

## 수치계산을 통한 증기폭발 전파과정 해석

박 익 규 · 박 군 철

서울대학교

방 광 현

포항공과대학교

### 요 약

본 논문에서는 증기폭발의 전파과정을 해석하기 위한 수학적 모델을 제시하였다. 이 모델은 용융물, 용융파편, 그리고 냉각재 기상과 액상 등 4상 유체의 2차원적인 천이거동을 지배방정식 및 관련상관식의 수치적 해를 구함으로써 증기폭발의 전파속도 및 폭발압력 등을 예측할 수 있다. 모델에 사용된 주요 상관식은 용융물 분쇄, 냉각재 상변화, 에너지 교환, 그리고 운동량 교환항으로 구성되어 있다. 냉각재의 상태를 결정하는데 있어서 냉각재의 기상과 액상 사이의 열역학적인 비평형을 허용할 수 있도록 냉각재의 상태방정식을 구성하였다. 주석/물의 증기폭발에 대한 예계계산을 수행한 결과 폭발의 전파속도 및 압력 등에 있어서 합당한 것으로 밝혀졌다. 또한 중요한 초기변수(증기 비율, 용융물 비율) 및 관련상관식에 대한 민감도 분석을 수행함으로써 모델개선을 위한 중요인자를 제시하였다.

### 1. 서론

증기폭발 현상은 열 전달, 상 변환, 압력전파 등 다양한 현상을 내포하고 있으며 그 거동이 2차원적이고 매우 빠른 천이현상이라는 점에서 현상이 매우 복잡하나, 실험적 관측을 통하여 대규모 증기폭발의 경우는 뚜렷이 구분할 수 있는 4단계(혼합단계, 기폭단계, 전파단계, 팽창단계)를 거치는 것으로 알려져 있다[1]. 전파단계는 혼합단계에서 형성된 용융물과 냉각재의 열반응으로 인한 압력의 성장과정을 설명하는 단계로서 수 마이크로미터의 Timescales을 가지고 있으며 복잡한 현상이 관계되고 있어서 현상의 규명이 어렵다. Board-Hall은 BNL에서 실시한 주석-물을 사용한 폭발현상을 관측하고 증기폭발현상을 고전적인 화학적 폭발에 적용할 수 있다고 생각하고, 충격파의 바로 뒷부분에서 용융물과 냉각재가 열적 기계적 평형을 이룬다는 가정 하에 질량, 운동량, 에너지 보존방정식을 사용하여 수학적인 모델을 제시하였다[2]. 이후 Sharon 과 Bankoff[3] 등은 Board-Hall 모델의 단점으로 지적된 충격파 통과시 용융물의 완전분쇄와 완전한 열전달 가정을 해결하기 위해 상대속도에 의한 용융물분쇄 메카니즘을 도입한 정상상태의 모델을 개발하였다. 그러나, 시간에

따른 폭발의 거동을 계산하고 어떠한 조건에서 정상상태의 폭발이 일어날 수 있는지를 결정하기 위하여 천이모델이 개발이 요구된다. Fletcher[4]와 Theofanous[5] 및 Corradini[6] 등은 다장기법을 사용하여 증기폭발의 전파과정을 해석하기 위한 천이모델을 개발한 바 있다.

실제의 증기폭발은 4개의 상(용융물, 용융파편, 액체냉각재, 그리고 증기 냉각재 등)이 서로 다른 속도와 온도를 가지고 있으며, 상간의 열전달, 물질전달 등 복잡한 거동을 지니고 있으나 실험 데이터의 부족과 세부 현상 이해의 부족 등으로 인하여 속도평형, 온도평형 등 적절한 가정을 도입하여 문제를 간략화하는 등 모델들 사이에 차이점을 보여왔다. 본 연구에서는 증기폭발의 전파과정을 해석할 수 있는 모델을 개발하고, 증기폭발 전파모델에 사용되고 있는 관련된 상관식 및 주요 초기조건에 대한 민감도 분석을 수행하여 향후 증기폭발의 세부연구에 대한 활용이 되도록 하였다.

## 2. 본론

모델은 천이상태의 원통형 2차원이다. 충격파면 앞쪽의 혼합체는 구형의 용융물 알갱이가 냉각재와 막비등을 사이에 두고 안정되게 섞여 있다. 이때 혼합체는 정체상태에 있으며 용융물로부터 냉각재의 열전달은 막비등에만 의존되며 상간의 물질전달은 없는 상태이다. 혼합체가 충격파면을 지나게 되면 막비등이 깨어지면서 용융물과 냉각재간에 생성된 상대속도에 의한 용융물분쇄와 열전달이 이루어지면서 압력파가 전파하게 된다. 본 모델에서는 4개의 상(용융물, 냉각재 액상과 기상, 용융파편 ; 각각 하첨자  $f, g, l, db$ )과 2개의 속도장(용융물과 냉각재 ; 각각 하첨자  $f, c$ )을 다루고 있다. 본 모델에 도입된 가정은 다음과 같다.

1. 속도장은 용융물과 냉각재(액상, 기상, 용융파편)의 두 가지로 구성되며 용융파편은 생성 즉시 균질냉각재와 속도평형을 이룬다.
2. 냉각재의 상변화는 국부적으로 열역학적인 평형을 유지하는 방향으로 일어난다.
3. 폭발에 소요되는 시간이 매우 짧으므로 용융물의 온도는 상수로 본다.
4. 냉각재의 온도는 기상과 액상을 따로 추적하며 상변화를 계산한다.
5. 용융파편의 온도는 냉각재의 액상온도와 같으며 냉각재가 모두 기화되었을 경우 냉각재의 기상온도와 평형을 이룬다.

### 2-1. 지배방정식

○ 질량 보존식

$$\frac{\partial \alpha_f \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{u}_f) = -F_r, \quad \frac{\partial \alpha_{db} \rho_{db}}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_{db} \rho_{db} \vec{u}_c) = F_r \quad (1), (2)$$

$$\frac{\partial \alpha_v \rho_v}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{u}_c) = -J_e + J_c \quad , \quad \frac{\partial \alpha_l \rho_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \vec{u}_c) = J_e - J_c \quad (3), (4)$$

○ 운동량 보존식

$$\frac{\partial (\alpha_c \rho_c \vec{u}_c)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_c \rho_c \vec{u}_c \vec{u}_c) = -\alpha_c \nabla P - K(\vec{u}_c - \vec{u}_f) + F_r \vec{u}_f \quad (5)$$

$$\frac{\partial (\alpha_f \rho_f \vec{u}_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{u}_f \vec{u}_f) = -\alpha_f \nabla P + K(\vec{u}_c - \vec{u}_f) - F_r \vec{u}_f \quad (6)$$

여기서,  $\rho_c = (\alpha_l \rho_l + \alpha_v \rho_v + \alpha_{db} \rho_{db}) / \alpha_c$

$$\alpha_c = \alpha_l + \alpha_v + \alpha_{db}$$

○ 에너지 보존식

$$\frac{\partial (\alpha_l \rho_l I_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l I_l \vec{u}_c) + P \left\{ \frac{\partial}{\partial t} \alpha_l + \nabla \cdot [\alpha_l \vec{u}_c] \right\} = -(J_e - J_c) H_v + \delta(\alpha_l) F_r H_f + \delta(\alpha_l) R(T_f - T_l) - R_{vl}(T_l - T_v) \quad (7)$$

$$\frac{\partial (\alpha_v \rho_v I_v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v I_v \vec{u}_c) + P \left\{ \frac{\partial}{\partial t} \alpha_v + \nabla \cdot [\alpha_v \vec{u}_c] \right\} = (J_e - J_c) H_v + [1 - \delta(\alpha_l)] F_r H_f + [1 - \delta(\alpha_l)] R_f(T_f - T_v) + R_{vl}(T_l - T_v) \quad (8)$$

$$T_{db} = \delta(\alpha_l) T_l + [1 - \delta(\alpha_l)] T_v \quad (9)$$

여기서,  $H_f = \left( \frac{P}{\rho_f} + I_f \right)$ ,  $H_v = \left( \frac{P}{\rho_v} + I_v \right)$

$\delta =$  Kronecker Delta

○ 용융물 수송방정식

$$\alpha_f \rho_f \frac{\partial L_f}{\partial t} + \alpha_f \rho_f \vec{u}_f \nabla \cdot L_f = -F_{rag} \quad (L_f = \text{용융물직경}) \quad (10)$$

○ 단위부피당 분율합

$$\alpha_f + \alpha_l + \alpha_v + \alpha_{db} = 1 \quad (11)$$

## 2-2. 관련상관식

○ 용융물과 냉각재간의 열전달식( Convection and Radiation )

$$R_{fc} = n_f (h_r + h_c) 4 \pi r^2 (1 - \epsilon_v) \quad (12)$$

여기서,  $n_f = \frac{3}{4} \frac{(1-\theta)}{\pi r^3}$ ,  $h_r = \sigma \epsilon_f \frac{T_f^4 - T_l^4}{T_f - T_l}$

$$h_c = 2.98(\rho_v k_v [I_{h_v} + 0.68c_{pv}(T_f - T_d)]) * (|\vec{u}_f - \vec{u}_h| / 2r(T_f - T_d))$$

○ 냉각재 기상과 액상간의 열전달식

$$R_{vl} = 0 \sim 10^{11} W/m^2K \quad (13)$$

○ 냉각재와 용융물간의 운동량 교환식( 상대속도에 의한 마찰 + 물질 전달 항)

$$K = \frac{3}{8} \frac{C_D \alpha_f \alpha_c \rho_c |\vec{u}_c - \vec{u}_f|}{r} + \frac{1}{|\vec{u}_c - \vec{u}_f|} \alpha_v \rho_v \left| \frac{d(\vec{u}_c - \vec{u}_f)}{dt} \right| \quad (14)$$

여기서,  $C_D = 2.0$

○ 비등 및 응축의 상변화율식

$$J_e = \frac{\alpha_l \rho_l}{\tau} \left[ \left( \frac{p_s}{p} \right)^{1/\gamma} - 1 \right] \quad J_c = \frac{\alpha_v \rho_v}{\tau} \left[ 1 - \left( \frac{p_s}{p} \right)^{1/\gamma} \right] \quad (15), (16)$$

여기서,  $\tau = 0.1 \sim 10ms$

○ 용융물 분쇄율식( 상대속도에 의한 Boundary Layer Stripping)

$$F_r = c_{frag} \alpha_f |\vec{u}_f - \vec{u}_c| \pi L_f^2 \sqrt{\rho_f \rho_c / L_f} \quad (17)$$

여기서,  $c_{frag} = 1.0$

따라서, 식 (10)의  $F_{mg}$  은  $\frac{1}{3} F_r L_f$ 가 된다.

### 2-3. 상태방정식

용융물 및 용융파편은 비압축성이며 그 밀도는 상수로 본다. 물의 상태는 NBS/NRC의 증기표를 활용하되 현 모델에서 사용되고 있는 비등 및 응축 모델의 특성과 물리적 현상을 고려하여 냉각재의 액상과 기상의 과열 및 과포화 상태를 허용한다.

### 3. 결과 및 토의

본 연구에서 개발된 수치해석코드(TRACER)는 실제 코드는 2-차원적으로 되어 있지만 본 논문에서는 증기폭발 전파 특성의 해석과 실험치와의 비교를 위해 1 차원적 계산을 수행하였다. 각 셀의 크기는 1cm이고 총 계산 영역은 1.5m이다. 초기조건은 표 1에 제시되어 있다. 모든 계산의 시작은 공간적으로 균일한 분포를 가진 혼합체에서 특정 셀에 기폭을 위한 압력(대략 1MPa)을 초기화 한다. 이러한 방법 외에도 특정 셀의 용융물 분쇄율을 정해주는 방법도 있다. 계산의 시간 간격은 10 μm로 하였다.

먼저 그림 1~6까지 표 1의 초기조건(이하 기본조건)을 사용한 계산결과가 제시되어 있는데 그림 1~2는 계산 개시 후 매 1ms마다 압력과 용융분쇄율을 그리고 그림 3~6은 계산 개시 후 5ms(그림 1,2의 5번째 파형과 같은 시각)에서의 속도, 온도, 용융물직경, 그리고 각 상의 분율을 나타내고 있다.

그림 1과 2에서는 폭발이 성장하면서 전파해 나가는 것을 볼 수 있다. 폭발의 최고압력은 8MPa정도이고 폭발의 전파속도가  $\sim 200\text{m/s}$ 임을 알 수 있으며 그 압력진행과 용융물분쇄율이 물리적으로 합당함을 알 수 있다. 그림 3의 속도파형은 그림 1,2와 비교하여 물리적으로 잘 들어맞고 있다. 충격파면 직후에는 냉각재와 용융물의 속도차가 크고 따라서 용융물 분쇄율도 커진다. 충격파면 뒤로 갈 수록 상대속도는 작아지고 용융물분쇄율은 작아지고 속도차가 없는 폭발후방에서는 용융물의 분쇄는 없다. 그림 4의 온도파형은 냉각재가 기상과 액상간에 열적 평형을 보여주지는 못하지만 그 상태는 열적 평형 상태로 가고 있음을 알 수 있다. 그림 5에는 용융물의 반경을 보여주고 있는데 그 값은 충격파면에서부터 감소함을 알 수 있으며 팽창지역에서는 변화가 없음을 알 수 있다. 그림 6에 주어진 각 상의 분율은 충격파면 앞에서는 모두 초기 값을 유지하고 있으며, 충격파면을 지나면서 그 값은 압축, 상변화, 그리고 분쇄를 거치면서 변하다가 팽창지역에서는 변화가 없다.

표 1(B)는 Baines[7]의 실험을 수치적으로 계산하고자 하는 초기조건이다. 계산 결과 최고압력은 3MPa이며 전파속도는  $100\text{ m/s}$ 로 나타났다. 실험결과와 값(5MPa,  $100\text{m/s}$ )과는 다소 차이를 보이고 있는데, 이는 초기변수(각상의 분율, 기폭)에 불확실성이 있기 때문으로 보인다. 특히, Baines실험의 기폭은 찬 냉각제로의 용융물주입으로 인한 용융물 분쇄로 인한 것인데 이 초기 분쇄를 정량화하기는 어렵다.

표 1(A)의 기본조건에서 각 변수를 바꾸어가면서 계산을 수행하여 폭발최고압력과 전파속도에 대한 그 영향을 고려하여 민감도를 제시하였다. 이들 민감도 분석인자는 각각 증기분율 ( $\epsilon_v$ ), 용융물분율 ( $\alpha_f$ ), 냉각재의 기상과 액상과의 열전달계수 ( $R_{vl}$ ), 상변화 완화 계수 ( $\tau$ ), 용융물 분쇄율 계수 ( $C_{frag}$ ), 그리고 냉각재와 용융물간의 마찰계수 ( $C_D$ )으로 구성되어 있다. 증기분율이 커지는 것은 매질의 압축성이 커지는 것을 의미한다. 따라서 충격파면에서 압축의 효과는 상대적으로 냉각재의 빠른 유동을 유도하면 따라서 용융물분쇄도 커지는 반면 냉각재의 큰 압축으로 인하여 폭발의 진행속도를 느려지고 폭발력도 약하게 된다. 용융물분율은 클수록 폭발력은 커질 것이다. 용융물분쇄식 상수의 영향은 다른 어떤 계수보다도 컸다. 이 계수의 증가로 폭발력, 진행속도, 분쇄율은 모두 증가하고 있다. 냉각재간의 열전달 계수는 폭발현상에는 큰 영향을 미치지 않으나 적절한 값을 벗어났을 경우 폭발 현상이 없거나, 계수치계산에 영향을 미친다. 상변화 계수 역시 폭발력에는 큰 영향을 보이지는 않지만 적절한 값을 사용하여야 할 것이다. 마찰계수는 용융물의 분쇄가 상대속도에 의한 것이어서 그 값이 커지면 용융물 분쇄를 줄여 폭발력은 작아지고 그 전파도 느려짐을 알 수 있었다. 이들의 민감도는 향후 증기폭발의 연구의 지표로 삼을 수 있을 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서 증기폭발 전파해석을 위한 수치 모델을 개발하고 예제를 통하여 주요 초기 조건 및 관련된 상관 방정식들의 영향을 고찰하였다. 기포분율과 용융물분율 등 혼합체의 초기조건에 따른 영향들은 대체로 기존의 해석 결과들과 일치된 경향을 보였다. 그리고 상관식들에 대한 고찰로 이들의 상관식의 사용은 상태방정식 및 상호 간에도 밀접한 관계가 있으며, 증기폭발의 거동의 세세한 면에 대한 이해가 전제됨을 알 수 있었다. 특히 증기폭발에 있어서 충격파 근처의 냉각재의 상태 결정은 해의 안전성에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 또한, 본 모델은 앞으로도 계속 증기폭발 실험결과와의 비교분석, 관련 상관식 개선 등을 통하여 보완되어야 할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 기초전력공학공동연구소(Electrical Engineering and Science Research Institute : EESRI)를 통하여 한국전력공사(Korean Electric Power Co. : KEPCO)의 지원하에 수행되고 있다.

#### 참고문헌

1. M.L.Corradini, B.J.Kim and M.D.Oh, "Vapour Explosions in Light water Reactors: a Review of Theory and Modelling," Prog. Nucl. Energy, 22, 1-117, (1988).
2. S.J.Board, R.W.Hall and R.S.Hall, "Detonation of Fuel Coolant Explosions," Nature, 254, 319-321, (1975).
3. A.Sharon and S.G.Bankoff, "On the Existence of Steady Supercritical Plane Thermal Explosions," Int. J. Heat Mass Transfer, 24, 1561-1572, (1981).
4. D.F.Fletcher, "An Improved Mathematical Model of Melt/Water Detonations-I. Model Formulation and Example Results," Int. J. Heat Mass Transfer, 34, 2435-2448, (1991).
5. S.Medhkar, M.Abolfadl and T.G.Theofanous, "Triggering and Propagation of Steam Explosions," Nucl. Eng. and Design 126, 41-49, (1991).
6. J.Tang and M.L.Corradini, "Modeling of the Complete Process of One-dimensional Vapor Explosion," CSNI, Santa Babara, Jan., (1993).
7. M.Baines, "Preliminary measurements of Steam Explosions Work Yields in a Constrained System," Proc. 1st UK National Heat Transfer Conf., Leeds, UK, (1984).

표 1. 초기조건

System	Tin/ Water (A)	Tin/ Water (B)
Pressure(MPa)	0.1	0.1
Fuel Temp. (K)	1123	1123
Water Temp. (K)	373	373
Fuel Fraction	0.4	0.2
Void Fraction	0.1	0.2
Fuel Radius(m)	.005	.005
Time Step( $\mu$ s)	10.	10.
$\tau$ (msec)	1.0	1.0
$C_{frag}$	1.0	1.0
$C_D$	2.0	2.0
$R_{vl}(Wm^{-2}K^{-1})$	0.0	0.0

표 2. 주요 변수에 대한 민감도 분석 결과

Variable	Input Value	$P_{peak}$ (MPa)	$\bar{V}_{prop}$ (m/sec)	Sensitive Order
$\epsilon_v$	0.1 $\pm$ 100%	8 $\pm$ 15 %	200 $\pm$ 40 %	2
$\alpha_f$	0.3 $\pm$ 100%	8 $\pm$ N %	200 $\pm$ N %	1'
$C_{frag}$	1.0 $\pm$ 100%	6 $\pm$ 150%	200 $\pm$ 150%	1
$R_{vl}$	10 <sup>3</sup> $\pm$ 100%	10 $\pm$ 25 %	200 $\pm$ 0 %	6
$\tau$	1.0 $\pm$ 100%	8 $\pm$ 15 %	200 $\pm$ 0 %	7
$C_D$	2.0 $\pm$ 100%	8 $\pm$ 25 %	200 $\pm$ 25 %	3

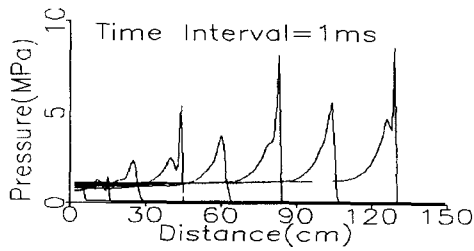


그림 1. 압력 vs. 시간

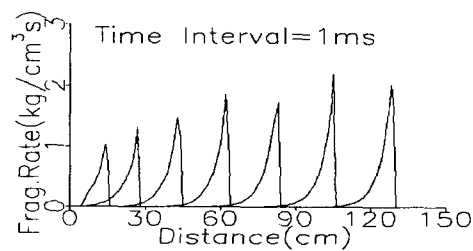


그림 2. 용융분쇄율 vs. 시간

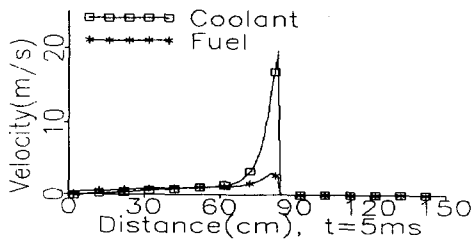


그림 3. 속도 vs. 거리(t=5ms)

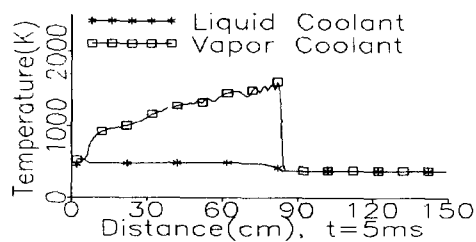


그림 4. 온도 vs. 거리(t=5ms)

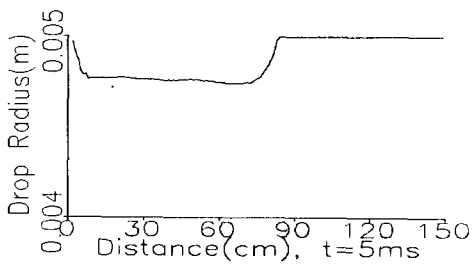


그림 5. 용융반경 vs. 거리(t=5ms)

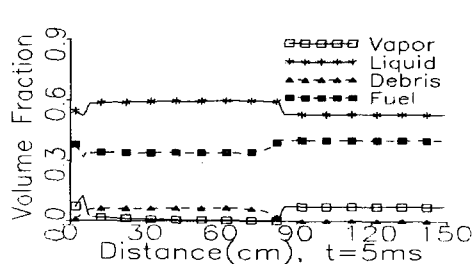


그림 6. 각상의 분율 vs. 거리(t=5ms)