



Improvement on the Spill Risk of a Vehicle Transporting Hydrogen Chloride

Chang Hyun Shin^{1#}, Byung Chol Ma¹⁺, Jai Hak Park²

¹ National Institute of Chemical Safety, 90 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

² Department of Safety Engineering, Chungbuk University, 1 Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju, Chungbuk, Republic of Korea

Abstract

According to the recent statistics on chemical accidents, 72 cases resulted from transport vehicles and 14 of those cases spilled hydrochloric acid, the most frequently spilled chemical from the accidents. A small leakage occurred in most of the chemical accidents, but the massive spill occurred due to the vehicle rollover. When hydrochloric acid reacts with fire water or rain after leakage, extremely toxic gases such as hydrogen chloride are generated and spread into the atmosphere, causing severe damage. Since responding to vehicle accident is relatively more difficult, it is important to take preventive measures to reduce the risks considering the worst-case scenario such as the rollover. Therefore, this study used ALOHA to compare the end points of ERPG for the rollover accident between the existing vehicle model and an improved one, which confirmed that the improved vehicle could reduce the end points by an average of about 33.3 to 40%.

Key words: chemicals control act, transporting vehicle, hydrogen chloride, partition, rollover

1. 서론

화학물질안전원에서 운영하고 있는 화학안전정보공유시스템(Cheical Safety Clearing-house)을 통해 2013년부터 2016년 4월까지 발생한 화학사고 337건을 조사한 결과, 운송차량에서 발생한 화학사고는 73건으로 전체의 21.7%를 차지하였다. 73건의 운송사고가 발생한 장소로는 국도에서 48건(65.8%), 고속도로에서 25건(34.2%)으로 발생하였으며, 운전여건이 더 열악한 국도에서 더 많이 발생한 것으로 조사되었다(NICS CSC, 2016). 유해화학물질 운송차량은 상수원보호지역, 주민

밀집시설 등 민감·취약시설, 보호지역을 제외하고는 전국적으로 운행이 되고 있으며, 사고지역이 어느 지역에 한정된 것으로 보는 것은 곤란하다. 사고는 운전 미숙, 교통사고 등으로 인한 단순 유출이 대부분이었으나, 최근 들어서는 전복사고가 급증하고 있어 각별한 주의가 요구되고 있다. 고속도로의 경우는 과속으로 인한 위험성으로 전복사고가 일어날 수 있으며, 국도의 경우에는 비탈길, 커브길, 교차로 등에서 운전미숙으로 인한 교통사고 위험성으로 전복사고가 발생할 수 있다. 기존에 발생한 73건의 운반차량 화학사고를 연도별로 전복사고 발생건수를 조사한 결과, 2013년 4건(20.0%),

[#] The 1st author: Chang Hyun Shin, Tel. +82-42-605-7022, Fax. +82-42-605-7035, e-mail. yjoy122@korea.kr

⁺ Corresponding author: Byung Chol Ma, Tel. +82-42-605-7049, Fax. +82-42-605-7065, e-mail. anjeon@korea.kr

2014년 3건(13.6%)이 발생하다가 2015년 9건(45.0%), 2016년 4월 기준 6건(54.5%)으로 대폭 증가한 것으로 나타났다. 운송차량에서 발생한 화학사고는 사고물질을 신속하게 확인하기 어려워 사고대응이 지연되고(Seol, 2015), 차량 정체로 인해 소방, 환경부 등 사고대응기관 전문요원이 사고현장에 빨리 접근하기가 어려운 점이 있다. 특히, 운송차량이 전복되는 대형사고의 경우 지면과 충돌하면서 유출량이 더욱 많아져서 사고대응을 하는데 어려움이 가중된다(Shin, 2016).

한편, 73건의 화학사고에 대한 사고물질을 확인한 결과, 염산 15건, 질산 5건, 과산화수소, 암모니아, 황산이 각각 2건, 가성소다 등 그 외 물질이 1건이었다. 사고가 가장 많이 발생한 염산은 화학물질관리법에서 사고대비 물질과 유독물질로 관리되고 있는 물질로 독성이 매우 강한 유해화학물질이다(Ministry of Environment, 2015). 염산이 운송차량에서 유출된 경우 사고대응을 위해 사용되는 소방용수, 빗물, 공기 중 수분 등과 반응하면서 독성가스인 염화수소를 발생하여 대기로 확산되는 제2차 환경피해가 일어나게 된다. 이러한 사고를 예방하기 위해서는 사고대응에 적절한 조치가 필요할 뿐만 아니라 운송차량 설계기준을 강화하여 사고의 위험성을 줄이는 것이 필요하다. 그동안 운송차량의 화학사고 관리대책은 화학사고를 신속하게 파악하여 유관 기관에 전파하고, 사고대응을 빨리 대응하는 사후관리적 측면에서 연구가 활발히 진행되었다(Shin, 2016). 그러나 운송차량 화학사고는 사후대응 개선책을 마련하는 것과 더불어 사고 발생 시 유출량을 근본적으로 줄여 사고 위험성을 감소시키는 사전예방 차원에서 접근이 반드시 필요하다. 제도적인 측면에서 볼 때, 2015년부터 시행되고 있는 화학물질관리법에서는 취급시설 기준이 강화되어 염산, 황산 등 유독물질 운반차량의 경우 사고 발생 시 유출량을 줄이고, 운송 중 안정성을 확보하기 위해 운송차량의 내부용량이 큰 경우 4,000 L 마다 강철판 재질로 된 칸막이를 설치해야 한다(Ministry of Environment, 2015). 이러한 기준을 만족하기 위해서는 물리적으로 구획된 칸막이 마다 주입

구, 레벨게이지, 압력센서 등 안전설비를 추가로 설치해야 한다. 그러나 운반차량 상단에 돌출된 주입구, 안전설비는 보통의 충돌사고에서는 안전하지만, 과거 화학사고 사례에서도 보듯이 전복사고가 발생하면 주입구와 지면이 충돌하여 다수의 주입구가 물리적으로 손상되어 주입구를 통해 운반하고 있는 화학물질이 유출되는 예상치 못한 잠재적 위험요인이 될 수 있다(Shin, 2016). 실제로, 2014년 9월 전남 여수에서 커브길 주행 중 운전 부주의로 염산 탱크로리가 전복된 사고와 2016년 3월에는 충남 서천에서 운전 부주의로 도로 주변에 있는 논으로 전복된 사고가 발생했으며, 운송차량에서 유출된 물질이 주변에 있던 수분·물과 반응하여 염화수소 가스가 발생되어 제2차 피해가 확대된 것을 확인할 수 있다(NICS CSC, 2016). 이에 본 연구에서는 운송차량 화학사고가 가장 많이 발생했던 염산이 전복사고로 대량 유출되어 염화수소가 발생하는 것을 대기로 확산되는 최악의 사고를 모사하기 위해 염화수소 운반차량을 선정하였다. 아울러 화학물질관리법에 따른 운송차량의 전복사고 시 발생할 수 있는 문제점을 개선하기 위한 공용 주입구 활용 칸막이 장치의 운송차량 개선 시스템이 현재 운반차량에 비해 ERPG 피해 영향범위가 감소되는 수준을 수치해석 프로그램 ALOHA를 통해 비교 평가하였다. 본 연구 결과, 개선 시스템이 기존 운송차량보다 전복사고 시 ERPG 피해거리가 평균 약 33.3% ~ 40% 줄어드는 것을 확인되었으며, 향후 화학물질관리법 운송차량의 설계기준으로 수립하여 운반차량의 위험성을 개선하는데 기여할 것으로 판단된다.

II. 이론적 고찰

1. 운송차량 화학사고 발생 현황

2013년부터 2016년 4월 현재까지 발생한 화학사고는 총 337건이었고, <Table 1>에서 보는 바와 같이 337건의 화학사고 중 73건(21.7%)이 운송차량에서 발생하였다(NICS CSC, 2016). 운송차량의 화학사고 비율을 연도별로 살펴보면, 2014년부터 2015년까지 약 18%에

Table 1. Statistics of domestic chemical accidents for the last 3 years

(unit : cases)

Year \ Type	(A) Total chemical accidents	(B) Transporting vehicle chemical accidents (B/A)	(C) Overturn accidents (C/B)
2013	86	20 (23,3%)	4 (20,0%)
2014	104	22 (21,2%)	3 (13,6%)
2015	111	20 (18,0%)	9 (45,0%)
2016 ¹⁾	36	11 (30,6%)	6 (54,5%)
Total	337	73 (21,7%)	22 (30,1%)

1) Based on Jan. 1st, 2016 ~ Apr. 30th, 2016

Table 2. Statistics of domestic transporting vehicle chemical accidents for the last 3 years

(unit : cases)

Year \ Type	(A) Transporting vehicle chemical accidents	(B) National highway (B/A)	(C) Freeway (C/A)
2013	20	13 (65,0%)	7 (35,0%)
2014	22	13 (59,1%)	9 (40,9%)
2015	20	13 (65,0%)	7 (35,0%)
2016 ¹⁾	11	9 (81,8%)	2 (18,2%)
Total	73	48 (65,8%)	25 (34,2%)

1) Based on Jan. 1st, 2016 ~ Apr. 30th, 2016

서 22%까지 발생한 것에 비해 2016년에는 운송차량 사고의 비율이 30.6%까지 급증하였다. 특이한 것은 <Table 1>에서 나타난 바와 같이 운송차량 사고의 형태에서 전복사고의 비율이 2015년부터 큰 폭으로 증가하고 있다는 점이다(Shin, 2016). 2015년 9건(45.0%), 2016년 6건(54.5%)으로 다른 해에 발생했던 전복사고 비율보다 2016년에 매우 큰 폭으로 전복사고 발생빈도가 높아졌다. 아울러, 운송차량의 화학사고 발생장소를 조사한 결과는 <Table 2>와 같으며, 국도에서 48건, 고속도로에서 25건이 각각 발생하였다.

운송차량에서 발생했던 사고물질을 세부적으로 물질의 종류별로 구분하여 상위 5개 사고다발물질을 조사한 결과는 <Figure 1>과 같다. 염산이 15건, 질산이 5건이었고, 과산화수소, 암모니아, 황산이 각각 2건, 가성소다 등 그 외 물질이 각각 1건으로 조사되었다. 특히, 염산의 경우 부식성 물질로 다른 유해화학물질에 비해 사고발생 빈도가 높아 각별한 주의가 필요하고, 공기 중의 수분 등과 반응을 통해 생성된 염화수소가 대기로 확산하여 사고의 영향범위가 매우 커지기 때문에 사전 예방대책이 반드시 수립되어야 한다. 이에, 본 연구에서는 화학사고 발생 빈도가 가장 높은 염산을 선정하였

고, 과거 화학사고 사례(<Figure 2> 참고)를 토대로 유출된 염산이 반응하여 염화수소가 발생된 최악의 사고 시나리오를 가정하기 위해 염화수소 운송차량의 위험도를 평가하기로 하였다. 이는, 액체 상태의 염산이 유출되는 것으로만 가정하는 경우 피해 영향범위 산정 프로그램에서 대기 확산을 평가하기 곤란한 것을 감안했고, 액체상의 염산이 운반차량에서 유출되는 소규모의 피해 범위를 염화수소가 확산되는 최악의 상황으로 확대 가정하여 운반차량의 유출사고 위험성 평가를 실시하는데 목적이 있기 때문이다.

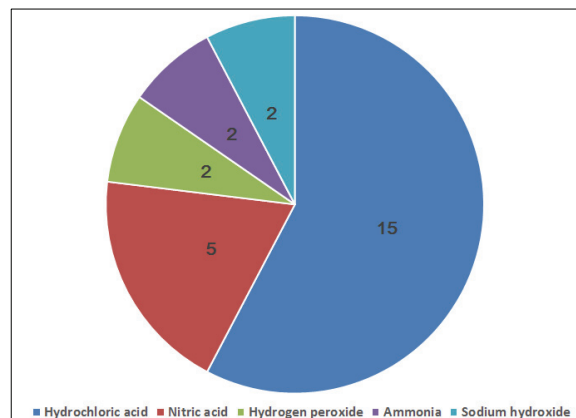


Figure 1. Top 5 chemicals of transport vehicle accidents for the last 3 years



Figure 2. Examples of transport vehicle accidents generating hydrogen chloride

(left : Gyeongsangbuk-do in 2016, right : Jeollanam-do in 2014)

2. 염화수소의 물리·화학적 특성

염화수소는 분자량 36.46, 비중 1.187(-85℃ 기준), 끓는점 약 -85℃, 녹는점 약 -115℃, 증기압 3,040 mmHg(17.8℃ 기준)를 갖는다(MSDS, 2016). NFPA (National Fire Protection Association)의 건강이 3, 반응 1로 분류되는 강산성 물질이다(ERG, 2014). 근로자가 1일 8시간 기준으로 작업중 노출될 경우 대부분의 사람에게 건강상 영향을 미치지 않는 농도 TLV-TWA (Threshold Limit Value-Time Weighted Average) 가 1 ppm으로 독성이 매우 강하다(ERG, 2014). 직업적이 아닌 일반 인구 집단에서 한번 노출될 경우 피해를 판단하는 AEGL(Acute Exposure Guideline Limit) 기준은 1~3단계로 분류되나, 주민대피에 주로 사용되는 60분 기준 AGEL-2는 22 ppm이다. 아울러, 1시간 노출 시까지 보호조치 불상의 증상을 유발하거나 회복 불가능 또는 건강상 영향이 나타나지 않는 공기 중 최대농도 ERPG-2(Emergency Response Planning Guideline) 기준은 20 ppm이다(KOSHA, 2012). 추가적으로 ERPG-1, ERPG-3에 대한 각각의 농도기준을 <Table 3>에 요약해서 나타내었다.

3. 염화수소 운송차량 시설 기준 현황

1) 화학물질관리법에 따른 운송차량 취급시설 기준
2015년 이전에 시행되었던 유해화학물질관리법에서는 운송차량의 구체적인 설계기준이 없었다(Ministry of Environment, 2013). 구미 불산사고 이후 지속적으로 발생하는 화학사고를 사전에 강화하기 위해 2015년부터 화학물질관리법이 시행되고 있으며, 운송차량의 설계기준도 대폭 강화되었다. 특히 수격 현상을 줄이고 운행 중 유동을 최소화하여 사고의 위험성을 줄이기 위해 운반차량의 내부 용량이 큰 경우 4,000 L 이내마다 칸막이를 설치하는 기준이 도입되었다(Shin, 2016). 이에 따라 염화수소 운송차량도 본 기준을 준수해야 하며, 탱크로리 용량이 12,000 L 운송차량의 경우 <Figure 4>와 같이 2개의 칸막이를 설치하여 3개의 격실을 설치하여야 한다. 이러한 기준을 만족하기 위해서는 물리적으로 구획된 칸막이 격실(441, 443, 445)마다 상부에 주입구(441a, 443a, 445a), 유량게이지, 압력감지기 등 안전설비를 설치해야 한다. 이러한 안전장치는 운송차량에서 발생하는 유출사고의 경우에 칸막이로 4,000 L를 물리적으로 구획했기 때문에 유출량을

Table 3. Criteria of ERPG division and ERPG values for hydrochloric acid

Division	Standard	Values (ppm)
ERPG-1	the maximum airborne concentration below which it is believed nearly all individuals could be exposed up to one hour without experiencing other than mild transient adverse health effects or perceiving a clearly defined objectionable odor	3
ERPG-2	the maximum airborne concentration below which it is believed nearly all individuals could be exposed up to one hour without experiencing or developing irreversible or other serious health effects that could impair their abilities to take protective action	20
ERPG-3	the maximum airborne concentration below which nearly all individuals could be exposed for up to 1 hour without experiencing or developing life-threatening health effects	150

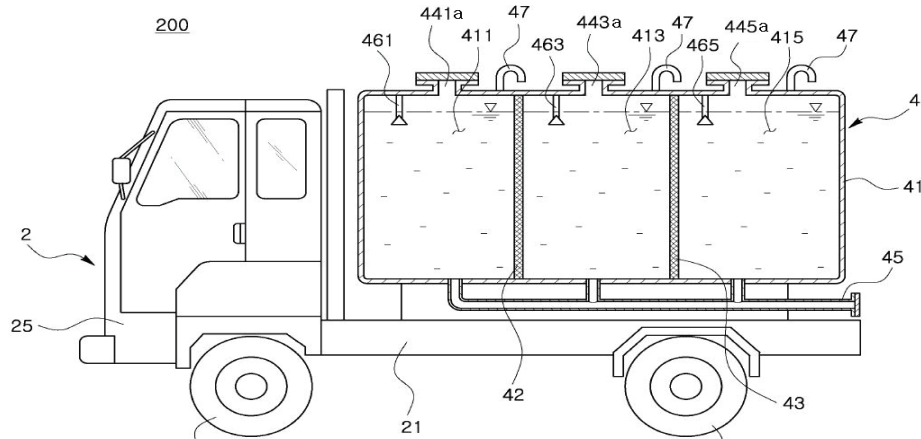


Figure 3. Schematic diagram of vehicles handling hazardous chemicals under Chemicals Control Act

※ Source: Control Method for Transporter(Shin, *et. al.*, 2015),

Improvement on Spill Risk of a Hazardous Chemical Transporting Vehicle(Shin, *et. al.*, 2016)

줄여주는 효과도 있다. 다만 운반차량의 상부에 주입구와 안전설비가 돌출된 상태로 운행하기 때문에 전복되는 대형사고의 경우에는 과거 화학사고 사례에서 보듯이 주입구가 지면과 충돌하면서 손상된 주입구를 통해 취급물질이 유출되는 위험성이 높아졌다(Shin, 2016). 이처럼 일정 용량마다 설치한 칸막이와 주입구, 안전설비 등이 순기능도 있지만, 전복사고의 경우에는 유출포인트가 되는 위험성이 내재하고 있어 대형사고 발생시 유출량을 완전히 줄여주는 예방 시스템으로 보기는 어렵다. 이러한 근거를 객관적으로 확인하기 위해 현재 화학물질관리법 운송차량을 기본 평가모델인 Case A로 분류하였다.

2) 위험성 개선 운송차량 취급시설 기준

운송차량의 사고는 사업장 내에서 발생하는 사고보다 대응이 어렵기 때문에 유출량을 근본적으로 줄여주는 것이 필수적이다(Seol, 2015). 운송차량에서 발생할 수 있는 가장 최악의 사고는 차량이 전복되는 사고로 전량이 유출되는 것을 들 수 있다. 이에, 본 연구에서는 현재 화학물질관리법에서 관리하고자 하는 칸막이 기능을 유지하되, 전복사고 시 지면과 주입구가 충돌할 수 있는 가능성을 줄이는 운송차량 칸막이 개선 시스템을 고안하는데 주력하였다. 이를 위해서 외부 유출이 없는 정상상태에서는 칸막이 하부를 열림(open) 상태

로 유지하여 임의의 칸막이 한 곳 상부에 주입구와 안전설비를 설치가 가능하도록 제안하였다. 칸막이 하부가 열림으로 되면서 칸막이 내부에 있는 화학물질이 칸막이를 이동하여 물리적으로 평형상태를 맞추기 때문에 화학물질의 양, 압력 등을 하나의 감지기로 감지할 수 있게 되고, 공용 주입구를 통해 화학물질 주입이 가능하다. 예를 들어, 본 연구에서 평가를 위해 선정한 중규모 운반차량인 12,000 L 용량의 염화수소 탱크로리의 경우 화학물질관리법에 따른 운송차량 칸막이를 4,000 L 이내마다 설치하는 것은 동일하나, 칸막이 하단을 열림과 닫힘으로 제어하는 시스템을 만들기 때문에 <Figure 5>와 같이 주입구와 안전설비는 공용으로 설치하게 된다. 구체적으로는 제어부에서 유해화학물질의 압력센서, 레벨게이지를 통해 정상 유출을 판단하여 유출이 없다고 판단되는 경우에는 칸막이 상부(717, 737)에 전기를 공급하여 자기력을 통해 칸막이 내부에 설치한 칸막이 바디(719, 739)를 들어 올려 칸막이 하부(531, 541)가 열림상태를 유지하게 된다. 반면 제어부가 주행 중에 압력센서, 레벨게이지 출력값이 비정상적으로 판단하는 경우 전기를 차단하여 자기력이 없어지게 되고, 칸막이 바디 상부 설치된 스프링에 의해 칸막이 바디가 내려가 칸막이 하부(531, 541)가 닫힘상태를 유지하게 된다. 아울러, 차량이 전복되어 전원 공급이 차단되는 경우에도 스프링의 복원력에 의해 칸막이 바

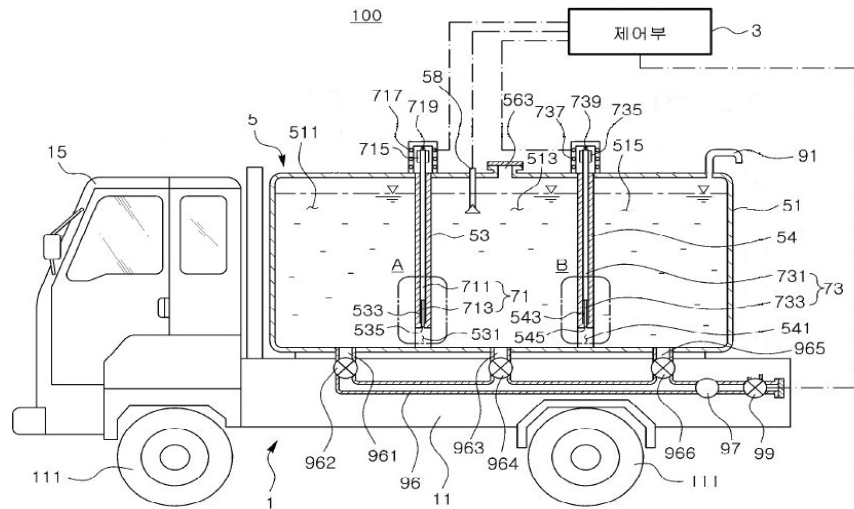


Figure 4. Schematic diagram of improved vehicles handling hazardous chemicals

※ Source: Control Method for Transporter(Shin, *et. al.*, 2015),
Improvement on Spill Risk of a Hazardous Chemical Transporting Vehicle(Shin, *et. al.*, 2016)

Table 4. Comparison of the transport vehicle’s specification for the two cases

Act \ Type	Tank volume (L)	Number of partition	Number of fuel inlet	Maximum of spill volume (L)
Case A	12,000	2	3	12,000
Case B	12,000	2	1	4,000

다가 내려가도록 설계되어 있다. 이러한 지능형 칸막이 작동 시스템은 기존의 단점을 보완하여 주입구를 공용으로 설치할 수 있어서 전복사고 시 유출될 수 있는 양을 한 개의 칸막이 용량으로 제한하여 대량 유출사고를 원천적으로 막아주는 효과가 있다.

현재 화학물질관리법 상 운송차량과 본 연구에서 제시한 위험성 개선 운송차량에 대해 전복사고로 인한 대량 유출사고 발생 시 ERPG 피해 영향범위를 비교 평가하기 위해 본 연구에서 제안한 운송차량을 Case B로 구분하였다. 전복사고 발생을 가정한 최악의 운송차량 사고에 대해 Case별로 운송차량 시설 현황 및 유출 최대용량을 <Table 4>에 요약해서 나타내었다.

4. 피해예측 프로그램 선정

화학사고 발생에 따른 유출, 화재·폭발 피해 영향범위를 예측하는 CFD 해석 프로그램은 화학업종 분야에서 상당히 많이 사용되고 있다. 국외의 경우 ALOHA, PHAST, DEGADIS 등이 있으며, 국내의 경우는 2015

년부터 시행되는 장외영향평가에 따라 사고 영향범위를 산정하는 보급형 KORA(Korea Off-site Risk Assessment), KCHAM 등이 있다. 본 연구에서는 국내·외적으로 널리 사용되고 있는 미국 환경보호청(EPA) 주관의 화학물질 확산 피해 평가를 프로그램인 ALOHA 모델을 선정하였다. ALOHA(Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 프로그램은 미국 NOAA와 EPA에서 공동 개발한 CAMEO(Computer-Aided Management of Emergency Operations) 내에서 대기확산을 설명하는 모델이며, 화학물질 관련 사고에 긴급대처하고 대응 계획을 세우는데 이용할 수 있도록 설계된 모델이다(EPA, 2013). ALOHA 모델은 EPA에서 사용자에게 무료로 보급하고 있으며, 사용자의 편의성 및 프로그램의 활용성 측면에서 널리 사용되고 있다. ALOHA의 주요 특성은 공기 보다 가벼운 누출가스의 확산과 무거운 가스의 확산, 도시 지역과 시골 지역에서의 확산, 실내 및 실외 유출 확산, 누출속도 및 시간에 따른 확산, 대기조건에 따른 영향범위 자동 모델 산

조치하는 것이 적절할 수 있다. 이러한 제도는 화학물 질관리법에 따라 새롭게 시행되는 위해관리계획이다. 다만 사업장의 위치가 정해진 곳이라면 사업장 주변 주민에게 위협성을 알리는 것이 가능하나, 운송차량의 경우 상시 이동하기 때문에 정해진 주민이 존재하지 않아 위해관리계획 제도가 효과적으로 적용되기는 곤란하다. 본 연구에서는 위험도 평가에 대한 민감성이 떨어진 장소를 임의적으로 선정하여 유출 사고에 대한 피해 확산평가를 종합적으로 수행하기 위해 민감성이 떨어진 화학물질안전원의 입지를 염화수소 운반차량의 사고장소 'A' 로 선정하였다. 'A' 사고장소는 대전광역시 유성구 대덕연구단지에 위치하고 있다. 주변에는 동측에 고등학교, 대학교가 있고, 서측에는 관공서, 은행, 연구소 등 공공시설이 밀집하였으나, 북쪽과 남쪽은 숲으로 우거진 비거주 지역이다. 'A' 사고장소의 입지조건을 <Figure 5>와 <Table 5>에 요약해서 나타내었다.

2. 측정기간 및 기상자료

본 연구의 영향범위 산정을 위해 사용되는 기상조건은 기상청 홈페이지에서 제공하는 2015년 1월부터 2015년 12월까지 대전 측정소의 지난 1년간 월별 평균 자료를 사용하였다(Shin, 2016). 월별 기상자료를 <Table 6>에 요약해서 나타내었다. 2015년 평균 기상 자료를 살펴보면 기온은 0 ~ 26.4℃, 바람의 세기는 1.2 ~ 1.9 m/s, 습도는 51 ~ 83%의 변화를 보였다. 다만, 대기 안정도는 평균치를 적용하여 중립인 D를 적용하였고, 구름은 50%를 적용하였다. 아울러, 풍향의

주방향은 북서풍이었으나, 영향평가 모델링의 일관적인 평가를 위해 풍향은 W(270 degree)를 적용하였다. 실제로 바람의 방향이 계절에 따라 바뀔 수 있으나, 바람 방향에 따라 피해 영향방향만 바뀔 뿐 입지적인 조건이 유사하기 때문에 풍향을 한 방향으로 가정하여 계절에 따른 피해 영향범위를 일관성 있게 비교하는 것이 효과적이기 때문이다.

3. 예비위험 분석 및 사고시나리오 도출

본 연구에서는 염화수소 운송차량이 전복되어 누출량이 최대량으로 누출되는 것을 가정하였다. 운송차량이 전복되는 경우 주입구가 지면과 충돌되면서 손상되어 주입구를 통해 칸막이 내부에 있는 염산이 전량으로 누출되는 최악의 누출 시나리오를 적용하였다. 아울러, 본 연구에서는 염산이 염화수소의 증기로 확산되는 것을 고려하여 화재·폭발의 위험성보다는 유·누출로 인한 독성을 위험요소로 보고, 각각의 ERPG에 도달하는 지점을 끝점으로 최대의 피해 영향범위를 산출하였다. 운송차량이 전복되어 주입구가 손상되어 대량 누출되는 것은 실제사고에서도 일어났었고(Shin, 2016), 앞에 화학사고 통계에서 살펴본 바와 같이 염화수소의 증기가 대량으로 발생하므로 이러한 가정은 현실적인 시나리오로 사료된다. Case A의 경우는 세 개의 격실에서 유출되어 전량 12,000 L이고, Case B의 경우는 한 개의 격실에서 유출되어 4,000 L가 된다. Case A와 Case B의 주입구 크기는 60 cm이고, 전복사고 발생 시 주입구가 전파되어 누출공 크기는 최악의 사고를 가정

Table 6. Average monthly weather data of 'A' location in 2015

Year-month	Temperature (°C)	Wind Speed (m/s)	Humidity (%)
2015-01	0.0	1.3	73
2015-02	1.9	1.7	66
2015-03	7.2	1.7	51
2015-04	13.3	1.9	68
2015-05	19.5	1.6	60
2015-06	23.4	1.5	68
2015-07	25.4	1.8	80
2015-08	26.4	1.5	76
2015-09	21.7	1.6	69
2015-10	15.5	1.4	71
2015-11	10.1	1.3	83
2015-12	3.1	1.2	75

Table 7. Comparison of the ALOHA input variables for the two cases

Case \ Type	Tank volume (L)	Maximum of spill amount (L)	Hole Size (cm)
Case A	12,000	12,000	103.9
Case B	12,000	4,000	60

하여 주입구 크기와 동일한 크기로 가정하였다. 다만 Case B의 누출공의 경우 동일 시간에 세 개의 격실에서 유출이 발생하므로 ALOHA에 입력되는 누출공의 크기는 질량수지(Mass balance) 식을 활용하여 Case B 누출공의 $\sqrt{3}$ 배(103.9 cm)를 계산식으로 산출하여 적용하였다. 아울러 운송차량 내 압력은 2 atm으로 가정하였고, 도로의 특성을 고려하여 시골지역으로 선정하여 유출 확산을 계산하였다. 운송차량의 용기 형태는 수평형 원통 실린더 형태로 지름 1.8 m, 길이 4.7 m로 가정하였다. 지금까지 설명한 Case별 형상을 <Table 7>에 요약해서 나타내었다.

IV. 연구결과 및 고찰

먼저, 화학물질관리법에 따른 운반차량 설계기준인 Case A의 계절별 ERPG-1(3 ppm), ERPG-2(20 ppm), ERPG-3(150 ppm) 농도의 끝점이 사고지점(운송차량)에서 떨어진 거리, 즉 피해 영향범위를 산출하였다. Case A의 경우 1월에서 12월까지 ERPG-1의 피해 영향범위는 1,500 ~ 1,600 m, ERPG-2는 760 ~ 777 m, ERPG-3의 피해 영향범위는 306 ~ 334 m로 나타난 것으로 조사되었다. 특히, 비상대응계획 수립에 사용되는 60분 독성 노출기준 ERPG-2 농도의 피해 영향범위는 최대 777 m로 사고지점 주변에 위치한 은행, 고등학교, 대학교 건물까지 미치는 것으로 나타났고, 피해 대상은 근로자 및 고객, 학생이 된다. 따라서 염화수소 탱크 크로리가 유출되는 사고가 발생하는 경우 ERPG-2 범위에 있는 주변 사람에게 신속히 공지하여 피부노출이 최소화되도록 하고, 호흡기를 젖은 손수건 등으로 막게 해서 신속히 외부로 대피시키도록 조치해야 한다. 다음으로, 본 연구에서 제안한 운반차량의 칸막이 및 주입구 개선 시스템인 Case B의 경우 1월에서 12월까지

ERPG-1의 피해 영향범위는 1,000 ~ 1,100 m, ERPG-2는 485 ~ 510 m, ERPG-3의 피해 영향범위는 177 ~ 207 m까지 나타난 것으로 조사되었다. Case B의 관심농도 ERPG-2의 경우 사고지점에서 최대 510 m까지 떨어진 곳까지 나타났고, 피해 영향범위는 고등학교, 대학교 건물까지 포함한 것으로 나타났다. Case B의 ERPG-2 피해범위가 최대 510 m로 Case A의 최대 770 m에 비해 약 33.8%가 줄어들어 개선 운송차량 시스템이 위험도를 감소시키는데 상당한 효과가 있었다. 다만 실제 운송차량 화학사고는 국도 또는 고속도로 장소에서 발생하고 주변 지역에 사람이 어느 정도 떨어진 곳에 있으나, 본 연구에서는 사고장소를 대전에 위치한 화학물질안전원 위치 'A'를 선정하였기 때문에 멀리 떨어져 있지 않은 인근 주변에 근로자, 학생 등이 있어 Case B가 피해영향 범위를 줄이는데 효과가 있었지만, 두 Case 모두 피해가 인근에 영향을 주게 되었다. 이러한 피해 영향범위 산출 결과를 사고장소 'A'에 적용할 경우, 전복사고로 인해 주입구가 파손되어 대량으로 유출이 발생하는 사고를 가정한 시나리오에서 각 ERPG 농도가 주변의 학생, 근로자 등에게 피해를 주는 것으로 나타나 두 Case에서 사고의 영향범위를 줄이기 위한 추가적인 기술적·관리적 안전대책이 필요한 것으로 판단된다. 한편 두 Case 모두에서 대기온도, 풍속에 따른 계절적 요인에 따른 확산 영향범위는 크게 차이가 없는 것으로 조사되었다. 지금까지 살펴본 Case에 따른 계절별 피해 영향범위 비교를 <Table 8> 및 <Figure 6>에 나타내었다. 아울러 <Figure 7>에 ALOHA 수치 모델링 결과를 계절별로 비교해서 나타냈다.

Case A와 Case B의 ERPG 평균 확산범위를 살펴보면, 다음과 같다. Case A의 평균 확산범위는 ERPG-1이 1,567 m, ERPG-2가 768 m, ERPG-3이 325 m로 나타났다. 반면, Case B의 평균 확산범위는 ERPG-1이

1,042 m, ERPG-2가 502 m, ERPG-3이 194 m로 나타났다. 이는, 현재 설계기준 Case A의 평균 확산범위에 비해 본 연구에서 제안한 Case B의 평균 확산범위가 약 33.5~40.3 % 줄어드는 것을 알 수 있다. 이로 인해 탱크로리 전복사고로 인한 피해 영향범위가 줄어들어

‘A’ 사업장의 잠재적인 위험도(Risk)가 현저히 감소하게 된다. 만약, ‘A’ 사고지점에서 500 ~ 700 m 사이에 주민, 근로자 등이 밀집된 경우라면 본 연구에서 제안한 운반차량 설계기준에 따른 영향범위 감소로 위험도가 줄어들어 큰 역할을 할 것으로 판단된다.

Table 8. Comparison of monthly ERPG dispersion between the two cases

(unit : cases)

Year-month	ERPG-1(3 ppm)		ERPG-2(20 ppm)		ERPG-3(150 ppm)	
	Case A	Case B	Case A	Case B	Case A	Case B
2015-01	1,500	1,000	760	504	328	203
2015-02	1,500	1,000	760	494	317	185
2015-03	1,600	1,000	762	495	317	186
2015-04	1,600	1,000	762	485	306	177
2015-05	1,600	1,100	772	507	326	195
2015-06	1,600	1,100	777	506	334	194
2015-07	1,600	1,100	776	502	321	187
2015-08	1,600	1,100	777	510	334	198
2015-09	1,600	1,100	777	508	331	195
2015-10	1,600	1,000	769	505	334	198
2015-11	1,500	1,000	768	506	329	203
2015-12	1,500	1,000	761	502	324	207

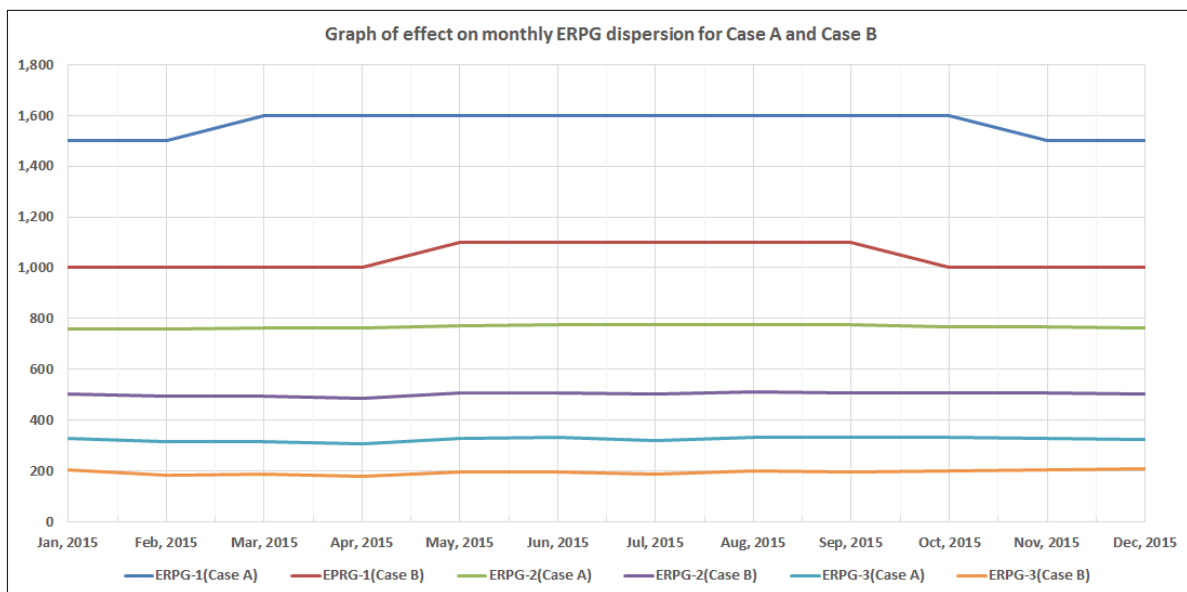
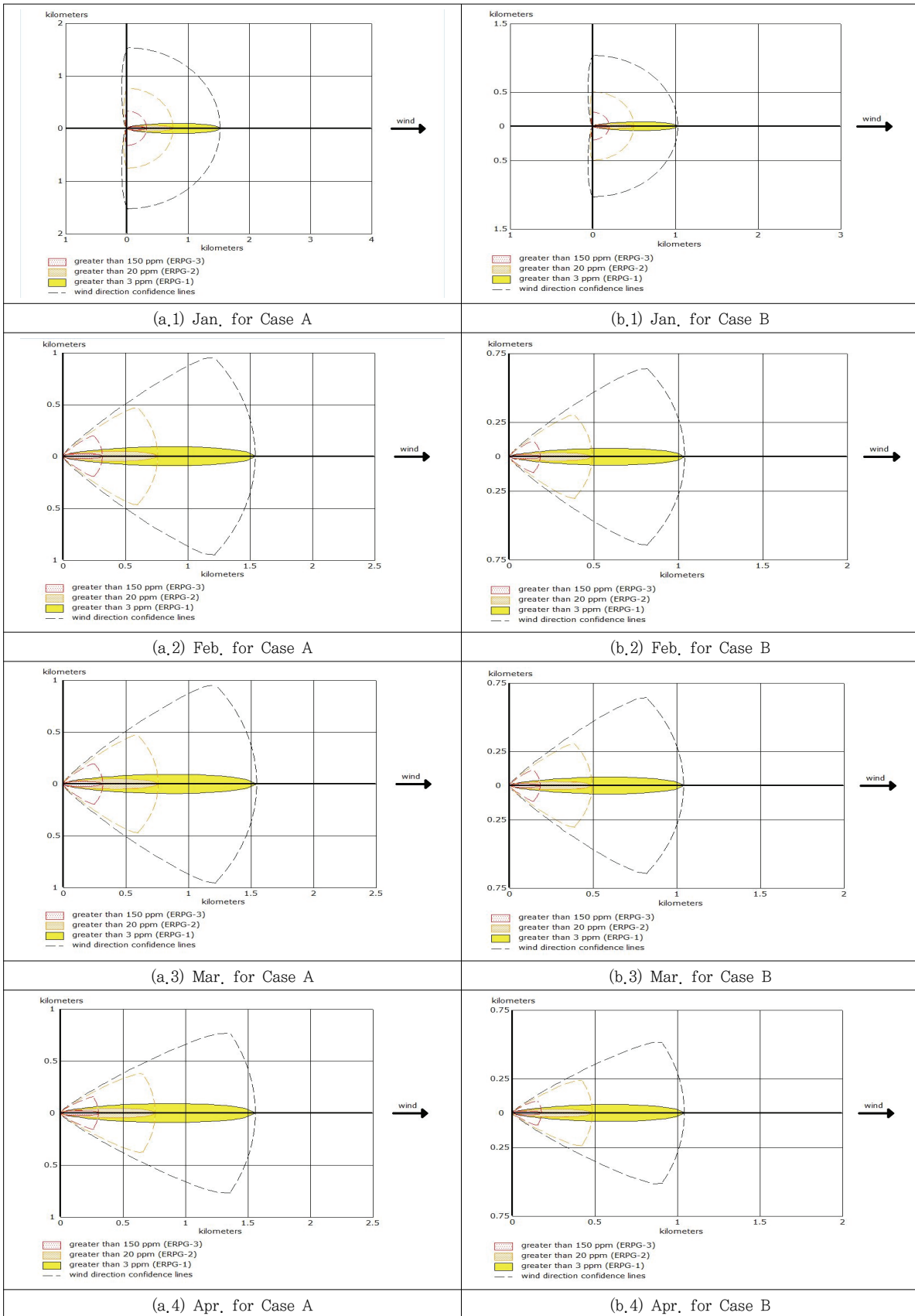
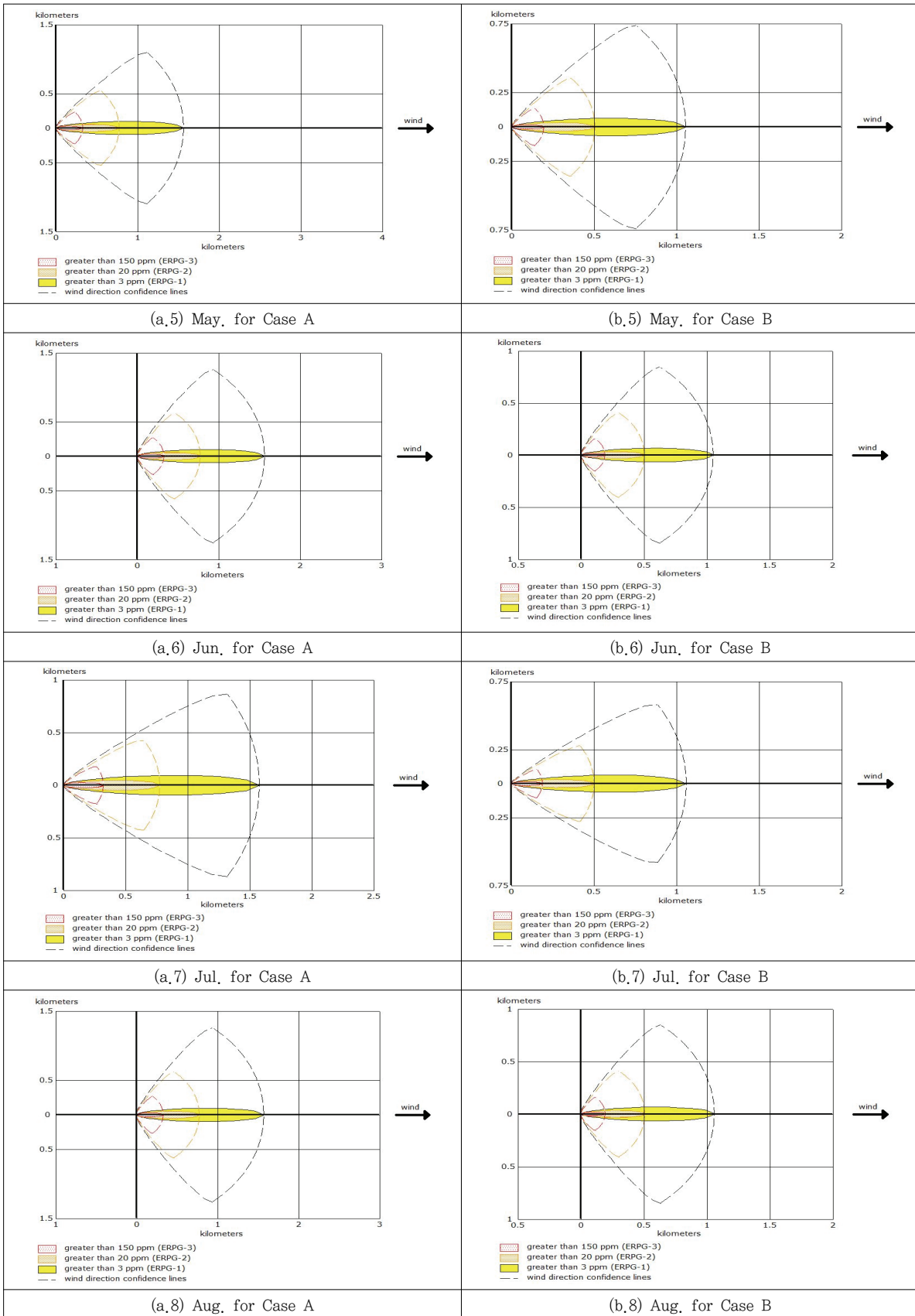


Figure 6. Graph of effect on monthly EPRG dispersion for Case A and Case B





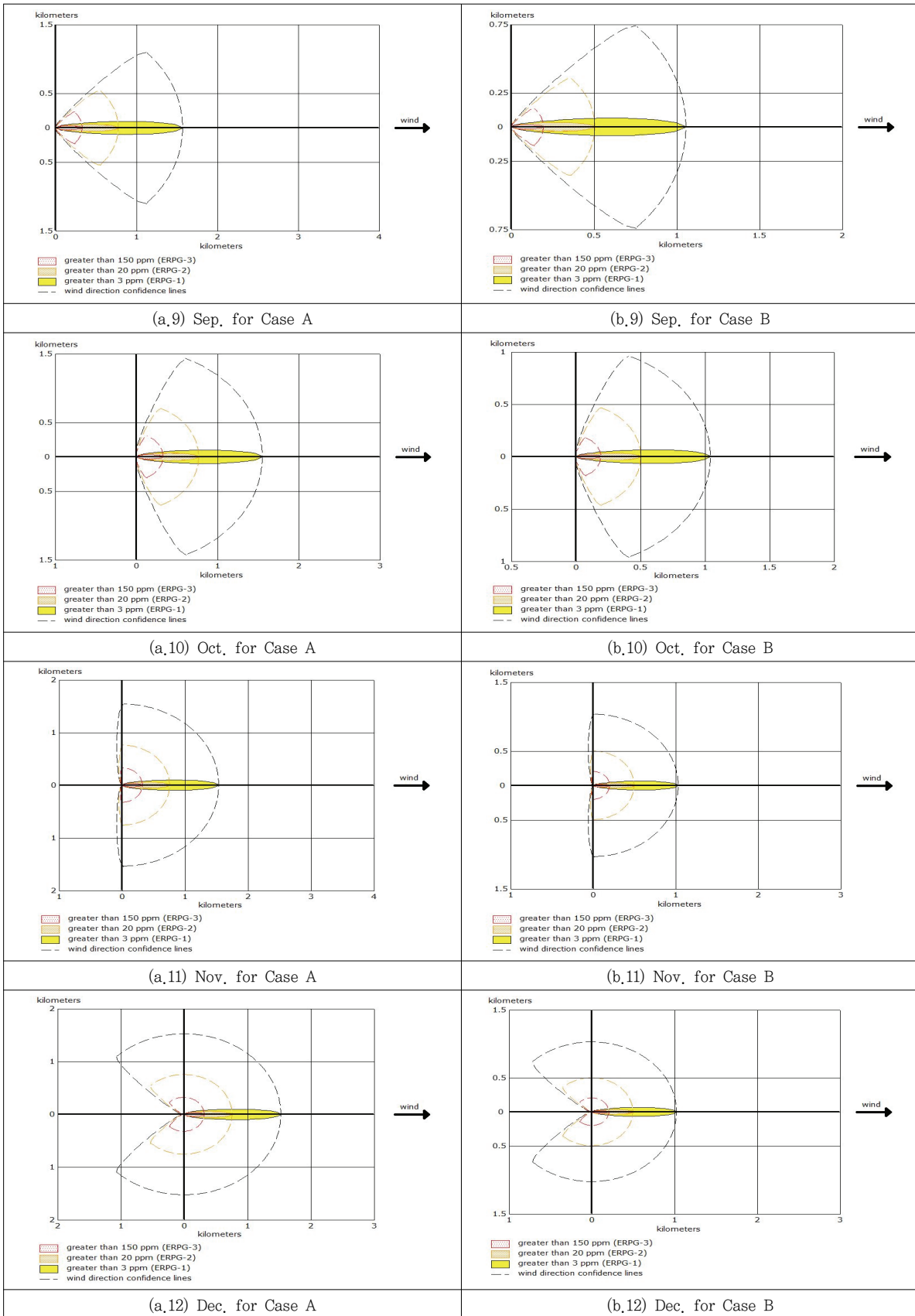


Figure 7. Diagram of monthly ERPG dispersion results for Case A and Case B.

IV. 결론

본 연구는 최근 3년간 운송차량 화학사고 통계를 조사하여 가장 많이 발생한 염화수소 운송사고에 대해 칸막이 및 주입구 설계기준에 따라 2개의 Case로 구분하여 염화수소의 누출사고를 ALOHA를 통해 전복사고로 인해 대량 누출되는 최악의 사고에서 ERPG-1, ERPG-2, ERPG-3 피해 영향범위를 비교하였다. 과거 화학사고 사례를 토대로 전복사고와 같은 최악의 사고 시나리오를 가정하여 운송차량이 전복사고로 인해 지면과 주입구가 충돌하여 주입구가 손상되고, 칸막이 내부에 보관 중인 염화수소가 누출되는 사고를 적용하였다. 이 경우, 현재 화학물질관리법에 따라 4,000 L 마다 칸막이 및 주입구를 설치한 운송차량을 Case A, 본 연구에서 제시한 칸막이 제어 주입구 공용 운송차량을 Case B로 분류하였다.

1. Case A의 경우 주입구 3곳이 지면과 충돌하여 3곳 모두 손상을 입어 각 칸막이에서 보관 중인 염화수소가 손상된 주입구를 통해 최대 12,000 L가 누출될 수 있다. 운송차량에서 염화수소가 대기로 누출되는 경우 계절별로 각 ERPG 피해 영향범위를 산출한 결과, Case A의 ERPG-1 피해 영향범위는 1,500 ~ 1,600 m, ERPG-2의 피해 영향범위는 760 ~ 777 m, ERPG-3의 피해 영향범위는 306 ~ 334 m로 산정되었다.

2. Case B의 경우 주입구 1곳이 지면과 충돌하여 1곳이 손상을 입게 되며, 제어시스템이 누출로 진단하는 경우 칸막이 하단을 차단하여 최대 4,000 L가 누출될 수 있다. 운송차량에서 염화수소가 대기로 누출되는 경우 계절별로 각 ERPG 피해 영향범위를 산출한 결과, ERPG-1 피해 영향범위는 1,000 ~ 1,100 m, ERPG-2의 피해 영향범위는 485 ~ 510 m, ERPG-3의 피해 영향범위는 177 ~ 207 m로 예측되었다.

3. Case A의 평균 피해 영향범위는 ERPG-1이 1,567 m, ERPG-2가 768 m, ERPG-3이 325 m가 되며, Case B의 평균 영향범위는 ERPG-1이 1,042 m, ERPG-2가 502 m, ERPG-3이 194 m가 산출되었다.

전체적으로 Case A의 영향범위에 비해 Case B의 피해 영향범위가 약 33.5 ~ 40 % 줄어들어, 향후 Case B를 운반차량 설계기준에 적용하는 경우 전복사고로 인한 위험도를 현저히 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

4. 각 Case별로 같은 ERPG 피해 영향범위가 계절에 따라 변화되는 수준을 확인한 결과, 피해 영향범위의 변화율이 최대 10%를 넘지 않은 것으로 나타나 상대적으로 계절적 요인은 주요인자가 아닌 것으로 볼 수 있다. 대기온도, 풍향 등 기상조건에 따라 ERPG 피해 영향범위는 어느 정도 차이가 나지만, 본 연구에서 살펴본 바와 같이 누출량이 피해 영향범위를 결정하는 주요인자(dominant factor)가 되는 것을 알 수 있다. 이로써, 운송차량의 위험도를 줄이는 것은 근본적으로 누출량을 줄이는 것이 가장 중요하며, 본 개선 시스템이 향후 운송차량의 운반 용기 설계기준에 기술적 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

5. 본 연구는 12,000 L 용량의 운송차량에 대한 전복사고 발생 시 대량 누출에 대한 위험성 평가로 취급량이 더 많은 고 용량 탱크로리 20,000 L 또는 25,000 L의 용량을 고려하는 경우에는 누출량의 차이가 더 커져 상대적으로 위험성이 더욱 감소될 것으로 사료된다. 이러한 위험성 평가 결과를 근거로 향후 화학물질관리법 취급시설 기준에 칸막이 작동 개선 운송차량 설계 시스템이 적용되는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 다만 본 연구는 위험성 평가를 수치모델링을 통해 실시한 것으로 실제 실험을 통해 검증되는 것이 더욱 가치가 높아질 것으로 판단되나, 유해화학물질의 특성상 대량 유출에 대한 실험을 하는 것은 매우 위험할 수 있다. 실험장치의 여건이나 유해화학물질의 위험성을 고려하여 본 연구와 같은 피해 영향범위 수치해석을 통한 위험성 평가가 현재는 최선의 결과로 판단된다. 하지만, 앞으로 국내에서도 미국과 같은 선진국처럼 야외에서 직접 유해화학물질을 유출시켜 피해 영향범위를 실험으로 직접 실시하는 것을 병행하는 것이 필요하다.

References

- Chemical Safety Board. 2016. *Chemical Safety Board Investigation Report*.
- ERG. 2014. *The Emergency Response Guideline*. Ministry of Environment. Korea Occupational Safety & Health Agency (KOSHA) Guide(P-102-2012). 2012. Consequence Analysis of Chemical Release. Korea Occupational Safety & Health Agency.
- Kim, Seong Beom, Chung Hwa Park, Mooun Sik Cho, Jin Seon Lee, Jeong Min Kim, Hye Ran Noh, and Gwang Seol Seok. 2012. A Study on Improving Management of Substances Requiring Preparation for Accidents Facilities. *Korean Society of Safety*. 27(3): 77-82.
- Ministry of Employment and Labor. 2015. *The Industrial Safety and Health Act*. Ministry of Employment and Labor.
- Ministry of Environment. 2013. *The Toxic Chemicals Control Act*. Ministry of Environment.
- Ministry of Environment. 2014. *Environmental White Paper*. Ministry of Environment.
- Ministry of Environment. 2015. *The Chemicals Control Act*. Ministry of Environment.
- Ministry of Public Safety and Security. 2015. *The Dangerous Substances Safety Control Act*. Ministry of Public Safety and Security.
- National Institute of Chemical Safety(NICS) Guideline. 2014. *Guidelines for Selecting Scenario of Chemical Accidents*. 2014(1).
- National Institute of Chemical Safety(NICS) Guideline. 2015. *Guidelines for Evaluating End Point of Chemical Accidents*. 2015(1).
- National Institute of Chemical Safety(NICS). 2015. *Impermeable Standards for the Concrete Bottom of Dikes for Crude Oil Storage Tanks*. National Institute of Chemical Safety.
- National Institute of Chemical Safety(NICS). 2016. *Chemical Safety Clearing-house*. National Institute of Chemical Safety (NICS).
- Park, Yeong Gyun and Tae O Kim. 2015. Evaluation of Ammonia Gas Release in the Solar Cell Manufacturing Process Using the ALOHA Model. *J. Odor Indoor Environment*. 14(2): 136-149.
- Seol, Ji Woo, Jong Won Yong, Chung Keun Chae, Ho Tae Chan, and Jae Wook Ko. A Study on Accident Response Guidelines for Hazardous Materials(HAZMAT) Transport Vehicle. *Journal of the Korean Institute of Gas*. 19(5): 87-97.
- Shin, Chang Hyun and Jai Hak Park. 2016. An Evaluation of the Off-site Risk of Spill from a Storage Tank of Nitric Acid. *Crisisonomy*. 12(3): 187-200.
- Shin, Chang Hyun and Jai Hak Park. 2016. Impermeable Standards for the Concrete Bottom of Dikes for Crude Oil Storage Tanks. *Journal of the Korean Society of Safety*. 31(1): 54-60.
- Shin, Chang Hyun and Jai Hak Park. 2016. Improvement in the Risk Reduction of Dikes of Storage Tanks Handling Hazardous Chemicals. *Crisisonomy*. 12(1): 83-93.
- Shin, Chang Hyun and Jai Hak Park. 2016. Improvement on Handling System of Spilled Chemical from Hazardous Chemical Storage Tanks. *Crisisonomy*. 12(7): 25-35.
- Shin, Chang Hyun and Jai Hak Park. 2016. Improvement on Spill Risk of a Hazardous Chemical Transporting Vehicle. *Crisisonomy*. 12(8): 33-45.
- Shin, Chang Hyun and Jai Hak Park. 2016. Improvement on the Risk of Spill from a Storage Tank of Nitric Acid. *Crisisonomy*. 12(5): 119-132.
- Shin, Chang Hyun, Chung Soo Lee, Jae Eun Kang, Beyong Chol Ma, Yi Yoon, Jun Hyeon Yoon, and Jai Hak Park. 2015. Review on the Inspection System of Facilities Handling Hazardous Chemicals Under the Chemicals Control Act. *Crisisonomy*. 11(7): 19-33.
- Shin, Chang Hyun, Chung Soo Lee, Jae Eun Kang, Beyong Chol Ma, Yi Yoon, Jun Hyeon Yoon, and Jai Hak Park. 2015. Review on the Safety Management System of Facilities Handling Hazardous Chemicals under the Chemicals Control Act. *Crisisonomy*. 11(6): 245-262.
- Shin, Chang Hyun, Kyun Kim, Jun Heon Yoon, Byung Chol Ma, Byung Tae Yoo, Joong Don Park, Sang Jae Lee, and Hyun Seung Lee. 2015. *Control Method for Transporter*. Patent, 10-2015-0178289(application).

Korean References Translated from the English

- 김성범, 박춘화, 조문식, 이진선, 김정민, 노혜란, 석광설. 2012. 사고대비물질 취급시설 관리방안 연구. 한국안전학회지. 27(3): 77-82.
- 미국 화학사고조사위원회. 2016. 화학사고조사위원회 화학사고 조사 보고서.
- 박영균, 김태오. 2015. ALOHA 모델을 이용한 태양전지 제조공정의 암모니아 가스 누출 평가. 한국냄새학회. 14(22): 136-149.
- 설지우, 용종원, 채충근, 태찬호, 고재욱. 2015. 유해화학물질 수송용 차량의 사고 대응 가이드라인에 관한 연구. 한국가스학회지. 19(5): 87-97.
- 신창현, 박재학, 윤준현. 2016. 원유저장탱크 방류벽의 콘크리트 바닥재 불침투성 세부기준 연구. 한국안전학회. 31(1): 54-60.
- 신창현, 박재학. 2016. 유해화학물질 운송차량 누출사고 위험성 개선. Crisisonomy. 12(8): 33-45.
- 신창현, 박재학. 2016. 유해화학물질 저장탱크 방류벽의 위험성 저감 방안. Crisisonomy. 12(1): 83-93.
- 신창현, 박재학. 2016. 유해화학물질 저장탱크 유출물질 처리 시스템 개선. Crisisonomy. 12(7): 25-35.
- 신창현, 박재학. 2016. 질산 저장탱크 유출사고의 위험도 개선. Crisisonomy. 12(5): 119-132.
- 신창현, 박재학. 2016. 질산 저장탱크의 유출사고에 대한 장외 위험성 평가. Crisisonomy. 12(3): 187-200.
- 신창현, 이청수, 강재은, 마병철, 윤이, 윤준현, 박재학. 2015. 화학물질관리법의 유해화학물질 취급시설 검사제도 고찰. 한국위기관리논집. 11(6): 245-262.
- 신창현, 이청수, 강재은, 마병철, 윤이, 윤준현, 박재학. 2015. 화학물질관리법의 유해화학물질 취급시설 안전관리 체계 고찰. 한국위기관리논집. 11(7): 19-33.
- 화학물질안전원. 2016. 화학안전정보 공유시스템(www.csc.me.go.kr). 화학물질안전원.
- 환경부. 2014. 유해화학물질관리법. 환경부.
- 환경부. 2015. 화학물질관리법. 환경부.

Received: Aug. 12, 2016 / Revised: Sep. 19, 2016 / Accepted: Sep. 26, 2016

염화수소 운송차량 유출사고의 위험성 개선

국문초록 최근 3년간 화학사고 통계조사에 따르면 운반차량의 화학사고는 72건이었고, 이 중 염산이 14건으로 가장 많았다. 운반차량의 화학사고는 대부분이 소량으로 누출된 사고였으나, 차량이 전복되어 대량으로 누출되면서 피해가 크게 난 사고도 있었다. 염산이 유출되면서 사고대응을 위해 사용되는 소방용수, 빗물 등과 반응하는 경우 염화수소와 같은 독성가스가 발생하여 대기로 확산되고 피해가 커지게 된다. 운반차량은 비교적 사고대응이 어려워 전복사고와 같은 최악의 사고를 고려해서 유출량을 근본적으로 줄여주는 예방대책이 매우 중요하다. 이에, 본 연구에서는 ALOHA를 이용하여 전복사고 발생의 경우 현재 화학물질관리법에 따른 운반차량과 위험성을 개선한 공용 주입구 운반차량의 ERPG 피해 영향범위를 비교하였다. 평가 결과, 개선 시스템의 ERPG 피해 영향범위가 평균 약 33.3 ~ 40%가 줄어든 것으로 확인되었다.

주제어 : 화학물질관리법, 운송차량, 염화수소, 칸막이, 전복

Profiles **Chang Hyun Shin** : He is a first author. After a master degree of mechanical engineering in Korea University, working at the National Institute of Chemical Safety. The major paper are “Impermeable Standards for the Concrete Bottom of Dikes for Crude Oil Storage Tanks(2016)” and so on. The interested areas are safety engineering, handling facility standards, machine safety(yjoy122@korea.kr).

Byung Chol Ma : He is a corresponding author. After a doctor degree of chemical engineering in Chonnam National University, working at the National Institute of Chemical Safety. The major paper are “A Study on the Simplified Estimating Method of Off-site Consequence Analysis for Aqueous Ammonia(2016)” and so on. The interested areas are chemical safety engineering, RMP(Risk Management Plan) system(anjeon@korea.kr).

Jai Hak Park : After a bachelor’s degree in Seoul National University and a master’s and doctor’s degree in KAIST, majored in mechanical engineering, being a professor of safety engineering in Chungbuk National University. The major paper are “Estimation of Leak Rate through Circumferential Cracks in Pipes in Nuclear Power Plants(2015)” and so on. The interested areas are mechanical safety, fracture mechanics, structural safety and so on(jhpark@chungbuk.ac.kr).