KIGAS Vol. 25, No. 4, pp 1~9, 2021
(Journal of the Korean Institute of Gas)
https://doi.org/10.7842/kigas.2021.25.4.1

3D 스캔과 FLACS를 활용한 화학플랜트 가스 누출의 계절별 위험성 및 피해영향 평가

김지영 · 김지유* · †김의수**
한국교통대학교 안전공학과 학사과정, *한국교통대학교 안전공학과 석사과정,
**한국교통대학교 안전공학과 교수
(2021년 7월 15일 접수, 2021년 8월 16일 수정, 2021년 8월 17일 채택)

A Seasonal Risk Analysis and Damage Effects Assessment by Gas Leakage of Chemical Plant using 3D Scan and FLACS

Jiyoung Kim · Jiyu Kim · †Euisoo Kim
Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation
(Received July 15, 2021; Revised August 16, 2021; Accepted August 17, 2021)

요 약

현대 화학 플랜트는 공정 및 설비가 복잡화, 세분화됨으로써 대규모 잠재 위험성이 증가하는 실정이다. 내부 화학물질이 난류, 층류, 압력, 온도, 마찰 등으로 인해 여러 조건하에 운영될 때 과도한 응력이 발생하고 이러한 발생 응력이 누적되면서 피로 등의 문제로 화학 설비 및 장치가 손상되거나 파열될 가능성이 존재한다. 사고통계에 따르면 여름철 화학 사고의 발생 빈도는 다른 계절에 비해 높게 나타나며 최근 5년간 발생한 화학 사고에서 누출에 의한 사고는 유형별 사고 중 압도적인 비율을 차지한다. 화학물질의 누출은 폭발 및 환경오염을 포함한 큰 인명 및 경제적 피해를 일으킬 수 있다. 이에 본 연구에서는 계절별로 화학 플랜트 배관 누출 시 위험성 및 피해영향 평가를 수행하기 위해 실제 프로필렌 누출사고 현장을 3D 스캐너를 활용하여 재구성하고 FLACS를 활용하여 계절별 최대농도, 끝점거리 및 확산 거동을 비교 분석함으로써 프로필렌의 계절별 누출 거동을 도출하였다. 그 결과 여름에 화학물질이 누출될 경우 다른 계절에 비해 위험성이 크게 나타나는 것을 확인하였으며 이를 통해 계절별 안전관리 대책 및 방안을 제시하였다.

Abstract - The process and facilities of modern chemical plants are becoming increasingly complex, there is possibility of potential risk. Internal chemicals generate stress concentration when operated due to turbulence, laminar flow, pressure, temperature, friction, etc. It causes cumulative fatigue damage, which can damage or rupture chemical facilities and devices. The statistics of chemical accidents found that the highest rate of occurrence was in summer, and in the last five years statistics on chemical accidents, leakage incidents make up a decent percentage of accidents. Chemical leaks can cause serious human damage and economic damage, including explosions and environmental pollution. In this study, based on the leak accident of chemical plant, the risk analysis, and damage effects assessment were estimated using a 3D scanner and FLACS. As a result, if chemicals leak in summer, the risk is higher than in other seasons, the seasonal safety management measures, and countermeasure were estimated.

Key words : seasonal risk analysis, damage effects assessment, chemical plant, propylene, FLACS

†Corresponding author:es92kim@ut.ac.kr
Copyright ⓒ 2021 by The Korean Institute of Gas

Ⅰ. 서 론

현대의 화학 플랜트는 소비자의 욕구를 충족시키기 위한 생산품 생산 및 제품의 고급화 등으로 공정 및 설비가 더욱 복잡해지고 세분화됨으로써 대규모 잠재 위험성이 증가하는 실정이다. 최근 5년간 화학 플랜트가 속하는 '제조시설 등 가스 허가업소'에서 발생한 사고는 총 61건이며 그 중 가스 누출로 인한 사고는 전체 사고의 57.4%(35건)를 차지한다.[1] 이러한 화학 플랜트 사고의 주요 원인은 화학물질의 난류, 층류, 마찰 등으로 인한 누출사고가 대부분을 차지하며 최근 5년간 전국 화학사고 현황에 따르면 여름철(7~8월) 화학 사고가 월평균 9.2건으로 여름철을 제외한 시기(월평균 6.2건)보다 1.48배 높게 나타났다. 상기와 같이 화학 사고의 빈도는 계절별로 상이하게 나타나는데 계절적 특성에 따른 누출 확산과정 및 피해 정도를 파악하기 위해서는 수치해석 시뮬레이션을 이용한 누출해석이 불가피하다. Jang은 CFD를 활용한 누출 방향에 따른 피해영향을 분석하여 설비 밀집도와 폭발 압력이 비례하는 것을 확인하였다.[2] Ko et al.은 안전시설이 없는 위험물저장시설에서의 톨루엔 누출 위험성을 CFD를 이용하여 분석하였으며 다양한 변수(온도, 상대습도, 풍속 등)가 누출에 끼치는 영향을 도출하였다.[3] Kim et al.은 KORA 프로그램을 활용하여 계절별 기상 조건에 따른 염소 누출사고의 위험성을 평가하여 여름의 기상 조건에서 누출 영향범위가 확대되었음을 확인하였다.[4] 이렇듯 기존의 화학 플랜트 누출해석과 관련된 연구를 살펴보면 실제 사고 현장의 설비 및 환경을 고려하여 계절별 누출 거동을 분석한 연구는 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 실제 사고 현장의 재현을 위해 누출이 발생한 배관과 그 주변을 3차원 레이저 스캐너를 사용하여 해석에 직접 적용 가능하도록 모델링하였고 상용해석 프로그램인 FLACS를 활용하여 누출 가스의 계절별 최대농도, 끝점거리 및 확산 거동을 비교 분석함으로써 누출 확산과정을 재현하고 이로 인한 위험성 및 피해영향을 평가하고자 한다.

Ⅱ. 사고 개요 및 재구성

2.1. 사고 개요

본 연구에서 적용한 사고는 Fig. 1과 같은 흐름을 통해 고순도 IPA(Isopropyl alcohol)를 생산하는 공정으로 공정 내 배관 중 직경이 8inch에서 12inch로 확장되는 배관 굴곡부의 균열로 인해 배관에 흐르던 프로필렌이 누출된 사고이다. 산업안전보건공단 화학물질 유통 사용 실태조사 보고서에 따르면 IPA는 반도체 세척 공정을 비롯한 아세톤, 화장품, 의약품(소독약) 등의 원료로 널리 사용되는 화학물질로 증기 또는 가스는 심각한 화재 위험성을 갖고 있으며, 산화제와의 반응성으로 접촉 시 화재 및 폭발 위험이 증가하는 특성이 있다. 이렇듯 IPA 제조 공정은 인화성이 높은 화학물질을 다량으로 취급하여 가동 중 장비의 과열이나 누설, 취급 부주의로 쉽게 화재가 발생하거나 화학물질의 강한 부식성으로 장비, 덕트 및 실내 내장재가 쉽게 부식되어 손상될 위험이 존재한다. 따라서 배관 균열 원인은 지름이 다른 두 배관을 연결하는 굽은 곡관 형상의 특징과 내부에 빠르게 흐르는 유체로 굴곡부에 지속적인 응력 집중을 유발하였으며, 그로 인해

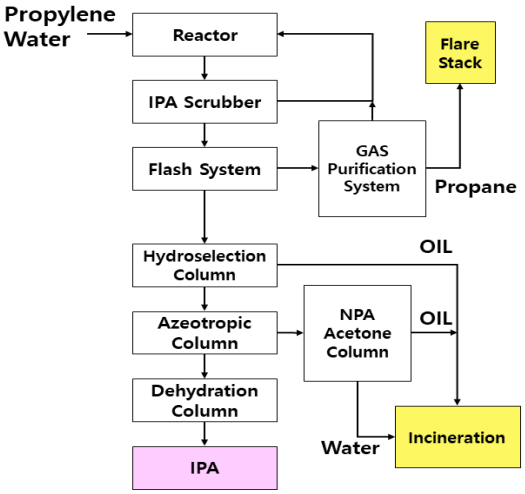


Fig. 1. Manufacturing process chart of IPA process.

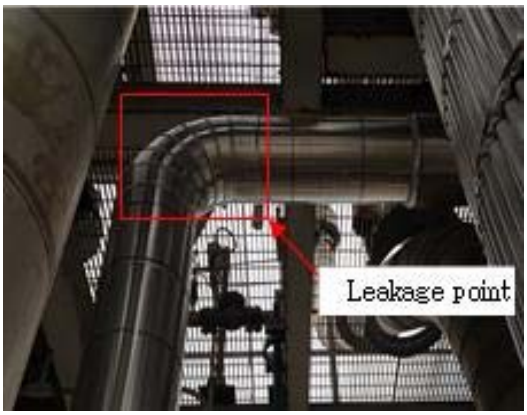


Fig. 2. Leakage point of accident site.

배관 굴곡부의 피로한도를 초과하여 피로 파괴가 발생하였고 누출 지점은 Fig. 2와 같다.

2.2. 현장 재구성

현장 재구성은 3D 스캐너를 이용한 스캔 작업을 통해 이루어지며 실제 사고 현장을 그대로 보존하여 정확한 치수 데이터 및 내부 물체에 관한 정보를 3차원 상에서 확인 가능하다는 장점을 갖고 있다. 본 연구에서는 실제 배관 누출사고가 발생한 현장을 3차원 광대역 레이저 스캐너를 이용하여 재구성한 형상을 FLACS 프로그램에 활용하기 위해 전산유동해석에 사용될 수 있는 유한체적모델을 재구성하였고 본 모델을 기반으로 계절별 누출 위험성 및 피해영향을 분석하였다. Fig. 3에서 보듯 실제 누출사고 현장을 스캐너를 통해 스캔한 후 데이터 후처리 과정을 거쳐 우선 스캔 데이터의 노이즈를 제거하였다. 이후 역설계 소프트웨어인 Geomagic Design X 프로그램을 이용하여 역설계 및 형상 최적화 작업을 진행하였다.[5] 누출사고의 피해 범위는 매우 광범위하므로 균열이 발생한 배관과 주변 및 사고 대상 건물의 형상을 스캔하였고 이를 FLACS 프로그램에서 사용할 수 있도록 최종 모델링하여 이를 Fig. 4에 나타내었다.[6]

2.3. 사고시나리오 선정

본 연구에서는 유해화학물질이 화재, 폭발 및 누출되어 환경과 인간에 미치는 영향을 평가하기 위해 화학물질안전원 사고시나리오 선정에 관한 기술 지침에 따라 사고시나리오 중 영향범위가 최대인 최악의 사고시나리오를 선정하여 계절별 누출 해석을 진행하였다.[7] 화재 및 폭발은 고려하지 않았으며, 누출물질의 인화 하한 농도에 이르는 지점을 끝점으로 하였다. 끝점(End point)은 누출된 물질의 폭발하한농도(LEL) 100%인 지점을 적용하였고 대기 온도 25℃, 대기습도 50%, 풍속 1.5m/s, 대기안정도는 매우 안정인 상태의 F로 적용하여 최악의 사고시나리오를 분석하였다. 누출조건은 배관 내 화학물질의 최대수량이 10분

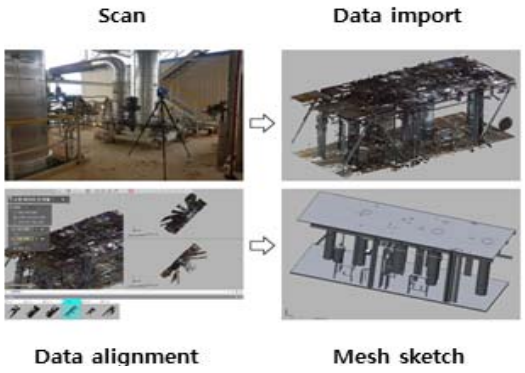


Fig. 3. Converting 3D scanner model to CFD based model.

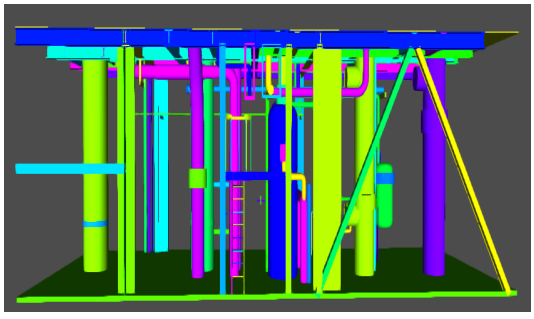


Fig. 4. 3D Modeling of accident scene and importing to FLACS.

Table 1. Condition of Worst leakage accident scenario

Material	Propylene
Operating Pressure	41.5 (kg/cm^2)
Design Pressure	55 (kg/cm^2)
Operating Temperature of pipeline	145 (℃)
Design Temperature of pipeline	250 (℃)
Leakage point	-
Wind speed	1.5 (m/s)
Pasquill class	F(stable)
Temperature	25
Humidity	50
Maximum Storage Capacity	-
Leakage Time	10 (m/s)
End point	100% of LFL
Leakage Rate	Maximum Storage Capacity/600

동안 누출되는 것으로 산정하였고 사고시나리오 조건은 Table 1과 같다. 계절별 위험성 및 피해영향을 비교 분석하기 위해 여름철, 겨울철 계절에 따른 대기 온도, 풍속, 대기안정도를 초기 환경조건에 반영하였다.

Ⅲ. 가스누출 확산 해석 및 평가

3.1. 해석개요 및 경계조건

본 연구에서 활용한 FLACS 프로그램은 가연성 또는 독성 가스의 확산 등에 사용하는 전산 유동해석 코드로 사고 전개 과정 및 피해 결과를 정밀하게 분석하고 예측할 수 있고 가상 시뮬레이션을 통해 최적화된 리스크 분석을 수행할 수 있다.[8] 누출확산 해석은 가스누출 시 누출 특성, 누출 형상을 가시화하고 다양한 조건 및 환경에서의 가스의 유동 및 확산 특성을 분석하여 1차 사고 이후 2차 사고의 가스누출 및 확산 거동을 예측한다.

누출확산 해석의 주요 지배 방정식은 LES(Large eddy simulation), DNS(Direct numerical simulation), RANS(Reynolds averaged navier stoke)로 구분되며 이러한 기법들은 편미분 방정식의 수치해석 결과로 실제 실험하기 어려운 환경에서의 사고 결과와 시간에 따른 변화 결과를 정밀하고 정확하게 얻을 수 있다. 다음은 연속 방정식(1), 운동량 방정식(2), 에너지 전달 방정식(3)으로 난류(Turbulence) 모델은 식(4)에서 제시된 $K-\varepsilon$ 모델이며 이를 통해 계산된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j) = \frac{m}{v} \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_i u_j) = -\beta_v \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \sigma_{ij}) + F_{0,i} + \beta_v F_{w,i} + \beta_v (\rho - \rho_0) g_i \tag{2}$$

ρ : $fluid density$
u : $fluid\ velocity$
v : $velocity$
m : $mass\ flow$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j h) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \frac{\mu_{eff}}{\sigma_h} \frac{\partial h}{\partial x_j}) + \beta_v \frac{Dp}{Dt} + \frac{Q}{V} \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + \beta_v P_k - \beta_v \rho \varepsilon \tag{4}$$

μ : $fluid viscocity$
Q : $volume\ flow rate$
P : $fluid pressure$
h : $height\ of\ fluid$
k : $turbulent\ kinetic energy$
ε : $dissipation\ velocity$

화학 플랜트 설비 내 가스 누출 해석을 위해 적용된 경계조건은 Table 2와 같고 구조물의 크기를 고려하여 Fig. 5와 같이 격자를 생성하였다. 격자(Grid)는 구조물이나 건물의 유동 시뮬레이션에 있어 정밀한 해석이 필요한 경우 좁은 간격으로 생성해야 하므로 본 연구에서는 제어볼륨을 X=74m, Y=63m, Z=27m로 구성하고 Grid cell size는 X, Y, Z축 0.5m로 생성하였다. 그 결과 대상 설비의 형상과 물질의 특성을 고려한 전체 격자수는 21,000개로 구성하였다.[9]

Table 2. Grid status for FLACS analysis

Contents	X	Y	Z
Control volume (m)	74	63	27
Min control vol size (m)	0.30	0.30	0.60
Max control vol size (m)	17.89	4.61	2.89
Max percentage difference (%)	12.50	9.54	11.76
Occurred at indices	46	4	9
Max aspect ratio			59.62
Total of control volumes defined (ea)			125874

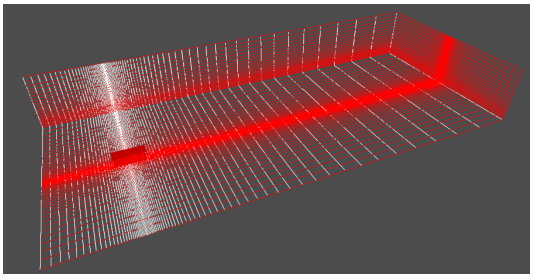


Fig. 5. Configuration of grid generation for 3D model.

3.2 가스 누출조건

해석상에서 누출조건은 사고 당시 누출 상황을 고려하여 선정하였고 Fig. 6에 나타낸 구조물 내·외부 총 12곳의 MP(Monitor Point)에서 프로필렌 가스의 누출해석을 진행하였다. 누출 시 확산 거동을 살펴보기 위해 누출 배관을 기점으로 동일 간격(6m)의 MP를 생성하였다. 구조물 공간 내 경계조건은 가스가 노즐에서 분사되는 것으로 설정하였고 가스 누출조건은 Table 3, 4에서 보듯 화학물질안전원 사고시나리오 선정에 관한 기술 지침에 따른 최악의 사고시나리오와

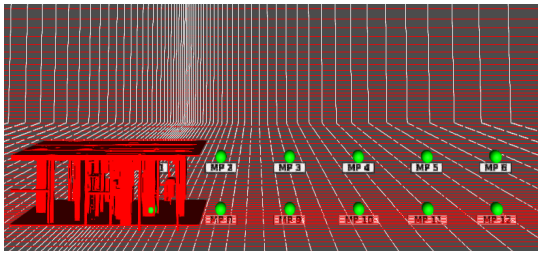


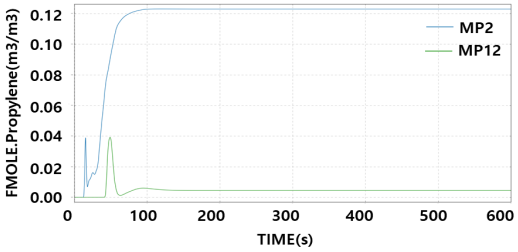
Fig. 6. Setting of point for leakage spot.

Table 3. Input and boundary condition for FLACS analysis

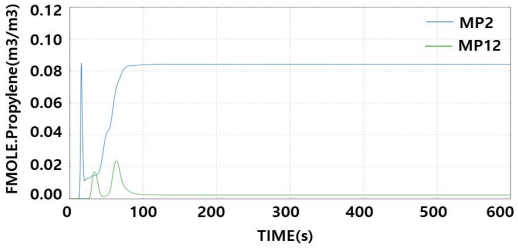
Boundary Condition	
XLO	Wind
XHI	Nozzle
YLO	Wind
YHI	Wind
ZLO	Wind
ZHI	Nozzle
Leaks	
Mass flow rate [kg/s]	10.544
Leak type	JET
Grid	
Total No. of Control Volumes	21000
Max aspect ratio	59.62
Simulation Conditions	
Gas composition	Propylene=1
Ambient pressure [Pa]	101325
CFLC	20
CFLV	2
DPTLOT	0.25

Table 4. Leakage condition for FLACS analysis

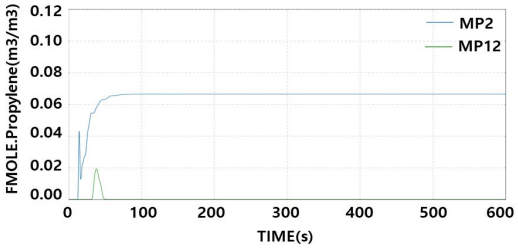
Simulation conditions	Summer	Worst leakage accident scenario	Winter
Ambient temperature [℃]	30.2	25	-8.7
Wind speed [m/s]	2.6	1.5	3.3
Pasquill class	None	F	None



(a) Summer



(b) Worst leakage accident scenario



(c) Winter

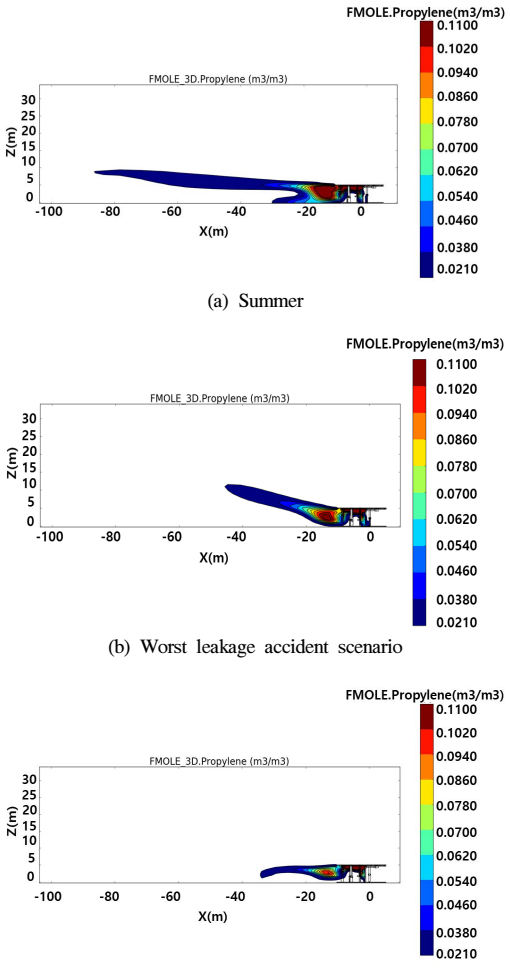
Fig. 7. Trend of propylene leakage.

기상청 통계자료를 활용하였다. 계절 간 결과에 뚜렷한 차이를 확인하기 위해 기상청 종합기후정보통계의 여름철 평균 기온이 가장 높은 대구(30.2℃)와 겨울철 평균 기온이 가장 낮은 대관령(영하 8.7℃)을 적용, 대구의 여름철 평균풍속은 2.6m/s, 대관령(강릉)의 평균풍속은 3.3m/s로, 가스 조성은 프로필렌 100%로 해석을 진행하였다. 시뮬레이션 시간을 좌우하는 격자 크기 및 개수, CFLC(Courant- Friedrich-Levy) 값은 격자 크기와 시뮬레이션 시간 step을 연결하여 출력데이터를 0.25초 간격으로 저장하도록 설정하였다.[10]

3.3. 해석결과 및 고찰

(1) 최대 누출농도

시간에 따른 농도변화를 살펴보면 Fig. 7과 같이 해석상에서 프로필렌 가스가 10분(600s) 전량 누출되어 80 ~ 110초까지 증기운이 폭넓게 확산되었고 이후 증기운의 크기는 큰 변함없이 평형상태를 이루었다. 누출이 발생한 배관과 가장 근접한 MP2는 가스 농도가 최대인 지점으로 여름(0.12%), 최악의 사고시나리오(0.08%), 겨울(0.06%) 순으로 농도가 나타났으며 겨울 끝점거리 35m 지점에 위치한 MP12 지점에서도 여름(0.04%), 최악의 사고시나리오(0.024%), 겨울

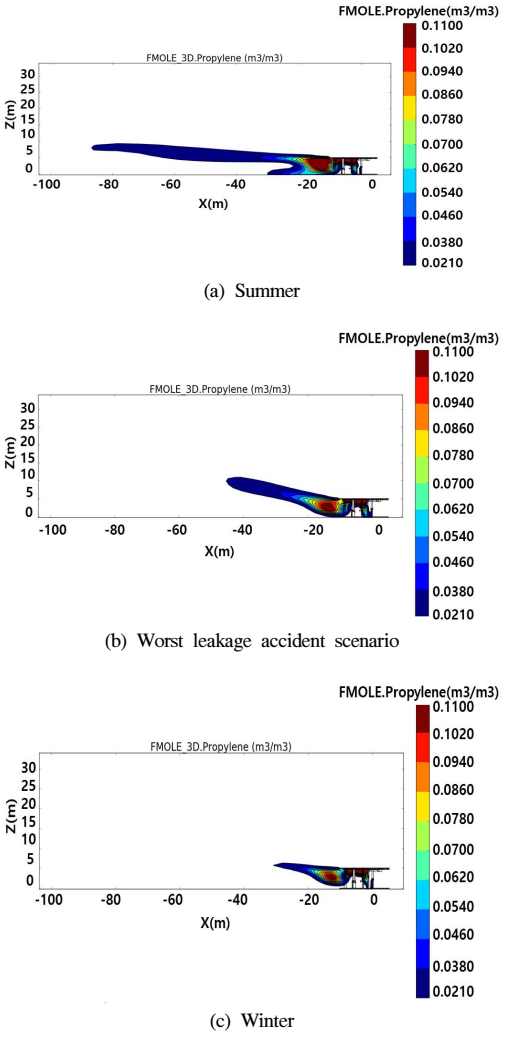


(a) Summer

(b) Worst leakage accident scenario

(c) Winter

Fig. 8. Result of Endpoint distance by FLACS.



(a) Summer

(b) Worst leakage accident scenario

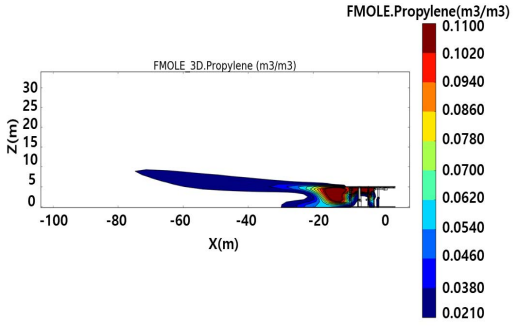
(c) Winter

Fig. 9. Gas concentrations at End point of Summer(86m).

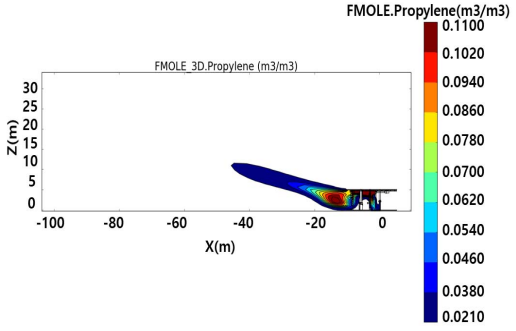
(0.02%) 순으로 농도가 확인되므로 여름에 화학물질이 누출될 경우 타 계절에 비해 프로필렌의 인체 노출 위험성이 증가할 것으로 판단된다.

(2) 끝점거리

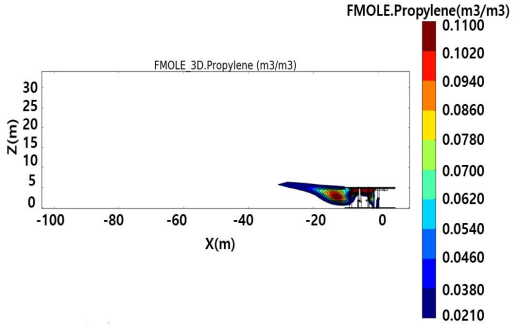
프로필렌 가스 확산에 따른 최대 끝점거리는 Fig. 8과 같다. (a)는 여름, (b)는 최악의 사고시나리오, (c)는 겨울의 최대 끝점거리이고 시간에 따른 결과이다. 여름의 최대 끝점거리는 86m로 확인되었고 최악의 사고시나리오의 최대 끝점거리는 46m이며 겨울의 최대 끝점거리는 35m이다. 이는 화학물질이 여름(6, 7월, 8월)에 누출될 경우 누출원으로부터 약 90m까지 연소범위의 영역이 형성되는 것으로 이는 최악의 사고시나리오 및 겨울에 누출되는 경우 대비 각 약 1.8배, 약 2.0배 정도의 값으로 이에 비례하여 위험성 및 피해영향 정도도 증가할 것으로 판단된다.



(a) Summer

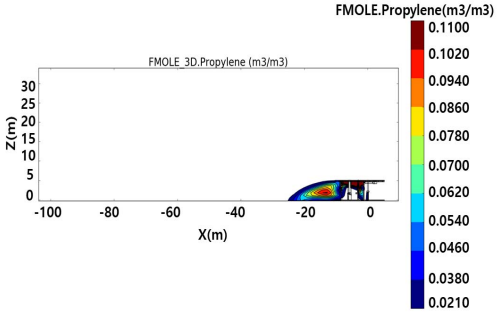


(b) Worst leakage accident scenario

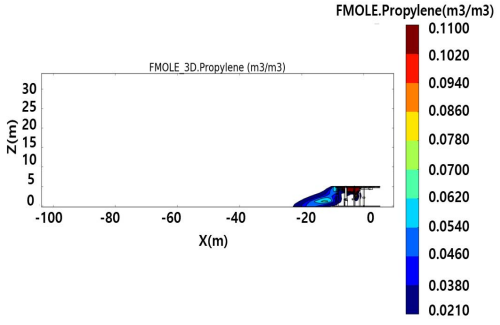


(c) Winter

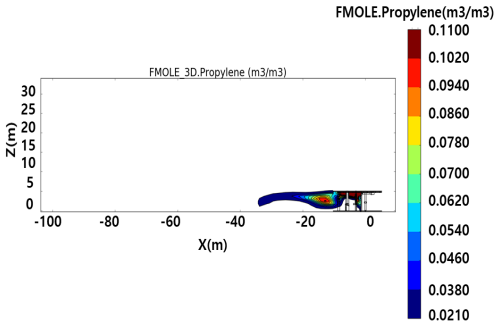
Fig. 10. Gas concentrations at End point of Worst Leakage Accident Scenario(46m).



(a) Summer



(b) Worst leakage accident scenario



(c) Winter

Fig. 11. Gas concentrations at End point of Winter(35m).

(3) 확산 속도

Fig. 9는 여름 끝점거리(86m) 도달시간에 따른 누출거리를 비교한 그림이다. 확산속도는 특정거리에 도달하는 시간으로, 본 연구에서는 특정 도달시간에 대한 누출거리를 비교 분석하였다.[11]누출 시작 이후 90초에 여름은 86m, 최악의 사고시나리오는 45.2m, 겨울의 경우는 30.9m 지점에 도달하여 화학물질이 여름에 누출될 경우 이는 최악의 사고시나리오 및 겨울에 누출되는 경우 대비 각 약 1.9배, 약 2.8배 정도의 값으로 이에 비례하여 피해 영향 범위가 더 증가할 것으로 판단된다.

Fig. 10은 최악의 사고시나리오 끝점거리(46m) 도달시간에 따른 누출거리를 비교한 그림이다. 누출 시작 이후 98초에 끝점거리에 해당하는 46m 지점에 도달하였으며 동일 시점에 대하여 여름의 경우 74.5m, 겨울의 경우 45.5m로 화학물질이 여름에 누출될 경우 최악의 사고시나리오 및 겨울에 누출되는 경우와 비교하여 각 약 1.6배. 약 1.7배 확산될 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 11은 겨울 끝점거리(35m) 도달시간에 대한 누출거리를 비교한 그림이다. 누출 시작 이후 37초에 끝점거리에 해당하는 35m 지점까지 도달하였으며 여름의 경우 74.8m, 최악의 사고시나리오의 경우는 21.5m로 화학물질이 여름에 누출될 경우 최악의 사고시나리오 및 겨울에 누출 발생과 비교하여 각 약 3.5배, 약 2.2배 확산될 수 있어 사고 발생 시 초기대응이 중요할 것으로 판단된다.

누출 초기의 증기운은 90초까지 빠르게 확산되어 끝점거리에 도달한 후 이후부터 증기운의 크기가 감소하여 거동이 유지되는 경향을 보인다. 영상의 온도에서 발생한 화학사고는 가스가 누출 초기에 빠르게 확산하므로 신속한 초기 대응으로 피해를 최소화해야 하고 지속적인 연구를 통해 계절별 누출 확산 경향 분석과 안전대책을 구체화해야 한다고 판단된다.

Ⅳ. 결 론

본 연구는 화학 플랜트 배관 결함(크랙)으로 인해 화학물질이 누출되었을 때 계절에 따른 누출 물질의 초기 유동과 확산 거동을 비교·분석하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 최대 누출농도 측면에서 프로필렌 농도를 비교한 결과 대기 온도와 최대농도가 비례하여 화학물질이 여름에 누출될 경우 최악의 사고시나리오 및 겨울에 누출될 경우 대비 프로필렌이 최대 1.5배까지 검출되므로 인체 노출 위험이 더 크다고 판단된다.

(2) 끝점거리 측면에서 프로필렌의 누출거리를 비교한 결과 대기 온도와 끝점거리가 비례하여 화학물질이 여름에 누출될 경우 최악의 사고시나리오 및 겨울에 누출되는 경우 대비 프로필렌이 최대 2배까지 확산되어 피해 범위가 더 넓게 형성되므로 위험성이 크다고 판단된다.

(3) 확산 속도 측면에서 프로필렌의 누출 거동을 비교한 결과 대기온도와 확산 속도가 비례하여 화학물질이 여름에 누출될 경우 최악의 사고시나리오 및 겨울에 누출되는 경우 대비 프로필렌이 최대 3.5배까지의 거리 차이를 보이므로 피해영향 정도도 증가할 것으로 판단된다.

종합적으로 화학물질이 여름에 누출되었을 경우 타 계절에 비해 프로필렌이 최대농도로 검출되고, 끝점거리가 가장 길게 형성되며, 확산 속도가 빠르기에 위험성 및 피해영향이 증가할 것으로 판단된다. 계절에 따른 누출 거동에 차이가 나타나므로 안전관리 대책 및 방안을 계절별로 구체화하여 제시해야 할 필요가 있다고 보여진다.

REFERENCES

[1] Annual Gas Accident Statistics, Gas Accident Almanac, Korea Gas Safety Corporation, (2016-2020)

[2] Jang, C. B., “ 시뮬레이션 기법을 활용한 화학사고 예방연구”, Occupational Safety and Health Research Institute (OSHRI), (2015)

[3] Ko, J. S., Kim, J. S., “Numerical Study on Atmospheric Dispersion and Fire Possibility in Toulene Leakage”, *Fire Safety and Engineering*, 31(3), 1-10, (2017)

[4] Kim, H. S., Jeon, B. H., “Development Plan of Accident Scenario Modeling Based on Seasonal Weather Conditions-Focus on Chlorine Leakage Accident-”, *Journal of the Korea Academia Industrial cooperation Society,* 18(10), 733-738, (2017)

[5] 3D Systems Inc, “Geomagic Design X User’s Guide”, 2020.

[6] Kim, E. S., “A Study on Calculation of Leakage for LPG Explosion Accident using 3D Scan and CFD”, *Journal of the Korean Society of Safety*, 33(3), 1-7, (2018)

[7] National Institute of Chemical Safety, ″Technical Guidelines for the Selection of Accident Scenar-

ios“, National Institute of Chemical Safety, 2018
[8] Gexcon, “FLACS-CFD v20.1 Users Manual”, (2020)
[9] Cho, W. S., Kim, E. S., “An Estimation of the Consequence Analysis for Asphyxiation Accident in Confined Space using C.F.D”, *Journal of the Korean Society of Safety*, 33(5), 28-34, (2018)
[10] Kim, E. S., ″A Study on Damage Effects Assessment for Asphyxiation Accident due to Malfunction of Gas Type Fire Extinguishing System″, *KIGAS*, 24(2), 36-43, (2020)
[11] Min, D. C., Gye, H. R., Kim, S. T., Kim, J. M., Kwon, J. R., Kim, B. D., “Effects on the Gas Dispersion by Changed Gas Composition”, *Journal of Energy Engineering*, 24(4), 117-123. (2015)