

# 부분 밀폐 공간의 가스 폭발에 대한 과압 예측 방법 검토

박달재, 이영순  
서울산업대학교 안전공학과

## A Review of Methodology to Predict Overpressures for Gas Explosions in a Partially Confined Space

Dal Jae Park, Young Soon Lee  
Dept. of Safety Engineering, Seoul National University of Technology

### 1. 서 론

부분 밀폐 공간에서의 가연성 증기 또는 가스 누출로 인해 발생하는 폭발은 엄청난 과압을 생성시켜 사고 영향이 치명적이고, 피해 정도가 매우 크다. 그러므로 이러한 과압 예측 및 수용할만한 안전을 확보하기 위해서 가스 폭발 위험성 평가는 중요하다. 이러한 평가를 수행하기 위해서는 신뢰할만한 예측 도구(Tool)가 필요하며, 이러한 도구가 사용되기에 앞서 이론적 방법들은 충분한 실험 데이터에 대하여 검증되어야 한다[3]. 따라서 본 연구에서는 부분 밀폐 공간에서의 가스 폭발로 인한 과압 예측과 관련된 이론적 방법을 검토하고자 한다.

### 2. 증기운 폭발 과압 예측 방법

#### 2.1 TNT 등가(Equivalence) 방법

Formby 및 Wharton(1996)[5]은 증기운내의 전체 연소 에너지를 누출된 가연성 질량, 가연성 물질의 순연소열, 폭발효율 등을 연관지어서 피해 영향을 산정하였다. 이 방법의 단점은 폭발효율이 단지 누출된 물질의 질량에만 관련되며, 연소형태와는 관련이 없다는 것이다. 증기운 폭발로부터 폭발 영향은 연소된 물질의 질량 및 증기운의 연소 형태에 의해서 결정된다. 또한 증기운 폭발로 인한 폭발 과압에 대한 TNT 등가 방법은 인근 거리의 예측에는 한계가 있고, 비교적 먼거리에서의 예측에는 정확하다[2].

#### 2.2 TNO 및 TNO Multi-Energy 방법

### 2.2.1 TNO 방법

TNO는 반경  $r_0(m)$ 를 가진 반구형 증기운내에 존재하는 모든 연소에너지가 폭발에 기여하는 것으로 가정하며 반구형 증기운의 반경, 연소에너지 밀도 등을 관련지어 특정 폭발길이를 산정하였다. 또한 증기운 폭발로부터 폭발 영향은 blast scale과 초기 폭풍 강도에 의해 산정된다[1].

### 2.2.2 TNO Multi-Energy 방법

폭발 예측은 TNO Multi-Energy(이하 ME라 함) 방법에 의해 크게 진보하였는데 이 방법은 누출된 증기운의 크기보다 주위의 장애물이나 밀폐 정도를 변수로 하여 계산하는 방법이다[1,4,5]. 여기서 밀폐 정도는 Low(3-D 화염 팽창), Medium(2-D 화염 팽창), High(1-D 화염 팽창)의 3가지로 나누어 생각하였고, 장애물 크기는 Low, Medium, High로 구분하였다. 이 방법에서 압력, 지속시간, 거리는 Sach의 환산법칙을 이용한다.

ME 방법을 적용할 때에 증기운 및 연소 메카니즘에 대한 많은 가정이 이루어진다. 밀폐정도, 난류정도, 증기운 형태, 연료 반응성, 혼합정도, 점화원 강도 등은 증기운 폭발로 인한 피해 영향에 미치는 중요한 요소이다. 현재 ME 방법은 이러한 것들을 완전히 포함하지 않고 있다. 그리고 ME 방법을 이용하는데 있어서 분석자들은 폭발강도와 같은 조정할 수 있는 변수 등급을 추측해야 한다. 이것은 TNT 등가 방법의 폭발효율 계수를 추측하는데 생기는 문제점과 유사하다[4,5].

### 2.3 열역학적 유용성(Thermodynamic Availability) 접근 방법

Crowl(1992)[4]은 평형 상태의 환경으로 가역적으로 이동하는 물질로부터 추론할 수 있는 최대 기계적 에너지를 나타내는 열역학적 유용성 접근 방법을 제안하였다. 이 방법의 주요 단점은 열방출속도, 화염속도, 또는 혼합물 반응성 산정, 누출 진행 특성에 의존하는 모든 요소, 공기와의 혼합 정도를 입력값으로 요구한다. 그 결과는 예측된 폭발 변수가 계산시 선정된 입력 데이터에 매우 의존한다.

### 2.4 수치 해석(Numerical Solution) 방법

증기운 폭발을 모사하기 위해 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 바탕으로 한 3차원 수치 해석 시뮬레이션의 적용이 최근에 빠르게 개발되어 왔다. 이 방법은 높은 정확성을 갖으며, 단순화시키는 과정 없이 상세한 실제의 시나리오를 다룬다. 그러나 화염 가속화 과정을 비교적 정확히 모사하기 위해 화염과 유

동 영역의 난류 상관관계를 정확하게 표현할 수 있는 연소 모델 설정에 아직도 상당한 어려움이 있다. 또한 흐름 방향에 장애물이 없는 지역에서는 축, 원통 또는 구형 전파와 같은 단순한 형태의 화염전파가 유용하다. 그러나 만일 장애물이 존재할 경우에는 복잡한 기하학을 걸쳐 화염 전면을 찾아내는 것은 어렵다. 이러한 장소에서는 가연성 부피의 다양한 위치에서의 연소속도를 계산하여 화염전파를 모사하는 것이 더욱 유용하다[3]. 가스 폭발에 대한 유사 모델들은 실질적으로 Kjalldman 및 Huhtanen(1989)[7], Marx 등(1985)[8], Martin(1986)[9] 및 van den Berg(1989)[10]에 의해 제안되었으며, 위의 모델들은 본질적으로 유사하고, 지배 방정식에 유한 영역(finite-domain) 근사값을 사용한다. 난류 영향은 Launder 및 Spalding(1974)[11]의  $k-\epsilon$  모델에 의해 고려되고, 연소속도는 Magnussen 및 Hjertager(1976)[12]의 eddy-dissipation 모델에 의해 모델화된다. Bakke 및 Hjertager(1987) 모델은 FLACS(FLame ACceleration) 및 EXSIM(EXplosion SIMulator) 코드로 통합된다. 여기에 사용된 해석 방법은 Patankar 및 Spalding(1972)[13]의 SIMPLE 기법이다.

### 3. 현존 데이터 상관관계, 구형 및 타원형 폭풍파

#### 3.1 현존 데이터 상관관계

M. Hattwig(1980)[6]은 벤트 가스 폭발 외부 압력을 측정하였으며, Schumann 및 Wirkner-Bott[7]는 벤트 중 폭발로부터 임의의 거리에서의 압력과 최대 외부 압력 위치를 구할 수 있는 경험적 관계를 전개하였다.

Van Wingerden[6]은 데이터 상관관계를 검토한 이외에도 증기운 폭발로부터의 폭발 압력을 예측하기 위해 전산 방법을 사용하였으며, 입력 변수로써 구조물의 전체 부피를 이용하여 구한 결과는 폭풍 압력을 과대 예측한 반면, 구조물의 벤트 면적과 동일한 표면적의 가연성 증기운을 바탕으로 구한 결과는 과소 예측되었다.

#### 3.2 구형 및 타원형 폭풍파

G.B. Whitham(1950)[6]은 구형 대칭 폭풍파 이론을 전개하였다. Whitham은 폭풍파 중심으로부터 방사거리( $r$ )의 함수로써 폭풍파의 주요 가장자리의 도착시간에 대한 식을 전개하였다.

K.W. Chiu 등[6]은 타원형 폭풍파와 관련된 충격(shock) 전면에 대한 미분식을 추론하기 위해 수정된 Whitham ray tube 이론을 사용하였다. 이들은 충격(shock)파가 전파될 때 타원체의 편심률이 시간에 따라 변하더라도 타원체 모양

을 유지하는 것으로 가정하였으며, 타원체의 2개 대칭축을 따라 폭풍 압력의 감쇄에 대한 식을 유도하였다. 벤트 폭발의 경우에 대해 이 식을 적용시에 타원체는 벤트 수직에 단축을 가지면서 벤트 개방 중앙에 놓이게 된다. 벤트 수직에 단축 방향은 벤트 조준선에서는 최소 감쇄, 벤트와 평행한 방향에서는 최대 감쇄를 야기시킨다.

#### 4. 결 론

부분 밀폐 공간에서의 가연성 증기 또는 가스 누출로 인해 발생하는 폭발 과압 예측은 기존 및 신설 설비의 설계 및 안전을 위해서 중요하다. 따라서 본 연구에서는 이에 대한 예측 방법 및 이론을 검토하였는 바 이를 정리하면 다음과 같다.

1. TNT 동가 방법의 폭풍과와 가스 폭발로 인한 압력파는 인근 거리 및 원거리에 대한 최고 압력 및 지속시간이 상이하하다. 다에너지, 반구형 및 열역학적 유용성과 같은 접근 방법들은 밀폐 및 부분 밀폐 지역에서의 가스 폭발에 대하여 사용자 및 그들의 적응성에 의해 인식된 가정과 판단의 정확성에 의해 제한된다. 다양한 평가 방법 중에 가장 효과적인 선정은 CFD 사용이다. 이 방법은 가스 폭발에 대한 설계시에 유용하고, 보다 상세한 정보를 제공하나 화염과 유동 영역의 난류 상관관계를 표현하는 연소모델에는 아직도 상당한 어려움이 있다.

2. 현재의 데이터 상관관계는 벤트 조준선 위치에 대한 실험 데이터와 일치한다. 비조준선 위치에서 감소된 폭풍 압력에 대한 데이터 상관관계는 명백히 존재하지 않는다. 타원체 폭풍과 모델은 구형 대칭 폭풍과 모델보다 상당히 비조준선 데이터를 예측한다.

#### References

- [1] W.P.M. Mercx and A.C. van den Berg., "The Explosion Blast Prediction Model in the Revised CPR 14E(Yellow Book)" , Process Safety Progress, Vol. 16, No. 3, pp. 152-159, 1997.
- [2] M.J. Tand and Q.A. Baker., "A New Set of Blast Curves from Vapor Cloud Explosion", Process Safety Progress, Vol. 18, No. 4, pp. 235-240, 1999.
- [3] B.H. Hjertager, O. Sæter., T. Solberg., "NUMERICAL MODELLING OF

- GAS EXPLOSIONS - A REVIEW” , 2nd Int. Specialist Meeting on Fuel-Air Explosions, Christian Michelsen Research a.s., Bergen., Norway, June 26-28, 1996.
- [4] Naser Nehzat, “Gas Explosion Modelling for Complex Geometries” , Ph.D. Thesis, University of New South Wales, 1998.
- [5] “Guidelines For Evaluating The Characteristics Of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, And BLEVEs” , Center For Chemical Process Safety, AIChE, 1994.
- [6] Tom Forcier and Robert Zalosh, “External pressures generated by vented gas and dust explosions”, J. Loss Prev. in the Process Ind.,” 13(5), pp. 411-417, 2000.
- [7] L Kjalman and R. Huhtanen, “Numerical simulation of vapour cloud and dust explosions” , In: Numerical Simulation of Fluid Flow and Heat/Mass Transfer Processes, Vol. 18, Lecture Notes in Eng., pp. 148-158, 1986.
- [8] K.D. Marx, J.H.S. Lee and J.C. Cummings, “Modeling of flame acceleration in tubes with obstacles” , Proc. of 11th IMACS World Congress on Simulation and Scientific Computation. Vol. 5, pp. 13-16, 1985.
- [9] D. Martin, “Some calculations using the two-dimensional turbulent combustion code FLARE” , SRD Report R373, UK Atomic Energy Authority, Warrington, 1986.
- [10] A.C. Van den Berg, “REAGAS a code for numerical simulation of 2-D reactive gas dynamics in gas explosions” , PML-TNO Report PML 1989-IN-48, The Netherlands, 1989.
- [11] B.E. Launder and D.B. Spalding, “The numerical computation of turbulent flows” , Computer Methods Appl. Mech. Eng., 3, pp 269-289, 1974.
- [12] B.F. Magnussen and B.H. Hjertager, “On the mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion” , 16th Symp. (Int) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, pp. 719-729, 1976.
- [13] S.V. Patankar and D.B. Spalding, “A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows” , Int. J. Heat Mass Transfer, 15, pp. 1787-1806, 1972.