

## 증기운 폭발에 의해 발생된 폭풍 과압 예측 모델 검토

박 달 재 · 이 영 순 · 임 영 훈

서울산업대학교 안전공학과

(2000년 11월 30일 접수, 2000년 12월 21일 채택)

### A Review of the Different Models for Predicting Blast Overpressures Caused by Vapor Cloud Explosions

Dal Jae Park · Young Soon Lee · Young Hoon Lim

*Dept. of Safety Engineering, Seoul National University of Technology*

*(Received 30 November 2000 ; Accepted 20 December 2000)*

#### 요 약

가연성 증기 또는 가스 누출로 인해 발생하는 증기운 폭발은 엄청난 과압을 생성시켜 사고 영향이 매우 크기 때문에 공정 중에 잠재하고 있는 사고의 위험요소를 발굴하여 제거하여야 한다. 이를 위해서는 사고 결과 영향평가가 선행되어야 한다. 이러한 평가를 수행하기 위해서는 신뢰할만한 예측 도구(Tool)가 필요하다[13]. 현재 여러 가지 사고결과 피해예측 모델이 제시되어 활용되고 있는 바 이러한 예측 모델(TNT-Equivalency, TNO Hemispherical, TNO Multi-Energy, CFD)이 어느 정도 타당성이 있는지에 대한 검토가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 증기운 폭발 위험성 정량화를 위해 사용된 각 모델을 비교·검토하여 여러 가지 모델의 가정 및 정확성을 알아보고 가장 타당성 있는 모델을 선정하고자 한다.

**Abstract** - Past accidents have shown that vapor cloud explosions are the predominant cause of the largest losses in the chemical and petrochemical industries due to the generation of significant overpressures. Prediction of such overpressure is of great concern and a knowledge of the likely overpressure is needed for the design of equipment, safety cases and emergency planning. For these reasons, risk assessment for vapor cloud explosion is crucial and this assessment can be carried out using the different models including TNT-Equivalency, TNO Hemispherical, TNO Multi-Energy and CFD models. Accordingly, in this paper, the published VCE prediction models are reviewed to provide a critical comparison of the different models used for the quantification of explosion hazards, in terms of the fundamental assumptions employed, and their predictive accuracy

**Key words** : TNT-Equivalency, TNO Hemispherical, TNO Multi-Energy, CFD

## 1. 서 론

화학공장 또는 가스 시설에서는 유해하고 위험성이 큰 원료나 생산품을 많이 취급하기 때문에 화재, 폭발, 독성 물질의 누출 등과 같은 사고 발생의 잠재 위험성이 클 뿐만 아니라 사고의 영향이 공장내부에만 국한되지 않고, 인근지역에까지 치명적인 영향을 발생시키기도 한다.

특히, 가연성 증기 또는 가스 누출로 인해 발생하는 증기운 폭발은 엄청난 과압을 생성시켜 사고 영향이 매우 크기 때문에 공정 중에 잠재하고 있는 사고의 위험요소를 발굴하여 제거하여야 한다. 이를 위해서는 사고 결과 영향 평가가 선행되어야 한다. 이러한 평가를 수행하기 위해서는 신뢰할만한 예측 도구(Tool)가 필요하다[13]. 현재 여러 가지 사고결과 피해 예측 모델이 제시되어 활용되고 있는 바 이러한 예측 모델(TNT-Equivalency, TNO Hemispherical, TNO Multi-Energy, CFD)이 어느 정도 타당성이 있는지에 대한 검토가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 증기운 폭발 위험성 정량화를 위해 사용된 각 모델을 비교·검토하여 여러 가지 모델의 가정 및 정확성을 알아보고 가장 타당성 있는 모델을 선정하고자 한다.

## 2. 증기운 폭발에 대한 선행 연구 결과 검토

증기운 폭발이 발생했을 때 사고 결과 주위에 미치는 경향에 관한 선행 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

Moen 및 Lee(1982)[1]는 화염전파와 폭발 압력 거동에 대한 장애물 영향을 예측할 수 있는 모델을 제안하였다. 장애물의 영향은 50 m<sup>3</sup> 용기에 장애물을 설치하되 간격과 크기를 변화시키면서 화염전파와 폭발압력의 거동을 측정하여 그 결과를 Bradly 및 Mitcheson이 제시한 단순한 모델 예측과 비교하였고, 장애물 영향에 의한 지배 메커니즘을 규명하였다. 이 모델은 장애물이 존재하는 여러 지역에서의 화염 형태나 연소속도와 같은 물리적 변수들도 고려하였다.

Bakke 및 Hjertager(1987)[2]는 양론적 예혼합 프로판-공기 혼합물에서 화염 가속화에 대한 밀폐 영향을 모사하기 위해 FLACS-ICE 모델을 제안하였다. 그리고 가스 폭발 시 구조물의 기하학적 특성에 대한 점화원 위치와 벤

트 면적 크기의 영향을 측정하였다.

Moen(1989)[3]은 대규모 연료-공기에서 제트 화염시 폭풍으로의 전이에 대한 수학적 모델을 공식화하였다. 실험은 고온 연소생성물과 미연소 혼합물사이에서 난류 혼합정도가 심한 지역에서 폭풍이 개시됨을 나타내었다.

Harris 및 Wikcens(1989)[4]는 증기운 폭발 발생 조건을 평가하기 위한 실험을 수행하였다. 이들의 실험은 증기운 폭발 발생의 가능성과 이로 인한 영향은 다른 일반 탄화수소보다는 천연가스인 경우에 더 낮은 결과를 나타냄을 밝혔으며, 이 결과는 증기운 폭발에 의해 생성된 과압 예측에 대한 기본적인 새로운 방법론을 제시하였다.

Tamanini 및 Chaffee(1990)[5]는 가스 폭발 거동에 대한 난류 영향을 조사하였다. 이들의 결과는 폭발의 격렬성에 있어 난류 강도 증가의 함수로써 연속적인 증가를 나타내었다.

Cates 및 Samuels(1991)[6]은 장애물을 포함하는 vented box에서의 증기운 폭발로 인해 발생한 과압을 예측하기 위한 컴퓨터 기반 모델을 개발하였다. 이 모델은 대부분의 중요한 물리적 프로세스에 대한 설명을 포함하고, 벤트된 증기운 폭발로부터의 위험성을 평가하기 위한 신속한 평가 tool로 사용되어질 수 있다.

Mercx(1992)[7]는 스케일 영향을 조사하기 위해 대규모 실험을 수행하였다. 밀집 지역에서 가스 폭발을 바탕으로 한 대규모 실험에서의 화염속도와 과압은 소규모 실험에서 밝혀진 화염속도와 과압을 초과하였다. 모든 실험에서 발생된 연소 생성물에 대한 초기 벤팅은 결과에 큰 영향을 미쳤다.

Tamnini(1992)[8]는 폭발 거동 예측에 대한 여러 변수들의 영향을 조사하기 위한 모델을 개발하였다. 그의 목적은 벤트되지 않은 가스 폭발 거동에 대한 난류의 영향(performance)을 결정하기 위한 것이었다. 그가 제시한 모델은 많은 변수에 대한 선정, 혼합물 특성 규명, 환경 특성, 밀폐 기하학적 형태 등을 필요로 한다. 이 모델은 벤트되지 않은 가스 폭발에 관한 난류 영향을 모사할 수 있음을 나타내었으나 사용된 연소 모델 적용성의 한계에 대한 여러 의문점이 존재하므로 더욱 더 개선이 요구된다.

Hjertager 등(1992)[9]은 복잡한 밀집 기하학적 형태에서의 가스 폭발에 대한 컴퓨터 모델을 제시하였다. 지배방정식은 quasi-continuum 원리에 의하여 공식화되었다. Hjertager(1982)

모델의 확대를 바탕으로 한 이 모델은 산업 현장의 복잡한 3차원 기하학적 형태에서의 가스 폭발에 사용될 수 있는 porosity/distributed resistance 공식을 사용한다. Hjertager(1993)는 난류 가스 폭발에서 화염과 압력 전개를 예측할 수 있는 수치 시뮬레이션 방법을 개발하였다. 제시된 입증은 여러 연료-공기 혼합물의 범위뿐만 아니라 기하학적 설계를 포함한다. 이 모델은 다음과 같은 사항을 예측할 수 있는 것으로 보고된다.

- 벤트 변수에 따른 최대 압력 변화
- 폭발 맹도(Violence)에 대한 내부 공정 장치의 영향
- 스케일 영향.

Leyer 등(1993)[10]은 증기운 농도, 증기운 형태, 점화원에 의해 방출된 에너지 영향과 같이 연소 영역에 영향을 미칠 수 있는 인자를 조사하였다.

Catlin 등(1993)[11]은 내부 공간이 텅빈 정육면체 및 덕트 형태의 밀폐공간에서의 가스 폭발을 예측할 수 있는 수학적 모델을 공식화하였다. Catlin 등(1995)[12]은 가스 폭발로 인해 발생한 과압을 예측할 수 있는 수학적 모델을 제시하였다. 전파하는 화염의 전방에 발생된 난류는  $\kappa - \epsilon$  모델을 이용하여 모사된다.

### 3. 증기운 폭발 과압 예측 모델 검토

신규 공장을 신설할 때 안전설계를 위한 중요한 자료는 이 설비에 대한 폭발 위험성 평가 결과로부터 제시된다. 이러한 폭발 위험성 평가는 다양한 평가 모델을 이용하여 수행되고 있다[14].

#### 3.1. TNT 등가(Equivalence) 모델

Robinson(1944), Schardin(1954), Glasstone 및 Dolan(1977), Jarrett(1968) 등은 고성능 폭발물에 대한 폭발 영향을 조사하여 폭발물에 대한 폭발 거동을 밝혔으며[15], Formby 및 Wharton(1996)은 증기운에서의 얻어질 수 있는 연소 에너지를 TNT 당량으로 환산하여 피해 영향을 산정하기 위해 다음과 같은 식을 이용할 것을 제안하였다[14,15].

$$W_{TNT} = a_e \frac{W_f H_f}{H_{TNT}} = a_m W_f$$

여기서,  $W_{TNT}$  = TNT 상당량,  $W_f$  = 누출된 가연성 물질 질량(kg),  $H_f$  = 가연성 물질의 순연소열(J/kg),  $H_{TNT}$  = TNT 폭발에너지,  $a_e$  = TNT 폭발효율(에너지),  $a_m$  = TNT 폭발효율(질량).

위 식에서 실험적인 폭발효율은 측정위치에 따라 차이가 난다. 즉 폭발지점 가까이에서 측정된 값보다 멀리 떨어져 측정된 값이 더욱 크다. 그 이유는 TNT의 실험에서 얻은 거리에 따른 압력 감소보다 증기운 폭발에 의하여 발생한 압력감소가 작기 때문이다.

이 식을 활용하기 위해서는 적절한 폭발효율의 산정이 필요하며, 증기운 폭발로부터 폭발 영향은 연소된 물질의 질량뿐만 아니라 증기운의 연소 형태에 의해서도 영향을 받는다.

이에 대해 Brasie 및 Simpson(1968)[15]은 3개의 화학플랜트에서 발생된 폭발 영향 분석을 통해 TNT 폭발효율은 폭발중심에 따른 거리에 상당히 의존하며, TNT 폭발효율이 0.3~0.4% 값으로 관찰되었어도, 인근 거리에서는 2%, 먼 거리에서는 5% 값을 사용할 것을 권장하였다.

Eichler 및 Napadensky(1977)[15]은 폭발에 의해 발생된 피해의 크기는 증기운의 연소 형태에 크게 의존하며, 수송로와 핵발전소 사이의 안전 거리를 결정하기 위한 효율은 20~40% 사이의 TNT 보존값을 사용하도록 권장하였다.

Gugan(1978) 및 Pritchard(1989)[15]는 폭발효율은 누출된 물질의 종류에 따라서 차이가 있으나 누출된 전체 질량의 연소열을 바탕으로 1~10% 값을 사용할 것을 제안하였다. 영국의 HSE(Health & Safety Executive)[15]에서는 증기운내에 존재하는 가연성 물질의 연소열에 대해 TNT 등가의 폭발효율은 3%를 사용할 것을 제안하였다.

Prugh(1987)[15]는 TNT 등가를 바탕으로 한 최대 에너지는 증기운내에 존재하는 가연성 질량에 크게 의존하며, 질량이 100kg인 경우에 효율은 2%, 100,000kg인 경우에는 70%에 이른다고 보고하였다.

Harris 및 Wickens(1989)[15]는 증기운 폭발에 의해 발생된 과압 영향은 단지 누출된 증기운 주변의 밀폐/장애물 지역에서 전개되는 연소에 의해 크게 좌우되며, 밀집/장애물 지역에서의 증기운 폭발이 발생할 경우 폭발효율은 20%를 사용할 것을 제안하였다.

IRI(Industrial Risk Insurers, 1990)[15]에서

는 실제 화학플랜트 증기운 폭발에 대한 TNT 등가 폭발효율은 1~5% 이며, 최대 및 파국적 손실을 산정할 경우 2%를 사용할 것을 제안하였다. FMRC(Factory Mutual Research Corp., 1990)[15]에서는 물질에 따라 폭발효율을 다음과 같이 크게 3가지 형태로 구분하였다; Class I(프로판, 부탄, 가연성 액체와 같은 상대적으로 저 반응성 물질) : 폭발효율 5%, Class II(에틸렌, 디에틸 에테르, 아크로레인과 같은 중반응성 물질) : 폭발효율 10%, Class III(아세틸렌과 같은 고 반응성 물질) : 폭발효율 15%.

이와 같이 제안된 폭발효율 값의 차이는 누출된 물질의 질량의 불확실성과 물질마다 증기운의 연소 형태가 상이하기 때문이다.

TNT 등가 모델은 사용하기 쉽고, TNT와 구조물에 대한 직접적인 경험 관계 때문에 증기운 폭발에 대한 재산 피해 가능성 계산에 잘 이용된다[14,17]. 그러나 인근거리에서는 증기운 폭발과 고성능 폭발물의 폭발 사이에는 커다란 차이가 있기 때문에 인근 거리의 예측에 이 모델의 사용은 제한되어야 하고, 과압 수준이 30kPa 이하인 먼 거리에서의 폭풍 영향 평가에 사용되어야 한다[17].

TNT 등가 모델을 검토한 결과 나타난 주요 단점을 열거하면 다음과 같다.

- 폭발 효율 계수가 명확히 규명되지 않았다.
- TNT와 VCE는 같은 조건에서 최대 정압 및 최대 동압, 과압 및 지속시간 등의 폭풍 특성치가 다르다.
- 증기운 폭발로 인한 실제 과압을 정확히 모사하지 못한다. 폭발 중심으로부터 인근 거리에 미치는 과압은 과대 예측되고, 먼 거리에서의 과압은 과소 예측된다.
- 완전 개방된 장소에는 과압을 발생시키지 않는데 이 모델은 과압을 예측한다.
- 증기운 폭발에 영향을 미치는 혼합정도, 점화원 강도, 점화원 위치와 같은 일부 주요 요소들이 고려되지 않는다.
- 누출된 증기운 주변의 밀폐 정도나 난류는 폭풍 예측에 영향을 미치지 않는다.

### 3.2. TNO Hemispherical 모델

Kogarko(1966)[15]는 연료-공기 혼합물에 대한 폭풍 실험 데이터로 Sachs 환산 그래프를 개발하였다. Wiekema(1980)[15]는 증기운 폭발로 인한 폭풍에 대해 원형으로 팽창하는 피스

톤에 의해 유도된 gas dynamics를 사용하였다.

TNO 모델에서는 반경  $r_0$ (m)를 가진 반구형 증기운내에 존재하는 모든 연소에너지가 폭발에 기여하는 것으로 가정하였다. 대부분의 탄화수소-공기 양론 혼합물의 평균 연소 에너지 밀도  $E_c$ 는  $3.5M/J/m^3$ 이며, 특정 폭발 길이  $L_0$ (m)는 다음 식과 같이 정의된다[18].

$$L_0 = (2/3 \times \pi \times r_0^3 \times E_c / p_0)^{1/3}$$

여기서,  $L_0$  = 특정 폭발 길이(m),  $r_0$  = 반구형 증기운의 반경(m),  $E_c$  = 연소에너지 밀도( $J/m^3$ ),  $p_0$  = 대기압력(Pa).

이 모델은 증기운 폭발로 인한 피해 영향을 다음과 같이 2가지 특성으로 나누어 예측하였다. (1) 증기운 내에 연소 범위 물질의 질량 산정 및 그 폭발의 규모(Blast scale), (2) 물질 특성과 부분 밀폐 또는 장애물 정도 즉 난류 과정, 예혼합 연소에 영향을 미치는 중요한 요소에 의해 구해지는 초기 폭풍 강도로 이루어진다. 또한 물질은 반응성 정도에 따라 3가지로 나누어진다. (1) 암모니아, 매탄, 천연가스, 에틸클로라이드 등과 같은 저 반응성, (2) 프로판, 에탄, 에텐, 프로필렌, 부탄 등과 같은 중반응성, (3) 에틸렌 옥사이드, 아세틸렌과 같은 고 반응성.

이 모델은 점화원 위치, 점화원 강도와 같은 폭발 과정에 영향을 미치는 일부 중요 변수들이 예측되지 않으며, 분석자는 조정 가능한 변수들의 값을 추측해야 한다. 이 모델은 단지 최대 압력에 대한 정보만 제시하지 임펄스, 지속시간 등은 제시하지 않는다.

### 3.3. TNO Multi-Energy(ME) 모델

폭발의 피해 예측은 TNO Multi-Energy(이하 ME라 함) 모델에 의해 크게 진보하였는데 이 모델은 누출된 증기운은 물론 주위의 장애물이나 밀폐 정도의 변수로 피해 정도를 계산하는 모델이다[14,15,17,18]. 즉, 주위 장애물에 의하여 부분적으로 한정된 지역에서는 화염전 파속도가 급속히 가속화되어 이때 발생한 폭발 압력의 상승이 주변에 피해를 입히게 된다. 따라서 ME 모델은 가연성 증기운이 분포해 있는 지역에서의 폭발 중심은 밀집된 구조물이 된다.

밀폐 정도는 Low(3-D 화염 팽창), Medium(2-D

화염 팽창), High(1-D 화염 팽창)의 3가지로, 장애물 크기는 Low, Medium, High로 구분하였다[14,15,17,18].

이 모델에서 압력, 지속시간, 거리는 Sach의 환산법칙을 이용하여 다음과 같은 식으로 무차원화된다[16].

$$\bar{P} = \frac{P - P_0}{P_0}, \quad \bar{R} = \frac{R}{(E/P_0)^{1/3}},$$

$$\bar{t}_* = \frac{t_* \cdot a_0}{(E/P_0)^{1/3}}$$

여기서,  $\bar{P}$  = 대상물(receptor)에서 무차원 과압,  $P$  = 최대 절대압력(Pa),  $P_0$  = 대기압(Pa),  $\bar{R}$  = 대상물(receptor)까지의 무차원 거리,  $R$ 는 폭발중심과 대상물(receptor)사이의 실제 거리(m),  $E$  = 연소에너지(J),  $t_*$  = 무차원 지속시간(양,+),  $a_0$  = 대기 중의 음속(m/s)

ME 모델을 적용할 때는 반구형 모양, 증기운 전체의 양론 농도, 일정한 화염속도 등과 같은 증기운 및 연소 메카니즘에 대한 많은 가정이 필요하다[14]. 밀폐정도, 난류정도, 증기운 형태, 물질의 반응성, 혼합정도, 점화원의 강도, 점화원의 위치 등은 증기운 폭발로 인한 피해 정도에 미치는 중요 변수이다. 그러나 현재 ME 모델은 이러한 것들을 완전히 포함하지 않고 있다. 그리고 ME 모델을 이용하는데 있어서 분석자들은 폭발강도와 같은 변수의 등급을 추측해야 한다. 이것은 TNT 등가 모델의 폭발효율 계수를 추측하는데 생기는 문제점과 유사하다.

### 3.3.1 TNO Multi-Energy 모델 적용에 유용한 지침

증기운 폭발의 피해 예측에서 ME 모델을 적용할 때에는 폭발 강도 선정이 중요한데, 이에 대해서는 여러 가지 논란이 있다. 이에 대해 미국의 화학공정 안전센터(Center for Chemical Process Safety)[18]에서는 TNO에서 제시한 지침을 사용하고 있으며, Kinsella 등[18]은 ME 모델에 대한 그들의 고유한 지침을 개발하였는데 이를 요약하면 다음과 같다.

- CCPS, 1994[18]

매우 밀집된 지역의 초기 폭발 강도는 10으로 하지만, 실제 경험에 의하면 7이 적절하며, 완전 개방된 공간에서는 1, 제트누출에 의하여 난류가 형성하거나, 초기 난류가 있는 경우 3으로 한다.

- Kinsella[18]

Kinsella는 증기운 폭발에 영향을 미치는 가장 중요한 변수로 증기운내에 존재하는 장애물 밀집정도, 점화에너지, 밀폐 정도를 바탕으로 하여 초기 폭발 강도 선정시 다음과 같은 Table 1을 이용할 것을 제시하였다.

### 3.4. TNO Hemispherical과 TNO Multi-Energy 모델 비교

TNO Hemispherical과 TNO ME 모델의 기본적인 차이점은 TNO에서는 가연성 증기운내에 존재하는 모든 연소 에너지가 폭발에 기여한다고 가정한 것이고, TNO ME에서는 가연성 증기운내에 존재하는 단지 일부 에너지만 폭발 생성 압력에 기여한다고 가정한 것이다.

Table 1. Initial blast strength according to the Kinsella[18]

Blast Strength Category	Low Energy Ignition	High Energy Ignition	High Congestion	Low Congestion	No Congestion	Parallel Plane Confinement	ME-Model Class	Source Overpressure (kPa)
1		X	X			X	7-10	100->1000
2		X	X				7-10	100->1000
3	X		X			X	5-7	20-100
4		X		X		X	5-7	20-50
5		X		X			4-6	10-50
6		X			X	X	4-6	10-50
7	X		X				4-5	10-20
8		X			X		4-5	10-20
9	X			X		X	3-5	5-20
10	X			X			2-3	2-5
11	X				X	X	1-2	1-2
12	X				X		1	1

ME 모델의 가정이 증기운 폭발의 물리적 현상과 일치됨이 입증되어도 TNO 모델을 적용시킬 때에 발생하지 않는 다음과 같은 문제점이 나타났다.

- 장애물 존재 지역을 어떻게 정의해야 하는지?
- 증기운내의 여러 장애물 지역의 존재를 어떻게 취급해야 하는지? 여러 장애물 지역을 언제 독립적인 작은 폭발원으로 간주해야 하는지? 그리고 언제 하나의 커다란 폭발원으로 간주해야 하는지?
- 여러 개의 독립적인 폭발원의 경우에 다중 폭풍파를 어떻게 취급해야 하는지?

TNO 모델에서 폭풍 그래프는 폭발 강도에 대한 물질의 반응성과 장애물의 영향을 명확히 분류하였다. 이러한 분류의 결과로써 최대 및 최소 과압은 제한된다. 예를 들어, 증기운 가장 자리에서의 메탄의 폭발은 15kPa보다 높은 과압을 발생시키지 않는다(낮은 반응성 범위의 상류 경계). 장애물 밀집 정도가 높은 지역에서의 메탄 폭발은 이 보다 작은 지역에서의 에틸렌 폭발보다 높은 과압을 발생시킨다. 또한 TNO 모델의 사고결과는 다량의 가연성 증기운이 장애물이 없는 지역에서 발생할 때 폭발 중심으로부터 먼 거리에도 상당한 과압을 발생시킨다.

과압에 대한 물질의 반응성 및 장애물이 존재하는 지역의 영향은 ME 모델의 폭풍 그래프에서는 분류되지 않는다. 이 모델은 장애물 지역의 특성에 의존하여 낮은 반응성 가스는 높은 반응성 가스보다 높은 과압을 발생시킬 수 있다는 사실을 인정한다. 현재 이 모델은 이용할 수 있는 폭발 강도 10개의 등급 중 어느 등급을 사용하느냐에 대한 어려움이 있다. TNO 모델과 비교하면 ME 모델은 반응성보다는 장애물 존재 지역의 영향에 대해 더욱 중점을 두기 때문에 폭발 강도 선정은 TNO 모델의 초기 개시 과압 선정 보다 주관적이다.

이에 제기되는 대부분의 의문사항은 다음과 같다.

- 사용자가 폭발 강도 선정을 어떻게 결정해야 하는지?
- 장애물 지역의 영향으로부터 물질의 반응성 영향의 분류는 가능하나, 각 영향은 어떻게 정량화되어 질 수 있는지?

### 3.5. CFD(Computational Fluid Dynamics) 모델

증기운 폭발을 모사하기 위해 CFD (Computational Fluid Dynamics)를 바탕으로 한 3차원 수치 해석 시뮬레이션의 적용이 최근에 빠르게 개발되고 있다. 이 모델은 비교적 정확성이 높으며, 단순화시키는 과정 없이 상세히 실제의 시나리오를 다루기 때문에 화염속도의 경험적인 결정을 회피할 수 있다. 그러나, 화염 가속화 과정을 비교적 정확히 모사하기 위해 화염과 유동 영역의 난류 상관관계를 정확하게 표현할 수 있는 연소 모델 설정에 아직도 상당한 어려움이 있다. 과거에는 전파되는 화염의 연소속도를 모델링하여 벤트된 부피 또는 개방 공간의 증기운에서의 화염과 압력 전개를 예측하는 것이 일반적이었다. 흐름 방향에 장애물이 없는 규모에서의 축, 원통 또는 구형 전파와 같은 단순한 형태의 화염전파를 가지는 경우에는 이것이 유용한 것이 될 수 있다. 그러나 만일 장애물이 존재할 경우에는 복잡한 기하학을 걸쳐 화염 전면을 찾아내는 것은 어렵다. 이러한 형태에서는 가연성 부피의 다양한 위치에서 연소속도를 계산하여 화염전파를 모사하는 것이 더욱 유용하다. 가스 폭발에 대한 유사 모델은 실질적으로 Kjaldman 및 Huhtanen[20], Marx 등[21], Martin[22] 및 van den Berg[23]에 의해 제안되었다. 위의 모델은 본질적으로 유사하다. 그들은 지배 방정식에 유한 영역(finite-domain) 근사값을 사용한다. 난류 영향은 Launder 및 Spalding[24]의  $k-\epsilon$  모델에 의해 고려되고, 연소속도는 Magnussen 및 Hjertager[25]의 eddy-dissipation 모델에 의해 모델화 된다. Bakke 및 Hjertager 모델은 FLACS(FLame ACceleration) 및 EXSIM(EXplosion SIMulator)이라는 2개의 컴퓨터 코드로 통합된다. 여기에 사용된 해석 모델은 Patankar 및 Spalding[26]의 SIMPLE 기법이다. Kjaldman 및 Huhtanen의 모델은 일반적으로 Spalding의 PHOENICS 코드를 사용한다[27]. 반면에 Marx 등의 모델은 ICE-ALE 해석 기법을 포함하는 CONCHAS-SPRAY 컴퓨터 코드를 사용한다[28]. Van den Berg의 모델은 Hjertager 모델과 유사하고, REAGAS라는 코드로 통합된다. FLARE라는 컴퓨터 코드에 포함된 Martin의 모델은 Boris 및 Book의 FCT(Flux-Corrected Transport)를 사용한다[29].

현재 대부분의 폭발모델은 범용적인 사용보다는 단일 현상 또는 특정한 적용을 나타내기 위하여 특정한 목적을 위해 개발되었기 때문에 사용자는 각 모델의 적용 범위와 사용되어지는 모델의 의도에 어떻게 적용되는지 이해해야 한다.

#### 4. 결 론

1. 현재 증기운 폭발에 대한 대부분의 위험성 평가는 사용상의 편의성 때문에 TNT 등가 모델을 바탕으로 한다. TNT와 구조물 피해 사이의 직접적인 경험적 관계성 때문에 증기운 폭발로 인한 재산 피해가 중요한 관심사항일 경우에 이 모델은 특히 선호된다. 이 모델은 인근거리에서는 증기운 폭발과 고성능 폭발물의 폭발 사이에는 커다란 차이가 있기 때문에 인근 거리의 예측에 이 모델의 사용은 제한되어야 하고, 먼 거리에서의 폭풍 영향 평가에 단지 사용되어져야 한다.

2. Multi-Energy 및 TNO Hemispherical과 같은 다른 접근 모델들은 밀폐 및 부분 밀폐 지역에서의 증기운 폭발에 대하여 사용자 및 그들의 적용성에 의해 인식된 가정과 판단의 정확성에 의해 제한된다.

3. 다양한 평가 모델 중에 가장 효과적인 선정은 전산 유체 역학(Computational Fluid Dynamics) 사용이다. 이 모델은 증기운 폭발에 대한 설계시에 유용하고, 보다 상세한 정보를 제공한다. 화염 가속화 과정을 비교적 정확히 모사하기 위해 화염과 유동 영역의 난류 상관관계를 정확하게 표현할 수 있는 연소 모델 설정에 아직도 상당한 어려움이 있다.

#### 참 고 문 헌

[1] Moen, B. H. and Lee, J. H., "Pressure development due to turbulent flame propagating in large-scale methane air explosion", *Combustion and Flame*, 47 pp. 31-52, 1982.

[2] Bakke, J.R., Hjertager, B.H., "The effect of explosion venting in empty volumes", *Int. Journal of numerical methods in engineering*, 24, pp. 129-14-, 1987.

[3] Moen, I. O., "Transition to detonation in a flame jet", *Combustion and Flame* 75,

pp. 297-308, 1989.

[4] Harris, R.J and Wickens, M. J., "Understanding vapour cloud explosions - an experimental study", *The Institute of Gas Engineers*, pp. 1-28, 1989.

[5] Tamanini, F. and Chaffee, J. L., "Turbulent unvented gas explosions under dynamic mixture injection conditions", *Symposium (Int.) on Combustion/The Combustion Institute*, pp. 851-858, 1990.

[6] Cates, A. and Samuel, B., "A simple assessment methodology for vented explosion", *Journal of Loss Prevention In the Process Industries*, Vol. 4, pp. 287-296, 1991.

[7] Mercx, W. P. M., "Large-scale experimental investigation into vapour cloud explosions: Comparison with the small-scale Discoe Trials", *Process Safety and Environmental Protection*, *Trans. IChemE*, Vol. 70, Part B. pp. 197-204, 1992.

[8] Tamanini, F. and Chaffee, J. L., "Turbulent vented gas explosion with and without acoustically induced instabilities", *twenty-fourth international symposium on combustion/The Combustion Institute*, pp. 1845-1851, 1992.

[9] Hjertager B. H., Solberg T. and Nymoen K. O., "Computer modelling of gas explosion propagation in offshore moulds", *J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol. 5 No. 3, pp. 165-174, 1992.

[10] Leyer, J. C., Desbordes, D., Saint-Cloud, J. P., and Lannoy, A., "Unconfined, deflagrative explosive without turbulence: Experiment and model", *Journal of Hazardous Materials*, 34, pp. 123-150, 1993.

[11] Catlin, C. A., Manos, A. and Tite, J. P., "Mathematical modelling of confined explosions in empty cube and dust shaped enclosures : Effect of scale and Geometry", *Process Safety and Environmental Protection*, *Trans. IChemE*, Vol. 71, Part B, pp. 89-100, 1993.

- [12] Catlin, C. A., Fairweather, M. and Ibrahim, S. S., "Prediction of turbulent, premixed flame propagation in explosion tubes", *Combustion and Flame* 102: pp. 115-128, 1995.
- [13] 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.
- [14] Naser Nehzat, "Gas Explosion Modelling for Complex Geometries", Ph.D. Thesis, University of New South Wales, 1998.
- [15] "Guidelines For Evaluating The Characteristics Of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, And BLEVES", Center For Chemical Process Safety, AIChE, 1994.
- [16] 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.
- [17] A.C. van den Berg and A. Lannoy, "Methods for vapour cloud explosion blast modelling", *Journal of Hazardous Materials*, 34, pp. 151-171, 1993.
- [18] W.P.M. Merx 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.
- [19] Quentin A.Baker, Ming Jun Tang, Ephraim A. Scheier, Gustavo J. Silva., "Vapor Cloud Explosion Analysis", *Process Safety Progress*, Vol. 15, No. 2, pp. 106-109, 1996.
- [20] L. Kjaldman and R. Huhtanen, "Numerical simulation of vapour cloud and dust explosions", *Numerical Simulation of Fluid Flow and Heat/Mass Transfer Processes*, Vol. 18, Lecture Notes in Eng., pp. 148-158, 1986.
- [21] 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.
- [22] D. Martin, "Some calculations using the two-dimensional turbulent combustion code FLARE", SRD Report R373, UK Atomic Energy Authority, Warrington, 1986.
- [23] 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.
- [24] B.E. Launder and D.B. Spalding, "The numerical computational of turbulent flows, *Computer Methods Appl. Mech. Eng.*, 3, pp 269-289, 1974.
- [25] B.F Magnussen and B.H Hjertager, "On the mathematical modelling 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.
- [26] 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.
- [27] D.B. Spalding, "A general purpose computer program for multi-dimensional one and two-phase flow", *Mathematics Computers Simulation*, IMACS, XXII, pp. 267-276, 1981.
- [28] L.C. Cloutman, J.K. Dukowicz, J.D. Ramshaw and A.A. Amsden, "CONCHAS-SPRAY: A computer code for reactive flows with fuel sprays", Los Alamos National Laboratory Report LA-9294-MS, Los Alamos, NM, May 1982.
- [29] J.P. Boris and D.L. Book, "Flux-corrected transport I: Shasta-A fluid transport that works", *J. Comp. Phys.*, 11, 1973.