



## 호흡용 고압용기 파열 피해영향 분석에 따른 안전충전함 개발

장갑만 · <sup>†</sup>김정환 · 장유리 · 이진한 · 조영도

한국가스안전공사 한국가스안전연구원

(2016년 8월 9일접수, 2016년 9월 23일 수정, 2016년 9월 24일 채택)

## Development of the Safety Cabinet for Respiratory High-Pressure cylinder according to Consequence Analysis of Physical Explosion Damage

Kap Man Jang · <sup>†</sup>Jeong Hwan Kim · Yu Ri Jang · Jin Han Lee · Young Do Jo

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

(Received August 9, 2016; Revised September 23, 2016; Accepted September 24, 2016)

### 요약

소방서, 스쿠버 등 공기호흡기 용기 충전시설의 고압가스안전관리법에 따른 허가 또는 신고를 하지 않고 운영하고 있으며, 시설개선 및 공기호흡기 충전중 사고발생에 따른 안전관리가 필요하다.

정부에서는 불법운영 해소를 위해 노력하고 있으며, 고압으로 인한 위험으로부터 안전거리와 방호벽 설치와 동등이상의 안전성을 확보하기 위한 방법으로 안전충전함을 설치하여 운용하는 방법을 대안으로 제시하였다. 방호벽 설치기준을 갈음할 수 있는 안전충전함은 용기파열 시 순간 과압이 원만하게 분산될 수 있는 내부 구조를 가져야 하며, 파편이 분산하는 것을 최소화 하고 모든 파편의 외부 비산을 방지하고, 외부로 방출되는 과압이 작업자가 위치하지 않은 곳(상부 및 하부)으로 분출되도록 하여 방호벽의 성능을 갖추도록 하여야 한다. 본 연구에서는 압축공기의 물리적 폭발에 따른 피해 영향을 계산하고, 실제 충전함 시제품을 제작하여 시험용 용기를 가스로 파열시키는 파열시험으로 안전충전함의 위험변화를 관찰 한 결과, 공기 배출구조설계 등을 통하여 안전충전함 내부의 과압을 해소할 수 있음을 확인 하였다.

**Abstract** - A fire station and scuba have operated filling facilities for respiratory high-pressure cylinder without getting authority or reporting according to High-Pressure Gas Safety Control Act. They need facility improvement and special management to make provision for the time of accident during filling process.

The Government have strived to correct illegal operations and suggested an alternative, establishing and operating the safety cabinet. It insures a safety being distance from danger caused by overpressure and a safety provoked by the protective wall equals or superiors. The safety cabinet is required to have an internal structure that smoothly distribute overpressure at the time of rupture. Plus, it needs to minimize fragments. It is also equipped with the performance of protective wall that makes overpressure to outside vent on the place where there is no person (top or bottom). This study calculated the consequence of physical explosion damage and built a prototype of safety cabinet. In addition, through the gas burst test, it derives for the ways to mitigate the physical explosion damage.

**Key words** : Respiratory High-Pressure cylinder, Safety Cabinet, Physical Explosion Damage, Fire station and scuba, Gas burst test

<sup>†</sup>Corresponding author: [abbu2k@kgs.or.kr](mailto:abbu2k@kgs.or.kr)

Copyright © 2016 by The Korean Institute of Gas

## I. 서론

고압의 압축공기는 위험하여 사고 발생 시 작업자의 생명을 위협할 수 있으며 실제로 사고도 발생하고 있다. 이러한 사고는 대부분 용기충전 중에 발생하며 사용 미숙이나 안전 불감증, 제품의 불량 등으로 발생한다.

해양경찰, 스킨스쿠버, 소방관을 위한 공기호흡기용 용기충전시설은 고압(300 bar, 30 MPa)으로 운전되기 때문에 위험요소가 크며, 고압가스안전관리법의 규제 대상이다. 공기호흡기용 용기 충전시설은 고압가스안전관리법 제4조제1항 내지 제2항에 의한 허가 또는 신고대상시설(35℃에서 1 MPa이상)로서 설치기준을 준수해야 하며 비가연성·비독성가스로서 하루 처리능력이 10 m<sup>3</sup> 이상이거나, 가스 저장능력이 3 ton 이상인 고압가스시설은 고압가스 충전허가(미만인 경우 신고)의 대상이 된다.

고압가스 충전시설의 경우 병원 등과 같은 1종 보호시설은 8~14 m, 주택 등을 포함하는 2종 보호시설은 5~10 m 이상의 안전거리를 유지하여야 하며, 압축기와 충전장소, 압축기와 충전용기 보관 장소, 충전장소와 충전용기 보관 장소, 충전장소와 충전용 주관밸브 조작밸브 사이에 방호벽을 설치하는 등 시설기준에 맞게 설치하여야 한다.

하지만 현실적으로 상기의 규정을 모두 준수하기에는 고압가스안전관리법에 의한 변경신고를 해야 하는 등의 어려움이 있으며 안전거리를 포함한 부지 확보 문제, 열악한 근무환경 등 여러 가지 문제로 인해 허가를 받지 못하는 경우가 많이 있다.

미국, 캐나다 등에서는 공기호흡기용 충전설비는 제조 모델별로 설계형식 승인을 받도록 하고 있으며, 소방 활동을 위해 캐리어 또는 차량 내부에 공기 호흡기용 충전설비를 격납하여 이동하면서 운영 중이다.

반면에 우리나라의 공기호흡기 충전 현장은 공간이 좁고 열악하여 보호시설과의 안전거리 확보, 방호벽 설치 등이 불가능하여 최소한의 안전을 담보할 수 있는 제품 및 합리적인 제도의 마련이 필요하다. 공기호흡기용 용기는 초고압으로 충전되므로 충전시설에서 충전 중 안전사고로 인한 인명피해 가능성이 높으며, 용기 탈부착 미숙으로 인한 폭발, 납땜 공기호흡기 충전 중 폭발 등 수차례의 사고가 발생된 것으로 조사되었다. 또한 12년 이후 한산신문('12.2), MBN('13.12) 보도로 공기 충전시설의 불법 운영 문제가 표면으로 대두되기에 이르렀다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 외국의 사례와 같이 성능인증을 받은 방호형 공기충전설비에 한해 변경신고 없이 이동 운영하는 것을 허용하도록 하고, 충전 중 용기파열이 일어

나더라도 작업자를 보호할 수 있는 방호성능이 확보된 공기호흡기 충전설비의 국산화 및 성능검증 기준의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 공기 충전설비의 안전성을 검토하고, 압축용기의 폭발에 대한 위험을 감소하는 방호형 충전설비를 개발하고 그에 대한 안전성을 검증하고자 한다. 이를 위해 압축공기의 물리적 폭발에 따른 피해 영향을 계산하고, 실제 충전함 시제품을 제작하여 파열시험을 통해 물리적 폭발 위험성을 완화시킬 수 있는 방안을 도출하였다.

## II. 물리적 폭발 영향 평가

### 2.1 물리적 폭발 강도 계산

일반적으로 폭발 강도는 TNT 상당질량을 통해 계산할 수 있다. 호흡기용 공기의 경우 가연성 가스에서와 달리 화학적 폭발이 발생하지 않기 때문에 물리적 폭발 강도를 계산하는 식을 이용하여 TNT 상당질량을 구할 수 있다.[1][6][7]

연구의 대상이 되는 호흡용 압축공기 용기는 충전 중 파열사고의 발생이 가능한데, 충전시스템으로부터 소방용 복합재료 용기(6.8 L) 1개가 충전 중 파열될 경우 물리적 폭발 강도를 계산하기 위한 개념도는 Fig. 1과 같다.

일정한 체적을 가진 용기가 P<sub>1</sub>에서 대기압 P<sub>0</sub>로 급격하게 강하여 부피가 팽창할 경우, 배출된 폭발과 압을 TNT 상당량으로 나타내기 위한 식은 Equation (1)을 사용할 수 있다.[1][2]

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

여기서,

W : TNT 상당질량 [lbm]

V : 압축된 공기의 부피 [ft<sup>3</sup>] (3.8 L)

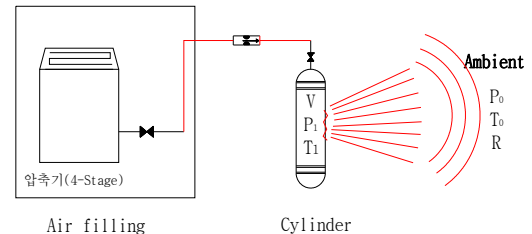


Fig. 1. Filling System of Respiratory Cylinder.

$P_1$ : 압축된 공기의 초기압력 [psia]  
 $P_2$ : 압축된 공기의 최종압력 [psia]  
 $P_0$ : 대기압력 [psia]  
 $T_1$ : 압축된 공기의 온도 [°R]  
 $T_0$ : 표준상태의 온도 [°R]  
 $R$ : 기체상수(=1.987) [Btu/lb · mole °R]  
 $1.4 \times 10^{-6}$  = 환산인자( $2.8 \times 10^{-3}$  lb · mole/ft<sup>3</sup>과 1 lb  
 의 TNT = 2,000 Btu로 가정)

본 연구의 대상인 압축공기 충전시스템에서 사용되는 압축 용기의 재료는 다음 Table 1과 같다.

호흡용 압축용기의 물리적 폭발에 대한 TNT 상당 질량을 구하기 위해 Table 2와 같은 변수를 이용하였다. 여기서,  $P_2$ (압축된 가스의 최종압력)는 용기 내부의 모든 압축공기가 대기압과 같아질 때까지 누출된다고 가정하며, 온도는 용기의 내 · 외부 모두 상온 15°C로 하였다. 기체 상수 R은 일반적인 값인 약 1.987

Table 1. Cylinder data for air respiratory


실린더	재질	카본복합용기	
	내용적	약 6.8 L	
	최고충전압력	300 kgf/cm <sup>2</sup>	
	내압시험압력	500 kgf/cm <sup>2</sup>	
	최고충전 공기량	약 2,046 L	
	중량	3.8 kg 이하	

Table 2. Conversion about the specification of parameter

Parameter	Specification	Conversion
V	6.8 L	0.24014 ft <sup>3</sup>
P1	300 bar	4,351.147 psia
P2	1 bar	14.50 psia
P0	1 bar	14.50 psia
T1	15°C	518.67°R
T0	15°C	518.67°R
R	-	1.987 Btu/lb-mole °R

Btu/lb · mole °R을 사용하였다.[3][4]

호흡용 압축용기의 재료는 Equation (1)에 대입하기 위해 단위를 환산하였다.

이와 같은 계산을 통하여 약 300 bar로 압축되어 저장된 용기 1개가 폭발할 때의 폭발위력은 대략 0.5926 lb이며, 이를 환산하면 0.2689 kg의 TNT가 폭발하는 힘과 동일한 것으로 산출 된다.

## 2.2 폭발로 인한 사고의 피해거리 비교

물리적 폭발로부터 발생한 과압은 순간적인 빠른 속도로 압력파가 발생하여 주변의 건물 및 인체에 상해를 입힐 수 있다. 특히, 폭발이 발생할 경우 비산물에 의한 직 · 간접적인 영향을 예상할 수 있다. 피크 과압을 산출하여 이와 같은 폭발에 의한 폭발영향의 피해를 추정 할 수 있다.[6][7]

TNT 상당질량을 이용하여 피크과압을 추정할 수 있으며, 일반적으로 환산거리 Z의 함수를 이용하여 폭발파의 특성을 표현한다. 즉, TNT의 상당질량과 폭발중심으로부터의 거리를 이용하여 과압을 추산할 수 있다. 환산거리 Z의 함수는 환산법칙(scaling law)을 사용한다. 이 식은 실험적으로 유도 되었으며 승근법칙(Hopkinson 삼승근법칙)이라고도 한다. 즉 “중류가 같은 폭발물을 크기를 달리하여 같은 조건에서 폭발시킬 때 환산거리가 같으면 폭발물의 양에 관계없이 충격파 등 폭발특성치가 같다.”고 가정할 수 있으며, 다음 Equation (2)와 같다.[5][6][7]

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

여기서,  
 Z: 환산거리 [m/kg<sup>1/3</sup>]  
 R: 폭발중심으로부터의 거리 [m]  
 W: TNT 상당질량 [kg]

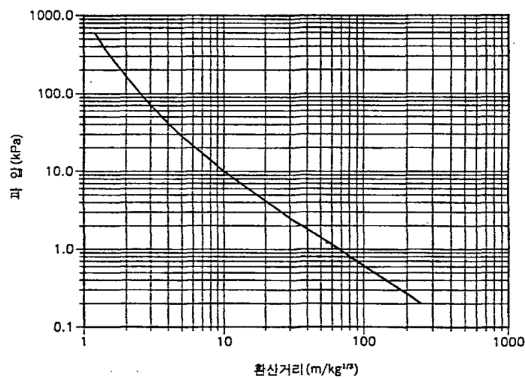
위 식을 통하여, 계산 된 환산거리 Z를 Equation (3)에 대입하여 피크과압[kPa]을 구할 수 있으며, 피크과압은 TNT 상당질량에 따른 환산거리 Z에 비례, 거리에 따른 피크과압에 반비례 하게 된다.[6][7]

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

여기서,  $p^0$ 는 환산거리 Z에 따른 overpressure이며, a와 b는 폭발 매개 변수 기능에 대한 방정식에 따른 값을 활용하였다. 환산 거리 Z가  $0.0674 \leq Z \leq 40$  일 때 각 변수는 Table 3과 같다.

**Table 3.** Equations for the blast parameters functions provided in figure

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. 2.** The universal relationship between scaled distance and overpressure. (SI unit)

위 Equation (3)을 통해 계산된 값은 Fig. 2와 같이 그래프로 나타내어지며, 그래프를 이용하여 환산거리와 피크과압을 추산할 수 있다.

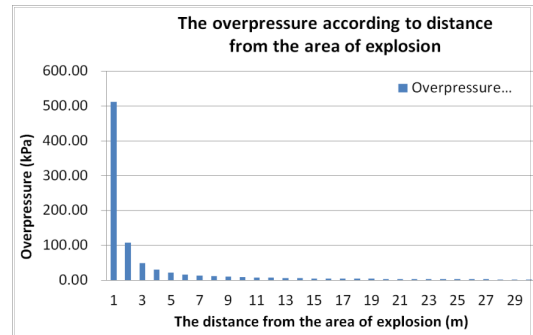
이와 같은 방법론을 통해 TNT 상당질량에 따른 거리별 피크과압(kPa)은 Table 4와 같다. 대략 0.2689 kg의 TNT가 폭발하는 폭발위력은 폭발지점으로부터 3 m 떨어진 위치에서 환산거리 4.6479 m로 피크과압 49.15 kPa을 받게 되며, 6 m 떨어진 위치에서는 환산거리 9.2958 m로서 피크과압 16.39 kPa을 받게 된다.

이와 같이 과압폭풍이 발생하면 건물 구조물이 손상되는 직접적인 영향이 있을 수 있으며, 간접적으로 건물 구조물의 붕괴로 인한 폭풍영향을 받을 가능성도 있다. 이러한, 직·간접적인 폭풍 영향에 대해 Lees(1980)는 Table 5와 같이 제시하였다.[6][7]

Lees(1980)의 제시에 따른 직·간접적인 폭풍 영향을 살펴보면, 약 0.2689 kg의 TNT 폭발이 발생할

**Table 4.** The overpressure according to distance from the area of explosion(kPa)

TNT equivalent W (kg-TNT)	Distance R (m)	Scaled distance Z (m/kg <sup>1/3</sup> )	Overpressure (kPa)
0.2689	1	1.5493	511.27
	1.5	2.3240	201.81
	2	3.0983	108.09
	2.5	3.8733	69.04
	3	4.6479	49.15
	3.5	5.4226	37.56
	4	6.1972	30.13
	4.5	6.9719	25.03
	5	7.7465	21.34
	5.5	8.5212	18.55
	6	9.2958	16.39



**Fig. 3.** The overpressure according to distance from the area of explosion.

경우, 3.7 m 이내에 약 34 kPa의 압력이 발생하여, 전신주 및 나무가 부러지는 정도의 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다.

### 2.3 폭발과압으로 인한 인체 상해

폭발로 인한 피해는 직·간접적인 폭풍 영향 이외에도 폭발과압으로 인한 인체에 상해가 있다. 인체에 대한 상해 경우, 크게 폐출혈(Lung Haemorrhage)로 인한 사망과 고막파열(Eardrum Rupture) 등의 상해를 입을 것을 예상할 수 있는데, 이와 관련한 자료는 Eisenberg(1975) 등에 의해 연구되었다. Eisenberg는

**Table 5.** 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)

핵 폭발 자료를 배경으로 직접적인 폭풍영향으로 인한 인체 상해 정도에 대해 Probit 모델을 사용하여 다음과 같이 제시하였다.[4][5][6][7]

(1) 폐출혈로 인한 사망의 경우

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

**Table 6.** 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 7.** The probability of body injury according to the distance from the area of explosion

Distance (m)	P (kPa)	Death		Eardrum rupture	
		Y	(%)	Y	(%)
0.5	2,727.34	24.04	100.00	12.65	100.00
1	511.27	13.73	100.00	9.77	100.00
1.5	201.81	7.31	98.94	7.98	99.85
2	108.09	2.99	2.23	6.77	96.16
2.5	69.04	-0.11	0.00	5.90	81.73
3	49.15	-2.45	0.00	5.25	59.84
3.5	37.56	-4.31	0.00	4.73	39.36
4	30.13	-5.84	0.00	4.30	24.34
4.5	25.03	-7.12	0.00	3.95	14.61
5	21.34	-8.22	0.00	3.64	8.67
5.5	18.55	-9.19	0.00	3.37	5.14
6	16.39	-10.04	0.00	3.13	3.07

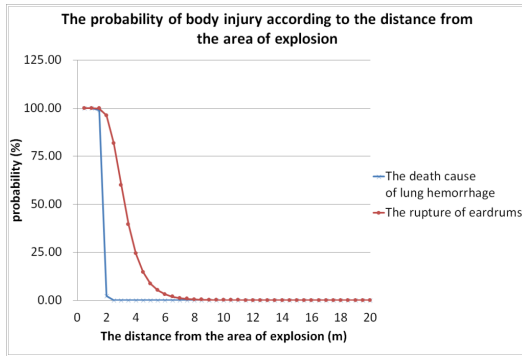


Fig. 4. The probability of body injury according to the distance from the area of explosion.

(2) 고막파열의 경우

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

여기서,  $P_s$ 는 피크 과압(Peak Overpressure [ $N/m^2$ ])을 나타낸다.

위 식을 통해 구해진 Probit 값은 Table 6을 참고하여 확률 값으로 나타낼 수 있다.[6][7]

위와 같이 Probit 모델 계산을 통해 구해진 인체 상해는 Table 7과 같다. Table 7에서 Y값은 Probit을 나타낸 값이며, 각 Probit 값에 대한 백분율을 구하였다.[4][5][6][7]

TNT 상당질량이 0.2689 kg · TNT 일 때 폭발거리가 1.2 m 이내인 경우 336 kPa의 압력에 의해 폐출혈로 인한 사망이 발생할 확률과 고막파열이 일어날 확률은 100%이며, 이후 폐출혈에 의한 사망 확률은 급격히 감소하여 2.3 m 이상 떨어지게 되면 사망확률이 0%이 된다. 고막파열의 경우 3 m 이상에서 감소하지만 3.2 m 이내에서 50% 확률을 갖는다.

이를 바탕으로 폭발 지역으로부터 약 1.74 km의 거리에 위치한 사람의 50% 정도가 폐출혈로 인해 사망을 일으킬 수 있는 과압 약 144 kPa이 나타난다. 또한, 폭발 지역으로부터 약 3.22 m의 거리에서 50% 고막파열을 일으킬 수 있는 과압 43 kPa이 측정 된다.

### III. 폭발 피해 완화를 위한 안전충전함 개발

#### 3.1 안전충전함 방호 개념

안전충전함은 고압의 공기를 충전하는 용도로 사용되기 때문에 용기파열시 순간과압이 순조롭게 분산될 수 있는 내부 구조로 설계 되어야 하며, 내부에서 폭발이 발생할 경우 상단 덮개가 열리면서 압축가



Fig. 5. The structure for solving overpressure when internal explosion in the safety cabinet for respiratory high-pressure cylinder.

스가 배출되고, 하단 사방으로 압축가스를 배출하여 과압을 해소하는 구조로 제작되어야 한다.

폭발 방호를 위한 공기호흡기 안전충전함 개발 제품 요구 성능은 다음과 같다.

- 용기파열시 순간과압이 순조롭게 분산될 수 있는 내부 구조
- 파편의 분산을 최소화 하고 모든 파편의 외부 비산 방지
- 외부로 방출되는 과압이 사람이 위치하지 않은 장소(상부 또는 하부)로 분출
- 외부로 방출되는 과압으로 인한 진동 및 소음 최소화
- 내부 압축기, 배관, 밸브 등의 내압성능 등

#### 3.2 안전충전함 파열시험

공기호흡기 안전충전함 파열성능시험은 소방용 복합재료용기(TYPE-3 Cylinder)와 잠수용 알루미늄용기(TYPE-1 Cylinder)를 36 MPa 이상의 압력에서 질소가스를 주입하여 파열시험을 실시하였다. 파열성능 시험 기준은 공기호흡기 용기의 사용압력의 1.2 배 이상의 압력에서 파열시 실린더 파편이 충전설비 외부로 비산하지 않아야 하며, 내부 압축공기의 누출이 충전작업자와 주변인을 향하여 가스가 배출되지 않도록 방호벽이 제 기능을 수행하는지 여부에 대한 성능을 실험적으로 검증하는 시험이다.

##### 3.2.1 소방용 복합재료 용기 파열시험

소방용 복합재료 용기는 복합재료의 이방성 때문에



(1) Screwed an adapter after processing flaw in composite materials cylinder



(2) Preparation for the sound level meter and dynamic pressure sensor

**Fig. 6.** Bursting test figure of the safety cabinet for respiratory high-pressure cylinder.

파열압력을 예측하기가 어렵다. 따라서 복합재료 용기 외부에 흡가공(깊이 4.1 mm × 길이 150 mm 흡가공 용기)을 한 후 용기 1개를 계속 날카로운 칼로 긁어 흡가공 깊이를 증가하면서 파열압력까지 도달하는 방법을 이용하였다. 기준압력은 42 MPa로 설정하여 가압하여 파열되지 않을 경우에는 용기 내부의 압력을 벤트 후 날카로운 칼로 추가 흡가공을 하면서 작업을 반복하였다.

파열시험은 14시 40분 1차 가압을 시작하여 총 5차에 걸친 가압을 하였으며, 최종 41 MPa에서 복합재료 용기를 파열시켰다.

### 3.2.2 소방용 복합재료 용기 파열시험 결과

Fig. 7은 가압반복 그래프와 파열 후 외함의 변화, 동압력 및 최대 소음 값을 보여준다.

공기호흡기 안전충전함 질소가스 파열성능시험 결과, 복합재 용기의 이방성으로 인해 완성된 복합재 용기의 정확한 파열압력(36 MPa 이상) 설정은 어려워 흡가공(4.1 mm × 3 mm × 150 mm) 후 실험을 하였으며, 시험에 사용된 소방용 복합재료 용기는 41

**Table 8.** The pressuring sequence

시간	과정	비고
14:40	1차 질소가압 시작	
14:59	벤트	420bar
15:06	용기 흡 가공	3회(아크릴 칼로 긁기)
15:07	2차 질소가압	
15:35	벤트	420bar
15:41	용기 흡 가공	3회(아크릴 칼로 긁기)
15:45	3차 질소가압	
16:04	벤트	420bar
16:13	용기 흡 가공	3회(아크릴 칼로 긁기)
16:19	4차 질소가압	
16:46	벤트	444bar
16:50	용기 흡 가공	6회(아크릴 칼로 긁기)
17:00	5차 질소가압	
17:30	용기파열	410bar에서 파열

MPa에서 파열되었으며 안전충전함 외함 변화가 없었다. 또한 안전충전함의 넘어짐이 없었으며, 동압력은 전면부 1 m 앞쪽에서 12.4 kPa, 소음은 127.6 dB 값을 나타냈다.

### 3.2.3 잠수용 알루미늄 용기 파열시험

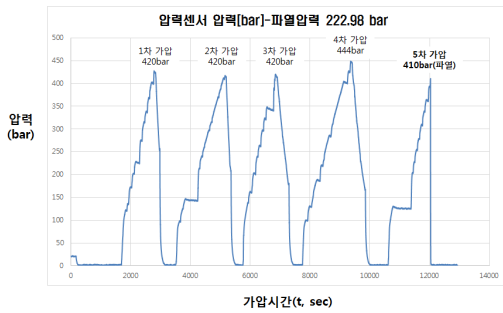
파열압력을 찾기 위해 선행 된 수압시험으로 실제 용기의 흡이 없는 용기의 파열압력을 58.8 MPa를 확인하였다. 58.8 MPa 이상의 압력에서 파열되므로 사용압력의 1.2배의 압력인 36 MPa에서 파열되게 하기 위해 용기 외피에 인위적인 흡(5 mm)을 가공하였고, 안전충전함 내부의 용기를 파열시키기 위해 검사시스템 내부에 공급이 가능한 질소가스를 주입하여 파열시험을 실시하였다.

### 3.2.4 잠수용기를 이용한 안전충전함 파열시험 결과

Fig. 9는 파열 후 외함의 변화와 소음계에 측정된 최대 소음을 나타낸 것이며, Fig. 10은 공기 충전함 내부의 용기 파열 모습이다.

공기호흡기 안전충전함 질소가스 파열성능시험 결과, 잠수용 알루미늄 용기는 37.7 MPa에서 파열되었으며 안전충전함 외함 변화가 없었다. 내부용기 파편의 외부비산 또한 없었으며, 용기 파열 시 안전충전

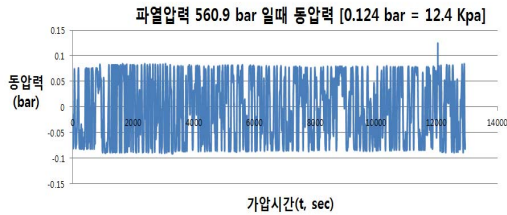
호흡용 고압용기 파열 피해영향 분석에 따른 안전충전함 개발



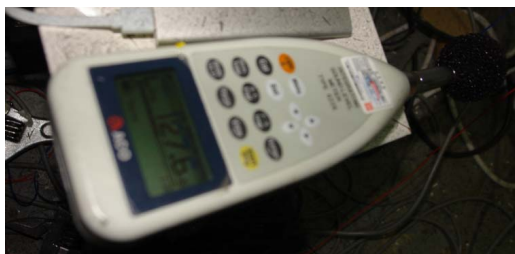
(1) Pressuring and venting graph



(2) Composite cylinder and Safety Cabinet after rupture



(3) Dynamic Pressure



(4) noise(126.7 dB) after the bursting test.

**Fig. 7.** Composite cylinder bursting test figure of the safety cabinet for respiratory high-pressure cylinder.

함의 넘어짐(전도)도 없었다. 폭발 시 충전함 전방 1 m 거리에서 측정된 최고순간과압은 4.1 kPa로, 50% 고막파열을 일으킬 수 있는 과압 인 34.5 kPa보다 낮



(1) Screwed an adapter after (2) Preparing nitrogen gas processing flow in seamless cylinder



(3) Preparation for the sound level meter and dynamic pressure sensor

**Fig. 8.** Bursting test figure of the safety cabinet for respiratory high-pressure cylinder.



**Fig. 9.** Change in appearance of the safety cabinet for respiratory high-pressure cylinder and noise(126.7 dB) after the bursting test.





**Fig. 10.** Change in appearance of the respiratory high-pressure cylinder inside the safety cabinet.

은 값이 측정되었고, 소음은 이명현상이 발생할 수 있는 130 dB 이하인 126.7 dB의 값이 측정되었다.

이와 같은 결과는 내부의 용기가 파열할 경우 내부 파열충격이 외부로 전달되지 않고, 충전함 내부에서 폭발과압이 해소되어 주변의 건물 및 인체에 미치는 영향을 완화시켜줄 수 있을 것으로 판단된다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 공기 충전설비의 안전성을 검토하고, 고압의 압축가스를 충전하는 용기의 폭발에 대한 위험을 감소하는 방호형 충전설비를 개발하기 위해 압축공기의 물리적 폭발에 따른 피해 영향을 계산하고, 실제 충전함 시제품을 제작하여 파열시험을 통해 물리적 폭발 위험성을 완화시킬 수 있는 방안을 도출하였다.

복합재료용기 6.8 L의 300 bar의 고압의 압력은 TNT 상당량으로 환산하면 0.2689 kg · TNT의 위력이 있다. 이 압축된 용기가 파열하면 폭발거리가 1.2 m 이내인 경우 과압에 의한 폐출혈 사망과 고막파열이 일어날 확률이 100%이다. 또한 50% 폐출혈로 인한 사망을 일으킬 수 있는 거리는 약 1.74 m이다. 안전 충전함 시제품 파열시험 결과 소방용 복합재료 용기는 41MPa와 잠수용 알루미늄용기를 37.7 MPa에서 파열시켜 안전충전함의 외함변화를 실험한 결과 공기 배출구조설계를 통하여 내부의 과압을 해소하여 충전작업자를 보호할 수 있음을 실험을 통해 확인하였다.

안전충전함의 이용은 파열형태가 다른 복합재료 용기나 잠수용 용기가 충전 중 파열되었을 때 물리적 폭발력으로부터 과압을 해소시켜 충전작업자를 보호하는 기능을 할 것이다.

공기호흡기 용기 안전충전함이 개발되면, 공간이 협소하고 열악하여 보호시설과의 안전거리, 방호벽

설치가 불가능하여 허가(신고)를 받지 못하는 실정에 있는 소방서 1,151개소, 스쿠버 슈 886개소의 시설에 대하여 최소한의 안전을 담보할 수 있는 안전충전함을 도입하여 합리적인 제도를 마련할 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 2014년도 중소기업청 구매조건부 신제품개발사업(과제번호 : S2197401, “고압의 압축공기 안전충전을 위한 공기호흡용기 폭발 방호 및 냉각기능 충전함 개발”) 지원을 받아 수행하였습니다. 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

- [1] Lee. S. K., Bae, Y. B., and Oh, J. G., "Consequence Analysis of Gas Explosion in LPG Vessel Retail Store Which is Located around Apartment Complex.", *Journal of the Korean Institute of Gas*, 10(3), 48-53, (2006)
- [2] Leem. S. H., Lee. J. R., Huh. Y. J., "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*, 12(1), 42-47, (2008)
- [3] Leem. S. H., Huh. Y. J., "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*, 14(2), 15-21, (2010)
- [4] Hwang. I. S., "Model Development of Risk Assessment for CNG Tube Trailers", The Graduate School of Industry & Engineering Seoul National University of Technology, (2007)
- [5] Jin. S. H., Kim. T. W., Kim. I. T., Kim. I. W., Yeo. Y. K., "A Study on Reliability Analysis and Quantitative Risk Analysis for Liquefied Petroleum Gas Station.", *Journal of the Korean Institute of Gas*, 5(4), 40-48, (2001)
- [6] Seo. D. H., Jang. K. M., Lee. J. H., Rhie. K. W., "A Study of Consequence Analysis of Physical Explosion Damage in CO<sub>2</sub> Storage Tank.", *Journal of the Korean Institute of Gas*, 19(2), 12-19, (2015)
- [7] "Chemical Process Quantitative Risk Analysis -Second Edition", Center for chemical process safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York 10016-5991.