

# 아크릴로니트릴 누출에 따른 독성, 복사열 및 외부영향에 의한 아파트의 성능위주설계 방안

오 승 주\* · 한 상 훈\* · 공 하 성\*\*

\*우석대학교 일반대학원 소방안전공학과 박사과정 · \*\*우석대학교 소방방재학과 교수

## Performance Based Design Plan for Apartment that Reflects External Effects from Toxicity and Radiant Heat Due to Acrylonitrile Leakage

Seongju Oh\* · Sanghun Han\* · Hasung Kong\*\*

\*Ph.D. Candidate Dept. of Fire Protection & Safety Engineering, Woosuk University

\*\*Associate Professor, Fire and Disaster Prevention, Woosuk University

### Abstract

This study aims to present a performance based design for apartments through evacuation safety assessment and damage impact assessment due to acrylonitrile leakage. In the evacuation safety evaluation, ASET was analyzed as 25 min or more and 60 min or less when the ventilation rate was once per hour, and RSET was 22.6 min. Evacuation safety is satisfied when the number of ventilation per hour is less than 1, so it is necessary to design the number of ventilation to be 1 or less. In the damage impact assessment, the 0% structural collapse rate due to overpressure was measured to be between 71m and 90m, and the 0% fatality rate due to radiant heat was measured to be between 136m and 353m. Therefore, maintain a safe distance of 353m or more.

**Keywords :** Leakage, ASET, RSET, Safety distances, Lethality

### 1. 서 론

아크릴로니트릴(Acrylonitrile)은 「위험물안전관리법」에서 제4류 인화성액체 중 제1석유류이고 지정수량이 200L인 위험등급Ⅱ의 위험물에 해당한다.[1] 제조 및 저장은 「위험물안전관리법」에 의해 제조등에서 하고 있다.[2] 현재 위험물의 제조소등은 108,344개소가 있으며 최근 5년간 위험물사고는 335건이 발생하였다.[3] 2013년 부산항 케미컬 운반선에서 아크릴로니트릴 4천 톤의 폭발로 선박과 해상에 피해가 발생했고 2015년 중국 산동성의 R화학공업에서 아크릴로니트릴의 폭발사고로 9명의 부상자가 발생했고 반경 5km까지 피해 영향을 받았다.[4] [5] 또한, 성능위주 설계는 「소방시설 설치 및 관리에 관한 법률」에서 “건축물 등의 재료, 공간, 이용자, 화재

특성 등을 종합적으로 고려하여 공학적 방법으로 위험성을 평가하고 그 결과에 따라 안전성능이 확보될 수 있도록 특정소방대상물을 설계하는 것”을 말한다.[6] 아크릴로니트릴을 제조·저장·취급하는 시설에서 누출이 발생하면 독성, 화재 및 폭발의 영향이 제조소등의 주변지역에 미치므로 제조소등의 근처에 아파트를 신축할 경우 이용자, 공간 등을 종합적으로 고려한 공학적인 방법으로 인명안전의 확보가 요구되고 있다. 따라서 아크릴로니트릴의 위험물이 누출한 경우 인명안전을 확보하기 위한 성능위주설계에 대한 논의가 필요한 실정이다.

기존의 선행연구를 분석하면 양정선 외3(2002)은 섬유제조공장의 근로자에 대한 아크릴로니트릴의 노출평가를 실시하여 기준치를 초과하는 아크릴로니트릴에 누출에 대한 건강관리의 필요성을 연구하였다.[7] 이유진 외

†Corresponding Author : Hasung Kong, 443, Samnye-ro, Samnye-eup, Wanju-gun, Jeonbuk State, E-mail: 119wsu@naver.com  
Received June 07, 2024; Revision June 20, 2024; Accepted June 28, 2024

1(2006)은 아크로니트릴 원료의 배합, 중합 및 포장 공정 중에서 아크로니트릴의 농도를 측정한 결과 원료의 배합 과정에서 아크릴로니트릴 농도가 가장 높은 것으로 나타나 배합공정의 안전관리가 필요함을 주장하였다. [8] 조지은(2022)은 피난 시뮬레이션 프로그램인 Pathfinder를 이용하여 NFPA 101(인명안전) 코드에 따른 문과 계단의 조건을 적용하여 거주자 배치를 세대별 3명, 4명, 5명 또는 6명이 거주하는 가구당 수용 인원수를 분석하여 아파트의 피난안전성 확보방안을 제시하였다. [9] 김학경(2020)은 국내 아파트를 대상으로 CFD 해석을 통하여 화염확산 및 연기전파속도를 억제할 수 있는 화재안전성을 평가하기 위하여 CFD 해석 결과를 토대로 평가항목별 가중치를 설정하여 아파트의 화재안전성능평가 방법을 제안하였다. [10] 송영주외 3(2021)은 주거용 구조의 오피스텔 성능위주설계에서 재실자 밀도는 주거용도인 18.6 m<sup>2</sup>/인, 피난 지연시간을 적용하여 현실성 있는 성능위주설계 방안을 제안하였다. [11]

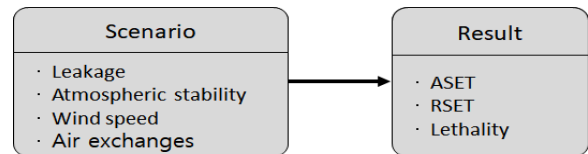
기존연구는 아크릴로니트릴의 누출에 따른 근로자의 건강관리, 아크릴로니트릴의 제조소등에서 공정에 따른 누출농도 관리, 아파트에서 세대당 거주인원에 따른 피난 안전성 확보방안, 아파트의 화재안전성능평가 및 오피스텔에서 성능위주설계 방안에 대한 연구가 활발하게 이루어졌으며 아크릴로니트릴의 누출에 따른 성능위주설계에 관한 선행연구는 없는 실정이다.

이 연구는 기존연구와 달리 아파트 내부의 요인이 아닌 제조소등에서 아크릴로니트릴이 누출되어 아파트에 영향을 미치는 외부요인에 따른 독성, 과압 및 복사열 피해 영향, 아파트의 피난시뮬레이션 및 피해 영향평가를 적용하는 공학적인 방법을 이용하여 아파트의 성능위주설계 방안을 제시한다는 점에서 차별성이 있다.

이 연구에서는 제조소등에서 아크릴로니트릴 누출에 따른 주변지역의 독성, 과압 및 복사열에 대한 영향평가와 피난안전성 평가를 통해 성능위주설계를 하고자 한다. 첫째, 장외영향평가프로그램인 ALOHA를 이용하여 아크릴로니트릴의 AEGL(Acute Exposure Guideline Level), 과압 및 복사열을 분석하여 ASET(Available Safe Egress Time)을 산정한다. 둘째, 제조소등 주변지역의 아파트에 대하여 피난평가프로그램인 Pathfinder를 이용하여 RSET(Required Safe Egress Time)를 산정한다. 셋째, 복사열 및 과압에 대한 영향평가를 실시하여 치사율이 0%인 수평 거리를 산정한다. 마지막으로 ASET, RSET 및 산출된 치사율을 통해 안전성을 평가하여 성능위주설계 방안을 제안하고자 한다.

## 2. 실험구성 및 모델

아크릴로니트릴은 독성이 있고, 흡입하거나 피부에 접촉할 경우 유해하며 작업 환경에서는 적절한 보호 장비를 착용하고 환기 시스템을 갖추는 것이 중요하다. 장기간 노출 시 발암성 위험, 무색의 액체, 자극적인 냄새, 끓는점이 약 77.3° C로 누출될 경우 건강유해성, 화재 및 폭발 위험성이 크다. 따라서 아크릴로니트릴 확산농도가 누출량, 환기조건 및 대기상태에 영향을 받으므로 아크릴로니트릴의 누출량, 풍속, 대기안정도, 실내 환기율 등에 따른 독성, 과압 및 복사열을 분석한다. 실험결과 산출된 ASET, RSET 및 치사율에 의하여 안전성평가를 실시하고 안전 성능에 따른 아파트의 설계방안을 제안하고자 한다. 실험 모델을 Figure 1에 표시하였다.



[Figure 1] Experimental Model

## 3. 시나리오 구성

### 3.1 ALOHA, Pathfinder 프로그램 및 피해 영향평가

피해예측은 ALOHA 프로그램, 피난 평가는 Pathfinder 프로그램 및 피해 영향평가는 「KOSHA GUIDE P-88-2023」의 기준에 따라 실시한다.

첫째, ALOHA 프로그램은 미국환경보호청(United States Environmental Protection Agency, EPA)와 국립해양기상청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 개발한 ALOHA 5.4.7를 사용하였다. ALOHA는 Gaussian 대기 확산과 Dense Gas 확산 모델을 사용하여 공기보다 무거운 아크릴로니트릴의 누출도 적용할 수 있고 AEGL-1,2,3 농도별 영향 범위, 0.5-30psi 과압 및 1-40kw/m<sup>2</sup> 복사열을 그림으로 자동 표출한다. 따라서 독성, 화재 및 폭발의 영향 범위를 예측할 수 있는 도구이다.

둘째, 피난 시뮬레이션은 미국 Thunderhead Engineering사에서 개발한 Pathfinder 2022 프로그램을 사용하였다. Pathfinder 프로그램은 FDS를 기반으로 하는 피난 시뮬레이션 프로그램으로 캐드 도면의 피난통로에서 재실자의 이동시간을 계산한다.

마지막으로 복사열 및 과압에 대한 피해 영향평가는 「KOSHA GUIDE P-88-2023」의 기준에 따라 치사율을 산정한다.[12] 열복사로 인한 화재 사망의 프로빗 변수 Pr는 식 (1)과 같다.

$$Pr = -36.38 + 2.56 \ln(tQ^{4/3}) \quad \text{식 (1)}$$

여기서, t는 노출 시간(S), Q는 복사열 강도(W/m<sup>2</sup>)이다. 폭발에 따른 구조물 붕괴의 프로빗 변수 Pr 은 식 (2)와 같다.

$$Pr = 5.0 - 0.26 \ln[(17,500/Ps)^{8.4} + (290/Is)^{9.3}] \quad \text{식 (2)}$$

여기서, Ps는 피크과압(N/m<sup>2</sup>), Is는 임펄스(N · s/m<sup>2</sup>)이다. 폭발 지속시간은 0.05초를 적용한다.[13] 액면 화재와 비등액체증기폭발의 치사율이 0%인 복사열량은 각각 0.3kw/m<sup>2</sup>, 13kw/m<sup>2</sup> 이하이고 구조물의 붕괴율이 0%인 압력은 1psi 이하이다.

## 3.2 사고시나리오

### 3.2.1 아크릴로니트릴 누출에 따른 사고시나리오

아크릴로니트릴 누출사고시나리오는 「화학물질안전원 지침(2021-3호)」의 사고시나리오 선정 및 위험도 분석에 관한 기술지침을 반영하여 결정하였다. 누출사고시나리오는 아크릴로니트릴의 저장 탱크가 파열되어 누출하는 것으로 가정하였다. 아크릴로니트릴 누출조건은 예방규정작성기준량에 따라 제조소 3ton, 옥외저장소 30ton 및 옥외 탱크저장소 60ton의 3종, 대기안정도는 A, D, F 3종으로 선정하였다. 영향 범위를 평가하기 위한 끝점농도는 AEGL-2 값인 1.7ppm에 도달하는 지역, 누출 공의 직경은 5cm, 대기 온도는 25℃, 상대습도는 50%, 풍속은 1.5m/s, 3m/s, 5m/s 3종으로 선정하였다. 먼저 실내 환기율을 시간당 4회인 경우 사고시나리오 1-12를 적용하고자 한다. 사고시나리오 1은 풍속 1.5m/s, 대기안정도 F, 기온 25℃, 상대습도 50%, 지표면 저항은 숲 또는 도시 상태에서 3ton이 누출되는 최악 조건의 시나리오를 설정하였다. 사고시나리오 2는 풍속

3m/s, 대기안정도 D, 기온 25℃, 상대습도 50%, 지표면은 저항은 숲 또는 도시 상태에서 3ton이 누출된 사고시나리오이다. 사고시나리오 3은 풍속 3m/s, 대기안정도 A, 기온 25℃, 상대습도 50%, 지표면은 저항은 숲 또는 도시 상태에서 3ton이 누출된 사고시나리오이다. 사고시나리오 4는 풍속 5m/s, 대기안정도 D, 기온 25℃, 상대습도 50%, 지표면은 저항은 숲 또는 도시 상태에서 3ton이 누출된 사고시나리오이다. 같은 방법으로 사고시나리오 5, 6, 7, 8은 누출량이 30ton, 사고시나리오 9, 10, 11, 12는 60ton이 누출된 경우이다. Table 1에 사고시나리오 12가지에 따른 조건들을 정리하였다. 또한, 실내 환기율이 시간당 2회 및 0.5회인 경우에도 사고시나리오 1-12를 각각 적용하고자 한다.

### 3.2.2 아크릴로니트릴 누출의 입력변수 및 입력값

EPA기준에 따른 독성 관심농도는 AEGL-2 1.7ppm, AEGL-3를 28ppm, 「KOSHA GUIDE P-102-2021」의 기준에 따라 과압 관심압력은 8psi, 3.5psi, 1psi 및 복사열 관심열량은 60초 노출하였을 때 통증이 발생하는 2 kw/m<sup>2</sup>, 2도 화상을 일으키는 5 kw/m<sup>2</sup>, 사망할 수 있는 10 kw/m<sup>2</sup> 및 치사율이 0%인 범위를 측정하기 위해 0.3kw/m<sup>2</sup>, 13kw/m<sup>2</sup>를 입력한다. 대기안정도는 안정도가 가장 큰 경우, 누출확률이 높은 경우 및 가장 불안정한 경우의 누출 영향을 반영하기 위하여 A, D, F 3종을 입력한다. 대기 온도는 25℃, 상대습도는 50%, 풍속은 1.5m/s, 3m/s, 5m/s 3종을 사고시나리오에 적합하게 입력한다. 아크릴로니트릴 누출량은 3ton, 30ton, 60ton의 3종류, 누출 공의 직경 5cm를 각각 사고시나리오별로 입력한다.

### 3.2.3 아크릴로니트릴 누출에 따른 피난 시나리오

피난 시나리오는 15층, 연면적 17,424.5m<sup>2</sup>인 아파트에서 Case 1은 피난계단만을 이용하는 피난하는 경우와 Case 2는 피난계단과 엘리베이터를 이용하여 지상으로 피난하는 경우로 선정하였다. 피난 시뮬레이션 분석을 위한 인원 배치는 「소방시설등 성능위주설계 평가 운영 가이드라인」 “화재 및 피난 시뮬레이션의 시나리오 작성 기준” 중 주거 용도의 아파트는 18.6m<sup>2</sup>/인 기준과 주차장은 IBC 기준에 따라 2명/대 기준을 적용하고 Table 2 전라북도

<Table 1> Conditions for scenario

End point	Temperature	Humidity	Atmospheric stability	Leak temperature
AEGL-2(1.7ppm)	25℃	50%	A, D, F	25℃
Leak duration	Leak size	Leak quantity	Wind speed	Surface curvature
10 ~ 60min	5cm	3on, 30ton, 60ton	1.5, 3, 5m/s	Urban or forest

2021년 인구통계 인구를 반영하여 배치하였다. 5층에서 15층의 재실자는 279명 1층에서 4층의 주차장의 재실자는 714명으로 전체 재실자 993명을 배치하였다.

### 3.2.4 피난에 따른 입력변수 및 입력값

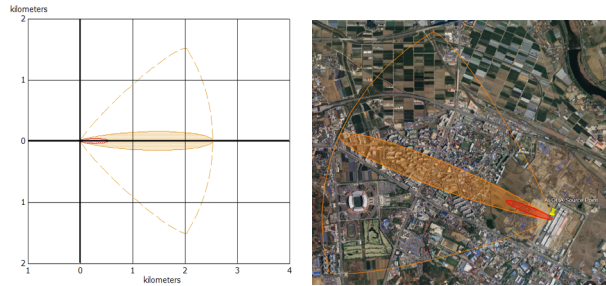
피난 시물레이션을 위한 재실자는 성인 남성은 신장 1.73m, 이동속도 1.2m/s, 어깨너비 39.95cm, 성인 여성은 신장 1.59m, 이동속도 1.1m/s, 어깨너비 35.8cm, 어린이는 신장 1.3m, 이동속도 1.0m/s, 어깨너비 28.4cm, 노인인 신장 1.65m, 이동속도 0.7m/s, 어깨너비 37.9cm로 입력하였다. 밀집 현상을 해결하기 위한 감소계수(reduction factor)는 0.7로 설정하였다. 에이전트 행동에 대하여는 돌발행동을 하지 않는 것으로 입력하였다.

## 4. 실험 결과

### 4.1 아크릴로니트릴의 영향범위 및 LOC 도달시간

아크릴로니트릴의 12가지 사고시나리오에 대한 실험

결과를 Table 3 내지 Table 10에 나타내었다. 독성영향에 대한 실험 결과를 관심농도(Level of concentration, LOC)와 영향 범위별로 Table 3에 나타내었다. 아크릴로니트릴 독성 영향범위 틀은 ALOHA 프로그램에 3.2.2의 입력값을 입력하고 결과를 도출하면 AEGL-1,2,3의 농도별로 피해영향 범위를 표출하게 된다. 시나리오 10 독성의 영향범위를 그림2에 나타내었다. 그림2 (a)는 영향범위이고 그림2 (b)는 지도에 표출한 결과이다.



(a) Graph of Toxic (b) Diagram of Earth  
[Figure 2] Coverage according to scenario 10

12가지 사고시나리오에 대한 독성영향을 AEGL-1,2,3의 농도별로 측정된 결과이다. AEGL-2의 영향 범위가 0.69km에서 8.1km이고 AEGL-3의 영향 범위는 0.22km

<Table 2> Size Korea, 2021 [14]

Division	7 to 9 years old		10 to 19 years old		20 to 29 years old		30 to 39 years old		40 to 49 years old		50 to 59 years old		Over 60	
	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F
Height (cm)	129.8	128.9	169.1	158.7	173.85	160.95	172.75	160.25	170.2	156.65	168.35	154.35	165.9	152.8
Shoulder (cm)	32.0	31.8	41.0	36.4	40.15	35.7	39.95	35.65	39.65	35.95	38.55	35.75	37.65	35.45
Speed(m/s)	1.08	1.08	1.14	1.1	1.21	1.1	1.21	1.1	1.21	1.1	1.21	1.1	0.7	0.7

<Table 3> Toxic output to Simulation

Scenario	Leakage (ton)	Wind speed (m/s)	Stability	AEGL-3 (km)	AEGL-2 (km)	AEGL-1 (km)
1	3	1.5	F	1.20	7.30	7.30
2	3	3	D	0.44	2.00	2.00
3	3	3	A	0.18	0.67	0.67
4	3	5	D	0.37	1.70	1.70
5	30	1.5	F	1.50	8.10	8.10
6	30	3	D	0.54	2.50	2.50
7	30	3	A	0.22	0.82	0.82
8	30	5	D	0.44	2.10	2.10
9	60	1.5	F	1.50	8.10	8.10
10	60	3	D	0.54	2.50	2.50
11	60	3	A	0.22	0.82	0.82
12	60	5	D	0.44	2.10	2.10

에서 1.5km의 범위로 나타났다. A 저장소에서 수평거리 5km 이하에 아파트단지가 위치하고 누출지점으로부터 수평거리 0.9 km에 가장 가까운 아파트단지가 있으므로 1km, 3km 및 5km 지점에서 아크릴로니트릴의 관심농도 도달시간을 아파트의 시간당 환기횟수를 4, 1 및 0.5회로 실시하여 외부와 내부를 측정하였다. 아크릴로니트릴 LOC 도달시간 틀은 산출된 독성 영향범위에 각각 1km, 3km에 및 5km 지점을 ALOHA 프로그램에 입력하고 결과를 도출하면 각 지점에서 아파트의 내부와 외부의 AEGL-1,2,3 농도별 도달시간을 그래프로 표출하게 된다.

Table 4는 아크릴로니트릴의 12가지 사고시나리오에 대한 아파트 외부의 독성 관심농도 도달시간이고 Table

5-7은 아파트 내부에서 관심농도 도달시간을 측정한 결과이다. Table 5는 시간당 환기횟수가 4회인 경우, Table 6는 시간당 환기횟수가 1회 및 Table 7은 시간당 환기횟수가 0.54회인 경우이다. 환기횟수가 감소함에 따라 아파트 실내의 관심농도 도달시간이 증가하였다. 아파트 외부에서 독성 관심농도 AEGL-2의 도달시간은 1km 지점에서 11분 이상 60분 이하, 3km 지점에서는 43분 이상 60분 이하, 5km 지점에서는 60분 이상으로 측정되어 1km 이하의 지역에서는 11분 이상 외부에 거주하게 되면 회복 불가능한 건강상의 악영향이 발생한다.

아크릴로니트릴 과압 및 복사열 영향범위 틀은 ALOHA 프로그램에 3.2.2의 입력 값을 입력하고 결과를 도출하면

<Table 4> Time output to Simulation at Out door

Scenario	Leakage (ton)	Wind speed (m/s)	Stability	Time (min)								
				1km			3km			5km		
				AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3	AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3	AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3
1	3	1.5	F	15	15	38	43	43	60	60	60	60
2	3	3	D	11	11	60	60	60	60	60	60	60
3	3	3	A	60	60	60	60	60	60	60	60	60
4	3	5	D	17	17	60	60	60	60	60	60	60
5	30	1.5	F	14	14	38	43	43	60	60	60	60
6	30	3	D	11	11	60	60	60	60	60	60	60
7	30	3	A	60	60	60	60	60	60	60	60	60
8	30	5	D	16	16	60	60	60	60	60	60	60
9	60	1.5	F	13	13	37	43	43	60	60	60	60
10	60	3	D	11	11	60	60	60	60	60	60	60
11	60	3	A	16	16	60	60	60	60	60	60	60
12	60	5	D	16	16	60	60	60	60	60	60	60

<Table 5> Time output to Simulation at In door (Air Exchanges Per Hour : 4)

Scenario	Leakage (ton)	Wind speed (m/s)	Stability	Time (min)								
				1km			3km			5km		
				AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3	AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3	AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3
1	3	1.5	F	18	18	53	53	53	60	60	60	60
2	3	3	D	25	25	60	60	60	60	60	60	60
3	3	3	A	60	60	60	60	60	60	60	60	60
4	3	5	D	24	24	60	60	60	60	60	60	60
5	30	1.5	F	20	20	51	53	53	60	60	60	60
6	30	3	D	26	26	60	60	60	60	60	60	60
7	30	3	A	60	60	60	60	60	60	60	60	60
8	30	5	D	24	24	60	60	60	60	60	60	60
9	60	1.5	F	18	18	52	53	53	60	60	60	60
10	60	3	D	26	26	60	60	60	60	60	60	60
11	60	3	A	60	60	60	60	60	60	60	60	60
12	60	5	D	24	24	60	60	60	60	60	60	60

<Table 6> Time output to Simulation at In door (Air Exchanges Per Hour : 1)

Scenario	Leakage (ton)	Wind speed (m/s)	Stability	Time (min)								
				1km			3km			5km		
				AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3	AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3	AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3
1	3	1.5	F	25	25	60	60	60	60	60	60	60
2	3	3	D	42	42	60	60	60	60	60	60	60
3	3	3	A	60	60	60	60	60	60	60	60	60
4	3	5	D	45	45	60	60	60	60	60	60	60
5	30	1.5	F	24	24	60	60	60	60	60	60	60
6	30	3	D	41	41	60	60	60	60	60	60	60
7	30	3	A	60	60	60	60	60	60	60	60	60
8	30	5	D	38	38	60	60	60	60	60	60	60
9	60	1.5	F	23	23	60	60	60	60	60	60	60
10	60	3	D	40	40	60	60	60	60	60	60	60
11	60	3	A	60	60	60	60	60	60	60	60	60
12	60	5	D	43	43	60	60	60	60	60	60	60

<Table 7> Time output to Simulation at In door (Air Exchanges Per Hour : 0.5)

Scenario	Leakage (ton)	Wind speed (m/s)	Stability	Time (min)								
				1km			3km			5km		
				AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3	AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3	AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3
1	3	1.5	F	28	28	60	60	60	60	60	60	60
2	3	3	D	60	60	60	60	60	60	60	60	60
3	3	3	A	60	60	60	60	60	60	60	60	60
4	3	5	D	60	60	60	60	60	60	60	60	60
5	30	1.5	F	30	30	60	60	60	60	60	60	60
6	30	3	D	55	55	60	60	60	60	60	60	60
7	30	3	A	60	60	60	60	60	60	60	60	60
8	30	5	D	60	60	60	60	60	60	60	60	60
9	60	1.5	F	32	32	60	60	60	60	60	60	60
10	60	3	D	56	56	60	60	60	60	60	60	60
11	60	3	A	60	60	60	60	60	60	60	60	60
12	60	5	D	60	60	60	60	60	60	60	60	60

각각의 관심압력 및 관심열량의 피해영향 범위 및 화구의 지름과 연소시간을 표출하게 된다. Table 8은 아크릴로니트릴의 12가지 사고시나리오에 대한 과압의 영향범위를 관심압력 8psi에서 1psi의 영향 범위를 측정된 결과이다. 8psi의 영향 범위가 22m에서 31m, 3.5psi의 영향 범위는 33m에서 41m 및 8psi의 영향 범위가 71m에서 90m로 측정되었다. Table 9는 아크릴로니트릴의 액면 화재 (Pool fire) 12가지 사고시나리오에 대한 열복사 관심열량의 범위를 10kw/m<sup>2</sup>에서 0.3kw/m<sup>2</sup>의 영향 범위를 측정된 결과이다. 복사열에 의한 치사율이 0%에 해당하는 복사열량이 0.3kw/m<sup>2</sup> 이상의 영향 범위는 55m에서 57m로 측정되었다. 연소시간은 4분에서 60분으로 측정되었

다. Table 10은 아크릴로니트릴의 12가지 사고시나리오에 대한 비등액체증기폭발(BLEVE) 복사열을 13kw/m<sup>2</sup>에서 2kw/m<sup>2</sup>의 영향범위를 측정된 결과이다. 2kw/m<sup>2</sup> 이상의 영향 범위는 349m 이상 903m 이하로 측정되었다. 연소시간은 7초에서 14초, 화구 지름은 81m 이상 220m 이하로 측정되었다. 복사열에 의한 치사율이 0%에 해당하는 복사열량이 13kw/m<sup>2</sup> 이상의 영향 범위는 136m에서 353m로 측정되었다.

<Table 8> Over-pressure output to Simulation

Scenario	Leakage (ton)	Wind speed (m/s)	Stability	8psi (55.2kPa) (m)	3.5psi (24.2kPa) (m)	1psi (6.9kPa) (m)
1	3	1.5	F	22	33	71
2	3	3	D	-	-	-
3	3	3	A	-	-	-
4	3	5	D	-	-	-
5	30	1.5	F	31	41	90
6	30	3	D	-	-	-
7	30	3	A	-	-	-
8	30	5	D	-	-	-
9	60	1.5	F	31	41	90
10	60	3	D	-	-	-
11	60	3	A	-	-	-
12	60	5	D	-	-	-

<Table 9> Radiation(Pool fire) output to Simulation

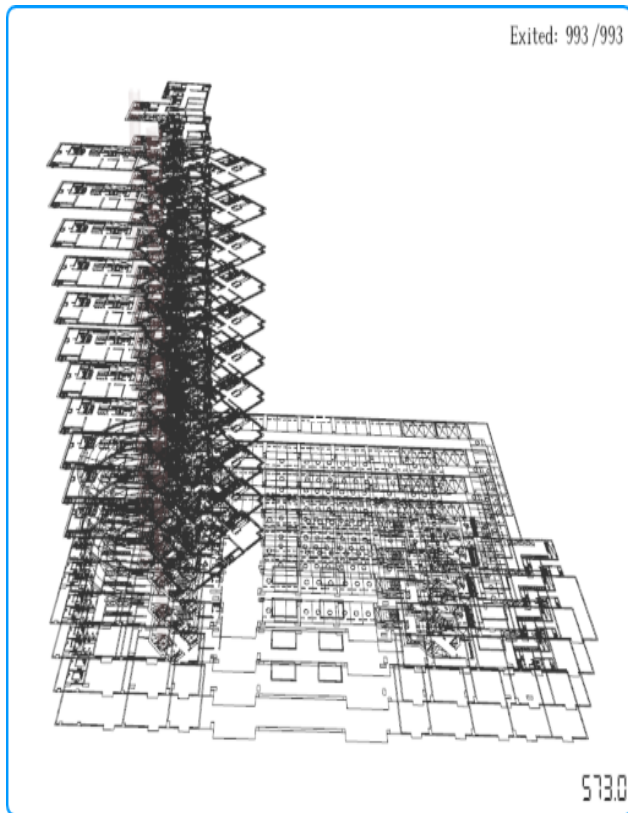
Scenario	Leakage (ton)	Wind speed (m/s)	Stability	10kw/m <sup>2</sup> (m)	5kw/m <sup>2</sup> (m)	2kw/m <sup>2</sup> (m)	0.3kw/m <sup>2</sup> (m)
1	3	1.5	F	10	14	23	55
2	3	3	D	10	15	23	55
3	3	3	A	11	16	24	56
4	3	5	D	13	18	25	57
5	30	1.5	F	10	14	23	55
6	30	3	D	10	15	23	55
7	30	3	A	11	16	24	56
8	30	5	D	13	18	25	57
9	60	1.5	F	10	14	23	55
10	60	3	D	10	15	23	55
11	60	3	A	11	16	24	56
12	60	5	D	13	18	25	57

<Table 10> Radiation(BLEVE) output to Simulation

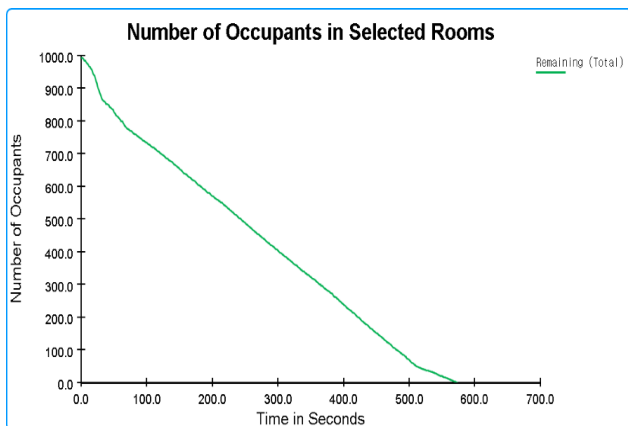
Scenario	Leakage (ton)	Wind speed (m/s)	Stability	13kw/m <sup>2</sup> (m)	10kw/m <sup>2</sup> (m)	5kw/m <sup>2</sup> (m)	2kw/m <sup>2</sup> (m)	Diameter (m)	Time (sec)
1	3	1.5	F	136	157	223	349	81	7
2	3	3	D	136	157	223	349	81	7
3	3	3	A	136	157	223	349	81	7
4	3	5	D	136	157	223	349	81	7
5	30	1.5	F	283	326	463	752	174	12
6	30	3	D	283	326	463	752	174	12
7	30	3	A	283	326	463	752	174	12
8	30	5	D	283	326	463	752	174	12
9	60	1.5	F	353	406	577	903	220	14
10	60	3	D	353	406	577	903	220	14
11	60	3	A	353	406	577	903	220	14
12	60	5	D	353	406	577	903	220	14

### 4.2 아크릴로니트릴의 누출에 따른 피난 시간

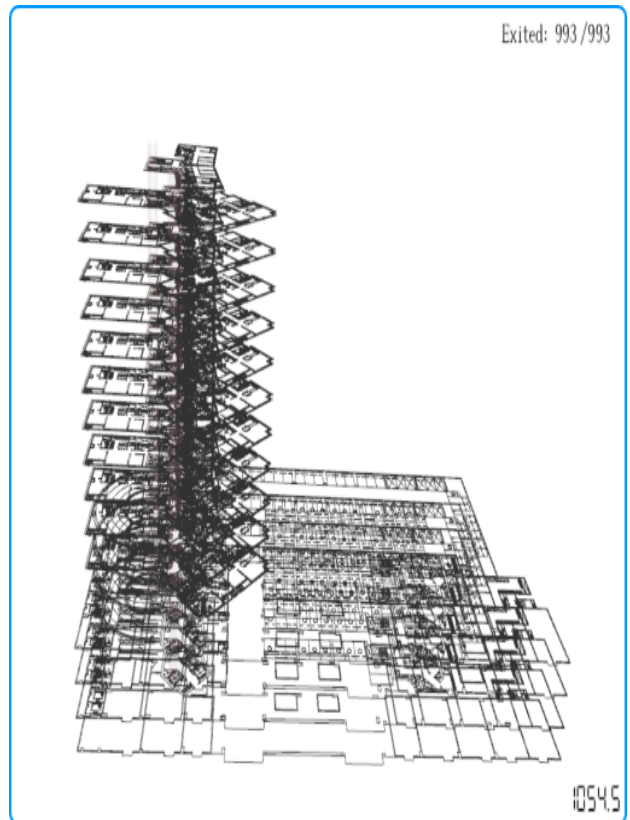
피난 시나리오에 따른 피난 시간(Travel Time)은 그림 1에 나타내었다. Case 1인 피난계단을 이용한 경우의 피난 시간은 573초(9.6분) Case 2인 피난계단과 엘리베이터를 이용하여 지상으로 피난하는 경우의 피난 시간은 1054.5초(17.6분)로 측정되었다. 피난계단만을 이용하여 피난하는 시간이 피난계단과 엘리베이터를 사용하여 피난하는 시간이 8분이나 크게 측정되었다.



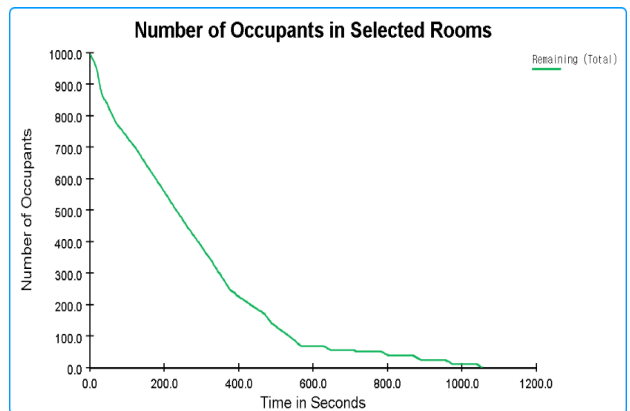
(a) Use the evacuation stairs only



(b) Use the evacuation stairs only



(c) Use the evacuation stairs and elevator



(d) Use the evacuation stairs and elevator

[Figure 3] Travel Time

피난 시간(Travel Time)을 정리하면 Table 11과 같다.

<Table 11> Travel Time

Case	Travel Time
1. Use stairs only	573 sec (9.6 min)
2. Use stairs and elevator	1054.5 sec (17.6 min)



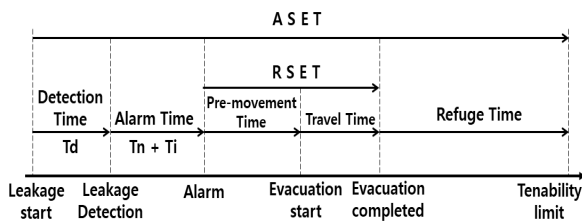
## 5. 실험 분석

### 5.1 아크릴로니트릴의 독성 평가

#### 5.1.1 아크릴로니트릴의 누출에 따른 ASET

아크릴로니트릴의 누출에 따른 ASET 산정은 노출되었을 때 비가역적이며 지속적인 역건강 효과 또는 대피 능력에 장애를 일으키는 독성 관심농도 AEGL-2, 복구 불가능한 주택 일부가 파손되는 과압 관심압력 1psi 및 60초 동안 노출되었을 때 통증을 유발하는 복사열 관심열량  $2\text{kw/m}^2$  기준 중에서 가장 먼저 도달하는 시간을 ASET로 산정한다. 아크릴로니트릴의 AEGL-2는 1.7ppm, 연소 하한계는 30,000ppm으로 화재나 폭발조건이 형성되기 전에 독성 관심농도 AEGL-2인 1.7ppm이 형성되므로 ASET은 독성 관심농도 AEGL-2에 도달하는 시간으로 결정된다. 영국 표준연구소(British standard institute) 고시에 따라 아크릴로니트릴의 누출에 의한 대피 시간은 Figure 3와 같다. [15] 대피시간 = ASET-Td-Tn-Ti-RSET

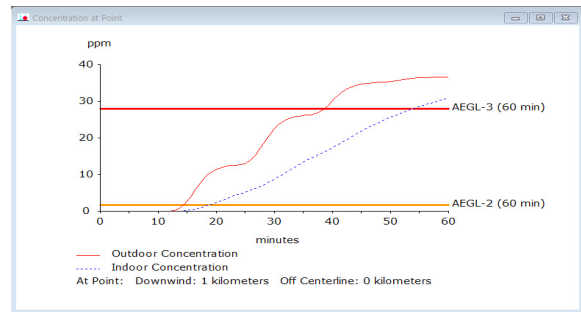
여기서 ASET : 아크릴로니트릴이 누출되어 AEGL-2 수준에 도달하는 시간, Td : 제조소등에서 아크릴로니트릴 누출을 감지하는 시간, Tn : 제조소등에서 자치단체로 누출상황을 통보하는 시간, Ti : 관할 자치단체에서 해당 지역주민에게 통보하는 시간, RSET : 아파트에서 피난 가능한 시간이다. 대피 시간을 Figure 4에 정리하였다.



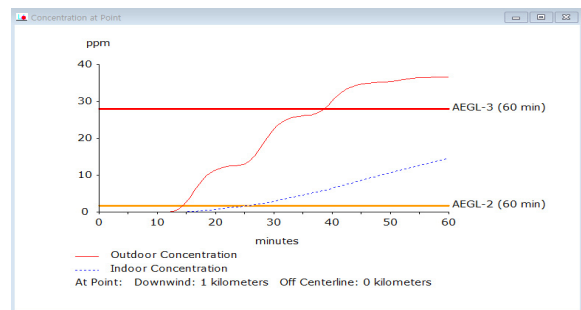
[Figure 4] Refuge Timeline

아파트 외부에서 독성 관심농도 AEGL-2의 도달시간은 1km 지점에서 11분 이상 60분 이하, 3km 지점에서는 43분 이상 60분 이하, 5km 지점에서는 60분 이상으로 분석되어 1km 이하의 지역에서는 11분 이상 외부에 거주하게 되면 회복 불가능한 건강상의 악영향이 초래하는 것으로 분석되었다. 아파트 내부에서는 회복 불가능한 건강상의 악영향이 환기 조건에 영향을 받았다. 시간당 4회의 환기가 일어나면 AEGL-2의 도달시간은 1km 지점에서 18분 이상 60분 이하, 3km 지점에서는 53분 이상 60분 이하로 분석되며 시간당 1회 환기에서는 AEGL-2의 도달시간은 1km 지점에서 25분 이상 60분 이하, 시간당

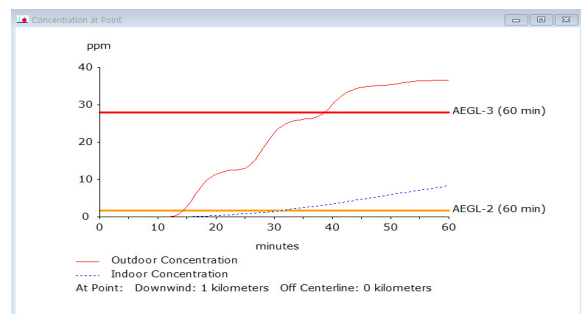
0.5회 환기가 이루어지면 AEGL-2의 도달시간이 1km 지점에서는 28분 이상 60분 이하로 분석되었다. 따라서 시간당 0.5회 환기가 이루어지는 실내라도 누출지점에서 1km 이하의 지역에서는 28분 이상 거주하면 회복 불가능한 건강상의 악영향이 초래하는 것으로 분석된다. 환기율에 따른 사고시나리오 1의 1km에서 AEGL-1,2,3 농도에 이르는 시간 곡선을 Figure 3에 나타내었다.



(a) Time output at Air Exchanges 4



(b) Time output at Air Exchanges 1



(c) Time output at Air Exchanges 0.5

[Figure 5] Time at 1km according to scenario 1

Figure 5 (a)는 환기횟수 4회 일 때 누출량 3ton, 풍속 1.5m/s, 대기안정도 F, 대기습도 50% 및 대기온도 25°C 인 사고시나리오 1에 대한 AEGL-1,2,3의 농도에 이르는 시간 곡선으로 표시한 것이다. Figure 5 (b)와 (c)는 환기횟수가 각각 1회 0.5회 일 때 AEGL-1,2,3의 농도에 이르는 시간 곡선이다. Table 4 에서 Table 7의 AEGL-2에 도달하는 시간을 정리하면 Table 12와 같다.

<Table 12> ASET of Acrylonitrile leak

Scenario	Out door (min)			In door (min)								
				No. Air Ex 4			No. Air Ex 1			No. Air Ex 0.5		
	1km	3km	5km	1km	3km	5km	1km	3km	5km	1km	3km	5km
1	15	43	60	18	53	60	25	60	60	28	60	60
2	11	60	60	25	60	60	42	60	60	60	60	60
3	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
4	17	60	60	24	60	60	45	60	60	60	60	60
5	14	43	60	20	53	60	24	60	60	30	60	60
6	11	60	60	26	60	60	41	60	60	55	60	60
7	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
8	16	60	60	24	60	60	38	60	60	60	60	60
9	13	43	60	18	53	60	23	60	60	32	60	60
10	11	60	60	26	60	60	40	60	60	56	60	60
11	16	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
12	16	60	60	24	60	60	43	60	60	60	60	60

5.1.2 아크릴로니트릴 누출에 따른 RSET

아크릴로니트릴 누출에 따른 RSET은 Figure 4처럼 식 (4)와 같다.

$$RSET = \text{피난 지연시간(Pre-movement Time)} + \text{피난 시간(Travel Time)} \quad \text{식 (4)}$$

피난 지연시간(Pre-movement Time)은 영국표준연 구조 고시에 따르고 피난 시간(Travel Time)은 아파트 피난 시뮬레이션을 통해 산출한다. [15] 제조소등의 사업체, 관할 자치단체 및 아파트 안전관리자의 신속한 비상경보가 거주자의 피난 가능한 시간 확보에 영향을 미친다. 피난 지연시간은 Table 13에서 아파트에서 화재경보 신호를 이용하여 비상경보하고 훈련되지 않은 직원이 보조하는 경우의 피난 지연시간(W3) 5분을 적용한다. 식 (4)에 의한 전체피난 시간(RSET)을 산정하면 Table 14와 같다.

<Table 14> RSET of Apartment

Case	RSET
1. Use stairs only	14..6min
2. Use stairs and elevator	22.6min

<Table 13> Pre-Movement Time[16]

Occupancy type	W3(min)
Dormitories, residential mid-rise and high-rise (Occupants may be asleep but are predominantly familiar with the building, alarm system, and evacuation procedure.)	> 5
W3: warning system using fire alarm signal and staff with no training	

5.1.3 아크릴로니트릴 누출에 따른 안전성 평가

피난 안전성 평가는 RSET와 ASET를 비교하여 ASET이 RSET보다 큰 경우에 피난 안전성이 확보된 것으로 평가한다. Table 15에서 아크릴로니트릴 누출에 따른 시나리오 1, 5, 9가 1km 및 3km의 위치에서 ASET이 RSET보다 적으므로 피난 안전성이 확보되지 않았다. 또한, 아파트 외부의 ASET 여유가 적어 대피소 등으로 대피 시간이 충분하지 않는 경우에는 아파트 내부에 대피공간의 확보가 필요하다. 피난 안전성은 아크릴로니트릴의 누출점으로부터 수평거리에 비례하였고 실내 환기율에 반비례하였다. Figure 4처럼 제조소등에서 아크릴로니트릴 누출을 감지하는 시간(Td), 제조소등에서 자치단체로 누출상황을 통보하는 시간(Tn), 관할 자치단체에서 해당 지역주민에게 통보하는 시간(Ti)이 필요하므로 ASET이 RSET보다 피난 지연시간(W3) 5분 이상의 여유시간이 필요하다. 따라서 ASET이 RSET와 비슷한 값이거나 피난 안전성이 확보되는 못한 경우에는 안전대책이 필요하다. 피난 안전성 평가결과를 Table 15에 정리하였다.

5.2 아크릴로니트릴의 복사열 평가

아크릴로니트릴의 누출에 따른 ASET은 독성관심농도 AEGL-2 도달시간으로 결정되지만 연소 또는 폭발은 점화원이 존재할 때 발생하므로 ASET 형성된 후 연소 또는 폭발시간은 예측할 수 없다. 그러나 연소나 폭발이 발생하면 관심열량 및 관심압력 범위 이상 영역에서 피난이 완료되지 않으면 피해가 발생하게 된다. 따라서 관심열량에 의한 치사율 및 관심압력에 의한 구조물의 붕괴율을 고려하여 피해 영향평가를 실시 할 필요가 있다. 식(1)에 따른 액면 화재는 노출 시간 30분일 때 치사율이 0%인 복사열량은 0.3kw/m<sup>2</sup> 이하이고 비등액체증기폭발에서는 노출 시간이 14초일 때 치사율이 0%인 복사열량은 13kw/m<sup>2</sup> 이하이며 식(2)에 따른 과압에 의한 구조물의 붕괴율이 0%인 압력은 1psi 이하이다. Table 8, 9, 10에서 아크릴로니트릴의 12가지 사고시나리오에 대한 액면 화재 및 비등액체증기폭발의 치사율과 과압에 의한 구조물 붕괴율이 0%인 영향 범위를 Table 16에 정리하였다.

<Table 15> Assessment of evacuation safety

Scenario	ASET(min)									RSET(min)	Evacuation safety			
	No. Air Ex 4			No. Air Ex 1			No. Air Ex 0.5				Scenario	1km	3km	5km
	1km	3km	5km	1km	3km	5km	1km	3km	5km					
1	18	53	60	25	60	60	28	60	60	22.6	1	Unsafety	Safety	Safety
2	25	60	60	42	60	60	60	60	60	22.6	2	Safety	Safety	Safety
3	60	60	60	60	60	60	60	60	60	22.6	3	Safety	Safety	Safety
4	24	60	60	45	60	60	60	60	60	22.6	4	Safety	Safety	Safety
5	20	53	60	24	60	60	30	60	60	22.6	5	Unsafety	Safety	Safety
6	26	60	60	41	60	60	55	60	60	22.6	6	Safety	Safety	Safety
7	60	60	60	60	60	60	60	60	60	22.6	7	Safety	Safety	Safety
8	24	60	60	38	60	60	60	60	60	22.6	8	Safety	Safety	Safety
9	18	53	60	23	60	60	32	60	60	22.6	9	Unsafety	Safety	Safety
10	26	60	60	40	60	60	56	60	60	22.6	10	Safety	Safety	Safety
11	60	60	60	60	60	60	60	60	60	22.6	11	Safety	Safety	Safety
12	24	60	60	43	60	60	60	60	60	22.6	12	Safety	Safety	Safety

<Table 16> Output of Lethality 0%

Scenario	BLEVE(m)	Pool Fire(m)	Over-pressure(m)
1	136	55	71
2	136	55	-
3	136	56	-
4	136	57	-
5	283	55	90
6	283	55	-
7	283	56	-
8	283	57	-
9	353	55	90
10	353	55	-
11	353	56	-
12	353	57	-

### 5.3 실험분석에 따른 성능위주설계 방안

지금까지 실시한 위험등급Ⅱ의 위험물에 해당하는 아크릴로니트릴의 ALOHA, Pathfinder 프로그램 및 Probit 분석을 이용한 누출 영향평가에 따른 성능위주설계 방안은 다음과 같다.

첫째, 아크릴로니트릴의 독성 관심농도 AEGL-2 범위가 누출지점으로부터 8.1km까지 영향을 미친 것으로 평가되었다. 따라서 아크릴로니트릴을 저장·취급하는 제조소등으로부터 수평거리 8.1km 이하의 범위에 있는 아파트는 성능위주설계가 필요하다.

둘째, 피난 안전성을 평가한 결과 시간당 환기횟수가 4회 이상일 때 누출지점으로부터 수평거리 3km 미만에서

피난 안전성이 확보되지 못한 경우가 발생했고 시간당 환기횟수가 1회 이하일 때는 피난 안전성을 만족하므로 아파트의 환기율을 시간당 1회 이하로 설계할 필요가 있다.

셋째, (주)B회사의 플루오르화수소 누출시 아파트단지 주민들이 모두 피난하는데 2시간이 걸렸고 「산업안전보건 기준에 관한 규칙」에서 밀폐공간의 산소농도 18% 이상 23.5% 이하, 이산화탄소 농도 1.5% 미만의 공기를 유지하도록 규정하고 있다.[17][18] 시간당 환기횟수가 1회 이하로 할 때는 아파트의 실내나 대피구역은 밀폐공간에 접근하고 산소농도가 낮은 환경이 초래된다. 따라서 아파트 실내 전부 또는 대피구역만 환기횟수를 1회 이하로 하고 산소농도 18% 이상 유지하기 위해 아파트 실내 또는 대피구역에 공기공급시설 또는 공기호흡기 설치가 요청된다.

넷째, 제조소등에서 아크릴로니트릴 누출이 발생하면 제조소등에서 지방자치단체로 통보하고 지방자치단체에서 아파트 관리사무실 및 거주자에게 누출정보를 통보하고 있다. (주)B회사의 플루오르화수소 누출정보 전달은 사고 발생 1시간을 초과하여 지역주민에 통보되었으며 실제로 C 부는 경계경보발령 후 위급재난문자 발송에 5분이 소요되었고 D 자치단체는 경계경보발령 후 위급재난문자를 발송하기까지 10분이 소요되었다.[17][19] 따라서 아크릴로니트릴의 누출경보 시간을 단축하기 위해 아파트 외부에 아크릴로니트릴의 ERPG-1 이상의 농도를 감지하고 비상경보 할 수 있는 시설을 설치할 필요가 있다.

다섯째, 「위험물안전관리법 시행규칙」 조에서는 제조소등의 외벽과 아파트 외벽과 안전거리를 저장·취급하는 위험물의 수량을 고려하지 않고 10m 이상으로 규정하고 있다. 과압 및 복사열의 피해 영향평가 결과 치사율이 0%에 해당하는 범위가 353m로 산정되었으며 저장·취급하

는 아크릴로니트릴의 수량에 비례하였기 때문에 저장·취급하는 수량에 따라 안전거리를 유지할 필요가 있다. 따라서 저장·취급량에 따른 안전거리 산정이 필요하다.

여섯째, 위험물의 종류 및 위험물의 물리·화학적 성질이 다르므로 독성, 과압 및 복사열 등을 종합적으로 반영하여 특정 소방대상물의 성능위주설계를 할 필요가 있다. 소방방재청(2008)은 위험물시설의 안전거리 기준 적정성 연구에서 중장기 관점에서 최소거리만 규정하고 안전성 평가 또는 위험성 평가를 통하여 성능 위주 규제에 전환할 것을 제안하였다.[20] 따라서 위험물의 물리·화학적 특성을 고려한 성능에 따른 특정소방대상물의 설계가 필요한 실정이다.

마지막으로 아크릴로니트릴은 저장탱크, 배관, 밸브, 이송펌프 등의 부식, 진동, 접촉부 파괴, 오조작 등으로 누출이 발생하므로 폭발압력 이상 설계, 용접이음, 방유제 설치 등의 본질안전설계, 시설의 비파괴 검사 등의 안전관리 및 인터록, 봉쇄, 안전장치 설치 등 공학적인 방법을 통해 아크릴로니트릴의 누출을 방지할 필요가 있다.

## 6. 결론

이 연구는 아크릴로니트릴 누출에 따른 아파트의 성능 위주설계 방안을 제시하기 위하여 아크릴로니트릴의 독성, 과압 및 복사열에 대한 영향 및 피난을 실험하고 평가한 것이다. 누출에 따른 시뮬레이션과 영향평가를 통하여 도출한 결과는 다음과 같다.

(1) 장외영향평가 시뮬레이션을 통해 도출된 영향 범위는 AEGL-2 범위가 0.67km 이상 8.1km 이하, 압력 1psi 범위가 71m 이상 90m 이하 및 복사열 13kw/m<sup>2</sup> 범위가 136m 이상 353m 이하이고 화구 직경은 81m 이상 220m 이하로 분석되었다. 또한, ASET은 환기율이 시간당 4회일 때 18min 이상 60min 이하, 환기율이 시간당 1회일 때 25min 이상 60min 이하, 환기율이 시간당 0.5회일 때 28min 이상 60min 이하 측정되었고 ASET은 아파트의 시간당 환기횟수에 비례하였으며 피해 영향 범위는 아크릴로니트릴의 저장·취급하는 수량에 비례하였다.

(2) 피난 안전성 평가는 RSET은 22.6min으로 분석되어 시간당 환기횟수가 1회 이하일 때 피난 안전성을 만족하므로 환기횟수를 1회 이하로 설계할 필요가 있다.

(3) 누출에 따른 피해 영향평가는 과압에 의한 구조물 붕괴율 0% 범위가 71m 이상 90m 이하, 복사열에 따른 치사율 0% 범위는 136m 이상 353m 이하로 측정되었다. 피해 영향은 아크릴로니트릴의 저장·취급하는 수량에 비례하였다.

이 연구에서는 아크릴로니트릴의 누출에 따른 탐지에서 아파트의 거주자에 대한 비상경고 시간을 도출하여 피해 영향에 반영하지 못한 점에 한계를 가지고 있다.

## 7. References

- [1] Korean Law Information Center, Article 2 of the Dangerous Materials Safety Management Act (<https://www.law.go.kr/lsSc.do?menuId=1&subMenuId=15&tabMenuId=81#undefined>)
- [2] Korean Law Information Center, Article 5 of the Dangerous Materials Safety Management (<https://www.law.go.kr/lsSc.do?menuId=1&subMenuId=15&tabMenuId=81#undefined>)
- [3] Fire Department Agency(2023), 2022 Hardous materials statistics.
- [4] Busanilbo(2013, 12, 29), Collision fire with chemical carrier cargo ship off the coast of Taejongdae, (<https://www.busan.com/view/busan/view.php?code=20131229000020>)
- [5] Money Today(2015, 8, 23), An explosion of unknown cause at a chemical plant in Shandong Province (Lunxing Chemical Industry). 9 injured, (<https://news.mt.co.kr/mtview.php?no=2015082311164333359>)
- [6] Korean Law Information Center, Article 2 of the Act on Installation and Management of Fire Facilities (<https://www.law.go.kr/lsSc.do?menuId=1&subMenuId=15&tabMenuId=81#undefined>)
- [7] J. S. Yang, S. H. Byeon, S. K. Kang(2002), "Biological monitoring for Acrylonitrile workers in fiber sizing agent Workplace." J Korean Soc Occup Environ Hyg. 12(2):135-139.
- [8] Y. J. Lee, E. H. Kim(2011), Epidemiological investigation of occupational diseases 25, Korean Industrial Health Association.
- [9] J. E. Cho(2022), "A measure to secure evacuation safety according to the occupancy of apartment households." Department of Fire and Disaster Prevention Woosuk University Graduate School.
- [10] H. K. Kim(2020), "Fire Safety Assessment Method of Existing Apartment Houses by CFD Simulation." Master degree paper, Department of Architectural Engineering Graduate School of Urban Science,

- University of Seoul.
- [11] Y. J. Song, D. G. Seo, M. S. Kim, H. J. Kim, (2021), "A Study on the Improvement Plan of Performance-based Design of Officetels of Residential Structure." Fire Science and Engineering, 35(5):113-124.
- [12] KOSHA(2023), Technical guidelines on accident damage impact assessment, KOSHA GUIDE P-88-2023.
- [13] Y. M. Kim(2011), "Dynamic behavior analysis of tunnel structure under gas explosion load." Journal of the Korea Tunnel and Underground Space Society, 13(5):413-430.
- [14] K. H. Park, J. Y. Lee, H. S. Kong(2022), "Measures to Enhance Evacuation Safety of Nursing Hospitals Through Evacuation Simulation." J. Korean Soc. Hazard Mitig. 22(2):133-145.
- [15] British Standard Institute PD 7974-6(2004), The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings -Part 6: Human factors: Life safety strategies.
- [16] Y. S. Cho, D. M. Kim, G. T. Im(2021), "Risk Assessment through Fire and Evacuation Simulation in the Main Control Room of a Domestic Thermal Power Plant." Fire Science and Engineering, 35, (26):68-74.
- [17] National Disaster and Safety Research Institute (2015), Research on ways to improve evacuation information transfer system based on evacuation simulation.
- [18] Korean Law Information Center, Article 680 of the Rules on Occupational Safety and Health Standards (<https://www.law.go.kr/lsSc.do?menuId=1&subMenuId=15&tabMenuId=81&eventGubun=060114#undefined>)
- [19] Social Focus(2023, 6, 1), (<https://www.socialfocus.co.kr/news/articleView.html?idxno=16692>)
- [20] Fire Department Agency(2008), Research on the suitability of safety distance standards for hazardous materials facilities.

## 저자 소개



### 오 승 주

우석대학교 일반대학원 소방·안전공학과 박사과정  
관심분야: 위험물, 소방전기, 소방기계, 소방방재정책 등



### 한 상 훈

우석대학교 일반대학원 소방·안전공학과 박사과정  
관심분야: 위험물, 소방전기, 소방기계, 소방방재정책 등



### 공 하 성

학위: 공학 박사, 행정학 박사  
경력: 대한안전경영과학회 편집위원, 한국화재소방학회 평의원 역임  
관심분야: 소방전기, 소방기계, 소방방재정책 등  
근무지: 우석대학교 소방방재학과 부교수