



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士學位論文

Consequence Analysis를 이용한
화학사고 초기대응에 관한 연구



鄭炳昆

工學碩士學位論文

Consequence Analysis를 이용한
화학사고 초기대응에 관한 연구



指導教授 이 창 준

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2014年 11月

釜慶大學校産業大學院

安全工學科

鄭炳昆

鄭炳昆의 工學碩士 學位論文을
認准함



主 審 工學博士 이 의 주 (인)

委 員 工學博士 오 창 보 (인)

委 員 工學博士 이 창 준 (인)

목 차

제 1 장 연구개요	01
1.1 연구의 배경 및 목적	01
1.2 연구내용 및 방법	05
제 2 장 연구내용	09
2.1 Consequence Analysis	09
2.2 최악의 누출시나리오 선정에 관한 기술지침	16
2.3 CA(Consequence Analysis) 소프트웨어	18
2.4 ERPG(Emergency Response Planning Guideline)	28
제 3 장 구미 불산 누출사고 사례연구	30
3.1 사고개요 및 정보수집	30
3.2 CASE별 시뮬레이션 결과	40
3.3 사고발생시 CA활용 PROCESS	56
제 4 장 결론 및 고찰	58
참고문헌	61

Table List

Table 1 Recent major accident case	04
Table 2 Discharge modeling	13
Table 3 Diffusion modeling	15
Table 4 Comparison of CA Software	20
Table 5 Hazard categories modeled in ALOHA	22
Table 6 Necessary information for running ALOHA	27
Table 7 Summary of Kumi accident	31
Table 8 Weather data	39
Table 9 Case of scenario	41
Table 10 Case 1 input data	42
Table 11 Case 2 input data	47
Table 12 Case 3 input data	52

Figure List

Fig. 1 Hazard evaluation procedure for quantitative risk assessment	11
Fig. 2 Flow of Consequence Analysis	13
Fig. 3 Source selection chart	25
Fig. 4.1 Kumi accident infographics	33
Fig. 4.2 Kumi accident infographics	34
Fig. 5 Hydro Fluoric MSDS	37
Fig. 6 Case 1 diffusion range	44
Fig. 7 Case 1 diffusion time	45
Fig. 8 Case 2 diffusion range	49
Fig. 9 Case 2 diffusion time	50
Fig. 10 Case 3 diffusion range(Footprint)	54
Fig. 11 Case 3 diffusion range(Side View)	54
Fig. 12 CA Process in initial response	57

Study of chemical accident initial response based on Consequence Analysis.

Byung Gon Jung

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

Abstract

While a semiconductor, fine chemical, a new material industry come into the limelight in a high value-added industry, it requires massive and various dangerous substances for the production of such products. However, using of these types of harmful materials have recently connected to huge chemical substance leakage accidents such as Kumi hydrofluoric acid accident, Namyangju ammonia accident and so on. All recent events taken together, chemical substance leakage accidents clearly result in secondary damage to local residents such as toxic gas exposure, but there being no systems at all to cope with the accidents effectively is more serious issue. It vividly shows that the establishment of measures to minimize the secondary damages is as important as prevention of the accidents by managing

unstable status and action.

In this document, it uses CA(Consequence Analysis) of one in QRA(Quantitative Risk Analysis) techniques to minimize damage from the chemical substances leakage accidents in early period of accidents. Also it studies on propriety analysis of guidance which simulated results could be effective for helping evacuation of residents and wearing protective equipment. This study method has simulated the Gumi accident, assorting the level of information by identifiable items at the early stage of the accident. In case of unidentifiable information as in early stage of the accidents, the range of leakage area was simulated based on worst case mentioned in KOSHA GUIDE. In this document, it suggests essential information needed at the early period of accident and the model of CA performance stage at accident outbreak. To raise software applicability, these results are based on the simulated results, the documents which are studied on Kumi hydrofluoric acid accident and released news, in comparison of real leakage range.

**Key Words : Consequence Analysis, Quantitative Risk Analysis,
initial response, ALOHA, PHAST**

제 1 장 연 구 개 요

1.1 연구의 배경 및 목적

과거 일반 중화학 산업에서 반도체, 정밀화학, 신소재 산업이 고부가가치 산업으로 각광받으면서 제품의 생산을 위하여 고온, 고압의 조건이나 유해·유독한 물질의 사용이 불가피해졌다. 중대산업사고는 산업 활동을 하는 과정에서 비정상상태의 결과로 위험물의 누출, 화재, 폭발 등이 발생하여 즉각적이거나 또는 장기적으로 근로자는 물론 주민의 피해를 유발하거나 인근지역의 환경에 중대한 영향을 주는 사고로 정의되고 있다.⁷⁾

중대산업사고의 주요 발생형태는 화재, 폭발 및 독성물질의 누출로서, 이들 산업사고는 일반 산업재해와는 달리 사고 발생의 빈도(frequency)는 낮으나 사고의 결과(consequence)는 막대한 영향을 끼치고 있다.

최근 발생한 구미 불산 누출사고를 보면 중대산업사고가 지역사회에 미치는 영향을 여실히 보여주고 있다. 구미의 작은 공장에서 발생한 사고는 사고발생 공장뿐만 아니라 인근지역 주민 및 근로자, 방재작업에 투입된 인력, 주변 농축산물, 환경 등에 천문학적인 피해를 입혔다. 이 사고로 인하여 인류가 오늘날의 문명 혜택을 누리는데 크게 기여해온 화학물질은 아쉽게

도 일반 대중의 호감도 면에서는 매우 부정적인 반응을 얻게 되었다. 구미 불산 누출사고 이후 Table 1에서와 같이 연이은 중대산업사고(화학물질 누출)로 과거에는 크게 이슈가 되지 않았던 화학물질 누출에 대한 전국민적인 관심이 고조되고 있고, 이는 중대산업사고 및 사고로 인한 인근지역사회의 피해를 예방하기 위하여 적극적인 노력을 해야 하는 충분한 이유를 제시하고 있다.

사고의 예방을 위하여 불안정한 상태, 행동의 관리 및 체계적인 안전관리 시스템 구축을 통한 사고예방활동도 중요하지만 발생한 사고의 피해를 최소화하는 피해 최소화 대책의 수립도 중요하다. 특히 여러 가지 피해 최소화 대책 중 위험성평가를 통한 2차 사고예방에 관한 수준은 외국에 비하여 상당 부분 뒤쳐져 있다.

PSM 제도의 도입 및 관련법규의 강화로 인하여 많은 기업에서 사고예방을 위한 다양한 위험성평가를 실시하고 있다. 하지만 대부분의 기업에서는 JSA, HAZOP 등 정성적인 평가를 위주로 시행하고 있고 정량적인 평가는 시간과 비용이 많이 들고 평가가 가능한 전문 인력의 보유에 한계가 있어 일부기업에서만 실시 중에 있다. 일부 기업에서 사용 중인 ALOHA, PHAST 등의 소프트웨어의 활용도 사고 발생 시 활용 보다는 사전 위험성 평가를 통하여 피해범위를 시뮬레이션하고 그 결과를 비상대응 시나리오 작성, 사고예방을 위한 설비보완 등에 활용되고 있는 실정이다. 사고발생

전에 시뮬레이션 결과를 통한 시나리오를 확보하고 훈련을 실시하고 있지만 최악의 시나리오 등 몇 가지 CASE만 확보하고 있는 실정이라 사고 발생 시 이전 평가결과를 실제 비상대응에 활용하기는 어려운 여건이다.

본 연구에서는 화학물질 누출사고의 여러 가지 피해 최소화 대책중에 사고 발생 초기 파악 가능한 정보를 바탕으로 정량적 위험성평가 기법중 하나인 CA(Consequence Analysis)를 수행하고 시뮬레이션된 결과가 주민 대피 및 방재인력의 보호구 착용 범위 선정의 가이드로의 활용 적정성 및 적용성에 대하여 연구를 수행할 것이다.

본 연구를 통하여 중대산업사고 발생시 CA(Consequence Analysis)를 활용하여 화학물질의 누출범위를 시뮬레이션 하는 초기 대응체계가 보완되어 인근 지역 주민 및 방재인력의 2차 피해가 최소화 되었으면 한다.

Table 1 Recent major accident case

일시	사고내용	피해현황
'12. 9月	구미 휴브글로벌 불산 누출사고	사망 5명, 부상 18명
'13. 1月	화성 삼성전자 불산 누출사고	사망 1명, 부상 4명
'13. 3月	구미케미칼 염소 누출사고	부상 1명, 주민대피
'13. 4月	울산 삼성정밀화학 염소 누출사고	부상 6명
'14. 2月	남양주 빙그레 암모니아 폭발 누출사고	사망 1명, 부상 3명
'14. 4月	울산 에스오일 원유 누출사고	-

1.2 연구의 내용과 방법

본 연구에서는 CA(Consequence Analysis) 소프트웨어인 ALOHA를 활용하여 사고발생 초기 파악 가능한 정보를 바탕으로 다양한 CASE를 가정하여 화학물질의 누출범위를 시뮬레이션하고, 그 결과를 실제 구미 불산누출 사고의 피해범위, 대피범위 등과 비교하여 사고초기 비상대응에 CA 적용성에 대한 연구를 수행할 것이다.

주현수 등은 화학물질 누출사고의 위해성 평가를 통한 산업단지 환경영향평가 개선방안 연구에서 CARIS, NBC-RAMS 등 국내외 개발되어 사용 중인 6개의 모델 및 가이드 라인을 이용하여 구미 불산사고의 피해범위를 산정하였고⁶⁾ 고재선은 최근 불산 저장탱크에서의 가스 누출시 공정위험 및 결과영향 분석을 통하여 구미불산사고 케이스로 수치해석과 ALOHA를 이용한 결과해석을 수행하였다.¹³⁾

앞서 소개한 연구들을 살펴보면 사고 발생이후 파악한 정보를 바탕으로 결과를 해석하여 사고피해범위를 정확하게 확보하려는 노력을 하고 있으나 사고 발생즉시 시뮬레이션을 수행하여 비상대응에 활용하기에는 시간 등의 여건으로 불가능하다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 사고당시 시간대별 확보 가능한 정보를 바탕으로 최대한 빠른 시간 내 시뮬레이션을 수행하고 그

결과가 비상대응(주민대피 가이드)으로 적용이 가능한가에 대한 연구를 수행하였다.

연구방법은 소프트웨어를 통한 시뮬레이션 수행을 위하여 필요한 정보를 사고발생시 현장에서 얻을 수 있는 정보와 확보가 불가능한 정보로 구분하고, 확보가 불가능한 정보는 KOSHA GUIDE인 최악의 누출 시나리오 선정에 관한 기술지침에 따라 시뮬레이션을 수행할 것이다. 그리고 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 높이기 위하여 어떠한 정보를 초기에 확보해야 하는지에 대하여 연구 할 것이다.



1) Consequence Analysis 연구

본 연구에서 사용하는 CA(Consequence Analysis) 기법을 누출모델, 확산 모델, 피해예측 3단계로 나누어 연구를 수행하며 각각의 단계별로 누출시간, 증기운의 밀도, 누출위치, 물질상태 등으로 구분되어 적용되는 모델에 대하여 연구한다.

2) 최악의 누출시나리오 연구

소프트웨어를 통한 시뮬레이션을 수행함에 있어 초기에 파악이 불가능한 정보를 정의하기 위하여 필요한 최악의 누출 시나리오 선정에 관한 기술지침(KOSHA GUIDE)에 대하여 연구한다.

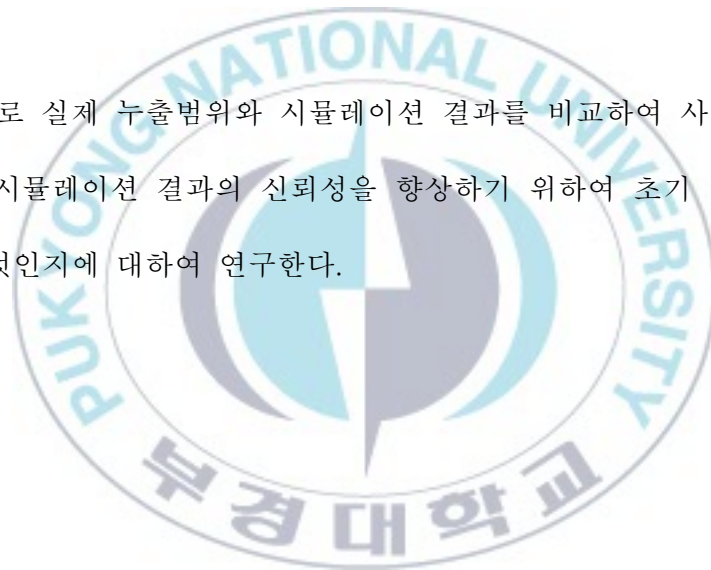
3) CA(Consequence Analysis) 소프트웨어 연구

미국 EPA에서 개발한 대기확산 모델링 소프트웨어인 ALOHA(Areal Locations of Hazardous Atmospheres)와 DNV사의 PHAST 7.1의 모델링 방법, 제한조건에 대하여 연구한다.

4) 구미불산 누출사고 CASE 연구 및 시뮬레이션

현재까지 발표된 구미불산 누출사고의 피해 및 불산 확산범위를 연구한 논문과 관련 보도자료를 활용하여 불산의 실제 누출범위에 대하여 연구하고 위험성평가 소프트웨어를 활용하여 다양한 시나리오에 대한 시뮬레이션을 수행한다.

마지막으로 실제 누출범위와 시뮬레이션 결과를 비교하여 사고발생 초기 적용성과, 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 향상하기 위하여 초기 확보해야 할 정보가 무엇인지에 대하여 연구한다.



제 2 장 연구내용

2.1 Consequence Analysis

위험은 발생가능성(빈도)과 발생으로 인한 영향(결과)의 함수로 나타낼 수 있다.

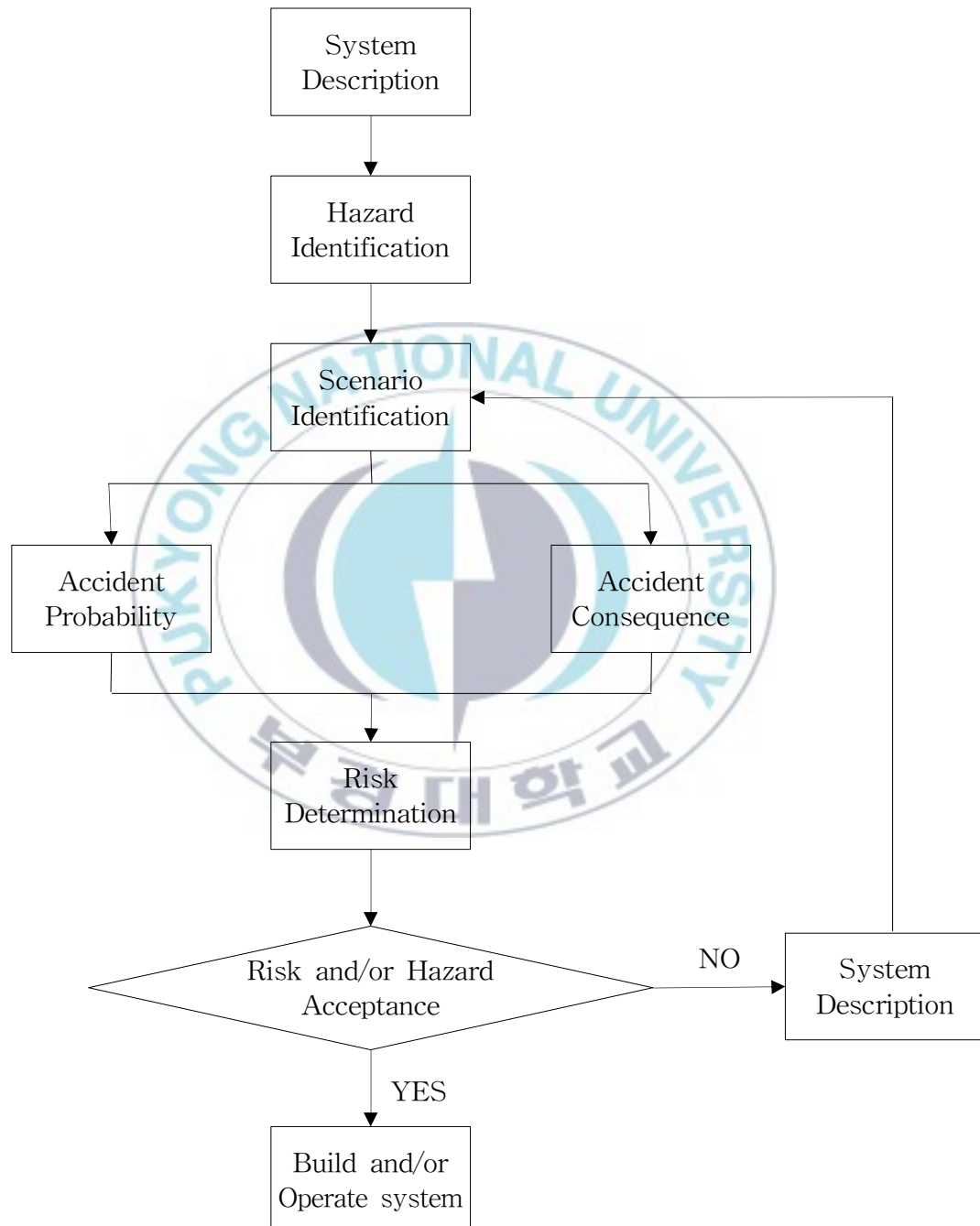
$$\text{위험(RISK)} = \text{빈도(Frequency)} \times \text{결과(Consequence)}$$

위험성 평가는 공장에서의 잠재위험(Hazard)을 확인하여 가상 시나리오에 대한 사고 발생 가능성(Accident Frequency)과 사고결과 (Accident Consequence) 분석을 통해서 위험성(Risk)을 계산 및 표현하는 것으로 사고에 의하여 인체나 건물에 미칠 수 있는 피해를 평가하는 것이다. 많은 위험성 평가(Risk Assessment) 방법들이 공정에 대한 잠재적인 위험 확인 및 위험성 감소의 역할을 할 뿐 아니라 운전성(Operability), 경제적 문제(Economical Problem) 및 환경적 문제(Environmental Problem)와 같은 안전 이외의 필요조건을 충족시키는데 도움을 주고 있다¹⁾

Fig. 1은 위험성 평가의 일반적인 절차를 나타낸 것이다. 이 절차는 공정에 대한 모든 장치, 설비, 작업자 그리고 작업환경 등의 분석이 완료되면 공정이 가지고 있는 모든 잠재위험 확인 작업이 수행되어진다. 그리고 발생할 수 있는 사고에 대한 다양한 가상 시나리오가 정해지며, 그 다음으로 사건의 발생 확률과 결과에 대한 연구가 동시에 수행이 된다. 이 정보들은 최종 위험성 평가에 이용되는데 만약 결과로 나온 위험도가 허용가능한 정도의 위험성으로 판명되면 분석 결과는 성공적으로 수행되어 공정은 정상적인 가동이 가능하다. 반면, 그렇지 못할 경우는 시스템을 변경하여 앞의 절차를 다시 반복적으로 수행하게 된다.²⁾



Fig. 1 Hazard evaluation procedure for quantitative risk assessment²⁾



위험성평가는 방법에 따라 크게 정성적 위험성평가와 정량적 위험성평가로 구분되는데 정성적 위험성평가 기법으로는 HAZOP, PHA, CHECKLIST, What-if법 등이 있으며, 정량적 위험성평가 기법으로는 빈도에 대한 평가를 수행하는 FTA, ETA와 사고의 결과에 대해 분석을 하는 CA(Consequence Analysis)가 있다.

CA는 Fig. 2에 따라 일반적으로 3단계로 나누어 수행이 가능하다.

1단계인 누출모델은 물질이 어떻게 누출되는지를 분석하는 것으로서 배관의 파손, 플랜지 누출, 안전밸브 작동, 운전원 실수 등에 의한 잠재적인 누출원 등을 확인하여 방출되는 위험물질의 양, 온도, 밀도, 시간, 누출상태(가스, 증기, 액체, 혼합물) 등을 계산한다. 누출모델은 Table 2에 따른 구분으로 각각의 모델링이 가능하며, 세부적인 모델링 방법은 KOSHA GUIDE P-92-2012 누출원 모델링에 관한 기술지침, KOSHA GUIDE P-102-2012 사고 피해예측 기법에 관한 기술지침 등에 명시하고 있다.

Fig. 2 Flow of Consequency Analysis

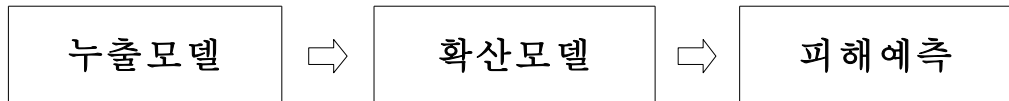


Table 2 Discharge modeling

구분	모델링 방법
누출시간	순간누출, 연속누출
증기운의 밀도	가벼운 가스, 무거운 가스
누출위치	설비누출, 배관 누출
물질상태	가스, 액체, 2상(액체-증기)

확산모델은 1단계의 누출 모델을 근거로 하여 대기 중으로 확산되는 위험물질의 거리에 따른 농도, 확산되는 증기운 구름의 크기, 농도, 형태를 예측한다. 확산되는 가스의 밀도나 누출형태에 따라 KOSHA GUIDE에서는 Table 3과 같은 모델을 제시하고 있다.

확산모델을 바탕으로 누출되는 위험물질이 인화성가스 또는 인화성액체인 경우에는 화재·폭발로 인하여 사업장내의 근로자 및 주변 시설에 미치는 화재·폭발의 영향을 계산하며 독성물질인 경우에는 작업자, 인근 주민 또는 주변 환경에 미치는 영향을 계산한다. 화재폭발의 경우 형태에 따라 Pool fire, Flash fire, Jet fire, BELVE, Fireball, VCE등의 CASE로 모델링이 가능하다.

Table 3 Diffusion modeling

구분	연속누출	순간누출
가벼운 가스	가우시안 플룸	가우시안 퍼프
무거운 가스	HMP 모델, BM 모델	BM 모델



2.2 최악의 누출시나리오 선정에 관한 기술지침

사고 발생초기 CA의 수행을 위하여 파악이 불가능한 정보는 KOSHA GUIDE의 ‘최악의 누출시나리오 선정에 관한 기술지침⁸⁾’에 따라 가정하여 CA를 수행할 것이다. 최악의 누출시나리오 선정에 관한 기술지침에서는 각각의 변수 결정방법에 대한 가이드를 아래와 같이 제시하고 있다.

1) 끝점

사업장 밖에서의 누출 시나리오 분석을 하기 위한 기준이 되는 지점

- 독성물질 : 농도가 끝점농도(ERPG-2)에 도달하는 지점
- 인화성가스 및 인화성액체
 - 폭발 : 0.07kg/cm^2 의 과압이 걸리는 지점
 - 화재 : 40초 동안 5kW/m^2 의 복사열에 노출되는 지점
 - 누출 : 누출된 물질의 폭발하한 농도에 이르는 지점

2) 풍속 및 대기 안정도

- 최악의 누출시나리오 : 풍속 1.5m/s, 대기안정도 ‘F’
- 임의 누출시나리오 : 통상의 기상조건

3) 대기온도 및 습도

- 최악의 누출시나리오 : 지난 3년간 낮 동안의 최대온도 및 평균습도
- 임의 누출시나리오 : 그 지역의 통상온도 및 습도

4) 누출원 높이

- 최악의 누출시나리오 : 지표면 누출
- 임의 누출시나리오 : 실제 누출되는 높이

5) 지표면의 굴곡상태 : 도시지형과 평탄한 시골지형 중 선택

6) 누출물질의 온도

- 최악의 누출시나리오 : 낮 시간의 최고온도 또는 운전온도중 큰수치
- 임의 누출시나리오 : 운전온도 또는 대기온도

7) 최악의 누출 시나리오

- 누출량 : 사고시 비상조치가 가능한 범위 내에서의 단일 용기에 저장 되는 최대량, 단일 배관계에 보유하고 있는 최대량
- 누출시간 : 가스는 10분동안 누출된 가정, 액체는 누출량이 순간적으로 누출되어 액체층을 형성하는 것으로 가정

2.3 CA(Consequence Analysis) 소프트웨어

사고발생초기 앞서 연구한 CA를 단계별로 수행하는 것은 시간 등의 여건을 고려할 때 불가능하여 CA 수행을 좀 더 간단하고 빠르게 할 수 있는 소프트웨어에 대하여 연구를 해보았다. CA소프트웨어는 범용적으로 Table 4와 같이 3가지 소프트웨어가 많이 쓰이고 있는 것을 알 수 있다. Dupont, DNV사에서 개발하고 유상으로 판매하고 있는 TRACE, PHAST와 같은 유료 소프트웨어와 EPA(미국 환경청)에서 개발, 보급하고 있는 ALOHA와 같은 무료 소프트웨어가 있다. CA의 결과는 PHAST, TRACE 등 상용 소프트웨어의 정확성이 높지만 ALOHA의 신뢰도도 Steven Hann등(2008)이 연구한 Comparison of six widely-used dense gas dispersion models for three recent chlorine railcar accidents³⁾ 연구를 통하여 상용소프트웨어와 큰 차이가 없다는 것이 확인되었다.

본 연구에서는 간단한 데이터의 입력으로 비상대응에 적합한 CA결과를 보여주는 ALOHA를 사용하여 연구를 수행할 것이다. 무료로 배포되어 누구나 사용이 가능한점 역시 ALOHA의 큰 장점이라 볼 수 있다.

ALOHA의 대기확산 모델은 가벼운 가스의 경우 Palazzi¹⁴⁾등(1982)이 연구한 Gaussian dispersion model과 Hanna¹⁵⁾(1982)가 제시한 단일상의 연속

누출 Gaussian distribution을 바탕으로 ALOHA에서 응용한 모델을 사용하고 있으며, 무거운 가스는 Havens¹⁶⁾등(1985)이 제시한 DEGADIS모델을 바탕으로 이후 연구된 모델의 내용을 추가하여 ALOHA-DEGADIS란 모델을 개발하여 사용하고 있다.



Table 4 Comparison of CA Software

구분	TRACE	PHAST	ALOHA
운영	SAFER Systems, Dupont	DNV	EPA
특징	다양한 사고 데이터 반영	다양한 유동 해석, 많은 물질 데이터, 빈도분석가능(SAFETI)	간단한 모델링으로 신속한 대응 가능
비용	고비용	고비용	무료



1) ALOHA

ALOHA(Areal Locations of Hazardous Atmospheres)는 미국 EPA(Environmental Protection Agency)와 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 공동 개발한 화학물질 유출과 관련된 몇 가지 위험의 공간적 범위 추정치를 제공하는 프로그램이다. 특히 유독화학 물질 누출에 따른 인간의 건강위험과 화재·폭발로부터 압력파의 영향 등을 다룬다.

ALOHA는 모든 CASE에 대하여 모델링을 지원하지 않는다. Table 5에 따른 시나리오, 누출원의 조합에 따라 모델링을 하며, 사용자는 제한된 특정조합을 선택하여야 한다.

ALOHA는 비상시 대응에 일반적으로 사용할 수 있는 정보를 사용하여 위험 영역의 평가를 제공하도록 설계되었고 입력데이터는 화학적 성질 및 지리적 특성에 관한 광범위한 데이터베이스를 최소한으로 요구하고 있다.

ALOHA는 화학물질유출과 관련된 거리를 어떠한 경우에 과대평가하기도 한다. 그것은 불확실성에 따른 위험거리를 과소평가하여 발생할 수 있는 리스크를 줄이기 위함이다.

Table 5 Hazard categories modeled in ALOHA⁴⁾

<i>Scenario/ Source</i>	<i>Direct source</i>	<i>Tank</i>	<i>Puddle</i>	<i>Gas Pipeline</i>
<i>Vapor cloud</i>	Toxic vapors	Toxic vapors	Toxic vapors	Toxic vapors
<i>Vapor cloud (flash fire)</i>	Flammable area	Flammable area	Flammable area	Flammable area
<i>Vapor cloud (explosion)</i>	Overpressure	Overpressure	Overpressure	Overpressure
<i>Pool fire</i>	NA	Thermal radiation	Thermal radiation	NA
<i>BLEVE (fire ball)</i>	NA	Thermal radiation	NA	NA
<i>Jet fire</i>	NA	Thermal radiation	NA	Thermal radiation

ALOHA의 제한조건(한계)은 특정시나리오(CASE)에 대한 시뮬레이션을 지원하지 않으며, 상용소프트웨어에 비해 지원하는 시나리오가 부족하다. 그리고 대기 중 화학반응, 토양의 흡수량, 건물, 구조물의 영향은 고려가 불가하며, 혼합물질에 대한 DATA가 부족하다는 한계가 있다.

2) ALOHA의 수행절차

ALOHA는 누출CASE에 따른 누출원 모델을 제공하고 있으며, 각 CASE에 대한 선택은 아래 CASE와 Fig. 3에 따라 수행하게 된다.

- Direct

An instantaneous or continuous release of chemical vapors into the air from a single point. This is the only option that allows for an elevated release.⁴⁾

- Puddle

A puddle of constant area, containing either a non-boiling or boiling liquid.⁴⁾

- Tank

A cylindrical or a spherical tank at ground level with a single hole or leaking valve. The tank may contain a liquid, pressurized gas, or gas liquefied under pressure. Tank contents may escape directly into the atmosphere or first form a spreading evaporating pool.⁴⁾

- Gas pipeline

A pressurized pipe containing gas, either connected to a very large reservoir or unconnected to any storage vessel.⁴⁾

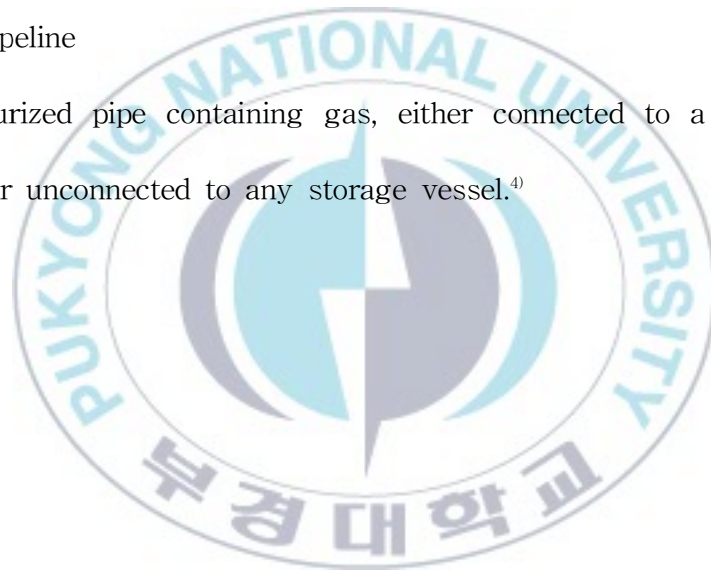
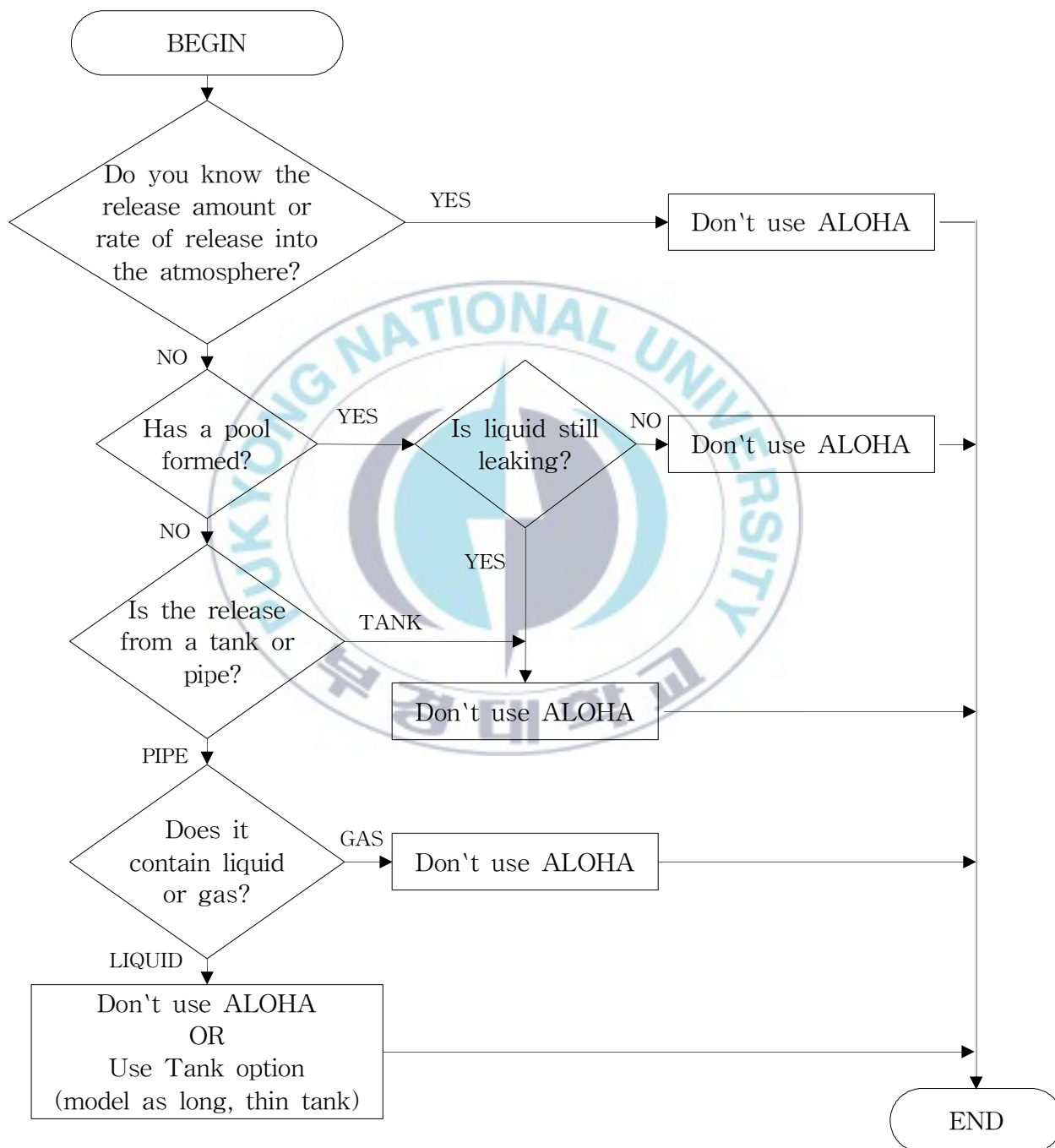


Fig. 3 Source selection chart⁵⁾



3) ALOHA 수행에 필요한 데이터

ALOHA는 시뮬레이션을 위해 Table 6과 같이 장소정보, 누출물질, 기상 조건, 누출원 정보 4가지 부문의 정보를 필요로 한다.

4가지 유형의 정보는 각각의 유형에 따라 사고발생전이나 즉시 또는 일정시간이 지난후인 초기 조치 후 파악가능한 정보로 구분하였다.

장소정보는 사고발생 전이나 즉시 확인할 수 있는 정보로 지역, 고도, 경도, 위도, 건물의 환기율 등을 포함한 정보이다.

누출물질은 ALOHA에 등록된 1,000여종을 물질중 선택이 가능하며, 기상 조건은 사고발생 즉시 기상청 지역별상세관측자료(AWS)를 통하여 확보가 가능하다.

누출원 정보는 저장량 또는 공정정보는 사고전이나 사고발생즉시 파악해야하는 정보이며, 누출형태나 실제 누출량은 사고발생이후 파악가능한 정보로 정의하였다.

Table 6 Necessary information for running ALOHA

구분	주요내용	사전	즉시	초기 조치후
장소 정보	지역, 고도, 경도/위도, 환기율 등	○		
누출 물질	물질 1,000종 이상 DB 보유	○		
기상 조건	풍속, 풍향, 기온, 습도, 대기안정도 등		○	
누출원 정보	저장량(최대, 현재)	○	○	
	공정정보	○		○
	누출형태		○	
	실제 누출량			○

2.4 ERPG(Emergency Response Planning Guideline)

ERPG는 미국산업위생학회(AIHA)에서 개발된 지침으로 화학물질 누출 시 확산지역의 파악 및 지역사회와 비상대응계획을 수립하는데 사용되는 가이드라인이다. ERPG는 물질의 종류와 농도에 따라 각각의 등급을 지정하고 있는데 등급의 표현은 ERPG-1, 2, 3 세단계로 나타낸다.

각각의 등급에 대한 피해정도는 아래와 같다.

1) ERPG-1

1시간까지 노출되더라도 미약한 건강이상 효과를 나타내지 않고 명확히 구분 할 수 있는 불쾌한 냄새도 감지하지 못하는 대기 오염원 최대 농도 (1시간 이상 노출 또는 기준치 초과 시 회복 가능한, 미약한 건강이상 초래)⁶⁾

2) ERPG-2

회복 불가, 심각한 건강이상 효과 또는 스스로 보호수단을 강구하기 위한 개인의 활동력을 손상시킬만한 증상을 보이지 않고 1시간까지 노출할 수 있는 오염원 최대농도 (1시간 이상 노출 또는 기준치 초과시 회복 불가 또는 심각한 건강이상 초래)⁶⁾

3) ERPG-3

생명을 위협받거나 생명위협 상태로 진전될 수 있는 건강 효과를 나타내지 않고 1시간까지 노출할 수 있는 오염원 최대농도 (1시간 이상 노출 또는 기준치 초과시 생명위협 가능)⁶⁾

실제 대피는 ERPG-2를 기준을 가이드로 권고하고 있으며, ERPG-2의 수치는 KOSHA GUIDE에 따른 CA에서 끝점농도로 정의하고 있다.

제 3 장 구미 불산 누출사고 사례연구

3.1 사고개요 및 정보수집

1) 사고개요

2012년 9월 27일 오후 3시 43분경 경상북도 구미 4공단 내 위치한 (주)휴브글로벌에서 발생한 사고로 탱크로리에서 공장 저장탱크로 불화수소를 옮기던 중 작업자의 실수로 밸브를 열어 가스가 누출된 사고이다. 피해현황은 사망 5명, 부상 18명, 건강검진 12,000명 및 농작물 91.2ha, 가축 1,313두 등의 피해가 발생하였다. 사고의 원인으로는 작업자의 업무 부주의, 규정된 안전보호구 미착용, 취급자에 대한 교육 미흡 등이며, 누출사고 초기대응을 할 수 있는 사전 구비사항들이 갖춰져 있지 않은 상태에서 사고가 발생하였기 때문에 사고의 2차 피해를 막지 못한 것으로 파악되고 있다. 누출밸브가 열린 시간이 오후 3시 43분이었고, 밸브가 차단된 것이 당일 오후 11시 40분으로 밸브가 개방된 약 8시간동안 탱크 내부에 있던 8~12톤 가량의 불화수소가 대기 중으로 방출되었다. 사고 당시 및 이후 대기 중에 높은 농도의 불화수소 가스의 정량적인 계측수치는 확보되지 않았다.⁶⁾

Table 7 Summary of Kumi accident

사고일시 및 장소	- 2012년 9월 27일 오후 3시 43분경 - (주)휴브글로벌, 경북 구미 4공단
사고현황	- 불산 적재 탱크로리(18톤)에서 공장 저장탱크로 옮기던 중 실수로 밸브를 열어 가스 누출
피해현황	- 인적피해 : 23명(5명 사망, 18명 부상), 건강검진 12,243명 - 재산피해 : 농작물(91.2ha), 가축(1,313두) 등
사고원인	- 작업자의 업무 부주의(작업순서 임의변경) - 규정된 안전보호구 미착용 - 유독물관리자 없이 유출입 작업 - 취급자에 대한 교육 미흡
비상조치	- 15:43 사고발생 - 17:08 (+1hr 25min) 구미 4단지 대피 통보 - 17:50 (+2hr 07min) 봉산리,임천리(약 0.7km) 주민대피 - 20:20 (+4hr 37min) 인근지역(1.3km) 대피명령 - 23:40 (+7hr 57min) 사고 탱크로리 불산 밸브 차단

2) 피해현황

Fig. 4.1과 4.2는 구미 불산 누출사고의 피해를 인포그래픽으로 나타낸 것으로 사고에 따른 피해가 1km이내 사방으로 집중되어 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4.2와 같이 식물 또는 공기 중 불산농도를 분석한 결과로 볼 때 사고발생 2시간 이후 대피명령이 떨어진 봉산리, 임천리 주민들도 불산에 노출된 것으로 생각된다.



Fig. 4.1 Kumi accident infographics⁹⁾

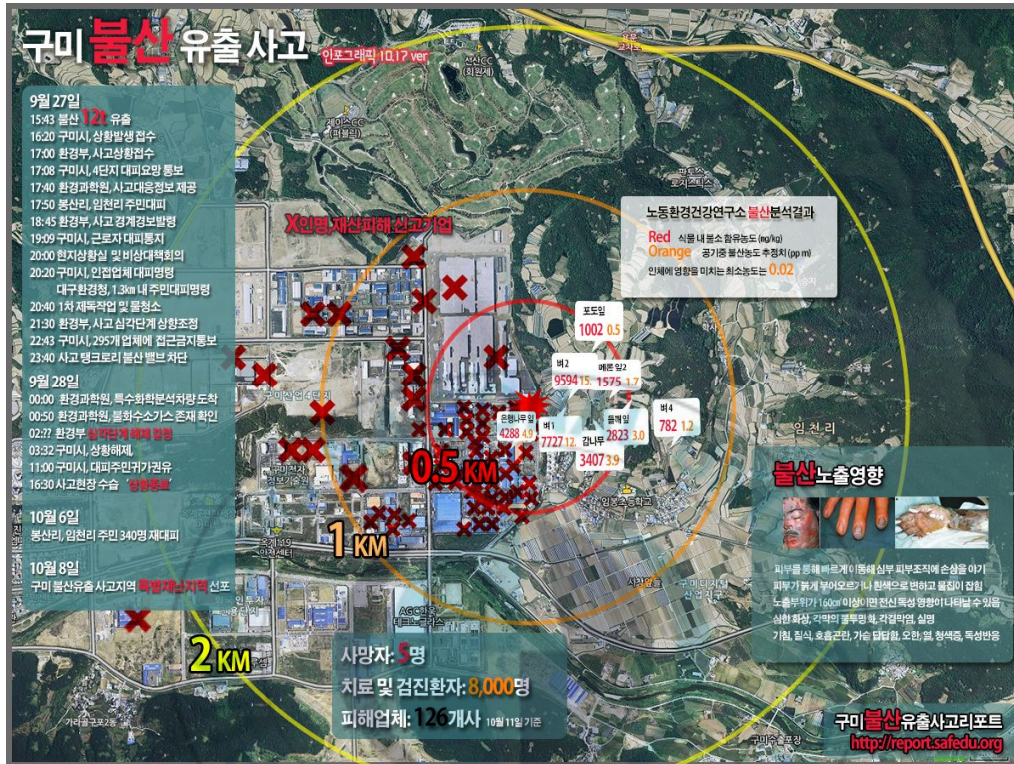
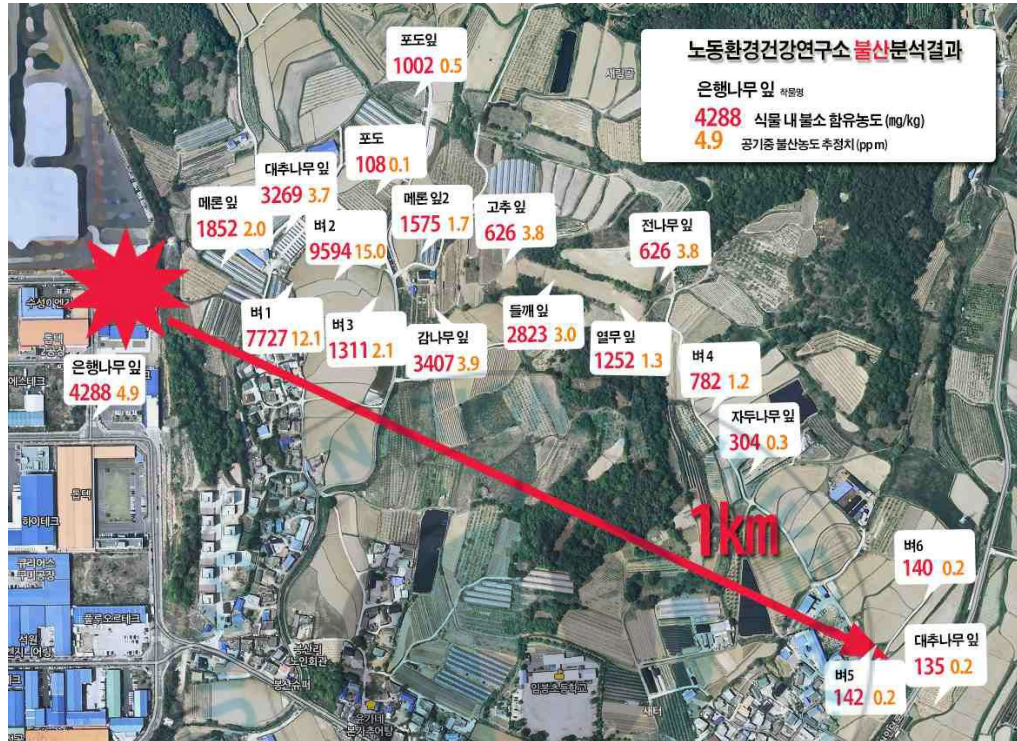


Fig. 4.2 Kumi accident infographics⁹⁾



3) 불화수소

- 불화수소

불화수소(HF, Hydrogen Fluoride)는 상온, 상압에서 기체상태의 급성독성 물질로 무색이지만 강하고 자극적인 냄새가 나며 기체상태의 불화수소를 가압·냉각시키면 액화되어 다량으로 운반·보관이 가능함¹⁰⁾

- 불산

불화수소를 물에 녹여 만든 수용액으로 부식성물질이며 물의 함량이 높을수록 증기압은 낮아지고 끓는점은 높아지므로 확산 위험성은 상대적으로 낮아짐¹⁰⁾

- 급성독성물질

산업안전보건법에 다음과 같은 물질을 급성독성물질로 규정하고 있다.¹⁰⁾

1. 쥐에 대한 경구투입실험에 의하여 실험동물의 50퍼센트를 사망시킬 수 있는 물질의 양, 즉 LD50(경구, 쥐)이 킬로그램당 300밀리그램-(체중) 이하인 화학물질

2. 쥐 또는 토끼에 대한 경피흡수실험에 의하여 실험동물의 50퍼센트를 사망시킬 수 있는 물질의 양, 즉 LD50(경피, 토끼 또는 쥐)이 킬로그램 당 1000밀리그램 - (체중) 이하인 화학물질
3. 쥐에 대한 4시간 동안의 흡입실험에 의하여 실험동물의 50퍼센트를 사망시킬 수 있는 물질의 농도, 즉 가스 LD50(쥐, 4시간 흡입)이 2500ppm 이하인 화학물질, 증기 LD50(쥐, 4시간 흡입)이 10mg/ℓ 이하인 화학물질, 분진 또는 미스트 1mg/ℓ 이하인 화학물질
- 불화수소 MSDS는 fig.5와 같다.

Fig. 5 Hydro Fluoric MSDS¹¹⁾

MSDS 요약정보

물질명

분화수소

1. 일반정보

CAS No.:	7664-39-8	KE No.:	KE-20198
물질상상:	기체	분자량:	20.01
끓는점:	19.51 °C	녹는점:	-83.55 °C
인화점:	자료없음		
주요용도:	자료없음		

2. 물질정보

물질명	CAS No.	함유량(%)
분화수소	7664-39-8	100%

3. 그림문자

4. 유해위험 문구

피부에 심한 화상과 눈에 손상을 일으킴 알레르기성 피부 반응을 일으킬 수 있음 눈에 심한 손상을 일으킴 흡입하면 유독함 유전적인 결함을 일으킬 것으로 의심됨 신체 중 (...)에 손상을 일으킴 장기관 또는 방벽노출 되면 신체 중 (...)에 손상을 일으킴

5. 응급조치요령

눈에 들어왔을 때	긴급 의도조치를 받으십시오. 분화수소(CAS No. 1062)와 접촉한 경우 6분간 물로 피부와 눈을 씻어낸 후 피부는 알콜/질리 배합으로 분지시키고, 눈은 15분간 물/알콜 용액으로 씻어내십시오. 눈에 물이면 몇 분간 물로 조심해서 씻으십시오. 가능하면 콘택트렌즈를 제거하십시오. 계속 씻으십시오.
피부에 접촉했을 때	피부(또는 머리카락)에 묻으면 오염된 모든 의복은 벗거나 제거하십시오. 피부를 물로 씻으십시오/샤워하십시오. 피부자극성 또는 홍반이 나타난다면 의학적인 조치/조언을 받으십시오. 다시 사용전 오염된 의복은 세탁하십시오. 뜨거운 물질인 경우, 얼음 없애기 위해 영향을 받은 부위를 다량의 차가운 물에 담그거나 씻어내십시오. 오염된 옷과 신발을 제거하고 오염지역을 격리하십시오. 분화수소(CAS No. 1062)와 접촉한 경우 6분간 물로 피부와 눈을 씻어낸 후 피부는 알콜/질리 배합으로 분지시키고, 눈은 15분간 물/알콜 용액으로 씻어내십시오. 액화가스에 접촉한 경우 미지근한 물로 해당 부위를 녹이십시오. 가스 또는 액화 가스와 접촉 시 화상, 심한한 상해, 통증을 유발할 수 있음.
흡입했을 때	과량의 먼지 또는 흙에 노출된 경우 깨끗한 공기로 제거하고 기침이나 다른 증상이 있을 경우 의료 조치를 취하십시오. 즉시 의료기관(의사)의 진찰을 받으십시오.
먹었을 때	삼켰다면 입을 씻어내십시오. 토하게 하여 하지 마십시오. 물질을 먹거나 흡입하였을 경우 구강내누출법으로 인공 호흡을 하지 말고 적절한 호흡의료장비를 이용하십시오.

6. 저장방법

빈 드럼통은 완전히 배수하고 적절히 막아 즉시 드럼 조절기에 되돌려 놓거나 적절히 배치하십시오.

용기는 환기가 잘 되는 곳에 단단히 밀폐하여 저장하십시오.

음식과 음료수로부터 분리하십시오.

피해야 할 물질 및 조건에 유의하십시오.

7. 피해야 할 조건 및 물질

피해야 할 조건	없음
피해야 할 물질	없음

8. 누출 및 폭발·화재 사고시 대처방법

(분진·흙·가스·미스트·증기·스프레이)의 흡입을 피하십시오.	
가능하다면 누출용기를 돌려 약제보다는 가스로 방출되도록 하십시오.	
가스가 완전히 확산되어 화재를 피하지 오염지역을 격리하십시오.	
누출물을 방지거나 줄여나십시오.	
누출물에 직접접촉하지 마십시오.	
물에 갈 필요가 없거나 보호장비를 갖추지 않은 사람은 출입하지 마십시오.	
불분명한 이유로 증기를 줄이거나 증기부품을 흡수해서 물에 누출물과 접촉되지 않도록 하십시오.	
방출된 것을 즉시 막아내고, 보호구 등의 예방조치를 따르십시오.	
오염 지역을 격리하십시오.	
위험하지 않다면 누출을 멈추십시오.	
피해야 할 물질 및 조건에 유의하십시오.	
화재가 없는 누출시 경보보호형 증기 보호복을 착용하십시오.	

9. 법적 규제현황

노출기준	THA 0.5ppm, STEL 0.5ppm 0.2.5mg/m³
특수관광전압구기	12개월
작업환경측정구기	6개월
작업환경측정물질	관리대상물질
산업안전 보건법	특수관광전압구기
유해화학물질관리법에 의한 규제	사고대비물질
화학물질안전관리법에 의한 규제	유독물질
	자료없음

10. 취급시 주의사항

개인보호구 착용	배기설비 가동 / 용기밀폐	규제 회기알기
		

밀폐공간에서는 공기공급식 숨기 마스크 착용
 먼 마스크, 일방방진 방독 마스크 착용 금지

기타사항

1. 유해성-위험성(추가정보) : 국립환경과학원고시 제2011-15호에 따른 유독물 분류는 다음과 같습니다.

- 급성독성(경구) 구분1
- 급성독성(경구) 구분2
- 급성독성(경피) 구분1
- 급성독성(흡입) 구분2
- 피부부식성/피부자극성 구분1

4) 사고당시 기상정보

CA 수행을 위한 기상조건은 기상청 지역별 상세관측자료(AWS)에서 분단위로 확인이 가능하며, 본 연구에서는 불산 누출이 집중된 15:30 ~ 16:30까지의 기상조건인 Table 8 중 최대치를 기준으로 하여 수행하였다.

- 설정한 기상조건 : 기온 22.0℃, 풍향 서풍, 풍속 2.0 m/s, 습도 67%



Table 8 Weather data¹²⁾

[매분관측자료] 구미 279 (49m) / 2012.09.27.16:30 / 경상북도 구미시 남통동

시:분	강수	강수15	강수60	강수6H	강수12H	일강수	기온	풍향1	풍속1	풍향10	풍속10	습도	해면기압
16:30	○	0	0	0	0	0	21.6	120.9 ESE	0.4	306.9 NW	0.7	67	1017.5
16:20	○	0	0	0	0	0	21.9	255.9 WSW	1.5	288.8 WNW	1.1	67	1018.0
16:10	○	0	0	0	0	0	21.8	344.1 NNW	0.9	317.0 NW	1.1	66	1017.6
16:00	○	0	0	0	0	0	21.8	307.8 NW	0.8	288.9 WNW	1.6	67	1018.0
15:50	○	0	0	0	0	0	22.0	270.6 W	2.0	278.0 W	1.1	64	1018.3
15:40	○	0	0	0	0	0	21.9	86.3 E	1.0	64.2 ENE	1.3	63	1017.6
15:30	○	0	0	0	0	0	22.3	317.4 NW	0.6	33.6 NNE	1.7	64	1017.3



3.2 CASE별 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 사고발생 직후부터 시간대별로 확보 가능한 정보를 가정하고 확보된 정보만을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 확인이 불가능한 정보는 KOSHA GUIDE P-107-2012 최악의 누출시나리오 선정에 관한 기술지침에 따라 가정하였다.

시간대별로 확보할 수 있는 정보에 따라 Table 9와 같이 3가지 CASE에 따라 시뮬레이션을 수행하였으며, CASE 1은 사고발생 즉시 사고물질, 누출 가능한 최대용량을 바탕으로 KOSHA GUIDE에 따라 10분간 전량이 누출된 시나리오로 시뮬레이션을 수행하였다. CASE 2는 일정시간이 지난 비상조치이후에 확보가능한 정보인 탱크 등의 잔량을 바탕으로 파악된 누출량과 조치까지 걸린 시간으로 파악된 누출속도를 바탕으로 시뮬레이션된 시나리오이다. CASE 2에서 가정한 탱크 내 잔량과 비상조치시간은 구미불산 사고보고서에서 안전관리자 인터뷰를 통하여 확보하였다고 밝히고 있다.⁶⁾ CASE 3는 탱크 용량 등 누출량과 관련된 정보가 파악이 불가할 경우 소프트웨어에서 지원하는 시나리오에 따라 기존에 알고 있던 공정정보를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 본 논문에서는 ALOHA를 이용한 탱크누출시나리오를 수행하려 하였으나, ALOHA에서 가압된 액체의 대한 탱크누

출 시나리오를 지원하고 있지 않아서 CASE 3의 경우 상용 소프트웨어인 PHAST 7.1을 이용하여 수행하였다.

Table 9 Case of scenario

CASE	수행시점	시나리오	필요정보
CASE 1	사고발생 즉시	탱크 전량이 10분 동안 누출	탱크저장량
CASE 2	비상조치 직후	잔량으로 파악된 누출량이 조치시간 동안 누출	잔량 및 조치시간
CASE 3	비상조치 직후	공정조건을 이용한 Tank 누출	저장량, 압력, 누출공 직경 등

1) CASE 1. 수행결과

CASE 1은 탱크 내 전량이 10분 동안 누출되는 시나리오로 사고발생 즉시 파악 가능한 정보로 수행하였다. 시뮬레이션 수행을 위한 누출 모델은 Table 10과 같이 설정하였다.

Table 10 Case 1 input data

SOURCE	누출타입	누출량	누출시간
Direct	연속누출	18ton	10min

시뮬레이션 수행결과는 아래와 같다.

SOURCE STRENGTH:

Direct Source: 1.8 tons/min

Source Height: 0

Release Duration: 10 minutes

Release Rate: 1,630 kilograms/min

Total Amount Released: 16,329 kilograms

Note: This chemical may flash boil and/or result in two phase flow.

Use both dispersion modules to investigate its potential behavior.

THREAT ZONE:

Model Run: Gaussian

Red : 2.0 kilometers --- (50 ppm = ERPG-3)

Orange: 3.2 kilometers --- (20 ppm = ERPG-2)

Yellow: 7.9 kilometers --- (2 ppm = ERPG-1)

Fig. 6 Case 1 diffusion range

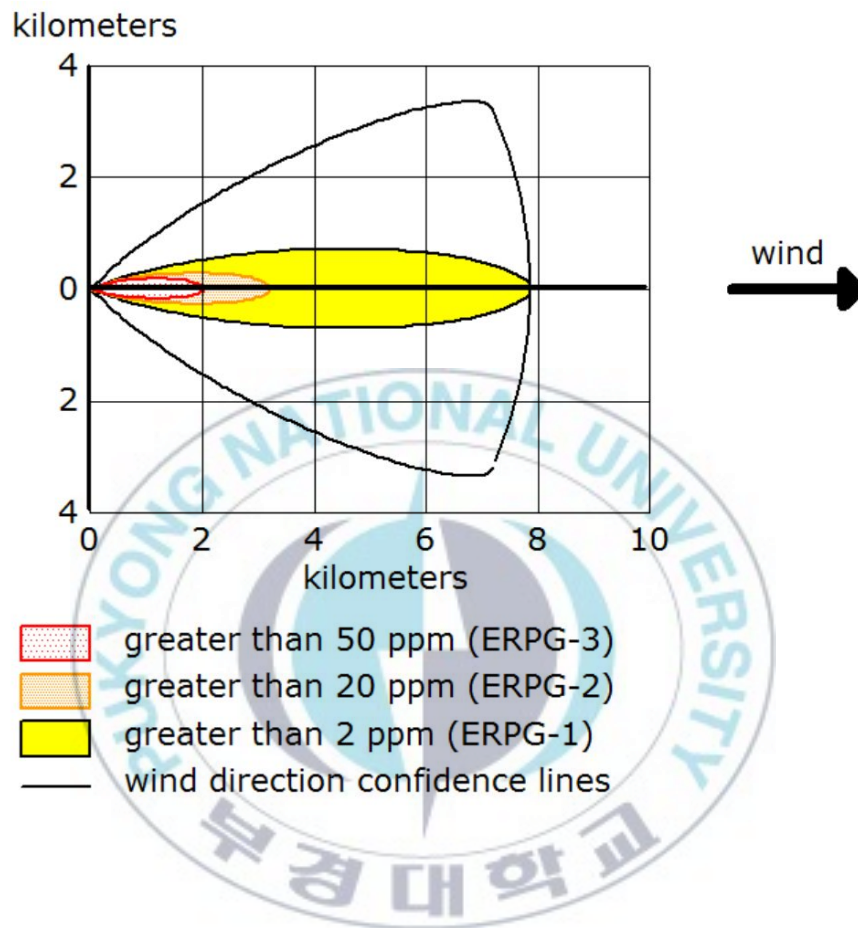
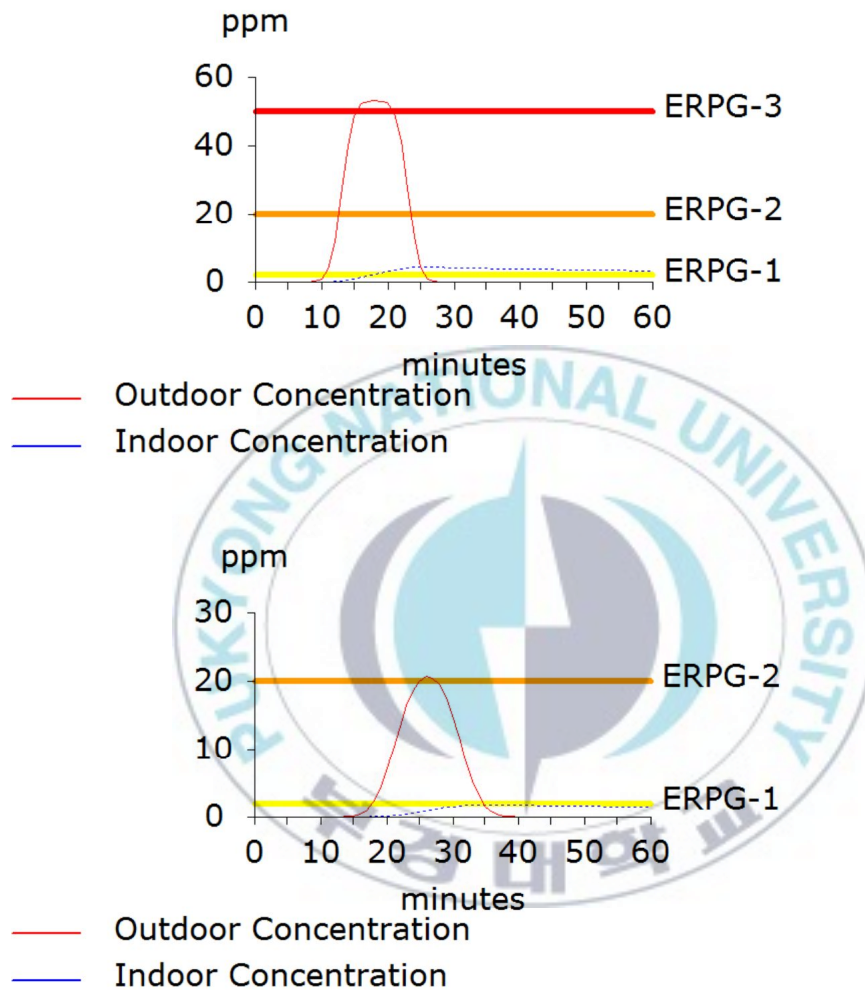


Fig. 7 Case 1 diffusion time



사고 접수 시 파악할 수 있는 저장량을 바탕으로 최악의 시나리오(조치가 불가하여 탱크 내 전량이 10분 동안 누출)로 시뮬레이션 결과 대피범위의 가이드가 되는 ERPG-2(20ppm)의 범위가 약 3200m로 시뮬레이션 되었다.

사고 접수 시 확보된 정보로 시뮬레이션 된 결과는 실제 피해 및 대피범위의 결정보다는 사고 물질의 정확한 파악 및 물질의 유동정도를 파악하는 지표로만 사용이 가능한 것으로 판단된다. 실제 사고 시 대피하였던 범위인 1.3km와는 약 2km정도 차이가 나기 때문에 본 데이터를 바탕으로 대피 범위를 설정하기에는 과잉대응 문제가 발생할 수 있어 보인다.

하지만 대피가 아닌 대응 또는 대비를 위한 가이드로서는 충분한 의미를 가진다고 보인다. 실제 공정조치가 불가능하여 탱크 내 전량이 누출된다면 최대 3.2km까지 인체에 영향을 미칠 수 있는 불산 농도에 노출될 가능성이 있기 때문이다.

2) CASE 2. 결과

사고 초기조치 이후 CASE 2를 수행하기 위해 필요한 정보는 누출량과 조치시간으로 산정한 누출속도이다. 초기 조치이후 탱크내 잔량으로 누출량을 확인하고 안전관리자 인터뷰를 통하여 확인한 조치시간(펌프 가동 정지)으로 CASE에 필요한 정보를 정리하면 Table 11과 같다.

Table 11 Case 2 input data

SOURCE	누출타입	누출량	누출시간
Direct	연속누출	10ton	30min

Table 11에서 정의한 정보로 CASE 2를 수행하면 결과는 아래와 같다.

SOURCE STRENGTH:

Direct Source: 0.33 tons/min

Source Height: 0

Release Duration: 30 minutes

Release Rate: 299 kilograms/min

Total Amount Released: 8,981 kilograms

Note: This chemical may flash boil and/or result in two phase flow.

Use both dispersion modules to investigate its potential behavior.

THREAT ZONE:

Model Run: Gaussian

Red : 853 meters --- (50 ppm = ERPG-3)

Orange: 1.4 kilometers --- (20 ppm = ERPG-2)

Yellow: 4.6 kilometers --- (2 ppm = ERPG-1)

Fig. 8 Case 2 diffusion range

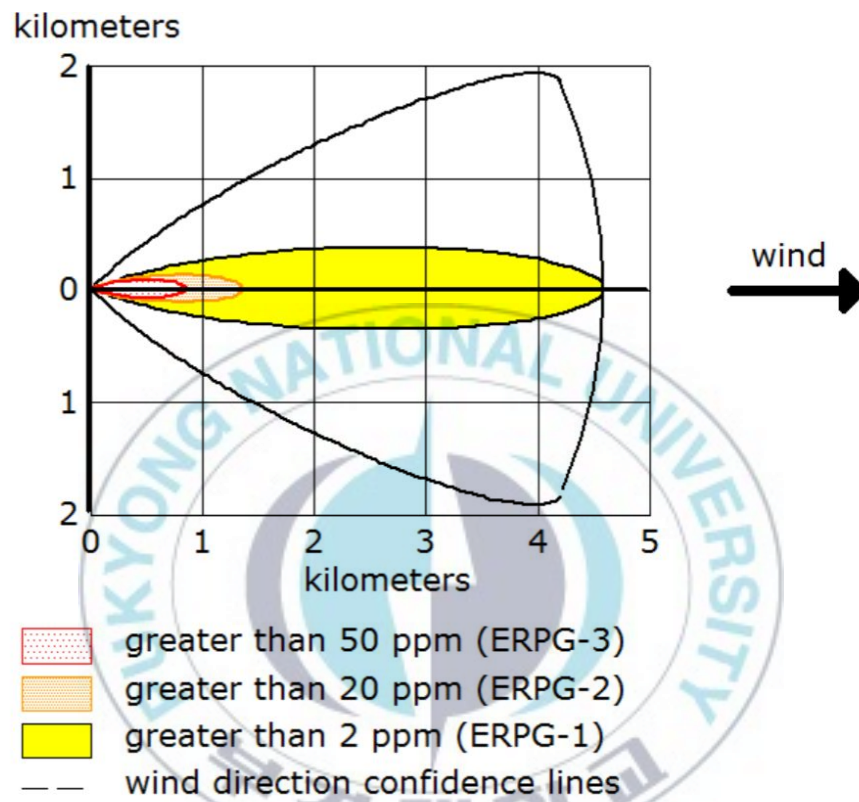
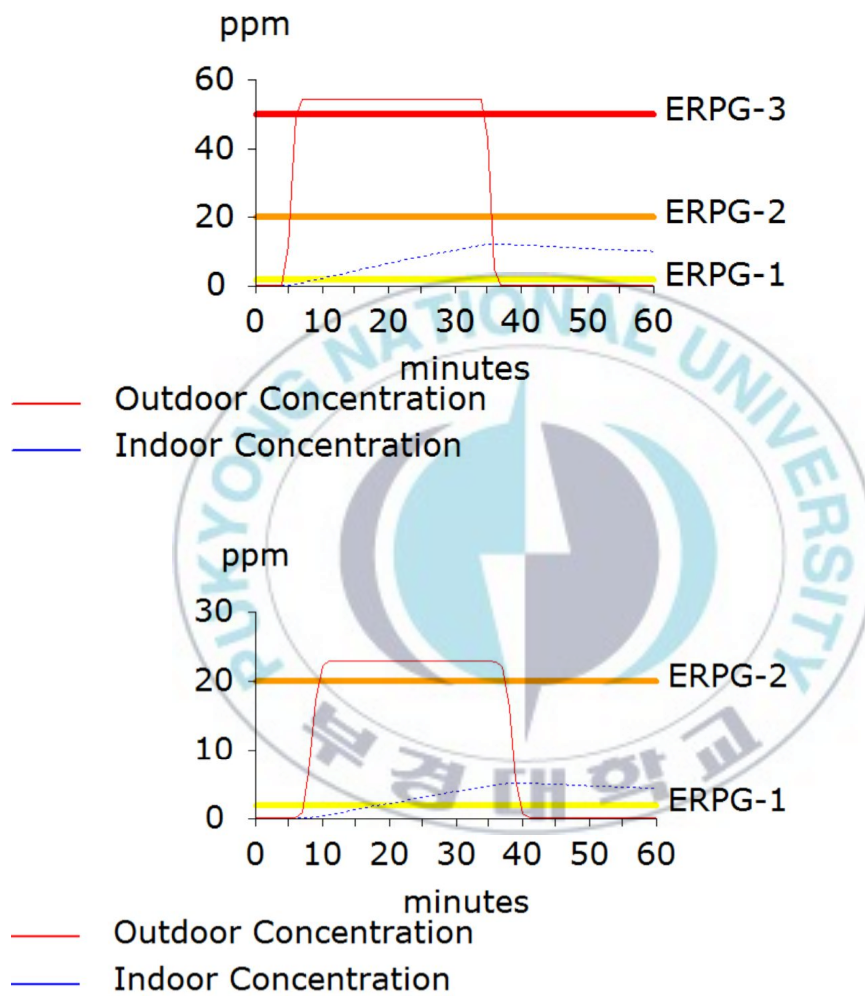


Fig. 9 Case 2 diffusion time



현장에 비상대응 인력이 도착 후 담당자 인터뷰 또는 직접 조치를 취하고 나서 공정조치 시간(펌프 차단, 밸브 차단 등) 및 누출량(탱크내 잔량으로 추정) 정보를 얻을 수 있을 것이다.

추가로 얻은 정보로 좀 더 정확한 시뮬레이션이 가능하다. 불산사고를 케이스로 하면, 초기 30분전후로 안전관리자가 펌프를 가동정지 하였고 탱크 잔량으로 파악해본 누출량은 약 10ton가량 된다. 시뮬레이션에 사용될 누출율은 30분간 일정한 속도로 10ton이 누출된 것으로 가정하였다. 30분 이후는 탱크내 잔량이 증발되는 양은 본 시뮬레이션에서 고려치 않는다는 조건으로 시뮬레이션을 하면 대피가이드로 쓰이는 ERPG-2(20ppm)의 범위가 약 1.4km로서 실제 사고 시 대피한 1.3km와 그 차이가 크지 않다는 것을 알 수 있다.

3) CASE 3. 결과(PHAST 7.1)

앞서 말했듯이 CASE 3의 경우 소프트웨어에서 지원하는 시나리오에 기존에 알고 있는 공정정보를 이용하여 확산 모델링을 수행하려 했으나, ALOHA의 경우 가압된 액체탱크의 누출에 대한 시나리오를 제공하고 있지 않아(가압된 가스탱크의 누출만 지원) 상용 소프트웨어인 PHAST 7.1을 통하여 수행하였다.

시뮬레이션은 탱크용량과 가압상태, 누출된 밸브의 직경과 위치 정보로 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션을 수행을 위해 사용한 정보는 Table 12과 같다.

Table 12 Case 3 input data

SOURCE	저장량	탱크내 압력	누출공 크기	누출방향
Short pipe	18ton	3.5kgf/cm ²	20mm 밸브	Horizontal

시뮬레이션 결과는 아래와 같다.

- Mass Flowrate : 0.961214kg/s

- Pipe exit data

· pressure : 4.05 bar

· temperature : 63.97 degC

- ERPG 1(2ppm) : 2942.38m

- ERPG 2(20ppm) : 630.841m

- ERPG 3(50ppm) : 296.967m



Fig. 10 Case 3 diffusion range(Footprint)

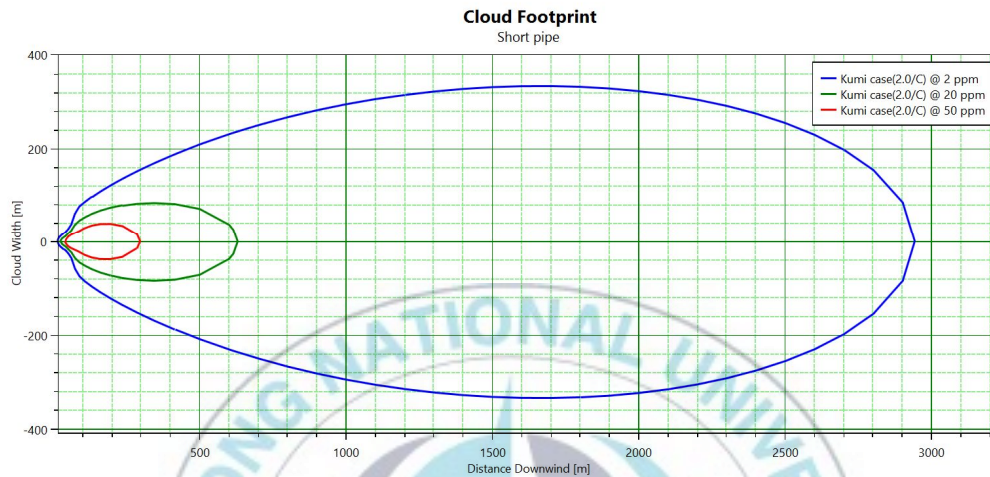
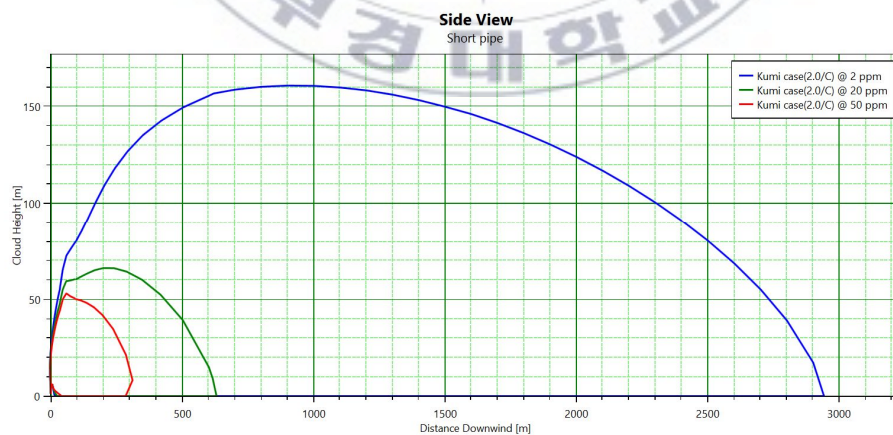


Fig. 11 Case 3 diffusion range(Side View)



PHAST 7.1을 이용하여 실제 사고와 가장 유사한 케이스로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과는 ERPG-2의 범위가 631m로 가장 적게 나타내고 있다. 사고현장 접근이 불가하거나 정확한 누출량을 산정하지 못하는 경우 상용 소프트웨어를 활용하여 좀 더 정확한 누출 모델링이 가능한 것을 확인하였다. 하지만 사고발생초기 PHAST 수행을 위해 필요한 공정정보를 확보하기는 쉽지 않으므로 다양한 방법으로 공정정보를 확보하려는 노력과 연구가 필요하며, 사고 대응을 위하여 기본적인 공정정보를 사전에 잘 확보하여야 한다는 것을 알 수 있다.



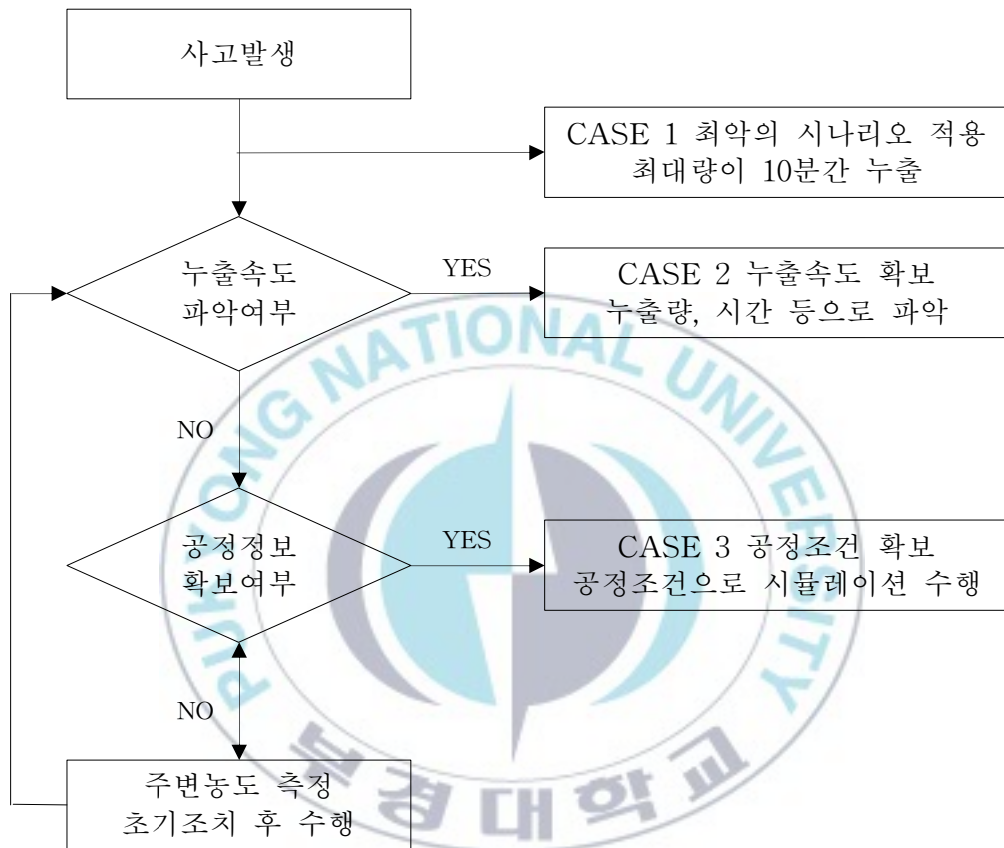
3.3 사고발생시 CA활용 PROCESS

사고발생부터 단계별로 수행 가능한 시나리오는 Fig.12와 같이 표현된다.

사고발생 초기 KOSHA GUIDE에 따른 최악의 누출시나리오에 따라 1차적인 CA가 가능하며, 초기조치 이후 파악된 누출속도를 바탕으로 2차 CA가 가능하다. 그리고 CA 소프트웨어에서 지원하는 시나리오에 기존에 파악하고 있는 공정정보를 이용하여 3차 CA가 가능 할 것이다. 하지만 무료로 배포하는 ALOHA로 많은 시나리오의 수행이 가능하지만 ALOHA가 지원하지 않는 몇 가지 CASE에 대해서는 상용 소프트웨어를 활용하여 CA가 가능하다.

그리고 누출속도나 공정정보 등이 전혀 파악이 안 된다면 주변농도를 측정하거나 초기 조치 이후에 재조사 하는 등의 방법의 비상대응이 필요하다.

Fig. 12 CA Process in initial response



제 4 장 고찰 및 결론

구미 불산사고를 되돌아보면 사고 당시 피해도 컸지만 1차 주민대피가 약 1시간 20분이 지난 시점에 이루어졌고 적절한 보호구 없이 누출지역에 투입되는 등 불산의 확산범위 예측의 애로로 인하여 2차 피해가 발생한 것을 알 수 있다. 본 사고로 화학물질 누출사고의 초기대응의 중요성을 전 국민에게 인식시키게 되었고 그 결과로 여러 분야에서 비상대응과 관련된 많은 연구가 수행되고 있다.

본 연구에서 여러 가지 피해 최소화 대책 중 정량적 위험성평가 기법인 Consequence Analysis를 통하여 사고초기 화학물질의 누출범위를 시뮬레이션하고 그 결과의 비상대응 적용성에 관한 연구를 수행하였다.

사고발생 직후부터 단계별로 수행 가능한 CA 모델을 정의하고 각 단계별 시뮬레이션 결과를 실제 구미불산사고의 비상대응결과와 비교해본 결과 사고발생 직후 얻을 수 있는 정보를 이용하여 시뮬레이션을 수행한 CASE 1의 경우 주민대피의 가이드로 사용하기에는 자칫 과잉대응의 문제로 이어질 수도 있는 매우 보수적인 결과를 나타내었다. 하지만 사고로 발생할 수

있는 최악의 피해에 대해 예측 할 수 있고 시뮬레이션 결과를 바탕으로 최악의 경우에 대한 대응계획의 수립이 가능하다.

사고현장에 도착하여 파악한 누출속도를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 CASE 2의 경우는 ERPG-2 기준이 1.4km로 실제 사고 시 적용된 대피범위인 1.3km와 유사한 결과를 보여주고 있다. 이는 실제 사고발생시 사고물질, 조치시간, 누출량(탱크의 잔량으로 추정)정도의 정보만 파악이 된다면 CA의 결과를 비상대응의 대피범위 선정 등에 직접 사용할만한 수준의 결과를 나타내는 것을 알 수 있다.

만약 누출량이나 누출속도 등을 파악하기 힘든 사고의 경우 CA 소프트웨어에서 제공하는 시나리오와 기존에 파악된 적절한 공정정보를 이용하여 시뮬레이션 수행이 가능한 것을 CASE 3를 통하여 알 수 있다. CASE 3의 경우 실제 사고와 매우 근사한 모델링이 되지만 무료로 사용가능한 ALOHA의 경우 그 사용범위가 제한적이었다.

실제 사고 시 CA를 Fig. 12에서 제시한 Process에 따라 수행을 한다면 단계적으로 누출범위를 예상할 수 있으며, 사고 초기 화학물질의 확산범위를 빠른 시간 내 확인이 가능하다. 그리고 정확한 CA의 수행을 위하여 누

출량, 공정조건 등을 이용하여 누출속도를 산정하는 다양한 방법에 대한 연구가 필요하다는 것을 알 수 있고 사고초기 신속한 CA 수행을 통하여 확보한 화학물질 누출범위는 주민대피나 방재인력의 보호구 착용 가이드 등의 초기대응에 충분한 활용가치가 있으며, 화학물질 누출사고로 인한 2차 피해 예방에 큰 도움이 될 것이라 판단한다.



참고문헌

- 1) 백종배, “화학공정에서의 정량적 위험성 평가를 위한 기반구조 구축에 관한 연구”, 광운대학교 박사학위논문, 1995
- 2) 신정수, “가스제조 시설에 대한 정량적 위험성 평가 및 모델 적용에 관한 연구”, 전남대학교 박사학위논문, 2011
- 3) Steven Hanna, “Comparison of Six Widely-Used Dense Gas Dispersion Models for Three Recent Chlorine Railcar Accidents”, Process Safety Progress(Vol.27, No.3), 2008
- 4) ALOHA TECHNICAL DOCUMENTATION, November 2013
- 5) Mary Evans, ALOHA Decision Kes, September 1996
- 6) 주현수, 이영수, 임오정, 유정민, “화학물질 누출사고의 위해성 평가를 통한 산업단지 환경영향평가 개선방안 연구”, 2013
- 7) 한국산업안전공단, 중대산업사고 사례집, 2005
- 8) 한국산업안전보건공단, 최악의 누출시나리오 선정에 관한 기술지침, 2012
- 9) 구미불산유출사고리포트, <http://report.safedu.org/>
- 10) 안전보건공단, 불화수소 누출사고 사례연구, 2013
- 11) 안전보건공단 물질안전보건자료, <http://www.kosha.or.kr/>
- 12) 기상청 지역별상세관측자료(AWS), <http://www.kma.go.kr/>

- 13) 고재선, “최근 불산 저장탱크에서의 가스 누출시 공정위험 및 결과영향 분석”, 한국재난정보학회, 2013
- 14) Palazzi, E., M. Defaveri, G. Fumarola, G. Ferraiol., “Diffusion from a Steady Source of Short Duration.”, Atmospheric Environment no. 16, 1982
- 15) Hanna, Steven R., Gary A. Briggs, Rayford P. Hosker, “Handbook on atmospheric diffusion: prepared for the Office of Health and Environmental Research, Office of Energy Research, U.S. Department of Energy”, 1982
- 16) Havens, Jerry A., and Thomas O. Spicer., “Development of an Atmospheric Dispersion Model for Heavier-Than-Air Gas Mixtures”, 1985