

# LPG 탱크로리 폭발시 파편 형상에 따른 비산거리 산정에 관한 연구

## A Study on the decision of Scattering distance by Shape of Fragments in LPG Tank lorry Explosion

이영진\* · 황용우\*\* · 이익모\*\*\* · 문진영\*\*\*\*

Young Jin Lee\*, Yong Woo Hwang\*\*, Ik Mo Lee\*\*\*, and Jin Young Moon\*\*\*\*

**요 약** LPG는 사고발생시 사람이나 환경에 치명적인 피해를 가져올 수 있으므로 많은 주의가 필요한 물질이다. LPG는 고정시설 뿐 아니라 운송시설에서도 사고가 빈번하게 발생하며, 그 중 LPG 탱크로리의 사고가 가장 많다. LPG 탱크로리가 운송중 전도되었을 때 LP가스는 2상(two phase) 상태로 누출되어, 대부분 기체로 누출되고 일부분 액체로 누출된다. 이때 누출된 기체도 공기보다 무겁기 때문에 아래로 가라앉게 되고, 누출이 계속된다면 증기운을 형성하여 점화원에 의해 폭발할 수도 있다. 본 연구에서는 LPG 탱크로리의 증기운 폭발 사고 발생시 파편에 대한 영향거리를 분석하여 대피거리를 제시함을 목적으로 한다. 파편의 비산반경 산출 결과, 최대 561m 비산하였다. 따라서 LPG 탱크로리의 누출시 대피하여야 하는 거리는 561 m 이상으로 설정하는 것이 필요하다고 판단된다.

**핵심용어** 파편, 증기운 폭발, LPG 탱크로리

**ABSTRACT** LPG is a substance that requires a lot of attention because it can cause fatal damage to people and environment when an accident occurs. LPG is frequently accidents in transportation facilities as well as fixed facilities, among which LPG tank lorries are the most frequent accidents. When the LPG tank is evacuated, the LP gas leaks into two phases, leaks mostly to the gas and leaks to some liquid. At this time, the leaked gas will also sink downward because it is heavier than air, and if it continues to leak, it may form an explosion and explode by the ignition source. The purpose of this study is to present the evacuation distance by analyzing the effect distance of the LPG liquefied petroleum gas in the event of explosion. As a result of calculation of the scattering radius of the fragment, the cylinder fragment was scattered up to 561 m. Therefore, it is appropriate to set the distance to be escaped when the LPG tanker leaks to 561m or more.

**KEYWORDS** Fragment, Vapor Cloud Explosion, LPG Tank Lorry

### 1. 서 론

국내 부천시 LPG 폭발사고(1998), 멕시코 시티의 정유공장 폭발사고(1984), 영국 Cairns의 LPG 레일탱크 폭발사고, 프랑스 Feyzin의 정유공장 폭발사고 등으로 비추어 볼 때, LPG는 사고발생시 사람이나 환경에 치명적인 피해를 가져올 수 있으므로 많은 주의가 필요한 물질이다(안전보건공단, 2003). 실제 LPG 사고현황은 2006~2015년 조사결과 점차 줄어드는 추세이지만, 여전히 다른 가스들에 비하면 높은 사고율을 보이며, 이러한 사고들의 형태는 폭발이 가장

많았고 누출, 화재, 파열 순으로 집계되었다(한국가스안전공사, 2015).

한국교통연구원의 연구보고서에 따르면 위험물질 관련 사고의 45%가 운송사고에서 발생하였고, 이는 제조과정이나 보관과정보다 높은 수치이다(노홍승 외, 2012). 실제로 가스를 운송하는 탱크로리들의 사고현황을 살펴보면, 탱크로리의 교통사고 건수는 약간 증가하는 추세이며, 그중 LPG 탱크로리가 LPG 벌크로리 및 고압가스 탱크로리보다 훨씬 많은 사고를 유발하는 것으로 집계되었다(한국가스안전공사, 2009). 가스 탱크로리들은 급회전이나 차량의 장비

\*인하대학교 대학원 환경안전융합전공 석사과정(Graduate Student, Dept. of Environment Technology and Safety Technology Convergence, Inha Univ.), E-mail: lyj9727@naver.com

\*\*인하대학교 대학원 환경안전융합 교수(Professor, Dept. of Environment Technology and Safety Technology Convergence, Inha Univ.)

\*\*\*인하대학교 대학원 환경안전융합 교수(Professor, Dept. of Environment Technology and Safety Technology Convergence, Inha Univ.)

\*\*\*\*재능대학교 환경보건과 조교수(Assistant Professor, Dept. of Environmental Engineering & Health Science, Jaeneung Univ.)

결함 등으로 전도되는 사고가 많이 발생하고, 전도 후 가스 누출이 예상된다.

LPG 탱크로리가 제반 원인으로 전도되었을 때 LP가스는 2상(two phase) 상태로 누출된다. 대부분 기체로 누출되고 일부분 액체로 누출되며, 이때 누출된 기체도 공기보다 무겁기 때문에 아래로 가라앉을 것이고 누출이 계속된다면 증기운을 형성하여 점화원에 존재시 폭발할 수도 있다. 대표적인 예로 멕시코 시티의 PEMEX사에서 일어난 LPG 터미널 폭발사고를 들 수 있다. 당시 PEMEX사는 크고 작은 다양한 크기의 LPG 저장탱크 54기를 보유하고 있었다. 사고 당일, 하나의 탱크에서 8인치 배관이 파열되어 LP가스가 누출되었고, 5~10분정도 방치되었을 때 증기운 폭발(Vapor Cloud Explosion, VCE)이 일어났다(방은정, 2017). 이후 연차적으로 폭발이 일어났고, 폭발로 인한 복사열, 과압 및 파편으로 인하여 엄청난 피해를 야기시켰다. 이때 작은 구형의 탱크 파편들은 590 m, 통형 탱크의 파편은 최대 1,200 m에서도 발견되었고, 파편들의 비산은 2차 화재의 원인이 되기도 하였다(안전보건공단, 2003).

이러한 사례들로 보아, 전도된 LPG 탱크로리는 누출된 LP가스로 인한 증기운 폭발을 야기시킬 수 있으며, 폭발의 과압으로 인하여 전도된 차량 주변의 파편들이 영향을 받아 비산하여 먼 거리에 있는 다른 차량이나 사람에게 피해를 줄 수 있다고 판단된다. 또한 멕시코 시티의 폭발사고에서 볼 수 있듯이, 파편의 모양에 따라 비산거리가 달라지기 때문에 가장 멀리 날아갈 수 있는 파편의 형상을 찾아냄으로 대피거리를 제시할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 LPG 탱크로리의 증기운 폭발 사고 발생시 파편에 대한 영향거리를 파편의 형상에 따라 분석하여 대피거리를 제시함으로써 인명 및 재산 피해를 감소시키고자 한다.

## 2. 이론 고찰

### 2.1 증기운 폭발(VCE : Vapor Cloud Explosion)

누출 및 유출된 가연성 가스는 대기중의 공기와 혼합하여 폭발성을 가진 혼합가스를 형성하는데, 이때 가연성 가스는 단열팽창에 의한 온도 감소로 공기와 혼합하여 증기 구름의 형태가 된다. 가연성 가스의 폭발범위의 영역 내에서 발화원이 존재한다면 폭발하게 되는데 이를 증기운 폭발이라고 한다(문일 외, 2016). 폭발은 개방계에서 발생하기 때문에 개방계 증기운 폭발(Unconfined Vapor Cloud Explosion)이라 부르기도 한다(하정호, 1999). 증기운 폭발이 발생하려면 세 가지 조건을 만족해야 하는데, 첫 번째는 충분한 크기의 증기운이 형성되어야 하고, 두 번째로 연소 범위농도에서 공기와 접촉하여 폭발가능한 혼합기체를 형성하여야 하며, 마지막으로 발화원이 필요하다. 세 가지 조건을 모두 만족해야 하므로 증기운 폭발은 잘 일어나지 않

는다. 또한 확산된 증기운 중 전부가 폭발에 참여하지는 않는다. 통상 가연성 가스의 3% 정도가 반응하고, 아주 반응성이 큰 경우에 10% 정도 반응에 참여한다고 알려져 있다. 이때 폭발의 크기는 화염이 전파되는 속도에 따라 결정되는데, 1,000~3,500 m/s로 압력파가 음속보다 빠르면 폭굉, 초당 수미터로 느리면 폭연으로 구분한다.

증기운 폭발이 발생하면 과압(Overpressure)이 발생하여 주변에 피해를 주는데, 이때 과압은 TNT equivalency model 과 식[3](S. R. Soman, 2012)을 사용하여 산출가능하다.

$$W_{TNT} = \frac{\eta H_C W_C}{H_{TNT}} \quad (1)$$

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

$$P_s = \frac{80,800 \left\{ 1 + \left[ \frac{Z}{4.5} \right]^2 \right\}}{\sqrt{1 + \left[ \frac{Z}{0.048} \right]^2} \sqrt{1 + \left[ \frac{Z}{0.32} \right]^2} \sqrt{1 + \left[ \frac{Z}{1.35} \right]^2}} \quad (3)$$

where,

$W_{TNT}$  = TNT equivalent (kg)

$\eta$  = Explosion coefficient

$W_C$  = Mass of the flammable gas (kg)

$H_C$  = Heat of combustion of the flammable gas (kJ/kg)

$H_{TNT}$  = Heat of combustion of TNT (kJ/kg)

$Z$  = Scaled distance (m/kg<sup>1/3</sup>)

$R$  = Distance from the center of explosion (m)

$P_s$  = Overpressure (kPa)

### 2.2 파편의 비산거리 산출

Baker(1983)는 유체역학적인 힘을 통합하기 위하여 Runge-

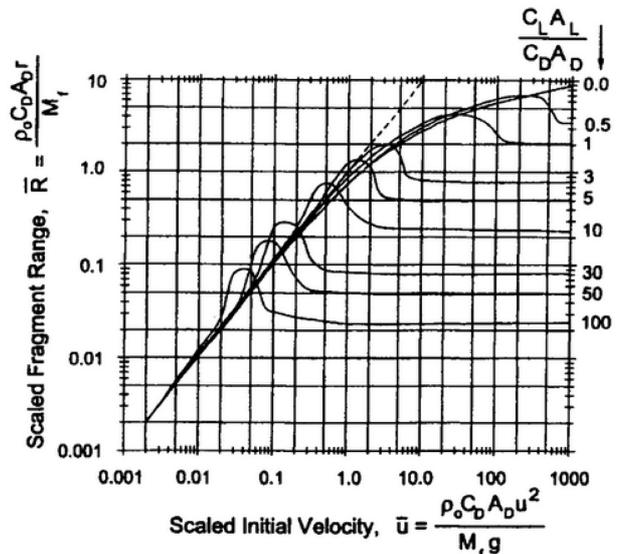


Fig. 1. Scaled initial velocity vs. scaled fragment range

Kutta 방법을 이용하여 미분 방정식을 풀어냈다. 초기속도와 양항비의 조건에 따라 파편 비산반경의 산출 가능한 그래프를 그림 1과 같이 나타냈다. 따라서 파편의 비산거리는 파편의 파열 당시 초기속도와 양항비를 구하고 Baker(1983)의 그래프를 읽음으로서 산출가능하다. 이때 파편의 초기속도는 식 [4]와 같다.

$$u = 2.05 \sqrt{\frac{PD^3}{W}} \quad (4)$$

where,

- $u$  = Initial velocity of the fragment (ft/s)
- $P$  = Rupture pressure of the vessel (psig)
- $D$  = Fragment diameter (inches)
- $W$  = Weight of the fragment (lb)

환산초기속도( $\bar{u}$ )와 환산비산반경( $\bar{R}$ )은 식 [5] 및 식 [6]과 같다.

$$\bar{u} = \frac{\rho_0 C_D A_{D1} u^2}{M_f g} \quad (5)$$

$$\bar{R} = \frac{\rho_0 C_D A_{D1} \gamma}{M_f} \quad (6)$$

where,

- $\bar{u}$  = Scaled initial velocity
- $u$  = Initial fragment velocity (m/s)
- $\bar{R}$  = Scaled range
- $\rho_0$  = Density of ambient air (kg/m<sup>3</sup>)
- $C_D$  = Drag coefficient
- $A_{D1}$  = Area receiving strength (m<sup>2</sup>)
- $M_f$  = fragment mass (kg)

그리고 파편의 비산거리는 식 [7]에 의하여 산출한다.

$$R = \frac{M_f \bar{R}}{\rho_0 C_D A_{D1}} \quad (7)$$

where,

- $R$  = Actual range (m)

### 2.3 양항비

양력과 항력은 항공역학에서 주로 다루는 개념이다. 물체가 공기를 지날 때 공기와 물체는 서로 상호작용하는 힘이 발생하게 되고 이를 공력이라고 한다. 여기서 공력은 양력과 항력을 의미하는데, 양력은 유체의 흐름에 대하여 물체의 표면에서 수직 방향으로 발생하는 힘이다. 즉 고양력을 얻을수록 멀리 비산할 수 있다. 항력이란 유체를 지나는 물체에 대하여 그 움직임을 방해하는 힘을 말한다. 양력은

받음각에 따라 달라지며 상대바람과 받음각의 함수로서 양력계수를 나타낼 수 있다. 또한 항력은 무차원수인 항력계수로 나타낼 수 있고, 항력계수는 실험적으로 데이터가 확보되어 있는 상태이다.

## 3. 연구방법

### 3.1 탱크로리 설계

LPG 탱크로리는 한국가스안전공사의 통계에 의하면 10~20톤의 차량이 가장 많은 것으로 나타났다(한국가스안전공사, 2015). 따라서 사고확률도 10~20톤의 차량이 가장 많이 발생할 수 있기 때문에, 본 연구에서는 연구대상을 차량무게 14톤 탱크로리로 설정하였고 이때 탱크의 유효용량은 10톤이다. 이를 부피의 단위로 나타내면 19,386.77 l이며, 내용물은 프로판으로 설정하였다.

### 3.2 시나리오 설정

도로를 달리던 중 급 회전으로 인하여 LPG 탱크로리의 전도가 발생하였고, 프로판 가스가 누출되어 증기운이 형성된 후 폭발한 시나리오로 설정하였다. 이때 프로판 누출량은 적재량의 10%로 설정하였고, 「액화가스의 안전관리 및 사업법」에 의하여 LPG는 용기의 85%를 초과하지 못하도록 규정되어 있기 때문에 80%가 충전되어 있었다고 가정하였다. 따라서 프로판의 누출량은 1,551 l(19,387 l × 0.8 × 0.1)이다. TNT equivalency model과 식 [3]을 이용하여 과압을 산정하였다. 이때  $H_C$ 는 46,000 kJ/kg,  $H_{TNT}$ 는 4,680 kJ/kg을 적용시켰다(이수경 외, 2006).

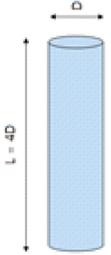
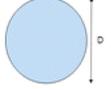
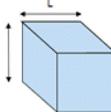
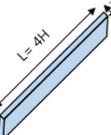
### 3.3 파편의 설정

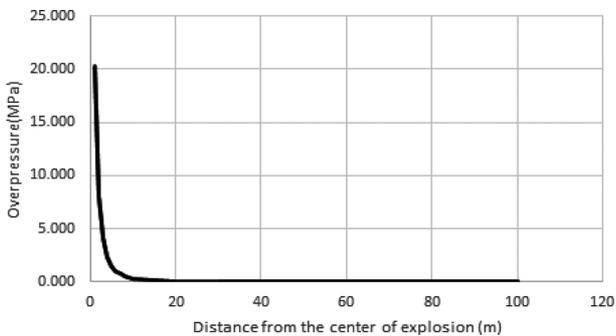
파편은 모양이 달라짐에 따라 받는 공력이 변하게 된다. 따라서 파편의 모양을 달리하여 분석할 필요가 있다고 판단된다. 본 연구에서는 LPG 탱크로리가 전도되어 프로판이 누출되었을 때 증기운을 형성하고 있는 주변에 네 가지 모양의 파편이 존재한다고 가정하였다. 이때 파편은 원기둥형, 구형, 정육면체형, 판형으로 설정하였고, 증기운이 폭발하여 모든 파편이 비산한다고 가정하였다. 파편의 무게는 모두 동일한 20 kg으로 설정하였고 재질은 일반 강철로 설정하여 7,800 kg/m<sup>3</sup>의 밀도값을 적용시켰다. 이때 파편의 부피는 모두 2.56 × 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>으로 동일하게 고려하였다. 파편의 세부 데이터는 표 1에 나타내었고 이때 항력계수는 문헌에 있는 자료를 참고하여 적용시켰다(CCPS, 2000).

### 3.4 양항비의 설정

양력계수는 받음각에 따라서 달라지게 되는데, 일반적으로 받음각이 커질수록 양력계수는 높아지게 된다. 그러나 받음각이 너무 커지게 된다면 박리현상이 일어나 양력계

**Table 1.** The shape of a fragment

Cylinder		Length and diameter		Weight		$C_D$		
		L(m)	D(m)	kg	lb	0.82		
		0.37	0.09	20.00	44.09			
		Equivalent diameter (D)		Area receiving strength ( $A_{D1}$ )		lift-to-drag ratio coefficient		
		m	in	$m^2$	$ft^2$	$A_{D2}$	$A_L$	
		0.26	10.41	0.05	0.59	0.01	0.11	
Sphere		Diameter (D)		Weight		$C_D$	Area receiving strength ( $A_{D1}$ )	
		m	in	kg	lb	0.47	$m^2$	$ft^2$
		0.37	0.09	20.00	44.09		0.05	0.49
Cubic		Length	Equivalent diameter (D)		Weight			
		m	m	in	kg	lb		
		0.14	0.15	6.08	20.00	44.09		
		$C_D$	Area receiving strength ( $A_{D1}$ )		lift-to-drag ratio factor			
			$m^2$	$ft^2$	$A_{D2}$	$A_L$		
		0.80	0.02	0.20	0.07	0.04		
Narrow strip		Length and height		Weight		$C_D$		
		L(m)	H(m)	kg	lb	1.98		
		0.14	0.15	20.00	44.09			
		Equivalent diameter (D)		Area receiving strength ( $A_{D1}$ )		lift-to-drag ratio factor		
		m	in	$m^2$	$ft^2$	$A_{D2}$	$A_L$	
		0.47	18.37	0.17	0.59	0.35	1.84	



**Fig. 2.** Over pressure aspect

수가 감소되는 현상이 일어난다. 본 연구에서는 받음각을 0°, 5°, 10°, 15°로 구분하여 양항비를 산출하였으며, 박리 현상을 고려하여 최대 15°까지 분석하였다(Wikipedia, 2017).

## 4. 연구결과

### 4.1 과압의 산정

1551 l의 프로판이 터졌을 때 과압을 산정한 결과 폭발 중심으로부터 1 m일 때 20.25 MPa, 2 m일 때 8.07 MPa, 3 m일 때 4.12 MPa, 10 m일 때 0.332 MPa로 산출되었다. 과압은 관심거리로부터 멀어질수록 급격히 감소하는 것을 알 수

있었고, 과압에 대한 양상은 그림 2에 나타내었다. 식 4를 이용하여 초기속도를 구할 때, 과압은 psig값을 이용하게 되고, 폭발 중심으로부터 16 m일 때 1.48psig이며 17 m부터 음의 값을 갖게 된다. 통상적으로 1.4psi는 철골구조물에 약간 손상을 일으킬 정도의 과압이지만, 20 kg의 쇳덩어리로 설정한 파편에 대해서는 비산에 대한 영향이 미비할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 폭발 중심으로부터 1~10 m까지의 과압에 대한 파편 비산 영향을 분석하였다.

### 4.2 파편의 초기속도

파편의 초기속도는 식 4에 따라, 폭발당시 힘을 받는 직경이 가장 넓은 판형 파편이 400 m/s로 가장 빠른 것으로 분석되었고, 원기둥형 파편, 구형파편, 정육면체형 파편 순으로 나타났다. 이때 환산 초기속도는 관심거리(폭발 중심으로부터 거리) 1 m일 때 판형 파편 149.30, 원기둥형 파편 7.96, 구형 파편 1, 정육면체형 파편 0.529로 산출되었고, 표 2에 파편의 형태별 초기속도 및 환산초기속도를 나타내었다.

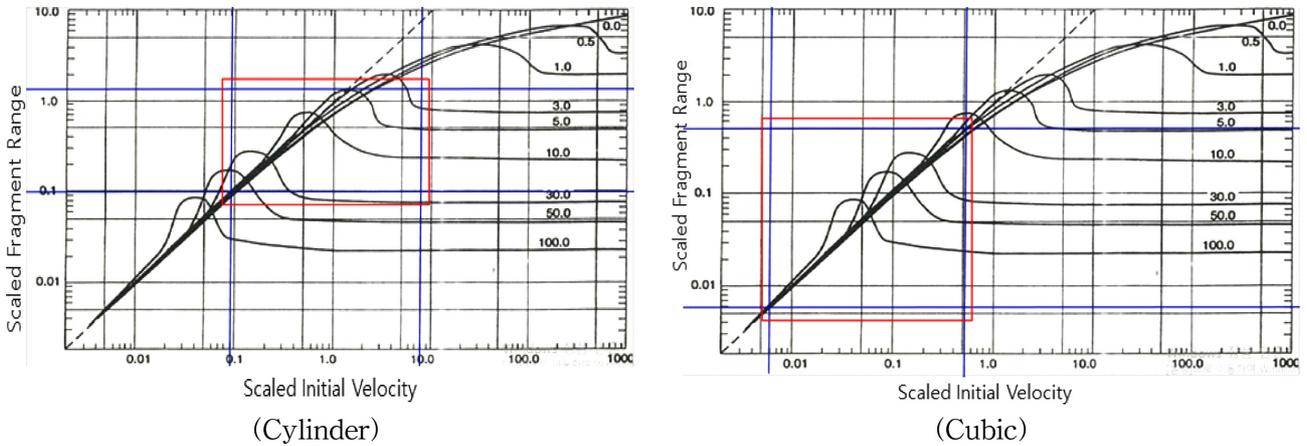
### 4.3 양항비 설정

따라서 본 연구에서는 파편의 모양별로 양항비를 설정하였으며, 이때 받음각은 0°, 5°, 10°, 15°로 구분하였다. 결과

**Table 2. Scaled initial velocity**

Interest*	Cylinder			Sphere			Cube			Narrow strip		
	Initial velocity		Scaled initial velocity	Initial velocity		Scaled initial velocity	Initial velocity		Scaled initial velocity	Initial velocity		Scaled initial velocity
	m	m/s		ft/s	m/s		ft/s	m/s		ft/s	m/s	
1	170.769	560.27	7.959	87.936	288.505	0.999	76.269	250.227	0.529	400.419	1313.711	149.298
2	107.420	352.43	3.149	55.315	181.479	0.395	47.976	157.401	0.209	251.877	826.368	59.075
3	76.284	250.28	1.588	39.282	128.877	0.199	34.070	111.778	0.106	178.870	586.844	29.792
4	57.800	189.63	0.912	29.763	97.649	0.114	25.815	84.693	0.061	135.528	444.647	17.103
5	45.624	149.68	0.568	23.494	77.079	0.071	20.377	66.852	0.038	106.979	350.980	10.657
6	37.010	121.42	0.374	19.058	62.527	0.047	16.530	54.231	0.025	86.782	284.717	7.013
7	30.587	100.35	0.255	15.751	51.676	0.032	13.661	44.820	0.017	71.721	235.306	4.790
8	25.597	83.98	0.179	13.181	43.244	0.022	11.432	37.507	0.012	60.019	196.913	3.354
9	21.584	70.81	0.127	11.115	36.465	0.016	9.640	31.627	0.008	50.610	166.044	2.385
10	18.258	59.90	0.091	9.402	30.846	0.011	8.155	26.754	0.006	42.812	140.460	1.707

\*Interest : Distance from the center of explosion (m)



**Fig. 3. Optimal lift-to-drag ratio setting (Cylinder and Cubic)**

원기둥형 파편이 경우 받음각 0°일 때 양항비 5.37로 가장 멀리 비산하였고, 정육면체형 파편은 받음각 15°의 경우 양항비 1.06으로 최대로 비산하였다. 구형 파편은 받음각과 상관없이 양력계수가 0이 됨으로 양항비는 0이 된다. 판형 파편의 경우 받음각을 0~15°로 달리하여 분석해본 결과 모

두 양항비는 0에 가깝게 산출되었기 때문에 양항비 0을 적용시켰다. 그림 3은 원기둥형과 정육면체형의 양항비와 초기속도에 따른 비산반경을 나타내었고, 구형파편과 판형파편의 경우 받음각과 상관없이 양항비 0을 적용시키기 때문에 그래프를 나타내지 않았다.

**Table 3. Range according to the number of fragment (Cylinder, Sphere, Cubic, Narrow strip)**

Interest	Scaled distance	Cylinder		Sphere		Cubic		Narrow strip	
		Scaled range	Range (m)						
1	0.163	0.479	178.772	0.700	552.468	0.500	560.711	5.888	292.398
2	0.326	0.550	205.257	0.328	259.005	0.209	234.298	4.898	243.206
3	0.488	1.288	481.170	0.184	145.314	0.106	118.787	4.074	202.290
4	0.651	1.122	419.082	0.100	78.942	0.056	63.062	3.311	164.427
5	0.814	0.661	246.774	0.065	50.969	0.040	44.645	2.692	133.651
6	0.977	0.386	145.311	0.045	35.670	0.024	26.901	2.212	109.894
7	1.139	0.266	99.280	0.028	22.249	0.015	17.369	1.841	91.406
8	1.302	0.200	74.701	0.020	15.751	0.013	14.447	1.531	76.028
9	1.465	0.133	99.380	0.014	11.151	0.008	8.747	1.253	62.226
10	1.628	0.100	74.701	0.010	7.894	0.006	6.504	1.000	49.656

#### 4.4 파편의 비산반경

파편의 비산반경 산출 결과 원기동형 파편은 최대 481 m, 구형 파편은 552 m, 정육면체형 파편은 561 m, 판형 파편은 292 m 비산하였다. 원기동형 파편의 경우 관심거리 3 m에서 최대 비산거리를 나타냈으며, 다른 파편들은 모두 1 m일 때 최대 비산거리를 나타내었다. 또한 환산거리 3 m부터 10 m 까지는 원기동형 파편이 가장 멀리 비산하였고, 판형, 구형, 정육면체형 순으로 비산되었다.

연구결과 낮은 폭발압력에서는 양항비 5를 적용시킨 원기동형 파편이 멀리 비산되고, 본 연구 시나리오의 폭발압력에서는 양항비 1을 적용시킨 정육면체형 파편이 가장 멀리 비산되며, 더 높은 파열압력에서는 양항비 0을 적용시킨 구형 파편이 가장 멀리 비산될 것으로 판단된다.

판형 파편의 경우 비산시 공기저항을 받는 힘이 크고, 따라서 항력계수도 높은 값이 적용되어 높은 초기속도에도 불구하고 비산거리는 적게 나타난 것으로 판단된다. 하지만 판형 파편의 얇은 부분이 공기저항을 받는 모양으로 비산된다면 프리스비(frisbee)효과가 발생되어 아주 먼 거리를 비산할 수 있음을 유의하여야 한다. 파편의 형태별 비산반경은 표 3에 나타내었다.

### 5. 결 론

LPG 탱크로리를 소재로 하여 증기운 폭발 시나리오의 파편 영향을 분석해 본 결과, 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1551 l의 프로판이 터졌을 때 과압을 산정한 결과 폭발 중심으로부터 1 m일 때 20.25 MPa, 2 m일 때 8.07 MPa, 3 m일 때 4.12 MPa, 10 m일 때 0.332 MPa로 산출되었으며, 파편의 판형파편의 초기속도가 400 m/s로 가장 빠르게 나왔다.

받음각을 0°, 5°, 10°, 15°로 구분하여 양항비를 산출한 결과, 원기동형 파편이 경우 받음각 0°일 때 양항비 5.37로 가장 멀리 비산하였고, 정육면체형 파편은 받음각 15°의 경우 양항비 1.06으로 최대로 비산하였다. 구형파편과 판형파편은 양항비 0으로 산출되었다.

정육면체형 파편이 561 m로 최대로 비산하였다. 현재 시나리오에서 누출된 프로판의 양이 많아 폭발시 최대 과압이 높게 산출되었고, 이로 인해 환산초기속도 또한 높게 산출되었다. 이러한 높은 초기속도에서는 Baker(1983)의 그래프에 따라 낮은 양항비를 가진 파편이 멀리 날아가는 것으

로 분석되었다. 따라서 LPG의 누출량이 더욱더 많아지게 된다면 구형 파편이 가장 멀리 비산될 것이고, 반면에 누출량이 적어진다면 원기동형 파편이 가장 멀리 비산하게 될 것이다. 판형 파편은 양항비는 적지만 비산시 공기저항을 및 항력을 받는 면적이 커서 멀리 비산할 수 없다고 판단된다.

따라서 LPG 탱크로리의 누출시 대피하여야 하는 거리는 561 m 이상으로 설정하는 것이 타당하다고 판단되고, 이 거리들은 파편의 비산시 회전하지 않고 최대로 비산될 수 있는 모양으로 설정하여 계산한 것이기 때문에 실제보다 더욱 안전을 고려한 거리라고 판단된다.

### References

1. Bang, Eun Jung (2017), Analysis of Mexico City LPG Explosion considering Domino Effect. Ajou University.
2. CCPS. (2000), Guideline for Chemical Process Quantitative Risk Analysis 2nd ed. New York.
3. Ha, Jung Ho (1999), Core fire fighting technique.
4. KGS, (2009), Tank lorry accident map.
5. KGS (2015), Gas year book for 2015.
6. KGS (2015), Gas Statistics for 2015.
7. KOSHA (2003), Serious Industrial Accident Book.
8. Lee, Su kyung, Young Bum Bae and Jeong Gyu Oh (2006), Consequence Analysis of Gas Explosion in LPG Vessel Retail Store Which is Located around Apartment Complex. 10(3): 48-53.
9. Moon, Il, Eun Jung Kim, Young Woo Chun, Joong Keun Chae, Young Taek Heo, Jae Deuk Park, and Kwang Hee Lee (2016), Introduction to Chemical Safety. Cheongsong.
10. Roh, Hong Seung, Yeon Joo Min, Min chul Park, Hong Mo Sung, and Soo Jin Park (2012), A Plan for the National Dangerous Goods Transportation Information System in Korea. The Korea Transport Institute.
11. Soman, S. R. (2012), Consequence Assessment of Vapor cloud Explosion Involving Hydrogen Release. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2(11).
- Wikipedia (2017), Lift coefficient.

<b>Received</b>	December 13, 2017
<b>Revised</b>	December 21, 2017
<b>Accepted</b>	December 26, 2017