



불화수소 누출사고 비교를 통한 하역작업장의 안전성 향상방안에 관한 연구

†우종운 · 신창섭

충북대학교 안전공학과

(2018년 4월 14일 접수, 2018년 8월 10일 수정, 2018년 8월 11일 채택)

A Study on the Improvement of Safety of Unloading Site by Comparison of Hydrogen Fluoride Leakage Accident

†Jongwoon Woo · Changsub Shin

**Dept. of Safety Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea*

(Received April 14, 2018; Revised August 10, 2018; Accepted August 11, 2018)

요약

본 연구는 불화수소 탱크 컨테이너 하역장에서 불화수소 누출 시 누출량 및 확산 정도를 정량적으로 평가하여 동종사고의 재발을 방지하고 안전성 향상방안을 제시하는데 목적이 있다. 2012년 H사에서는 최대 저장량이 18 Ton인 탱크컨테이너에서 누출사고가 발생하여 인근 지역으로 8 Ton이 누출되었고, 그로 인해 사회적 이슈가 되었다. 가우시안 플럼(Gaussian plume) 모델을 이용하여 계산한 결과 누출지점에서부터 반경 1,321m까지의 농도가 20ppm 이상으로 예측되었다. 2014년 R사에서 발생한 불화수소 누출사고에서는 누출량이 11.02kg으로 추정되었고, 그 중 2.9kg이 세정기로 회수되었다. 가우시안 플럼 모델을 사용하여 계산한 결과, 누출 원으로부터 20ppm 이상의 농도를 갖는 피해 범위가 반경 69m로 예상되었다.

위의 두 가지 사고를 비교 한 결과, 누출량은 약 987배 차이가 발생했고, 피해 지역은 19 배 이상 차이가 나는 것으로 나타났다. 따라서 보호구의 착용, 하역 장소의 밀폐 및 세정기 설치, 그리고 비상훈련을 실시하여 하역장에서 불화수소가 대량으로 누출되는 사고가 발생하지 않도록 관리해야 한다는 결론을 얻었다.

Abstract - The purpose of this study is to assess quantitatively the amount of leaks and the extent of dispersion in case of a leak at a hydrogen fluoride tank container unloading station, and to suggest a safety improvement plan to prevent recurrence of similar accidents. In 2012, Company H leaks 8 tonnes of tank containers with a maximum storage capacity of 18 Ton, causing it to become a social issue. As a result of calculation using Gaussian plume model, the concentration was estimated to be more than 20ppm from the leak point to 1,321 m radius. The leakage of hydrogen fluoride from the company R in 2014 was estimated to be 11.02 kg, of which 2.9 kg was treated by the scrubber. As a result of calculation using Gaussian plum model, the damage range with a concentration of 20ppm or more from the leak source was estimated to be 69 m in radius.

As a result of comparing the above two accidents, it was found that the leakage amount was about 987 times different and the damaged site was more than 19 times different. Therefore, it was concluded that it was necessary to control the wearing of the protective equipment, the enclosure of the unloading site, the installation of the scrubber, and the emergency training to avoid the accidental leakage of a hydrogen fluoride from the unloading site.

Key words : Hydrogen Fluoride, Tank Container, Dispersion modeling

†Corresponding author:ken73@daum.net

Copyright © 2018 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

반도체 제조공정에서 산화규소계 재료의 식각(Etchant) 공정에 주로 사용되는 불화수소는 독성이 매우 강하여 저장탱크나 용기, 배관 등에서 미량이 누출되더라도 근로자에게 화상, 피부괴사 등으로 사망에 까지 이르게 할 수 있으며, 인근 지역으로 확산될 경우에는 수목 및 농작물의 고사, 동물의 폐사, 수질오염 등 지역 환경에 악영향을 준다. 그렇기 때문에 일반적으로 불화수소와 관련된 시설에는 가스감지기, 세정기 등의 안전설비를 설치하여 사고를 미연에 방지하거나 사고가 발생하더라도 피해가 최소화 될 수 있도록 관리하고 있지만, 이러한 설비들의 노후화 및 조작자의 실수로 인하여 불화수소가 대기 중으로 누출되는 사고가 빈번하게 발생되고 있다.

2012년 구미지역에서 탱크컨테이너 하역작업 시 액체상태의 불화수소(무수불산) 약 8 ton이 인근지역으로 누출되는 사고가 발생하여 5명이 사망하였고, 그 사고로 인한 피해보상금도 554억원이 발생하였다[9]. 2014년에는 액체상태의 불화수소 약 11.02 kg이 플렉시블 덕트를 통해 역류되는 사고가 발생하여 1명이 치료를 받았고 인근 야산의 수목이 고사하였다.

2012년 구미 불화수소 누출사고 이후 고용노동부, 환경부 등 관련 부처에서는 화학물질 취급설비에 대한 설치기준 및 관리기준을 강화시키는 등 관리감독을 하고 있지만 물질자체의 위험성이 줄어들지 않고 사용량은 오히려 증가하고 있으므로 사고발생의 가능성은 항상 잠재되어 있다.

이 연구는 위에서 언급한 2가지 불화수소 누출사고를 대상으로 누출량과 그에 따른 확산범위를 정량적으로 분석하고 비교하여 동종 사고가 재발되지 않도록 하역작업장의 안전성 향상방안을 제시하는데 그 목적이 있다.

II. 사고사례 및 원인분석

2.1. 불화수소 누출 사고사례

2012년 9월 경상북도에 소재한 H사에서 용량이 18 ton인 탱크컨테이너에서 회석설비로 불화수소를 이송하기 위한 연결 작업 중 밸브가 열리면서 8 ton의 불화수소가 누출되어 5명이 사망하고 입원 치료 12명, 건강검진 7,162명, 농작물 237.9 ha, 가축 3,209두, 차량 1,138대 등 막대한 피해가 발생하였다[4].

그리고 약 2년 후 2014년 8월 충청남도에 소재

한 R사에서 동일 용량의 탱크컨테이너 하역작업 중 액체상태의 불화수소가 플렉시블 덕트를 통하여 역류되는 사고가 발생하여 1명이 부상을 당하였다. 역류된 불화수소는 밸브박스에 고인 후 증발되면서 일부는 세정기를 통하여 회수되었고 나머지는 인근지역으로 확산되었다. 사업장에 있던 근로자 4명과 주민 10명이 병원에서 진료를 받고, 인근 수목 중 일부가 고사되었다[5]. 다행히도 이때 작업자가 불화수소의 역류를 확인함과 동시에 밸브를 차단하고 대피하여 큰 사고로 이어지지 않았다.

2.2 사고원인물질

탱크컨테이너로 부터 누출된 물질은 불화수소로서 주요물성은 Table 1과 같다. 분자량은 공기보다 작아 가볍고 대기압 하에서는 19.51 °C 일 때 기화되는 특성을 가지고 있다. 또한, 보통의 근로자가 노출될 경우에는 8시간기준으로 0.5 ppm이하가 되도록 농도를 관리하여야 한다.

2.3. 사고설비

2012년 9월 H사의 사고와 2014년 8월 R사의 사고가 발생한 설비는 모두 같은 종류의 외형을 가진 18 Ton 용량의 탱크컨테이너이다. 이 탱크컨테이

Table 1. Properties of material related to accident. [10]

Material name	Vapor density	Allowable concentration(ppm)		Boiling point(°C)
		TLV-TWA	0.5	
Hydrogen fluoride (HF)	0.72	TLV-STEL	3	19.52
		ERPG-1	2	
		ERPG-2	20	
		ERPG-3	50	

Table 2. Specification of HF Tank Container.[4]

Storage amount (Ton)	Size (m)	Pressure(MPa)		Temperature(°C)	
		operation	design	operation	design
18	ID:2.2 TL:5.3	Vapor Pressure	0.67	AMB	-40~50

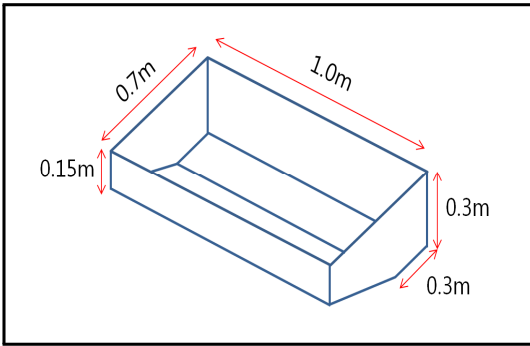


Fig. 1. Shape of Valve Box.

너는 18 Ton의 불화수소가 저장되어 있기 때문에 초기에 비상조치를 하지 못했을 경우 많은 양의 불화수소가 누출되어 사업장 및 인근지역에 심각한 피해를 줄 수 있다.

Table 2는 탱크컨테이너의 설계 및 운전조건에 대하여 설명하고 있다. 0.67 MPa의 내압에 견딜 수 있게 설계되었으며, 내경은 2.2 m, 길이는 5.3 m 이다.

Fig.1은 수평원통형 저장용기 상부에 부착되어 있는 Valve Box의 외형을 나타낸 그림이다. 밸브 박스 내부에는 2개의 밸브가 설치되어 있다.

2.4. 사고발생 원인

불화수소 하역이라는 동일한 작업에서 사고가 발생하였지만 H사의 사고와 R사의 사고발생 원인은 다르다. H사는 작업자의 발이 실수로 미끄러지면서 사고가 시작되었지만 R사의 사고는 배관설비가 불안정하게 설계된 것이 결정적인 원인이었다. 하지만 두 사고 모두 한 가지 원인이 아닌 여러 가지 불안정한 조건이 종합적으로 동시에 발생되어 사고가 발생하였으며 그 조건 중 일부를 제거했다면 피해가 감소하거나 아예 사고가 발생하지 않았을 것이다. 구체적인 사고원인은 다음과 같다.

(1) H사 사고발생 원인

사고발생 공정은 Fig.2에 그려진 바와 같이 탱크 컨테이너 상부에 부착된 2개의 밸브(①,②)에서 맹플랜지를 제거한 후 플렉시블 호스와 연결시켜 생산시설로 보내는 공정으로 옥외에서 작업이 이루어진다. 작업자가 밸브박스 위에 쪼그려 앉아 밸브(①,②)의 맹판을 제거하는 중 밸브박스 모서리 위에 걸쳐있던 작업자의 발이 미끄러지면서 밸브①이 개방되어 불화수소 8톤이 대기 중으로 누출되었다. 배관연결 작업절차가 있음에도 이를 무시하고

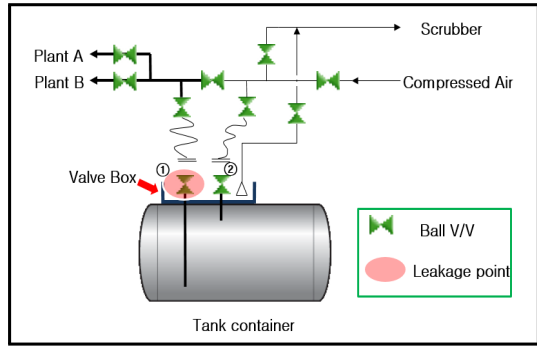


Fig. 2. Diagram of accident process(H Company)

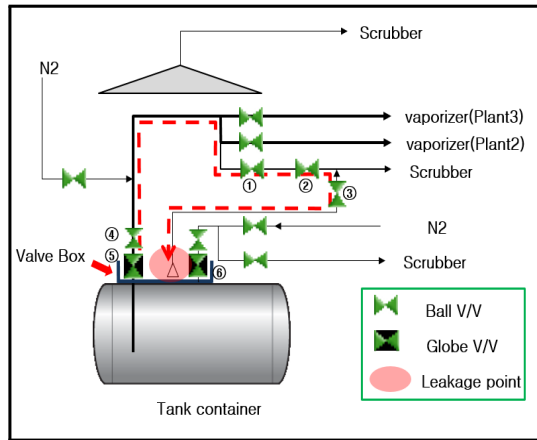


Fig. 3. Diagram of accident process(R Company)

연결작업을 진행했으며, 방독면, 내화학복 등 보호구는 착용 시 답답하고 작업성이 떨어지기 때문에 착용하지 않은 상태로 작업을 하였다. 그리고 사고 발생시를 대비해서 평소에 비상훈련을 실시하여야 하나 실시하지 않았다. 이러한 여러 가지 이유로 사고발생 직후 초기 대응에 실패하였다.

(2) R사 사고발생 원인

사고발생 공정은 H사와 동일한 작업을 하는 공정으로 Fig.3과 같으며, 야외가 아닌 건물내에서 작업을 수행한다. 탱크컨테이너에 부착된 2개의 밸브(⑤,⑥)에서 맹플랜지를 제거 후 하역장에 설치된 고정 배관에 연결시켜 불화수소를 생산시설로 보내는 공정이다.

밸브①과 ②가 닫힌 상태에서 밸브④와 ⑤를 열어야 불화수소가 생산시설로 이송되지만 사고발생 당시에는 밸브①과 ②가 열려있는 상태에서 밸브

④와 ⑤를 열어 불화수소가 플렉시블 덕트를 통해 역류되어 누출되었다. 누출된 액체상태의 불화수소는 밸브박스에 고인 후 증발되어 확산되었다.

사고의 가장 근본적인 발생원인은 불화수소를 세정기로 보내는 배관을 안전하게 설계하지 않았기 때문이다. 밸브④와 밸브①, ②를 거쳐 세정기로 이송되는 덕트 배관은 밸브③을 통해서 세정기로 이송되는 배관과 처음부터 분리시켜 설계했어야 했다. 하지만 분리하지 않고 두 배관을 연결시켜 사고발생 가능성을 높였다. 그 외에도 여러 가지 원인이 있다. 안전운전매뉴얼에는 3인이 1조로 작업을 하도록 규정되어 있으나 매뉴얼의 절차를 무시하고 2인이 작업하였으며, 작업자가 차단밸브 ①과 ②가 닫혔는지 확인하지 않은 채 밸브④와 ⑤를 여는 등 작업절차를 따르지 않았다.

III. 누출량 및 피해범위 비교

3.1 누출량 추정

H사의 경우에는 사고 발생 후 확인결과 탱크컨테이너의 저장량인 18 Ton 중 약 10 Ton이 남아있는 것으로 확인되어 8 Ton이 누출되었다는 것을 알 수 있었다.

R사의 경우 다음과 같이 세정기의 세정수 내에 포집된 불소의 농도를 분석한 결과와 밸브박스에 고인 불화수소가 34분 동안 증발되는 CCTV 자료를 분석하여 증발량을 계산하였다.

(1) 증발량 추정(R사)

Fig.1과 같이 밸브박스의 면적을 구하면 최대 0.7 m²이 된다. 이 밸브박스의 면적을 누출된 액체상태의 불화수소의 표면적으로 설정하고, 식 1에 대입하면 분당 0.324 kg의 불화수소가 증발된다고 계산할 수 있으며, CCTV에 녹화된 동영상을 근거로 증발지속시간인 34분을 곱하면 최대 증발량을 구할 수 있다.

$$G = \frac{MKAP^{sat}}{R_g T_L} \quad (1)[1]$$

여기서, G(kg/s) : 단위시간당 증발량
 M(g/mol) : 분자량
 K(cm/s) : 물질전달계수
 A(m²) : 액체의 표면적
 P^{sat}(atm) : 액체의 포화증기압
 R_g(atm · m³/kgmol · °K) : 기체상수

T_L(°K) : 액체의 온도

$$Q = G \times t \quad (2)$$

여기서, G(kg/s) : 단위시간당 증발량
 t(s) : 증발지속시간

(2) 세정기로 회수된 양(R사)

사고 발생 후 세정기 내의 세정수를 회수하여 IC(Ion Chromatography)로 분석한 결과 세정수 내에는 4,225 ppm의 불화수소가 포함되어 있는 것으로 확인되었다. 사고발생 전에 R사에서 자체적으로 측정하였을 때에는 309 ppm이었으므로 사고로 인하여 3,916 ppm이 증가한 것을 알 수 있었다.

세정기의 모양은 Fig.4에서와 같이 원형과 직사각형이 겹쳐진 모양이며, 면적에 높이를 곱하여 세정기의 내용적을 구하고 농도를 대입한 결과 2.9 kg의 불화수소가 포함되어 있는 것을 알 수 있었다.

밸브박스의 상부에 설치된 후드의 제어풍속을 측정한 결과 0.08 m/s ~ 0.12 m/s로 산업안전보건법 상의 제어풍속 기준에 비해 미흡하고 하역장이 조립식 판넬로 설치되어 밀폐구조가 아니므로 세정기로 포집된 양 보다 많은 양의 불화수소가 누출되었을 것으로 추정된다.

위 2가지의 방법을 통해 R사의 누출량을 추정한 결과 탱크컨테이너에서 11.02 kg의 불화수소가 누출되었고 그 중에서 2.9 kg이 세정기를 통해 회수된 것을 알 수 있었다. 따라서 인근지역으로 확산된 불화수소의 양은 8.1 kg으로 추정되며 H사와 R사의 누출량은 987배 차이가 남을 알 수 있다.

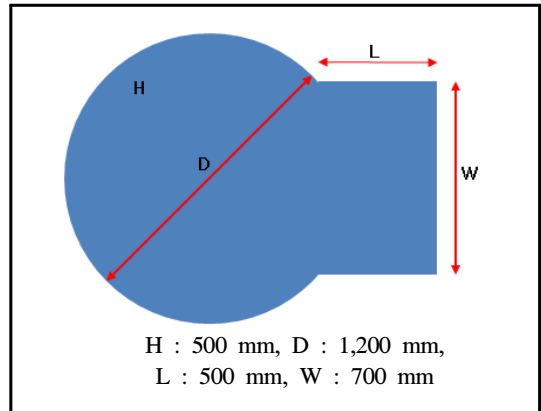


Fig. 4. Plane Figure of Scrubber.

3.2 확산범위 추정

확산범위를 추정하기 위해 가우시안 플럼모델 계산식을 이용하였고, 이를 근거로 ERPG-1,2,3 값 이상의 농도로 예상되는 피해거리를 계산하였다.

(1) 대기조건

Table 3은 2건의 사고에 대한 사고당시의 대기 조건을 설명한 것이며, 온도, 습도, 풍속 등 모든 기상조건은 사고발생 시간의 기상청의 자료를 확인하여 선정하였고 이를 근거로 Pasquill-Gifford의 대기 안정도 등급을 대입한 결과 대기안정도의 등급을 구할 수 있었다.

(2) 가우시안 모델에 의한 계산결과

계산에 적용한 확산모델은 연속누출 시 적용하는 모델인 가우시안 플럼 모델로서 Pasquill-Gifford에 의하여 제안되었다. 평균 농도는 누출되는 속도, 대기의 조건, 지면으로부터 누출원의 높이, 누출원에서의 거리에 의해 결정된다. 이 경우 바람은 일정한 속도와 방향으로 이동하는 것으로 전제로 한다.

피해범위 예측 조건은 불화수소가 지표면에서 누출되었을 경우로 제한하였고, 불화수소 누출 시 대기중의 수증기와 결합하지 않고 확산되는 조건으로 계산하였다.

Table 3. Weather Condition

Company Name	Ambient temperature (°C)	Wind speed (m/s)	Humidity (%)	Stability category
H	22.7	1.1 (3m Height)	80.5	D (Neutral conditions)
R	24.1	1.0 (3m Height)	85.0	F (Stable conditions)

Table 4. Damage Prediction of Hydrogen Fluoride Dispersion

Level	Concentration (ppm)	Distance of leak point(m)	
		H Company	R Company
ERP-3	50	734	44
ERP-2	20	1,321	69
ERP-1	2	7,613	224

Table 4는 불화수소가 누출되었을 때 확산으로 인하여 근로자의 피해가 예상되는 범위를 농도별로 구분하여 설명한 표이다.

3.4 누출량에 따른 피해범위 비교

2012년에 H사에서 발생한 누출사고는 최대 저장량인 18 Ton 중 8 Ton이 인근지역으로 누출되었고 구미시의 집계에 따르면 누출로 인한 인적, 물적, 환경적 피해를 보상하기 위하여 약 554억원의 예산이 편성되어 그 중 380억원이 지급되었다[14]. 가우시안 플럼모델을 이용하여 계산한 결과 끝점농도인 20 ppm이상의 농도를 갖는 확산범위는 누출원으로부터 반경 1,321 m까지로 예상되었다.

2014년 R사에서 발생한 누출사고는 탱크컨테이너와 연결된 플렉시블 덕트를 통하여 불화수소가 누출된 사고로서 누출량이 소량이고 사업장 주변이 사람이 살지 않는 임야이기 때문에 일부 수목이 고사하였지만 큰 피해는 발생하지 않았다[5]. 사고로 인해 증발된 불화수소의 양은 11.02 kg으로 추정되었으며, 그 중 2.9 kg은 세정기로 회수된 것으로 확인되었다. 가우시안 플럼모델을 이용하여 계산한 결과 끝점농도인 20 ppm이상의 농도를 갖는 확산범위는 누출원으로부터 반경 69 m까지로 예상되었다.

위의 두 사고를 비교한 결과 피해거리가 약 19배 이상 차이가 나는 것을 알 수 있었다.

IV. 누출량 및 피해범위 차이의 원인과 안전성 향상방안

두 회사 모두 불화수소를 탱크컨테이너로 운반하여 하역장에 보관 후 배관으로 이송시켜 사용한다는 공통점이 있지만 Table 5에서처럼 여러 가지 다른 점이 있다. H사는 5인 미만 사업장으로 공정안전보고서 작성 비대상 사업장이었던 반면 R사는 PSM대상 사업장으로 공정안전보고서를 작성하여 실행하였고, H사의 근로자는 보호구를 착용하지 않은 반면 R사의 근로자는 보호구를 착용하고 작업을 하였다[4],[5]. 이렇게 같은 공정이면서도 관리 및 설비적인 차이에 따라 인적, 물적 피해의 크기가 현저하게 다르게 나타났다.

두 회사의 관리적, 설비적 그리고 교육적인 측면에서의 차이점은 다음과 같다.

(1) 관리적 측면

앞의 두 사고에서 가장 중요한 점은 H사 근로자는 보호구를 착용하지 않고 작업을 하였고 R사는

Table 5. Comparison between two accident

comparison Item	H Company	R Company
Number of deaths	5 people	none
Number of injures	12 people	1person
Leakage amount	8 Ton	0.011 Ton
Protective equipment	Not wearing	Wearing
Tank container storage place	indoors	outdoors
PSM (Process Safety Management)	Nontarget	Target

보호구를 착용하였다는 점이다. H사와 R사의 사고 발생 당시 CCTV 영상을 분석한 결과 H사의 근로자는 보호구를 착용하지 않았기 때문에 불화수소에 노출되어 하역작업장에 있던 5명의 근로자 전원이 사망하고, 많은 양의 불화수소가 외부로 누출되었으나, R사의 근로자는 방독마스크, 내화학성 보호복, 내화학성 장갑, 내화학성 장화 등 작업에 적합한 보호구를 착용하였기에 가벼운 화상자 1명 외에 재해자가 발생하지 않은 것이다.

보호구를 착용하지 않는 이유는 호흡곤란, 안경 착용 시 불편해서, 귀찮아서, 보호구를 지급하지 않아서 등 여러 가지가 있다. 사업장 업종과 규모에 따라서 많은 차이가 있겠으나 인쇄 또는 도장을 하는 50인 미만 소규모 사업장에서의 호흡용 보호구의 착용률이 32.7% [11] 이라는 조사결과를 보더라도 소규모 사업장의 보호구 착용상태를 짐작할 수 있다. 따라서, 사업주는 근로자에게 보호구를 지급하고 착용상태를 관리하여야 하며 해당물질의 위험성에 대한 교육을 제공하여야 한다. 그리고 근로자는 해당 작업 시 보호구를 착용하여 불화수소로부터 자신의 생명을 지킬 수 있는 최소한의 보호조치를 취하여야 한다.

(2) 설비적 측면

설비적으로 보면 H사는 밀폐된 하역장 없이 야외에서 하역작업을 하여 누출된 불화수소 전부가 인근지역으로 확산되었으나, R사는 약간의 개구부는 있었지만 거의 밀폐된 건물 내에서 하역작업이 이루어져 인근지역으로 많은 양의 불화수소가 확산되지 않았다. 또한 R사는 불화수소 가스를 포집하여 회수하는 세정기가 설치되어 있었기 때문에 누출된 불화수소의 일부도 회수할 수 있었다.

불화수소와 같이 허용농도가 낮은 독성 가스의 취급은 반드시 외부와 격리된 밀폐된 공간에서 실시하여야 하며, 독성가스가 누출되더라도 세정 후 대기로 안전하게 배출할 수 있도록 세정기에 연결시켜야 한다. 또한 정전 등 비상시에도 작동이 가능하도록 비상전원에 연결해야 한다.

(3) 교육적 측면

H사는 산업안전보건법의 공정안전관리 비대상 사업장이었으므로 평소 비상시를 대비한 훈련이 이루어지지 않았다. 반면에, R사는 공정안전관리 대상 사업장으로 산업안전보건법 제49조의 2에 따라 의무적으로 공정안전자료, 공정위험성 평가서, 안전운전계획, 비상조치계획을 포함하여 작성하고 이를 이행해야 하므로, 정기적인 비상훈련이 이루어졌고 그래서 사고발생 시 밸브를 잠그는 등 신속한 대응을 할 수 있었다. 실제로 R사에서는 ‘보호복 빨리 입기 대회’를 개최하여 우수 직원에게 상을 주는 등 평소에 비상시를 대비하여 여러 활동을 하고 있었다. 사고발생 시의 CCTV 자료를 보면 근로자가 대피한 후 신속하게 공기호흡기 및 완전 밀폐형 보호복을 착용하고 사고 장소에 복귀해 조치상황을 재확인하는 모습을 확인할 수 있었다. 따라서, 평소 사고에 대비하여 비상 시나리오를 작성하고 그에 따라 훈련하는 것이 중요하다.

위의 두 사고를 비교한 결과 R사에서는 보호구를 착용하고, 하역장소의 밀폐 및 세정기로 회수하였고 비상훈련을 실시하였다. 하지만 H사에서는 이러한 조치가 이루어지지 않았고 그 결과 누출량 987배, 피해거리 약 19배의 차이가 발생했다.

따라서, 불화수소를 탱크컨테이너에서 하역하는 작업을 할 경우에는 R사와 같이 설비적, 관리적으로 안전조치를 하여 중대산업사고로 이어지지 않도록 피해를 최소화 하여야 할 것이다.

V. 결론

이 연구에서는 2012년과 2014년에 발생한 2건의 불화수소 누출사고를 대상으로 누출량 및 확산범위, 피해범위 등을 비교하였고 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

PSM 비대상인 H사는 불화수소 누출사고로 약 8 Ton의 불화수소가 누출된 것으로 조사되었고, PSM 대상인 R사는 현장 CCTV에 나타난 확산 지속 시간 및 세정기 내 불화수소의 농도를 근거로 계산

한 결과 8.1 kg의 불화수소가 누출된 것으로 추정되어 약 987배의 누출량 차이가 발생하였다.

ERPG-2 값인 20ppm의 농도를 기준으로 피해 거리를 계산한 결과 PSM 비대상인 H사는 1,321m로 예측되었고, PSM 대상인 R사는 69m로 예측되어 약 19배의 거리차이가 발생하였다.

누출량과 피해거리가 크게 차이나는 근본원인을 찾기 위해 관리적인 측면, 설비적인 측면, 교육적인 측면에서 두 사업장을 비교분석하였다. 그 결과 보호구 착용, 하역작업장의 밀폐 및 세정기 설치, 비상훈련의 실시여부에 따라 누출량 및 피해범위가 크게 차이가 나는 것을 알 수 있었다. 따라서 하역 작업 시에는 보호구를 반드시 착용하고, 작업장을 밀폐시키고 세정기를 설치하여야 하며, 평상시에 비상훈련을 실시하여 불화수소 누출로 인한 중대산업사고 발생을 예방하여야 한다는 결론을 얻었다.

REFERENCES

- [1] Y. S. Lee, *Chemical Process Safety*, Donghwa Technology Publishing Co, 168-203, (2009)
- [2] Sam Mannan, *Lees' loss prevention in the process industries*, Butterworth-Heinemann, 852-863, (2012)
- [3] D. J. Lee, J. H. Ahn, C. G. Song. "Improvement of Damage Range Calculation for First Response to Chemical Accidents", *Journal of the Korean Society of Safety*, **32**(2), 59-63, (2017)
- [4] KOSHA, "Case study on hydrogen fluoride leak accident", (2013)
- [5] KOSHA, "Case study of leakage accident during unloading of hydrogen fluoride tank container", (2015)
- [6] KOSHA, "Technical Guideline for Selecting the Worst- case Scenario", (2016)
- [7] CCPS, "Guideline for Consequence Analysis of Chemical Releases", CCPS, 15-125, (1999)
- [8] NICS, "Study on calculation of damage amount due to chemical accident", (2016)
- [9] Gumi-si, "White paper on hydrogen fluoride leak accident", (2013)
- [10] KOSHA, "Hydrogen Fluoride MSDS(Material Safety Data Sheet)", (2017)
- [11] Y. K. Kim, H. J. Kim, S. J. Lee. "Factors Associated With the Personal Protective Equipments Wearing of Workers in Small Scale Industries", *Annals of Occupational and Environmental Medicine*, **14**(3), 315-325, (2002)
- [12] B. C. Ma, K. W. Lee, J. P. Im. "A Study on the Safety Improvement in a Venting System from the HCl Release Accident of a Petrochemical Company", *Journal of the Korean Institute for Gas*, **16**(4), 38-43, (2012)
- [13] M. W. Co, C. B. Oh, Y. S. Han. "Large Eddy Simulation for the Prediction of Unsteady Dispersion Behavior of Hydrogen Fluoride", *Journal of the Korean Society of Safety*, **30**(1), 14-20, (2015)
- [14] Gumi city, "Hydrogen fluoride, Change the Gumi city!", Gumi city, 395-468, (2013)