

## 화학물질 운송위험지수를 활용한 염소(Chlorine) 유통 위해성 평가

김정근\* · 변현수\*\*†

\*한화케미칼(주) 울산공장  
680-180 울산광역시 남구 상개로 141

\*\*전남대학교 화공생명공학과  
550-749 전남 여주시 대학로 50

(2014년 4월 27일 접수, 2014년 5월 20일 수정본 접수, 2014년 5월 26일 채택)

## Hazard Assessment on Chlorine Distribution Use of Chemical Transportation Risk Index

Jeong Gon Kim\* and Hun Soo Byun\*\*†

\*Hanwha Chemical Ulsan Site, 141 Sanggae-ro, Nam-gu, Ulsan 680-180, Korea

\*\*Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Chonnam National University, 50 Daehak-ro, Yeosu, Jeonnam 550-749, Korea  
(Received 24 April 2014; Received in revised form 20 May 2014; accepted 26 May 2014)

### 요 약

염소(Chlorine)는 지구상에서 가장 많이 생산되고 사용되는 화학물질 중 하나로, 비가연성 물질이지만 독성, 오존층 파괴 및 활발한 반응성을 지닌 물질이며, 현대사회는 염소와 그 유도체의 사용 없이 운택한 삶을 유지하는 것이 거의 불가능할 정도로 의약품과 세정제, 방취제, 살균제, 제초제, 살충제 및 플라스틱을 비롯하여 공산품의 40% 이상에 사용되고 있는 지구상의 대표적인 화학물질이다. 국내의 경우, 염소는 전국의 다양한 사업장(중소기업, 정수장, 운송회사 등)에서 취급 및 유통되고 있지만 관련 운송위험과 위해성 평가 연구가 부족하여, 국내외 염소누출 관련 사고에 대해 분석 및 염소 취급 및 유통에 대한 위해성 평가를 시도하였다. 특히 화학물질 운송위험지수를 국내 실정에 맞도록 모델화하였고, 액화 염소를 포함한 13종 화학물질의 운송위험성 모사를 통해 위해성 평가를 실시하였다. 이는 염소를 비롯한 다양한 화학물질에 대한 화학물질 운송위험지수 모델을 적용하여 정형화된 유통 위해성평가를 할 수 있을 것으로 판단된다.

**Abstract** – Chlorine is one of the most produced and most used non-flammable chemical substances in the world even though its toxicity and high reactivity cause the ozone layer depletion. However, in modern life, it is impossible to live a good life without using Chlorine and its derivatives since they are being used as a typical ingredient in more than 40 percent of the manufactured goods including medicines, detergents, deodorant, fungicides, herbicides, insecticides, and plastic, etc. Even if Chlorine has been handled and distributed in various business (small and medium-sized businesses, water purification plants, distribution company, etc.), there have been few researches about its possible health hazard and transportation risks. Accordingly, the purpose of this paper is to make a detailed assessment of Chlorine-related risks and to model an index of chemicals transportation risks that is adequate for domestic circumstances. The assessment of possible health hazard and transportation risks was made on 13 kinds of hazardous chemicals, including liquid chlorine. This research may be contributed to standardizing the risk assessment of Chlorine and other hazardous chemicals by using an index of transportation risks.

Key words: Chlorine, Chemicals Transportation, Distribution, Transportation Risk Index, Hazard Assessment

### 1. 서 론

염소(Chlorine)는 국내를 비롯하여 전세계에서 제조되는 화학물질 량을 기준할 때 상위 10%에 해당하는 범용화된 화학물질이다. 매 4년마다 조사하는 환경부의 화학물질유통량조사(2006년) 보고서에

따르면 국내 총 제조량 중 36위의 물질이며, 유도체를 포함할 경우 10위권 이내의 화학물질이다[1]. 현대사회는 염소와 그 유도체의 사용 없이 운택한 삶을 유지하는 것이 거의 불가능할 정도로 의약품, 세정제, 방취제, 살균제, 제초제, 살충제, 플라스틱을 비롯하여 공산품의 40% 이상에 사용되고 있으며, 세계 10위권 내의 모든 화학회사에서 생산되는 지구상의 대표적인 물질이다. 염소는 세계적인 화학회사 중심으로 제조되고 있으며, 국내도 대규모 화학회사에서 제조하고 있다. 생산된 염소의 대부분은 자가소비 및 공장 간의 배관망을 통해 공급되고 있다. 그러나 생산된 염소의 일부는 살균 및 소독제 등의 다양한 용도로 전국 모든 지역에 차량을 통한 유통 및 직

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: hsbun@jnu.ac.kr

‡이 논문은 서울대학교 윤인섭 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.

접적인 취급이 되고 있지만 체계적인 현황파악이 되지 않은 상태여서 이에 대한 유통 유해성 평가가 부족한 실정이다.

국내에서는 염소(Chlorine) 누출 피해예측 및 확산영향 등의 독성 영향에 관한 연구는 활발히 이뤄지고 있으나, 취급 및 유통에 대한 유해성 연구는 부족하다고 판단되었다. 따라서 본 연구는 국내외 염소 누출사고에 대한 자료수집과 분석을 통하여 사고의 주요 현상 및 문제점을 확인하고자 하였고, 주요 사고원인이 염소와 다른 물질과의 반응성(국내 사고의 44.4%, 일본 45.2%, 미국 57.1%) 및 유통 과정의 사고(국내 사고의 경우 18.5%, 미국의 경우 28.6%)임을 확인하였다[2]. 염소의 생산과 유통에 대한 기본적인 자료 수집을 통해 총 생산량과 차량을 이용한 염소의 유통량 및 전국적인 취급 지역에 대한 정보를 확보와 수집한 정보를 바탕으로 염소를 비롯한 주요 화학물질 운송에 대한 유해성 평가 연구를 시작하여, 국내 실정에 맞는 화학물질 유통에 대한 운송위험순위 평가 기준이 필요하다고 판단되었다[3]. 특히 국내 화학물질 운송위험성 평가 연구가 가연성(인화성) 물질 중심의 철도 운송사고와 터러에 대비하는 예방 활동 등의 관점에서 진행되고 있으나, 다양한 화학물질(염소를 포함) 유통에 대한 운송위험성 평가가 체계적으로 이뤄지지 못하고 있는 현실이다[4]. 따라서 국내 여건에 적합한 화학물질 운송위험 유해성 평가 모델을 제시하고자 한다. 이를 위해 운송위험지수는 Risk Evaluation의 기본공식인 '위험 = 결과(영향)×빈도'를 적용하였고, 국내 여건에 맞게 세분화한 화학물질의 물질적 영향을 결과지수로, 운송빈도를 바탕으로 빈도지수로 구성하였다. 이렇게 제시된 모델의 검증에 위해 고위험군 물질로 알려진 염소(Chlorine)에 대한 운송 유해성 모사를 실시하여 화학물질 운송위험지수를 활용한 화학물질 유통 유해성 평가를 실시하고자 한다[3].

## 2. 염소의 특성과 배경

### 2-1. 염소의 특성 및 활용

염소( $\text{Cl}_2$ , CAS No. 7782-50-5)는 주기율표에서와 같이 17족에 속하는 할로젠 원소 중 플루오르 다음으로 가벼운 원소이다. 주기율표에 표시된 1족 나트륨과 17족인 염소로 구성된 소금( $\text{NaCl}$ )을 전기분해시키거나 용융된 염화나트륨을 전기분해시켜 나트륨을 제조할 때 부산물로 얻을 수 있고[5], 염소와 염소 화합물은 제지공업과 섬유산업의 표백제, 도시의 상수도 소독제, 가정용 표백제, 살균제, 유기 무기 화합물 제조, 의약품의 핵심 원료로 쓰인다. 특히 염소는 많은 유기화합물을 합성하는데 직접 또는 중간물질로 쓰인다. 독성과 부식성이 있는 황록색 기체로 눈과 호흡기관을 자극하며, 가스상태에서는 공기보다 2.5배 정도 무겁고 영하 34°C에서 맑은 호박색의 액화상태로 존재하며, 반응성이 좋아 자연계에서는 유리상태가 아닌 화합물 형태로 존재한다[6,7].

물리적 특성은 Table 1에 자세히 표현하였다. 염소의 증기압이 매우 높아 공기 중의 최대 농도는 상당히 높는데, 21°C에서 염소의 공기 중 최대 농도는 680.3%(6,802,631.6 ppm)으로 10 ppm에 비해 68만 배 이상 높기 때문에 염소의 누출이 있는 경우, 즉각적으로 생명에 위협을 초래할 수 있다. 특히 염소는 물보다는 알칼리류, 알코올류, 염화물에 더 잘 용해된다[6,7].

화학적 특성은 비가연성물질로 분류되며, 미국화재방재협회(National Fire Protection Association: NFPA) 목록에서는 '0' 등급으로 분류되는데 이는 815°C에서 5분 동안 공기 중에 노출되어도 연

**Table 1. Physical properties of chlorine**

Field	Description
Name	Chlorine
CAS No.	7782-50-5
Color	Clear Amber Liquid Yellow-Green Gas
Boiling Point	-34.05 °C
Critical Temperature	144.0 °C
Water Solubility	0.7 g/100 g H <sub>2</sub> O
Density	3.2 g/l (0 °C, 101.325 kPa)
Molecular Formula	Cl <sub>2</sub>
Melting Point	-100.98 °C
Critical Pressure	76.1 atm
Gas Density	2.5 (air=1)
Expansion Rate	457.6

**Table 2. Human effects of chlorine exposure [12]**

Concentration in Air (ppm)	Degree of the Human Effect
0.03-0.4	Odor Threshold (Decrease in odor perception occurs over time)
1-3	Mild Nose (Mucous Membrane) Irritation
5-15	Throat Irritation upper respiratory tract
30	Immediate Chest Pain, Vomiting, Changes in Breathing Rate, and Cough
40-60	Lung Injury (Toxic Pneumonitis) and Pulmonary Edema (Fluid in the Lungs)
430	Lethal after 30 minute Exposure
1,000	Death after a few minute Exposure

소되지 않는 물질이라는 의미이다. 염소는 인화 가능성이 매우 낮은 물질이며 동시에 상온에서 자연발화 위험이 없어서, 공기 중의 폭발 한계(폭발상한계와 폭발하한계) 적용 대상이 아니다. 그러나 비가연성 가스인 염소는 조연성 가스로서 공기 중에서 다른 물질 등의 연소를 도울 수 있다[6-9].

인체 위험성은 일차적으로 호흡기를 자극하는 물질인데, 저(低)농도의 염소가스는 표백제 냄새와 비슷하다. 냄새를 감지한 다음부터 농도를 증가하게 되면 개인적으로 노출에 대한 증상을 느끼게 되는데, 염소가스 농도가 5 ppm을 넘게 되면 매우 자극적이게 되고 짧은 시간 노출에도 매우 심각한 상태로 될 수 있다. 특히 고농도의 염소가스를 대량으로 흡입하면, 생명이 위협에 이르는 일이 있고, 액화염소가 피부에 묻으면 동상을 일으킬 우려가 있다. 산업안전보건법 허용농도(TLV-TWA기준)는 0.5 ppm이고, 독성기준인 LC<sub>50</sub>은 293 ppm/

**Table 3. Chlorine usage rate in 2005 [13]**

Chlorine Usage	Product Sectors (%)
Vinyl (EDC/VCM)	36
Chlorinated Intermediates	9
HCl	8
Propylene Oxide	7
Chloroethane Solvents	6
Water Treatment	5
Allylics	4
Pulp & Paper	4
Other Organics	7
Other Inorganics	14

hr이다. 염소 노출에 대한 인체영향을 미치는 자료는 Table 2에 나타내었다[7,10-12].

2-2. 염소의 취급 및 활용

2-2-1. 염소의 취급

다양하게 이용되는 염소는 Table 3에 나타낸 바와 같이 취급되며, 세계염소협회(World Chlorine Council: WCC) 자료를 사용했다[13]. 염

소와 가성소다는 원료인 소금을 전기분해할 때 동시에 발생하는 생산물로, 염소가 많이 필요해서 생산량을 높이고자 하더라도 가성소다의 수요처가 확보되지 않으면 결과적으로 생산 공정을 멈추어야 하는 동질성의 문제를 안고 있다. 현재 염소 사용량이 가장 큰 ‘Vinyl 공정’은 유기 화학 제조공정인 염화비닐(PVC) 제조에 사용되는 VCM 생산을 의미하는 것이다. PVC는 매우 다양한 열가소성으로 일상생활에 가장 폭넓게 사용된다. 두 번째로 많은 사용처인 ‘염소유

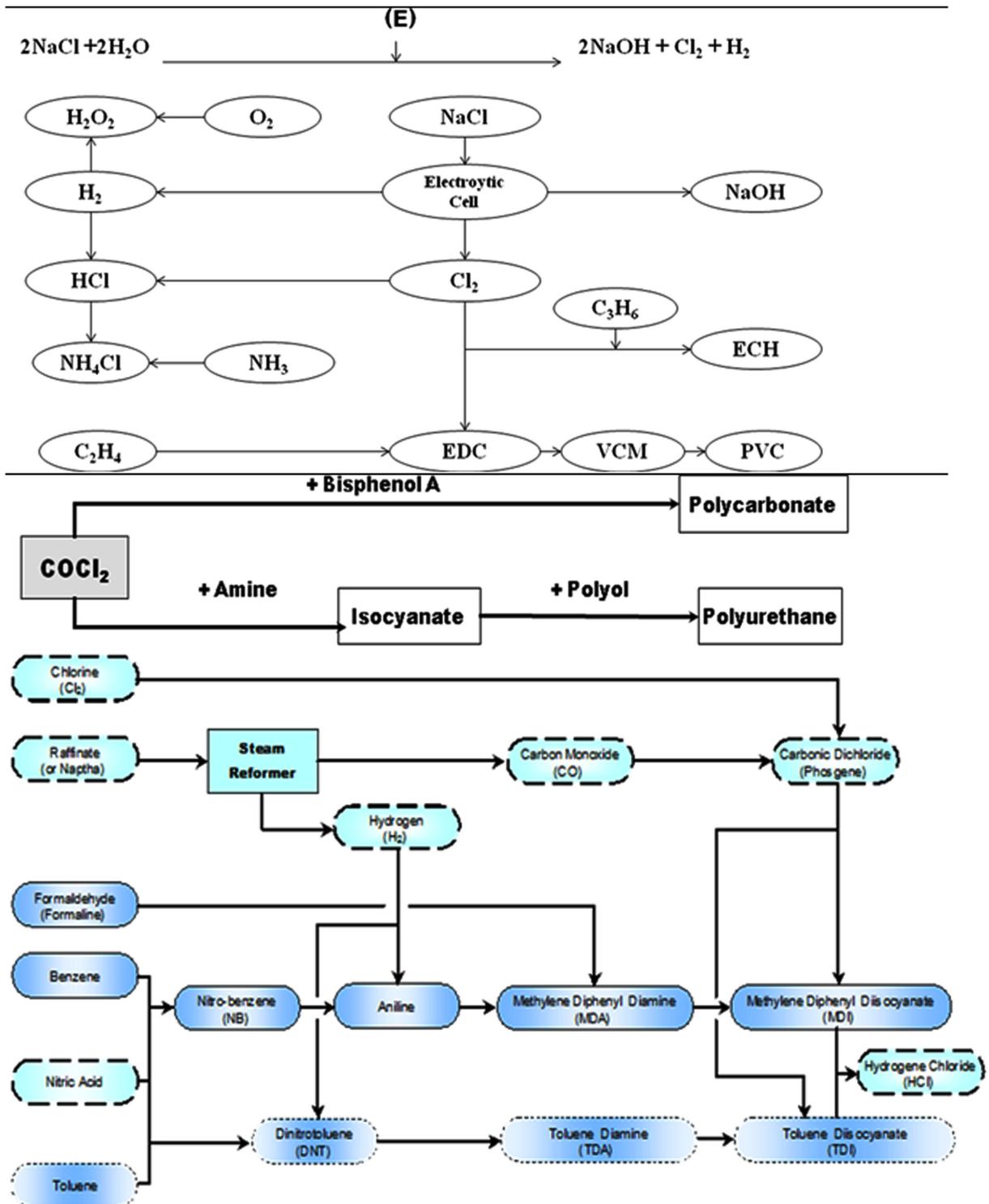


Fig. 1. The process diagrams of chlorine derivative [1].

도체(포스젠)'는 폴리우레탄의 원료부분으로 엠디아이/티디아이(MDI/TDI) 공정이며, 기타 정밀화학의 원료와 펄프, 제지공정의 생산품을 표백하는 고기능 표백제와 수처리제, 의약품 등에 사용된다. Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 염소를 사용하는 대표적인 유도체 공정은 이디씨(EDC) → 브이씨엠(VCM) → 피브이씨(PVC) 체인이다. 화학 시장정보(1999년)에 의하면 염소의 국내 수요 구성비는 이디씨(85%), 염소 유도체인 폴리우레탄의 원료인 메틸렌 디페닐 디이소시아네이트(Methylene Diphenyl Diisocyanate: MDI)톨루엔 디이소시아네이트(Toluene Diisocyanate: TDI) 원료(9%), 염산제조(8%), 무기화학(8%), 이씨에이치(6%), 기타(4%)로 분석되고 있다[14].

### 2-2-2. 염소 전기분해 공법

염소(Chlorine) 제조는 소금물 전기분해에 의한 방법이 대부분이다. 일반화된 화학공정 중의 하나인 전기분해 공정은 암염이나 천일염 또는 진공으로 증발시킨 소금을 물에 녹인 소금물(통상 염수, 鹽水: Brine이라 부름)에 직류전기를 통하게 하여 전기의 양극과 음극에 소금물이 분해되면서 형성되는 이온의 환원작용에 의해 분해되어, 양극으로는 일차 생산물인 염소가스와 음극으로는 수소가스 그리고 용액 상태의 수산화나트륨(가성소다: Caustic Soda)이 생성되는 공정이다. 이 공정을 클로르 알카리(또는 염소-소다)산업이라고 부르며, 세계에서 가장 큰 전기화학 산업이며, 에너지 집중이 세계에서 두 번째로 높은 공정으로 전기소모(24,000억 kWh)가 큰 산업이다[13]. 전기분해 공정을 요약하면 소금물 또는 염수(鹽水)에 직류 전류를 흘려줌으로써 염소 이온을 염소 원자로 환원시켜주는 방법이다. 소금이 물에 용해되게 되면, 나트륨 양이온과 염화물이 음이온으로 용해된다. 이 염화물 이온은 염소가스 형태로 양극에 산화되고 물 분자가 감소되고 음극에 수산기 양이온과 수소가스가 형성된다. 용해된 나트륨 이온과 수산기 이온이 음극에서 수산화 나트륨 형태로 구성되어 소금이 전기분해 되는 것이다. 염소 생산에 사용되는 전기분해 공정은 수은법과 격막법, 멤브레인법으로 크게 세 가지 종류가 있다[13,16]. 2006년 전 세계 염소 생산량인 5,900만 톤의 84%에 해당하는 양이 격막과 이온막 셀을 사용하는 전해조에서 생산되며, 13% 정도의 양이 수은 셀에서 생산되고 있다[17]. 2008년 현재 격막법의 시장 점유율은 62%이고, 멤브레인 이온막법의 시장 점유율은 24%를 가지고 있다.

### 2-3. 염소운송과 다우케미칼 화학물질 유통운송지수

#### 2-3-1. 염소운송과 용기

저장된 염소는 -34 °C 이하의 저온에서 액화시킨 액화가스이고, 공

장 간의 이송은 저온 액화상태로 저장된 염소를 기화시켜 가스상태를 유지하면서 배관을 통해 이루어진다. 그 외는 차량을 이용한 운반만 이루어진다.

국내에서 유통되는 염소용기는 톤 용기와 100 kg으로 구분되며, 미국에서는 일반적인 톤 용기를 컨테이너(Container)라고 부르며, 염소를 선적하는 용기는 다른 용기와는 달리 제작 때 공인된 번호를 등재하여야 한다. 새로운 용기는 최신 규격과 적합한 법규에 따라 제작되며, 사용중인 용기는 적합한 법규에 따라 검사를 받아야 한다. 각 용기의 기본 사양과 대략적인 크기와 무게는 Table 4에 나타내었다[2,11,18].

### 2-3-2. 다우케미칼 화학물질 유통위험지수

국내의 화학물질 유통위험성에 대한 자료는 철도이용에 관한 위험물 수송 안전기준에 대한 연구와 가연성 물질을 대상으로 하는 위험물질 수송 시 위험성 평가, 비상대응 시스템 및 수송체계에 관한 연구에 대해서는 이뤄지고 있으나, 차량에 의한 유통위험성평가의 연구사례는 없었다. 그러나 국외의 경우 미국화학공학회에 발표된 다국적 화학회사인 다우케미칼의 유통위험성지수 지침을 참조할 수 있다[19,20]. 다우케미칼은 운송비상에 대해 기업의 중요가치(Core Value)로 논의되고 있는 '운송위험 검토'라는 절차서를 통해 운송위험성 평가시스템을 운영하고 있다. 우선적으로 7개의 실행 위험성(화재폭발지수 F&EI, 화학물질 누출지수 CEI, 흡입독성, 피부흡수 독성, 피부와 눈의 부식도, 수생독성, 기타 심각도)을 통해 Fig. 2와 같이 위험 우선순위를 설정하여 위험분석을 한 후 그 영향을 모델링하고, 이와 관련된 해당 정부 및 세계적인 기준과의 비교를 통해 운송위험의 재검토 및 정량적인 위험성평가를 적용한다.

유통위험지수(Distribution Ranking Index: DRI) 지침은 유통위험성 재검토(Distribution Risk Review)를 하기 위한 기본단계로, 화학물질 유통과정에서의 피해 영향과 이동거리를 환산한 운송위험성평가를 유통의 단계로 확대한다[3,19,20].

## 3. 연구결과 및 고찰

### 3-1. 염소 유통 사전조사

법적 규제로 볼 때 염소(Chlorine)의 경우 환경부 사고대비물질로 등록된 물질이지만, 안전행정부 산하 소방방재청의 화학물질별 사고 대응 물질과 대형사고 및 다량 유통되는 52종의 사고대응물질을 비롯하여 철도운송에 따른 위험물 수송안전기준에는 포함되지 않았다. 특히 정부의 여러 행정부처에서는 화학적 위험물질의 운송위험을

Table 4. Chlorine cylinders, containers and tank car specifications in USA [18]

Type of Device (Cl <sub>2</sub> Capacity)	Weight	Size	Relief & Safety Devices
Cylinders 45~68 kg (100~150 lbs)	72.5~131.5 kg (160~290 lbs)	25.4 cm × 1.5 m (Dia × Length)	Fusible Plug: 1
Ton Container 907 kg (2000 lbs)	1633 kg (3600 lbs)	762 cm × 2.0 m (Dia × Length)	Fusible Plug: 6
Rail Container (Rail Tank Car) (16~20 Ton)	37~132 Ton	Length 9~15 m Width 3.25 m Height 4.7 m	Safety Valve: 1
Tank Trailer (16~20 Ton)	30~38 Ton	Length 13.7~18 m Width 3 m Height 3.65 m	Safety Valve: 6

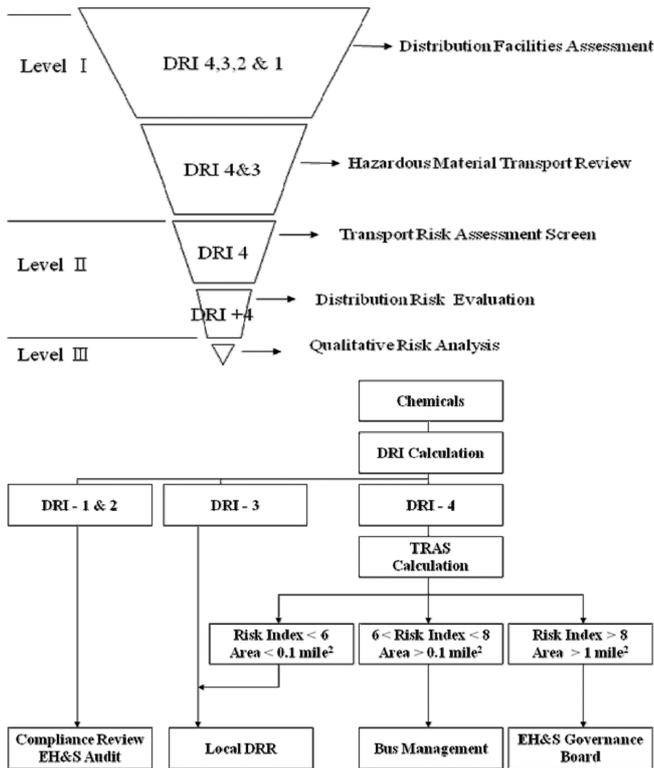


Fig. 2. The DOW-distribution risk management flow charts [3].

분류하는 평가 기준을 가지고 있지 않은 상태로 파악되며, 염소의 경우 독성을 이유로 고위험군으로 분류하거나 아예 제외되는 관리상 취약점도 확인된다. 특히 위험물질의 운송 위험 정도를 파악하여 적용하는 화학물질 운송 위해성 평가를 위한 평가 기준 수립이 중요하다고 판단된다. 국제적으로 운송 위험도가 높게 평가된 염소를 통하여 위험도를 객관화하기 위해서는 몇 가지 사전조사가 필요하였다.

3-1-1. 염소 제조 및 유통량 조사

염소(Chlorine)는 전 세계에서 사용되는 화학물질 중 제조 상위권에 해당하는 물질로 2008년은 전 세계 약 500여 개 생산회사가 650여 개의 지역에서 약 62.8백만 톤을 생산하고 있다[13]. 국내의 경우 화학물질 전 과정 유통현황이 관리되지 못한 상황으로 2011년 이후 순차적으로 확대할 것으로 알려졌으며, 환경부 자료에 따르면 상업용 염소의 국내 수입은 없고, 화학물질 배출이동량 정보(2008년)를 참고하면 연간 배출량은 128,940 kg/yr으로 대기나 수질로 배출되고 있다고 발표되었다. 한국 클로르 알카리 공업협회의 2008년 자료에 따르면 국내 5개 지역 7개 제조회사 9개 제조공장이 운영되고 있으며, 생산된 염소는 약 135만 톤이다. 또한 한국가스안전공사의 액화염소 사용관련 자료에서도 염소생산량이 135만 톤으로 기록되어 있어 2009년 기준 국내 염소 생산량은 135만 톤으로 잠정 추정할 수 있었다. 참고로 최근 전남 여수지역에 증설된 생산량을 감안하면 2012년 기준 167만 톤을 초과할 것으로 추정된다.

3-1-2. 염소 유통 수단 및 유통량 조사

전국에 있는 염소관련 시설은 고압가스안전관리법에 적용받는 것을 감안하여 한국가스안전공사에서 발간되는 고압가스통계자료를 통한 염소 관련 시설과 설비의 현황을 파악하였다. 2009년도 고압가스통계(KGS 2009-071) 자료[21]에서 발췌한 염소 관련 고압가스 시설은 Table 5와 같다. 특정제조시설은 전국에 13개 사업장, 일반 제조 8개 사업장이며, 4군데의 충전시설이 허가를 받아 운영되고 있고, 염소 저장탱크는 113개로 ‘10톤 이하(59개), 10~20톤(6개), 20~30톤(19개), 30~40톤(4개), 40~15톤(5개), 50~10톤(5개), 100~500톤(3개), 500톤 초과(2개)’에서 2009년 현재 75개소로 감소된 것으로 나타나고 있으며, 염소 사용시설은 255개소로 집계되었다. 염소의 일반 고압가스 소규모 저장은 총 467개소로 한강 취수장을 포함하여 228개소이고, 소규모 정수장 및 일반 사업소는 241개소이다. 특히 유통되는 염소 용기는 정수장 등 사용처의 도시 광역화로 인하여 감소 추세에 있다고 판단된다. 특징적으로 현재 CNG 및 수소운반용 튜브트레일러를

Table 5. Chlorine registration facilities in Korea [21]

Registration and Permission Facilities for High Pressure Gas in 2008 (Korea Gas Safety Corporation)				
Liquefied Chlorine	Product Manufacturing Facilities	13 EA	General Manufacturing Facilities	8 EA
	Filling/Storage Facilities	4 EA	Storage Tank	75 EA
	Consuming Facilities	255 EA	Small Vessel	467 EA
	Distribution	13 EA	Gas Cylinder	4,305 EA
	Marketing Facilities	68 EA		
The Quantity Consumed of Chlorine Handling Facilities (Korea Gas Safety Corporation)				
Area (City)	Handling Quantity (ton/yr)	Consuming Facilities		
		Water Intake Plant	Filtration Plant	Sum of Plant
Seoul	5,184	3	6	9
Incheon	1,038	-	4	4
Suwon	54	1	2	3
Deajeon	405	1	3	4
Deagu	1,925	6	7	13
Ulsan	233	1	5	6
Busan	342	1	4	5
Kwangju	259	3	4	7
Jeonju	29	4	3	7
Jeju	-	-	10	10
Total	9,469	20	48	68

Table 6. Chlorine accidents in Korea (1967~2009) [2]

Date	Descript of Chlorine Accidents	Accident Causes
1985/10/25	Gas release	Miss Operation (Valve Connection)
1985/05/08	Valve Disassemble	Miss Operation (Disassemble Cylinder)
1983/10/02	Poisoning Accident	Pipe Connection (Reaction)
1983/04/15	Valve Rupture	Poor Driving (Distribution)
1978/06/29	Gas release (Welded Connection)	Pipe Connection (Reaction)
1978/03/20	Cylinder Rupture	Careless Handling (Distribution)
1975/07/13	Gas release (Welded Connection)	Decrepit Cylinder (Reaction)
1974/08/15	Gas release	Pipe Connection (Reaction)
1974/01/06	Gas release (Cylinder fall)	Careless Handling (Distribution)
1971/11/23	Gas release (Cylinder fall)	Bad Product (Valve)
1970/06/02	Gas release	Bad Product (Valve)
1968/04/16	Gas release	Bad Product (Valve)
1967/11/03	Poisoning Accident	Bad Product (Valve)
2009/04/23	Gas release of Scrap-metal Dealer	Careless Handling(Cylinder)
2006/08/17	Poisoning Accident	Careless Handling(Wrong filling)
2006/02/06	Gas release	Careless Handling(Cylinder)
2004/04/16	Gas release of Scrap-metal Dealer	Decrepit Cylinder (Reaction)
2003/05/10	Gas release	Miss Operation (Wrong filling)
1998/09/17	Gas release	Miss Operation (Valve)
1998/08/23	Gas release	Miss Operation (Replacement)
1997/07/13	Gas release	Decrepit Cylinder (Reaction)
1996/06/03	Gas release of Valve Neck-connection	Decrepit Cylinder (Reaction)
1996/02/15	Gas release of Miss-tighten	Wrong Connection
1995/05/09	Gas release of Traffic Accidents	Traffic Accidents
1993/07/25	Gas release	Decrepit Cylinder (Reaction)
1993/06/17	Gas release of Relief Valve	Overcharge (Tank Lorry)
1990/10/29	Gas release	External Impact
1985/10/25	Gas release	Miss Operation (Valve Connection)
1985/05/08	Valve Disassemble	Miss Operation (Disassemble Cylinder)
1983/10/02	Poisoning Accident	Pipe Connection (Reaction)
1983/04/15	Valve Rupture	Poor Driving (Distribution)
1978/06/29	Gas release (Welded Connection)	Pipe Connection (Reaction)
1978/03/20	Cylinder Rupture	Careless Handling (Distribution)
1975/07/13	Gas release (Welded Connection)	Decrepit Cylinder (Reaction)
1974/08/15	Gas release	Pipe Connection (Reaction)
1974/01/06	Gas release (Cylinder fall)	Careless Handling (Distribution)
1971/11/23	Gas release (Cylinder fall)	Bad Product (Valve)
1970/06/02	Gas release	Bad Product (Valve)
1968/04/16	Gas release	Bad Product (Valve)
1967/11/03	Poisoning Accident	Bad Product (Valve)

제외하고 국내 운영중인 대용량 고압가스 운반차량은 약 1,110대로, LPG 운반 차량(탱크로리가 628대, 벌크형 탱크로리가 62대), 고압가스 산소 운반차량이 98대, 탄산가스 97대, 염소 운송 차량은 13대, 기타 고압가스 운반차량이 191대이다.

즉, 일반 소형 염소용기를 일반 고압가스 차량을 통한 운반을 제외한 벌크 형태의 염소 운반차량은 총 13대가 운용되고 있으며, 벌크 형태의 염소운반차량의 최대 허가량은 20톤이다. 참고로 소형 염소용기는 100 kg 및 1톤 용기로 유통되는데, 이 용기는 독성가스로 구분되어 주기적으로 용기의 재검사를 받고 있다. 전국에 있는 총 68개 취급시설에서의 직접적인 액체염소 취급량은 9,469톤으로 추정되며, 13대의 염소운송차량이 주 4회 운행을 한다면 54천 톤의 액체 염소가 유통되는 것으로 추정할 수 있다. 결국 2009년 기준 국내 생

산되는 염소 135만 톤의 대부분은 전국 5개 지역(7개 사, 9개 사업장, 13개 제조시설)에서 대부분 자가 소비되거나 염소 유도체용 원료로 배관을 통해 사용된다. 국내에서는 철도나 배를 통한 염소의 이동이 없는 것이 특징이며, 배관을 제외한 대부분의 이동은 허가된 염소 운반차량 13대를 통해 일반제조 및 충전장으로 보내져서 100 kg 및 1톤 용기로 충전되어 전국 각지로 보내진다. 그 규모는 국내 생산량 135만 톤 중 약 5.4만 톤(생산량 대비 약 4% 수준)이 차량으로 유통된다고 추정할 수 있다.

### 3-2. 국내의 염소사고 사례분석

#### 3-2-1. 국내 염소 누출사고

국내의 경우 총 27건의 사고가 기록되어 있으며, 상세 자료는

**Table 7. Chlorine accidents in Japan (2000-2008) [2]**

Date	Descript of Chlorine Accidents	Accident Causes
Jan/2000	Valve leakage of underground Storage	Decrepit Storage (Reaction)
Mar/2000	Cracked Hose Connection	Degradation (Hose Connection)
Oct/2000	Over-tighten Connection	Careless Handling
Apr/2000	Wrong Charging of Tank Lorry	Miss Operation (Valve, Distribution)
Jun/2000	Out of Control (Instrument Failure)	Miss Operation (Malfunction)
Nov/2000	Flange leakage	Degradation (Corrosion, Reaction)
Mar/2001	High Temperature (Relief Valve)	Miss Operation
Sep/2001	Hose leakage of Tank Lorry	Degradation (Corrosion, Reaction)
Nov/2001	Valve Corrosion	Degradation (Corrosion, Reaction)
Dec/2001	Not Used Cylinder	Careless Handling
May/2002	Charge of Tank Lorry	Miss Operation
Jul/2002	Valve leakage	Careless Handling (Miss Operation)
Jul/2002	Internal Corrosion of Evaporator	Degradation (Corrosion, Reaction)
Oct/2002	Excess charge of Filtration Plant	Overcharge (Miss Operation)
Oct/2002	Sewage Treatment Plant	Careless Handling (falling)
Feb/2003	Not Used Cylinder	Careless Handling
Jun/2003	Contact to Not-removal-Resin for New Instrument	Careless Handling (Reaction)
Jun/2003	External Corrosion (Cylinder)	Degradation (Corrosion, Reaction)
Sep/2003	External Corrosion (Pipe)	Degradation (Corrosion, Reaction; Loading Area)
Jul/2004	Careless Handling (Scrap Cylinder)	Cleaning Error (Dregs)
Nov/2005	Miss Cutting (Pipe)	Construction Error (Missing Work)
Jun/2006	Corrosion (Valve Connection)	Miss Connection
Aug/2006	External Impact (Changed Cylinders)	Construction Error (Missing Work)
Oct/2006	Remain Gas Leak (Piping Work)	Construction Error (Missing Work)
Oct/2006	Gas Release (Filling Plants)	Careless Handling (Unloading)
Jun/2007	Filtration Plant (Damaged Pipe Connection)	Degradation (Corrosion, Reaction)
Dec/2007	Excess Charge of Filling Facilities	Careless Handling
Jan/2008	Snapping Failure of Tank Lorry Charging	Miss Operation
May/2008	Miss Operation (Valve)	Miss Operation
Sep/2008	Gas Release (Scrap Cylinder)	Degradation (Corrosion, Reaction)
Nov/2008	Construction Error (Missing Work)	Degradation (Corrosion, Reaction)

Table 6에 나타내었다. 이 기록은 1967년부터 2008년까지 한국가스 안전공사의 ‘국내 염소사고 사례’로, 사고를 분석하면 염소사고 대부분이 누출사고였고, 염소 취급 중 흡입사고가 1건을 차지하고 있다[2]. 참고로 한국산업안전보건공단의 염소관련 사고는 21건으로 알려졌으나, 사고 일시 및 장소 등이 익명으로 처리되어 통계적 기준에서 제외하였다. 염소 취급 40년간 27건의 사고만 발생하였다고 판단하기에는 미비한 점이 많다고 보인다. 또한 공개된 사고는 염소 취급 공정에서가 아니라 유통과 같은 일반고압가스 용기 취급 사고로 판단된다. 자료의 대부분이 고압가스 일반 취급 과정의 사고로, 사고 원인별로 분류하면 용기 노후 및 불량(반응) 등으로 인한 가스누출 사고가 27건 중 12건(44.4%)을 차지하고 다음으로 오조작, 점검불량 등 인적 오류에 의한 사고가 27건 중 9건(33.3%)을 차지해, 용기 저장실에 대한 안전관리와 인적 오류에 의한 사고를 예방하기 위해 교육 및 훈련이 필요한 것으로 나타났다. 즉 부식과 같은 염소 반응성으로 추정되는 사고가 44.4%를 차지하고 있으며, 유통과 관련 사고도 5건으로 각 18.5%를 차지하고 있어 염소 유통에 대한 안전관리의 필요성을 확인할 수 있다.

3-2-2. 일본 염소 누출사고

일본 액화염소 사고자료에 의하면 2000년부터 2008년까지 일본에

서 발생한 염소 사고는 가스 누출 및 폭발 등의 사고가 총 264건으로, 대표적인 염소사고 31건을 정리하면 Table 7와 같다[11]. 특히 염소누출 사고의 31건 중 14건이 다른 물질과의 반응성(열화, 부식)과 관련된 사고가 45.2%이며, 오조작 및 취급부주의 등의 10건으로 32.3%, 염소 유통관련 사고도 4건으로 12.9%로 분석되고 있다[2].

264건의 사고 자료를 살펴보면 인명피해는 사망 6명, 중상 25명, 경상 1,649명 총 사상자수가 1,680명으로 여타의 고압가스에 비해 높은 수치를 나타내고 있고, 사고의 형태를 사고장소와 사고발생 위치, 취급상태, 사고현상 및 사고원인 등 5가지로 구분하여 분석되었고, 사고 장소로는 소비설비 및 제조설비가 약 40%이고, 탱크로리 등 이송 및 기타 사고장소에서 18% 정도를 차지하고 있다.

3-2-3. 미국과 중국 염소 누출사고

Table 8의 미국 염소누출 사고는 한국산업안전보건공단에서 경제협력개발기구에 등록된 관련 사고를 발췌한 것으로 부식 등으로 인한 염소 반응성 사고가 12건(57.1%)이고, 운송사고가 6건(28.6%), 기타 화재 사고가 3건(14.3%)으로 분류되었다. 참고적으로 미국 ‘화학안전과 위험조사위원회(Cheical Safety and Hazard Investigation Board: CSB)’의 연구자료인 ‘The 600K Report’에 의하면 염소 유통 사고는 3,800건으로 전체 사고 발생율은 1.47%이지만 운송 물질별

**Table 8. Chlorine accidents in America and China**

1) Chlorine Accidents in America			
Dec/1975	Explosion of Niagara	Jan/1989	Gas Release of Los Angeles
Dec/1976	Explosion of Baton Rouge (Plants)	May/1995	Gas Release
Oct/1977	Gas Release of Michigan	Feb/1995	Warehouse Fire (Included Chlorine Cylinders)
Feb/1978	Gas Release of Youngstown (Railroad)	Sep/1997	Explode of Unloading Tank Lorry
Jun/1978	Gas Release (Storage)	Jul/2001	Warehouse Fire (Included Chlorine Cylinders)
May/1981	Gas Release of Puerto Rico	Jul/2002	Abnormal reaction (Explode Pipe)
Jun/1981	Gas Release	Aug/2001	Hose Failure during Railroad Charging
Jul/1987	Gas Release of Railroad	Jul/2003	Louisiana, Corrosion of Management Failure
Jun/1988	Gas Release of Springfield	Jun/2006	Texas (Train to Train)
Sep/1988	Gas Release of Los Angeles	Jan/2005	South Carolina (Tank Lorry to Train)
Sep/1988	Gas Release of Los Angeles (2 <sup>nd</sup> )		
2) Chlorine Accidents in China			
Dec/2003	Explode of Chlorine Storage	Chlorine Leak: 234 dead, over 10,000 evacuated	
Apr/2004	Leak of Chlorine Storage	Chlorine Leak 9 dead, over 150,000 evacuated	
Mar/2004	Highway Traffic Accidents	Chlorine Leak: 27 dead, over 10,000 evacuated	

사고 순위는 9위로 조사되었다. 2011년도 미국 Environmental health News의 Jane Kay 특별기고문에 의하면 2000년부터 14개주에서 100여 건의 염소누출로 인하여 14명이 사망하고 820명이 상해를 입었으며 수천명의 작업자와 주민이 대피한 것으로 나타난다. 또한 1996~2001년까지 40,000건의 화학물질 사고가 있었으며 이 중 1993~2000년 사이에 865건의 염소 누출 사고가 발생하여 그 중 275건이 상해를 일으켰으며 1,071명이 피해를 입었다. 2005~2009년에는 염소 운송 사고로 48건의 차량과 열차사고로 9명이 사망하였고 83명이 상해를 입었는데, 이는 같은 기간 가솔린 등의 위험물질 1,306건의 차량 및 열차 운송사고로 인해 30명이 사망하고 19명이 중상을 입은 것과 비교하면 심각한 위험을 나타낸다.

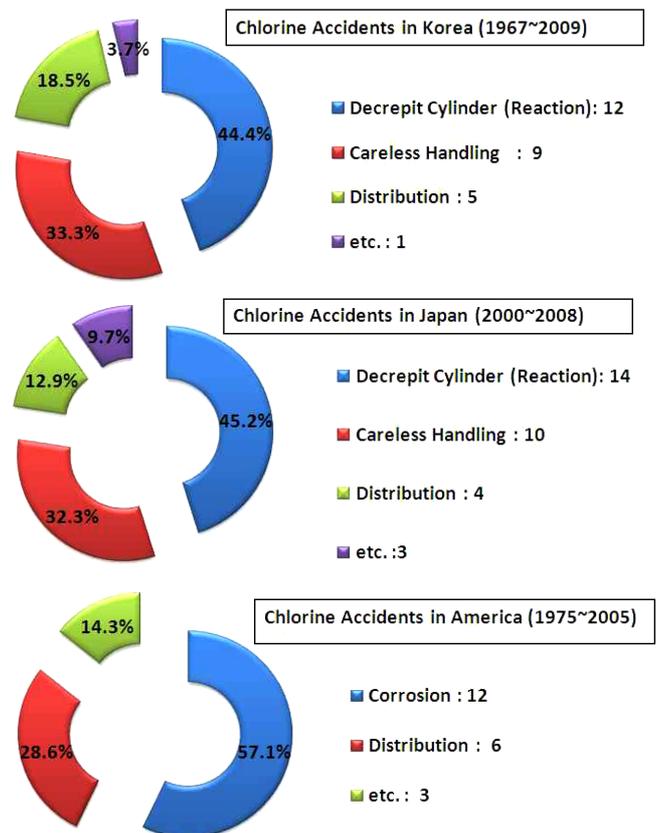
Table 8의 하단부에 나타난 중국의 염소 사고는 단 3건에 불과하지만 수 만 명이 대피한 중대사고였다. 2003년 12월 충칭시(市)에서 염소저장 탱크 7개 중 3개가 폭발하여 234명이 사망하였고, 2004년 4월 쑹칭시(市) 티엔위엔에서는 염소가스 누출로 9명이 사망하고 15만 명이 대피하였다. 2005년 3월 장쑤성 화이안시(市) 고속도로에서는 액화염소 30톤을 운송하던 Tank Lorry가 화물차와 충돌하면서 염소가 누출되어 인근 주민 27명이 사망하고 수 만 명이 대피하는 사고였다. 두 건의 사고는 반응성과 설비불량에 의한 사고였으며, 한 건의 사고는 유통 관련 사고로 피해가 큰 사고로 분류되고 있다.

### 3-2-4. 기타 염소사고

기타 국가에서 발생한 17건의 염소 사고 사례 경우도 다른 물질과의 반응성 사고가 7건, 유통관련 사고가 4건으로 각각 41%와 23.5%로 나타나 있다. 2011~2012 Chlorine Industry Review 보고서에 의하면 유럽내의 염소 운송은 전년 대비 약간 상승하였고 이 중 1/3이 차량 운송이었으며, 사고는 없었다고 한다.

### 3-2-5. 염소사고 분석

국내와 일본의 염소사고 기록을 비교하면, 국내의 경우 30년간 27건 발생하였으나, 일본의 경우 9년간 264건의 사고가 보고되고 있다. 이는 국내의 염소에 대한 안전관리 및 기준이 일본보다 월등히 높아서 사고가 발생되지 않았다는 의견보다는, 국내의 염소 사고사례에 대한 분류 및 통계가 부족하고 사업장의 사고 집계에도 제한적인 문



**Fig. 3. Analysis of chlorine accidents for Korea, Japan and U.S.A.**

제가 있었다고 판단된다. Fig. 3과 같이 사고사례를 분석한 결과, 염소와 다른 물질간의 반응성으로 인한 가스 누출사고가 국내 44.4%, 일본 45.2%, 기타 미국 57.1%이고, 염소 유통과 관련된 사고도 국내 18.5%, 일본 12.9%, 미국 28.6%, 기타 국외 사례는 23.5%로 분석되었다. 염소 제조공정의 유해성에서 확인된 바와 같이 수은이나 석면의 유해성으로 인한 문제 이외에도 염소와 염화질소의 폭발이 5건, 염소와 수소 반응에 의한 전해조 폭발사고가 7건이 확인되었다. 이는 멤브레인 전해조 운전 시 수소에 의한 전해조 손상 사고가 가장

많이 발생되고 있다는 것도 주목할 만한 내용이다. 일본과 미국 지역에서 발생한 염소 누출 사고의 주요원인이 다른 물질과의 반응성과 유통 과정에 있다고 분석되고 있다. 이는 염소 취급 및 유통의 위해성 인식에 대한 연구가 필요하다고 판단하게 하는 중요한 근거이다.

3-3. 화학물질 운송위험지수 모델 제시

실제 운송자료를 기반으로 운송 위험에 대한 분류와 위험의 정도를 표현할 수 있는 평가 모델을 제시하는 연구가 필요하여 화학물질의 특성과 운송사고의 영향 및 이송거리를 조합하여 위험을 등급화 하는 화학물질 운송위험지수(Cheical Transportatation Risk Index: CTI) 평가 모델을 제시하고, 국내 실제 유통 자료를 바탕으로 제시한 모델의 적절성을 검증하고자 한다. 참고로 미국 화학안전과 위험사고 조사국(CSB)의 605,000건의 화학물질 사고 조사 결과 중 운송시설에 의한 사고가 259,000건(43%)으로 조사되었고[22], 일본의 경우에도 탱크로리 등 이송 및 기타 사고장소에서 18% 정도의 사고분포를 나타내고 있다. 국내는 운송위험에 대한 평가기준을 갖추고 있지 않은 상태여서, 미국의 관련 지침과 운영모델을 기반으로 국내에 적용 가능한 모델을 구성하였다. 기본적으로 제안된 모델의 구조는 Risk Evaluation의 기본공식인 ‘위험 = 영향×빈도’를 적용하되, 화학물질 유통에 따른 운송위험으로 물질의 영향과 운송빈도의 영향을 지수화한 ‘Chemical Transportatation Risk Index (CTI)=Consequence×Frequency’로 나타낸다[23-25]. 즉,

$$\begin{aligned} & \text{화학물질 운송위험 지수(Cheical Transportatation Risk Index: CTI)} \\ & = \text{물질의 영향(결과 운송지수: } \Sigma C) \times \text{운송빈도(빈도 운송지수: } \Sigma F) \\ & = \text{최대 영향(독성, 화재, 독성, 법규 등)} \times \text{화학물질 이송환산 톤 거리} \end{aligned} \quad (1)$$

화학물질 운송위험지수(CTI)는 화학물질 유통에 대한 운송위험평가를 위해 두 가지의 지수를 항목으로 선정하고, 지수의 각 항목에 대해서는 위험의 정도를 등급(Level)으로 세분화하여 그 해당 항목을 조합하는 방식이다. 식 (1)을 적용하는 것에 우선해서 각 지수의 해당 항목의 객관적인 기준 확보를 위해 보편성과 객관성 및 주기적으로 보정이 가능한 데이터를 선정하는 것이 중요하다고 판단되며 선정된 위험지수를 구체적으로 검토하면 다음과 같다.

3-3-1. 다우케미칼 운송위험 지수

다우케미칼의 결과 운송지수(Consequence Index:  $\Sigma C$ )는 ‘화재폭발지수 F&EI과 화학물질 누출지수 CEI, 흡입독성, 피부흡수 독성, 피부와 눈의 부식도, 수생독성 및 기타 심각도’ 7가지를 사용하고 있다. 세부 항목은 다우케미칼에서 자체 개발한 화재폭발지수 F&EI와 화학물질 누출지수 CEI, 보유하고 있는 독성 자료를 근거로 흡입독성, 피부흡수 독성, 피부와 눈의 부식도, 수생독성 및 기타 심각도

를 적용한다[11]. 빈도 운송지수(Frequency Index:  $\Sigma F$ )는 ‘Log(적재량 × 이동거리)’로 표현한다.

3-3-2. 제안모델의 운송위험 지수

제안하는 운송위험지수의 구성 항목은 미국화학공학회 화학공학 안전센터 운송위험분석의 최대예상사고분석 기법에 적용되는 화재, 반응, 보건 항목을 적용하였다. 즉, 화재폭발 항목과 화학물질 누출 항목은 미국화재방재협회 NFPA 지수 중 ‘Nf = 화재폭발 지수’와 항목은 ‘Nr = 반응성 지수’를 적용하였다[10,11].

보건에 대한 항목은 인체 및 생태계 유해성을 파악하기 적합한 ‘흡입독성, 급성독성, 수생독성’을 적용하였다. 보건에 대한 3가지 자료는 일반적인 자료의 접근이 용이하고 지속적인 보정이 이뤄지는 자료를 선정하였다. ‘흡입독성’은 미국 국립직업안전건강 연구소(NIOSH)에서 관리하는 IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations)와 ‘급성독성’은 유럽연합의 운송평가에 적용되는 미국 운수성 Subcommittee on Consequence Assessment and Protective Actions의 TEELs (Temporary Emergency Exposure Levels)를 선정하였다. ‘생태독성’은 어독성을 기준으로 96시간(환경독성으로 어독성, 무척추동물, 해조류 중 하나를 선택)을 선정하였다. 마지막으로 기타 위험도 부분은 국내 실정에 맞는 객관적인 평가를 위해 국가 법률인 환경법규/위험물법규/산업안전보건법 등과 국제협약 중 국내에 적용되는 화학무기 사용제한(CWC) 및 잔류성 유기화학물질 등 화학물질의 환경과 안전에 관한 협약에서 규제되는 화학물질을 대상으로 그 규제의 수준을 등급화하여 기준과 병행하는 방법을 선정하여 적용하였다.

즉, 제안하는 화학물질 운송위험지수는 다우케미칼의 운송위험평가 모델을 기본으로 적용하되, 국내 실정에 맞도록 각각의 항목을 재조정하였으며 Table 9에 비교자료를 나타내었다.

결과 운송지수(Consequence Index:  $\Sigma C$ ) 선정기준은 Table 10에 나타내었다. Table 10 ‘결과 운송지수(Consequence Index)’ 항목은 ‘화재폭발, 반응성, 흡입독성, 급성독성, 수생독성, 법규’ 6개 항목으로 관련 분야에서 가장 대표적인 기준과 지속적인 보정이 되는 데이터를 기준으로 선정하였다. 선정된 항목의 객관성을 확보하기 위해 각각 5단계로 구분한 후 이를 ‘AND’ 조건으로 묶는 방법을 적용하여 다양한 위험이 내재된 물질의 위험도를 평가할 수 있도록 하였다. 빈도 운송지수(Frequency Index:  $\Sigma F$ ) 선정기준은 Table 11에 나타내었다. Table 11에서 ‘빈도 운송지수(Frequency Index)’ 항목은 운송과정에서 사고 영향이 될 수 있는 ‘운송량, 운송 횟수, 운송거리와 주 운송도로 상태’로 선정하였다. 객관적인 항목의 적용을 위해 각각 4 단계로 구분하여 이를 ‘AND’ 조건으로 묶는 방법을 적용하여 다양한 위험이 내재된 물질의 위험도를 평가할 수 있도록 하였다. 이 기준은 물질 고유의 위험과 유통과정에서 사고 발생을 가정하여, 1회 유통에 적재되는 화학물질의 양과 월 단위의 운송 횟수, 운전자의 운

Table 9. Compared with consequence and frequency index

		Consequence Index: Level 1~5				Frequency Index: Level 1~4					
DOW	Fire & Explosion Index: F&EI	Chemical Exposure Index: CEI	Inhalation Toxicity Index	Skin Absorption Toxicity Index	Skin/Eye Corrosive Index	Aquatic Toxicity Index	“Other Effects” Index	Ton Miles Per Year - Log Scale			
Suggestion Model	NFPA Index: Nf	NFPA Index: Nr	Inhalation Toxicity: IDLH	Acute Toxicity: TEEL		Aquatic Toxicity: Fish Toxicity	Regulation	Transport. Traffic Volume	Transport. Frequency	Transport. Distance	Road

**Table 10. Consequence index of chemical transportation risk evaluation**

Consequence Index: $\Sigma C$						
	Fire & Explosion	Reactivity	Inhalation Toxicity	Acute Toxicity	Aquatic Toxicity	Regulation (International & Local)
Guide	NFPA Index: Nf	NFPA Index: Nr	IDLH (ppm)	TEEL-2 (mg/m <sup>3</sup> )	Fish Toxicity 96 hr at LC <sub>50</sub> (μg/l)	Environmental Laws/ Dangerous Goods (Safety Control of Dangerous Substances Act)/Occupational Safety and Health Act etc. - Law and Regulations
Level 5	4	4	~10	~10 bellow	~10	Substances requiring preparation for accidents, Terror or Radioactivity
Level 4	3	3	11~50	10~5 bellow	11~500	Substances requiring preparation for accidents or Dangerous Substances (Risk 1) or International Environmental Conventions (CWC, PIC, POPs)
Level 3	2	2	51~100	50~100 bellow	501~10,000	Dangerous Substances (Risk 2) or Toxic Chemicals, Malodor Substances
Level 2	1	1	101~200	100~500 bellow	10,001~100,000	Dangerous Substances (Risk 3) or Special Pollution Substances (Air/Water)
Level 1	0	0	Great Than 201	Great Than 500	Great Than 100,001	Environmental Pollution Substances (Soil/Air/Water etc.)

**Table 11. Frequency index of chemical transportation risk evaluation**

Frequency Index: $\Sigma F$				
Guide	Volume Ton per Time	Frequency Time per Month	Distance km	Main Route Road Identification <sup>†</sup>
Level 4	Great Than 20 Ton	Great Than 200	201 km~	2 Traffic Lanes (per Each Way)
Level 3	11~20 Ton	101~200	101~200 km	4 Traffic Lanes (per Each Way: National Highway)
Level 2	1~10 Ton	10~100	20~100 km	4 Traffic Lanes (per Each Way: National Expressway)
Level 1	Less Than 1 Ton	Less Than 10	Less Than 20 km	Over 4 Traffic Lanes (per Each Way)

<sup>†</sup>Grade of Road identification in Korea: National Expressway, National Highway, Special/City Metropolitan City Road, Provincial Road, Si/Gun Road

**Table 12. Consequence data of chemical transportation**

Consequence Index Data						
(T.:Toxicity)	F & E	React.	Inhalation T.	Acute T.	Aquatic T.	Regulation
Guide	NFPA Index	NFPA Index	IDLH (ppm)	TEEL-2 (mg/m <sup>3</sup> )	Fish T. LC <sub>50</sub> (μg/l)	Local Regulation
Chlorine	0	0	10	7.5	390	Preparation for Accidents
	Level 1	Level 1	Level 5	Level 5	Level 4	Level 5
HCl	0	0	50	30	21,900	Accidents, Toxic
	Level 1	Level 1	Level 4	Level 4	Level 2	Level 4
Caustic	0	1	3.5 (10 mg/m <sup>3</sup> )	5	240	Toxic
	Level 1	Level 2	Level 5	Level 5	Level 4	Level 3
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0	2	10	10	2.8	Accidents, Toxic
	Level 1	Level 3	Level 5	Level 4	Level 5	Level 4
HypoChlo	0	0	-	500	95	Environmental Pollutant
	Level 1	Level 1	Level 1	Level 1	Level 4	Level 1
EDC	3	0	50	810	150,000	Toxic, CWC, PIC
	Level 4	Level 1	Level 4	Level 1	Level 1	Level 4
VCM	4	2	-	12.5	3,880,000	Accidents, Toxic, CWC
	Level 5	Level 3	Level 1	Level 4	Level 1	Level 4
ECH	3	2	75	75	13,200	Toxic, CWC
	Level 4	Level 3	Level 3	Level 3	Level 2	Level 4
DCPa	3	0	400	500	280,000	Toxic, Risk 2
	Level 4	Level 1	Level 1	Level 1	Level 1	Level 3
2-EH	2	0	-	100	28,200	Risk 3
	Level 3	Level 1	Level 1	Level 3	Level 2	Level 2
n-BAL	2	0	-	75	16,000	Risk 2, Odor
	Level 3	Level 1	Level 1	Level 3	Level 2	Level 3
i-BuOH	3	0	1,600	750	1,000,000~3,000,000	Risk 2, CWC
	Level 4	Level 1	Level 1	Level 1	Level 1	Level 4
n-BuOH	3	0	1,400	150	2,250,000	Risk 2, Ordor, CWC
	Level 4	Level 1	Level 1	Level 2	Level 1	Level 4

전시간을 감안할 수 있는 운행거리와 도로의 상태를 반영하였다. 참고로 국내 도로의 상황은 국토해양부 기준 전국 도로 통계를 활용하여 반영할 수 있도록 등급화하였는데, 2008년 기준 국내 도로의 총연장은 104,236 km로 고속도로(3,447 km, 포장율은 100%), 일반국도(13,905 km, 포장율은 97.4%), 특별광역시도(18,517 km), 지방도(18,193 km, 포장율은 81.1%), 시군도(50,174 km, 포장율은 63.1%)이며, 주요 화학물질을 취급하는 울산광역시(1,682 km, 포장율은 96.5%)와 전라남도(10,181 km, 포장율은 69.9%)로 조사되었다[26].

3-4. 화학물질 운송위험지수의 모사

제안된 ‘화학물질 운송위험 지수(CTI)’ 모델의 적절성을 평가하기 위해 국내에서 클로르 알칼리 화학물질을 가장 많이 생산하는 H社의 액상 화학물질 운송출하 자료를 통하여 화학물질 운송위험도를 평가 하였다. 운송 출하자료는 H社의 2개 사업장(울산광역시와 전라남도 여수 소재)에 대한 것으로 과거 자료 중 확보된 5개월간에 출하된 화학물질 13종에 대한 자료이다. 운송 사고 빈도가 가장 높고 통계 관리되고 있는 ‘가솔린과 LPG/LNG 차량’을 제외시켰을 때, 운송위험이 높은 물질이라고 판단되었다. 특히 국내에서 가장 많은 화학제품을 생산하는 여수지역과 울산지역에서의 육상운송 출하자료를 통해 빈도운송지수와 물질고유의 정보를 바탕으로 ‘결과 운송지수’를 설정하여 평가모델 모사에 적용하였다. 해당 화학물질은 염소를 포함하여, 염산, 가성소다, 황산, 하이포(차아염소산), EDC, VCM, 옥탄올(2-EH) 등 13종으로 해당 물질에 대한 지수적용 항목 6가지를 세부 등급으로 적용한 데이터로 ‘결과 운송지수’는 각 6개

항목의 등급(Level)을 합한 값으로, 물질별 세부 등급을 Table 12에 나타내었다. Table 13는 해당 물질의 운송량과 횟수, 운송거리, 운행 구간 4가지 항목을 세부 등급으로 적용한 데이터로 빈도 운송지수는 각 4개의 항목의 등급(Level)을 합한 값이 된다. 모사한 ‘화학물질 운송위험 지수(CTI)’는 Table 12와 Table 13의 각 지수의 합을 곱으로 나타낸 것으로 식 (1)을 적용하면 된다.

염소의 경우, 결과 운송지수(ΣC)에 해당하는 6개 항목의 등급의 합은 다음과 같다.

$$\Sigma C = 1 + 1 + 5 + 5 + 4 + 5 = 21 \tag{2}$$

빈도 위험지수(Frequency Index: ΣF)에 해당하는 4개 항목의 합은 다음과 같다.

$$\Sigma F = 3 + 3 + 4 + 3 = 13 \tag{3}$$

단, 빈도 운송지수에서 국내 도로 포장율이 높고 화학물질의 주요 운송경로의 상당부분이 Level 3~4에 해당된다. 물론 전 구간을 확인한다면 일반 비포장 도로까지 운행이 될 수 있지만 정확한 정보가 생성되지 않는 관계로 공통 항목으로 평가될 수 있는 마지막 항목인 주 운행구간을 잠정적으로 제외하였다. 즉, 결과 위험지수(Frequency Index) ΣF = 10으로 식 (1)을 적용하면 다음과 같다.

$$CTI (\text{화학물질 운송지수: Chlorine}) = \Sigma C \times \Sigma F = 21 \times 10 = 210 \tag{4}$$

Table 14는 13개 물질에 대한 운송위험지수를 나타냈다. 또한 각 결과 운송지수와 빈도 운송지수를 축으로 하는 그래프로 나타내었다. 이

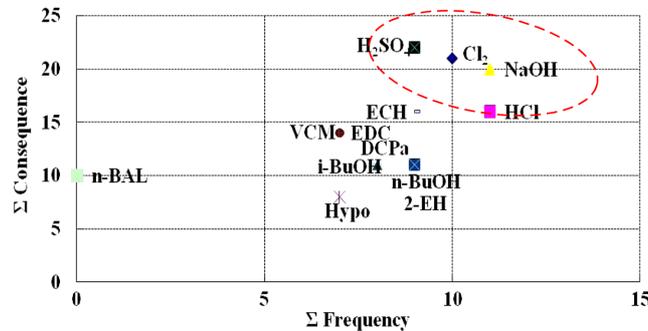
Table 13. Frequency data of chemical transportation

Guide	Frequency Index Data Level 4 Level 3			
	Volume (Ton per Time)	Frequency (Time per Month)	Distance (km)	Main Route (Type of Road)
Chlorine	19	110	201	Four lanes
	Level 3	Level 3	Level 4	Level 3
HCl	26	240	201	Four lanes
	Level 4	Level 4	Level 4	Level 3
Caustic	26	210	400	Four lanes
	Level 4	Level 4	Level 4	Level 3
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	25	20	380	Four lanes
	Level 4	Level 2	Level 4	Level 3
HypoChlo	15	16	100	Four lanes
	Level 3	Level 2	Level 2	Level 3
EDC	14	6	380	Four lanes (Highway)
	Level 3	Level 1	Level 4	Level 2
VCM	less than 1	3	280	Four lanes (Highway)
	Level 1	Level 1	Level 4	Level 2
ECH	17	50	370	Four lanes
	Level 3	Level 2	Level 4	Level 3
DCPa	9	3	260	Four lanes
	Level 2	Level 1	Level 4	Level 3
2-EH	26	41	380	Four lanes
	Level 4	Level 2	Level 4	Level 3
n-BAL	Land Shipping: No data during investigation period			
		i-BuOH	18	5
Level 4	Four lanes		Level 3	Level 1
	Level 3	n-BuOH	25	11
	Four lanes		Level 4	Level 2

Table 14. Chemical transportation risk with CTI's consequence and frequency level

Chemical Transportation Risk Chart			
Materials	Consequence Index( $\Sigma C$ )	Frequency Index ( $\Sigma F$ )	Chemical Transportation Index (CTI)
Chlorine	21	10	210
HCl	16	11	176
Caustic	20	11	220
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	22	9	198
Hypochlo.	9	7	63
EDC	15	7	105
VCM	18	7	126
ECH	19	9	171
DCPa	11	8	99
2-EH	12	9	117
n-BAL	13	0	0
i-BuOH	12	8	184
n-BuOH	13	9	117

Chemical Transportation Risk Chart



그래프는 운송 위험지수가 '결과와 빈도의 합'으로 표시되는 동시에 각각의 지수가 지닌 개별적인 위험도를 나타낼 수 있다. 일정 수준에 있는 운송대상물의 결과적 위험과 빈도적 위험을 동시에 보여 줌으로 수치적인 위험 외에도 시각적인 위험을 판단함으로써 유통 위험성을 평가할 수 있는 적절한 모델의 근거가 될 수 있다고 판단된다.

이번 모사를 통한 결과 염소, 염화수소, 염산, 황산이 고(高)위험지수로 평가되었고, 그래프를 통해 결과 위험의 상위 수준인 20 이상, 빈도 위험이 10 이상인 물질을 주목하면, '염소와 염화수소'가 화학물질 유통과정 중 위험도가 가장 높은 위험군으로 판정할 수 있었다. H사의 운송위험 정도를 나타낸 Table 14 하부의 그래프를 미국화학안전과 위험조사국(CSB)의 연구자료인 'The 600 K Report' 화학물질 유통사고 분석 [22] 결과(가솔린 1위, 접착제 타르 2위, 화학폐기물 3위, 페인트류 4위, 황산 5위, 무수 암모니아 6위, 염산 7위, 가성소다 8위, 염소 9위)와 비교하여 모사된 결과 고위험군인 '염소, 가성소다, 염산, 황산'과의 동질성이 확인되었고, 다우케미칼의 DRI 지수와 유사성도 확인할 수 있었다. 이와 같이 제시된 모델을 기초로 염소 이외의 화학물질 운송에 대한 위험도를 평가할 수 있는 화학물질 운송위험 지수(CTI)를 완성할 수 있었다.

#### 4. 결 론

염소와 같은 위험물질의 운송 유해성을 파악하기 위해 염소에 대한 기초 자료에서부터 생산량 자료를 조사하였다. 그 결과 2009년도

염소 생산량은 잠정적으로 135만 톤으로 조사되었다(참고로 2012년은 165만 톤으로 추정됨). 대부분은 배관을 통해 자소하거나 인근 공장으로 이송되고 있으며, 철도나 바지선을 이용한 유통은 없었다. 대략 4% 수준인 5.4만 톤 정도의 액화염소는 허가된 염소 운송용 벌크 차량 13대를 이용하여 유통되고 있으며, 제조공장에서 벌크 차량으로 출고된 염소는 고압가스 특정제조시설 13개와 일반 제조시설 8개소로 출하되어, 4,305개의 소형용기에 충전되어 일반 고압가스 운반 차량을 이용하여 전국 255개소의 사용시설 및 소규모 정수장 68개 취급시설 등의 시설로 유통되는 것이 조사되었다.

또한 국내의 염소 누출 사고와 관련 사고사례를 분석한 결과, 염소와 다른 물질 간의 반응성으로 인한 염소가스 누출사고가 가장 많지만, 염소 유통과 관련된 사고도 높게 분석되었다. 이와 같은 위험물질의 운송위험의 정도를 파악하기 위해 다우케미칼의 평가지수에서 착안한 정성적인 '화학물질 운송위험지수 CTI' 모델을 제시하였고, 이의 모델링을 통하여 염소를 포함한 다양한 화학물질을 대상으로 위험물질의 유통 유해성에 대한 운송위험도를 '결과 및 빈도의 지수'로 모사 평가하였다. 모사를 통해 적용된 13종의 화학물질 중 액화염소와 가성소다, 염산, 황산이 고위험군으로 평가되었고, 이는 미국화학안전과 위험조사국(CSB)의 화학물질 유통사고분석 연구자료와의 동질성이 확인되어 화학물질 운송위험지수의 적합성을 확인할 수 있었다.

향후 '화학물질 운송차량의 설비, 사람, 물질, 경로, 작업'에 대한 유통 위험성 세부지수를 확대 실시 할 경우 화학물질 유통 유해성 평가를 좀더 구체적이며 정형화하여 평가할 수 있으며 국내실정에 적

합한 화학물질 운송위험지수로 활용될 수 있으리라 판단된다.

## 감 사

이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 지원을 받아 수행된 기초 연구과제입니다(No. 2011-0022371).

## References

1. Ministry of Environment, "The 3<sup>rd</sup> Investigation of Distributed and Discharged Quality of Chemical, Toxic Chemicals Control Act article 17," Seoul(2007).
2. Korea Gas Safety Corporation, The User Safety Manual of the Liquefies Chlorine (KGS 2009-179), Seoul(2009).
3. Chung, J. E., "Distribution Risk Review - Dow Chemical Korea Ltd.," Responsible Care Awards for Excellence in Environmental, Health & Safety Project and Public Outreach, Seoul(2002).
4. Kwon, T. O., Park, B. B., Roh, H. C. and Moon, I. S., "Electrochemical Generation of Chlorine Dioxide from Sodium Chlorite Using Un-Divided Electrochemical Cell: Effect of Anode Materials," *Korean Chem. Eng. Res.*, **48**(2), 275-282(2010).
5. Yoo, J. H., Lee, H. S. and Ko, J. W., "Risk Assessment and Drawing Information System Based Change Management," *Korean J. Chem. Eng.*, **28**(2), 323-331(2011).
6. Kim, H. D., "The study on Chemical Exposure Limit - Chlorine," The Occupational Safety and Health Research Institute (OSHRI), Seoul (2005).
7. <http://en.wikipedia.org/wiki/Chlorine#Characteristics>.
8. NFPA, "NFPA 49, Hazardous Chemicals Data," National Fire Protection Association, Massachusetts, MA(2002).
9. NFPA, "NFPA 325, Fire Hazard Properties of Flammable Liquids, Gases, and Volatile Solids," National Fire Protection Association, Massachusetts, MA(2002).
10. <http://www.emedicine.medscape.com>.
11. Korea Gas Safety Corporation (Institute of Gas Technology Training), The Management Course of the Chlorine Gas Handling, KGS Press, Seoul(2008).
12. The Chlorine Institute Inc., "Pamphlet 63 First Aid, Medical Management / Surveillance and Occupational Hygiene Monitoring Practices for Chlorine," The Chlorine Institute, Inc., New York, NY(2003).
13. <http://www.worldchlorine.com>.
14. <http://cischem.com>.
15. <http://www.kpia.or.kr>
16. <http://www.eurochlor.org>.
17. Bommaraju T. V., Orosz P. J., "Brine Electrolysis, In Electrochemistry Encyclopedia," Ernest B. Yeager Center for Electrochemical Sciences: Grand Island, New York, NY(2001).
18. Korea Soda Industry Association, The Chlorine Distributed Emergency Response Guide, Seoul(1997).
19. Dow Chemical, "Chemical Exposure Index Guide," American Institute of Chemical Engineers, New York, NY(1994).
20. Dow Chemical, "Pacific Area Guideline for hazardous Materials Transportation Risk Review and Reduction Process," Dow Chemical Pacific Limited, New York, NY(1991).
21. Korea Gas Safety Corporation, GoAb Gas Tong-Gye: The Statistics of High Pressure Gas (KGS 2009-071), Seoul(2009).
22. Kim, J. G., Rhyu, J. Y., Lee, H. Y. and Byun, H. S., "A Study on the Risk Evaluation for Chemical Transportation Tank Lorry of Chemical Plants," Theories and Applications of Chem. Eng., Proceedings of 2003 KICHe Spring Meeting, **9**(1), 1270(2003).
23. Center for Chemical Process Safety, "Guidelines for Chemical Process Qualitative Risk Analysis," 2nd ed., American Institute of Chemical Engineers, New York, NY(2000).
24. Arendt J. S. and Lorenzo D. K., "Evaluating Process Safety in the Chemical Industry: A User's Guide to Quantitative Risk Analysis," Center for Chemical Process Safety (CCPS), American Institute of Chemical Engineers, New York, NY(2000).
25. Lees, F. P., Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 1, Butterworths, London(1980).
26. Ministry of Environment, White Paper of Environment, Seoul(2008).