

액화석유가스(butane)의 대기중 누출현상에 대한 고찰

윤재건

한성대학교 안전과학기술연구소
(2000. 3. 7. 접수 / 2000. 6. 7. 채택)

Discussions on the Leak Phenomena of Liquid Butane in the Open Air

Jae-Kun Yoon

Hansung University, CSST
(Received March 7, 2000 / Accepted June 7, 2000)

Abstracts : Almost accidents related with gas have started with the leakage of LPG(Liquefied Petroleum Gas) in the open air. But experimental data of LPG leak jet are difficult to find because the safety of experiment is hard to secure and its phenomenon is not steady but transitional. This study is focused on the phenomena of injection jet of liquid butane to the open air. Simple experiment shows that only liquid butane jet in the open air is possible due to the slow vaporization because of low temperature difference between the liquid and air and low vapor pressure of liquid butane. Comparing with the water, 25~40% more liquid butane flow through the tube under the same pressure difference driving.

Keywords : LPG(Liquefied Petroleum Gas), leak jet, vaporization of liquid butane

1. 서론

1999년도의 가스사고통계를 보면 총 224건의 가스사고 중에서 액화석유가스에 의한 사고가 181건으로 전체가스사고의 80%를 점하고 있다. 또한 총181건의 LPG사고 중에서 단순누출, 폭발 및 화재 등 LPG의 대기중 누출이 수반된 사고가 161건으로 전체 LPG 사고의 거의 90%를 점하고 있다.¹⁾ 결국 거의 모든 가스사고가 LPG의 대기중 누출로부터 시작되고 있음을 알 수 있다. 세계적으로도 그 유래를 찾아보기 힘든 대형사고 중에서 우리나라에서 발생한 것만 보아도 1971년의 대연각호텔 화재사고, 1972년의 대왕코너 화재사고, 1995년의 대구지하철공사장 폭발사고, 1998년의 부천 LPG충전소 폭발사고 모두 LPG의 대기 누출로부터 시작되었다. 특히 부천 LPG충전소폭발사고의 경우 사고원인이 아직도 밝혀지지 않았고, 주 의문점은 그렇게 많은 부탄이 작은 밴트밸브를 통해서 누출될 수 있느냐는 것과

누출시의 소음의 크기에 대한 것이다. 특히 소음은 누출시의 급격한 기화현상과 관련이 있다.

본 연구에서는 액화석유가스(butane)가 대기중으로 누출되는 현상을 실험적으로 관찰하였다. 부탄의 대기압에서의 기화온도가 -0.5°C 이므로 상온에서 평형상태에 이르면 기체로 존재하여야 하지만 액체상태로 대기압에 노출될 경우 열전달에 시간이 많이 소요된다. 이 시간의 절대값이 얼마인가는 액체부탄의 주위환경에 따라 크게 달라진다. 누출의 초기상태를 어떻게 가정하는 것이 타당한지를 규명하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 실험장치 및 방법

부탄은 실험실내의 대기에서 평형상태에 이르면 기체로 존재하게 되지만 많은 양의 부탄을 다룰 때는 기화된 증기나 액체 부탄이 장치 등의 온도를 충분히 저온으로 만들거나 약간의 압력하에서 액체상태를 유지한다. 또한 기화하기 위한 잠열이 아주 커서 액체 부탄은 상당한 시

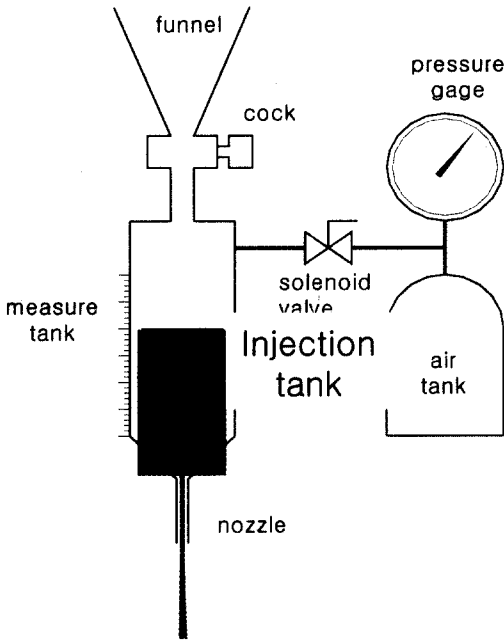


Fig. 1. Experimental apparatus

간동안 액체 상태로 다루어 질 수 있다. 다만 노즐을 통해 고속으로 분사되는 경우에는 액적이 깨어지거나 바닥에 충돌하는 등의 과정에서 급격히 기화된다. 부탄을 상 방향으로 분사할 경우 부탄의 밀도가 공기보다 크기 때문에 바닥으로 계속 흘러내리게 되므로 본 실험에서는 하 방향 분사를 선택하였다.

부탄의 분사를 위한 실험장치는 Fig. 1과 같다. 액체 부탄을 깔때기(funnel)를 통해서 분사용용기(injection tank)에 주입한다. 콕크(Cock)를 잠그고 솔레노이드 밸브(solenoid valve)를 열어서 공기 압축 탱크내의 일정 압력의 공기를 주입함으로써 부탄의 분사 속도를 조절하였다. 부탄의 분사 속도는 분사용 용기에서 액주 높이의 변화를 측정하여 계산하였다. 노즐은 0.4mm, 0.52mm의 내경을 가지는 주사기 바늘의 끝 단을 평면으로 가공하여 사용하였다. 부탄의 유량을 검정해본 결과 0.4mm의 노즐은 재현성이 상대적으로 떨어졌는데, 이는 실험을 진행하는 과정에서 노즐 내부에 존재하던 공기중의 수증기가 부탄의 공급으로 얼음으로 바뀌면서 노즐의 단면적을 변화시키기 때문이다. 노즐의 가열 여부에 따라 많은 차이가 있었다. 따라서 실험결과는 주로 0.52mm노즐에 대해 다루고 비교를 위해 일부

0.40mm노즐의 결과를 사용하였다.

부탄분출제트의 거동을 살펴보기 위하여 직접 사진 촬영(Direct photography)과 Shadow photography를 행하였다. 직접사진은 1/50초의 간격으로 초고속카메라를 이용하여 촬영하였고 Shadow photograph는 1/1000초의 간격으로 촬영하였다. 유량 검정을 위해서는 공급되는 압력에 대해 물의 유량을 보다 엄밀하게 측정하고 그 중 일부에 대해 액체 부탄을 사용하여 두 값을 비교함으로써 검정하였다. 유량 검정을 모두 액체 부탄으로 할 수도 있었지만 본 실험실의 안전 문제 등의 이유로 가능한 한 액체 부탄의 사용량을 줄이려는 의도에서 이와 같은 방법을 택하였다. 관내 난류 유동에서의 압력강하와 관련 인자들 간의 관계식은 다음과 같다.⁴⁾

$$\frac{\Delta p}{\rho g} = K \cdot \frac{V^2}{2g}$$

여기서 K 는 유동상수로서 관 내부를 흐르는 유체의 특성 및 유동의 형태에 따라 다른 값을 갖는다. 이식으로부터 압력차이와 평균유속(평균유량)과는 2차식으로 된다는 것을 알 수 있다. 실험 결과는 노즐 내부의 평균 유속과 평균 유량에 대해 정리하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 직접사진을 보여주고 있다. 네 장의 직접 사진은 laser 광의 조명에 의한 부탄 액체에

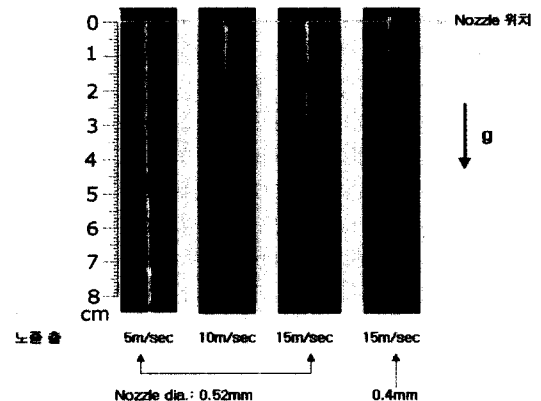


Fig. 2. Direct photography of LPG injection jet

반사된 빛을 촬영한 것으로 부탄 액주의 형태가 그대로 보여진다. 사진의 보이는 부분의 최대길이는 8cm이다. 점차 하류로 가면서 액주의 두께가 작아지고 분출속도가 커질수록 액주의 가늘어짐이 빨라지는 것을 관찰할 수 있다. 비교적 분출속도가 빠르고 노즐의 직경이 작아 액주의 기화가 급격히 이루어지리라 예상했으나 예상보다는 액주의 존재가 길게 유지된다. 이것은 shadow photography에 의해서도 확인된다. Shadow photography에서는 직접사진에서 잘 보이지 않던 부탄의 기화현상을 확인할 수 있다.

일반적으로 LPG시설에서의 누출에서 완전한 액상으로의 누출은 일어나기 어렵다고 보는 것이 일반적이다. 따라서 LPG에 의한 풀(pool)화재의 가능성은 매우 적다고 본다.⁶⁾ 그러나 부천 총전소 사고와 같은 탱크로리의 BLEVE(Boiling Liquid Evaporating Vapor Explosion)는 풀화재에 의한 것이고, 이러한 풀화재의 가능성은 부탄의 완전한 액상누출로부터 확인할 수 있다.

Fig. 3은 shadow 사진으로 증발하는 부탄 기체의 모습을 확실히 볼 수 있다. 앞의 직접사진에서 하류로 갈수록 액주의 두께가 작아지는데 이것은 shadow사진에서도 확인할 수 있다. 하류로 가면서 또한 분출속도가 커지면서 증발이 급격히 일어난다. Fig. 3의 조건은 노즐 직경이 0.52 mm이고, 노즐 출구 속도를 변화 시켰다. 이러한 속도의 변화는 액체부탄을 밀어내고 있는 공기의 압력을 증가시켜 얻는다. 급격한 증발이 일어날 때까지의 액주의 일정한 길이가 있는데 이 길이는 분사 속도에 따라 달라진다. 분사속도가 빨라짐에 따라 그 거리가 짧아지게 되는데 이는 난류와 주위공기와의 열전달의 증가에 기인한 것이다.

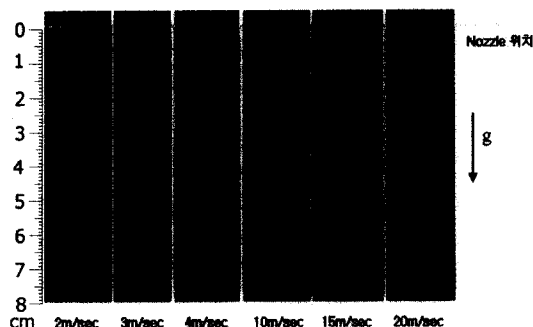


Fig. 3. Shadow photography of LPG injection jet

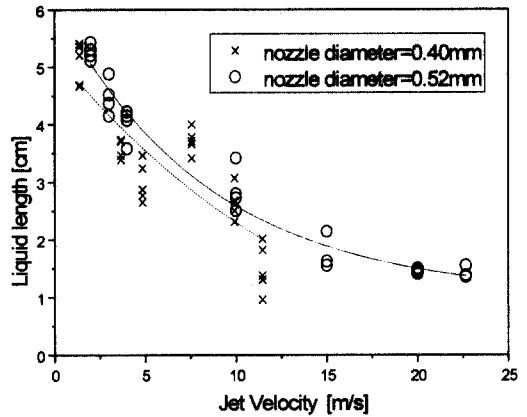


Fig. 4. Liquid jet length vs. average jet velocity

Fig. 4는 shadow photography에서 증발이 급격히 일어나는 곳까지의 액주의 길이를 측정하여 표시한 것이다. 측정은 눈으로 급격한 두께의 변화를 보이는 곳을 기준으로 삼았다. 노즐의 직경이 작은 경우가 큰 경우보다 재현성이 많이 떨어지는데 이는 앞에서 설명했듯이 수증기의 응결에 의한 노즐면적의 변화에 의한 것이다. 측정된 길이는 노즐출구직경에 무관하고 오직 분출속도의 영향만을 받는 것으로 사료된다.

Fig. 5는 압력차에 대한 분출유량의 변화를 보인 것이다. 노즐직경이 큰 것과 작은 것에 대하여 물을 사용하여 유량을 검정하고 실제 액체부탄을 사용해서는 각각 2점만을 검정하였다. 최소자승법(least square method)에 의해서 각각의 측정점을 이차식으로 fitting한 결과 잘 일치하였다. 이것은 앞의 지배식처럼 압력차와 평균유량이

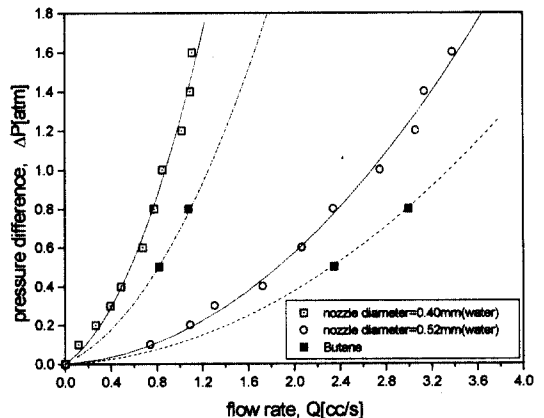


Fig. 5. Pressure difference vs. jet flow rate

이차식의 관계를 갖고 있음을 보여준다. 노즐직경이 0.4mm인 경우, 같은 압력차에서 액체부탄이 물에 비하여 40%정도 유량이 크다. 직경이 0.52mm인 경우는 25%정도 유량이 크게 측정되었다. 따라서 액체부탄이 누설될 경우 같은 상황의 물보다 많은 부피가 누출될 수 있다는 것을 보여준다.

4. 결론

액체부탄의 대기중 분출실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 상온, 상압의 대기중으로의 액체부탄분출 제트는 상당한 거리를 진행할 때까지 액체상태를 유지한다. 대기와의 낮은 온도차이와 부탄의 낮은 증기압이 급격한 상변화를 유발하지 않는다. 따라서 액체부탄이 누출할 경우 액상만의 제트가 가능하다. 이렇게 액상만으로 누출될 경우 부탄에 의한 폭발재의 가능성은 충분하다.
- 2) 액체부탄의 누출량을 유량의 검정을 통하여 물과의 상대적인 값을 구해 보았다. 본 실험 조건(압력차 2기압 미만)에서 액체부탄의 누출량이 물에 비해 25내지 40%정도 많았다. 액체부탄이 대기로 누출되는 상황은 상변화를 동반하는 천이상태이므로 이론식에 의한 계산은 불가능하

다고 판단되며 실험적으로 구하기에는 너무 위험하다. 따라서 대기중으로 누출되는 액체부탄의 유량계산시 본 실험을 통하여 구한 값을 고려하고, 물을 이용한 실제 누출량 측정이 이루어질 경우 실제와 근사한 값을 줄 수 있다.

감사의 글 : 실험에 큰 도움을 준 한국과학기술원 연소공학실험실 김남일, 오광철군에게 감사의 뜻을 표합니다. 본 연구는 1999년도 한성대학교 교내연구비 지원 과제임.

참고문헌

- 1) 한국가스안전공사, 1999년도 가스사고현황, pp. 1~19, 2000.
- 2) 유석기, LPG 및 도시가스 실무핸드북, 구민사, pp. 664~693, 1992.
- 3) R. H. Sabersky, A. J. Acosta & E. G. Hauptmann, Fluid Flow: A first Course in Fluid Mechanics, The Macmillan Company, pp. 9~10, 1971.
- 4) R. V. Giles, Fluid Mechanics and Hydraulics, McGraw-Hill Co., pp. 96~100, 1962.
- 5) A. L. Lydersen, Fluid Flow and Heat transfer, John Wiley & Sons Ltd., pp. 1-9, 1979.
- 6) 박교식, 가스안전공학, 청문각, pp. 586~590, 1999.
- 7) D. L. Katz and R. L. Lee, Natural Gas Engineering, McGraw-Hill Co., pp. 143~153, 1990.