

압력 방출밸브를 장착한 이동식 부탄연소기용 부탄캔의 분출가스 확산 실험 및 해석

강승규* · 최경석* · 윤준용**

Experiment and Simulation of Diffusion of Gas Released from the Relief Valve of a Gas Cylinder for a Portable Gas Range

Seung-Kyu Kang*, Kyung-Suhk Choi*, Joon-Yong Yoon**

Key Words: Safety evaluation(안전성 평가), Portable gas range(이동식 부탄 연소기), Relief valve(방출밸브), Lower explosion limit(폭발한계범위)

ABSTRACT

In the last five years, 91 accidents from portable gas ranges and non-refillable metallic gas cartridges have occurred. The gas cylinder installed with a relief valve was developed to prevent an explosive accident from the gas cartridge. In this study it was carried out to evaluate the safety of a gas cylinder mounted with a relief valve which can prevent an explosion. Under the real using condition and the extreme condition the gas cylinder is heated with an electric heater. Simultaneously, the operating pressure is checked and the suitability of releasing flux is evaluated. And the possibility of fire or explosion was tested when the gas was released from the relief valve at the real using condition. Using a numerical simulation method, the diffusion of butane gas released from a relief valve was visualized.

1. 서론

이동식 부탄연소기는 휴대가 간편하고 사용이 용이하여 찌개나 불판구이 등의 음식문화가 보편화된 국내에서 많이 사용되고 있는 실정이다. 그러나 사용이 편리하고 용이한 반면, 사용하던 중 용기가 과열하여 가스가 폭발하는 가스사고가 빈번히 발생하고 있으며⁽¹⁾, 이로 인한 인명피해도 상당한 것으로 보고되고 있다⁽²⁾. 일반적으로 고압가스 용기에는 방출밸브가 있어 이상 상태의 발생 시 밸브로 가스를 방출함으로써 용기에 과압이 걸리는 것을 차단시킬 수 있도록 하고 있으나, 1회용 부탄 용기는 노즐만 있고, 방출밸브가 없어 과압을 차단하

는 것이 불가능하다. 이를 보완하기 위하여, 1회용 부탄 캔에 스프링식 안전장치를 장착한 폭발방지 부탄캔을 개발하여, 용기 내압 상승 시 가스를 분출함으로써 용기 내압을 감압시킬 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 개발된 폭발방지 장치를 부착한 1회용 부탄캔의 안전성평가 시험을 통하여 제품의 안전성 여부를 평가하며, 또한 본 연구결과를 바탕으로 폭발방지용 1회용 부탄캔의 기술 기준제정에 필요한 데이터를 구축하고, 제품성능을 평가하기 위한 기술력을 확보하고자 한다.

2. 사고사례

최근 5년간 이동식 부탄연소기 및 접합용기 관련 사고사례를 분석하였다⁽¹⁾. 2002년 이후로 전체 가스 사고는 감소하고 있는 반면, 이동식 부탄연소기 및 접합용기 사고는 증가하는 추세를 보이고 있다(Table 1). 매년 10

* 한국가스안전공사 가스안전연구원
† 교신저자, E-mail : skkang@kgs.or.kr
** 한양대학교 기계공학과

Table 1 Gas accident status for the last 5 years

구 분	계	2002	2003	2004	2005	2006
전체가스사고	569	119	119	110	109	112
이동식연소기 · 접합용기 사고	91	12	12	21	29	17
점유율(%)	16.0	10.1	10.1	19.1	26.6	15.2

Table 2 Classification of accident type related with portable gas range

사고유형	사고건수	점유율(%)
계	91	100
◆ 이동식부탄연소기 사용 중	58	63.7
- 과대불판 사용	27	29.8
- 접합용기 장착불량	14	15.4
- 점화미숙	5	5.5
- 기타 사용 중	12	13.2
◆ 접합용기 보관·가열·폐기 중	33	36.3
- 화기 근처 용기방치	26	28.6
- 잔가스 사용을 위한 용기 가열·폐기	7	7.7

여건 이상의 관련사고가 발생하고 있으며, 2005년의 경우는 29건으로 전체 가스사고의 26.6%를 차지할 정도로 이동식 부탄연소기 및 접합용기 관련 사고는 국내 가스 사고에서 상당히 큰 비중을 차지하고 있다.

이동식 부탄연소기 사고를 세부 원인별로 보면, 대부분 연소기 사용 중(58건)에 발생하였고, 다음은 접합용기를 화기 근처에 방치(33건)하여 발생한 것으로 나타난다.(Table 2) 이동식 부탄연소기 사용 중 발생하는 사고의 주요 원인은 연소기 삼발이보다 큰 불판 사용으로 복사열에 의하여 접합용기 내부 압력이 상승 파열되는 사고가 27건으로 이동식 부탄연소기 사고의 29.8%를 차지한다. 그리고 화기근처에 용기를 방치하여 용기 내압 상승으로 인한 사고가 28.6%를 점유하고 있다. 이러한 사고들은 캔의 내압상승에 의한 용기파열 및 폭발사고로, 폭발방지 부탄캔의 보급을 통해 상당부분 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

3. 실험방법

3.1 안전장치 개요

개발제품은 이동식 부탄연소기용 용기에 장착하여

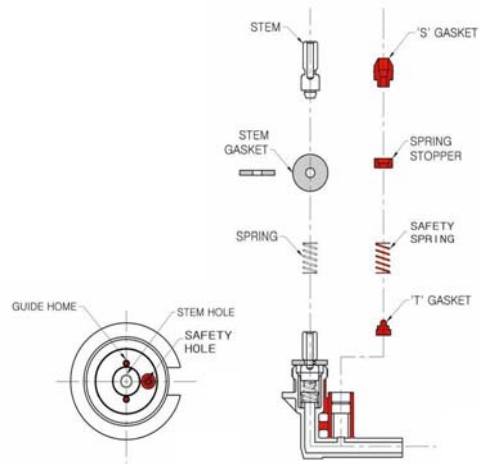


Fig. 1 Configuration of relief valve for prevention of explosion.

용기내부에 과압이 발생할 경우 밸브가 열리면서 용기 내압의 상승을 방지하도록 설계되었다. 개발제품에 대한 부품 구성도를 Fig. 1에 도시하였다. 기존의 밸브 하우징에 안전장치를 추가하였으며, T-가스켓, 안전스프링(SAFETY SPRING), 스프링 지지대(SPRING STOPPER) 그리고 S-가스켓으로 방출밸브는 구성되어 있다. 기존의 스템 밸브와 동일한 유로상에 안전장치가 설치되어 용기내부에 과압이 발생할 경우, 용기 변형압력(13kg/cm²) 이전인 11.0±1.0kg/cm²에서 안전스프링이 작동하여 T-가스켓이 열리고 S-가스켓을 통과하여 방출밸브의 오리피스(SAFETY HOLE)로 가스가 분출되도록 설계되었다.

3.2 시험방법 및 절차

현재 사용되고 있는 이동식 부탄연소기는 이동식 부탄연소기의 제조기준에 의해 용기 내압이 5.0~7.0kg/cm²에 이르면 가버너의 안전장치가 작동하여 가스가 공급되지 않도록 하고 있다⁽³⁾. 이때 사용되는 가버너 안전장치는 가스의 통로를 자동으로 닫히게 하는 유로차단식과 용기가 가버너에서 이탈되도록 하는 용기이탈식이 있다. 본 시험은 두 가지 형식의 연소기에 부탄캔을 장착하여 실험을 수행한다. 우선 유로차단식의 경우 가버너에 노즐을 장착하여 용기의 내압을 측정할 수 있도록 압력센서(0~20kg/cm², ±0.15%FS)를 설치하였다. 용기 이탈식의 경우는 용기가 가버너로부터 이탈되기 때문에 이탈된 이후의 압력을 측정하는 것이 불가능하여 용기 표면에 열전대(T-type, 0~350℃, ±0.4%)를

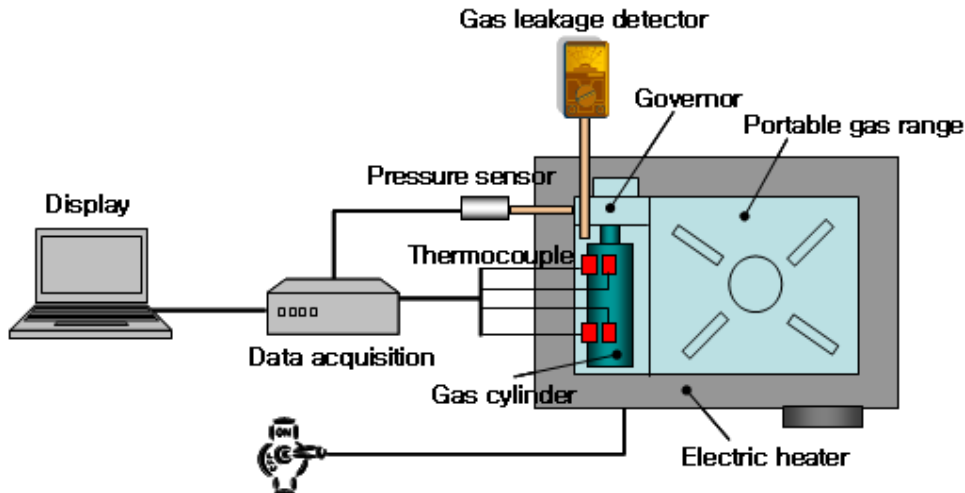


Fig. 2 Experimental apparatus for safety test of gas cylinder with relief valve

부착하여 온도만을 측정하였다. 유로차단식에서 측정된 온도와 압력 값을 참조한다면 이탈식에서 측정된 캔 온도를 이용하여 압력을 예측하는 것이 가능하다. 부탄캔 표면에 온도센서는 Fig. 2에서 보듯이 4군데 부착하여 4 지점의 평균온도를 계산하여 사용한다. 캔의 상단은 기상부에 해당하고 측면은 액상부에 해당한다. 압력 및 온도센서가 부착된 이동식 부탄연소기를 히터 위에 올려 놓고, 연소기와 히터를 약 20mm 이격 시킨 상태에서 히터를 가열하여 캔의 내압을 상승시킨다. 국내 이동식 부탄연소기의 삼발이 높이가 약 30mm 이상인 것을 감안하여, 이보다 극한 조건인 20mm 이격거리에서 실험을 수행하였다. 히터 온도가 상승하면서 복사열에 의해 캔의 온도 및 내압이 상승하게 되고, 온도 및 압력센서로부터의 신호를 데이터 분석 장치(DAQ)에서 10Hz로 받아, 그 평균값을 PC에 저장하고 모니터링 할 수 있도록 하였다. 그리고 부탄가스가 누출되는 시점을 확인하기 위하여 가스누출검지기를 용기밸브 근처에 설치하였다.

3.3 CFD계산 조건

실험을 통해 발생가능한 모든 상황을 모사하는 것은 본 연구의 수행 범위에서는 불가능하다. 실험을 대신하여 본 연구에서는 시뮬레이션 프로그램을 사용하여, 제한된 공간 내에서 부탄가스가 분출될 경우 부탄가스의 확산거리 및 범위를 예측하여 참고자료로 활용하고자 한다. 시뮬레이션에 사용된 프로그램은 혼합가스의 이동 및 확산해석이 가능하고, 공학해석에서 범용 유동해

석 도구로 사용되고 있는 FLUENT⁽⁴⁾를 사용하였다. 해석 영역은 2×2×2m의 공간에 이동식 부탄연소기와 과대 불판, 그리고 방출밸브가 장착된 1회용 부탄캔을 모델링하고 방출밸브로부터 부탄가스가 방출되어 실내에 분출되는 상황을 모사하였다.(Fig.3 참조) 방출밸브에서의 경계조건은 방출유량 측정시험에서 획득된 실험값을 사용하였다. 방출유량 시험에서 밸브의 작동압력에 따라 방출유량이 3.7g/min~4.0g/min까지 변화하였다. 본 연구에서는 최대유량이 측정된 압력(11.0kg/cm²) 및 유량조건(4g/min)을 방출밸브 경계조건으로 사용하였다. 이때 유량을 기체상태로 환산하면 밸브 출구에서의 가스 유속은 4.8m/s이다. 실내는 온도 20℃(상온) 및 대기압 상태의 공기가 분포하는 것으로 가정하였다. 방출밸브로부터 분출되는 부탄가스는 비중이 약 1.91로 공기보다 무거운 가스이다. 비중이 서로 다른 공기와 부탄가스가 혼합된 이상유동(two-phase flow)을 해석하기 위해,

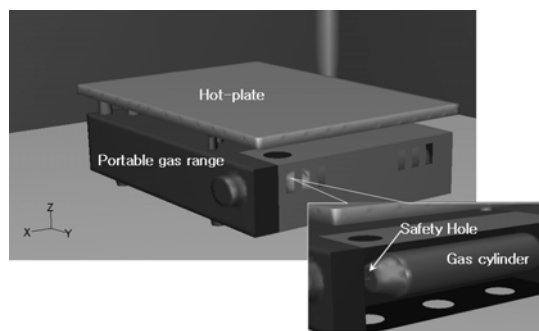


Fig. 3 Configuration of flow simulation domain.

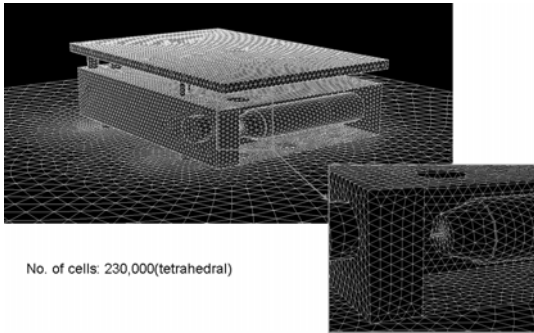


Fig. 4 Grid generation for flow simulation.

FLUENT에서 제공하는 Multiphase module의 Mixture model을 적용하였다. 과대불관은 400℃로 가정하였고, 불관에 의한 복사열을 해석하기 위해 FLUENT의 Radiation Model 중 DO(Discrete Ordinates)을 적용하였다. 불관 및 연소기 표면 그리고 부탄캔의 재질은 모두 스틸(steel)로서 방사율(emissivity) 0.25로 가정하였다.⁽⁵⁾ 복사매체는 파장에 무관한 이상적인 가스(회색체 가스, gray gas)로 가정하여 해석한다. Fig.4는 수치계산을 위한 격자망 구성으로, 용기 장착부의 복잡한 구조를 효과적으로 계산하기 위해 비정렬격자망을 사용하였으며, 총 사용된 cell 수는 약 230,000개이다.

4. 결과 및 분석

폭발방지 부탄캔에 장착된 방출밸브가 실제와 같은 사용조건에서 이상 없이 작동하는 지, 그리고 사용 중 방출밸브에서 분출된 가스에 의해서 화재 및 폭발에 대한 안전성을 평가하기 위하여, 20개의 시료를 시험하였다.

Fig. 5는 유로차단식 연소기에 부탄캔을 장착하고, 히터 온도상승에 따른 캔의 온도 및 압력변화 곡선을 도시하였다. 유로차단식의 가버너 안전장치는 캔 온도 56~60℃, 용기 내압 5.7~5.9kg/cm²에서 작동하였고, 용기 방출밸브는 캔 온도 77~81℃, 내압 10.4~11.4kg/cm²에서 작동하였다. REF의 첫 번째 시그널은 가버너 안전장치의 작동시점을 의미하고, 두 번째 시그널은 용기 방출밸브 작동 시점을 표시한다. 온도 및 압력 상승곡선을 보면, 가버너 안전장치가 작동한 이후에 온도 및 압력 변화율이 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 현상은 압력곡선에서 뚜렷이 파악이 되는데, 이는 용기 내압의 상승 메커니즘을 보여주는 것이다. 용기의 내압 상승에 기여하는 열량(ΔQ)은 다음과 같은 식으로 정의할 수 있다.

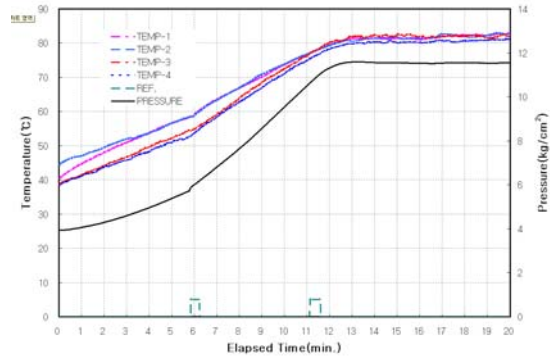


Fig. 5 Temperature and pressure rising curve for a flow passage cutoff system.

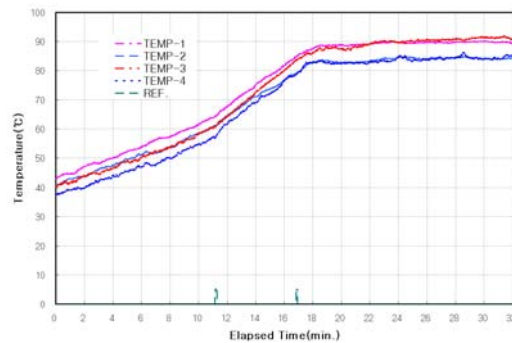


Fig. 6 Temperature rising curve for a cylinder separation system

$$\Delta Q = Q_r - Q_c \quad (1)$$

여기에서, Q_r 은 히터 또는 불관, 냄비 등의 열원에 의해 부탄용기에 영향을 주는 열량을 의미하고, Q_c 은 캔 내부에서 액상으로 존재하던 부탄이 방출되어 기화되면서 주위로부터 열을 빼앗아 가는 증발잠열을 의미한다. 가버너 안전장치가 작동하기 전 단계에서는 용기가 받는 복사열의 일부가 기화열에 사용되기 때문에 용기의 내압 및 온도상승이 완만하다가, 가버너 안전장치의 작동으로 가스방출이 차단되면서 더 이상 기화열이 존재하지 않게 되자($Q_c=0$) 열원에 의한 복사열이 모두 부탄캔의 온도 및 압력상승에 기여하여 상승률이 증가되는 것이다.

유로가 차단되면 더 이상 버너가 연소되지 않는 상황이므로, 본 시험에서도 유로차단 시점에서 히터를 OFF시켰으며, 히터가 꺼진 상황에서도 350~400℃까지 뜨거워진 히터의 복사열에 의하여 캔의 온도 및 압력은 계속 상승하게 된다. 유로 차단식 연소기에서 방출밸브는

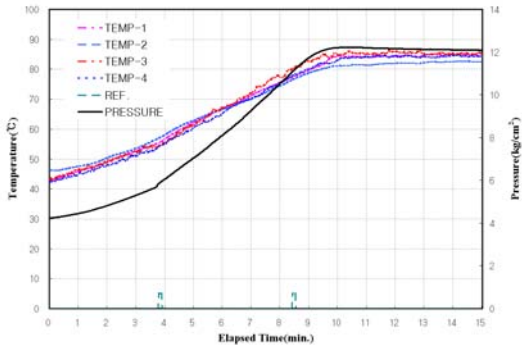


Fig. 7 Temperature and pressure rising curve at an extreme using condition

캔 온도 77~81℃, 내압 10.4~11.4kg/cm²에서 정상작동하였다⁽⁶⁾.

음식점 등에서 연소기를 사용 중에, 한 연소기에서 방출밸브가 작동하여 가스누출이 발생할 경우 다른 연소기의 화염에 의한 화재 및 폭발 가능성을 확인하기 위하여, 용기 방출밸브가 작동하여 가스가 분출된 상태로 5~10분을 방치하고, 100cm 및 80cm 이격된 거리에 다

른 연소기를 점화시켜놓은 상태로 방치하였다. 그리고 연소기의 방향을 회전하여 가스 누출구의 방향을 연소되고 있는 연소기 쪽으로 향하도록 하였다. 이격거리 및 연소기 방향의 변화에도 화재 및 폭발은 발생하지 않았다.

Fig. 6은 용기 이탈식 연소기에 대한 시험 결과를 그래프로 도시하였다. 용기 이탈식의 경우 압력측정이 곤란하여 온도상승 곡선만을 표시하였다. 가버너 안전장치는 캔 온도 53~61℃에서 작동하였고, 용기 방출밸브는 77~83℃에서 정상 작동하였다. 그리고 연소기 이격거리 및 가스누출 방향에 의한 화재 및 폭발은 발생하지 않았다. 본 실험결과를 통해 볼 때, 방출밸브에서 분출된 부탄가스의 농도가 이격거리(100 또는 80cm)에서 부탄가스의 폭발한계(1.8~8.5vol%)범위⁽⁷⁾에 도달하지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 폭발방지 부탄캔에 대한 극한조건 시험결과이다. 극한시험 조건은 가버너 안전장치가 작동한 이후에도 히터를 계속 ON 상태로 유지하여 이전 시험에 비해 열원에 의한 복사열을 극대화한 상황이다. 본 실험에서 개발제품은 11.0kg/cm²에서 방출밸브가 작동하였으며, 과도한 복사열에 의해 방출밸브 개방 후에도 압력이

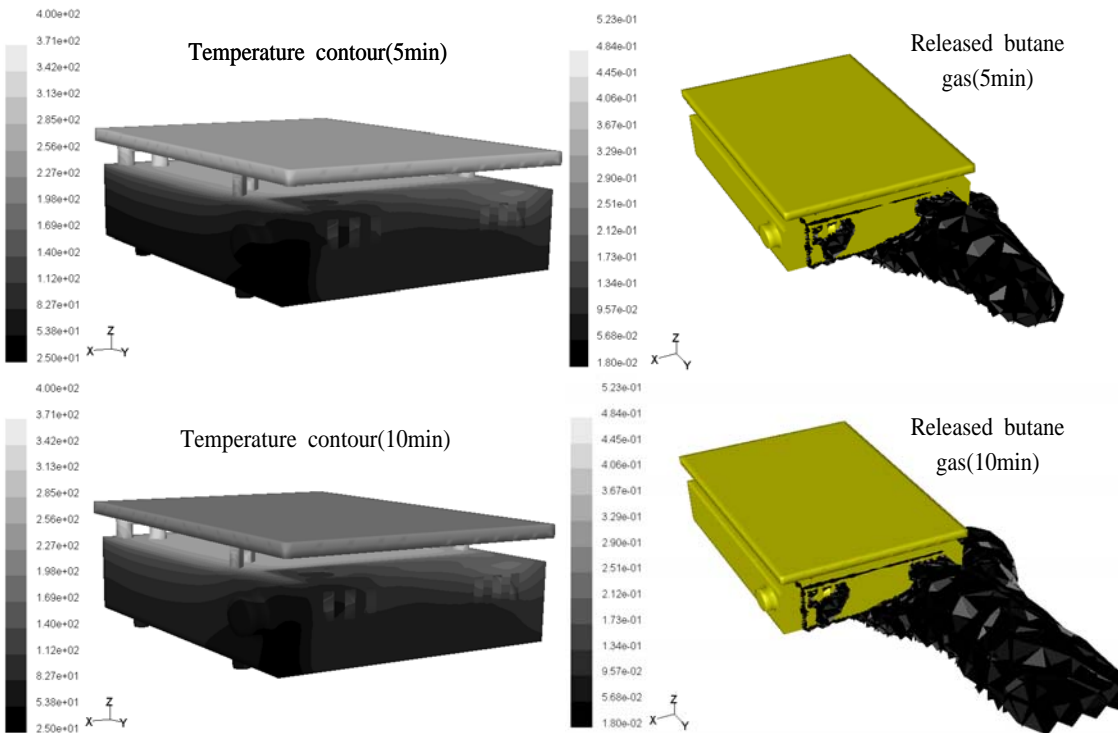


Fig. 8 Time evolution of temperature contours and diffusion of released butane gas.

상승하였으나, 변형압력(13.0 kg/cm²)⁽⁸⁾까지는 도달하지 않았으며, 12.2kg/cm²에서 다시 하강하기 시작하여 캔의 변형 및 파열을 방지하는 것을 확인하였다.

Fig. 8은 부탄캔이 이동식 부탄연소기에 장착된 상태에서 방출밸브가 작동한 상황을 시뮬레이션한 결과로서 가스분출 경과시간별 온도장 및 부탄가스의 농도 변화를 도시하였다. 불관의 복사열에 의해 용기 덮개 온도가 상승하는 것을 확인할 수 있으며, 이로 인해 부탄캔 내부압력이 상승하게 되는 것이다. 캔의 내압이 방출밸브의 설정압력(11.0±1.0kg/cm²)에 도달하면 더 이상의 압력상승을 방지하기 위해 밸브가 열리면서 부탄가스를 대기 중으로 방출하게 된다. 상온에서 부탄가스의 밀도는 약 2.46kg/m³으로 공기에 비해 약 1.91배의 비중을 가진다. 따라서 부탄가스는 공기 중으로 상승하여 확산되지 않고, 바닥 쪽으로 하강하는 현상을 보이고 있다. 시간이 지남에 따라 부탄가스의 유입량이 증가하면서 확산 거리와 범위는 증폭되는 것을 확인 할 수 있다. 계산을 통해 확산거리를 예측한 결과 부탄가스의 최저 폭발한계범위(0.18vol%)는 가스누출 5분경과 시 50cm, 10분경과 시 80cm까지 도달하는 것으로 파악 되었다. 실제 사용조건에서는 환기 등 다양한 공기 이동조건들이 존재하므로 누출가스가 대기 중으로 신속히 확산되어 폭발한계범위의 도달거리는 더욱 감소하게 된다. 그러므로 연소기 사이의 이격거리 100cm 또는 80cm에서 화재 및 폭발에 대하여 안전한 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구를 통해 이동식 부탄연소기용 부탄캔에 방출밸브를 장착한 폭발방지용 부탄캔에 대한 안전성평가 및 분출가스확산 해석을 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 개발 제품은 유로차단식 및 용기이탈식 연소기에서 방출밸브 작동에 이상이 없고, 연소기 이격거리 100/80cm에서 약 10분간 분출가스에 의한 화재 및 폭발이 발생하지 않는 것으로 확인되었다.

- (2) 본 개발제품의 시료 20개의 테스트 결과 작동압력은 10.4~11.4kg/cm²로서 성능기준의 상한 및 하한 기준을 만족하는 것으로 확인된다. 분출유량의 적정성 평가를 위해 개발제품을 이동식 부탄연소기에 장착하고 실제 사용조건 및 극한 조건에서 외부열원(히터)에 의해 캔을 가열하였을 때, 방출밸브의 작동으로 캔의 내압이 변형압력(13.0kg/cm²)이하로 유지되고 변형 및 파열이 없는 것으로 확인되었다.

- (3) 유동해석 프로그램을 이용한 분출가스의 확산해석에서, 방출밸브에서 누출된 부탄가스의 연소 및 폭발한계 범위는 분출 후 10분경과 시 약 80cm까지 도달하였다. 연소기에 장착된 상태에서 누출된 가스는 연소기 후면 및 바닥의 통풍구를 통해 연소기 바닥 근처에서 확산되는 것을 확인하였다.

참고문헌

- (1) 2006년도 가스사고연감, 한국가스안전공사, 2007.
- (2) 임사환, 허용정, 최성주, 이종락, 임동연, 2007, “부탄캔 파열로 인한 인체피해예측에 관한 연구,” 한국안전학회지, 제22권 제3호, pp. 98~104.
- (3) KGS A406-2003 “이동식 부탄연소기용 가버너 성능인증 기준,” 한국가스안전공사, 2003.
- (4) FLUENT 6.1 User's Guide, Fluent Inc., 2003.
- (5) 김동률, 정현성, 민동호, 손봉세, 김태국, 1998, “정유면체 공간 내의 CO₂ 가스에 의한 자연대류-복사 복합열전달의 측정 및 수치적 연구,” 대한기계학회 춘계학술대회논문집 A, pp. 873~878.
- (6) KS B 6212 “액화 석유가스 용기용 밸브,” 한국표준협회, 2006.
- (7) Daniel A. Crowl and Joseph F. Louvar, Chemical Process Safety Fundamentals with Applications, Printice Hall PTR, 2002.
- (8) 고압가스안전관리기준통합고시 제12장 10절 “이동식 부탄연소기용 용기,” 한국가스안전공사, 2007.