

불산수용액 누출사고에 대한 초기대응 단계별 영향

최재식 · 최재우* · 심주용 · 이무철†

서울과학기술대학교 일반대학원 안전공학과
 01811 서울특별시 노원구 공릉로 232

*주아스프, 01811 서울특별시 노원구 공릉로 232

(2020년 5월 11일 접수, 2020년 9월 29일 수정본 접수, 2020년 10월 6일 채택)

Effects of Initial Responses in Steps for the Release Accidents of Hydrofluoric Acid

Jae Sik Choi, Jae U Choi*, Ju Yong Shim and Mu Chul Lee†

Department of Safety Engineering, Graduate school, Seoul National University of Science and Technology,
 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 01811, Korea

*ASP Co., Ltd. 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

(Received 11 May 2020; Received in revised from 29 September 2020; accepted 6 October 2020)

요 약

화학 및 석유화학 공장과 같은 공정산업에서 위험물질이 누출할 때 초기대응의 중요성은 항상 강조되어 왔다. 그러나 이러한 화학물질의 누출동안 단계별 초기대응에 따른 피해예측에 대한 정량적 분석에 대한 연구는 그 동안 미흡하였다. 이에 본 연구에서는 불산 누출사고 동안에 초기대응의 영향을 조사하고자 하였고, 이를 위해 불산농도 범위에 따른 피해예측 영향거리를 산정할 수 있는 간이식을 우선 도출하였다. 그리고 시스템 다이내믹스 기법을 활용하여 초기대응 단계의 인과지도를 작성하였고, 인과지도에 도출한 간이식을 적용하여 다양한 초기대응 시나리오에 따른 피해예측 영향거리를 분석하였다. 연구결과, 최대피해영향거리와 비교할 때 '누출발견 후 초기조치 시작시간'인 경우 최대 약 87%, '누출부위 차단조치'는 약 59%, '전문진입팀 도착시간'이후 조치는 약 50% 감소율을 보였다. 이 연구결과는 불산 취급 사업장에서의 초기대응 지침의 기초자료로 활용하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

Abstract – As hazardous chemicals are releasing in process industries such as chemical & petro-chemical plants, the importance of initial responses has been always emphasized. However, little attention of quantitative analysis of the consequence by different initial responses during releasing of the chemicals has been done. The main objective of current paper is to investigate the effects of initial responses for the release accidents of hydrofluoric acid. For this, a simplified equation that can easily calculate the effect distance by varying concentrations of hydrofluoric acid was firstly deduced. In addition, a causal loops for the initial response steps using the system dynamics technique was constructed during release of 50% hydrofluoric acid. The effect distances according to different scenarios of the initial actions were also quantitatively analyzed by applying the simplified equation to the causal map. As a result, the highest reduction rate on the maximum effect distance was obtained with 'start time of action after leak detection' being about 87% while the lowest was 'arrival time of professional response team' being about 50%, as expected. It is expected that the results gained from the current study can be helpful as of basics of the initial response to the workplace, dealing with the hydrofluoric acid.

Key words: Hydrofluoric acid, Initial response, System dynamics

1. 서 론

화학물질안전원 화학안전정보공유시스템에서 2014년에서 2018년 사이에 발생한 5년간의 화학사고 자료[1]를 살펴보면, 보고된 사

고는 총 471건에 이르며 이중 누출사고는 357건으로 가장 높은 비중을 차지한다. 누출사고 중 재난수준으로 심각성을 보여준 대표적인 예는 2012년 9월 구미 불화수소 누출사고[2]로, 이 사고는 누출된 불화수소가 대기 중의 수증기와 반응하면서 불산으로 변화되어 인근지역까지 확산하여 수많은 인명 및 재산피해를 발생시켰다[3]. 이에 대한 원인은 다양하나 초동대응이 미흡하여 재난수준까지 발생한 것으로 전문가들은 지적하였다.

수용액 정도에 따라 위험성이 상이한 불산 등의 물질은 화학물질 관리법의 사고대비물질[4], 산업안전보건법의 공정안전관리[5] 적

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: lmc3902@naver.com

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

용 대상물질로 관리하고 있다. 이러한 물질을 규정수량 및 농도 이상으로 사용하는 사업장에서는 사전에 피해예측 도구를 활용하여 피해영향을 평가하고, 안전대책 및 누출사고 시 대응방안을 마련하는 것이 요구된다. 이러한 피해도구를 현장에서 활용할 경우 관련된 지식 및 숙련된 경험이 필요하고, 예측 프로그램의 구동이 쉽지 않은 사업장인 경우 누출사고 발생시 누출량에 따른 현장대응 및 피해예측은 여전히 어려움이 있다. 이에 사업장에서 간편하게 피해영향 범위를 예측할 수 있는 간이식이 필요하며, 이를 통해 현장 대응조치를 마련하는 것이 필요하다.

최근에 조가영 등[6]은 사고대비물질 중 메탄올, 질산, 아세트산 누출 시 누출량에 따른 독성 피해영향거리 예측 간이식, 원종호 등[7]은 염화수소 및 불화수소 누출 시 누출속도에 따른 피해영향거리 산정 간이표와 간이식, 정유경 등[8,9]도 염산수용액 및 암모니아수 농도에 따른 피해예측 간이식을 도출, 김정환 및 정승호[10]도 불화수소 누출시 피해예측을 현장에서 신속·용이하게 활용할 수 있는 그래프를 제안하였다. 선행연구[6-10]에서 제시한 연구결과를 활용하면 피해예측 도구의 사용에 어려움이 있는 사업장에서 피해예측 거리를 쉽고 간편하게 예측하는데 용이할 것으로 판단된다. 그러나 이러한 선행연구에서는 특정 화학물질(염화수소, 불화수소, 염산수용액 등)의 누출에 따른 피해예측 간이식 개발에 집중하였고, 누출사고 시 초기대응에 따라 피해가 어떻게 달라지는 고려하지 못하는 한계점이 있다. 또한, 현재까지 불산 농도에 따른 피해예측 간이식은 제시된 바 없으며, 불산 누출 시 현장에서의 다양한 초기대응에 따라 피해영향 범위가 달라질 수 있는데 이를 고려한 연구는 아직은 미흡한 상황이다.

이에 본 연구에서는 불산농도에 따른 피해예측 범위를 손쉽게 산출할 수 있는 간이식을 도출하여 제시하고, 시스템 다이내믹스 기법을 활용하여 불산 누출 사고시 초기대응 단계의 인과지도를 작성하고, 인과지도에 도출한 간이식을 적용하여 초기대응 시나리오별 피해예측 영향거리를 정량적으로 분석하여 불산취급 사업장에서의 초기대응 지침의 기초자료로 활용하는데 도움을 주고자 한다.

2. 연구방법

2-1. 사고시나리오 선정 및 간이식 도출 방법

본 연구에서는 불산농도에 따른 피해 영향범위 분석을 위해 시골 지형조건으로 최악의 시나리오를 가정하여 ALOHA 프로그램 (version 5.6.3)을 사용하였으며, 평가조건은 Table 1과 같다. 불산

은 불화수소의 수용액으로 미국 환경부 RMP[12]에서는 불산농도 50%(by weight) 이상, 국내 화학물질관리법 사고대비물질[4] 및 산업안전보건법 공정안전관리 대상물질[5]에서는 현재 불산 1% 이상으로 정하고 있다. 그러나 2020년 1월 16일 산업안전보건법이 개정됨에 따라 불산 10% 이상이 공정안전관리 대상물질이며 5인 이상 사업장은 2021년 1월 16일부터, 5인 미만 사업장은 2021년 7월 16일부터 적용한다. “2012년도 유독물 영업자 등의 실적보고” 자료[11]에 따르면, 259개의 전체 사업장중 50% ~ 60% 범위의 불산농도를 취급하는 사업장이 가장 많았고, 그 다음은 60% ~ 70% 범위이었다. 본 연구에서의 불산의 농도범위는 미국환경청에서 범용적으로 사용하는 피해예측 프로그램인 ALOHA에서 이용 가능한 불산 농도범위 40% ~ 70%를 고려하여 연구대상 불산농도 범위를 40%에서 70%로 한정하였다. 본 연구에서 고려한 끝점거리에서의 농도 기준은 미국산업위생협회(American Industrial Hygiene Association, AIHA)[13]가 제시한 비상대응계획수립지침서의 ERPG-2로 하였으며, 이는 “거의 모든 사람이 1시간 동안 노출되어도 보호조치 불능의 증상을 유발하거나 회복 불가능 또는 심각한 건강상의 영향이 나타나지 않는 공기 중의 최대 농도”[13]이며, 불산농도에 따른 ERPG-2는 보고되지 않아, 여기서는 불화수소의 ERPG-2 농도인 20 ppm을 고려하였다.

본 연구의 ALOHA 예측 프로그램으로 도출된 불산농도 40~70%까지의 피해영향거리를 살펴보면 풀 면적(m^2)과 농도가 높을수록 피해영향거리가 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 불산 50%이상의 농도부터 피해영향거리가 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 불산농도에 따른 피해예측 범위 간이식 도출 방법은 정유경 등[8,9]이 염산수용액 및 암모니아수 농도에 따른 피해예측 간이식 도출에 적용한 방법을 이용하였다. 불산 제조공정의 저장탱크 등에서 불산이 누출하여 형성되는 액표면적을 $1 m^2 \sim 800 m^2$ (17개 구간)으로 제한하여 불산농도별 피해영향거리를 분석하였다. 불산농도 및 액표면적별 피해영향거리 상관관계를 분석하고, 정유경 등[8,9]이 제시한 상관관계 약 0.99 이상을 보이는 추세선을 바탕으로 간이식을 도출하였다.

2-2. 인과지도 작성 및 초기대응 시나리오 선정

본 연구에서 누출사고시 초기대응 항목을 도출하기 위해 유해화학물질 화학사고의 대응 매뉴얼[14]의 초기대응 단계와 불산 취급공정의 기술지침[15]의 비상대응계획을 참조하여 누출부위 차단, 밸브격리, 펌프정지, 살수설비, 국소 배기장치, 중화, 맨홀주위 차단, 집수설비 우회로 구성하였고, 이를 Table 2에 나타내었다. Table 2에 나타낸 항목에 부합하는 피드백 루프로 이루어진 인과지도를 Fig. 1과 같이 작성하였고, 초기대응에 대한 시스템 흐름도에 적용된 변

Table 1. The conditions of worst-case scenario considered in this study

Conditions	Input Data
Concentrations of hydrofluoric acid (%)	40, 45, 50, 55, 60, 65, 65, 70
Wind Speed	1.5 m/s
Temperature	25 °C
Humidity	50%
Stability	F
Source	Puddle
Cloud Cover	Partly cloudy
Ground Roughness	Open Country
Ground Type	Concrete
Measurement Height	10 m above ground
End Points	ERPG-2 (20 ppm)

Table 2. Initial response items

Symbols	Items
n1	Leak block
n2	Valve isolation
n3	Pump stop
n4	Watering equipment
n5	Local exhaust system
n6	Neutralization
n7	Block around manhole
n8	Bypass to catchment facility

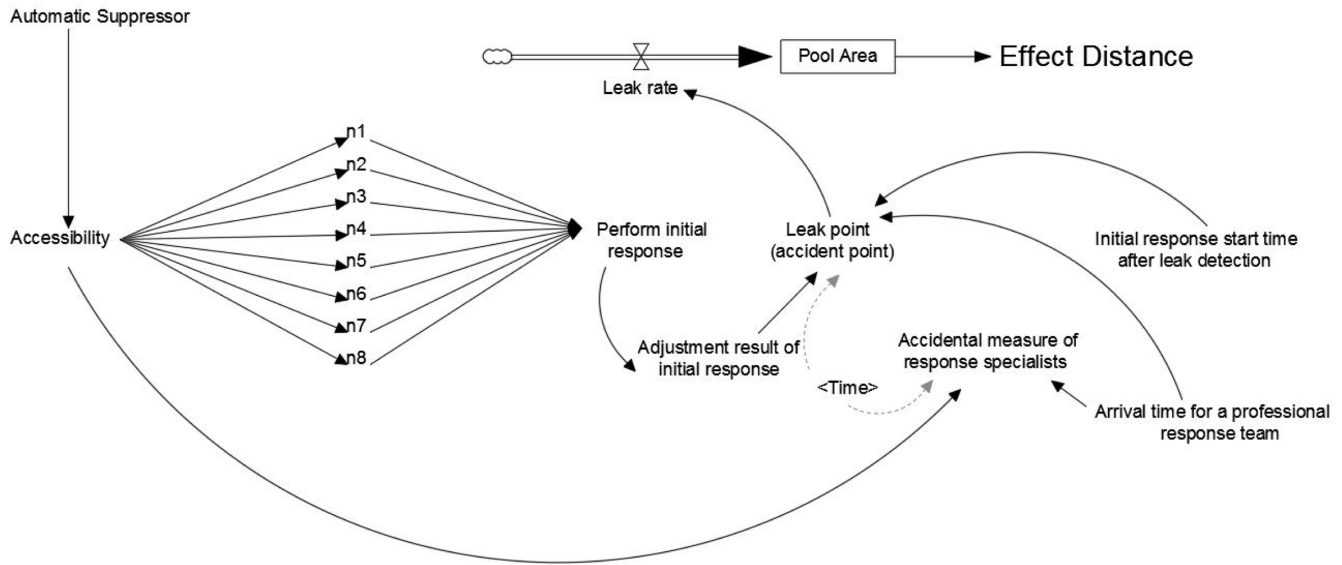


Fig. 1. Causal loop diagrams of initial responses during releasing of hydrofluoric acid.

Table 3. Components applied to causal loops diagram

Type	Component Name	Description
Stock	Pool Area	The liquid level formed due to the amount of leaks when leakage occurs due to accident
Flow	Leak rate	Amount of Hydrofluoric acid released Per Minute
	Effect Distance	ERPG-2 (20 ppm) end point distance according to pool area of hydrofluoric acid concentration
	Density(%)	Density according to hydrofluoric acid concentration (Kg/m ³)
	constant	Conditions in which the liquid level by EPA-RMP Guideline is formed as 1 cm (0.01)m
	Leak point (accident point)	Point where leakage occurs and 150 kg per minute is leaked
	Accidental measures of response specialists	The time when the professional response personnel proceeded and the action was completed
	Time of Arrival on the Professional Response Team	The time when a professional Response team arrives on site after receiving the report
	Initial response start time after leak detection	The time to check for leaks in the state where leaks have already occurred and to start initial response
	Adjustment result of initial response	Conversion of results of initial measures
	Perform initial response	Performance index of initial measures
Auxiliary Variable	Automatic suppressor	Operation of Emergency Shutoff Valve, Watering equipment, etc.
	Accessibility	Access indexes of on-site safety personnel and workers and professional response personnel
	n1	Approach leakage area to block leakage
	n2	(Leakage Valve Isolation) Locked adjacent valve of leaked valve
	n3	Stopping pump connected to storage tank and piping
	n4	Manual sprayer operation to prevent evaporation of hydrofluoric acid
	n5	Hydrofluoric acid is neutralized by calcium hydroxide
	n6	Operate local exhaust to discharge hydrofluoric acid vapor
	n7	If it is not possible to block, enter into the sewer manhole around the sewer to prevent sewage inflow.
	n8	If blocking is not possible, prevent sewage inflow and bypass sewage collection facilities with sand
	Time	Total response time (60 minutes)

수들을 시스템 다이내믹스에 적용할 수 있는 변수들로 나타내면 누출량에 따른 풀 면적인 상태변수, 누출률을 결정하는 증감변수, 누출률의 전체적인 민감도를 결정하는 보조변수로 세부내용들을 정리하여 나타내면 다음 Table 3과 같이 나타낼 수 있다.

여기서 누출률의 민감도를 결정하는 보조변수는 초기조치 시작 시간, 누출부위 차단, 전문진입팀 투입시간을 기준으로 산정하였고 대응하는 민감도 및 완벽한 정도에 따라 누출량, 누출면적, 피해영향거리가 악화되는 것이 Fig. 3 ~ 5에 나타나 있다. 즉, 시스템 다이내믹스에서 적용한 변수들이 불산누출사고 발생시 피해영향의 크기를 결정하는데 중요한 인자로 작용하는 것을 확인할 수 있다.

Table 3의 변수 중 독성기준은 미국 EPA의 RMP Guide (비상대응계획)의 ERPG-2이며, 이것은 거의 모든 사람이 1시간 동안 노출되어도 보호조치 불능의 증상을 유발하거나 회복 불가능 또는 심각한 건강상의 영향이 나타나지 않는 공기 중의 최대 농도이다. 사고 발생 후 초기진압 시작시간은 이미 누출이 발생이 되고 있는 누출원에 초기진압을 실시하는 시작시간이며, 이는 직접적으로 누출량에 영향을 미치는 변수이다. 이와 같은 누출부위 차단, 밸브격리, 펌프정지 등이 초기 조치이며, 누출 시 근로자 및 인근 주민에 대한 비상경보와 비상대응 시스템에 해당하는 비상대피경보 시스템, 원격조작 긴급차단밸브, 살수설비, 신속한 재고 이송 등의 조치가 피

해 최소화라는 항목들이 기술되어있다.

전문대응팀 투입시간은 투입되는 시간에 따라 사고조치에 영향을 주며, 현장대원들의 전문수행 능력에 따라 누출원에 직접적인 영향을 주어 누출량에 영향을 미친다. 전문사고조치는 접근성과 자동진압장치에 의해 누출원에 영향을 미친다. 자동진압장치는 정상작동에 따라 접근성에 영향을 주어 근로자 및 현장요원의 접근을 용이하게 하여 n1~n8의 초기조치 수행에 가중치로 작용하게 된다. 자동진압장치가 정상동작하고 누출이 발생된 것을 현장 안전요원 및 근로자가 확인하여 초기대응을 시작할 때 시작하는 시간은 누출원에서의 누출량에 영향을 미치게 된다. 그러나 누출부위를 차단할 수 있는 인접밸브와 살수설비 등과 같은 안전설비의 접근성이 나쁘다면 현장요원과 전문대응팀에서 수행할 수 있는 행동이 제한적이어서 누출은 계속해서 발생되고 최악의 경우 차단이 불가능한 상황에 대비하여 n7~n8 action과 같은 하수도 유입을 방지하기 위한 유입차단 대응이 실행된다.

따라서 누출발생 후 초기조치시작 시간 15분 이내를 가정하여 '1분후 즉시조치', '5분 후 조치', '10분후 조치'에 따른 위험거리 변화, 유해화학물질 취급사업장의 화학사고 대응매뉴얼의 초기대응 항목에 누출을 가장 많이 억제시킬 수 있는 n1(누출부위 차단조치)만을 적용하여 '완벽하게 조치', '50%만 조치', '조치실패'와 전문진압팀의 투입시간은 도착시간 '10분으로 기준으로 가정하며', '10분보다 빠른 5분', '10분보다 늦은 20분'에 따른 위험거리 변화로 시나리오를 선정하였다.

또한 현장 안전요원 및 근로자가 누출부위에 접근하여 n1(누출부위 차단)조치를 완벽하게 수행하면 더 이상의 누출을 일어나지 않는다. 그러나 누출부위 접근이 어려워 누출부위를 완벽하게 차단하지 못하면 후속 조치로 n2(인접밸브 잠금), n3(연결펌프 정지) 등이 이루어져 누출을 차단하여 어느순간에는 누출이 더 이상 발생하지 않는다. 그리고 누출사고 신고 접수에 따라 현장으로 출동하는 대응팀의 도착시간은 이미 누출하여 잔류한 불산을 처리하기 위한

후속조치의 시작시간을 결정하게 된다.

본 연구에서는 50% 불산농도가 누출될 때를 고려하여 다음과 같이 3가지의 초기대응 시나리오를 가정하였다.

· Scenario-1: 50% 불산농도 누출시, 누출 발견후 조치시작 시간으로 설정하여 '1분후 조치', '5분후 조치', '10분후 조치'로 분석하였다.

· Scenario-2: 누출사고 시 누출량을 제일 많이 제어시킬 수 있는 초기조치인 n1(Leak block)을 Scenario-2로 설정하여 '100% 조치', '50% 조치', '조치실패'를 고려하였다.

· Scenario-3: 전문대응팀 도착시간으로 현장 근로자 및 안전요원의 신고접수 이후 출동시간을 '5분 도착', '10분 도착', '20분 도착'으로 설정하였다.

Table 4는 Fig. 1과 Table 3에 나타난 변수 간 관계 및 변수들의 초기값을 나타낸 것이고, 대응시간은 유해화학물질 취급사업장의 화학사고 대응매뉴얼에서의 대응성공 시간인 60분으로 설정하였다. 또한, 50%불산농도를 고려한 간이식과 누출량 및 풀면적을 적용하였다. 각 시나리오별 피해영향거리 예측은 Vensim 프로그램으로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 액표면적에 따른 불산농도별 피해영향거리 간이표 및 간이식

저장시설에서 누출사고 발생 시 액면(pool)을 형성하는 경우는 첫 번째 화학물질의 저장탱크에서 누출되어 누출된 물질이 방유제 내부에 머무르면서 형성되는 액면이며, 두 번째의 경우 이송펌프에서 저장탱크로 화학물질을 이송하는 연결배관에서의 화학물질이 누출되어 지표면에서 액면을 형성하는 경우가 있다. 마지막으로 이 동식저장탱크인 탱크로리의 연결부에서 누출이 일어나 이동식저장탱크 주변 트랜치설비로 화학물질이 유입되는 경우이다. 그러나, 누출사고 발생 시 최악의 시나리오는 안전설비인 방유제나 트랜치가 설치되지 않은 개방된 공간에서의 액체의 증발이므로 이 논문에서는 안전설비를 고려하지 않은 액표면에서의 증발을 적용하였다.

Table 4. Initial value or function for the simulation of SD model

Type	Component Name	Initial value or Function	Unit
Stock	Pool Area	Leak rate/("Density(%)"*constant)	m ²
Flow	Leak rate	"Leak point (accident point)"	kg/min
	Effect Distance	(Impact Factor by Concentration)*((4*Pool Area)/3.14)^0.5	m
	Density(%)	50%	kg/m ³
	constant	0.01	m
	Leak point (accident point)	IF THEN ELSE (Time ≤ Initial response start time after leak detection, Concentration (%) Leakage) (Time > Initial response start time after leak detection) : AND : Time < Time of Arrival on the Professional Response Team, Concentration (%) Leakage*Adjustment result of initial response (Adjustment result of initial response < Accidental measures of response specialists)	kg
Auxiliary Variable	Accidental measures of response specialists	IF THEN ELSE (Time > Time of Arrival on the Professional Response Team, 0.8*(Accessibility/100), 0)	%
	Initial response start time after leak detection	1, 5, 10	min
	Time of Arrival on the Professional Response Team	5, 10, 20	min
	Adjustment result of initial response	IF THEN ELSE (Perform initial response>1, 1 , IF THEN ELSE (Perform initial response < 0, 0 , Perform initial response))	-
	Perform initial response	n1-n2/10-n3/100-n4/1000-n5/10000-n6/100000-n7/1e+06-n8/1e+07	-
	Automatic suppressor	100	%
	Accessibility	Automatic suppressor(100)	%
	n1(Leak block)	0, 50, 100	%
	TIME	60	min

Table 5. Results of released mass and effect distance by varying concentrations of hydrofluoric acid at given pool areas

Pool Area (m ²)	Effect distance (m)						
	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%
1	30	40	53	70	91	119	155
5	64	85	113	149	196	257	337
10	88	117	157	207	274	361	476
20	122	163	218	290	385	511	677
30	147	199	266	354	471	629	832
40	169	228	306	409	546	729	963
50	188	254	341	457	612	819	1100
60	205	278	374	501	672	900	1200
70	231	299	404	542	728	974	1300
80	236	320	432	581	782	1000	1400
90	250	339	458	617	931	1100	1500
100	263	357	483	652	879	1200	1500
200	370	506	691	938	1300	1700	2300
300	454	623	855	1200	1600	2100	2900
400	525	724	998	1400	1900	2500	3400
500	589	815	1100	1500	2100	2900	3900
800	746	1000	1400	2000	2800	3800	5200

이때의 증발속도는 관련 식[16]에 의해 쉽게 산정할 수 있고, 이 속도는 액표면적에 비례하고[8], 액표면적을 이용한 누출량 산정도 보고된 식[8]으로 간략히 구할 수 있다.

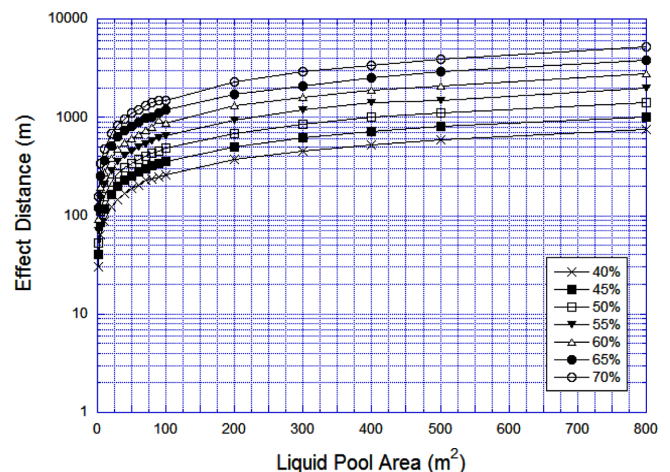
이에 본 연구에서는 불산 누출로 형성되는 액표면적을 17개로 구분하여 Table 1에 제시한 평가조건으로 ALOHA를 이용하여 피해영향거리를 산정하였다. Table 5는 ALOHA 프로그램을 이용하여 1 m²에서 800 m²까지 17개의 액표면적에 따른 서로 다른 7개의 불산농도(40%~70%, 5% 단위간격)별 피해영향거리와 액표면적별 누출량에 대한 간이 산정표 결과이다.

여기서, 액표면적을 이용한 누출량 산정은 정유경 등[9]에서 주어진 식과 상수를 바탕으로 하였다. 평가결과, 영향거리는 불산농도 및 액면크기에 영향거리는 민감하였고, 이 결과는 정유경 등[8,9]이 암모니아수 및 염산수용액이 농도에 따른 피해영향 결과와 동일한 것으로 나타났다. 그러나 Table 5에 제시한 액표면적과 불산농도에 따른 영향거리는 액표면적 조건을 17개로 제한하였기에 문제점이 있고, 이 문제는 정유경 등[8,9]이 언급한 문제와 동일하다. 이 문제를 보완하고자 본 연구에서도 정유경 등[8,9]이 제시한 방법을 이용하여 결과값을 Fig. 2와 같이 다시 표현하여 내삽 등을 바탕으로 결과값을 추정하였다.

Table 5에서의 불산농도, 액표면적 및 영향거리의 상관관계를 조사하고자 불산농도별 피해영향거리 곡선으로 확인한 결과, 각 농도에서의 영향거리는 다음 식 1과 같이 액표면적의 지수함수로 나타났고, 이는 정유경 등[8,9]의 결과와 동일하다. 또한 농도별 피해영향거리 간이식을 정리하여 나타내면 다음 아래 Table 8과 같다.

$$D_E = K \times A^B \quad (1)$$

여기서, D_E 는 피해영향거리(m), K 는 영향상수, A 는 액표면적(m²), B 는 면적지수이다. Table 6은 불산농도(40% ~ 70%)에 따른 영향상수 및 면적지수 결과이다. 영향상수는 29.1(40%불산), 38.5(45%불산), 50.8(50%불산), 66.0(55%불산), 85.6(60%불산), 112.0(65%불산), 145.8(70%불산)로 농도 증가에 따라 증가하였다. 면적지수는 0.48 ~ 0.54의 범위로 비교적 일정하였다. 불산농도에 따른 영향상수 값

**Fig. 2. Effect distances by various concentrations of hydrofluoric acid at given pool areas.****Table 6. Results of K and B factors at given concentrations of hydrofluoric acid**

Con. (%)	K Factor	B Factor	R ²
40	29.14	0.48	0.9996
45	38.51	0.49	0.9995
50	50.88	0.50	0.9994
55	66.04	0.51	0.9987
60	85.56	0.52	0.998
65	111.99	0.53	0.9986
70	145.83	0.54	0.9985

과 추세선을 비교하여 신뢰도를 분석한 결과, 결정계수(R^2)는 0.9999를 보였다. 도출된 영향상수식은 $K = 2.2 \times e^{0.059 \times C}$ 이었고, 여기서 C 는 불산농도이다. 불산 농도별 풀면적(m²)과 풀면적(m²)에 대한 피해영향거리(m)의 관계를 분석한 식에 K Factor(영향상수)에 대한 식을 최종적으로 적용하여 나타내면 다음 식 2와 같으며, 불산 농도별 피해영향거리 간이식을 정리하여 나타내면 Table 8과 같다.

Table 7. Comparison of the effect distance obtained by both simplified equation and simplified table

Pool Area (m ²)	Effect distance (m)																				
	40(%)			45(%)			50(%)			55(%)			60(%)			65(%)			70(%)		
	Eq.	Table	%RED	Eq.	Table	%RED	Eq.	Table	%RED	Eq.	Table	%RED	Eq.	Table	%RED	Eq.	Table	%RED	Eq.	Table	%RED
1	30	27	6.14	40	36	5.53	53	49	4.53	70	66	3.35	91	89	1.39	119	119	0.11	155	160	1.66
5	64	61	3.36	85	81	2.52	113	109	1.73	149	147	0.62	196	198	1.33	257	266	1.95	337	358	3.24
10	88	86	1.72	117	115	0.95	157	155	0.72	207	208	0.72	274	280	1.89	361	376	2.33	476	506	3.31
20	122	121	0.60	163	163	0.10	218	219	0.40	290	294	1.20	385	396	2.23	511	532	2.28	677	716	2.99
30	147	148	0.47	199	199	0.12	266	268	0.60	354	361	1.38	471	485	2.29	629	652	1.99	832	876	2.79
40	169	171	0.69	228	230	0.56	306	310	0.81	409	416	1.35	546	560	2.08	729	753	1.78	963	1012	2.66
50	188	192	0.97	254	258	0.77	341	346	1.00	457	466	1.38	612	626	1.95	819	842	1.50	1100	1131	1.46
60	205	210	1.23	278	282	0.82	374	379	0.93	501	510	1.34	672	686	1.83	900	922	1.33	1200	1239	1.69
70	231	227	1.27	299	305	1.06	404	410	0.93	542	551	1.26	728	741	1.68	974	996	1.21	1300	1339	1.52
80	236	242	1.40	320	326	1.00	432	438	0.91	581	589	1.11	782	792	1.45	1000	1064	3.51	1400	1431	1.12
90	250	257	1.47	339	346	1.07	458	465	0.94	617	625	1.05	931	840	5.62	1100	1129	1.44	1500	1518	0.60
100	263	271	1.58	357	364	1.12	483	490	0.91	652	658	0.92	879	885	1.21	1200	1190	0.55	1500	1600	3.50
200	370	383	1.88	506	515	0.99	691	693	0.29	938	931	0.47	1300	1252	1.90	1700	1683	0.65	2300	2263	1.20
300	454	469	1.77	623	631	0.69	855	848	0.40	1200	1140	2.75	1600	1533	2.16	2100	2061	1.14	2900	2771	2.87
400	525	542	1.69	724	728	0.32	998	979	1.00	1400	1317	3.35	1900	1770	3.73	2500	2380	2.92	3400	3200	3.76
500	589	606	1.49	815	814	0.10	1100	1095	0.24	1500	1472	0.94	2100	1979	3.07	2900	2661	5.09	3900	3578	5.27
800	746	759	1.42	1000	1030	1.67	1400	1385	0.55	2000	1862	3.94	2800	2504	6.13	3800	3366	7.20	5200	4526	8.42
Avg	-	-	1.71	-	-	1.14	-	-	0.99	-	-	1.60	-	-	2.47	-	-	2.18	-	-	2.83

Table 8. Simplified equation of the impact distance according to the area of each concentration

Simple equation by hydrofluoric acid concentration	
40%	$d_c(m) = 23.89 \times \sqrt{\frac{4 \times A(m^2)}{\pi}}$
45%	$d_c(m) = 32.24 \times \sqrt{\frac{4 \times A(m^2)}{\pi}}$
50%	$d_c(m) = 43.55 \times \sqrt{\frac{4 \times A(m^2)}{\pi}}$
55%	$d_c(m) = 58.85 \times \sqrt{\frac{4 \times A(m^2)}{\pi}}$
60%	$d_c(m) = 79.75 \times \sqrt{\frac{4 \times A(m^2)}{\pi}}$
65%	$d_c(m) = 105.26 \times \sqrt{\frac{4 \times A(m^2)}{\pi}}$
70%	$d_c(m) = 140.79 \times \sqrt{\frac{4 \times A(m^2)}{\pi}}$

$$D_c(m) = 2.2 \times e^{(0.059 \times C(\%))} \times \sqrt{\frac{4 \times A(m^2)}{\pi}} \quad (2)$$

Table 6에 제시된 불산농도별 영향상수 및 면적 지수 결과값과 영향상수식을 이용하여 불산농도에 따른 피해영향거리에 대한 간 이식을 도출할 수 있다. Table 7은 도출된 간이식을 이용하여 산정한 결과와 Table 5의 간이 산정표를 통해 얻어진 결과와 비교하여 신뢰성을 검증한 결과를 나타낸 것이다. 검증결과, 불산농도 40%~70% 범위에서의 상대편차는 0.99%~2.83%의 범위를 가지는 것으로 나타났고, 이 결과는 간이식과 산정표를 상호보완하여 이용할 수 있다고 제시한 정유영[8,9]의 결과와 일치한다.

3-2. 초기대응 시나리오

불산 누출사고시 초기대응에 따른 피해영향거리를 정량적으로 분석하고자, Fig. 1과 같이 작성된 인과지도에 50% 불산농도 누출에 대한 영향거리 예측 간이식, $D_E = 2.2 \times e^{(0.059 \times C)} \times A^{0.50}$ 을 적용하였고, 분석한 결과는 다음과 같다.

3-2-1. 초기대응 시나리오 1

Fig. 3은 50% 불산농도가 누출되었을 때 조치시간(1분, 5분, 10분)에 따른 누출량, 형성된 풀면적 및 피해영향거리 변화를 나타낸 것이다. Fig. 3(a)에 보여지는 바와 같이, 60분 동안 최대 누출량은 약 9240 kg이며, '1분후 조치'인 경우 누출량은 약 308 kg, '5분후 조치'는 '1분후 조치'보다 약 3배 이상인 약 924 kg으로 나타났다. '10분후 조치'에서는 1분후 조치 보다 약 5배 이상인 약 1694 kg이 었다. Fig. 3(b)와 같이, '1분후 조치'에서의 풀면적은 약 13 m²으로 최대 풀면적 800 m²에 약 98.3%, '5분후 조치'은 약 67 m²으로 약 91.6%가 감소하였다. '10분후 조치'는 약 133 m²으로 약 83.4%를 감소시키었다. Fig. 3(c)와 같이, 피해영향거리에서 '1분후 조치'는 약 179 m으로 최대피해영향거리 약 1390 m에 약 87.1%, '5분후 조치'는 약 401 m으로 약 71.1%, '10분후 조치'은 약 568 m으로 약 59.2%의 감소율을 보였다.

3-2-2. 초기대응 시나리오 2

Fig. 4는 누출부위 차단 정도(100% 차단, 50% 차단, 조치실패)에 따른 누출량, 형성된 풀면적 및 피해영향거리 변화이다. Fig. 4(a)에 나타낸 것처럼, '100% 차단'인 경우에 누출된 양은 약 1694 kg, '50% 차단'은 약 2293 kg, '조치 실패'는 약 3610 kg으로 나타났다. '차단 실패'가 되었는데 최대 누출량이 약 9240 kg으로 나타나지 않는 이유는 '조치실패' 후에 현장에 도착한 현장진압팀의 조치능력에 의해 누출량이 더 이상 증가하지 않기 때문이다. Fig. 4(a)에 보여지는 바와 같이, 풀면적인 경우에 '100% 차단'은 약 133 m²,

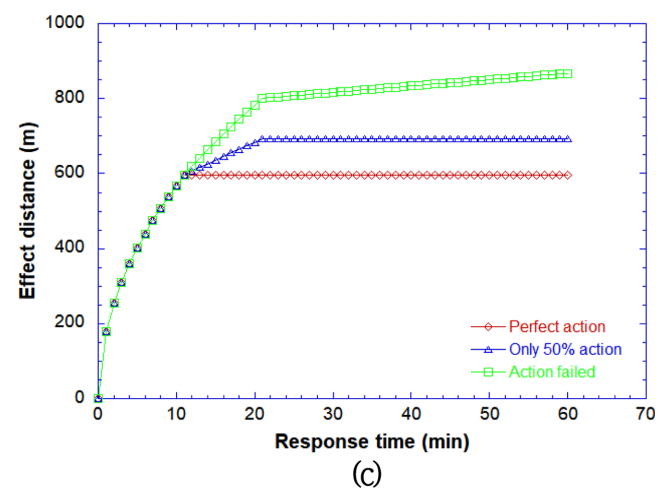
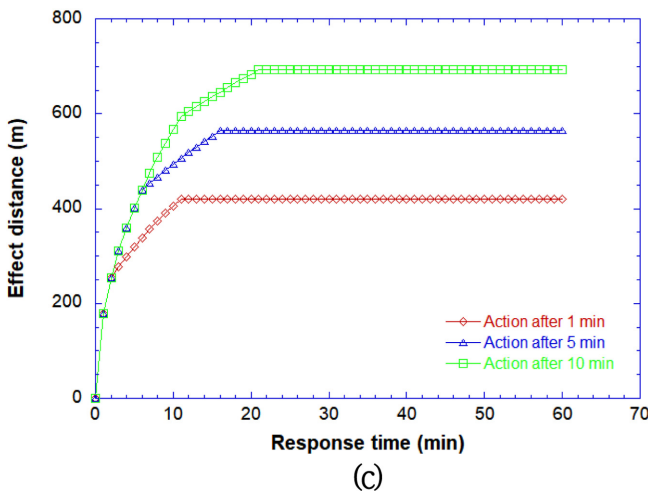
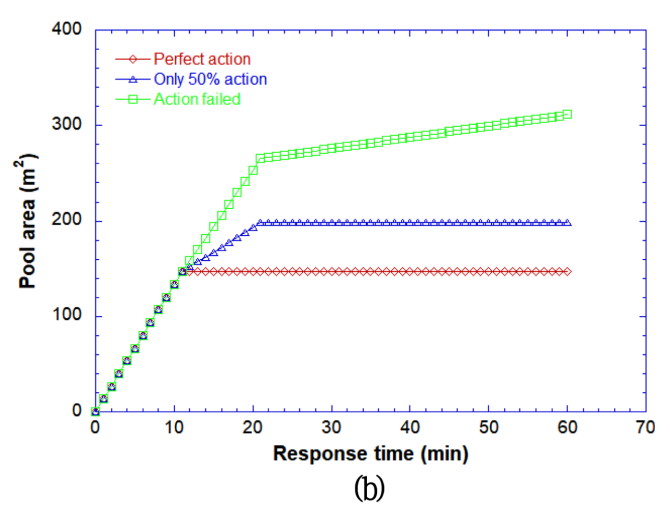
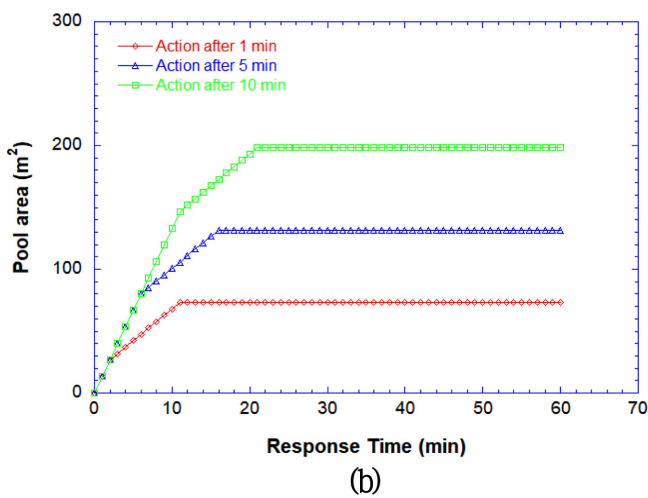
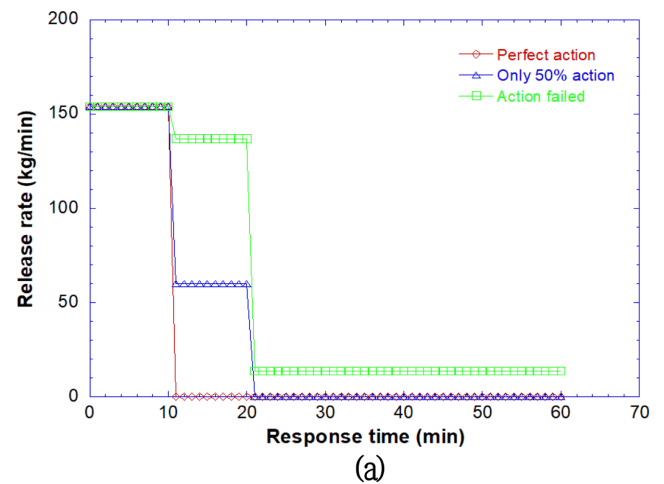
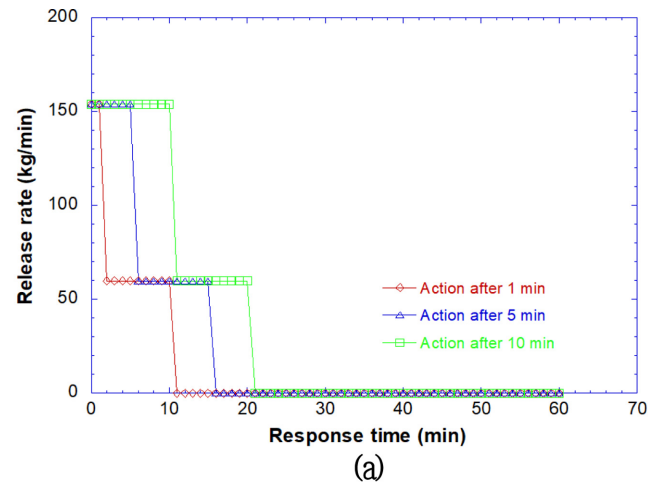


Fig. 3. Variations of released mass, pool area and effect distance obtained from the scenario 1: (a) Released mass, (b) Pool area and (c) Effect distance.

Fig. 4. Variations of released mass, pool area and effect distance obtained from the scenarios 2: (a) Released mass, (b) Pool area and (c) Effect distance.

‘50% 차단’은 약 193 m², ‘조치 실패’는 약 253 m²로 나타났다. Fig. 4(c)와 같이, 피해영향거리에서 ‘100% 조치’를 했을 경우 영향 거리는 약 568 m, ‘50% 차단’은 약 683 m, ‘조치실패’는 약 782 m 이었다.

3-2-3. 초기대응 시나리오 3

Fig. 5는 전문 대응팀 도착시간(5분 도착, 10분 도착, 20분 도착)에 따른 누출량, 형성된 풀면적 및 피해영향거리이다. 대응팀이 ‘5분 도착’할 때까지 누출된 누적된 누출량은 약 2378 kg, ‘10분 도착’은 약 3063 kg으로 시나리오 2에서 ‘조치 실패’의 경우와 동일한 결과가 나타났다. ‘20분 도착’할 때까지의 누적된 누출량은 약 4432 kg

4. 결 론

본 연구에서는 불산 취급 사업장에서 불산 누출 사고시 초기대응에 따른 피해영향을 정략적으로 분석하고자 하였다. 이를 위해 우선적으로 불산농도에 따른 피해예측 영향거리를 간편하게 산정할 수 있는 간이식을 도출하였다. 또한, 시스템 다이내믹스 기법을 활용하여 초기대응과 피해영향거리간의 인과지도 모형을 작성하였고, 50% 불산 누출시 피해영향거리 예측 간이식을 인과지도 모형에 적용하여 초기대응 시나리오에 따른 피해영향거리를 분석하였다. 본 연구를 통해 얻어진 핵심 결과를 제시하면 다음과 같다.

피해영향거리는 불산 농도 및 액면크기에 민감하였다. 그리고 간이식 및 간이 산정표 결과 사이의 상대표준편차는 불산농도에 따라 0.99%~2.83% 범위를 가지는 것으로 나타났으며, 이 결과는 간이식과 산정표를 상호보완적으로 사용할 수 있다는 기존연구의 결과와 일치한다. 본 연구에서 고려한 3가지 초기대응 시나리오에서 시나리오 1 ‘누출발견 후 조치시작 시간’에서 피해영향거리 감소율은 최대피해영향거리에 비해 약 87.1%, 시나리오 2 ‘누출부위 차단조치’의 경우 작업자의 조치 수행능력에 따라 약 59%, 시나리오 3 ‘전문진입팀 도착시간’은 진입팀의 현장 도착시간에 따라 약 50%가 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구는 불산농도(40%에서 70%까지)에 따른 피해예측 영향거리를 관련 사업장에서 쉽게 산정하는데 도움을 줄 수 있고, 불산 누출사고시 사업장에서 초기대응 지침의 기초자료로 이용하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

감 사

이 논문은 주저자의 석사학위 논문인 “시스템 다이내믹스 기법을 이용한 구미 불산 누출사고 피해에 대한 초기대응 영향에 관한 연구”(서울과학기술대학교, 2018)의 일부내용을 수정·보완하여 작성한 것이다.

References

1. National Institute of Chemical Safety, Chemistry Safety Cleaning-house, <https://csc.me.go.kr/accident/accidentInfoPList.do> [Accessed 09 2018].
2. Kim, J. H., Jeong, C. M., Kang, S. M., Yong, J. W., Yoo, B. T. and Seo, J. M., “Comparison Study for Impact Range of Prediction Models Through Case Study about Gum Hydrogen Fluoride Accident,” *Korean Chem. Eng. Res.*, **55**(1), 48-53(2017).
3. Kim, J. H., Yang, J. M., Yong, J. W., Ko, B. S., Yoo, B. T. and Ko, J. W., “Development of Hazardous Work Mapping Methodology Based on Layout of Workplace Handling The Accident Preparedness Substances,” *Korean Chem. Eng. Res.*, **52**(6), 736-742 (2014).
4. Ministry of Environment, Enforcement Rule of the Chemicals Control Act [Ordinance of the Ministry of Environment No.778], <http://www.law.go.kr> [Accessed 22 May 2018].
5. Ministry of Employment and Labor, Enforcement Decree of the Occupational Safety and Health Act, [Attached Table 10], <http://www.law.go.kr> [Accessed 22 May 2018].
6. Jo, G. Y., Lee, I. M., Hwang, Y. W. and Moon, J. Y., “A Study on the Simulation of Damage Distance for Toxic Substances Leak-

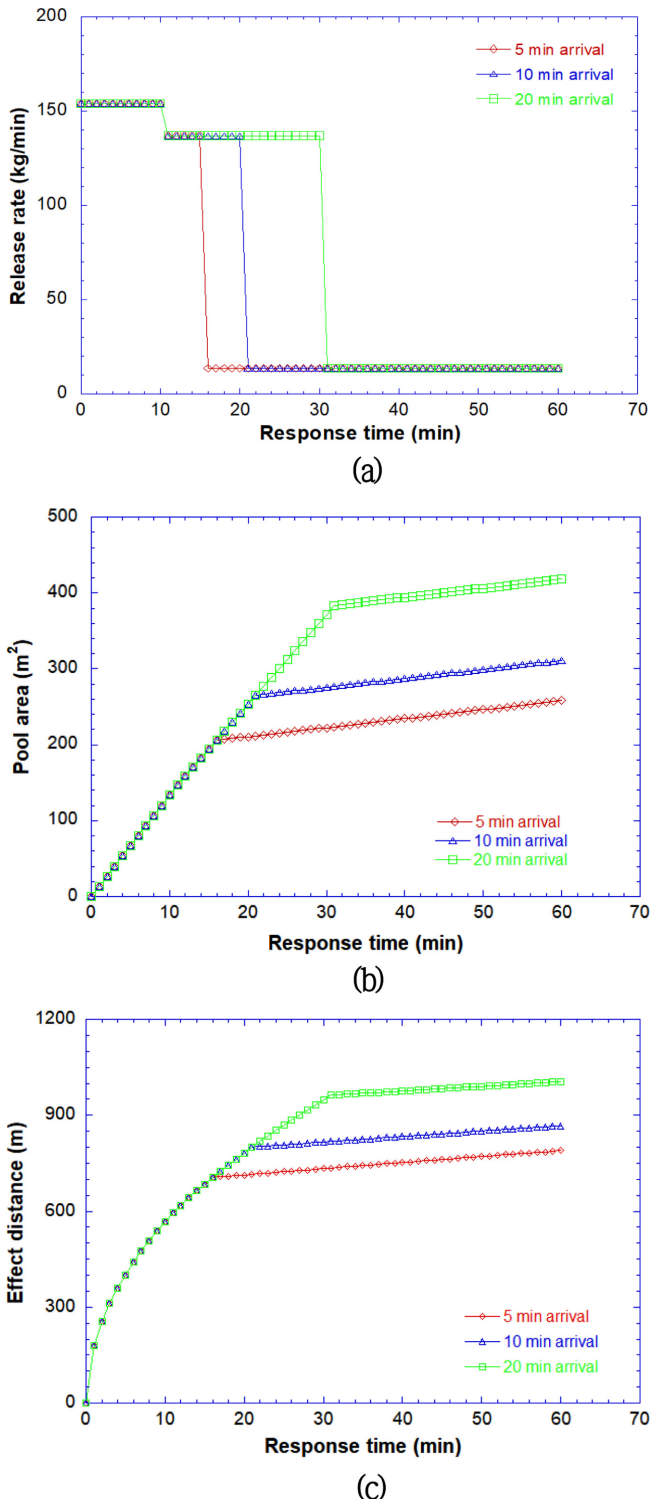


Fig. 5. Variations of released mass, pool area and effect distance obtained from the scenarios 3: (a) Released mass, (b) Pool area and (c) Effect distance.

으로 나타났다. 풀면적에서 ‘5분 도착’인 경우 풀면적(m^2)은 약 294 m^2 , ‘10분 도착’은 약 253 m^2 , ‘20분 도착’은 약 372 m^2 이었다. 누출된 누출량에 따른 피해영향거리는 전문진입팀이 ‘5분 도착’할 경우 최대 약 685 m로 나타났으며, ‘10분 도착’은 약 782 m, ‘20분 도착’은 약 948 m로 나타났다.

- age," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, **18**(4), 599-607(2017).
7. Won, J. H., Kim, B. H., Ma, B. C., Yoon, Y., Jo, A. R., Chon, Y. W. and Moon, J. Y., "Development of the Simplified Estimating Method of Off-site Consequence Analysis for Hydrogen Chloride and Hydrogen Fluoride," *Korean Journal of Hazardous Materials*, **4**(2), 41-52(2016).
 8. Jung, Y. K., Kim, B. H., Heo, H. J., Yoo, B. T., Sin, C. H., Yoon, Y. and Ma, B. C., "A Study on the Simplified Estimating Method of Off-site Consequence Analysis by Concentration of Hydrochloric Acid," *Journal of the Korean Society of Safety*, **32**(2), 52-58(2017).
 9. Jung, Y. K., Heo, H. J., Yoo, B. T., Yoon, Y., Yoon, J. H. and Ma, B. C., "A Study on the Simplified Estimating Method of Off-site Consequence Analysis for Aqueous Ammonia," *Journal of the Korean Institute of Gas*, **20**(2), 49-57(2016).
 10. Kim, J. H. and Jung, S. H., "Consequence Modeling for Evacuation Distances against Accidental Hydrogen Fluoride (HF) Release Scenarios," *Korean Chem. Eng. Res.*, **52**(4), 582-585(2016).
 11. Ministry of Environment, Performance Report of Sale Representatives of Toxic Substances, (2012).
 12. United States Environmental Protection Agency, List of Regulated Substances under the Risk Management Plan (RMP) Program, <https://www.epa.gov/rmp/list-regulated-substances-under-risk-management-plan-rmp-program> [Accessed 20 May 2018].
 13. AIHA Guideline Foundation, "2013 ERPG/WEEL Handbook," AIHA(2013).
 14. National Institute of Chemical Safety, "Response Process of Chemical Accidents(Practices)," 191-193(2017).
 15. Korea Occupational Safety and Health Agency, "Technical Guide on Safety of Treatment for Hydrofluoric Acid (KOSHA Guide P-21-2010)," 1-22(2010).
 16. Daniel A. C. and Joseph F. L., *Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications*, 3rd Ed., Prentice Hall, New York, 157-158(2011).