

2001 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

중합전산코드용 증기폭발 하중 예측 모듈 개발- I. 방법론 및 예제계산

Module Development for Steam Explosion Load Estimation- I. Methodology and Sample Calculation

박익규, 김동하, 송진호

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자력발전소 중대사고 해석용 종합코드에 적용할 증기폭발 하중예측 모듈개발 방법론을 제시하고, 방법론에 따른 예제계산을 실시하였다. 모듈개발의 1단계로서 증기폭발 상세 해석 도구 및 해석능력을 확보하기 위해 먼저 증기폭발 상세 해석코드인 TEXAS-V에 대해 논하였고, 원자로공동에서의 증기폭발의 특성을 분석하기 위해 TEXAS-V를 이용한 예제를 개발하였다. 이 예제 계산을 통하여 원자로공동에서의 증기폭발 현상을 분석하였고 증기폭발 해석에 영향을 미칠 수 있는 격자 개수, 격자 단면적(반응 단면적), 혼합 완료조건, 그리고 기폭력에 대한 민감도 분석도 실시하였다. 직경 0.15m인 용융물 제트가 9m/s의 초기속도로 투입되어 0.74초에 947kg의 용융물이 1기압, 363K, 1.1m 깊이의 냉각수에 투입되었고 이 중에서 총 투입된 용융물의 20%인 197kg이 냉각수와 혼합되었다. 폭발의 최고 압력과 전파속도는 각각 40MPa, 1500m/s에 이르고 냉각수에 투입된 용융물만을 고려한 폭발의 에너지변환비는 2%로 나타났다. 폭발은 일단 기폭이 된다면 그 기폭력의 크기가 폭발력에 미치는 영향은 없는 것으로 나타났으나, 격자개수, 격자단면적, 그리고 혼합완료조건은 폭발력 예측에 영향을 주는 것으로 밝혀졌다. 이는 이 인자들이 혼합체의 구성에 영향을 미치기 때문이며 이에 대한 추가적인 분석이 요구된다.

Abstract

A methodology has been suggested to develop a module, which is able to estimate the steam explosion load under the integral code structure. As the first step of module development,

TEXAS-V, which is a one-dimensional mechanistic code for steam explosion analysis, was selected and sample calculations were done. At this stage, the characteristics of the TEXAS-V code was identified and the analysis capability was setup. A sensitivity study was also performed on the uncertain code parameters such as mesh number, mesh cross-sectional area, mixing completion condition, and triggering magnitude. The melt jet with the diameter of 0.15m and the velocity of 9m/s was poured into the water at 1 atm, 363K, and 1.1 m depth during 0.74 sec. 197kg of melt was mixed with the water among the total of 947kg. The explosion peak pressure, propagation speed, and conversion ratio considering the mixed melt, were evaluated as 40MPa, 1500m/s, and 2%, respectively. The triggering magnitude did not show any effect on the explosion strength once the explosion would be started. The explosion violence was sensitive to the mesh number, mesh area, and mixing completion condition, mainly because the mixture condition is dependent upon these parameters. The additional study on these parameters needs to be done.

## 1. 서론

MELCOR는 원자력발전소 중대사고 모델링 및 분석도구로서 사용되는 대표적인 전산코드로서 이를 이용하여 모든 원자로용기 내외의 중요한 모든 시스템을 동시간에 해석할 수 있으며 광범위한 민감도 및 불확실성 분석을 수행할 수 있다. 또한, 이 코드는 사고평가를 위해 빠른 계산수행 능력을 가지고 있으며 거의 모든 시스템이 모듈로 구성되어 있어서 유지보수 및 모델개선이 용이하다. MELCOR는 사고평가를 위한 전산코드로서 사고진행경위 개개의 물리적인 현상에 대한 자세한 이해보다는 개개의 사고경위가 하나의 사고시나리오에 미치는 영향을 모사하고 있다. 용융물과 냉각수 반응과 같은 개별 현상에서 대해서는 자세한 열수력적 거동은 배제되어 있으며 물리적으로 합리성을 유지하며 최대한 간략하게 표현하고 있다. 이렇게 용융물과 냉각수의 반응과정이 간략하게 표현되어 있기 때문에 이 반응으로 인한 수증기발생, 수소발생, 그리고 증기폭발의 영향평가가 어렵다는 것이다.

특히, 용융물과 냉각수 반응으로 인한 증기폭발 평가는 보류되고 있다. 지난 수십 년간의 노력으로 원자로용기 상반구가 발사되는 알파 모드 사고 가능성은 배제되고 있으나, 증기폭발로 인한 원자로용기 하반구의 조기파손 및 원자로공동 벽의 파손의 가능성을 완전히 배제하기는 어렵다. 원자로용기 하반구 혹은 원자로공동 벽의 파손은 방사선원향 거동에 있어서 영향이 크기 때문에 중대사고 평가 종합코드에 증기폭발 모듈의 추가가 요구된다. 증기폭발 현상이 매우 복잡한 물리적 현상들로 이루어져 있기 때문에 간단한 상관식의 형태로서 이를 해석하는 것은 매우 어렵다. 본 연구에서는 기존에 개발된 증기폭발 상세 해석 코드의 결과를 도표화하여 다항식 보간법을 사용 MELCOR 코드에 적용하고자 한다.

본 논문에서는 증기폭발 모듈 개발 방법론을 제시하고 그 1 단계로서 증기폭발 상세 해석 도구 및 해석 능력 확보를 위해 상세 해석 코드로 선정된 TEXAS-V 코드의 특성을 파악하고 원자로 공동에서의 증기폭발 예제 계산을 수행하였다. 이 예제 계산을 통하여 원자로공동에서의 증기폭발 특성을 분석하였고, 증기폭발 해석에 영향을 미칠 수 있는 격자 개수, 격자 단면적(반응 단면적), 혼합 완료조건, 그리고 기폭력에 대한 민감도 분석도 실시하였다. 4개의 불확실한 인자에 대한 민감도 분석 결과 기폭력은 증기폭발 예측에 큰 영향이 없는 것으로 판단되었다. 그러나, 격자개수, 격자단면적, 그리고 혼합완료조건은 폭발력 예측에 영향을 주는 것으로 밝혀졌으며 이에 대한 체계적인 분석이 요구된다.

## 2. 증기폭발 모듈 개발 방법론

종합코드에 개별적인 현상모델을 추가하는 방법은 상세 해석코드 병합과 물리적으로 합당성을 유지한 간단한 모델 삽입 등 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 증기폭발 해석코드들의 수치적 어려움을 감안할 때 많은 횡수의 계산을 수행해야하는 사고평가코드인 MELCOR코드의 특성을 살리기 위해서는 최대한 간단한 모듈개발이 합리적이라 판단된다. 그 동안 많은 증기폭발 실험이 수행되었으나 대부분이 코롬이 아닌 상사물질로 수행된 것들이고 코롬에 대한 폭발 실험 데이터는 전무한 형편이다. 따라서 실험 데이터를 취합한 실험 상관식을 활용하는 것은 불가능하기 때문에 증기폭발을 해석할 수 있는 해석 모델을 활용하는 것이 타당하다.

증기폭발을 해석하기 위하여 폭발전후의 질량과 에너지 보존만을 고려하는 열역학적 모델을 위시하여 용융물과 냉각수의 접촉부터 폭발까지 각상에 대한 보존방정식을 수치적으로 해석하려는 다상 유동 모델까지 많은 모델들이 개발되었다. 종합코드에 직접 적용 가능한 열역학적 모델은 폭발의 최대 혹은 최소 에너지만을 계산해낼 수 있다는 단점이 있으며, 냉각수와 용융물의 열수력적 조건을 적용하는데 어려움이 있다. 다상 유동 전산모델은 증기폭발의 혼합과 폭발을 적절히 모사할 수 있지만 경계조건 및 초기조건의 병합문제, 수치적 어려움 등 때문에 직접 종합코드에 적용하는 데는 한계가 있다.

본 연구에서는 비교적 현실적인 증기폭발력을 계산할 수 있는 증기폭발 전산코드를 활용하여 냉각수와 용융물의 중요한 열수력인자를 선택하고 이들 값들의 상하한을 부여하여 증기폭발 압력 및 충격량을 계산하여 도표화하고자 한다. 중대사고 해석 종합코드에서는 이 도표와 다항식 보간법을 사용하여 종합코드 중간계산과정으로 도출된 냉각수와 용융물의 열수력 인자에 해당하는 증기폭발 압력 및 충격량을 계산하고자 한다. 증기폭발 모듈을 개발하는 흐름을 정리하면 그림 1과 3 단계로 나눌 수 있다.

먼저, 증기폭발 상세 해석 도구 및 해석능력 확보를 하는 단계로서 반응 단면적, 혼합완료조건(기폭시점), 격자 개수 등 코드관련 변수 및 초기 열수력 인자를 열거하고 민감도 분석을 통하여 코드관련 변수를 고정한다. 제 2 단계는 상세 해석 코드의 계산결과를 이용하여 보간식 적용성을

판단하는 하고 열수력 변수를 선정하 뒤 그 상하한을 설정한다. 마지막으로 선정된 열수력 조건의 상하한 내에서 폭발압력 및 충격량 계산하고 이를 다항식 보간법을 사용하여 폭발압력 및 충격량 계산 모듈개발을 완료한다.

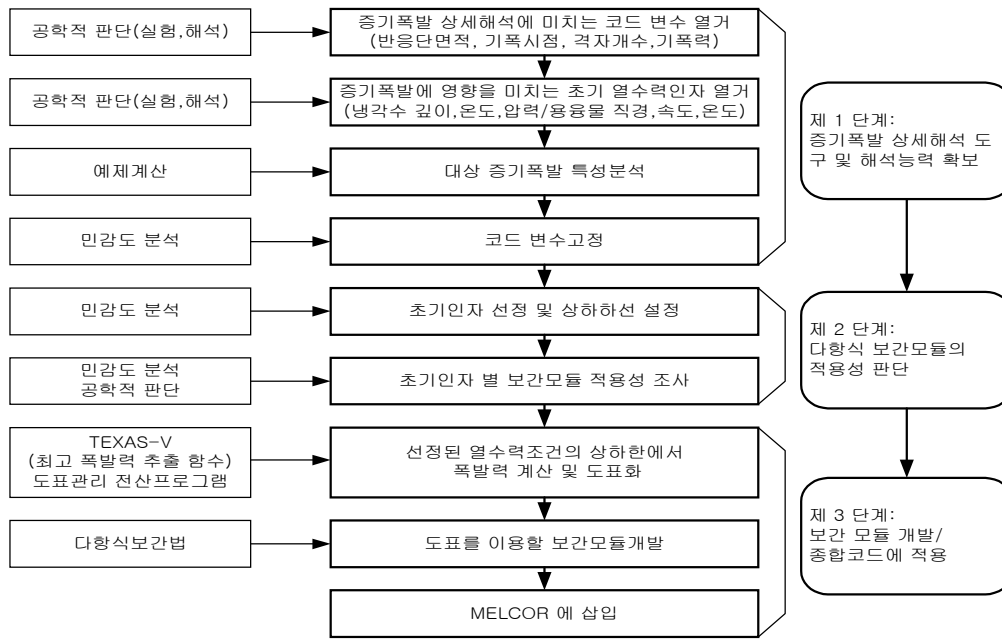


그림 1. MELCOR를 위한 증기폭발 해석모델 개발계획

만약 증기폭발력에 영향을 미치는 중요한 두 인자를 변수  $x, y$ 로 선택한다면 각 값의 상하한( $x_1, x_K$ ), ( $y_1, y_L$ )에서 증기폭발 압력 및 충격량을 상세 해석 코드를 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_{peak} \text{ or } I &= f(x_1, y_1), P_{peak} \text{ or } I = f(x_2, y_1), \dots, P_{peak} \text{ or } I = f(x_K, y_1) \\
 P_{peak} \text{ or } I &= f(x_1, y_2), P_{peak} \text{ or } I = f(x_2, y_2), \dots, P_{peak} \text{ or } I = f(x_K, y_2) \\
 &\dots \\
 P_{peak} \text{ or } I &= f(x_1, y_L), P_{peak} \text{ or } I = f(x_2, y_L), \dots, P_{peak} \text{ or } I = f(x_K, y_L)
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서,  $x, y$ 는 냉각수 또는 용융물의 열수력적 조건이며 다음 Lagrangian 보간법을 사용하여 주어진 점 외에서의 압력 또는 충격량을 계산할 수 있다.

$$f(x, y) = \sum_{l=0}^L \delta_{L,l}(y) \left\{ \sum_{k=0}^K \delta_{K,k}(x) f(x_k, y_l) \right\} \tag{2}$$

여기서,  $\delta$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\delta_{K,k}(x) = \prod_{i=0, i \neq k}^K \frac{x - x_i}{x_k - x_i}, \quad \delta_{L,l}(y) = \prod_{i=0, i \neq l}^L \frac{y - y_i}{y_l - y_i} \tag{3}$$

다항식 보간법을 사용하여 좀더 정확한 근사치를 얻기 위해서는 보간점을 추가하거나, Lagrangian 보간법의 단점을 보완할 수 있는 여러 가지 보간법이 있으니 만약 선택사용이 가능할

것이다. 이러한 방법으로 증기폭발 모듈을 개발하기 위해서는 다양한 열수력 조건에 따라 증기폭발을 계산해 낼 수 있는 안정적인 증기폭발 상세 해석 코드가 필요하다. 증기폭발 해석을 위한 다상유동 전산모델에는 IFCI [Young., 1987], TEXAS-V [Corradini et al., 1997], PM-ALPHA&ESPROSE.m [Theofanous et al., 1995], 그리고 TRACER-II [Park et al., 2000] 등이 있다. TEXAS-V 는 혼합과 폭발을 1차원적으로 해석할 수 있는 전산코드로서 KROTOS 및 FARO 실험[Magallon et al. 1995, 1997] 분석을 통해 그 타당성이 입증되었으며, 여러 미국 발전소의 안전성 분석에 적용된 바 있다. 본 연구에서는 TEXAS-V 코드를 상세 해석 코드로 선택하여 증기폭발 모듈을 개발하고자 한다.

### 3. TEXAS-V 코드

TEXAS-V 코드는 냉각수 기상과 액상은 Eulerian으로 처리하고 있으나, 용융물은 Lagrangian 입자로 처리하고 있어서 용융물의 동력학적인 파쇄거동을 현실적으로 모사할 수 있다는 장점이 있다. TEXAS-V 코드의 수력학적 파쇄 모델은 용융물 제트가 냉각수로 침투하여 혼합되는 단계에서 일어날 수 있는 수력학적인 현상인 Rayleigh-Taylor instabilities (RTI), Kelvin-Helmholtz instabilities (KHI), boundary layer stripping (BLS)의 세 가지 형태를 고려하고 있다. 그림 1에서와 같이 TEXAS-V에서는 용융물 제트의 옆면에서는 주로 KHI에 의해서, 용융물 제트의 침투 부분에서는 주로 BLS에 의해서 용융물 제트가 쪼개져 자유 용융물 입자가 생성된다. 여기서 생성된 자유 용융물 입자는 RTI에 의해서 더 작은 용융물 입자로 파쇄된다. 코드 내부적으로는 모든 용융물은 직경을 가진 입자의 형태이며 단지 그 입자의 FLAG에 의해 사용될 파쇄모델이 정해진다.

RTI는 수직방향으로 움직이는 두 유체간에 형성되며 기본적인 모델로 특성길이가 짧으며 입자화된 용융물에 적용된다. 용융물입자가 RTI에 의해 쪼개지는 경우 입자의 크기는 다음 식으로 예측할 수 있다.

$$D^{n+1} = D^n(1 - C_0 \Delta T^+ We^{0.25}) \quad (4)$$

여기서,  $n$ 과  $n+1$ 은 각각 이전 그리고 다음 time step을 나타내며,  $\Delta T^+$  ( $= u_r(t^{n+1} - t^n)/D_f^n \cdot (\rho_c/\rho_f)^{1/2}$ )는 무차원 시간 간격변수,  $We$  ( $= (\rho_c u_r^2 D_f^n)/\sigma_f$ )는 상대속도에 의해 계산되는 무차원 변수, 그리고 상수인  $C_0$  ( $= 0.1093 - 0.0785(\rho_c/\rho_f)^{1/2}$ )는 이론적인 모델로부터 도출되는 상수로 실험 값을 사용한다.  $u_r$ 은 상대속도,  $D_f$ 는 용융물 입자의 직경, 그리고  $\rho_f$ 와  $\rho_c$ 는 용융물과 냉각수의 밀도를 나타낸다.

KHI는 수평방향으로 움직이는 두 유체간에 형성되며, 특성길이가 길어 용융물 제트의 본체의 파쇄에 중요한 원인으로 작용한다. 증기분율 0.2를 기준으로 하여 0.2보다 작은 경우는 얇은 막비등을 가정하고 그 이상일 경우는 두꺼운 막비등을 가정하였다. 얇은 막비등일 경우 냉각수에 의해서만 용융물체트가 KHI에 의해 파쇄되며, 두꺼운 막비등일 경우에는 냉각수 및 수증기 모두에 의해

파쇄된다고 가정하였다. KHI로 인해 파쇄되는 질량 비율은 다음 식으로 결정된다.

$$\frac{dm_{KH}}{dt} = C_0 A \rho_f n_{\max} \lambda_{\max} \quad (5)$$

여기서,  $C_0$ 는 실험에 의해서 결정되는 상수(0.01),  $A$ 는 용융물 제트의 표면적,  $\rho_f$ 는 용융물의 밀도,  $n_{\max}$ 는 불안정과 성장률(1/sec), 그리고  $\lambda_{\max}$ 는 불안정과 최대파장(m)이다.

BLS는 용융물 제트가 냉각수와 직접적으로 접촉할 때 발생하는 동압과 전단력에 의해 용융물 제트의 첨두 부분에서 용융물 표면층이 주위의 냉각수에 의해 제트본체와 분리되는 현상을 고려하여 이에 의한 침식율이 다음 식으로 주어진다.

$$\frac{dm_{BL}}{dt} = \rho_f \int 2\pi u r dr \quad \text{at } R \text{ over region} \quad (6)$$

여기서,  $R$ 은 용융물 제트의 반지름,  $\delta (= 0.5\sqrt{4\nu_f/u_0}\sqrt{\pi R})$ 는 용융물 운동량 경계 두께, 그리고  $u (= u_0 \exp(-y/\delta))$ 는 경계층 내부 속도로서, 여기서 다시  $u_0$ 는 용융물 첨두(leading edge)의 경계층 바깥면에서 용융물 속도이며,  $\nu_f$ 는 용융물 입자의 동적 점성(kinematic viscosity)이다.

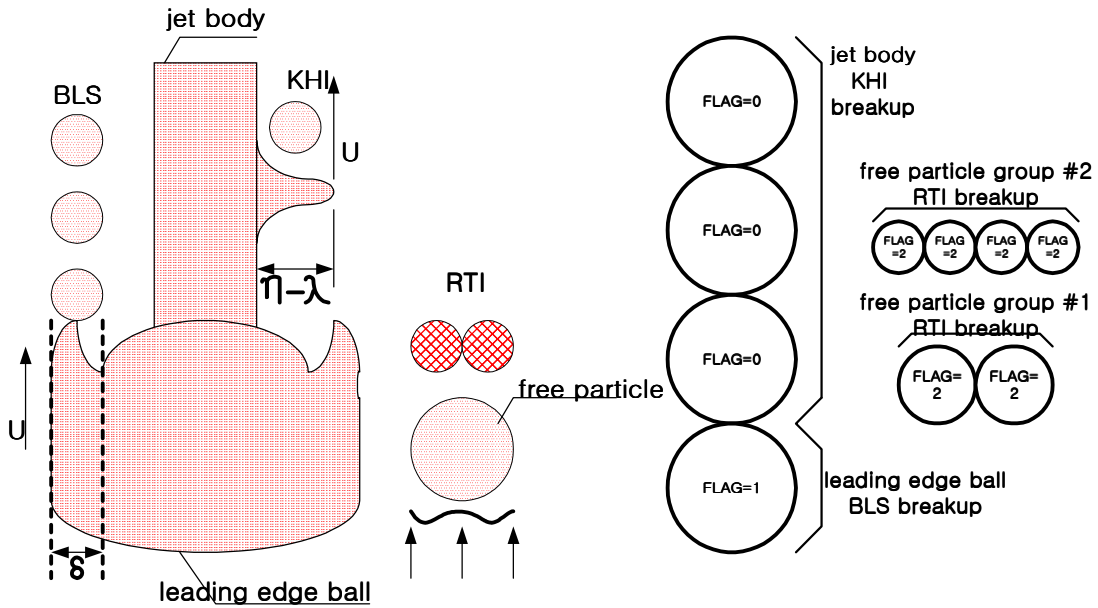


그림 2. TEXAS-V 코드의 제트파쇄 개념 및 코드내부의 처리개념

TEXAS 코드의 전과단계 분쇄모델은 수력학적인 효과와 열적인 효과를 고려한 막비등 붕괴 및 냉각수의 용융물 투입에 의한 용융물분쇄 과정을 가정하여 중요한 인자인 용융물의 표면적과 국부압력 등을 이용하여 반경험적(semi-empirical)모델을 이용하였다.

$$\dot{m}_f \sim C_{ff} \rho_f A \pi R_b^2 N_b \left( \frac{P - P_{th}}{\rho_c R_b^2} \right)^{0.5} F(\alpha) g(\tau) \quad (7)$$

여기서,  $m_f$ 는 용융물 분쇄율,  $C_{ff}(=0.002)$  열적 분쇄의 경험상수,  $\rho_f$ 는 용융물의 밀도,  $R_b$ 는 용융물 입자의 반경,  $N_b$ 는 용융물 입자 개수,  $P$ 는 국부압력,  $P_{th}$ 는 증기막 붕괴 문턱압력,  $\rho_c$ 는 냉각수 밀도,  $F(\alpha)$ 는 냉각수 증기 분율에 대한 보상계수, 그리고  $g(\tau)$ 는 용융물 분쇄시간 계수 등이다.  $P_{th}$ 는 냉각수 대기압력이 0.1MPa일 때 문턱압력은 0.2 ~ 0.4MPa인 것으로 알려졌으며 TEXAS 코드에는 0.2MPa이 제안되었다. 기저압력이 0.1 ~ 0.75MPa의 범위를 가질 때 용융물 분쇄가 일어나는 특성시간  $\tau$ 는 2 ~ 4ms로 나타났으며, TEXAS 코드에서는 특성시간 동안  $g(\tau) = 1$ 이며, 특성시간이 지나면  $g(\tau) = 0$ 이다.

#### 4. 원자로공동에서의 증기폭발 예제 해석

TEXAS-V 코드는 1 차원 코드이기 때문에 실제 원자력발전소의 증기폭발에 적용하는데 있어 반응단면적(격자단면적)을 정의하는 것이 매우 중요하다. 단면적이 큰 냉각수에 용융물이 낙하할 때 용융물은 용융물의 위치로부터 근접한 국부적인 냉각수와만 반응을 하기 때문에 원자로공동에서의 용융물 냉각수 반응처럼 용융물 제트직경에 대한 냉각수직경 비가 매우 큰 경우 물리적으로 합당한 계산결과를 줄 수가 없다.

따라서, TEXAS-V를 이용하여 원자력발전소 증기폭발을 모사하기 위해서는 물리적으로 합당한 반응 단면적을 제시할 필요가 있다. 또 하나는 기폭시점의 선정이 증기폭발력에 매우 큰 영향을 미친다는 점이다. 만약 냉각수의 과냉각도가 매우 커서 혼합과정시 증기 발생량이 억제된다면 용융물이 바닥까지 충분히 도달하였을 때 기폭이 발생하는 것이 증기폭발력은 크고, 만약 냉각수의 과냉각도가 작을 때 기폭시점이 늦는다면 과도한 증기발생으로 증기폭발력은 현저히 낮게 평가될 것이다. 본 장에서는 원자로공동에서의 증기폭발 예제 계산 결과와 증기폭발에 계산에 영향을 줄 것으로 판단되는 코드변수 격자 개수, 격자 단면적, 기폭 시점(혼합완료 조건), 기폭력 등에 대한 민감도 분석 결과가 제시될 것이다.

##### 4.1. 원자로공동에서 증기폭발 계산을 위한 문제의 정의

원자로공동에서의 증기폭발은 그림 3에서와 같이 노심용융물이 원자로용기 하반구에 쌓였다가 관통부가 파손되면서 원자로공동으로 낙하함에 의해서 발생된다. 이때 노심용융물 및 냉각수의 열수력적 조건은 증기폭발 현상을 분석하는데 주요한 초기인자가 되며 본 연구에서는 표 1과 같은 조건을 가정하여 TEXAS-V코드의 입력자료를 준비하는데 이용하고자 한다.

또한, 증기폭발 기폭의 시점은 매우 불확실하며 증기폭발력을 결정짓는 중요한 요소가 될 수 있

다. 본 연구에서는 용융물제트가 원자로공동의 바닥에 닿았을 경우에 기폭이 된다고 가정하였으며, 추후 기폭시점에 대한 추가적인 분석도 수행할 예정이다. 반응부의 단면적은 FARO실험 [Magallon, et al. 1995]의 제트직경에 대한 반응용기 직경비 7의 3배에 해당하는 값이다.

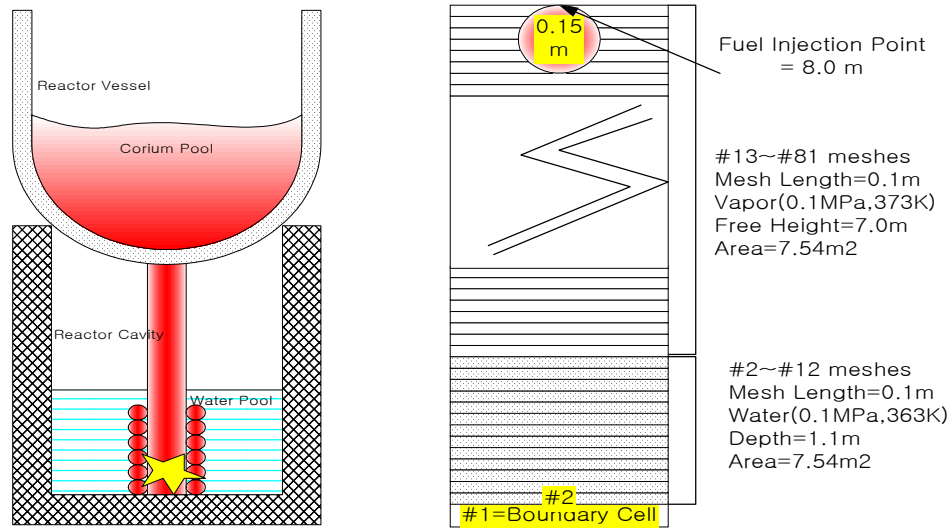


그림 3. 원자로공동 증기폭발 개념도 및 TEXAS-V 격자배열

표 1. 원자로공동 증기폭발시 예상되는 열수력적 조건

| Component    | Property                    | Results |
|--------------|-----------------------------|---------|
| Melt         | Jet diameter(m)             | 0.15    |
|              | Jet Velocity(m/s)           | 9.0     |
|              | Temperature(K)              | 2800.   |
|              | Melting Temp.(K)            | 2700.   |
|              | Density(kg/m <sup>3</sup> ) | 8000.   |
|              | Specific heat(J/kgK)        | 565.    |
| Water        | Pressure(MPa)               | 0.1     |
|              | Temperature(K)              | 363     |
|              | Depth(m)                    | 1.1     |
| Test Section | Height(m)                   | 8       |
|              | Area(m <sup>2</sup> )       | 7.54    |

#### 4.2. 혼합 및 폭발 계산

투입된 용융물의 양: 그림 4에는 시간에 따른 총 투입된 용융물의 질량과 입자화 된 용융물의 질량이 시간별로 제시되어 있다. 직경 0.15m인 용융물 제트가 9m/s의 초기속도로 투입되어 0.74초에 바닥도달 혹은 증기분율 0.05이상의 사용자 지정 혼합 완료조건이 만족되어 혼합계산이 종료되었다. 이 시간 동안 총 947 kg의 용융물이 투입되었고 이 중에서 15%인 155kg이 입자화 되었다. 또한, 실제 냉각수와 혼합된 용융물의 질량은 총 투입된 용융물의 20%인 197kg으로 계산되었다.



용융물 침투 위치: 그림 5에는 용융물 제트의 침투부분과 용융물(제트와 입자를 포함)의 침투 부분의 시간에 따른 위치변화를 보여주고 있다. 용융물 제트의 침투부분은 깊이 1m인 냉각수의 표면에 도달하기 전까지는 대체로 일정한 속도로 진행하고 있다. 계산 후 0.6초가 지나면 용융물 제트의 침투 부분이 냉각수의 표면에 도달하여 침투 부분이 계속적으로 파쇄됨에 따라서 그 위치는 거의 변함이 없다. 용융물 침투는 물 속을 진행하여 0.74초에 이르면 거의 바닥에 도달한다.

냉각수의 평균 증기분율: 그림 6에는 냉각수면(1m) 아래에서 평균적인 증기분율을 보여주고 있다. 0.6초에서 용융물이 냉각수로 진입하였기 때문에 점점 증기분율이 증가한다. 0.65초 정도에 증가하던 증기분율이 소강상태를 이루다가 다시 증가하여 혼합계산이 완료되는 0.71초에 냉각수의 평균 증기분율은 0.013 정도를 유지하고 있다.

폭발압력: 그림 7에서는 0.2m간격으로 설치된 각 압력측정위치 P1, P2, P3(격자번호 4, 6, 8; 바닥부터 높이가 0.25m, 0.45m, 0.65m)에서 시간에 따른 압력 파형을 제시하였다. 이 그림에 의하면 폭발의 최고 압력과 전파속도는 각각 40MPa, 1500m/s에 이르고 그 파장은 위치별로 차이는 있지만 대략 1 msec정도로 판단된다.

에너지 변환비: 그림 8에는 원자로공동에 투입된 총 용융물의 열에너지와 냉각수의 총 운동에너지가 제시되어 있다. 냉각수의 운동에너지는 기폭 후 1.6msec까지는 작은 값을 갖다가 압력파가 혼합체로 진행을 어느 정도 진행한 1.6msec에 갑작스럽게 증가하고 거의 모든 혼합체를 압력파가 지나가게 되는 4msec에는 운동에너지가 서서히 감소한다. 원자로공동전체에 투입된 총 용융물의 열에너지는  $1.65E+9$  J이며 냉각수의 운동에너지의 최대치는  $6.15E+6$  J에 이른다. 그림 9에는 냉각수의 총 운동 에너지를 용융물의 열에너지로 나눈 에너지 변환비가 제시되어 있으며 최대 에너지 변환비는 0.4%로 계산되었다. 하지만 실제 냉각수와 혼합된 용융물의 질량은 총 투입된 용융물의 20%에 해당하므로 이를 고려한 에너지 변환비는 2.0% 이다.

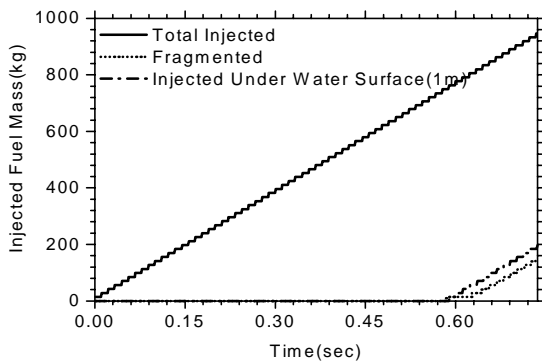


그림 4. 시간에 따른 용융물의 질량

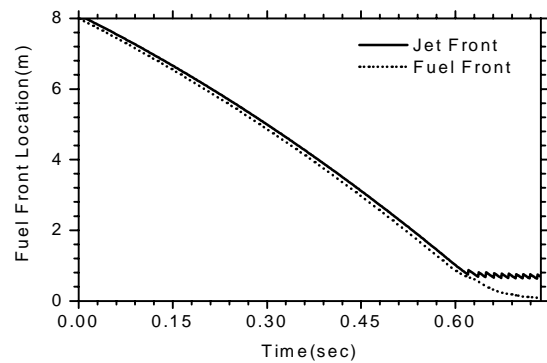


그림 5. 시간에 따른 용융물 제트의 침투 위치

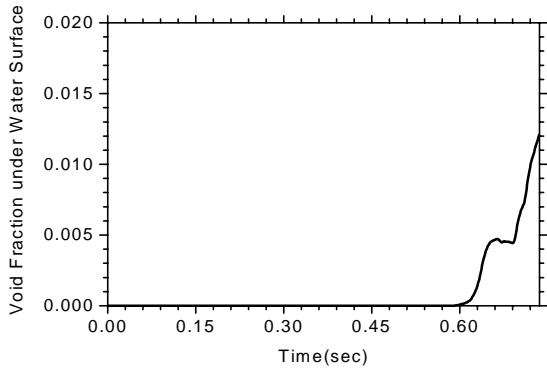


그림 6. 냉각수의 평균 증기분율

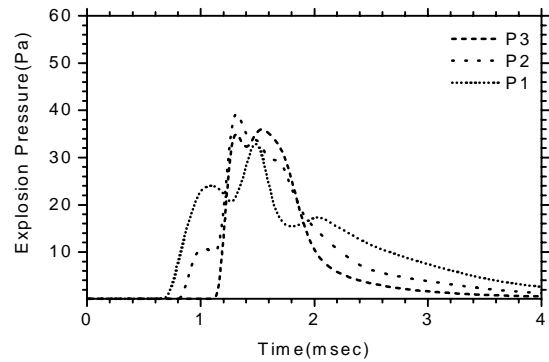


그림 7. 시간에 따른 폭발 압력과의 추이

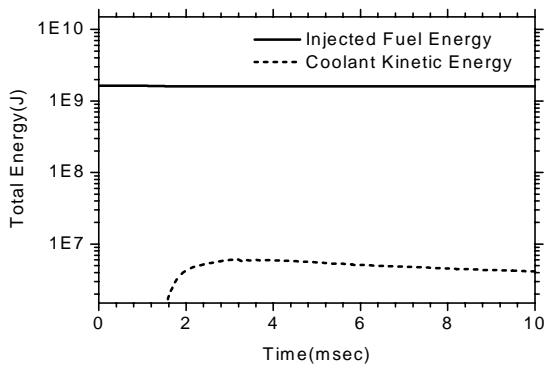


그림 8. 용융물 에너지 vs. 냉각수 운동에너지

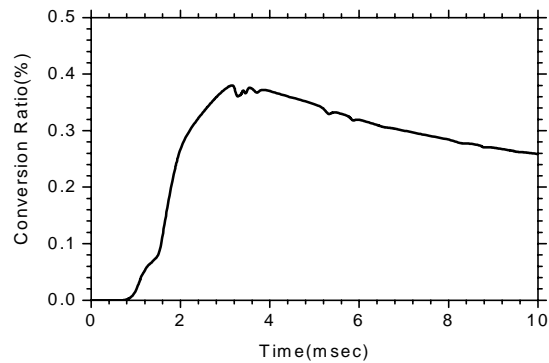


그림 9. 시간에 따른 에너지 변환비

### 4.3. 민감도분석

본 절에서는 위에서 정의된 초기조건을 이용하여 용융물 혹은 냉각수의 열수력적 조건을 제외한, 증기폭발 계산에 심대한 영향을 미칠 것으로 여겨지는 몇 가지 인자들에 대해 민감도분석을 실시하고 이를 고정하고자 한다. 민감도분석의 근거는 폭발압력의 최고치로 한다. 용융물 혹은 냉각수의 열수력적 조건이 정해졌다면 혼합계산에 영향을 줄 수 있는 것들은 계산 격자 개수 및 격자 단면적을 들 수 있다. 특히 격자 단면적은 1차원 코드인 TEXAS-V에서는 곧바로 FCI 반응 단면적이 되기 때문에 냉각수의 온도 및 증기량을 결정하는데 중요한 역할을 할 것으로 판단된다. 또한 이와 같은 열수력적 조건 및 수치적 조건이 정해졌을 때 폭발력을 결정할 수 있는 인자로는 기폭이 일어나는 순간의 혼합체의 구성비와 기폭력 등을 들 수 있다.

혼합체의 구성비는 보통 코드의 사용자가 혼합계산을 언제까지 수행하느냐에 달려 있는데 기폭이 일어나는 격자 근처에서 증기분율이 너무 커질 때까지 혼합계산을 수행할 경우 증기폭발력이 작게 예측될 수 있다. 또한, 기폭격자의 증기분율을 작게 하기 위해 혼합계산을 조기에 마칠 경우

에는 기폭격자에서 분쇄될 용융물의 부족으로 폭발력이 작게 예측될 수 있다. 기폭력에 있어서 일반적으로 그 크기가 실제 폭발력에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있으나 최소 필요압력이 있으므로 이에 대한 민감도분석을 실시하여 적절한 기폭력을 선정해야 할 것이다.

#### 4.3.1. 혼합 완료조건

본 연구에서는 기폭은 용융물의 침투부분이 바닥에 도달하였을 때 발생한다고 가정하여 다음과 같은 혼합 완료조건을 도출하였고, 이에 따른 폭발압력의 변화를 표 2에 제시하였다.

- (1) 바닥에 용융물 입자 도달시(IBOTTOM1)
- (2) 바닥부터 용융물 제트 반경의 높이에 용융물 제트 초기 반경을 갖는 용융물 입자만큼의 질량이 쌓였을 경우 혼합계산 완료, 즉 바닥부터 높이  $RPARN$ 아래에 용융물의 양이  $4/3 \times 3.14 \times RPARN^3 \times RHOP$ 를 초과할 경우 혼합 완료 (IBOTTOM2)
- (3) 증기분율을 사용하여 바닥격자의 증기분율이 사용자 지정 값을 초과하였을 때 혼합계산완료 (IBOTTOM3)

표 2. 혼합 완료조건에 따른 폭발압력의 변화

| 혼합완료조건         | 폭발압력 | 기폭격자 용융물질량 | 기폭격자 증기분율 |
|----------------|------|------------|-----------|
| IBOTTOM1       | 16   | 226        | 0.48      |
| IBOTTOM2       | 32   | 71         | 0.08      |
| IBOTTOM3(0.2)  | 20   | 155        | 0.2       |
| IBOTTOM3(0.1)  | 26   | 85         | 0.1       |
| IBOTTOM3(0.07) | 34   | 71         | 0.07      |
| IBOTTOM3(0.05) | 40   | 42         | 0.05      |
| IBOTTOM3(0.03) | 34   | 42         | 0.03      |
| IBOTTOM3(0.01) | 40   | 14         | 0.01      |

표 2에서 혼합 완료조건 (1) IBOTTOM1를 적용하였을 때 기폭 격자에서의 용융물의 질량은 226kg으로 상당히 많으나 증기분율이 0.48로서 상당히 높기 때문에 폭발압력은 16MPa 정도로서 기본예제의 44MPa에 비해 폭발력이 약함을 알 수가 있다. 혼합 완료조건 (2) IBOTTOM2를 적용하였을 경우 기폭격자에서의 증기분율이 0.08이며 용융물의 질량도 71kg 정도로서, 32MPa의 폭발압력을 보여주고 있다. 혼합 완료조건 (3) IBOTTOM3를 적용할 때 기준이 되는 증기분율을 0.01에서 0.2 까지 변화시켜가면서 폭발압력의 변화를 조사하였다. 증기분율이 0.1-0.2일 경우에는 증기분율이 0.1이하일 경우에 비해 폭발압력이 30MPa이하로 폭발력이 작게 나타났다.

결론적으로, 기폭격자에서 증기분율이 상당히 높을 때는 증기폭발력은 감소하는 것으로 사료되며, 본 연구에서는 다음과 같은 혼합 완료조건을 제시한다. (1)바닥에 용융물도달 & 바닥으로부터

RPARN높이를 통과한 용융물의 양이 초기용융물입자 질량과 동일 혹은 (2)기폭 격자의 증기분율이 0.05도달. (1)번의 경우는 과냉각도가 큰 냉각수에서 적용될 것이면 (2)번의 경우는 주로 과냉각도가 작은 냉각수에서 적용될 것으로 판단된다.

#### 4.3.2. 기폭력

TEXAS-V 개발자가 제시한 KROTOS-38 계산에서는 냉각수의 압력이 대기압일 때 용융물 분쇄의 기준압력(POLD)으로는 0.2MPa를 사용하였고 기폭압력(PTRIG)로는 0.5MPa를 사용하였다. 본 절에서는 앞서 제시한 혼합 완료조건을 이용하여 혼합계산을 완료한 뒤 기폭력을 0.5MPa ~ 1.3MPa로 변화시켜가면서 증기폭발을 계산하였으며 이를 표 4에 제시하였다. 이 때 기폭력을 제외한 격자 개수, 격자 단면적 등은 앞서 사용한 예제계산 입력자료와 동일하다. 표 3을 보면 혼합 완료조건이 고정되었다면 기폭력은 압력과의 성장 속도에는 다소 영향을 미치고 있으나, 그 폭발력에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

표 3. 기폭력에 따른 폭발압력의 변화

| 기폭력(MPa) | 폭발압력 | 기폭격자<br>용융물질량 | 기폭격자<br>증기분율 |
|----------|------|---------------|--------------|
| 0.5      | 40   | 42            | 0.05         |
| 0.7      | 40   | 42            | 0.05         |
| 1.0      | 40   | 42            | 0.05         |
| 1.3      | 40   | 42            | 0.05         |

#### 4.3.3. 격자 개수

TEXAS-V 코드 사용자는 격자 개수가 200를 초과할 수 없음을 주의해야 한다. 표 4에 제시된 바와 같이 격자 개수를 늘리면 폭발 압력과는 그에 비례해 점점 늘어나고 있음을 알 수 있다.

표 4. 격자 개수에 따른 폭발압력의 변화

| 격자 개수 | 격자 길이(m) | 폭발압력<br>(MPa) | 기폭 격자의<br>용융물질량(kg) | 기폭 격자의<br>증기분율 |
|-------|----------|---------------|---------------------|----------------|
| 41    | 0.2      | 30            | 85                  | 0.05           |
| 65    | 0.125    | 36            | 57                  | 0.05           |
| 81    | 0.1      | 40            | 42                  | 0.05           |
| 126   | 0.065    | 56            | 42                  | 0.05           |

#### 4.3.4. 격자 단면적

위에서 기폭력, 혼합완료조건, 격자 개수에 관한 민감도 분석을 통하여 기폭력은 주위압력보다 1MPa 높게, 분쇄기준압력은 주위압력보다 0.2MPa 높게, 그리고 격자 개수는 101개로 하였을 때 적합한 증기폭발 계산을 할 수 있음을 보여주었다. 본 절에서는 위와 같은 인자들을 사용하여 LOCA 사고시 증기폭발 계산을 수행하고 아울러 격자 단면적에 관해 논하고자 한다. TEXAS-V 는 1차원 코드이기 때문에 축과 직각인 방향으로의 해석은 불가능하다. 그런데, 단면적이 넓은 냉각수에 용융물 제트를 투입하였을 경우 혼합체는 용융물 주위로 형성되며 따라서 용융물과 거리를 두고 있는 냉각수는 용융물과 어떠한 반응도 일으키지 않는다. TEXAS-V 같은 1차원적 코드를 사용하여 이를 해석하게 되면 일단 격자 내에 용융물이 들어오게 되면 격자 내에 있는 모든 냉각수가 용융물과 반응하도록 모델되어 있기 때문에 이에 대한 평가가 필요하다.

표 5. 격자 단면적에 따른 폭발압력의 변화

| 격자단면적 (m <sup>2</sup> ) | 격자직경 (m) | 폭발압력 (MPa) | 기폭격자 용융물질량(kg) | 기폭격자 증기분율 |
|-------------------------|----------|------------|----------------|-----------|
| 1.89                    | 1.55     | 38         | 28             | 28        |
| 4.26                    | 2.33     | 52         | 42             | 42        |
| 7.54                    | 3.1      | 40         | 42             | 42        |
| 11.75                   | 3.87     | 22         | 71             | 71        |

표 5에 제시된 바와 같이 본 절에서는 원자로공동의 단면적 18.46m<sup>2</sup>을 기본으로 하고 단면적을 1/2씩 줄인 9.23m<sup>2</sup>, 4.62m<sup>2</sup>에 대해서 증기폭발계산을 수행하였다. 단면적이 9.23m<sup>2</sup> 일 경우에 폭발압력은 30MPa로 18.46m<sup>2</sup>일 때의 20MPa에 비해 1.5배정도 크게 계산되었다. 4.62m<sup>2</sup>을 사용하였을 경우에 폭발 전파는 발생하지 않았는데 이것은 혼합체가 전체적으로 증기분율이 높고, 또한 기폭격자에서 용융물의 질량이 상대적으로 작은 데서 비롯된 것으로 판단된다.

FARO 실험의 용융물 제트 직경에 대한 반응 단면의 직경 비는 7이다. 따라서, 이를 본 원자로 공동의 경우에 직접 적용하면 용융물 제트의 직경이 0.15m이므로 반응 직경은 1m정도이고 반응 단면적은 0.8 m<sup>2</sup> 가 되는데 이 경우에는 TEXAS-V 코드는 증기폭발이 발생하지 않는 것으로 계산한다. 이렇게 1 차원 코드로 증기폭발을 예측하기 위해서는 격자 단면적(반응 단면적)에 대한 합리적인 평가가 요구된다. FARO나 KROTOS 같은 증기폭발 실험 결과 혹은 2 차원적인 코드 계산이 반응 단면적을 도출하는 것이 하나의 대안일 것이다.

## 5. 결론

본 논문에서는 원자력발전소 중대사고 해석용 종합코드에 적용될 다음과 같은 증기폭발 모듈개

발 방법론을 제시하였다. 먼저, 증기폭발 상세 해석 도구 및 해석능력을 확보한 후 이 상세 해석 도구를 이용한 계산 결과가 다항식 보간 모듈에 적용성이 있는지를 판단한다. 초기인자로 선정된 열수력 조건의 상하한에서의 증기폭발 해석결과를 도표화하여 다항식 보간 모듈을 개발하여 종합 코드에 적용한다.

모듈개발의 1단계로서 증기폭발 상세 해석 도구 및 해석능력을 확보하기 위한 연구가 수행되었다. 증기폭발 상세 해석코드인 TEXAS-V에 대해 논하였고, TEXAS-V 코드 및 원자로공동 증기폭발의 특성을 분석하기 위한 예제를 개발하였다. TEXAS-V코드는 1차원적 코드여서 반응 단면적 설정에 어려움이 있긴 하지만 KROTOS, FARO실험 등의 적절한 예측, 실제 원자로에 적용경험, 그리고 용융물 파쇄모델에 강점 등을 고려하여 본 증기폭발 모듈개발의 상세 해석 코드로서 선정되었다.

예제 계산을 통하여 원자로공동의 증기폭발 혼합 및 폭발의 특성을 파악하였고, 기폭력, 혼합완료조건, 격자단면적, 그리고 격자개수 등이 증기폭발력 예측에 미치는 영향에 대해서 분석하였다. 직경 0.15m인 용융물 제트가 9m/s의 초고속도로 투입되어 0.74초에 947 kg의 용융물이 1기압, 363K, 1.1m 깊이의 냉각수에 투입되었고 이 중에서 15%인 155kg이 입자화되었다. 또한, 실제 냉각수와 혼합된 용융물의 질량은 총 투입된 용융물의 20%인 197kg으로 계산되었다. 폭발의 최고 압력과 전파속도는 각각 40MPa, 1500m/s에 이르고 냉각수에 투입된 총 용융물을 고려한 폭발의 에너지변환비는 2%로 나타났다.

폭발은 일단 기폭이 된다면 그 기폭력의 크기가 폭발력에 미치는 영향은 없는 것으로 나타났으나, 격자개수, 격자단면적, 그리고 혼합완료조건은 폭발력 예측에 영향을 주는 것으로 밝혀졌다. 이는 이 인자들이 용융물과 냉각수의 혼합상태를 결정짓는 요인이 되기 때문이다. 격자개수가 증가하면서 폭발력은 점진적으로 증가하는 모습을 보이고 있어 적절한 격자개수를 도출하기 위해서 추가적인 계산이 필요할 것으로 판단된다. 격자단면적이 작을 때는 냉각수의 양에 비해 용융물로부터의 열이 커서 증기폭발력이 작거나 발생치 않으며 격자단면적이 매우 커지게 되면 용융물이 냉각수에 줄 수 있는 에너지의 양이 작게 되어 폭발력은 작게 나타나는 것으로 분석되었다. 혼합완료조건은 혼합체의 전체적인 상태 및 기폭위치에서의 증기분율, 용융물 조건들을 결정짓기 때문에 폭발력에 영향을 미치는 것으로 판단되며, 기폭위치에서 증기분율이 0.05 정도를 유지하였을 때 폭발력은 최고를 나타내었다. 이렇게 격자개수, 격자단면적, 그리고 혼합완료조건은 증기폭발력 예측에 있어 영향을 주는 것으로 밝혀졌기 때문에 이에 대한 추가적인 분석이 요구된다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부 중장기과제에서 재정적 지원을 받았습니다.

## 참고문헌

M.L.Corradini, M.El-Beshbeeshy, S.Nilsuwankowsit, J.Tang, "Fuel Fragmentation Model Advance using TEXAS-V," OECD/CSNI Specialist Meeting on Fuel-Coolant Interactions, JAERI, Japan, May 19-21, 1997.

M.F.Young, "IFCI: An Integrated Code for Calculation of all Phases of Fuel-Coolant Interaction," NUREG/CR-5084, 1987.

S. Angelini, W.W. Yuen and T.G. Theofanous, "Premixing-related Behavior of Steam Explosions," Nucl. Eng. Des. 155, pp. 115-157, 1995.

W.W.Yuen and T.G.Theofanous, "The prediction of 2D thermal detonations and resulting damage potential," Nuclear Engineering and Design, Vol.155, pp.289-309, 1995.

I.K.Park, G.C.Park, and K.H.Bang, "Multiphase Flow of Molten Material-Vapor-Liquid Mixtures in Thermal Nonequilibrium", KSME International Journal, Vol. 14, No.5, pp.553-561, 2000.

C.Chu,"One-Dimensional Transient Fluid Model for Fuel-Coolant Interaction Analysis", Ph.D Thesis, Univerisity of Wisconsin-Madison, 1988.

Jian Tang, " Modeling of the Complete Process of One-dimensional Vapor Explosions", Ph.D Thesis, Univerisity of Wisconsin-Madison, 1993

D. Magallon, H. Hohmann, "Experimental Investigation of 150kg-Scale Corium Melt Jet Quenching In Water", Proceedings of the 7th International Meeting on Nuclear Thermal-Hydraulics NURETH-7, NUREG/CP-0142. Vol.3, 1688-1711, 1995.

D.Magallon, I.Huhtiniemi, H.Hohmann, "Lessons Learnt from FARO/TERMOS Corium Melt Quenching Experiments", Proceedings of Final Program of CSNI Specialist Meeting on Fuel Coolant Interactions, Tokai, Japan, May, 1997.

H. Hohmann, D. Magallon, H. Schins, and A. Yerkess, "FCI Experiments in the Aluminum Oxide/Water System," Nuclear Engineering and Design, 155, 391-403,1995.

I.Huhtiniemi, D.Magallon, H.Hohmann, "Results of Recent KROTOS FCI Tests: Alumina vs. Corium Melts", Proceedings of Final Program of CSNI Specialist Meeting on Fuel Coolant Interactions, Tokai, Japan, May, 1997.