

[Research Paper]

## 석유화학공장 폐수 저장 탱크의 낙뢰사고 분석과 보호방안에 관한 연구

송방언 · 오길정<sup>\*†</sup> · 우인성<sup>\*\*</sup>

인천대학교 안전공학과 대학원생, <sup>\*</sup>SK인천석유화학 전기팀 과장, <sup>\*\*</sup>인천대학교 안전공학과 교수

## A Study on the Analysis and Protection of Lightning Accident in Petrochemical Plant Wastewater Storage Tank

Bang-Un Song · Gil-Jung Oh<sup>\*†</sup> · In-Sung Woo<sup>\*\*</sup>

Graduate Student, Dept. of Safety Engineering, Incheon National Univ.

<sup>\*</sup>Engineer, Electric Team, SK Incheon Petrochemical

<sup>\*\*</sup>Professor, Dept. of Safety Engineering, Incheon National Univ.

(Received January 28, 2019; Revised March 20, 2019; Accepted April 3, 2019)

### 요 약

최근 지구 온난화 현상에 따라 낙뢰가 증가하고 있는 추세이며 산업시설과 인프라 설비에 사고 위험이 가중되고 있다. 특히 낙뢰가 정유 및 석유화학 공장의 시설물이나 저장탱크 등 인프라 설비에 떨어지는 경우 가동 중인 공장에 정전, 전자기기의 오동작이나 파손을 유발하거나 화재 폭발과 함께 동시 다발적이고 복합적인 재해를 초래하게 된다. 그러므로 낙뢰사고에 대한 체계적인 연구를 통하여 낙뢰에 대한 메커니즘의 이해 및 낙뢰에 의한 화재·폭발 발생 사례를 심층 분석하고, 조사 방법을 체계화하여 예방대책을 강구 할 필요가 있다. 본 연구는 낙뢰에 의해 석유화학공장의 폐수저장탱크 내부의 유증기가 폭발한 사례에 대해 사고 원인을 분석하고 그 원인에 따른 사전 예방대책을 제시하여 낙뢰에 의한 사고 발생을 예방하고자 한다.

### ABSTRACT

Recently, due to global warming, the trend shows an increase in number of lightning strikes which increase risk regarding industry infrastructures. Especially in case where the lightning strikes infrastructures including refinery, petrochemical plant facilities or storage tanks, it can cause power failures, electrical machine malfunction and damage which can lead to fire explosion and multiple calamities. Therefore, detailed case studies must be conducted through a systematic research regarding lightning strike accidents in order to understand its mechanism and devise preventive measures. This paper aims to study cases of explosion regarding waste water storage tanks in refineries and petrochemical plants in order to analyze its root cause and provide preventive measures for avoiding lightning related incidents.

**Keywords :** Lightning strikes, Petrochemical, Storage tanks, Explosion, Preventive measures

## 1. 서 론

### 1.1 연구 배경

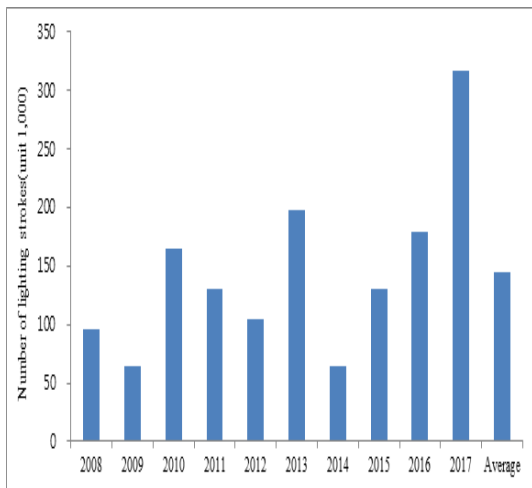
최근 지구 온난화 현상에 따라 낙뢰, 홍수, 태풍 등 자연 재해가 증가하고 있으며 이 결과로 산업시설과 인프라에 사고 위험이 가중되고 있다. 우리나라에서의 낙뢰 발생 빈도<sup>(1)</sup>는 Figure 1(a)에 나타난 바와 같이 2008년부터 2017년 까지 국내에서 년 평균 145,000회의 낙뢰가 발생하고 있으

며 Figure 1(b)에 나타난 바와 같이 7월에서 8월 사이에 집중되어 발생하고 있다.

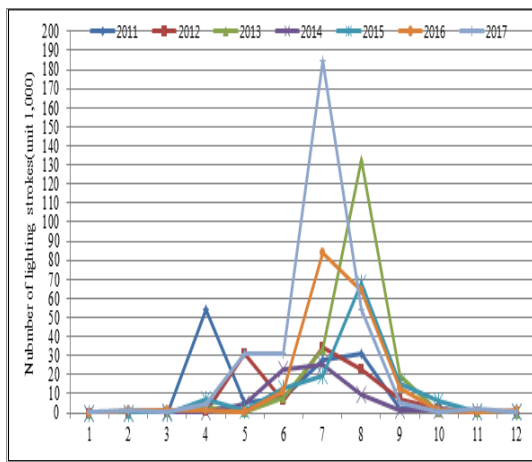
낙뢰의 증가 추세에 따라 전기설비, 건축물 등 일반 시설물에 대한 피해사례 및 낙뢰 보호대책에 대한 연구는 지속되고 있으나 상대적으로 정유 및 석유화학 공장의 시설물에 대한 낙뢰 피해 사례 및 통계자료는 찾아보기 어렵다. 정유 및 석유화학공장의 인프라 설비인 유류 저장탱크 및 폐수처리시설의 경우 대부분 생산 공정으로부터 떨어져 있

<sup>†</sup> Corresponding Author, E-Mail: [giogh@sk.com](mailto:giogh@sk.com), TEL: +82-32-570-5886, FAX: +82-32-570-5690

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.



(a) Annual frequency



(b) Monthly distribution

Figure 1. Stats statistical data of lightning strokes.

으며 넓은 지형에 위치하고 있어 낙뢰에 노출되기 쉬운 조건을 갖추고 있다. 국제적으로 유류 저장탱크의 사고 발생은 다양하게 발생하는 것으로 조사되었다. 해외의 유류탱크 화재 사고 통계<sup>(2)</sup>를 보면 Figure 2에 나타난 바와 같이 탱크화재 사고의 32%가 낙뢰에 의한 사고이며 보수작업 중 사고는 13%, 운전실수가 12%, 설비결합 8% 정전기 5% 및 기타 원인으로 28%를 차지하고 있는 것으로 나타났으며 프랑스 환경부 자료<sup>(3)</sup>에 따르면 1967년부터 2007년 기간 중 낙뢰에 의한 유류 저장탱크 사고가 101건이 발생되었다고 보고되고 있다. 국내에서 발생된 정유 및 석유화학공장에서 낙뢰에 의한 사고로는 2008년 울산 석유화학단지에서 정유공장에서 부유식 지붕형 유류저장탱크(Floating roof tank)가 낙뢰에 의한 화재가 발생하였으나 큰 피해 없이 초기에 진화된 사례가 있었으며, 2017년 대산석유화학단지 석유화학공장 변전소 내에 낙뢰가 떨어져 변압기 등이 손상되며 정전으로 가동이 중단<sup>(4)</sup>되어 큰 피해를 입힌 사고가 있었다. 또한 유류저장시설은 아니나 2017년 석유화학

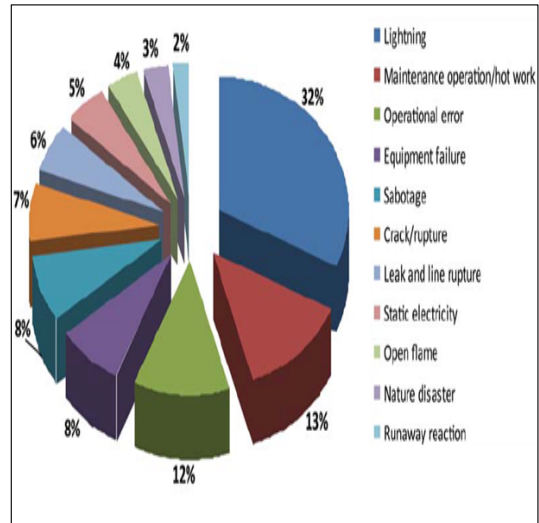


Figure 2. Cause of tank accident.

공장의 폐수저장탱크가 낙뢰로 인한 내부 유증기 폭발로 탱크 지붕이 파손된 사고가 발생한 사례가 있었다. 낙뢰 사고는 순간적으로 발생하고 화재 매커니즘 규명이 쉽지 않아 정확한 통계나 조사 보고가 잘 이루어지지 않아 정확한 실상을 알 수가 없는 것이 현실이다. 본 연구에서는 2017년 발생한 수도권 석유화학공장에서 낙뢰로 인한 폐수저장시설의 지붕 파손 사고에 대해 사고 당시의 정황과 재현 실험을 통하여 화재 원인을 추정하고 낙뢰사고 예방을 위한 보호 방안을 제시하고자 한다.

### 1.2 연구내용 및 방법

2017년 석유화학공장에서 발생한 기름을 함유한 폐수를 일시 저장하는 고정식지붕형 저장시설(Fixed roof tank)에서 낙뢰가 원인으로 추정되는 폭발사고에 대한 사고 현장 조사를 통해 폐수 저장탱크의 화재 발생 가능성과 점화원으로 추정되는 저장시설 설치물에 낙뢰에 준하는 임펄스 전압을 인가하는 재현 실험을 통해 불꽃 방전이 발생하는지 확인하고 국내의 기술기준을 검토하여 보호방안을 제시하고자 한다.

### 1.3 연구의 제약

연구 과정에서 낙뢰가 폭발의 원인이고 점화원으로 어떻게 작용했는지를 규명하기 위해서는 실험에서 사고 당시에 저장되었던 폐수저장시설 내부의 가연성 증기 농도와 저장시설에 낙뢰가 적용되는 상황이 재현되어야 한다. 하지만 사고 당시의 폐수저장시설 내부의 가연성 증기 조성을 인위적으로 만들기는 불가능하고, 자연의 낙뢰를 실험에서 재현하는 것이 불가능하여 폐수저장시설에서 발생하는 휘발성 유기화합물질을 처리하는 축열식 소각로 설계 당시에 사용하였던 농도 측정 자료를 이용하고 탱크에 낙뢰로 인한 점화원으로 추정되는 시설물에 직뢰의 뇌전류에 해당되는 임

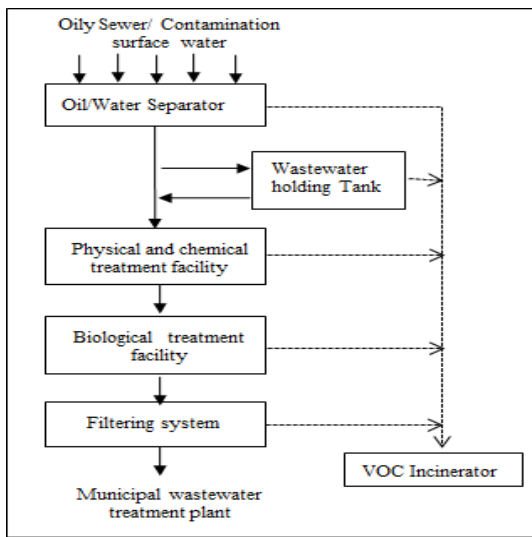


Figure 3. Wastewater treatment system block diagram.

펄스 전류를 인가하여 적용하는 실험을 실시하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 폐수저장탱크 개요

석유화학공장에서 발생하는 폐수는 Figure 3에 나타난 바와 같이 공정에서 발생하는 공정폐수와 원료 및 제품 탱크에서 발생하는 수분의 배출수, 하절기 폭우 시 공정지역에 떨어지는 빗물 및 정기보수 작업 시 발생하는 세척수 등이며, 발생한 폐수는 폐수처리장으로 유입되어 기름 성분과 물을 분리하는 유수 분리시설을 거쳐 물리화학적 처리시설, 생화학적 처리시설을 거쳐 하수종말처리장으로 방류한다. 본 연구 대상인 폐수저장시설은 하절기 폭우로 인하여 또는 설비 보수중 설비 세척수의 발생으로 폐수의 발생량이 급격히 증가하는 경우 폐수를 일시 저장 후 폐수처리시설로 균등하게 공급을 하는 시설이다. 폐수처리시설은 대기환경보전법 휘발성유기화합물 처리기준에 따라 모든 시설이 밀폐화가 되어있으며 발생되는 휘발성유기화합물질은 포집하여 축열식소각로 유입하여 소각처리를 한다.

### 2.2 저장시설의 낙뢰 보호 기준

#### 2.2.1 국내 저장시설의 낙뢰 보호 기준

- (1) KS C IEC 62305<sup>(5)</sup>의 저장 용기 대한 기준
  - (a) 가연성 액체의 저장 또는 가연성 기체의 저장에 사용되는 구조물의 형태는 자체적으로 보호되며 (방전 갭이 없고, 두께 5 mm 이상의 강철이나 7 mm 이상의 알루미늄의 연속성이 있는 금속제 용기 내에 모두 들어가도록 한다), 추가 보호가 필요 없다.
  - (b) 접지저항은 가능한 작아야 하며, 10 Ω 이하여야 한다.
  - (2) 고용노동부 고시<sup>(6)</sup> 피뢰침의 설치에 관한 기술상의

지침에는 옥외 고정 지붕형 위험물 저장조의 피뢰침 설비에 대해 대기압에서 인화성물질, 가연성 가스 등의 위험물을 저장하는 금속제 지붕형 저장조는 다음 각 호의 조건을 만족하는 경우에 저장조 자체가 구조적으로 낙뢰의 위험으로부터 보호되는 것으로 간주하여 피뢰침을 설치하지 아니할 수 있다.

- (a) 금속판 사이의 모든 접속 부분이 리벳접합, 볼트접합, 용접방식으로 접속되어야 한다.
- (b) 저장조에 유입되는 모든 배관이 탱크와 전 기적으로 접속하여 통전에 의하여 불꽃이 일어나지 않아야 한다.
- (c) 밀폐구조의 저장조이어야 한다.
- (d) 지붕 철판의 두께가 3.2 mm 이상이고, 탱크 접지 저항이 5 Ω 이하이어야 한다.

(3) 위험물안전관리법 시행규칙의 제조소의 피뢰설비 기준<sup>(7)</sup>에는 지정수량의 10배 이상의 위험물을 취급하는 제조소(제6류 위험물을 취급하는 위험물제조소를 제외한다)에는 피뢰침(KS C IEC 61024의 규격에 적합한 것을 말한다. 이하 같다)을 설치하여야 한다. 다만, 제조소의 주위의 상황에 따라 안전상 지장이 없는 경우에는 피뢰설비를 설치하지 아니할 수 있다.

(4) KOSHA GUIDE E-920-2017<sup>(8)</sup> 접지설비 계획 및 유지관리에 관한 기술지침은 낙뢰 등에 의한 기기 및 구조물 손상방지를 위한 피뢰 접지 기준으로 인화성 물질 등을 수송하는 배관의 연결부분이 플랜지(Flange) 등으로 인하여 절연(전기저항이 1,000 Ω 이상)된 경우에는 플랜지의 양단을 서로 본딩(Bonding)하도록 규정하고 있으며, 콘크리트 슬래브 위에 설치되는 탱크설비는 대각으로 2개소 이상을 접지하며, 탱크의 저장 용량에 따라 접지 개소의 수를 증가시킨다.

- (a) 1,000 kl 이하 : 2개소 이상.
- (b) 5,000 kl 이하 : 3개소 이상.
- (c) 20,000 kl 이하 : 5개소 이상.
- (d) 20,000 kl 초과 : 8개소 이상.
- (e) 기타 열 교환기, 탑조 류 등은 최소 1개소 이상 접지한다.

#### 2.2.2 해외 저장설비에 대한 낙뢰보호 기준

NFPA780<sup>(9)</sup>의 가연성 증기 또는 액체를 저장하는 상압의 고정 지붕식 저장탱크의 낙뢰 보호를 위한 설치기준은 다음과 같다.

- (a) 모든 연결 부위는 용접, 리벳 또는 볼트 구조로 하여야 한다.
- (b) 모든 파이프는 탱크의 옆면과 금속적으로 연결되어야 한다.
- (c) 모든 증기 개구부는 밀폐되거나 화염 방지 기구가 설



Figure 4. wastewater storage tank after explosion.

치되어야 한다.

(d) 지붕의 철판 두께는 최소 3/16 in가 되어야 한다.

2.2.3 폐수저장시설에 대한 안전관리 기준

(1) KOSHA Guide P-148-2015<sup>(10)</sup> 화학공장 폐수 집수조의 안전조치에 관한 기술지침은 폐수 집수조의 폭발분위기 형성을 방지하기 위하여 집수조 내부가 연소하한계(LEL)의 25% 이하를 유지하는지 항상 모니터링 하여야 한다.

3. 폐수저장탱크 낙뢰 사고 분석

3.1 폐수저장탱크 사고 정황

2017년 8월 01시경 석유화학공장 폐수저장시설에서 낙뢰에 의한 발화로 추정되는 폭발이 발생하여 Figure 4와 같이 탱크 지붕이 파손된 사고로서 사고 당시 CCTV 영상을 확인한 결과, 폐수저장탱크의 주변에 Figure 5(b)와 같이 낙뢰 섬광이 번쩍인 후 Figure 5(c)와 같이 폭발이 발생하였다.

3.2 발화 원인 분석

3.2.1 현장 조사 및 접화원 분석

CCTV로 관찰된 정황 및 사고 현장 조사를 통하여 낙뢰가 접화원으로 작용하였으며, 폐수 저장탱크 내부의 가연성 증기가 폭발한 것으로 추정되어 집에 따라 접화원 및 발화원인을 다음과 같이 분석을 실시하였다.

(1) 철제 구조 탱크의 접지 저항이 높은 경우 대지와 탱크 Shell 간의 전위차에 의해 대지와 접촉 부위에서 Spark가 발생할 수 있는 가정에 따라 사고 발생 전 측정된 탱크에 설치된 4개소의 접지 저항 측정 기록을 확인한 결과 0.4~1.0 Ω으로 정상적으로 접지가 되어있었던 것으로 확인하였다.



(a) CCTV image before lightning



(b) CCTV image at the time of lightning



(c) CCTV image of wastewater storage tank explosion

Figure 5. CCTV image of wastewater storage tank.

(2) 황화철이 포함된 슬러지는 175 °C 이상 상승하면 자연발화 할 수 있으며<sup>(11)</sup>, 190 °C 이하의 온도에서 자연발화 되는 것이 관찰된 사례<sup>(12)</sup>를 참조하여 공정 폐수중에 포함

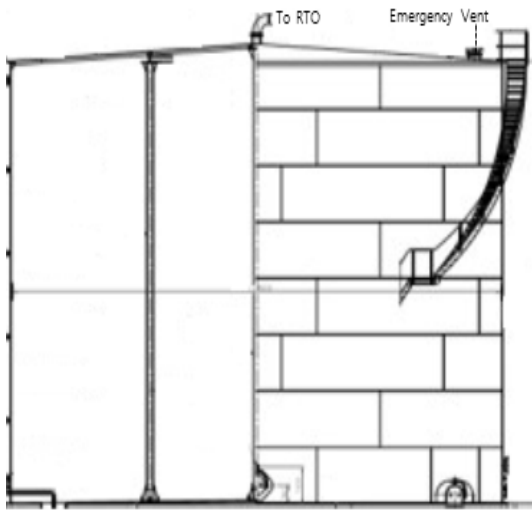


Figure 6. Oily wastewater storage tank.

된 황 성분에 의해 존재할 수 있는 탱크 내부의 황화철이 낙뢰에 의해 순간 온도 상승으로 인하여 발화할 수 있는 가능성에 대해 검토한 결과, 탱크 내부는 부식방지를 위해 전체적으로 코팅 처리가 되어있고 황화철이 발견되지 않아 점화원에서 제외하였다.

(3) 폐수저장탱크 또는 폐수저장탱크와 전기적으로 연결된 시설물에는 자연 부재로서 피뢰설비를 설치하지 않고 있으나 직격뢰가 발생하였을 경우 접지의 회귀과정에서 각종 배관의 이음매 또는 부속 설치물의 이음매 부위에서 아크가 발현할 수 있으며, 이러한 장소에서의 아크가 발생하였을 때 가연성 유증기가 존재하여 착화 분위기가 형성되었다면 화재·폭발이 발생할 수 있으므로 아크 발생 가능성이 있는 부속 시설물의 조사를 실시하였다.

(a) 사고가 발생한 폐수저장탱크는 Figure 6과 같이 높이 19 m, 직경 24 m의 고정식 지붕형 구조의 철제 구조의 탱크이며, 상부에는 탱크 내부의 휘발성유기화합물질을 회수하여 축열식소각로(Regenerative thermal oxidizer)로 보내는 포집 배관이 연결되어 있고 환기 밸브(Emergency vent)가 설치되어 있다.

(b) 폐수저장탱크 상부에 대한 현장 조사 결과 뇌격 시 발생 되는 탄화흔 등 흔적은 발견되지 않았으나 탱크 상부에 설치된 환기 밸브의 상부와 하부를 연결하는 부위가 손상된 것이 발견되었다. 휘발성유기화합물질의 포집 배관은 플랜지로 연결된 부위에 분당이 설치되어 전기적으로 연결되어 있었으며, 하부의 연결 배관도 플랜지 부위에 분당 설치 및 단단히 고정되어 밀폐되어 있는 상태로 아크가 발생하는 경우에도 화재·폭발로 이어질 수 없는 구조로 확인되어 점화원으로 가능성을 배제하였다.

현장 조사 결과 환기밸브를 낙뢰 시 불꽃 방전 가능성

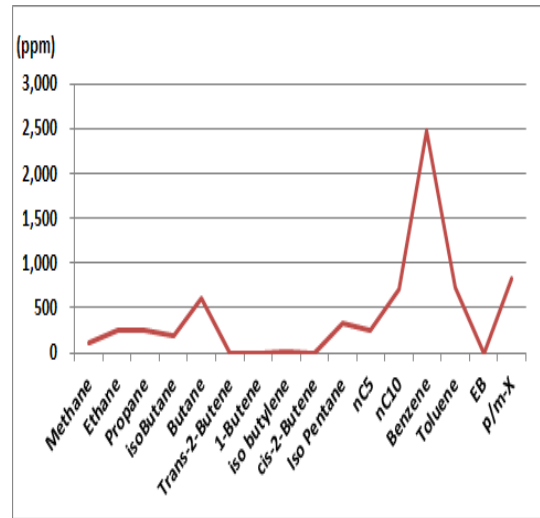


Figure 7. Mixed gas components in wastewater tank.

있는 점화원으로 작용하였을 가능성이 있었을 것으로 판단하였고 환기밸브에 대한 불꽃 방전 발생 유무에 대한 재현 실험이 필요 하였다.

(4) 폐수저장탱크에 저장되는 폐수(물과 기름의 혼합물)는 저장 중 분리된 유류 성분의 표면 증발에 따라 연소하한계 이상이 될 경우 폭발 및 화재 분위기가 형성될 수 있으므로 사고 당시의 폐수저장탱크 내부의 가연성 혼합증기의 농도가 폭발 범위 내에 있었는지에 대한 분석이 필요하였다. 그러나 사고 당시의 혼합 유증기의 농도를 정확히 알 수 없어 폐수저장시설에서 발생하는 휘발성유기화합물질을 소각하는 축열식 소각시설의 설계 당시 분석하였던 Figure 7의 자료를 근거로 폐수저장시설 내부 혼합 유증기의 연소하한계(Lower explosion limit)를 LeChatelier's 식(1)<sup>(13)</sup>을 이용하여 계산하였다.

$$LFL_{mix} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n y_i / LFL_i} \quad (1)$$

여기에서  $LFL_i$ 는 물질  $i$ 의 연소하한계,  $y_i$ 는  $i$  물질의 몰분율,  $n$ 은 가연성 물질의 수를 의미한다.

혼합 유증기 농도의 계산 결과 폐수저장탱크 내부의 혼합 유증기 농도는 0.67%로 혼합 유증기의 연소 하한계 1.32% 대비 50% 수준으로 계산되었다.

### 3.2.2 불꽃 방전 재현 실험

#### (1) 실험방법

실험은 폐수저장탱크에 설치된 동일한 구조의 환기밸브에 낙뢰에 준하는 전류를 인가시키기 위하여 Figure 9과 같은 실험장치를 이용하였다. 환기 밸브의 충격전류 시험을





Figure 8. Impulse current generation system.

Table 1. The Result of an Test

Number of Test	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>
Current (KVA)	62.2	63.2
Bonding Valve	No Arc Generation	No Arc Generation
No Bonding Valve	Arc Generation in Connection Bolt	Arc Generation in Connection Bolt

이 및 시료의 길이의 영향으로 임피던스가 증가하여 실제로는 60 kA 정도의 전류가 인가되었다. Lee<sup>(14)</sup>는 국내 낙뢰 분석 연구에서 60 kA 이하가 95%를 차지한다고 분석하였으며, 분석 결과를 참조하여 최대 크기인 60 kA의 임펄스 전류가 인가되도록 지정하였다.

(2) 실험결과

임펄스 전류를 인가한 실험을 2회 실시한 결과 등전위 본딩을 실시한 환기밸브의 경우 Figure 9(a)와 같이 실험을 위해 실험 장비와 연결한 리드선 부위에서 만 불꽃이 발생하고 상부와 하부의 연결 부위에서는 불꽃이 발생하지 않았다. 반면에 등전위 본딩을 실시하지 않은 환기밸브의 경우 Figure 9(b)와 같이 상부와 하부의 볼트 연결 부위에서 강력한 불꽃 방전이 발생하였다. 환기밸브에 낙뢰에 준하는 임펄스 전류를 인가한 실험결과는 Table 1과 같다.



(a) Test of electric bonding emergency vent



(b) Test of no electric bonding emergency vent

Figure 9. Impulse current application test.

위한 실험 장비로는 충격전류 8/20  $\mu$ s, 80 kA 인가가 가능한 임펄스 전류 발생장치((주)옵니엘피에스)와 인가 및 측정을 위한 Controller를 사용하였다. 실험은 환기밸브의 상부와 하부를 등전위 본딩을 하였을 때와 하지 않았을 때 각각에 대해 임펄스 전류를 각각 2회씩 인가하였다. 시험 전류는 8/20  $\mu$ s, 80 kA로 설정하여 인가하였으나 리드선 길

4. 결 론

사고현장 조사와 폐수저장탱크 내부의 유증기 분석 및 환기밸브의 임펄스 전류 인가 실험을 종합하여 폐수저장탱크의 발화원인을 조사하고 다음과 같이 결론을 얻었다.

첫째 낙뢰가 저장탱크 상부를 뇌격하였고 등전위 본딩이 설치되지 않았던 환기밸브의 상부와 하부 사이에서 불꽃 방전이 발생되었으며, 불꽃 방전이 점화원으로 작용하였다.

둘째 혼합 유증기의 연소상한계 및 연소하한계는 온도에 영향을 받으므로(폭발하한계는 온도가 100  $^{\circ}$ C 증가할 때마다 8% 감소)<sup>(15)</sup> 폐수저장탱크 내부의 혼합 유증기 농도는 폭발 하한계의 50% 수준이었으나 뇌격으로 인하여 탱크 내부 온도가 순간적으로 급격히 상승하였고 탱크 내부의 혼합 유증기 폭발이 발생하였으며, 이로 인하여 저장탱크 지붕이 파손된 것으로 판단된다.

셋째 낙뢰에 의한 화재·폭발 사고 방지를 위하여 정유 및 석유화학 공장의 저장탱크는 낙뢰 발생 시 자연 부재로서 역할을 충분히 할 수 있도록 구조적 안정성을 검토하고 접지 및 본딩을 빠짐없이 실시하여 전기적 연속성을 유지하는 것이 반드시 필요하다.

## 후 기

본 연구과정에서 임펄스 전류 인가 실험을 지원해준 (주) 움니엘피에스 기술연구소 관계자분들의 연구 지원에 감사드립니다.

## References

1. Korea Meteorological Administration, "2018 Lightning Yearbook" (2018).
2. Jerome Taveau, "Explosion of Fixed Roof Atmospheric Storage Tanks, Part1: Background and Review of Case Histories", Process Safety Progress, Vol. 30, No. 4, pp. 381-383 (2011).
3. Foregin Accident French Ministry of Ecology, Energy, Sustainable Development and Town Planning Polution and Prevention Department, "ARIA Database Appendix 2", p. 50 (2007).
4. Yonhap News Agency, <http://yna.co.kr> (2017.07.08).
5. KS C IEC 62305, "Protection Against Lightning - Part 3 : Physical damage to Structures and Life Hazard", p. 45 (2007).
6. Ministry of Employment and Labor, "Technical Instructions on the Installation of Lightning Rods", Notice No. 2001-4 (2001).
7. Dangerous Goods Safety Control Act Enforcement Regulations Annex.4, "Criteria for Lightning Protection Facilities in Manufacturing Plants" (2019).
8. KOSHA Guide E-920-2017, "A Study on the Planning and Maintenance of Ground Equipment Technical Guidance" (2017).
9. NFPA 780, "Standard for the Installation of Lightning Protection System" (2004)
10. KOSHA Guide P-148-2015, "Technical Guide for Chemical Plant Wastewater Collection Tank Safety Measure" (2015).
11. KOSHA Guide P-64-2012, "Safety Technical Specification on the Treatement of Iron Sulfide in Oil Refining and Petrochemical Plants" (2012).
12. L. H. Dimpfl, "Study Gives Insight Into Asphalt Tank Explosion", Oil & Gas Journal, pp. 180-185 (1980).
13. S. K. Lee, D. J. Kim, Y. J. Jeng, J. D. Jeng and D. M. Ha, "Combustion Engineering", Dong Hwa Technology Publishing, Seoul Korea, pp. 119-121 (2014).
14. S. H. Lee "A Study on Recent Lightning Accident Examples and Disaster Analysis", Master's Thesis, Kangwon University, p. 15 (2016).
15. Y. S. Lee, S. J. Kang, H. Kim, C. N. Park, J. B. Bak, S. C. Shin, I. S. Woo, K. W. Lee, et al., "Chemical Process Safety Fundamentals with Applications", Dong Hwa Technology Publishing, Seoul Korea, pp. 240-242 (2006).