

가스시설에서의 폭발 피해범위 해석에 관한 연구

탁송수, 조영도, 강태연
한국가스안전공사

A Study on the Consequence Analysis of an Explosion in the Gas Facilities

Song-Su Tak, Young-Do Jo, Tae-Yeon Kang
Korea Gas Safety Corporation

1. 서론

가스폭발은 지상과 해상에서 모두 주요한 위험요소이다. 1974년 Flixborough의 Nypro plant에서 폭발은 화학공정 산업에서 발생한 가장 심각한 사고 중 하나이다. 폭발은 임시 배관의 고장으로 누출된 사이클로hexan 약 50톤을 포함하는 가연성 증기운의 점화에 의해 야기되었다. TNT 약 16톤과 맞먹는 폭발력으로 예측되었는데 28명이 사망하고 89명이 부상을 입었으며 플랜트 전체가 파괴되었다. 또한 플랜트 인근의 거의 2000개 가량의 건축 구조물에 피해를 입힌 결과를 가져왔다.

국내의 경우만 보더라도 이러한 대표적인 예로 아현동 도시가스 폭발사고¹⁾(1994. 12. 7. 14:55, 사망 12명, 부상 10명, 건물 145동 파괴, 차량 93대 파손 등), 대구지하철 도시가스 폭발사고¹⁾(1995. 4. 28. 07:52, 사망 101명, 중상 201명, 차량 152대 파손, 복강판 400m 붕괴 등) 및 부천 대성에너지 LPG 충전소 폭발사고²⁾(1998. 9. 11. 14:20, 사망 1명, 중상 6명, 경상 77명, 재산피해 약 100억원) 등을 들 수 있다. 이러한 사고를 통해 인명 및 건물 등에 대규모의 피해를 초래할 수 있음을 체험하였다.

본 연구에서는 가스폭발에 따른 피해범위를 해석함에 있어 최근까지 개발되어 사용되고 있는 모델의 기술현황을 검토하고 폭발피해범위 해석을 통해 개발하고자 하는 프로그램의 방향을 제시하고자 한다. 최신 폭발모델 현황은 크게 Empirical, Phenomenological, Computational Fluid Dynamics(CFD) 등 세 가지 형태로 구분할 수 있다.³⁾ 이 중 Empirical 모델식은 과압을 예측하는 가장 간단한 방법으로 이러한 모델식은 물리학적 개념이 거의 없는 상관관계식으로 표현된다. Phenomenological 모델식은 폭발의 주요 물리적 현상 과정을 표현하는 간단한 모델식이며, CFD 모델식은 유동장에 대해 상당한 정보를 제공하고 폭발공정을 지배하는 편미분방정식의 수치해석을 포함하고 있다.

2. 가스폭발에 대한 이론적 고찰

가스폭발은 에너지 누출지점 주위 공기의 밀도, 압력, 속도의 순간적인 변화를 일으키는 에너지의 누출로 정의한다. 또한 노르웨이 CMR의 가스폭발핸드북⁴⁾에서는 압력의 빠른 증가로 인해 유도되는 사건으로 폭발을 정의하고 있으며, 예혼합가스(연료-공기 또는 산화제)의 연소가 빠른 압력 증가를 일으키는 공정으로 가스폭발을 정의하고 있다.

다음 그림은 일반적인 폭발의 분류를 나타낸 것으로 폭발에는 물리적 폭발과 화학적 폭발로 나눌 수 있으며⁵⁾, 물리적 폭발은 액상 또는 고상에서 기상으로의 상변화, 온도상승이나 충격 등에 의하여 압력이 이상적으로 상승하여 일어나는 폭발로 보일러 폭발 또는 BLEVE 등과 같이 물리적인 힘에 의하여 재료가 파열되어 폭발하는 것을 말하고, 화학적 폭발은 화학반응에 의해 폭발이 일어나는 것을 의미한다. 예를 들어 가연성 가스가 공기 중에 혼합된 후 연소될 때 일어나는 폭발현상을 말한다.

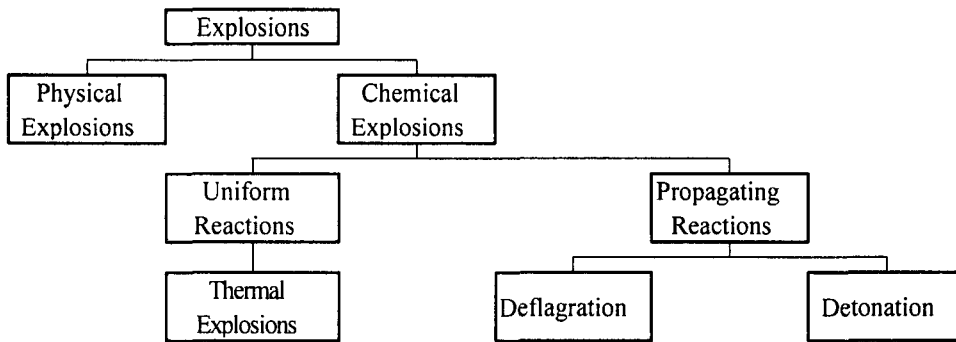


Fig. 1. Classification of Explosions

화학적 폭발은 균일한 화학반응(uniform reactions)과 전파반응(propagating reactions)으로 구분하며, 균일한 화학반응은 탱크내부에서 모든 부분이 거의 동시에 같은 속도로 화학반응이 일어나는 것을 말하며, 주로 기상반응기에서 일어난다. 즉 기상반응기 내부 반응에 의하여 발생하는 열의 제거가 잘 되지 않을 때, 반응기 내부는 거의 균일하게 온도가 상승하게 되고, 온도에 의하여 반응속도는 더욱 가속화됨으로써 결국 시스템은 폭발하게 된다. 이때 폭발강도는 화학반응속도와 반응기의 강도에 의존한다.

전파반응은 화학반응이 물질 내 임의의 한 점에서 시작되어 미반응 물질로 전파되어 가며 화학반응을 일으키는 것을 말한다. 정상상태에서 연속적인 반응의 전파를 위해서는 반응영역의 에너지가 반응하지 않은 물질로 전달되어야 한다. 전파반응은 반응영역에서 미반응물질로 에너지 전달 메커니즘에 따라 폭연(deflagrations)과 폭굉(detonation)으로 분류한다.

Reaction Products	Reaction Zone	Unreacted Material
Direction of Propagation →		

Fig. 2. Example of a Propagating Reaction

폭연은 반응영역에서 미반응물질로 에너지 전달이 일반적인 전달과정(열 및 물질전달)을 통해 일어나는 전파반응으로 이러한 반응의 전파속도는 음속보다 작다. 그러나 폭굉은 반응영역에서 미반응물질로 에너지 전달이 충격파에 의하여 전달되며, 반응의 전파속도는 음속보다 크다.

폭발현상 해석 모델링을 통해 폭발에 의한 과압, 복사열 및 비산물에 의한 위험성 등을 계산하여 사람과 구조물에 미치는 영향을 산정한다. 해석모델로는 저장탱크 폭발, BLEVE, 증기운 폭발, 밀폐공간 폭발, 비산물 생성 모델 등이 있다.⁶⁾

3. 가스폭발에 대한 최신 기술동향 분석

폭발의 영향은 최대압력, 충격파의 지속시간 등과 같은 많은 요소들에 의존하며 이러한 요소들은 또한 연료의 종류, 연료의 양론조성, 점화원의 형태와 위치, 밀폐형태와 벤트, 초기 난류정도, 폐쇄비, 장애물의 크기·형태와 위치, 그리고 주어진 장애물의 수 등에 의존한다. 폭발의 물리적 현상을 설명하는 폭발 모델링은 실험을 보완하는 도구로써 위와 같은 모든 변수들이 원칙적으로 고려되어야 한다. 현재 사용되는 모델은 물리화학 이론 바탕 위에서 만들어진 것으로 많은 경우에 모사 결과가 실험과 좋은 일치를 보이고 있으나 모델들은 모두 제한사항을 지니고 있다. 따라서 요구되는 상세수준, 정확성 수준과 계산에 이용 가능한 계산시간 등에 의존하여 모델을 선택하여야 한다. 최신 폭발해석모델의 현황을 검토해보면 다음과 같다.

폭발해석 모델은 크게 Empirical, Phenomenological, Computational Fluid Dynamics(CFD)로 구분할 수 있다. Empirical 모델은 실험데이터의 분석으로부터 얻어지는 관계식에 근거를 두고 있으며, Phenomenological 모델은 폭발에서 필수적인 물리학 개념을 표현한 간단한 물리적 모델로 실제 시나리오의 기하구조를 간략화 하는 등 합리적으로 근사 축약하고 있으나 복잡한 상황에서는 부정확하다. 또한 폭발공정의 물리학은 실험적으로 또는 이론적으로 설명되고 있다. CFD 모델은 폭발공정을 지배하는 편미분 방정식의 수치해석 결과로 속도, 압력, 밀도 등과 같은 유동장(flow field)에 대한 많은 정보를 주고 있으며, 예를 들면 수치해석 결과인 표면압력 데이터는 구조물 해석에 이용될 수 있다. CFD 시뮬레이션의 특징으로는 실험을 수행하기가 불가능하거나 어려운 환경에서 유동 거동에 대한 보다 정확한 정보를 제공할 수 있다는 것이다. 따라서 최근 빠르게 CFD에 근거한 3차원 수치해석 모델이 개발되고 있다. CFD 모델의 사용에 있어 주요 결점은 이용 가능한 컴퓨터 하드웨어에 주어질 수 있는 한계에 의해 야기되며, 예를 들면 현재 난류 연소흐름을 정확하게 시뮬레이션 할 수 없는 것 등이다.

현재까지 개발되어 산업현장에서 위험평가에 사용되고 있는 Empirical 모델로는 TNT Equivalency, TNO Multi-Energy, Baker-Strehlow, Baker-Strehlow-Tang, Congestion Assessment Method, Sedgwick Loss Assessment Method 등이 있으며, Phenomenological 모델로는 SCOPE(Shell Code for Over-pressure Prediction in gas Explosion)과 CLICHE(Confined Linked Chamber Explosion) 등이 있다. CFD 모델로는 EXSIM, FLACS, AutoReaGas, CFX-4, COBRA, REACFLOW 등이 사용되고 있다. 최근까지 개발되어 사용되고 있는 각 모델의 종류와 설명을 종합하면 다음 표와 같다.

Table 1. Summary of Explosion Models

Type	Name of Models	Short Description
Empirical Model	TNT Equivalency	Decker(1974), Non-unique yield factor is needed
	TNO Method	Wiekema(1980), Assume whole vapor cloud
	TNO Multi-Energy	Van den Berg(1985), Charge strength is difficult
	Baker-Strehlow	Baker et al.(1994), Can be over conservative
	Baker-Strehlow-Tang	Baker et al.(1999), Blast curves were validated by experiments with flame speed, Mf.
	CAM	Cates et al.(1991), Congestion Assessment Method
	Sedgwick Loss Assessment	Thyer(1997), It is based on Puttock's CAM model
Phenomenological Model	SCOPE	Shell's Thornton Research(1991),SCOPE2(1994),SCOPE3(2000)
	CLICHE	Advantica Technologies Ltd.(1982), Confined explosion
CFD Model	EXSIM	Norway and U.K, Current version 3.3(2000)
	FLACS	CMR in Norway(1986), FLame ACceleration Simulator
	AutoReaGas	Century Dynamics Ltd. and TNO in Netherlands(1993)
Advanced CFD Model	CFX-4	AEA Tech. in U.K(1996), Current version 3.0(1999)
	COBRA	Mantis Numerics Ltd. and Advantica Tech. Ltd.(1997)
	REACFLOW	Joint Research Centre of E.U. in Ispra, Italy

4. 가스폭발 피해범위 해석

그동안 우리나라의 가스안전관리는 사고를 방지하기 위한 근본적 차원의 기술개발보다는 대형사고 발생시마다 검사와 점검을 강화하는 등 하드웨어적인 면에 치중하여 왔으나, 시설위주의 단순한 검사나 점검 등의 안전관리로는 한계에 직면하고 있어 시설이나 설비에 대한 잠재된 위험성 평가 등을 통하여 대형사고를 사전에 예방할 수 있는 안전기술

개발이 시급함을 인식하고 있다. 이러한 필요성에 따라 2002년부터 본 연구팀에서 종합적인 피해범위 산정 프로그램 시작품 개발을 진행 중에 있다.

본 연구에서 가장 중요한 분야인 가스폭발 피해범위 해석은 증기운 폭발, 물리적 폭발, BLEVE, 분진폭발, 밀폐공간 폭발, 비산물 생성 모델링, 인체 및 건축물에 미치는 폭발 영향으로 구분하고 있으며, 프로그램 개발의 기본원칙은 다음과 같다. 위에서 언급한 바와 같이 CFD에 기초한 3차원 상세한 수치해석 방법이 최근 빠르게 개발되고 있으며, 이는 많은 가정을 통한 간략화 없이 실제 시나리오를 직접 설명하고 높은 정확성을 제공할 능력이 있다. 그러나, 여전히 화염 가속화 공정을 올바르게 모사하기 위해서 화염과 유동장 난류작용을 정확하게 표현할 능력이 있는 연소모델을 세우는 것이 상당히 어려운 점 등의 결점을 지니고 있다. 또한 상당히 많은 시나리오에 대해서 기초적이며 일반적인 폭발효과를 예측하기 위한 접근방법으로 여전히 덜 복잡한 것을 필요로 하고 있다. 더욱이 필수적인 실험적 타당성 증명이 많은 경우에 이용 가능하지 않으며 CFD 모델링에 요구되는 구체적인 정보들이 이용 가능하지 않은 경우가 있다. 따라서 본 연구의 가스폭발 피해범위 해석은 최근 개발되어 수치해석 결과와 거의 유사한 정확도를 지닌 실험적 모델식들이 검토되고 프로그램 개발에 적용하고 있다. 예를 들면 증기운 폭발 모델에서는 TNT 상당량 모델 및 TNO Multi-Energy 모델 뿐 만 아니라 실험에 의해 측정된 화염속도 M_f 값이 폭발곡선에 적용된 Baker-Strehlow-Tang 모델⁸⁾의 지배방정식을 검토하고 이를 적용하여 증기운 폭발을 해석하고, 밀폐공간에 대해서는 새로운 가우스분포모델을 제시하였다.

5. 결론

최근까지 개발되어 사용되고 있는 가스폭발 피해해석 모델에 대한 최신 기술동향을 분석하였으며, 본 연구팀이 수행하고 있는 피해범위 산정기술 개발과 관련한 가스폭발 피해범위 해석 연구내용과 방향을 언급하였다. 최신 기술동향 분석 결과 CFD에 기초한 상세한 수치해석 모델이 빠르게 개발되고 있음을 알 수 있었고, 국내에서도 궁극적으로는 이러한 수치해석 모델 개발의 필요성을 인지할 수 있었다. 그러나 국내의 기술능력을 감안하고 편리한 이용과 빠른 계산을 원하는 사용자의 수요를 고려하여 최신의 검증된 Empirical Method를 적용하여 프로그램을 개발하고 있으며, 아울러 본 연구팀에서 개발한 가우스분포 모델에서는 기존의 최소연소한계농도 방법에서 제공하지 못하는 밀폐공간에서의 폭발위험성에 대한 최소가스 누출량 예측방법을 제공하고 있다.

참고문헌

1. "가스사고편람", 한국가스안전공사 (1997)
2. "1998 가스사고연감", 한국가스안전공사 (1999)
3. C.J. Lea et al., "A Review of the State-of-the-Art in Gas Explosion Modeling", Health&Safety Laboratory (2002).

4. Dag Bjerketvedt et al., "Gas Explosion Handbook", Journal of Hazardous Materials 52, pp1-150(1997).
5. "Hazard Evaluation Consequence Analysis Method", The Process Safety Institute Textbook, (2002).
6. CCPS, "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis", 2nd, AIChE, New York, pp.153-224 (2000).
7. 강태연, 조영도, 탁송수, "가스사고 발생시의 피해범위산정 기술개발 연구(I) 연구", 한국가스안전공사 (2002).
8. M.J. Tang and Q.A. Baker "A New Set of Blast Curves from Vapor Cloud Explosion" Process Safety Progress, Vol.18, No. 3, pp.235-240(1999).