멀티미디어 기술이 구현된 도심 가스배관에서 누출에 의한 피해범위 예측의 소프트웨어 개발

임사환, 신봉기
부경대학교 컴퓨터공학과

Development of Software for Damage area Estimation embodied multimedia technology of Leakage of Gas Pipeline in a City

Sa-Hwan Leem, Bong-Kee Sin
Div. of Electronic, Computer and Telecommunication Eng. PuKyong Nat'l University

요 약

산업사회의 고도화로 에너지 자원에 대한 환경 친화적 요인을 감안한 가스의 수요가 날로 급증하고 있으며, 이와 더불어 안전에 관한 인간 내면적 욕구도 증가하고 있다. 따라서 위험성 평가에 관하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 본 논문에서는 가스의 수요자 시설에서의 단순누출에 의한 위험성 평가를 멀티미디어 기술을 도입하여 피해범위를 예측하는 프로그램을 개발하여 향후 안전지역을 쉽게 파악할 수 있도록 제안하고 있다.

1. 서론

현대산업에 있어서의 대규모화, 복잡화, 고속화 등은 생산기술의 발전과 이에 따른 재해의 발생 또한 다발적이며 피해의 광역화를 수반해왔다. 특히, 가스는 냉난방 및 취사용 연료, 자동차 연료 그리고 산업용 연료로 널리 보급되어 최근에는 국내 보급률이 99%에 이르렀다. 이렇게 가스의 사용이 증가함에 따라 LPG 및 도시가스 배관 망을 형성하였다.

그러나 가스 사용은 경제성과 편리함의 장점이 있지만, 가연성이 매우 크기 때문에 폭발·화재와 같은 사고의 위험성도 내포하고 있다. 특히 가스 배관은 인구가 밀집한 도심에 위치한 모든 사용시설에 설치되어 있기 때문에 이로 인해 발생하는 사고는 막대한 재산손실 및 인명피해를 가져오는 경우가 많다. 실제로 1982년 11월 아현동에서 누출된 도시가스가 폭발하여 13명의 사상자가 발생했고, 1995년 4월 대구지하철 공사장 배관에서 누출된 도시가스로 302여명의 사상자가 발생하기도 하였다.

본 연구에서는 LPG 및 LNG 배관에서 누출로 인한 폭발·화재시 사고 범위와 피해정도를 예측하고자 한다. 이를 위해서 위험성을 평가하는 기법을 사용하여 프로그램을 작성하였고, 프로그램은 Visual Basic으로 작성하였다. 그리고 LPG 및 LNG 배관에서 발생하는 사고는 UVCE만을 고려하였다. 영향 범위는 해당 지점에 폭발로 인해 생성되는 과압을 근거로 추론하였으며, LPG 및 LNG 배관이 위치한 해당 지역의 피해규모는 파손되는 건물의 수로 나타내었다

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 2장에서는 가스사고의 형태의 개념과 기존의 사고형태와 평가기법에 대해서 기술하고 3장에서는 간단한 방법으로 평가 프로그램의 개발을 하였다. 그리고, 4장에서는 피해 범위를 평가하여 그 정도를 보였으며, 마지막으로 5장의 결론에서는 향후의 연구과제를 제시한다.

2. 폭발

폭발이란 아주 빠른 에너지의 누출로 인해 충격파가 생성되는 현상이다. 폭발은 이렇게 생성된 충격파의 속도에 따라 음속을 기준으로 하여 폭굉(detonation)이나 폭연(deflagration)으로 구분한다. 또한 폭발 거동은 일반적으로 많은 변수에 의존하기 때문에 폭발 거동을 결정하는 것은 매우 어렵다. 폭발에는 여러 형태가 있는데 이중 가장 일반적인 형태가 BLEVE(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)와 UVCE(Unconfined Vapor Cloud Explosion)이다.

폭발시 발생하는 압력은 불연속이거나 충격파이며, 압력의 차이와 전달체의 성질에 의해 결정되고 근원

에서 멀어질수록 감소한다. 여기서 충격파와 바람을 가르는 압력의 차이는 압력파가 물체를 지날 때 광풍이 불균형한 힘을 만들어 발생한다. 따라서 폭발로부터 발생하는 생물학적이며, 구조학적인 손실은 폭발로 생긴 순간적인 과압을 계산해서 측정할 수 있다.

일반적으로 과압이 0.15psig일 경우에는 유리가 파열되며, 1psig에서는 가옥의 부분파괴, 5-7psig에서는 가옥의 완전 파괴가 발생한다.

비점 이상의 압력으로 용기내에 액체물질이 저장된 탱크에 열이 가해지면 용기 내에 저장된 액체가 기화하게 된다. 그 결과 용기내의 압력이 상승하게 된다. 이때 용기가 상승한 압력을 견뎌 내지 못하면 용기가 파열하여 그 내부의 물질이 상당 부분 외부로 증발하여 누출하게 된다. 이것을 BLEVE라고 한다. 만약 누출한 물질이 가연성 물질이면 BLEVE의 원인에 따라 fireball이나 UVCE가 발생한다. BLEVE의 원인이 화재에 의한 것이면 fireball이 발생하고, 화재에 의한 것이 아니면 UVCE가 발생할 수 있다. 또한 독성물질의 누출의 경우는 화재나 폭발에 비해 낮지만 인체나 환경에 대한 치명도면에서는 화재나 폭발에 비해 월등히 높음을 알 수 있다.

한편, 가연성 액체가 흐르는 배관이 파열되면 그 부분으로 가연성 물질이 급격히 기화·누출된다. 누출된 물질은 주위의 공기와 혼합하게 된다. 이때 공기와 혼합된 기체의 농도가 LEL(Lower Explosive Limit)과 UEL(Upper Explosive Limit)사이에 있고, 점화원이 있다면 폭발하게 된다. 이것을 UVCE라고 한다. 액화가스, 휘발성 과열 액체나 고압 가스를 상당량 취급하는 공정에서는 항상 UVCE가 발생할 가능성이 있다. LPG 및 LNG 배관에서 발생하는 폭발 사고는 주로 UVCE이다.

◆ 폭발의 영향범위 산정

폭발의 영향 범위를 산정하는 방법에는 Scaling법을 이용한 방법과 Jarrett식을 이용한 방법이 있다.

1. Scaling법

Scaling법은 먼저 폭발하는 물질의 양을 TNT 당량을 이용하여 폭발의 영향 범위를 구하는 방법이다. 어떤 손상을 줄 수 있는 과압을 알면 환산거리와 TNT 당량을 이용하여 그에 해당하는 거리를 구할 수 있다. TNT 당량을 구하는 식은 다음과 같다.

$$W = \frac{\eta M E_c}{E_{cTNT}} \quad \cdots\cdots\cdots (1)$$

여기에서 W는 TNT 당량, M은 누출된 가연성 물질의 질량(kg), η은 효율(여기서는 0.03), E_{cTNT}은 TNT의 연소열(kcal/kg), E_c는 누출된 가연성 물질의 연소열(kcal/kg)이다.

여기서 구한 TNT 당량과 환산거리를 이용하여 다음식으로 실제 피해거리를 예측한다.

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

여기서 R은 실제 영향거리(m), Z는 환산거리($m/kg^{1/3}$)이다.

이 연구에서는 이중 scaling법을 사용하여 영향거리를 평가하였다.

2. Jarrett식

Jarrett식은 scaling법의 근사식으로, 가스등이 폭발할 때 가옥에 미치는 영향을 예측하는 식으로 다음과 같다.

$$R = \frac{K\,W^{1/3}}{[1 + (7000 / W)^2]^{1/6}}$$

여기서 K는 피해의 정도를 나타내는 상수이다.

◈ 확산모델링에 필요한 input data

일반적으로 확산모델링의 최적 적정여부를 결정짓는 데에는 누출원, 기상조건, 지형이나 지세 등이 큰 변수로 작용하고 있다. 먼저 확산모델링에 요구되는 데이타로는 누출물질의 물리적, 화학적 특징과 누출위치의 기하학적 형태, 공정의 안전장치, 누출시간, 지표면의 특성 등이 있다. 누출물질의 물리적, 화학적 특징으로는 확산도, 전도도, 비점 등이 요구되며, 혼합물일 경우에는 각각의 성분에 대한 특징들을 필요로 한다. 누출위치의 기하학적 형태는 파이프나 탱크 등 누출원의 크기 등이 포함되며, 공정의 안전장치에는 안전밸브나 럽쳐디스크의 장착여부 등이 확산 모델의 한 요소로 작용하고 있다. 누출 경과후의 시간은 인체에 대한 피해 및 환경에 대해 크게 작용하고 있기 때문에 확산모델링시 반드시 고려되어야 할 항목이다.

두 번째로 기상데이타를 들 수 있는데, 여기에는 풍속, 온도, 상대습도, 대기안정도 등이 확산에 영향을 미치며, 그 외에 배관의 크기나 상용압력 및 누출량 등도 확산 모델에 고려되어야 한다.

◈ 유해물질의 누출과 확산모델

사고가 발생하면 배관으로부터 가스가 매우 빠르게 누출되고 인근지역에 피해를 줄 수 있는 위험한 증기운들이 형성된다. 일반적으로 유해물질의 누출은 인체, 환경에 중대한 피해를 유발하기 때문에 좋은 안전성 향상 프로그램은 이러한 사고가 발생하기 전에 그 문제점을 찾아내어 이를 사전에 방지하는 것이다. 또한 엔지니어들은 이러한 가스 누출에 대한 현상을 정확히 이해함으로써 그로 인한 피해를 사전에 방지하는 것이 필요하다. 가스의 대기중 확산에 영향을 미치는 파라미터로 바람의 속도, 대기안정도, 지표면의 상태, 누출지점의 높이 등이 있다. 연속누출(Continuous release)의 경우 바람의 속도가 증가함에 따라 증기형태는 더 길어지고 더 넓어진다. 따라서 누출된 물질은 바람의 방향으로 더 빠르게 이동하지만 많은 양의 공기에 의해 더 빨리 희석되기도 한다.

초기난류혼합(Initial turbulent mixing) : 여기서는 2가지 모델을 사용하여 누출물질의 거동을 묘사하는데, 균일제트모델(uniform jet model)과 가우스제트모델(gaussian jet model)이다. 균일제트모델에서는 어떤 단면적에 대해 균일한 농도분포를 갖는 제트로서 누출물질을 다룬다. 가우스제트는 Ooms model(1972)을 기초로 한 확산모델로서 제트의 농도와 밀도 분포가 가우스분포를 갖는다고 가정하여 제트의 흐름에 대해 과잉질량플럭스의 변화속도(dM/ds)와 운동량플럭스의 변화속도(dI/ds) 등을 사용하여 표현한다.

과밀중기운 확산(Dense cloud dispersion) : 과밀중기운 확산모델은 Cox와 Carpenter model로 표현할 수 있고, 공기보다 무거운 물질의 누출이나 냉각된 물질의 누출의 경우에 대해 적용된다.
수동확산(Passive Dispersion) : 누출지역으로부터 어느 정도 떨어진 지점에서 누출물질의 확산은 대기의 난류에 의한 영향을 받게 되며 이러한 확산은 대기의 안정도(stability class)나 표면의 상태 등에 크게 의존한다.

연속누출(Continuous release)의 경우,

$$C = \frac{G}{2\pi\sigma_y\sigma_z u}\left[\exp\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right]\left[\exp\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2} + \exp\frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right]^1$$

여기서, x,y,z = 누출원으로부터의 거리, m(x=downwind, y=crosswind, z=vertical)
C = 위치 x,y,z에서의 농도(kg/m^3)
G = emission rate(kg/s)
H = 지표면에서부터의 누출원의 높이, m
σ_y, σ_z = dispersion coefficient, m (function of distance downwind)
u = 바람의 속도, m/s

순간누출(Instantaneous release)의 경우,

$$C = \frac{M}{2\pi^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z}\left\{\exp\left[-\frac{(x-ut)^2}{2\sigma_x^2}-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right]\right\} \times \left[\exp\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2} + \exp\frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right]$$

여기서, M = 누출량, kg,
t = 누출후의 경과 시간, s

잘 알려진 가우스모델이 바람의 속도와 방향에 크게 의존하는 부유가스(buoyant gas)의 확산 거동을 잘 설명하고 있다. 특히 수십년간에 걸쳐 이러한 부유가스들은 가우스모델을 사용하여 발전소에서의 누출을 대상으로 연구되어 왔다. 이러한 확산모델은 사고위치로부터 가스가 인근지역으로의 공기중 이동을 묘사하는 것이다. 물질의 최대 농도는 누출위치에서 감지되며, 바람이 부는 방향으로는 농도는 난류혼합(turbulent mixing)과 유해물질의 공기중으로의 확산에 의해 감소된다.

3. 평가 프로그램의 개발

폭발에 의한 영향 범위를 구하기 위해 여기서는 Scaling 법을 이용하여 프로그램을 작성하였고, 누출의 시간과 확산에 대해 프로그램은 Visual Basic으로 작성하였다. 누출량은 배관의 상용압을 알고 있을 경우에는 배관의 상용압을 입력받아 누출량을 계산한 뒤 이를 토대로 영향 범위를 구할 수 있도록 하였으며, 상용압을 모를 땐 배관의 체적에 의한 총용량을 전부 폭발에 관여한다고 가정하여 배관의 관경과 단위길이를 입력받아 영향 범위를 구하도록 하였다. 그리고 배관 망 주위에위치한 건물들이 균일하게 분포한다고 가정하고 건축물의 피해도 예측할 수 있도록 하였다.

4. 피해 범위 평가

사례 연구로는 수도권에 있는 한 아파트를 대상으로 하여 이 아파트에 공급되는 배관에서의 누출로 인한 폭발로 피해 범위를 평가해 보았다. 이 아파트에는 100A의 배관이 연결되어 있으며, 배관은 전부 지상에 위치해 있다. 그리고 배관이 설치된 지역은 행정 구분상 주거 지역에 해당하는 곳이다. 아파트내의 배관중 일부가 폭발할 때 그 영향으로 다른 배관이 연쇄적으로 폭발하는 것은 고려하지 않았다. 폭발로 인해 발생하는 과압과 거리와의 관계는 그림 1과 같다. 그리고 예상되는 피해와 해당하는 피해를 입을 것으로 예상되는 건물의 수를 표 1에 나타내었다. 여기서 피해정도는 해당지역에 미치는 과압을 기준으로 하여 산정하였다. 그리고 피해 면적은 과압이 미치는 거리를 반지름으로 하는 원의 면적으로 구하였다. 피해 예상 건축물 수는 해당 지역의 면적당 평균 건축물 수에 예상 피해 면적을 곱하여 구하였다

피해정도	건축물 수 (채)
크고 작은 창 부서짐	12
가옥 부분 파괴	4
비강화콘크리트벽 부서짐	1
가옥전파	0

표 1. 건축물의 피해 정도

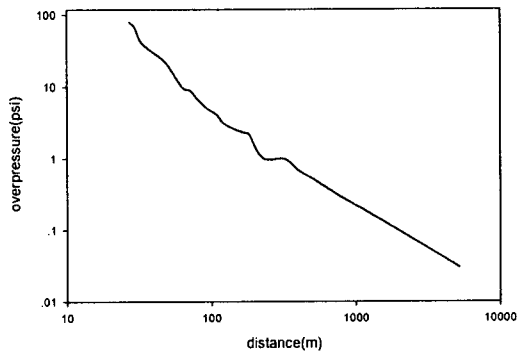

그림 1. 과압과 거리와의 관계

5. 결론

여기서는 LPG 및 LNG 배관에서 누출의 폭발로 인한 피해 정도를 평가하였다. 이를 위해 먼저 폭발은 UVCE의 경우를 가정하였고, 폭발의 영향 범위는 scaling법을 사용하여 평가하였다. 그리고 건축물들은 LPG 및 LNG 배관이 있는 장소에 균일하게 분포한다고 가정하여 피해를 입는 건축물의 수 및 피해정도를 예측하였다. 또한 확산모델링에서 바람의 속도 및 방향은 유해물질이 확산되는 방향을 경정하며, 바람의 속도에 따라 유해물질의 누출경로가 약간 길어짐을 보이고 있다. 이러한 현상은 연속누출보다는 갑작스런 누출의 경우에 더욱 두드러지게 나타나는데, 배관의 갑작스런 파열로 인한 누출의 경우 피해반경이 누출지점을 중심으로 원의 형태로 나타나며, 이러한 중기운은 바람의 속도와 방향에 따라 이동함을 알 수 있다.

또한 현재의 관망 형성에 따른 위험평가는 피해 범위가 한정된 단순범위에 해당하는 영향평가로 그칠 뿐이다. 따라서 멀티미디어 기술이 구현과 GPS에 의한 광범위의 영향평가로 도심지역의 위험지역에 대한 중점 관리가 가능하기에 경제적인 위험요인에 대해서 쉽게 평가를 내릴 수 있을 것이다. 향후 더 많은 사고사례와 현장 실험을 통한 멀티미디어상에서의 가현실상의 평가로서 현실에 도입이 가능하도록 후속 연구를 진행할 것이다.

[참고문헌]

[1] Daniel A. Crowl, Joseph F. Louvar, 이영순 외 3인 역 "화공안전공학", 대영사, 1994

[2] J. R. Tayler "Risk Analysis for Process Plant, Pipelines, and Transport", E & F N SPON, 1994

[3] 김용욱, "(최신)화공안전공학", 형설출판사, 1994

[4] CCPS, "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis", CCPS of the AIChE, 1989

[5] Crowl, Daniel A. and J.F. Louvar, "Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications", Prentice Hall, 1990

[6] Lees, Frank P., "Loss Prevention in the Process Industries", Butterworths, 1986

[7] CCPS, "Vapor Cloud Source Dispersion Models", CCPS of the AIChE, 1989