

중대사고시 노심용융물-냉각수 상호반응현상에 대한  
수소생성모델 개선 연구

**Development of a Transient Model for Hydrogen Generation  
in Fuel-Coolant Interactions**

이진용, 박군철

서울대학교

서울특별시 관악구 신림동 산56-1

**요 약**

노심용융물과 냉각수 상호반응시 수소생성모델에 대한 선행 연구를 검토하고 노심용융물과 냉각수의 반응현상을 Coarse mixing 단계와 성층화 단계로 나누어 개선된 모델을 제시하였다. 모델은 각 단계에서 물리적 모델, 열 및 물질전달 상관식, 수증기의 확산을 고려하여 수립하였으며 모델의 검증을 위하여 단일입자 실험인 Baker and Just 실험과 파편화 및 성층화를 고려한 FITS 실험을 모사하였다. 계산 결과 기존 모델에 비해 실험에 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 단일 입자 실험을 모사한 결과에서 반응 표면적이 수소생성에 주요 변수임을 알 수 있었으며 반응 표면적이 클수록 많은 양의 산화가 일어났다. FITS 실험을 모사한 결과 Coarse mixing 단계에서의 반응율이 매우 높은 것을 알 수 있었다.

**Abstract**

A transient model for hydrogen generation by Fuel-Coolant Interaction(FCI) is developed with separate models for each FCI stage, coarse mixing and stratification. The model includes the physical concept of each FCI stage, heat and mass transfer correlation and the concentration diffusion equation with non-zero boundary condition. Using this model, we have simulated the Argonne National Laboratory(ANL-6548) tests that are single droplet experiments, and Fully Instrumented Test Site(FITS) tests that contain dynamic fragmentation and stratification. The model developed in this study predicted the amount of hydrogen generation more accurately than that of previous works. It is shown from the results of ANL tests that the larger metal particle is, the larger reaction rate is. And the metal particle size is a important factor to hydrogen generation. The calculated results of FITS tests are shown that the reaction rate of coarse mixing stage is higher than the stratification.

**1. 서론**

고온의 금속과 냉각수가 반응하는 현상은 금속 공업이나 제지 공업에서 잘 알려진 문제로 원자력 발전소에서는 노심이 용융되는 중대사고시 뜨거운 액체 상태의 노심용융물이 차갑고 더 기화되기 쉬운 냉각수와 접촉해 급속히 파편화가 일어나면서 상대적으로 낮은 온도의 냉각수로 열을

전달해 증기를 발생시킴으로써 국부적으로 높은 압력을 유발하는 현상을 말하며 원자로용기 하부 공동 (lower plenum) 또는 원자로공동(reactor cavity)에서 발생할 수 있다. 노심용융물과 냉각수 상호반응이 일어날 경우 용융물 산화에 의한 수소 및 증기 충격파의 영향으로 격납건물 건전성이 위협받을 수 있으며 특히 발생된 수소의 연소는 화염전파경로를 제공하는 등 격납건물 건전성을 해칠 수 있다.

Baker와 just[1]는 냉각수 내에서의 구형 용융 지르코늄에 대한 단순한 이론적 모델을 개발하였다. 이 모델은 수소-수증기층에서의 증기확산에 의해 산화반응이 일어나는 가스확산과 산화층 내에서의 증기 확산에 따라 반응되는 고체확산의 메커니즘을 모두 고려한 최초의 연구라고 할 수 있다. 이 모델은 Nusselt 수를 2로 가정하고 있으며 Lewis 수를 1로 가정하고 있는데 이러한 열 및 물질 전달계수의 상사성은 광범위한 물질에서의 완전한 확산 모델이나 냉각수 미포화도를 설명하기에는 너무 단순한 가정이다.

Epstein et al 모델[2]은 고온의 구에 대한 막비등 경계층을 좀 더 완전하게 해석한 최초의 모델이라고 할 수 있다. 이 모델 역시 수소생성 메커니즘을 가스-증기막을 통해 수증기가 확산되는 정도에 의해 반응율이 결정되는 정상상태를 다루는 부분과 산화층을 통한 증기의 확산에 의한 부분으로 나누어 고려하였다. 산화층에 대한 고체확산은 B&J의 실험 상관식을 적용하였다. 이 모델은 B&J 모델에서의 고체확산에 대한 실험상관식과 정체유동의 상세 계산을 결합시킨 것이며 다른 성질의 접근방법을 결합시킨 것으로 다소 부적절하다고 판단된다.

Corradini et al 모델[3]은 FCI의 물리적인 현상 진행에 따른 단계를 반영하여 Coarse Mixing 단계와 성층화 단계 그리고 증기 폭발의 경우에 대해 수소생성량을 계산하였다. 금속 온도에 의해 메커니즘이 결정된다는 가정아래 이전의 모델처럼 금속의 산화 정도는 기체확산과 고체확산의 두 과정 중 어느 한 과정이 반응메커니즘을 결정한다고 모델을 수립하였으며 FITS실험 계산결과 각 FCI모드에 대한 수소생성량을 얻을 수 있었다. 그러나 계산결과가 실험에 비해 과다한 수소의 생성을 예측하고 있으며 격렬한 반응과 비격렬한 반응사이의 차이를 설명하지 못하고 있다.

FCI시 수소생성량을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 FCI에 대한 물리적인 진행 현상을 고려하여 열수력 거동, 열전달 과정, 그리고 산화반응공학의 각 부분에 대한 모델링이 필수적으로 요구된다. 이와 같은 점을 고려하여 Coarse mixing 및 성층화 단계에 대한 모델을 수립하여 검증하였다.

## 2. 수소생성모델 개발

### 2.1. 물리적 모형

FCI 모드 중 증기폭발의 매우 짧은 시간에 많은 양의 열전달이 일어나며 그 물리적 현상에서 성층화의 모사가 불가능하고 실제적으로 일어날 확률이 적다고 판단하여 계산 모델에서 제외하였다.

#### 2.1.1. Coarse mixing 단계

Coarse mixing단계에서는 구형의 용융입자가 무한한 미포화 냉각수 속에서 증기막을 형성한 상태로 떨어지는 것을 가정한다. 그림 1.은 그 물리적 개념도이다. 단일입자 실험의 경우 파편화를 고려하지 않으므로 주어진 반경의 입자가 계속적으로 산화되며 파편화를 고려할 경우 Corradini에 의해 제시된 상관식에 대하여 노심용융물의 상대속도와 밀도차이에 의해 야기되는 관성력으로 설명되도록 We 수를 도입한 Chu 상관식[4]을 고려하였다. 그리고 이를 위해서 냉각수 높이에 따른 분열 크기를 표현한 MELCOR 코드의 파편화 모형을 사용하였다. 물과 공기의 시스템

에 대하여 Chu의 파편화 상관식은 다음과 같다.

$$D_f(t) = D_{f0} \exp(-C_1 \tau^{0.772} We^{0.246})$$

여기서

$$We = \rho_c U_f^2 D_{f0} / \sigma_f$$

$$\tau = (U_f t / D_{f0}) (\rho_c / \rho_f)^{1/2}$$

$$C_1 = 0.171 - 0.149 (\rho_c / \rho_f)^{1/2} \text{ 이고}$$

$\rho_c$  는 냉각수 밀도이며,  $U_f$ ,  $D_{f0}$  와  $\sigma_f$  는 각각 용융물 입자의 속도, 초기직경, 그리고 표면장력을 의미한다.

하지만 MELCOR 코드에서는 위의 Chu의 상관식을 다음과 같이 보완하여 사용하고 있다.

$$D_f(t) = D_{f0} \exp(-C_1 \tau We^{0.254})$$

$$C_1 = 0.1232 - 0.149 (\rho_c / \rho_f)^{1/2}$$

수정된 상관식과 Chu의 상관식과의 비교는 거의 비슷한 결과를 보여준다. 일정한 속도  $U_f$  를 가정하고 낙하길이에 따른 입자의 직경 변화로 표현하면 다음과 같다.

$$D_f(t) = D_{f0} \exp(-Z) \quad \text{for } z_{BOT} \leq z \leq z_{POOL}$$

$$Z = C_1 We^{0.254} / D_{f0} (\rho_c / \rho_f)^{1/2} (z_{POOL} - z)$$

한편 Corradini는 노심용융물과 냉각수의 혼합 정도는 노심용융물이나 냉각수의 유체화(fluidization)에 의해 결정된다고 제안하였으며 이 때의 최소 입자 직경을 이용하여 더 이상의 파편화는 일어나지 않음을 가정하였다.

### 2.1.2. 성층화 단계

용융입자가 공동바닥에 도달하면 성층화가 시작된다. 본 연구에서는 성층화 시점에 대하여 모든 용융입자가 바닥에 도달하였을 때부터 시작되는 것으로 가정하였다.

## 2.2. 열 및 물질전달

### 2.2.1. Coarse mixing 단계

Coarse mixing단계에서의 모형은 분출 산화를 고려하지 않은 구형입자 형태의 용융물이 냉각수와 반응한다고 가정하였다. 고온의 구형입자 주위에 안정된 증기막이 존재한다고 설정하였으며 이 때 증기막을 통한 열전달은 기존의 열전달 모델을 사용하되 다음의 고려사항에 부합되는 모델을 선정하였다.

ⓐ 복사 및 대류 열전달을 모두 고려한다.

- ㉔ 구 주위의 증기에 대해 막의 불안정성은 고려하지 않는다.
- ㉕ 액체 속의 열경계층은 구의 반경에 비해 작다.
- ㉖ 용융입자에 대한 물성치의 온도 의존성을 고려한다.

가정 ㉔는 내부 Triggering에 의한 증기폭발의 가능성을 고려하지 않기 위함이고 가정 ㉕은 증기와 액체의 경계에서의 액체 유동 및 증기의 영향을 무시하여 액체 영역을 단순하게 취급하기 위하여 세워졌으며 가정 ㉖는 고온으로부터 빠른 냉각을 겪는 입자의 물성치의 급격한 변화를 고려하기 위함이다.

고화에 따른 산화 반응의 종료나 물성치의 온도 의존성의 고려하기 위해서는 시간에 따른 용융입자 및 증기막의 온도를 예측할 수 있어야하며 이를 위해 시간을 고려한 열전달 지배방정식 및 초기, 경계 조건을 다음과 같이 수립하였다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \quad r_i < r < R$$

$$4\pi r_i^2 k_{s(T)} C_f C_{vi} (-\Delta H) + 4\pi r_i^2 k(\nabla T) = \frac{4}{3} \pi r_i^3 \rho C_p \frac{dT_i}{dt} \quad \text{at } r = r_i$$

$$-k \nabla T = h_c(T_R - T_c) + h_{\text{rad}}(T_R^4 - T_c^4) \quad \text{at } r = R$$

$$T = T_i = T_r \quad \text{for } t = 0, \quad 0 \leq r \leq R$$

여기서  $k$ 는 용융입자의 열전도도를 나타내며  $R$ 은 입자의 반경을  $r_i$ 은 미반응 금속의 반경을 나타낸다.

또한, 본 연구에서는 열전달 계수를 구하기 위하여 Dhir 및 Purohit(D&P)모델[5]을 사용하였다. 이 모델은 넓은 범위의 냉각수 미포화 정도에 대해 잘 예측하는 장점을 가지고 있다.

물질전달계수를 구하기 위해서는 물성치가 변하지 않으며 물질전달율이 적을 경우에 가정할 수 있는 heat and mass analogy를 사용하였다. 막비등 상태의 수증기와 물의 물성치를 포화상태로 가정할 수 있으며 FCI시 물질전달율은 일반적으로 작으므로 이와 같은 가정을 수립할 수 있다.

### 2.2.2. 성층화 단계

노심용융물이 바닥에 도달할 경우의 물리적 모형은 바닥을 노심용융물이 차지하며 자리잡고 그 위를 냉각수가 덮는 노심용융물의 냉각가능성(debris coolability)에서 고려하는 모습을 갖게 된다. 따라서 이와 같은 상황에서는 앞서 살펴본 낙하하는 입자의 막비등 열전달과는 다르게 평판형의 막비등 열전달 상관식을 사용하여야 한다. 본 연구에서는 다음과 같은 modified Berrenson 막비등 상관식[6]을 사용하였다.

### 2.3. 산화반응 메커니즘

본 연구에서는 수증기 분자가 산화 가능한 표면까지 도달하는 일련의 과정을 모두 포함하는 메커니즘으로 산화반응 모델을 수립하였다. 산화반응에 대한 시간을 고려한 수증기 확산 방정식 및 초기, 경계 조건은 다음과 같다.

$$\epsilon \frac{\partial C_v}{\partial t} = \nabla(D \nabla C_v) \quad r_i < r < R$$

$$-D \nabla C_v = k_m (C_{v,R} - C_{v,e}) \quad \text{at} \quad r = R$$

$$D \nabla C_v = a k_{s(T)} C_f C_{v,i} \quad \text{at} \quad r = r_i$$

$$a C_f \frac{dr_i}{dt} = -D \nabla C_v \quad \text{at} \quad r = r_i$$

$$t = 0, \quad r_i = R$$

여기서  $k_m$ 은 수소-증기혼합체의 물질전달계수이며  $C_f$ 은 금속입자의 농도이다.  $D$ 는 산화층에서의 확산계수이며  $\epsilon$ 은 투과율,  $k_s$ 는 화학반응상수이다.

### 3. 결과

#### 3.1. 계산 방법

##### 3.1.1. Argonne National Laboratory (ANL) 실험

실험의 특성상 파편화 과정은 고려하지 않으며 성층화 역시 계산시간에서 제외하였다. 낙하속도는 자유낙하로 일정하다고 가정하여 계산시간을 결정하였다. 용융입자가 냉각수와 접촉하는 순간부터 시작하여 바닥에 도달할 때까지를 대상시간으로 한다. 이 때 고화 온도 이하로 떨어지거나 한 시간 간격에서 발생한 수소의 양이 극히 미미할 경우 계산은 종료하였다. 상관식에 적용할 물성치는 노심용융물 온도에 따라 변하는 것을 고려하였으며 입력으로 필요한 온도, 및 압력에 대해서는 증기막의 평균온도와 포화압력을 가정하였다. 평균온도가 매우 높을 경우에는 주어진 압력에서의 포화온도를 가정하였다.

##### 3.1.2. Fully Instrumented Test Site (FITS) 실험

증기폭발을 고려하지 않으므로 FITS-D 실험에서 폭발적인 반응이 일어나지 않은 경우를 대상으로 계산을 수행하였다. 수소생성량은 노심용융물이 원자로압력용기 파손부로부터 분출되어 냉각수와 접촉하는 순간부터 계산을 시작하였다. 성층화를 고려할 경우에는 성층화에 대한 시점이 명확하지 않으므로 이에 대한 가정이 필요한데 용융입자들이 모두 바닥에 도달한 시점부터 성층화를 가정하였다. 일차적으로 용융물이 모두 원자로공동 바닥에 도달할 때까지의 coarse mixing 단계를 모사하였으며 이후 성층화에 대한 계산을 수행하였다. 용융물 물성치의 온도의존성을 고려하였다. 원자로용기로부터 분출되는 노심용융물을 원자로압력용기의 파손부의 크기와 낙하속도에 따라 원통 형태로 냉각수로 유입된다고 가정하였다. 이 때 파손부의 크기에 대한 가정이 필요한데 이에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 원통형 용융물의 위치는 실험의 사용된 용융물의 부피와 파손부의 크기에 의해 원통형 용융물의 물리적 모형을 계산하고 원통형의 용융물의 처음 냉각수와 접촉하는 전면(ZHEAD)과 꼬리 부분(ZTAIL)의 위치를 파악하여 계산하였고 이를 통해 FCI의 각 단계를 결정한다. 천이 해석시에 coarse mixing 단계에서는 냉각수로 유입된 노심용융물의 시간에 따른 위치가 변하므로 이를 다루는 계산 방법으로 냉각수 풀을 임의의 정해진 층으로 나누어 노심용융물이 단위 시각동안 한 층만큼 진행하도록 하였다. 그리고 각 층과 층 사이에서 단위 시각을 다시 sub-node로 세분하여 천이 해석을 하였다. 이 때 각 동일층에서의 용융 입자의 크기는 균일하게 부여하였으

며 이 입자의 크기는 앞에서 설명한 파편화 방정식을 이용하여 나타내었다. Node의 개수에 따른 민감도 분석을 수행하여 이를 통해 계산에 타당한 node수를 결정하였다.

물성치의 경우 ANL실험에서와 같게 적용하였으며 한 시간 간격을 지나고 다음 층으로 내려오는 용융물은 산화층을 제거한 미반응 금속만으로 된 입자 주위에 증기막이 있는 형태로 가정하였다. 전 시간 간격에서 계산된 물성치 및 각 물리량은 시간이 진행됨에 따라 함께 전달되도록 하였다.

금속의 산화반경은 2.3.절에서 소개한 방정식에서 구해진다. 초기 반응은 경계조건을 통해 계산한다. 수소생성량은 화학반응식에서 분자량과 계수를 통한 분석에서 금속의 산화량을 알면 구할 수 있다.

## 3.2. 계산 결과

### 3.2.1. Argonne National Laboratory(ANL) 실험

잔여물의 기하학적 구조가 구형이고 비격렬한 반응을 보였으며 초기 금속이 용융 상태로 입사된 경우를 선택하여 실험 Run 15, 16, 29, 83, 90, 108에 대하여 수소생성량을 계산하였다. 표 1.에 실험 조건 및 결과와 계산 결과를 비교하여 나타내었으며 그림 2.에 계산 결과를 도시하였다.

계산 결과는 대체적으로 실험 결과보다 낮은 수소생성량을 예측하였다. 오차는 실험에 비해 -50.7% 에서 +30.9% 까지 나타났으며 ANL실험을 모사한 다른 모델의 결과가 없으므로 계산의 정확성을 다른 모델과 직접적으로 비교할 수는 없으나 FITS실험을 모사한 Corradini 등의 모델의 경우, 최대 오차가 실험에 비해 100% 이상인 것을 감안하면 상대적으로 적절히 수소생성량을 예측했다고 할 수 있다. 수소생성량에 영향을 주는 중요한 인자로는 다른 어떤 인자보다도 입자의 크기가 중요함을 확인하였다. 즉 반응에 참여하는 단면적의 크기가 클수록 많은 양의 수소가 빠른 시간 간격에 생성되었음을 확인하였다.

### 3.2.2 Fully Instrumented Test Site (FITS) 실험

단일입자 실험 모사 다음으로 FITS실험 조건하에서 파편화를 고려한 coarse mixing 단계 및 성층화 단계에서의 수소생성량을 모사하였다. Coarse mixing 단계에서 냉각수 풀에 대한 기준 위치를 잡았으며 이 기준 위치를 세분하여 sub-node로 나누어 계산을 수행하였다. 앞에서 언급했듯이 FITS실험의 모사를 위해서는 초기 단면적에 대한 가정과 냉각수 풀의 sub-node에 대한 민감도 분석이 필요하여 FITS-2D 실험조건하에서 초기직경과 node 수에 대한 분석을 하였다. 파손부의 크기에 대한 영향은 초기직경을 1, 3, 5, 8, 10, 20 cm로 가정하여 각각의 경우에 대한 수소생성량을 분석하였고 그 결과 초기직경이 1cm 인 경우를 제외하면 수소생성량에 대하여 모두 동일한 결과를 나타내었고 그 양의 차이도 크지 않았다. Node 수에 따른 결과는 대체적으로 비슷한 결과를 보였으며 극단적인 경우를 제외하고는 node의 개수가 수소생성량에 미치는 영향은 매우 작은 것으로 나타났다.

FITS-D 실험에서 초기직경 10cm, node 개수 1.0E+04개로 비격렬한 반응인 FITS-2D, FITS-2DR, FITS-3D, FITS-8D 실험의 coarse mixing 단계를 모사하였으며 각각의 실험에 대한 실험조건 및 실험결과는 표 2.에 계산 결과는 표 3.에 나타내었다. 그림 3.은 FITS-2D와 FITS-2DR의 계산결과 그래프이다. 계산결과 FITS-2D의 수소생성량이 FITS-2DR에 비해 약간 더 높았으며 일반적으로 냉각수 미포화도가 클수록 수소생성량은 감소한다고 알려진 사실과는 배치되는 결과였다. 그러나 그 양의 차이가 매우 적고 초기 용융물의 차이를 고려하고 계

산상의 오차 및 물성치의 오차를 고려할 때 정확한 미포화 정도에 대한 수소생성량의 변화를 나타낸다고 판단하기는 힘들다. FCI 현상의 모든 시간에 비해 매우 짧은 시간에 대한 coarsemixing 계산 결과이므로 미포화도에 대한 영향을 알아보기 위해서는 성층화를 고려한 전 FCI event를 모사함으로써 분명하게 분석할 수 있다고 판단된다.

그림 4.에 FITS-3D와 FITS-8D의 계산결과를 도시하였다. 상대적으로 FITS-2D나 FITS-2DR의 수소생성량보다 매우 적은 결과를 보이는데 이는 냉각수의 깊이가 낮는데 따른 결과로 판단된다. 즉 계산에 사용된 대상 시간이 FITS-2D보다 매우 짧게 되며 동적혼합모델을 이용한 결과에서 냉각수 풀의 높이가 낮을 경우 냉각수 속으로 들어갈 때 심하게 혼합되지 않고 노출 표면적도 작다는 실험 결과와 일치한다. 따라서 생성되는 대부분의 수소는 후에 성층화된 용융물 냉각 과정에서 생성됨을 의미하는 것으로 해석할 수 있다. FITS-8D의 경우가 약간 더 높게 수소생성량을 예측한 것은 초기 입사된 용융물의 질량의 차이와 냉각수의 양 차이에 의한 것으로 해석할 수 있다.

과편화를 고려한 계산결과는 수소생성량이 시간에 따라 포물선 형태로 증가하는 모양을 나타냈으며 이는 단일 입자 실험에서 무리함수 그래프의 형태로 점점 수렴해 가는 것과는 다른 특성이다. 이러한 현상은 반응면적의 증가에 기인한다고 해석할 수 있다. 즉 수소생성량에 있어서 용융물이 냉각수 풀을 진행함에 따라 과편화 현상을 겪게 되어 용융물 입자의 반경이 작아지므로, 반응을 통해 계산에서 제외되는 용융 금속에 의한 마이너스 효과에 비해 상대적으로 반응 면적이 증가하는 플러스 효과가 더 큰 것으로 해석할 수 있다.

그림 5.에 FITS-2D 및 FITS-3D실험에 대한 성층화를 고려한 계산결과를 도시하였다. 표 4.은 FITS-2D실험에 대한 계산결과를 보여준다. FITS-2D의 경우 계산 결과 약 97g의 수소가 발생하는 것으로 나타났는데 이는 실험에서 약 91g의 수소가 생성된 것과 비교하면 기존의 모델에 비해 매우 실험과 근접한 결과를 얻었음을 알 수 있다. FITS-3D의 경우에는 실험결과 97%의 산화가 이루어졌다고 나타났으며 계산에서는 용융물이 모두 산화한 것으로 나타났다. FCI시의 coarse mixing 계산결과는 다른 모델에 비해 다소 많은 양의 수소가 발생하는 것으로 나타났다. 대부분의 모델이 성층화 단계에서의 수소발생량이 지배적이라고 예측하는 것과는 다소 다른 결과로 이는 시간을 고려한 수소 생성율이 장기간의 성층화 단계보다는 coarse mixing 단계에서 높다는 것을 의미한다. 또 전체 계산에서 실험에 비해 다소 많은 양의 수소가 발생한다고 예측하였으며 그 이유는 다음과 같은 몇 가지의 요인이 복합적으로 작용했기 때문으로 판단된다. 첫째, coarse mixing 단계에서 반응이 일어난 금속산화물의 경우 다음 시간간격에서는 제거하고 미반응 금속만으로 다시 입자가 구성된다고 가정한 것이 수소생성량에 있어 플러스 요인으로 작용하였을 것으로 해석할 수 있다. 둘째는 계산에 사용된 각종 물성치의 불확실성이 포함되어 있다는 것이다. 용융입자의 물성치 뿐만 아니라 증기막에서의 수소의 생성에 따른 물성치의 변화를 적절히 반영하지 못하였으며 화학 반응에 대한 기초 자료의 부족으로 정확한 물성치 자료를 이용하는데 어려움이 있었다. 셋째는 실험상의 오차를 고려해야 한다는 것이다. 이러한 이유를 고려하더라도 기존 모델에 비해 전체적으로 실험과 근접한 결과를 얻을 수 있었으며 coarse mixing 단계에서 높은 수소 생성율을 보인 것은 적절한 결과라고 판단된다.

#### 4. 결론

FCI시 수소생성에 대한 물리적 모델, 열 및 물질전달 상관식, 수증기의 확산을 고려한 계산에서 기존 모델에 비해 실험에 근접한 결과를 얻을 수 있었으며 coarse mixing 단계에서의 수소생성율이 성층화 단계에 비해 상대적으로 높은 것을 알 수 있었다. 용융물의 반응 면적이 매우 중요한 인자임을 알 수 있었으나 냉각수 미포화도나 초기 금속 입자

의 온도에 따른 민감도 분석이 수행되어야 할 것이다. 또한 용융물의 물성치 자료에 대한 정확한 수집도 필요하다고 판단된다.

#### 참고문헌

- [1] L.Baker, Jr. and L.C.Just, "Experimental and Theoretical Studies of the Zirconium-Water Reaction", ANL-6548, 1979.
- [2] M.Epstein and G.M.Hauser, "Subcooled Forced-Convective Film Boiling in the Forward Stagnation Region of a Sphere or Cylinder", Int. J. Heat and Mass Transfer Vol. 23, pp. 179-189.
- [3] M.L.Corradini, D.E.Mitchell and N.A.Evans, "Hydrogen Generation During a Core Melt-Coolant Interaction", SAND83-0779C, 1983.
- [4] C.C.Chu, M.L.Corradini, "One-Dimensional Transient Model for Fuel-Coolant Fragmentation and Mixing", Proc. Int'l Mtg. on Thermal Reactor Safety, San Diego CA, Feb., 1986
- [5] V.K.Dhir and G.P.Purohit, "Subcooled Film-Boiling Heat Transfer from Spheres," Nucl. Eng. and Design vol. 47, pp. 43-66, 1978
- [6] M.R.Duignan et al., "Enhanced Convective and Film Boiling Heat Transfer by Surface Gas Injection", EML-52326, April, 1992



Run	실험조건			결과			
				실험결과		계산결과	
	금속온도 (°C) 및 상태	입자평균직 경( $\mu\text{m}$ )	기하학적 모양	산화 반응율 (%)	수소 생성량 (mg)	산화 반응율 (%)	수소 생성량 (mg)
15	1900. 액체	2040	구형	9.0	0.1096	5.72	0.0697
16	2700. 액체	980	구형	17.1	0.0231	13.05	0.0176
29	1852. 액체	1500	구형	7.9	0.0383	10.34	0.0501
83	2200. 액체	1180	구형	14.8	0.0349	12.86	0.0303
90	1852. 액체	1290	구형	19.7	0.0607	12.00	0.0370
108	2100. 액체	1680	구형	14.8	0.1007	7.30	0.0497

표 1. ANL 실험 결과 및 계산 결과

Test	Fuel Mass Deli	Water Mass	Mass Ratio	Water Temp	Ambient Pressure	Water Side Dimen.	Water Depth	Melt Entry Velocity	Metal Oxide(%)	
	kg	kg	$m_d/m_f$	K	MPa	m	m	m/s	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
FITS0D	17.8	182.9	10.3	368	0.085	0.61	0.51	5.9	29	19
FITS2D*	19.0	9537	5.0	289	1.103	0.38	0.66	7.3	24	16
FITS2DR	18.7	95.3	5.1	299	1.103	0.38	0.66	7.3	30	20
FITS3D*	18.9	86.6	4.6	401	0.70	0.76	0.15	5.7	97	67
FITS5D	19.5	21.3	1.1	368	0.083	0.38	0.15	7.3	24	16
FITS8D	19.5	21.3	1.1	367	0.083	0.38	0.15	6.9	31	21

표 2. FITS-D 실험 조건 및 결과

	FITS2D	FITS2DR	FITS3D	FITS8D
산화량(%)	1.3288	1.3222	1.2518E-001	1.5487E-001
수소생성량 (g)	4.9728	4.8699	4.6601E-001	5.9483E-001

표 3. FITSD실험 계산 결과

Test	Mass of Hydrogen Generated		
	Measurement(gm)	Calculation(gm)	
		Premixing	Stratification
FITS 2D	91	4.9728 (1.09)* (0.18)**	90.9752 (138.2)* (183)**

Note) \* : The Calculated results of B.C.Lee and Park

\*\* : The Calculated results of Corradini et al.

표 4. FITS-2D 실험 계산결과 비교

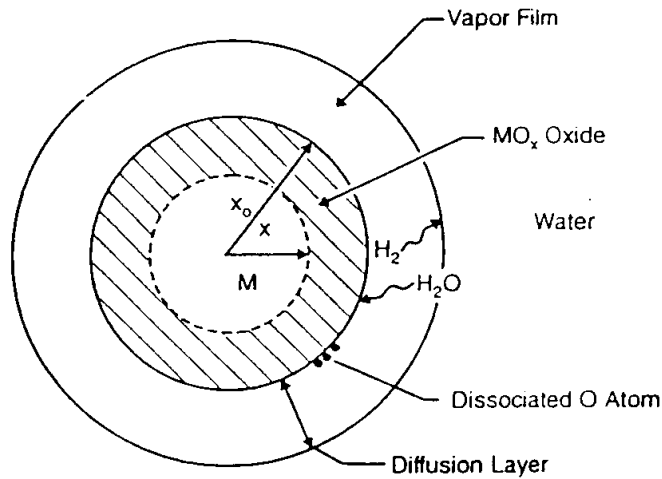


그림 1. Coarse mixing 단계에서의 물리적 모형

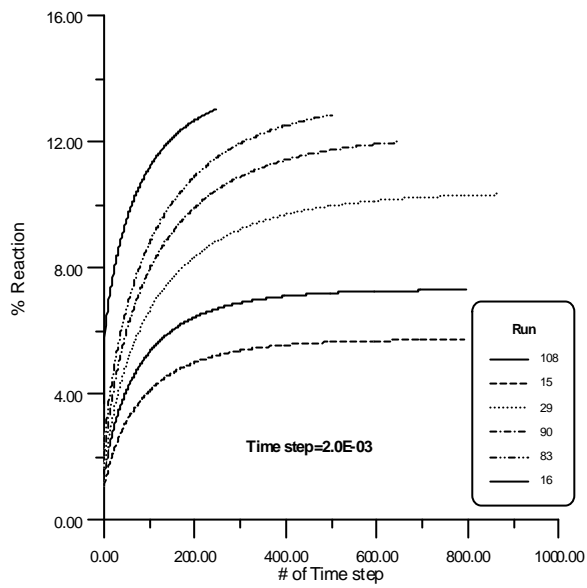


그림 2. ANL실험 계산 결과

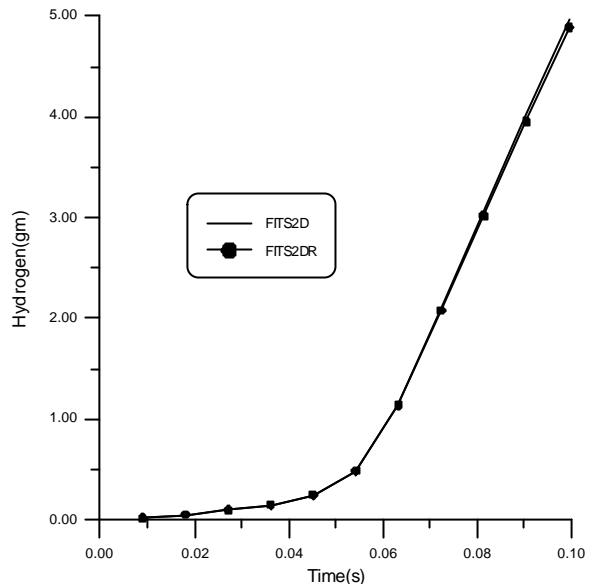


그림 3. Premixing 단계에서의  
FITS-2D 및 FITS-2DR 실험 계산 결과

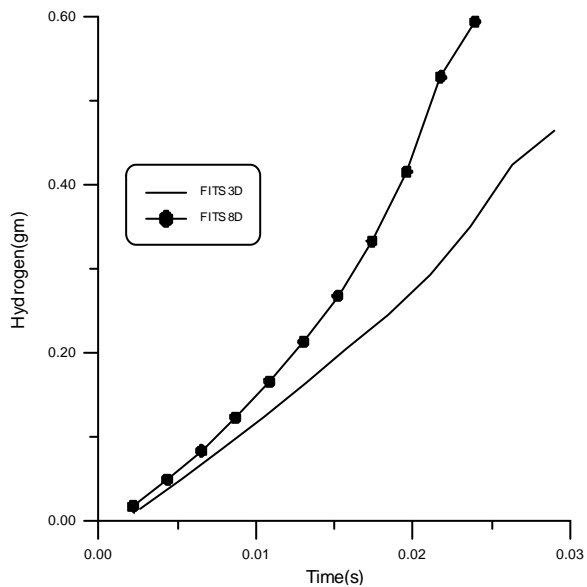


그림 4. Premixing 단계에서  
FITS-3D 실험 및 FITS-8D 실험 계산 결과

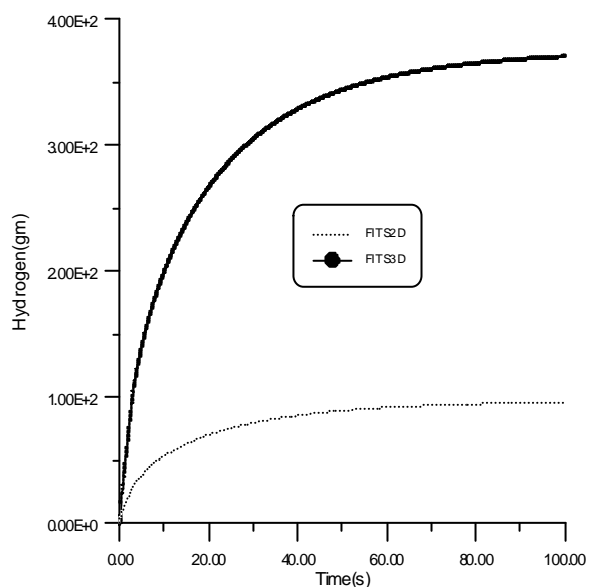


그림 5. 성층화를 고려한  
FITS-2D 및 FITS-3D 계산 결과