

# 소방학개론

---

8주차

폭발

부산가톨릭대학교 소방방재학과 김예진 교수  
<https://fire.cup.ac.kr>

# 폭발 : 급격한 압력의 방출 (교과서 184p), 폭발의 종류 (교과서 189p)

- **착화까지는 연소와 동일하나 착화 이후 급격한 압력의 전파가 일어나 폭음과 함께 파괴를 수반**
  - 물리적 폭발 : 기체나 액체의 팽창, 상변화 등의 물리현상이 압력발생의 원인  
→ 압력용기의 파열, 보일러 파열
  - 화학적 폭발 : 물체의 연소, 분해, 중합 등의 화학반응으로 압력이 상승  
→ 가스폭발, 화약류의 고체폭발, 아세틸렌 등의 분해폭발, 분진폭발
- 폭발의 조건 = 연소의 조건 (물적 조건, 에너지 조건)
- 폭발의 예방대책 = 발화, 연소의 예방대책과 동일
  
- 폭발이 발생할 때의 원인 물질의 물리적 상태에 따른 분류
  - 기상 폭발
  - 응상 폭발 (응상 = 고체와 액체를 총칭)

# 폭발 : 급격한 압력의 방출 (교과서 184p), 폭발의 종류 (교과서 189p)

- **착화까지는 연소와 동일하나 착화 이후 급격한 압력의 전파가 일어나 폭음과 함께 파괴를 수반**
  - 물리적 폭발 : 기체나 액체의 팽창, 상변화 등의 물리현상이 압력발생의 원인  
→ 압력용기의 파열, 보일러 파열
  - 화학적 폭발 : 물체의 연소, 분해, 중합 등의 화학반응으로 압력이 상승  
→ 가스폭발, 화약류의 고체폭발, 아세틸렌 등의 분해폭발, 분진폭발
- 폭발의 조건 = 연소의 조건 (물적 조건, 에너지 조건)
- 폭발의 예방대책 = 발화, 연소의 예방대책과 동일
  
- 폭발이 발생할 때의 원인 물질의 물리적 상태에 따른 분류
  - 기상 폭발
  - 응상 폭발 (응상 = 고체와 액체를 총칭)

# 11.2 기상 폭발 (화학적 폭발)

## • 가스 폭발

- 가연성 가스와 지연성 가스의 혼합기체 (가연성 혼합기 형성된 상태) 에서 발생

- 물적 조건(가연성 혼합기의 농도 및 압력) 및 에너지 조건(점화원)을 만족하여 폭발(연소)범위 내에 존재해야

(Ex) 증기운 폭발 (VCE, UVCE) : 다량의 가연성 가스 또는 기화하기 쉬운 가연성 액체가 지표면에 유출, 다량의 혼합기체 형성하여 폭발이 발생

### ◆ 부천 충전소 가스폭발사고

1. 사고일시 : 1998. 09. 11(금) 14:20경
2. 사고장소 : 경기 부천시 오정구 내동
3. 피해현황
  - ◇ 인명 : 사망 1명, 부상 83명
  - ◇ 재산 : 약 95억 7천만원

4. 사고내용 : 안전관리 책임자 부재시 탱크로리 운전자가 임의로 부탄탱크로리(12톤)에서 지하매몰형 부탄 저장탱크(39.9톤)로 이충전작업을 하기 위하여 액체라인과 기체라인의 로리호스 커플링을 체결한 후 가스압축기 전원 스위치를 작동시키자, 불완전하게 체결된 충전호스의 커플링이 이탈·파손 되면서 다량의 액화가스가 누출되어 증발되고 증기운을 형성하여 확산되던중 원인 미상의 점화원에 의해 착화되면서 BLEVE가 발생, 탱크로리 2대 및 충전소의 시설등이 파손된 사고임.



[http://www.edoori.co.kr/MrHome/HomeLove/safety/safety05\\_4.html](http://www.edoori.co.kr/MrHome/HomeLove/safety/safety05_4.html)

## 11.2 기상 폭발 (화학적 폭발)

- 분무 폭발

- 고압으로 유지되던 유압설비 일부가 파손
  - 내부의 가연성 액체(압력유, 윤활유)가 공기 중에 분출
  - 미세한 액적이 공기중에 부유
  - 착화에너지가 주어진다면 폭발

- 분해 폭발

- 분해에 의해 생성된 가스의 열팽창으로 인한 압력상승, 압력방출
- 일반적으로 분해할 때 흡열하므로, 가스폭발의 특수한 경우에 해당
- 분해할 때 발열하는 에틸렌, 산화에틸렌, 아세틸렌, 과산화물 등이 대표적

## 11.2 기상 폭발 (화학적 폭발)

- 분진 폭발

- 가연성 고체의 미분이 공기 중에 부유하고 있을 때 착화원에 의해 폭발
- 단위용적당 발열량이 크므로 가스 폭발에 준하는 파괴효과
- 유황, 플라스틱, 사료, 석탄, 알루미늄, 철, 곡물류

(1) 분진 분자의 표면에서 산소와 급격한 연소반응

(2) 부유 상태의 분진입자 + 점화원 → 입자표면 온도 상승

(3) 입자 표면의 분자 열분해 → 가연성 기체 방출, 혼합기 형성

(4) 점화원에 의해 발화, 화염 발생 → 미연소 분진 입자 및 열분해 산물들의 연.

(5) 연속적 미연 분말의 분해로 인한 발화 전파 → 폭발



2008년 미국의 설탕공장

<https://m.blog.naver.com/ldy9356/221863539989>

## 11.3 응상 폭발 (물리적 폭발)

- 수증기 폭발

- 용융금속이나 Slug 같은 고온물질이 물 속에 투입되었을 경우 일시적으로 물이 과열  
→ 순간적으로 비등하여 상변화 (액상→기상) 에 따른 폭발 발생
- 착화원과 가연물도 필요하지 않는 상변화에 의한 물리적 폭발

- 과열액체 증기 폭발

- 고압의 포화수를 저장하고 있는 용기가 파손되어, 용기 일부분이 개방되면 용기내압의 급속한 감소  
→ 일부 액체가 급속히 기화되며 증기압 급상승 → 용기의 파괴와 폭발을 야기함
- (대표적) 보일러폭발

# Chapter 12. 유류 저장탱크에서 발생하는 현상

- 석유 (Petroleum)

- Petra (바위, 그리스어) + Oleum (기름, 라틴어)
- 지하에서 생성된 고, 액, 기상의 원유를 말함
- 매장된 위치가 깊을수록 내부압력이 높고 가스물질의 함량이 높다
- 여러 종류의 탄화수소를 주성분 + 미량성분으로 황, 질소, 금속 함유
- 불순물로 수분, 가스분 함유하고 있어, 이를 간단히 제거한 상태까지를 원유라 칭함

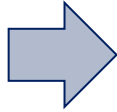
- 인화점 순서

• 휘발유(-43°C 이상) → **원유** (30~60 °C) → 정제공정 → **석유제품** (60~150 °C) → 윤활유 (130~350 °C)  
→ 아스팔트 (200~300 °C)

# 경질유와 중질유 탱크화재의 특성

## 경질유

- 등유보다 휘발도가 큼
  - 휘발유, 등유, 메탄올, 에탄올
- 20 °C에서 증기압 5mmHg 이상

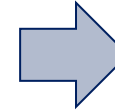


인화점이 낮아 증기 발생이 용이

작은 점화에너지로도 인화가 쉬움

단일성분 액체, 액온이 인화점보다 높음

예혼합형 전파

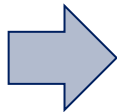


UVCE  
(증기운 폭발)

BLEVE  
(비등액체 팽창 증기폭발)

## 중질유

- 등유보다 휘발도가 작은 상태
  - 등유(케로신), 디젤, 중유, 원유
- 20 °C에서 증기압 5mmHg 미만

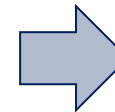


경질유보다 인화점이 높음

인화점까지 온도를 상승시켜야 인화가 가능

다성분 액체, 액온이 인화점보다 낮음

예열형 전파



Boil-over  
(물, 수증기 팽창)

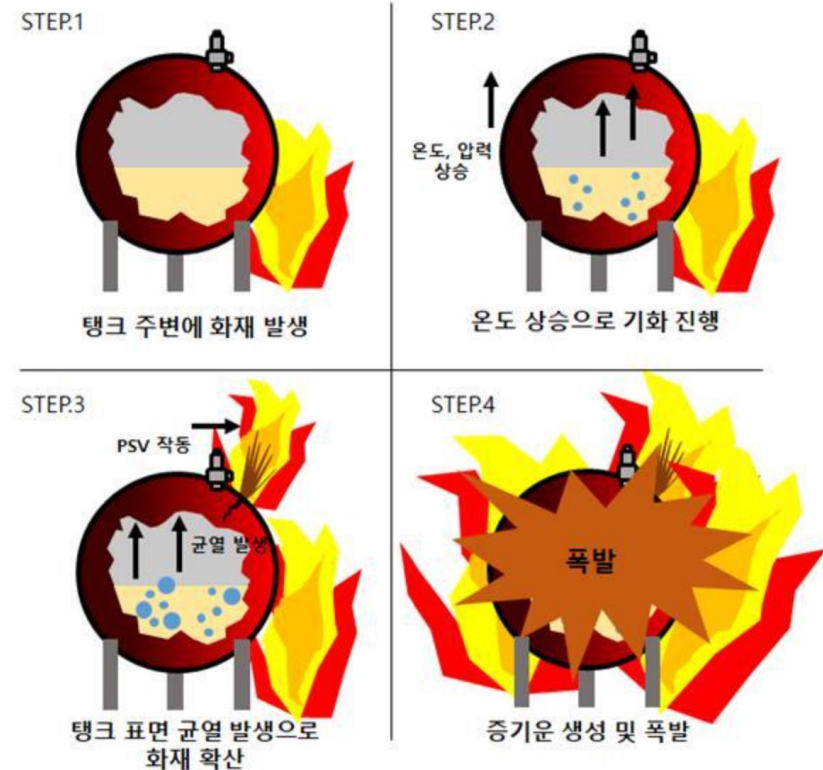
Slop-over  
(기름 팽창)

Floth-over  
(거품)

# BLEVE (비등액체 팽창 증기폭발)

- Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion

- 고압 상태인 액화가스용기가 가열되어 물리적 폭발 발생, 순간적으로 화학적 폭발로 이어지는 현상
- 초기의 물리적 폭발 발생(탱크의 파열로 인한 폭발) : 상의 변화에 의한 폭발
  - 액체가 들어있는 탱크 주위에 화재 발생
  - 화재열에 의해 탱크벽 가열
  - 액의 온도 상승, 탱크 내 압력 증가
  - 화염 접촉부(내면에서는 기상 접촉부) 탱크 외장 강도 강하, 탱크 균열
  - 탱크 균열로 기-액의 평형상태가 깨짐
  - 급격한 압력저하로 탱크내벽에 강한 충격  
→ 탱크 파열, 액화가스 증기 분출, 대형화염 발생



# BLEVE (비등액체 팽창 증기폭발)

- BLEVE의 위험성
  - 액체온도 상승으로 탱크 내 체적이 200배로 팽창  
→ 압력 급상승 → 안전장치 (Relief V/V 등)가 잘 되어 있어도 소용없음
  - 인화성 액체 저장탱크의 파열시 BLEVE 와 함께 Fire Ball 형성
- BLEVE의 발생조건
  - 가연물이 비점 이상 가열될 것
  - 가연성 가스가 밀폐계 내에 존재할 것
  - 기계적 강도 이상의 압력이 형성될 것
  - 내용물이 대기 중으로 방출될 것
  - 온도 상승으로 인한 탱크 파열

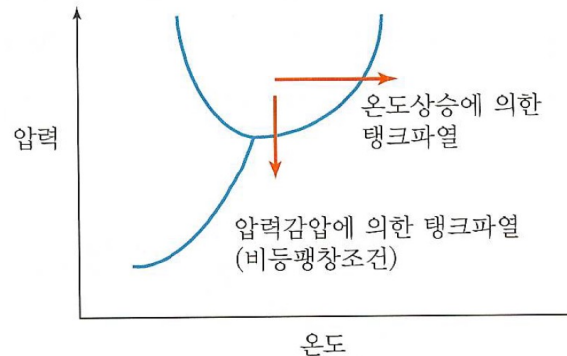


Figure 2. Time-dependent evolution of the fireball after the explosion.

Figure 2. Time-dependent evolution of the fireball after the explosion.

Published in 2015

Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (BLEVE) of peroxy-fuels: Experiments and Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation

K. Mishra, K. Wehrstedt, H. Krebs

[https://www.semanticscholar.org/paper/Boiling-Liquid-Expanding-Vapour-Explosion-\(BLEVE\)-Mishra-Wehrstedt/cofde35ffa6360ab6cdf5b4c19814cbe76283b17/figure/1](https://www.semanticscholar.org/paper/Boiling-Liquid-Expanding-Vapour-Explosion-(BLEVE)-Mishra-Wehrstedt/cofde35ffa6360ab6cdf5b4c19814cbe76283b17/figure/1)

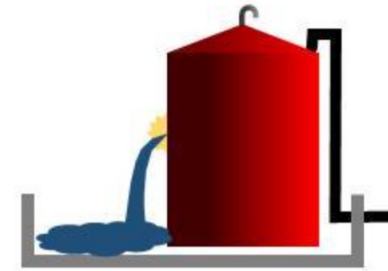
## UVCE (증기운폭발)

- Unconfined Vapor Cloud Explosion
  - 자유공간 증기운 폭발
  - 급격한 화학적인 변화에 의한 폭발 (원인계≠생성계)
  - 저장탱크에서 누출된 가스가 대기 중의 공기와 혼합, 폭발성을 가진 증기운을 형성, 점화원을 만나 Fire ball(화구)을 형성하며 폭발
- 밀폐된 공간에서 발생한 증기운에 의한 폭발 : VCE (Vapor Cloud Explosion)
- 개방된 공간에서 발생하는 증기운 폭발 : 자유공간 증기운 폭발, UVCE (Unconfined VCE)
- 증기운 : 증기로 된 운
- 가연성 혼합가스의 양이 많아(다량의 가연성 가스 혹은 인화성 액체가 누출되어야) 구름의 형태로 존재하는 상태에서 외부 점화원을 만나 폭발

# UVCE (증기운폭발)

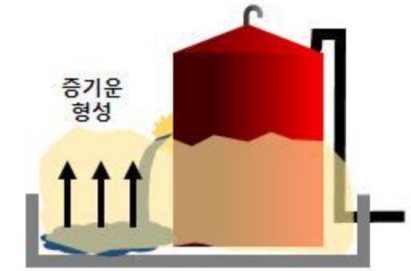
- UVCE 발생과정
  - 인화성 또는 가연성 액체 저장탱크에서 가스가 누설되어 급격히 증발
  - 증발된 가스와 공기가 혼합하여 증기운 형성 (압축가스가 팽창하거나 휘발성 액체가 증발할 때 증기운 형성)
  - 형성된 증기운이 점화원을 만남
  - 폭연에서 폭굉 과정을 거쳐 UVCE
  - Fire Ball로 발전

STEP1



인화성액체 등 누출

STEP2



증기가 공기와 혼합하여 증기운 형성

STEP3



탱크 표면 균열 발생으로 화재 확산

STEP4



증기운 생성 및 폭발

<https://hello-onl.tistory.com/40> (대서방과 경험치쌍기)

## 참고 : 화구 (Fire Ball)

- 가연성의 증기운이 발생하여 VCE 발생 시 에너지 양이 많을 경우 Fire Ball 형성
- 거대한 화염의 구름이 마치 Ball을 형성하듯이 보임
- 복사열에 의해 피해를 유발
- 화구 발생 직후 화구 하부로 공기 유입, 온도 상승됨에 따라 밀도 감소하여 위로 상승하는 특징

STEP.1



인화성물질 누출로  
화재 발생

STEP.2



화재의 확산

STEP.3



화염 반구 형성 후 상승

STEP.4



화구형성 및 지속 연소

<https://hello-onl.tistory.com/40> (대서방과 경험치쌍기)

# 보일 오버 (Boil-over)

- 물, 수증기 팽창

- 유류 탱크(중질유) 내에 수분이 존재할 경우 발생 가능

- 중질유는 다성분 액체여서 (앞 경질유 중질유 정의 참고) 저장탱크에 화재가 장기간 진행되면 유류 중 가벼운 성분은 유류 표면층에서 증발하여 연소되고, 무거운 성분은 화염의 온도에 의해 가열, 축적되어 200~300도(섭씨)의 열류층 (Heat Layer)을 형성

- 열류층의 온도가 열류층 아래로 열흐름에 의해 전달되며 고온층이 천천히 하강 (이 때, 대류나 복사보다는 전도가 지배적, ∴ 탱크 위쪽에서 가열되어 화염발생 중이기 때문) (혹은 화재 진행으로 인해 액의 높이가 낮아지거나 가열층이 두꺼워지는 개념)

- 탱크의 하부에 물 또는 물-기름 에멀전이 존재하면 물이 수증기로 변하면서 급작스럽게 부피팽창을 일으킴

- 유류가 탱크 외부로 분출되는 동시에 다량의 불이 붙은 기름을 탱크 밖으로 분출시키는 현상

- [방지대책] 물이 탱크 하부에 고이지 않도록 탱크 하부에 드레인밸브 설치

경질유의 경우 표면에서 화재 진행시 액면에서는 연소하고 액체 내에서는 비점 아래로 온도가 감소하여 열류층 형성 불가, 즉 Boil-over가 발생 X



## 슬롭 오버 (Slop-over)

- 유류저장탱크에서 표면 화재발생 시 소화활동에 중예, 소방대에 의해 고온층의 표면에 물, 포말 등 찬 물질이 투입될 경우 발생
- 화염과 유류 물질이 동시에 외부로 분출되어 화재 확산, 외부 설비에 영향을 미침
- 소화작업을 위해 주입된 물이나 포말이 주입될 경우 수분의 급격한 증발에 의해 유면에 거품이 일거나 열류의 교란에 의해 고온층 아래의 찬기름이 급격히 열팽창하여 유면을 밀어 올려 유류가 불이 붙은 채로 탱크벽을 타고 넘게 되는 현상



## 프로스오버 (Froth-over)

- 물이 고점도 유류 아래에서 끓을 때 발생
- 탱크 속의 물이 점성을 가진 뜨거운 기름의 표면 아래에서 끓을 때 **기름이 탱크 밖으로 넘쳐흐르는 현상**
- 물과 기름이 거품과 같은 상태로 넘치는 현상
  - 예) 뜨거운 아스팔트가 물이 약간 채워진 무개 탱크차에 옮겨질 경우 고온의 아스팔트에 의해 탱크차 속의 물이 가열되고 (아스팔트의 끓는점은 섭씨200~300도여서 끓지는 않을 것이나 물은 끓게 됨)  
물이 끓게 되면 아스팔트를 밀어올려 탱크차 밖으로 넘치게 됨
  - 유류 탱크 아래쪽에 물이나 물-기름 에멀전이 존재하는 상태에서 물의 비점 이상의 온도를 가진 폐유를 탱크에 주입하는 경우에도 발생

