3	5	40
4	Sulfuric acid (7664-93-9)	24	1	4	1	1	31
5	Formaldehyde (50-00-0)	15	-	-	-	-	15
6	Toluene (108-88-3)	2	4	2	4	-	12
7	Chlorine (7782-50-5)	9	-	-	1	-	10
8	Hydrogen fluoride (7664-39-3)	7	1	-	1	-	9

※ Source: Chemistry Safety Clearing-house(<http://csc.me.go.kr/>)

모니아, 황산은 누출과 폭발 형태의 사고가 가장 많이 발생하였으며, 염화수소, 포름알데하이드, 염소, 불화수소는 누출 사고가 가장 많이 발생하였다. 톨루엔의 경우 특정 사고형태가 두드러지지는 않았으나, 누출,

화재, 폭발 등 다양한 형태로 사고가 발생하였다.

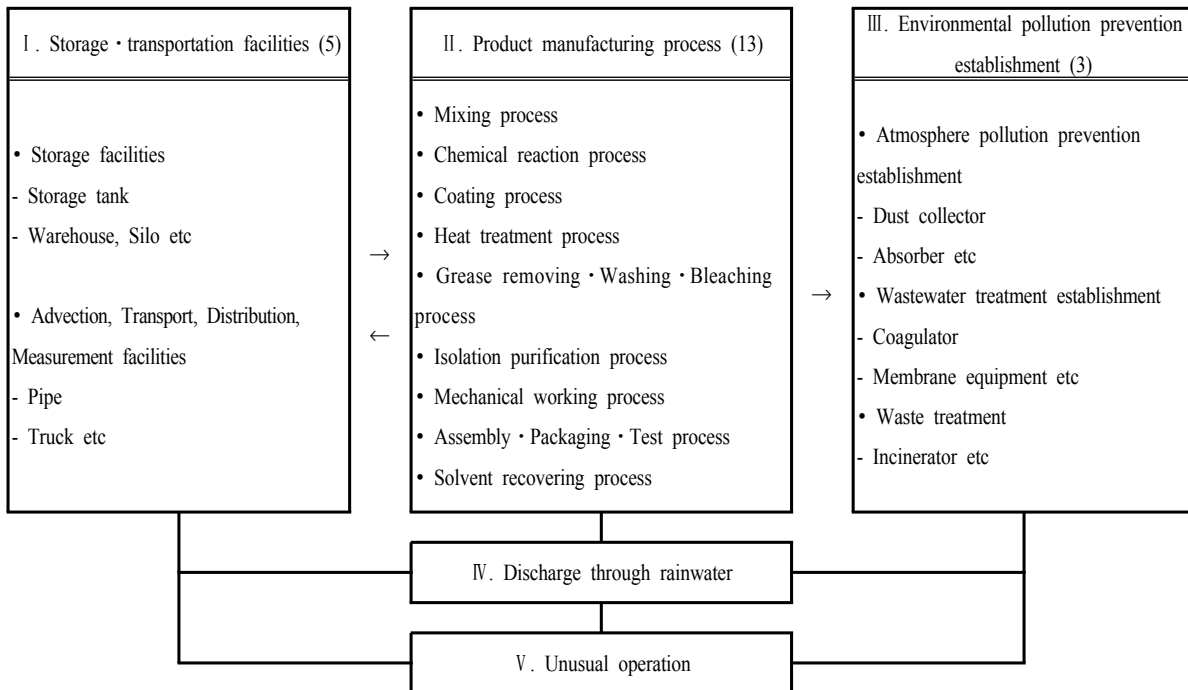
2. 공정별 사고발생 현황

공정별 사고발생 현황을 알아보기 위해 환경부 화학물질안전원의 ‘화학물질 배출·이동량 조사결과 보고서’를 살펴보았다(NICS, 2018). 화학물질 배출·이동량 조사표를 제출한 사업장에서 화학물질을 취급하는 공정은 다음 <Table 3> 과 같이 크게 저장 및 운반 시설, 제품제조공정, 환경오염방지시설로 나뉘며 세부적으로 21개 공정으로 구분할 수 있다.

분류된 21개 공정 중 선행연구 자료인 NICS & United Safety Consulting Inc.(2017)에서는 누출, 화재, 폭발 유형에 대하여 주요 위험공정을 운송, 하역, 저장, 이송, 공정, 배출·처리시설 및 기타(실험실, 수작업)로 분류하고 있는데, 주요 위험공정의 공정도 예시는 다음 <Figure 1>과 같다.

공통적으로 도출된 6개의 공정 외에도 각 물질의 특성에 따라 사고발생 가능성이 있는 공정에 대해 고민할 필요가 있다. 암모니아의 경우 냉각·응축시켜 액화 암모니아를 생성하기 때문에 냉동시설이 필요하

Table 3. Chemical processing process



※ Source: Ministry of Environment National Institute of Chemical Safety, '16 Chemicals release and transfer survey results report(2018: 12)

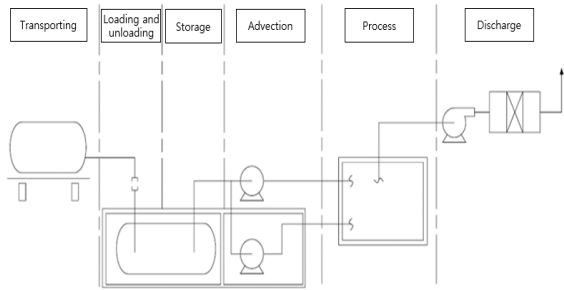


Figure 1. Key process (transporting, loading and unloading, storage, advection, process, discharge)

고, 염소의 경우에는 고압상태의 액체염소를 1톤 용기에 충전하여 이동하기 때문에 하역시설이 따로 필요 없으나 증발시설과 충전시설, 그리고 중화시켜 처리하기 위한 중화시설이 필요하다. 불산의 경우에는 불화수소의 특성과 중복되어 저장, 이송, 공정시설은 불화수소와 동일하지만, 수용액 상태인 불산은 농도에 따라 증기압이 다르기 때문에 운송, 출하, 배출처리시설은 불화수소와 차이가 있다. 이처럼 각 물질별 특성을 고려하여 총 51종의 연구대상 공정을 선정하였으

Table 4. List of process by substance for study

Chemicals	Process	Chemicals	Process	Chemicals	Process
Ammonia (7)	Transporting	Hydrogen chloride (6)	Transporting	Formaldehyde (6)	Transporting
	Loading and unloading		Loading and unloading		Loading and unloading
	Storage		Storage		Storage
	Advection		Advection		Advection
	Process		Process		Process
	Refrigeration		Discharge		Discharge
	Discharge				
Toluene (6)	Transporting	Nitric acid (6)	Transporting	Hydrofluoric acid (6)	Transporting
	Loading and unloading		Loading and unloading		Loading and unloading
	Storage		Storage		Storage
	Advection		Advection		Advection
	Process		Process		Process
	Discharge		Discharge		Discharge
Chlorine (5)	Transporting	Sulfuric acid (6)	Transporting	Hydrogen fluoride (3)	Transporting
	Storage · Advection		Loading and unloading		Loading and unloading
	Vaporization		Storage		Discharge
	Injection		Advection		
	Neutralization		Process		
			Discharge		

며, 연구대상물질별 연구대상공정을 목록화하여 <Table 4>와 같이 제시하였다.

III. 화학사고 예방을 위한 안전조치사항 및 사고대응방안 마련

1. 공정 분석 및 공정별 위험요인 도출

취급시설에 따른 사고대응체계를 구축하기 위해 먼저 공정에 대한 이해가 필요하다. 각 연구대상물질별 연구대상공정을 모두 분석하여 공정상세도를 그리고, 그에 따른 상세설비를 나타내었다. 상세설비는 <Figure 2>와 같이 공정상세도에 각각의 번호를 부여하여 각 설비의 위치를 알 수 있게 하였고, 필수적으로 설치해야하는 설비와 선택적으로 설치할 수 있는 설비를 구분하여 <Table 5>와 같이 나타내었다.

화학사고 대비·대응방법을 위험요인에 따라 제시하기 위해 화학사고를 분석해 공정별 위험요인을 도출하였다. 각 물질을 취급하는 공정에 대한 사고원인 및 사고발생 위험요인을 조사하여 공정 설비 위치에 따라 화학사고 유형(누출, 화재, 폭발)으로 분류하고

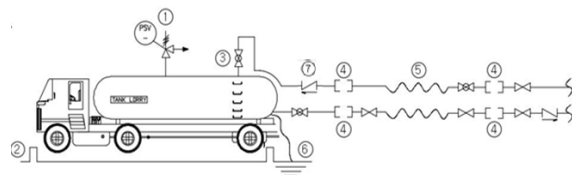
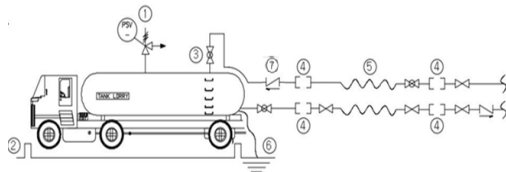


Figure 2. Process details of ammonia transporting process

Table 5. Ammonia transporting equipments

No.	Equipment	Essential	Optional
①	Safety valve	○	
②	Trench (Drip Panel)	○	
③	Vapor Recovery Valve		○
④	Hose connector	○	
⑤	Hose	○	
⑥	Grounding	○	
⑦	Check valve	○	
⑧	Vehicle in motion	○	

Table 6. Example of chemical accident risk factors (Ammonia transporting process)

Process information_Ammonia transporting process		
Ammonia transporting process details		
		
Risk factor	Equipment No.	Possible accident type
Damage to piping by vehicle transmission:	①③④	Leak
Fault of hose connection:	④	Leak
Leakage in gasket area:	①③⑦	Leak
Overtuning transport vehicle and tank lorry:	①③④	Leak, Fire · Explosion
Pressure increase by overcharging:	①	Leak, Fire · Explosion
Temperature rise in storage tank	①②	Leak, Fire · Explosion
Fire	①②	Leak, Fire · Explosion

목록화하였다. 예시는 <Table 6>과 같으며, 공정상세도에서 부여된 번호를 통하여 사고 발생 위험요인의 위치를 확인할 수 있도록 하였다.

2. 안전조치사항 마련

앞에서 도출된 화학사고 유형과 위험요인별로 사고 발생을 예방·대비하기 위한 안전조치사항을 마련하였다. 물질 특성 위주의 정보뿐만 아니라 취급시설에 관한 정보도 제공하기 위해 일반 안전조치사항과 공정별 안전조치사항을 구분하여 제시할 필요가 있다. 일반 안전조치사항으로 연구대상물질의 기본정보 및 물질특성에 따른 안전조치정보를 제시하였고, 공정별 안전조치사항으로는 주요 발생 사고유형별로 분류된 위험요인에 따른 정보를 제시하였다. 예시는 다음 <Figure 3>의 하단에 위치한 암모니아 운송시설 안전조치사항과 같다. 예를 들어, 차량전도에 의한 배관 파손으로 인해 누출 사고가 발생하는 것을 예방하기 위해 밸브, 배관 주위에 프로텍터를 설치하고, 이동용기에 보호캡을 설치해야 되는 것과 같은 안전조치사항을 마련하였다.

3. 화학사고 피해범위 예측

화학사고 피해 영향범위를 대략적이더라도 미리 제시한다면 사고발생시 빠르게 대피 및 주민대피계획을 세울 수 있고, 방재 및 제독 범위를 파악할 수 있다. 따라서 확산 모델링 프로그램인 CARIS 2018¹⁾과 KORA²⁾ 등을 활용하여 화학사고 피해범위를 예측하였다.

프로그램 입력 조건에서 기상정보는 화학물질안전원 지침 제2014-1호 ‘사고시나리오 선정에 관한 기술지침’의 제2장 사고시나리오 분석 조건과 KOSHA(2016) 등을 참고하여 대기온도 25℃, 대기습도 50%, 대기안정도 D, 풍속 3 m/s으로 하였다.

사고규모에 따라 대피계획, 대응방안 등이 달라지기 때문에 소규모는 드럼용량인 100kg, 대규모는 탱크로리 용량인 20ton으로 구분하였고, 규모별로 누출, 화재, 폭발로 구분하여 시뮬레이션을 진행하였다. 소량의 화학물질이 누출되는 경우 해당 물질을 취급하는 용기 자체가 작기 때문에 누출공의 크기가 작을 수밖에 없어 0.2 inch로 설정하였고, 대규모 누출사고의 경우에는 용기의 크기가 탱크로리 정도로 크기 때문에 누출공의 크기를 0.5inch, 1inch, 2inch로 나누어 진행

1) 환경부 화학물질안전원 화학사고대응정보시스템

2) 장외영향평가서·위해관리계획서 작성지원 프로그램

Table 7. The range of accident damage of ammonia_CARIS 2018

	The range of accident effect of ammonia_CARIS 2018(m)											
	100 kg			20 ton								
	Diffusion	Fire	Explosion	Diffusion			Fire			Explosion(VCE)		
Leakage hole Temperature(vapor pressure)	0.2 inch (5mm)			0.5 inch	1 inch	2 inch	0.5 inch	1 inch	2 inch	0.5 inch	1 inch	2 inch
-10°C (2.9kg/cm2)	22	56	13	58	122	264	298	298	298	73	73	73
0°C (4.3kg/cm2)	27	56	13	71	149	328	298	298	298	73	73	73
10°C (6.2kg/cm2)	32	56	13	85	181	403	298	298	298	73	73	73
20°C (8.6kg/cm2)	38	56	13	100	215	487	298	298	298	73	73	73
30°C (11.7kg/cm2)	44	56	13	117	253	583	298	298	298	73	73	73
40°C (15.5kg/cm2)	50	56	13	135	295	689	298	298	298	73	73	73

※ Absolute pressure. Leak(ERPG-2 150 ppm), Fire(radiant heat 5 kW/m²), Explosion(overpressure 0.007 MPa)

하였으며 각 누출공 크기는 배관크기를 참고하여 결정하였다. 온도조건은 대한민국의 사계절 기온을 고려하여 -10°C에서 40°C로 범위를 설정하였으며, 압력은 액화기체의 경우 각 온도에 따른 증기압으로, 온도 범위 내에서 액체인 경우 상압을 조건으로 피해예측 프로그램을 구동하였다. KOSHA GUIDE P-107-2016 ‘최악 및 대안의 누출 시나리오 선정에 관한 기술지침’에서 규정한 끝점³⁾을 기준으로, 누출인 경우 ERPG-2일 때, 화재의 경우 복사열이 5 kW/m²일 때, 폭발의 경우에는 과압이 0.007 MPa일 때의 피해범위 (m)를 나타내었다. 사고발생 형태(누출, 화재, 폭발), 사고누출량, 누출공 크기 등에 따라 피해예측 데이터 결과 값에 차이가 있으며, <Table 7>은 CARIS 2018를 이용한 암모니아의 화학사고 피해 영향범위 예측 결과의 예시이다.

4. 사고대응방안 및 기타정보 마련

안전조치사항을 마련했던 방식처럼 사고대응방안 또한 화학사고 유형과 위험요인별로 정보를 구축하였고, 이에 더하여 사고 규모별로 대응정보를 구분하여 사고발생시 사고규모별 대응방안을 찾아 신속하게 대응하도록 하였다. 예시는 다음 <Figure 4>와 같으며, 예를 들어 용기차량전도에 의한 배관 파손으로 인한

누출사고 중 20ton의 대규모 사고의 경우 사고영향범위 내의 차량, 사람 등의 접근을 차단하고, 물이나 5% 이하의 산을 분사해 누출가스를 희수해야하며, 배관 누출공은 누출방지 슬리브 등으로 누출을 차단한다는 것과 같은 대응방법을 마련하였다.

공정정보, 안전조치사항 및 사고대응방안에 관한 정보 외에도 화학사고 예방 및 대응을 위해 필요한 정보는 무수히 많다. 하지만 효과적인 화학사고 예방 및 대응을 위해서는 취급물질, 취급시설별로 단 한 장의 카드에 최소한의 핵심적인 정보만 담아야 한다. 따라서 기타정보는 국내규제정보와 물질 유해반응성, 누출/소화방제약품과 취급자 보호 장구로 추려 나타내었다. 국내규제정보와 유해위험성은 물질안전보건자료 (MSDS)에서 참고하였으며, 물질에 대한 특성 및 위험성에 대한 정보를 활용해 대피 시 유의할 수 있게 하였고, 누출/소화방제 약품은 National Fire Agency(2019) 과 MOE(2016)을, 취급자 보호장구는 환경부 고시 제 2017-7호 ‘유해화학물질 취급자의 개인보호장구 착용에 관한 규정’의 별표 1을 참고하여 사고발생시 필요한 방제약품과 보호장구에 대한 정보를 신속하게 얻을 수 있게 하였다. 예시는 다음 <Figure 3>의 상단에 명시되어 있다.

3) 끝점농도, 과압 또는 복사열 등의 수치에 도달하는 지점

IV. 화학사고 대비·대응 안전조치 정보카드

앞에서 구축한 정보를 토대로, 각 사업장이나 대응 기관에 비치해 화학사고를 신속하게 대비·대응 할 수 있는 ‘화학사고 대비·대응 안전조치 정보카드’를 마련·제시할 수 있다. 안전조치 정보카드의 구성은 전체적으로 다음 <Table 8>과 같으며, 카드의 전면과 후면을 예방과 대응으로 구분하여 화학사고 발생 전·후에 취득할 수 있는 정보를 구분하였다. 전면 상단에 물질특성을 우선 배치하여 유해화학물질에 대한 유해위험성을 알 수 있도록 하였다. 단, 기존에 구축되어 있는 화학물질 특성을 기반 한 정보와의 중복을 피하기 위하여 최소한의 필요한 정보만을 제시하고자 하였다. 물질특성 바로 아래에는 방재약품과 화관법 적용범위, 취급자 보호 장구에 대한 정보를 배치하여 대응에 필요한 약품 및 장비를 빠르게 준비할 수 있게 하였다. 물질별 방재약품은 누출방재약품과 소화방재약품으로 세분화하여 상황에 맞는 방재약품을 인지할 수 있도록 하였고, 유해화학물질 취급자가 갖추어야 할 취급자 보호 장구를 호흡보호구, 보호복, 안전장갑으로 세분화하여 빠르게 상황에 적합한 보호 장구를 착용할 수 있게 하였다.

물질의 유해위험성과 필요한 방재약품 및 보호 장구를 파악한 후, 바로 유해화학물질 취급공정에 대한 정보를 얻기 위해 위 정보의 바로 아래에 공정 정보를 배치하였다. 먼저 공정 설비별 위험요인을 사고유형(누출, 화재·폭발)에 따라 구분하였고, 위험요인의 위치를 공정상세도를 통해 인지할 수 있도록 하였다. 그리고 시설에 대한 위험요인에 대하여 안전조치사항

및 대응방안을 연계시켜 화학사고에 대한 대비·대응 정보를 화학설비의 위험요인에 따라 직관적으로 파악할 수 있도록 하였다. 이를 위하여, 화학사고 발생 전 취득할 수 있는 정보를 담은 전면에는 공정상세도 및 화학사고 위험요인과 위험요인에 대한 안전조치사항을, 화학사고 발생 후 취득할 수 있는 정보를 담은 후면에는 위험요인에 대한 대응방안을 배치하였다. 특히 대응방안은 화학사고 발생 규모에 영향을 받으므로 유해화학물질 취급 규모별로 구분하여 제시하고자 하였다.

유해화학물질의 누출여부를 확인할 수 있도록 화학물질을 탐지·분석할 수 있는 방법을 안전조치 정보카드 후면에 제시하였다. 또 후면 상단에 화학사고 피해 영향범위 데이터를 제시하여 대응 및 대피에 가장 필요한 정보인 피해범위를 빠르게 습득 할 수 있게 하였다. 발생 가능한 화학사고 형태에 따른 다양한 상황에 대한 피해 영향범위를 제시하여 화학사고에 대한 대응기관의 피해 영향범위 분석에 비교표가 될 수 있도록 하였고, 대응기관의 피해 영향범위 분석에 대한 유사값을 미리 제시하여 주민대피를 우선적으로 진행함으로써 피해를 최소화할 수 있도록 하였다.

앞서 선정한 9종의 연구대상물질(질산, 염화수소, 암모니아, 황산, 포름알데하이드, 톨루엔, 염소, 불화수소/불산 수용액)과 연구대상공정 51종을 바탕으로 화학사고 대비·대응 안전조치 정보카드를 마련하였다. 다음 <Figure 3> 와 <Figure 4>은 제작된 화학사고 대비·대응 안전조치 정보카드의 암모니아 운송시설 예시이다.

V. 결론

화학사고 대비·대응 안전조치 정보카드는 대응기관 및 화학물질 취급자에게 화학물질 취급공정에 대한 정보를 효율적으로 제공하기 위하여 고안되었다. 현재 화학사고 대비·대응 정보는 화학물질의 특성에 초점을 맞추어 구축되어 있는 실정으로, 유해화학물

Table 8. Configuration of safeguards information card for preparation and response of chemical accident

Front	Back
Chemical Information	The range of accident damage
Firefighting · Anti-disaster chemicals Protective equipment	Detection and analysis of leakage
Process details and risk factors Safeguards informations by risk factors	Respond informations by risk factors · size

암모니아 Ammonia CAS No. 7664-41-7 운송시설			
국내규제	사고대비물질, 유독물질	-	노출, 작업, 관리
유해위험성	<ul style="list-style-type: none"> 인화성 가스 고압가스 포함: 가압 시 폭발 가능 극렬하게 중합반응하여 화재 및 폭발 물과 격렬히 반응 달 수 있으나 쉽게 점화되지 않음 	<ul style="list-style-type: none"> 화재에 노출 시 가연성 가스 발생 화재 시 자극성, 부식성, 독성 가스 발생 증기는 매우 자극적, 부식성 있음 흡입, 섭취, 피부접촉 시 유독하고 치명적임 	연화성, 독성
누출방지 대책	<ul style="list-style-type: none"> 산성물질(아세트산 등) 중화반응 서포는 출하에 의한 방지 물 흡수, 흡분부, 흡포로 중화되게 	취급정보 보호복, 장갑, 안전장갑	암모니아 및 이종 10% 이상 함유한 혼합물일 경우 암모니아용 방독마스크 이상
소화방지 대책	<ul style="list-style-type: none"> 분말소화약제, 이산화탄소, 일반 포화, 분무류수 / 건조포화, 흡 	취급정보 보호복, 장갑, 안전장갑	화약물질용 보호복 3 또는 4형식(전신) 이상 화약물질용 안전장갑

공정정보-암모니아 운송시설		
암모니아 운송시설 공정상세도	위험요인	발생가능 사고유형
	차량전도에 의한 배관 파손 ㉠㉡	누출
	호스 연결 불량 ㉢	누출
	게스킷 부위 누출 ㉣㉤	누출
	운반차량 및 탱크로리 전복 ㉥㉦	누출, 화재 폭발
	과충전에 의한 압력상승 ㉧	누출, 화재 폭발
저장탱크 온도상승 ㉨	누출, 화재 폭발	
화재 ㉩	누출, 화재 폭발	

위험요인		암모니아 운송시설 안전조치사항
일반 조치사항 (권고사항)	<ul style="list-style-type: none"> 보조장구를 착용하고, 안전장갑 착용 시 지시에 따라 작업 과충전, 방전 및 화재 위험을 최소화할 수 있는 구비, 차량정지, 보조장구 준비/점검 누출대비 실시(흡입, 수확설비 확보, 차량, 레인, 피복설치 시설 설치) 가스 질지기 경보 설정값 80 ppm 설정 및 변경장치 작동확인 비누를 검사, 가스질지기, 알르나 생애로 누출부위 확인 긴급차량정지의 작동상태 및 비상전원점검 확인 소화 용기는 안전장갑 착용으로 세척, 보관 가동할 한 정지인 정지해서는 아니되며, 운반차량정지와 운전자 등에게 차량에서 이탈 금지, 방전 위험을 지시한 카드를 비치하고, 유지, 충분한 휴식 	
	<ul style="list-style-type: none"> 비누를 검사, 가스질지기, 알르나 생애로 누출부위 확인 긴급차량정지의 작동상태 및 비상전원점검 확인 소화 용기는 안전장갑 착용으로 세척, 보관 가동할 한 정지인 정지해서는 아니되며, 운반차량정지와 운전자 등에게 차량에서 이탈 금지, 방전 위험을 지시한 카드를 비치하고, 유지, 충분한 휴식 	
차량전도에 의한 배관 파손	<ul style="list-style-type: none"> 충전, 이송배관에 긴급차단밸브 설치하여 비상 시 누출 차단 확산방지책이 설치된 곳에서 상하차 작업 	
호스 연결 불량	<ul style="list-style-type: none"> 가스질지기정비, 육안, 관통검사, 비누를 검사 	
게스킷 부위 누출	<ul style="list-style-type: none"> 적절한 유해화학물질에 적합한 방재약을 또는 방재장비 구비 개인보호장구 2set 이상 비치 및 방재요령 카드 비치 탱크에 역회계, 온도조절을 설치하여 필요한 충전과 과열 방지 직사광선에 의한 온도상승방지를 위하여 그늘지고 통풍이 잘 되는 곳에 주차 	
운반차량 및 탱크로리 전복	<ul style="list-style-type: none"> 직사광선에 의한 온도상승방지를 위하여 그늘지고 통풍이 잘 되는 곳에 주차 고압 상태의 암모니아를 최대 용적의 90% 이하로 충전(저장) 안전밸브와 과충전방지 설치를 화재로 인한 파도한 내부압력 상승 방지 	
과충전에 의한 압력상승	<ul style="list-style-type: none"> 알루미늄(Compressor) 가동 전 차량 점검 실시 용기 근처에 가연성 물질 보관 금지 	
저장탱크 온도상승		
화재		

Figure 3. Front of safeguard information card

질 취급 공정 및 설비에 대한 정보가 부족하거나 분산되어 있어 원하는 정보를 빠르고 정확하게 취득하는데 많은 어려움이 있다. 이와 같이 분산되어 있는 화학물질 취급공정 및 설비 정보를 한 곳에 취합하고 정리함으로써 체계적으로 화학물질 취급 공정 정보를 구축할 수 있다. 이에, 화학물질 취급 공정 정보를 한 장 분량의 카드 형태로 제작한다면 화학사고 발생 시 급박한 상황에서 최적의 정보를 빠르게 취득할 수 있어 신속하고 체계적으로 사고대응 행동을 수행하여 화학사고의 피해를 최소화 할 수 있을 것이라 판단된다.

본 연구를 수행하기 위해 최근 4년간 국내에서 발생한 화학사고를 심층 분석하여, 그 중 발생 빈도가 높은 화학물질 9종(질산, 염화수소, 암모니아, 황산, 포름알데하이드, 톨루엔, 염소, 불화수소/불화수소산 수용액)을 연구대상물질로 선정하였고, 이러한 물질을 취급하는 공정 또는 시설을 연구대상공정(51종)으로 선정하였다. 다음으로, 취급공정의 운전조건 및 공정

암모니아 운송시설 사고 유형별 위험요인	암모니아 CARIS 2018 사고 영향범위(m)													
	100kg			20 ton										
	폭발	화재	폭발	폭발범위 (R50% (10 ppm))			폭발범위 (R100% (20 ppm))			폭발범위 (R50% (10 ppm))				
폭발/화재	누출공	0.2 inch (5 mm)	0.5 inch (13 mm)	1 inch (25 mm)	2 inch (50 mm)	0.5 inch (13 mm)	1 inch (25 mm)	2 inch (50 mm)	0.5 inch (13 mm)	1 inch (25 mm)	2 inch (50 mm)	0.5 inch (13 mm)	1 inch (25 mm)	2 inch (50 mm)
-10°C (4.9kPa)	22	55	13	58	122	284	298	298	298	298	298	73	73	73
0°C (4.2kPa)	27	55	13	71	149	328	298	298	298	298	298	73	73	73
10°C (5.2kPa)	32	55	13	85	181	402	298	298	298	298	298	73	73	73
20°C (6.3kPa)	38	55	13	100	215	487	298	298	298	298	298	73	73	73
30°C (7.4kPa)	44	55	13	117	253	583	298	298	298	298	298	73	73	73
40°C (8.5kPa)	50	55	13	135	295	689	298	298	298	298	298	73	73	73

암모니아 운송시설 사고대응방법		
위험요인	100kg 이하 폭발	100kg 이상 용기
누출 탐지분석	가스감지경보기, 휴대용 가스감지기, 가스감지관, 자극적인 냄새, 먼 연기 발생, 알르나 생애	
일반 대응사항	<ul style="list-style-type: none"> 긴급차단밸브, 차단밸브를 작동시켜 누출을 차단 취급지역 접근금지, 무단대기 사고 상황 파악 및 사고 정보 수집, 사고 위험성 평가 후 초기 안전 조치 실시 및 지원요청 현장 진입여부 결정 - 보조장구를 갖추고 진입, 접근 시 풍상방향에서 진입 누출 시 다량의 물을 분사시켜 누출된 암모니아를 희석, 처리 정확한 호스 연결과 밸브 조임 	
차량전도에 의한 배관 파손	<ul style="list-style-type: none"> 용기는 안전 장갑을 착용하여 운반 사고현황 파악 시 차량, 사람 등의 접근을 차단 다량의 물이나 5% 이하 산을 분사 누출공정을 위험으로 인지하거나 세워 가스 상하로 방출 가동한 경우 누출공기에 맡아 회수처리 	
호스 연결 불량	<ul style="list-style-type: none"> 사고현황 파악 시 차량, 사람 등의 접근을 차단 물이나 5% 이하의 산을 분사해 누출가스 희석 가능하면 흡수설비, 소방설비 이용 오염된 폐수는 폐수처리장 등으로 유입처리 유출물이나 용기를 제거하여 안전하게 회수, 희석, 검사, 분말시멘트 등으로 흡수 비누를 사용하여 누출부위 살균제로 누출 차단 	
게스킷 부위 누출	<ul style="list-style-type: none"> 비누, 가압설비 가동 중지 차단밸브 닫아 누출 차단 회수용기에 맡아 회수하고 거둬서 또는 폐기를 처리업체에 반출 또는 회수 비누를 사용하여 가동 중지 상하차 작업을 중지하고 긴급차단밸브를 닫아 누출 차단 호스를 해제하여 누출원을 찾아서 개선 가스킷 교체 파손된 경우 연결 호스 교체 상부에 따라서 누출되는 탱크에서 다른 안전장 곳으로 이동 	
과충전에 의한 압력상승	<ul style="list-style-type: none"> 누출은 걸로, 생애, 비누를 확인 차단밸브 닫아 누출 차단 누출 차단 지연 시 차량전도도 동일 충전 중지 긴급차단 암모니아를 회수 저장탱크 내용적 90% 이하로 충전 온도 높을 낮추기 위해 흡수설비 작동 회수설비로 기체 이송처리, 내부압력 저하 	
저장탱크 온도상승	<ul style="list-style-type: none"> 누출은 걸로, 생애, 비누를 확인 긴급차단밸브, 차단밸브 닫아 누출 차단 누출 차단 지연 시 차량전도도 동일 충전 중지 저장탱크 내용적 90% 이하로 충전 온도 높을 낮추기 위해 흡수설비 작동 회수설비로 기체 이송처리, 내부압력 저하 	
화재	<ul style="list-style-type: none"> 화재지역으로부터 멀리 이동 다량의 물을 분사시켜 용기의 온도 상승을 억제 파열된 이동용기는 파열된 작동에 의한 로켓현상으로 용기 비파 주의 가연성 물질에 주사하여 연소를 억제 가동한 경우 화재지역에서 용기 격리 회대만 먼 곳에서 화재 진압 상수 노부터, 무인 호스 지지대, 방수포 사용 폐수는 회수하여 중화처리 이동용기 이동용기는 파열된 작동에 의한 로켓현상에서 고출력소방관 분석 시 즉시 흡수 안전밸브 작동 확인된 경우만 차량 접근금지 계량한 설치(소방용수 수계유출방지) 상부에 따라서 누출되는 탱크에서 다른 곳으로 이동 	

Figure 4. Back of safeguard information card

설비에 대하여 사고유형(누출, 화재폭발 등)별로 위험요인을 분석한 후, 핵심사항을 도출하였다.

또한 화학사고 피해범위를 제시하기 위하여 확산모델 프로그램(CARIS 2018)을 활용하여, 시설별 화학물질 취급량과 사고설비의 누출부위 크기(누출공)별로 누출확산 피해범위를 제시하였다. 다음으로, 목록화한 공정 설비별 위험요인을 토대로 화학사고 규모별로 사고 대응방안과 화학사고 발생을 미연에 예방할 수 있는 안전조치사항을 도출하였다.

본 연구에서 제시한 안전조치 정보카드에는 총 51종으로 구성되었으며, 대응기관 등의 사고대응자의 가독성을 높이고자 한 장 분량에 물질별·시설별 안전조치, 피해예측 결과, 화학사고 예방·대비·대응에 관한 핵심정보를 함축하여 포함하였다. 본 연구는 연구대상물질을 9종, 연구대상 공정 또는 시설을 51종으로 제한하여 연구를 수행하였으나, 화학물질관리법에서 규제하고 있는 97종의 사고대비물질과 국내에서

취급하고 있는 유해화학물질의 수가 4만종 이상인 것을 감안한다면, 이러한 안전조치 정보카드는 점차적으로 확대되어야 할 것이라 생각된다. 본 연구에서 개발한 화학사고 대비·대응 안전조치 정보카드를 비롯하여, 화학사고 취약공정(시설) 기반의 정보가 다양하게 마련된다면 그 활용도가 지금보다 훨씬 높아질 것으로 예상된다.

감사의 글

본 논문은 정부(환경부)의 재원으로 화학물질 안전원의 지원을 받아 수행되었음(NICS-SP2018-10).

References

- Aspen Plus. 2016. Vapor Pressure Graph (Property Method: Ideal).
- Barrow, Gordon M. 1966. *Physical Chemistry(2nd Ed)*. New York: McGraw-Hill.
- Briggs, C. A. 1973. *Diffusion Estimation for Small Emissions*. USA: Environ.
- Chemicals Control Acts Enforcement Regulation. 2019. August, 31. Enforcement Regulations for Installation and Management of Facilities that Handling Hazardous Chemical Substances. 804.
- Crowl, D. A. and J. F. Louvar. 2001. *Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications(2nd Ed)*. London: Pearson.
- Kirk-Othmer. 2004. *Encyclopedia of Chemical Technology(3rd Ed)*. New Jersey: John Willey & Sons.
- Korea Ministry of Government Legislation. www.law.go.kr
- Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA). 2015. Material Safety Data Sheet(MSDS). <http://msds.kosha.or.kr>
- Korea Occupational Safety and Health Agency. 2016. *KOSHA GUIDE P-107-2016*.
- Ministry of Employment and Labor. www.moel.go.kr
- Ministry of Environment and National Institute of Chemical Safety. 2016. (2017)Key Info Guide. NICS-GP2016-2.
- Ministry of Environment and National Institute of Chemical Safety. nics.me.go.kr
- Ministry of Environment, and National Institute of Chemical Safety and United Safety Consulting Inc. 2017. The Establishment of a Database for Estimating Damage for Chemical Accident Response. NICS-RP2017-017.
- Ministry of Environment, and National Institute of Chemical Safety. 2018. '16 Chemicals Release and Transfer Survey Results Report.
- Ministry of Environment, and National Institute of Environmental Research. 2015. A Study on the Development of Management Plan and Response Guidelines for Accident Preparedness Substances.
- Ministry of Environment. 2016. *Emergency Response Guidebook*.
- Ministry of Environment. 2018. October, 12. Distribution of Chemicals Increased 12.4 Percent in 2016 Compared to 2014, and Harmful Chemicals Increased 8.5 Percent. <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=286&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&boardId=914580>
- Ministry of Environment. Chemistry Safety Clearing-house. 2014-2018. csc.me.go.kr
- Ministry of Environment. www.me.go.kr
- Ministry of Trade and Industry and Energy. 2019. Korea Gas Safety Code (KGS Code). <http://cyber.kgs.or.kr/kgscodex.do>
- National Fire Agency. 2019. *119 Guidebook for Chemical Accident Response*.
- National Institute of Chemical Safety. 2014. *National Institute of Chemical Safety Guideline*.
- National Institute of Chemical Safety. 2017. *National Institute of Chemical Safety Notification*.
- Occupation Safety and Health Acts Enforcement Regulations. 2019. Regulations on Industrial Safety and Health Standards.
- van den Bosch, C. J. H. and R. A. P. M. Weterings. 2005. *Method for the Calculation of Physical Effect(3rd Ed)*. London: Yellow Book.
- Yoo, Byung Tae and Myong Hwan Moon. 2018. Development of Emergency Response Plan for Chemical Accident Using ALOHA Program: Focusing on Evacuation Plan. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 18(3): 311-319.

Korean References Translated from the English

고용노동부. www.moel.go.kr
법제처 국가법령정보센터. www.law.go.kr
산업안전보건법 시행규칙. 2019. 10. 15. 고용노동부령 제263호
산업안전보건기준에 관한 규칙.
산업통상자원부. 2019. KGS Code 가스기술기준정보시스템.
http://cyber.kgs.or.kr/kgscode.index.do.
소방청. 2019. 119 화학사고 현장대응 가이드북.
아스펜플러스. 2016. 물질 증기압곡선(Property Method : Ideal).
유병태, 문명환. 2018. ALOHA를 활용한 화학사고 비상대응계획 수립 개선방안. 한국방재학회논문집. 18(3): 311-319.
한국산업안전보건공단. 2015. 물질안전보건자료(MSDS). http://msds.kosha.or.kr
한국산업안전보건공단. 2016. 6. 30. KOSHA GUIDE P-107-2016.
화학물질관리법. 2014. 12. 31. 화학물질안전원 지침 제2014-1호
사고시나리오 선정에 관한 기술지침.
화학물질관리법. 2017. 12. 1. 화학물질안전원 고시 제2017-7호
유해화학물질 취급자의 개인보호장구 착용에 관한 규정.
화학물질관리법 시행규칙(별표5). 2019. 8. 31. 환경부령 제804호
유해화학물질 취급시설 설치 및 관리 기준.
환경부. www.me.go.kr
환경부. 2016. 유해물질 비상대응 핸드북.
환경부 국립환경연구원. 2015. 사고대비물질 관리방안 및 대응지침개발 연구.
환경부. 2018. 2016년 화학물질 유통량 2014년 대비 12.4% 증가, 유해화학물질은 8.5% 증가. http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=286&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&boardId=914580
환경부 화학물질안전원. nics.me.go.kr
환경부 화학물질안전원. 2016. 2017년 키인포가이드. NICS-GP2016-2.
환경부 화학물질안전원. 2018. 2016년도 화학물질 배출·이동량 조사결과 보고서.
환경부 화학물질안전원, (주)연합안전컨설팅. 2017. 화학물질 사고대응을 위한 피해예측 산정 DB 구축. NICS-RP2017-017.
환경부 화학물질정보시스템. http://ncis.nier.go.kr/

환경부 화학안전정보공유시스템. 2014-2018. 통계. http://csc.me.go.kr/.

Received: Oct. 17, 2019 / Revised: Nov. 18, 2019 / Accepted: Nov. 25, 2019

화학테러 · 사고 예방을 위한 취약시설 사고예측 정보구축

국문초록 화학사고 관련법이 지속적으로 개정됨에 따라 화학사고에 대한 인식이 높아지고 있음에도 불구하고 화학사고는 끊임없이 발생하고 있으며 그 피해규모는 감소하지 않고 있다. 화학사고를 효과적으로 대응하기 위해서는 화학공정 및 시설에 대한 정보를 빠르게 확보하여 이에 따라 효과적인 대응을 수행해야 하지만, 현재 화학공정 및 시설 정보가 체계적이지 않아 구체적인 방침은 마련되어 있지 않다. 이에 본 연구는 주요 유해화학물질, 화학공정 및 단위시설에 대한 안전조치 정보카드 개발에 그 목적을 두었다. 이를 위하여 사고 사례 및 국내에서 많이 유통되는 화학물질을 기반으로 총 9종의 물질을 선정하였다. 다음으로, 해당 물질을 취급하는 총 51종의 화학공정을 선정하였다. 이에 더하여, 화학사고 위험요인 및 관련정보 등을 도출하였다. 최종적으로, 위의 연구결과를 재조합, 요약 후 핵심 프로세스 정보, 예방 조치 및 대응 방법이 포함된 51종의 화학사고 대응 카드를 제작하였다. 이 화학사고 대응카드는 해당물질 및 시설 등을 취급하는 사업장과 비상기관 대응자에게 좋은 자료가 될 것이다.

주제어 : 화학사고, 대비체계, 대응체계, 화학공정, 화학사고 대응카드

Profiles **Hee Jang** : He received his M.A. from Chonnam National University, Korea in 1998. He is an industry-academic cooperation professor of chemical engineering at Chonnam National University, Korea. He is a researcher at Center for Chemical Process Safety in Chonnam National University(koshajang@gmail.com).

Ga Young Jung : She received her B.A. from Chonnam National University, Korea in 2019. She is currently pursuing M.A. in chemical engineering from Chonnam National University, Korea. Her research interests include safe management for chemical facility(rkdud6881@naver.com).

Ha Eun Go : She received her B.A. from Chonnam National University, Korea in 2018. She is a researcher at Center for Chemical Process Safety in Chonnam National University. Her research interests include management for chemical and regulation on chemical(1103gkdms@naver.com).

Min Su Kim : He received his M.A. from Chungbuk National University, Korea in 2018. He works for Accident Coordination & Training Division at National Institute of Chemical Safety, Ministry of Environment. His research interests include regulation on chemical(naminsul@korea.kr).

Chang Bock Chung : He received his Ph.D. from University of Michigan, United States of America, in 1988. He is professor of school of chemical engineering at Chonnam National University, in which he has taught since 1980. His research interests include chemical process safety and modeling of chemical facility system(chungcb@jnu.ac.kr).

