



CO₂ 임시 저장 탱크에서의 물리적 폭발에 따른 피해영향 고찰

서두현 · †장갑만 · 이진한 · 이광원*

한국가스안전공사 가스안전연구실, *호서대학교 안전보건학과
(2014년 8월 4일 접수, 2015년 4월 6일 수정, 2015년 4월 7일 채택)

A Study of Consequence Analysis of Physical Explosion Damage in CO₂ Storage Tank

Doo-Hyoun Seo · †Kap-Man Jang · Jin-Han Lee · Kwang-Won Rhie*

Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation

**Department of Safety & Health Engineering, Hoseo University*

(Received August 4, 2014; Revised April 6, 2015; Accepted April 7, 2015)

요약

CCS(Carbon Dioxide Capture and Storage)은 온실가스의 주원인 중 하나인 CO₂를 감축하기 위한 대안으로 발전, 시멘트 및 철강 산업 등에서 발생하는 대량의 CO₂를 포집, 압축·액화하여 저장소에 격리하는 일련의 전 과정을 말한다. 이때, 포집된 CO₂는 수송 과정 전·후에 임시저장소에 저장 하게 된다. CO₂는 일반적으로 비가연성, 무독성 가스로 저장소에서 화학적 폭발을 일으킬 가능성이 희박한 가스지만, 임시로 저장되어 보관될 동안 100bar 이상의 압력으로 보관되고 있으며, 포집된 가스에 포함된 불순물과 산화물 등에 의해 용기의 부식으로 인한 물리적 폭발이 일어날 가능성이 있다.

폭발 강도는 일반적으로 TNT 상당질량을 통해 계산할 수 있으며, CO₂ 임시 저장소는 대량의 CO₂를 보관하기 위한 시설로 용기의 용량을 100,000L(100톤)로 가정하여 계산하였다. 계산을 통하여 약 100bar로 압축되어 저장된 100톤의 임시저장소 1개가 폭발할 때의 폭발위력을 산출하면, 대략 2346 lb 이며, 이를 환산하면 약 1064 kg의 TNT가 폭발하는 위력과 동일한 것으로 계산된다. 폭발중심으로부터의 거리에 따른 과압은 환산법칙(scaling law)을 통해 계산하였다. 또한, 폭발과압으로 인한 인체 상해에 대해 폐출혈(Lung Haemorrhage)로 인한 사망과 고막파열 등의 상해를 고려하여 Probit 모델을 통하여 추정하였다.

Abstract - CO₂ is non-flammable, non-toxic gas and not cause of chemical explosion. However, various impurities and some oxides can be included in the captured CO₂ inevitably. While the CO₂ gas was temporarily stored, the pressure in a storage tank would be reached above 100bar. Therefore, the tank could occur a physical explosion due to the corrosion of vessel or uncertainty. Evaluating the intensity of explosion can be calculated by the TNT equivalent method generally used. To describe the physical explosion, it is assumed that the capacity of a CO₂ temporary container is about 100 tons. In this work, physical explosion damage in a CO₂ storage tank is estimated by using the Hopkinson's scaling law and the injury effect of human body caused by the explosion is assessed by the probit model.

Key words : CO₂ Storage, Explosion, Probit model, Hopkinson's scaling law, TNT equivalent method

†Corresponding author:Kapman1006@kgs.or.kr
Copyright © 2015 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

CCS 기술이란, Carbon Dioxide Capture and Storage 약어로서, 온실가스의 주원인 중 하나인 CO₂를 감축하기 위한 직접적인 해결방법이다. CCS 기술은 CO₂ 대량 배출원이 되는 발전, 시멘트 및 철강 산업 등에서 발생하는 대량의 CO₂를 포집한 후 압축·액화하여 배관 및 차량 또는 선박으로 수송하여 육상 또는 해상에 검증된 저장소에 저장하는 일련의 전 과정을 말한다[1].

전 세계적으로 온실가스(CO₂ 등) 저감을 위한 기술적 대안으로 신재생에너지 뿐만 아니라 대규모 탄소 포집 및 처리 기술의 중요성이 대두되고 있다. 더불어 CCS 기술을 통해 배출전망치의 19%가 감축 가능 할 뿐만 아니라, CCS 플랜트 기술의 세계시장 진출을 통해 국가 녹색성장을 주도할 핵심 기술로 인식되고 있다. Fig. 1은 CCS 기술의 개략도이다.

CCS 기술은 크게 포집, 수송, 저장 기술로 나눌 수 있다. CCS 전체 비용의 70~80%를 차지하는 핵심 기술인 포집은 배출원으로부터 대량의 CO₂를 모아 압축하는 기술이며, 수송 기술은 포집된 CO₂를 저장소까지 안전하게 운송하는 기술을 의미한다. 그리고 저장 기술은 포집된 CO₂를 영구 또는 반영구적으로 격리하는 기술을 말한다.[3]

이러한 CCS 기술 과정 중에는 국가 차원에서 대량의 CO₂를 다루고 있으며, 압축·액화 과정을 거친 고압가스로 취급 되고 있다. 이에 따라, 대량의 CO₂는 질식의 위험뿐만 아니라 고압폭발의 위험을 갖고 있다.

본 논문에서는 대량의 CO₂에 대한 위험성을 인식하고, CO₂ 임시저장 용기 폭발의 시나리오를 구상하여 TNT 당량 분석을 통해 피해 정도 및 인체 상해 수준을 예측하고자 한다.

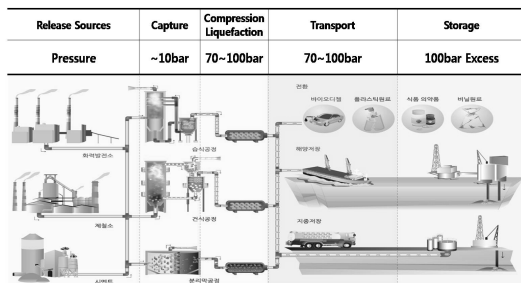


Fig. 1. Schematic diagram of CCS process[2].

II. 사고발생 시나리오

2.1. CCS 공정 시나리오

CCS 기술을 이용하여 CO₂를 처리하는 과정 중에서 포집된 CO₂는 파이프라인 또는 철도, 차량 등을 이용하여 저장소로 수송되어지게 된다. 이 중 대량의 CO₂를 운송하기에 가장 적합할 것으로 판단되어지고 있는 것이 파이프라인 수송기술이며, 지상 및 해상에서 가장 유효할 것으로 전망되고 있다. 저장소는 해안에 가까운 지중 또는 해양의 지하 암벽 층을 사용할 전망이며, 이는 포집장소로부터 상당한 거리에 위치한다. 따라서 CCS 수송 과정에서 CO₂는 수송되기 전·후에 임시저장소가 필요하게 된다.

CO₂를 파이프라인으로 수송하기 위해서는 일정 압력을 유지해야하며, 대량의 CO₂를 운송하기 때문에 포집된 CO₂를 축적하여 보내는 것이 효율적이다. 또한, 파이프라인의 사용이 어려운 지역의 경우 철도 및 차량을 통해 운반하기 위해서도 포집된 CO₂를 임시로 저장하는 공간이 필요하게 된다. 또한, 파이프라인을 통해 수송된 CO₂는 저장소에 주입하게 된다. 이 과정 중에도 지하저장소에 CO₂ 주입을 보다 효율적으로 운용하기 위해서는 주입 전 임시저장소에 저장할 필요가 있다.

2.2. CCS 공정에서의 위험성

일반적으로 CO₂는 불연성, 무독성 가스로 저장소에서 화학적 폭발을 일으킬 가능성이 희박한 가스이다. 그러나 공기보다 비중이 크고 밀도가 높아 지면에 체류하는 성질을 갖기 때문에 질식의 위험성이 존재한다. 공기 중에서 CO₂의 농도가 증가함에 따라 생리적 위험성이 발생되며, 공기 중 CO₂ 농도가 10%인 경우 1분 이내 의식상실, 20%이상인 경우 단시간 내 중추신경 마비와 사망에 이를 수 있다.[2]

또한, 발전소등 배출원으로부터 포집된 CO₂는 대량으로 포집·압축되며, 초임계(Super Critical)상태로 수송되어 매우 높은 고압으로 다루어진다.

현재 CO₂ 파이프라인은 석유회수증진(Enhanced Oil Recovery)을 위해 사용된 경험뿐이다. 이러한 운영은 가스 매장 지점과 가스 처리 공장으로부터 CO₂ 수송 작업에 대한 경험을 가진 북미 지역에서 대부분 설치·운용되고 있다. 하지만, CCS 공정단위에서의 CO₂ 취급은 운용해본 사례가 없으며, 인구 밀집 지역 등의 다양한 인위적 요인을 고려한 경험이 없다.

기존 EOR 운영에 따른 CO₂ 파이프라인에서 발생한 누출 사고의 경우, IPCC에서 발표한 Reported

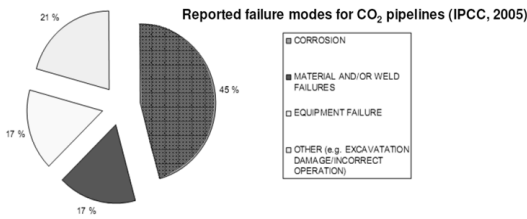


Fig. 2. Reported failure modes for CO₂ pipelines (IPCC,2005).

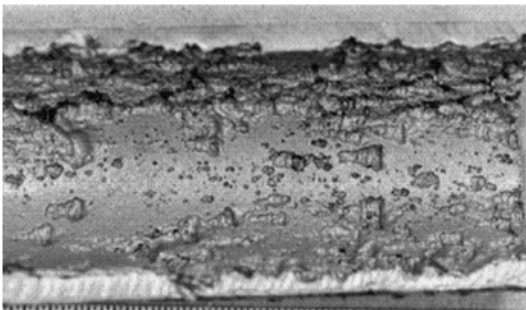


Fig. 3. CO₂ pipeline corrosion by impurities.

failure modes for CO₂ pipelines에 따르면 부식이 45%로 가장 많이 나타났으며, 재질 결함, 설비결함 순으로 나타났다. CO₂ 자체에는 파이프를 부식시키는 성질이 없지만, 사용되는 CO₂내의 불순물 등에 의해 부식이 발생할 수 있다. 특히, CCS 공정시 포집된 CO₂ 내에는 H₂O, H₂S, CO, O₂, CH₄, N₂, Ar, H₂ 등의 불순물과 SO_x와 NO_x 등 산화물이 포함된다.

이 기체들의 존재는 사람의 건강과 안전에 영향을 줄 수 있기 때문에 폐기물 또는 위험 물질로 취급될 수 있고, 배관을 통해 수송·저장되는 과정에서 배관 또는 저장 탱크의 부식 및 누출 영향을 발생할 수 있다. 특히, 불순물 중 H₂S의 경우 강한 부식성 및 독성 가스로 분류되고, 수생생물에게 매우 유독한 물질로 알려져 있다. Fig. 2는 IPCC의 사고원인 통계자료 이며, Fig. 3은 부식된 CO₂ 파이프의 모습을 보여준다.

이러한 CO₂ 파이프라인 부식에 대비하기 위해, 해외에서는 품질 기준을 만들어 관리 중에 있다. 일본의 경우 포집된 CO₂를 순도 99%로 유지하도록 규정하고 있으며, IEA에서는 각 불순물의 농도를 ppm 또는 vol%로 규정하여 관리하고 있다. 하지만, 과도하게 CO₂의 순도를 높이는 것은 포집과정 중 처리비용의 문제가 발생할 수 있으며, 반대로 불순물을 많이 포함할 경우 배관의 부식 및 저장 탱크의

Table 1. Recommendation and issues on CO₂ equality of liquid CO₂, transport

Limit concentrations of impurities in CO ₂ stream,		Major issues	
H ₂ O	< 5 ppm	Corrosion	Acid forming components e.g. SO ₂ , CO ₂ combined with water Water content has to be < 50 ppm to ensure no free water
H ₂ S	5 ppm		
CO	5 ppm		
O ₂	100 ppm		
CH ₄	< 2 vol%	Hydrate	Hydrate forming components, e.g. H ₂ S, CO ₂ combined with water Water content has to be < 50 ppm to ensure no free water
N ₂	< 4 vol%		
Ar	< 4 vol%		
H ₂	< 4 vol%	Particulate	Concentration < 4mg/Nm ³ Size 0.3 ~ 0.8 micron Velocity < 2 m/s
SO _x	5 ppm		
NO _x	5 ppm		

Stefan Liljemark et al., CO₂ Quality

- Transport Aspects, IEA Workshop, Oct. 2008.

파열, hydrate로 인한 배관 막힘 등의 문제점이 발생할 가능성이 있다. Table 1은 IEA에서 규정한 CO₂ 품질 기준이다.

부식의 영향으로 CO₂ 임시저장소에서 과압 또는 부식에 의해 폭발이 일어날 가능성이 존재한다. 이러한 경우, 내부의 압축·액화되어 있던 대량의 CO₂가 방출함으로써, 충격파 및 폭발파를 동반하게 된다. 발생된 충격파는 주변의 인명 및 건물을 손상시킬 수 있고, 건물 붕괴 및 2차 폭발 등의 간접적인 피해영향도 발생할 가능성이 있다. 또한, 방출된 대량의 CO₂는 지면에 체류하여 주변 동·식물에 질식 영향을 주게 된다.

이와 같은 사고가 발생할 것을 예상하여 과압에 의한 폭발피해를 평가하고, 만일의 사태를 대비하여 저장소의 안전거리를 예상해 볼 필요가 있다.

III. 물리적 폭발 영향

3.1. 물리적 폭발 강도 계산

폭발 강도는 일반적으로 TNT 상당질량을 통해 계산할 수 있다. 그러나 가연성 가스에서와 달리

CO₂는 화학적 폭발이 발생하지 않아 일반적인 식을 이용하여 열량 및 화학분자를 통해 구할 수 없다. 이러한 이유로 CO₂에 대한 폭발은 물리적 폭발 강도를 계산하는 식을 통해 TNT 상당질량을 구한다. CO₂ 임시 저장소에서 물리적 폭발이 발생할 경우 폭발의 강도는 Equation 1을 통해 계산 할 수 있다.

일정한 체적을 가진 용기가 P₁에서 대기압 P₀로 갑자기 강하하여 부피가 팽창할 경우 배출되는 폭발과압을 TNT 상당량으로 나타내면 Equation 1과 같이 된다. [4]

$$W = 1.4 \times 10^{-6} V \left[\frac{P_1}{P_0} \right] \left[\frac{T_0}{T_1} \right] R T_1 \ln \left[\frac{P_1}{P_2} \right] \quad (1)$$

- W : TNT 상당질량 [lbm]
- V : 압축된 가스의 부피 [ft³]
- P₁ : 압축된 가스의 초기압력 [psia]
- P₂ : 압축된 가스의 최종압력 [psia]
- P₀ : 대기압력 [psia]
- T₁ : 압축된 가스의 온도 [°R]
- T₀ : 표준상태의 온도 [°R]
- R : 기체상수(=1.987) [Btu/lb · male °R]

1.4 × 10⁻⁶ = 환산인자(2.8 × 10⁻³ lb · mole/ft³과 1lb의 TNT = 2,000Btu로 가정)[4]

Table 2. The CO₂ storage tank specification (assumption)

CO ₂ Storage tank capacity	100,000 L (1,000 kg)
Filling pressure	70 bar
Internal pressure	100 bar

Table 3. Converted parameter of specifications

Parameter	Specification	Conversion(US)
V	100,000 L	3,532 ft ³
P ₁	100 bar	1,450.40 psia
P ₂	1 bar	14.50 psia
P ₀	1 bar	14.50 psia
T ₁	15 °C	518.67 °R
T ₀	15 °C	518.67 °R
R	-	1.987 Btu/lb·male °R

위 Equation 1을 통해 계산을 하기 위해 평가 대상인 CO₂ 저장 탱크의 체원(시범시설의 체원)을 Table 2와 같이 가정하였다. 아직 CCS 공정을 위한 임시저장 설비는 갖추어지지 않았지만, CO₂ 임시 저장소는 대량의 CO₂를 보관하기 위한 시설이기에 용기의 용량을 100,000 L(100톤)로 가정하였다. 충전 압력과 저장 압력의 경우 일반적인 CCS 기술의 상용 압력으로 가정하였다. 또한, 임시저장 탱크 내부의 CO₂의 상태는 액체 상태이며, 기체 CO₂와 공존하는 것으로 가정하였으며, 본 연구에서 가정된 임시 저장소의 체원은 Table 2와 같다.

이와 같은 체원을 통하여 TNT 상당질량을 구하기 위해 사용된 변수는 Table 3과 같다. 여기서, 압축된 가스의 최종압력 P₂는 모든 CO₂가 누출하여 대기압과 같아진다고 가정하였으며, 온도는 상온 15°C로 선정하였다. R은 기체 상수로서, 일반적인 값인 약 1.987 Btu/lb · male °R이다.

선정된 값들은 위 Equation 1에 대입하기 위해 단위를 변환해 환산한 결과를 Table 3에 표현하였다.

이와 같이 계산을 통하여 약 100bar로 압축되어 저장된 100톤의 임시저장소 1개가 폭발할 때의 폭발위력을 산출하면, 대략 2346.5074 lb이며, 이를 환산하면 약 1064.3570 kg의 TNT가 폭발하는 위력과 동일한 것으로 계산된다. 만일, 동일하게 100bar의 압력으로 저장되어 있는 CO₂ 임시저장소의 체적이 100톤 이외라면 Table 4와 같은 TNT 상당량을 갖는다.

Table 4. TNT equivalent as the volume of the tank

The volume of the tank (V)		TNT equivalent	
L	ft ³	lb	kg
1,000	35.3150	23.4651	10.6436
5,000	176.5750	117.3254	53.2178
10,000	353.1500	234.6507	106.4357
50,000	1,765.7500	1,173.2537	532.1785
100,000	3,531.5000	2,346.5074	1,064.3570
150,000	5,297.2500	3,519.7611	1,596.5355
200,000	7,063.0000	4,693.0148	2,128.7140
300,000	10,594.5000	7,039.5222	3,193.0709

3.2. 폭발로 인한 사고의 피해거리 비교

물리적 폭발로부터 발생한 폭발과압은 순간적인 빠른 속도로 주변에 상해를 입힐 수 있다. 이에 의해 건물 또는 사람은 비산물 등에 직접적인 폭발영향을 받게 되며 폭발과압영향을 받기 쉽다. 이러한 폭발에 의한 폭발영향의 피해를 추정하려면 피크과압을 적절히 이용하여 얻을 수 있다.

피크과압의 추정에는 TNT 상당질량을 이용하여 얻을 수 있으며, 폭발과의 특성은 일반적으로 환산거리 Z의 함수로 표현한다. 즉, 과압은 TNT의 상당질량과 폭발중심으로부터의 거리를 이용하여 추산할 수 있다. 일반적으로 알려진 환산거리 Z의 함수는 실험적으로 유도된 환산 법칙(scaling law)을 사용하며, 다음 Equation 2와 같다[5,6].

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (2)$$

여기서, Z : 환산거리 [m/kg^{1/3}]
 R : 폭발중심으로부터의 거리 [m]
 W : TNT 상당질량 [kg]

위 식을 통하여, TNT 상당질량에 따라 거리에 비례한 환산거리 Z를 구할 수 있다. 계산된 환산거리 Z는 다음의 Equation 3을 통하여 피크과압[kPa]을 구할 수 있으며, 거리에 따라 피크과압은 반비례하게 된다[4].

$$\log_{10} p^0 = \sum_{i=0}^{11} c_i (a + b \log_{10} Z)^i \quad (3)$$

여기서, p^0 는 환산거리 Z에 따른 overpressure이며, a와 b는 폭발 매개 변수 기능에 대한 방정식에 따른 값을 이용하였다. 환산 거리 Z가 $0.0674 \leq Z \leq 40$ 일 때 각 변수는 Table 5와 같다.

위 Equation 3을 통하여 계산된 값은 아래 Fig. 4와 같이 그래프로 나타내어지며, 그래프를 이용하여 피크 과압을 추산할 수 있다[4].

이렇게 TNT 상당질량을 이용하여 환산거리 Z와 과압(kPa)을 계산하면 Table 6과 Fig. 5와 같다. 대략 1064 kg의 TNT가 폭발하는 폭발위력은 폭발지점으로부터 10m 떨어진 위치에서 1,417 kPa의 압력을 받게 되며, 20m 떨어진 위치에서는 298 kPa의 압력을 받게 된다.

이처럼 과압폭풍이 발생할 경우 건물 구조물이 손상될 수 있으며, 이때 건물 구조물의 붕괴로 인한

간접적인 폭발영향을 받을 가능성도 있다. 이러한, 직·간접적인 폭발 영향에 대해 Lees(1980)는 Table 7과 같이 제시하였다.

직·간접적인 폭발 영향을 살펴보면, 약 1064 kg의 TNT 폭발이 발생할 경우, 그 폭발 영향은 30m의 이내에서 건물에 균열을 일으킬 수 있는 정도이며, 도로 및 차량이 파손되는 영향을 미칠 수 있기에 충분하다. 60m 이내의 경우 약 33 kPa의 압력이 발생하여, 전신주 및 나무가 부러지는 정도의 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다[5,6].

3.3. 폭발과압으로 인한 인체 상해

폭발에 대한 직·간접적인 폭발 영향 이외에도 폭발과압으로 인한 인체에 상해가 발생할 수 있다. 인체에 대한 상해 경우에는 크게 폐출혈(Lung Haemorrhage)로 인한 사망과 고막파열(Eardrum Rupture) 등의 상해를 입는 것을 예상할 수 있다. 이와

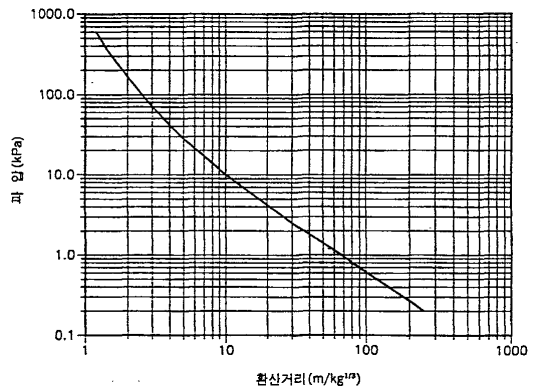


Fig. 4. The propensity when scaled distance and overpressure(SI unit).

Table 5. Equations for the blast parameters functions provided in figure 4

0.0674 ≤ Z ≤ 40			
a	-0.214362789	b	1.3503425
c0	2.780769166	c6	-0.026811235
c1	-1.695898874	c7	0.109097496
c2	-0.154159377	c8	0.001628468
c3	0.514060731	c9	-0.021463103
c4	0.098855437	c10	0.000145672
c5	0.293912623	c11	0.001678478

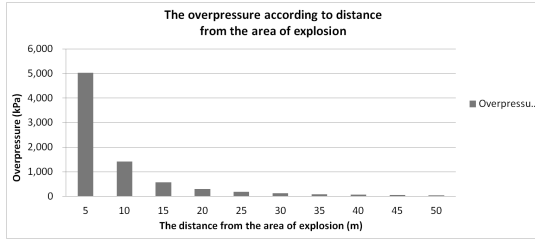


Fig. 5. The overpressure according to distance from the area of explosion.

Table 6. The overpressure according to distance from the explosion spot (kPa)

TNT equivalent W(kg-TNT)	Distance R(m)	Scaled distance Z(m/kg ^{1/3})	Over pressure kPa
1064.3570	1	0.0979	39,275
	5	0.4897	5,036
	10	0.9794	1,417
	15	1.4691	578
	20	1.9588	298
	25	2.4486	180
	30	2.9383	121
	35	3.4280	88
	40	3.9177	68
	50	4.8971	45
	60	5.8765	33

관련한 자료는 Eisenberg (1975) 등에 의해 연구되었다. Eisenberg는 핵폭발자료에 근거하여 직접적인 폭발영향으로 인한 사람의 상해 정도에 대해 Probit 모델을 사용하여 다음과 같이 제시하였다.[6][7]

(1) 폐출혈로 인한 사망의 경우

$$P_r = -77.1 + 6.91 \ln P_s \quad (4)$$

(2) 고막파열의 경우

$$P_r = -15.6 + 1.93 \ln P_s \quad (5)$$

여기서, P_s 는 피크과압(Peak Overpressure [N/m²])을 나타낸다. 위 식을 통해 구해진 Probit 값은 Table 8을 참고하여 확률 값으로 나타낼 수 있다.

Table 7. Diagnostic Features of Explosion Damage(Lees(1980))

Overpressure		Explosion Damage
(psi)	(kPa)	
0.03	0.21	Large glass windows which already under strain broken
0.04	0.28	Loud noise. Sonic boom glass failure
0.15	1.03	Typical pressure for glass failure
0.3	2.07	95% probability of no serious damage
0.5-1	3.45-6.89	Large and small windows usually shattered
0.7	4.83	Minor damage to house structures
1	6.89	Partial demolition of houses, made uninhabitable
1.3	8.96	Steel frame of clad building slightly distorted
2-3	13.79-20.68	Non-reinforced concrete or cinder walls shattered
2.3	15.86	Lower limit of serious structural damage
3	20.68	Steel frame building distorted and pulled from foundation
3-4	20.68-27.58	Rupture of oil storage tanks
5	34.47	Wooden utility poles snapped
5-7	34.47-48.26	Nearly complete destruction of houses
7	48.26	Loaded train wagons overturned
9	62.05	Loaded train boxcars completely demolished
10	68.95	Probable total destruction of buildings
300	2068.4200	Limit of crater lip

* V. J. Clancey, "Diagnostic Features of Explosion Damage", Sixth Int. Mtg. of Forensic Sciences, Edinburgh(1972)

위와 같이 Probit 모델을 이용하여 계산을 통해 구해진 인체의 피해에 대해서는 Table 9와 같다. Table 9에서 Y값은 Probit 값을 나타내며, 이에 따른 백분율을 구하였다.

TNT 상당질량이 1064 kg · TNT 일 때 폭발거리가 20m 이내인 경우 298 kPa의 압력에 의해 폐출혈 사망과 고막파열이 일어날 확률이 100%이며, 이후 폐출혈에 의한 사망 확률은 급격히 감소하여 35m이상 떨어지게 되면 사망확률이 0%에 가깝게 된다. 고

Table 8. Conversion from Probit to Percentages

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33
%	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
99	7.33	7.37	7.41	7.46	7.51	7.58	7.65	7.75	7.88	8.09

Table 9. The probability of body injury according to the distance from the explosion spot

Distance (m)	P (kPa)	Death		Eardrum rupture	
		Y	(%)	Y	(%)
1	39,275.124	43.73	100.00	18.15	100.00
5	5,036.538	29.54	100.00	14.18	100.00
10	1,417.498	20.78	100.00	11.74	100.00
15	577.708	14.57	100.00	10.00	100.00
20	297.621	9.99	100.00	8.72	99.99
25	179.598	6.50	93.33	7.75	99.70
30	120.862	3.76	10.82	6.99	97.65
35	87.856	1.56	0.03	6.37	91.47
40	67.541	-	0.00	5.86	80.58
50	44.788	-	0.00	5.07	52.78
60	32.847	-	0.00	4.47	29.85

막파열의 경우 20m 이상에서 감소하지만 50m 이내에서 50% 확률을 갖는다.

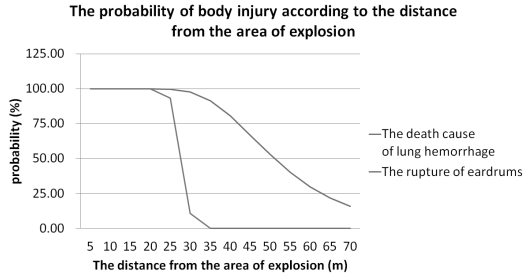


Fig. 6. The graph of the probability according for Table 9.

이를 바탕으로 50% 폐출혈 사망을 일으킬 수 있는 과압은 약 144 kPa 이며, 폭발지역으로부터의 거리는 약 27.6m 이다. 50% 고막파열을 일으킬 수 있는 과압은 43 kPa 이며, 폭발지역으로부터의 거리는 약 51m 이다.

IV. 결론

본 연구에서는 CCS 기술에서 다루어지는 CO₂ 수송 및 저장을 위한 임시저장소의 안전성을 파악하고자 수행하였다. CO₂ 임시저장소에서는 고압의 CO₂가 저장되어 있으며, 포집된 가스에는 부식성 및 독성을 띠는 불순물이 포함되어 있기에 저장 탱크의 부식 및 과압으로 인한 폭발이 발생할 가능성이 잠재되어 있다. CO₂는 화학적 폭발이 발생하지 않는 비 가연성 가스이지만, 고압·고온에서의 초임계상태를 취급하게 됨으로써, 탱크의 물리적 폭발을 고려할 필요가 있다. 이러한 CO₂ 임시 저장 탱크에서의 물리적 폭발이 발생할 경우를 가정하여, 피해 영향 평가를 실시하였다.

평가는 물리적 폭발 강도를 TNT 상당량으로 계산하여, 이에 따른 폭발폭풍 피해와 Probit 함수를 이용한 인체 상해에 대한 평가를 수행하였다.

현재, CCS 기술을 개발 중에 있으며, 아직 임시 저장 탱크 및 수송 라인에 대해서는 운용 사례가 없으며, 임시 저장 설비는 갖추어지지 않았지만, CCS 공정 특성상 포집된 대량의 CO₂를 취급해야 할 것으로 판단된다. 이러한 이유를 토대로 임시 저장 탱크의 용량을 100톤으로 가정하여 폭발강도를 계산한 결과 약 1064 kg의 TNT가 폭발하는 위력과 동일한 강도로 산출되었다. 이 결과를 토대로 환산거리 Z 값을 활용하여 폭발지점으로부터의 거리에 따른 과압을 구하였다.

또한, 인체 상해에 대해서는 Eisenberg(1975) 등에 의해 연구를 참고하여 폐출혈(Lung Haemorrhage)

로 인한 사망과 고막파열(Eardrum Rupture) 등의 상해에 대하여 Probit 모델을 적용하였다.

차후, 본 연구의 결과를 토대로 시뮬레이션 및 실험적 평가가 필요할 것으로 사료되며, 본 연구의 결과가 CCS기술의 실증화 연구에 기초자료로 활용되기를 바라며, 보다 안전한 기술 진보가 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 에너지기술개발사업(2012-2010200071)의 연구비 지원을 받아 수행하였습니다. 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] International Energy Agency, "Energy Technology Perspectives", OECD, (2007).
- [2] R&D Center for Reduction of Non-CO₂ Greenhouse gases, "Development of TRM of carbon dioxide reduction and sequestration", Non-CO₂ Report, (2005)
- [3] Sang Do Park, "Carbon dioxide Capture and Storage Technology", Physics & High Technology, (2009).
- [4] In Sun Hwang, "Model Development of Risk Assessment for CNG Tube Trailers", Seoul National University of Science and Technology, (2007).
- [5] Su Kyung Lee, Young Bum Bae, Jeong Gyu Oh, "Consequence Analysis of Gas Explosion in LPG Vessel Retail Store Which is Located around Apartment Complex", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 10, No 3, (2006).
- [6] Sa Hwan Leem, Jong Rark Lee, Yong Jeong Huh, "A Study on Estimation of Human Damage for Overpressure by Vapor Cloud Explosion in Enclosure Using Probit Model", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 12, No 1., (2008)
- [7] Sa Hwan Leem, Yong Jeong Huh, "A Study on the Estimation of Human Damage Caused by Vapor Cloud Explosion(VCE) in LPG Filling Station", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 14, No 2., (2010)
- [8] Sang Hwa Jin, Tea Woo Kim, In Tae Kim, In Won Kim, Yeong Koo Yeo, "A Study on Reliability Analysis and Quantitative Risk Analysis for Liquefied Petroleum Gas Station", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 5, No 4., (2004)
- [9] "Chemical Process Quantitative Risk Analysis - Second Edition", Center for chemical process safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York 10016-5991.