

노심용융물과 냉각수 반응시 증기폭발 가능성 고찰

An Investigation of Triggerability and Explosivity in Fuel Coolant Interactions

홍성완, 박익규, 김희동

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

노심용융물(코롬)과 냉각수의 반응시 증기폭발 발생 가능성에 대해 노심용융물의 기폭 및 폭발전파 관점에서 고찰하였다. 기폭성에 있어서는 주로 용융입자 한 개를 사용한 소규모 실험과 이론적인 모델에 대하여 고찰하였으며, 폭발성에 있어서는 대규모 실험을 위주로 논하였다. 이와 같은 기존의 실험적 연구와 이론적 연구를 고찰한 결과 용융물의 기폭성 또는 폭발성은 용융물 고유의 물성치에 따른 열수력적 조건이 중요한 역할을 하는 것으로 분석되었다. 하지만, 코롬과 냉각수의 증기폭발 발생 가능성과 폭발력 예측에는 실증실험에서 모사물질사용, 차원의 제약 등에서 야기되는 불확실성이 존재한다. 따라서, 원자로 중대사고시의 노심용융물과 냉각수 반응거동, 증기폭발 가능성, 그 폭발력 등을 현실적으로 예측하기 위해서는 노심용융물과 동일한 물질을 사용하여 다양한 기하학적 구조를 갖는 대규모 실증실험 수행이 요구된다.

Abstract

The triggerability and explosivity in the molten fuel and coolant interactions(FICs) were discussed. For the triggerability, small scale experiments using single molten droplets and analytical triggering models were reviewed and large scale experiments and a simple model were discussed for the explosivity. These works revealed that the thermal-hydraulic condition depending upon the physical properties of the molten material is an important role in vapor explosions. However, there exist some uncertainties due to the simulant material or the limited experimental dimension in reasonable explanations for vapor explosions during the reactor severe accidents. Therefore, the real melt simulations under various geometries are necessary

for properly answering the reactor safety issues related to vapor explosions during reactor severe accidents.

1. 서론

원자로 중대사고시 노심용융물은 원자로 압력용기내 하부 잔류냉각수 혹은 원자로공동의 냉각수와 반응하여 증기폭발을 일으키거나 냉각과정을 겪게된다. 증기폭발은 강력한 폭발로 인해 원자로 압력용기와 격납건물의 파손을 일으킬 가능성 있으며, 이러한 물리적인 파괴력 외에도 핵분열생성물의 이동경로를 좌우할 수 있다는 측면에서 중대사고 연구에 있어서 중요한 분야이다.

증기폭발 현상과 메커니즘(mechanism)은 아주 복잡하나 많은 실험적 연구를 토대로 대규모 증기폭발의 경우 혼합, 기폭, 전파, 팽창의 4 단계를 거치는 것으로 알려졌다. 또한, 증기폭발에서 특이하고도 중요한 현상인 용융물파쇄에 관한 메커니즘을 설명하는 모델들도 제시되었다. 이렇게 실험적, 이론적인 접근을 통해 간단하게는 용융물과 냉각수의 반응 전후만을 생각하여 폭발력을 계산하는 열역학적 모델부터 용융물, 냉각수, 증기, 용융파편 등에 대한 지배방정식을 세워 혼합과정과 전파과정을 모사하는 다상유동 전산모델까지 개발되었다.

증기폭발 해석을 위한 다상유동 전산모델에는 IFCI [Young., 1987], TEXAS-V [Corradini et al., 1997], ESPROSE.m [Theofanous et al., 1995], TRACER-II [I.K.Park et al., 1996, 1997] 등이 있다. 이러한 전산모델에서 사용하고 있는 실험상관식은 증기폭발상황과는 다른 열수력적 조건하의 실험데이터를 이용하고 있고 저압의 이상유동 유동영역(flow regime) 정의를 고압의 상황에 그대로 사용하는 등 불확실성이 내포되어 있긴 하지만, 실험적 관측과 이론적 모델링을 통해 개발된 다상유동 전산모델들은 증기폭발 혼합실험, 폭발실험 등을 이용한 검증계산수행으로 그 신뢰도를 높이고, 실제 실험으로 관측할 수 없는 여러 가지 정보를 제시하여 증기폭발의 이해에 많은 도움을 주고 있다.

다상유동 전산모델을 비롯한 증기폭발을 해석하려는 이론적 도구들의 단점 중의 하나는 증기폭발의 4 단계중의 하나인 기폭(triggering)에 대해서 구체적 설명이 없다는 점이다. 즉, 간단한 열역학적인 모델은 폭발 전후만의 전체적인 질량과 에너지보존만을 고려하고 있으며, 다상유동 전산모델의 경우에는 전파단계를 모사하기 위해 임의의 국부적 계산영역에서 고압을 부여하거나 가상적인 용융물분쇄율을 상수로 부여하고 있다. 이것은 기폭의 메커니즘이 워낙 복잡하고 관측이 어려워 기폭 메커니즘에 대해서는 거의 이해하지 못하고 있기 때문이다. 또 하나는 이러한 증기폭발 해석전산코드들은 일단 기폭이 주어지고 나면 항상 폭발전파가 일어나는 구조로서 주어진 혼합체의 폭발성 해석에 큰 도움은 못 주는 현실이다.

본 논문에서는 노심용융물과 냉각수 반응시 증기폭발의 기폭성(triggerability)과 폭발성(explosivity)에 관한 이론적, 실험적 연구에 관하여 논하고자 한다. 증기폭발 기폭성에 있어서는 주로 한 개의 용융입자를 사용한 소규모실험과 이론적인 모델에 대하여 고찰하였으며, 폭발성에

있어서는 대규모실험을 위주로 논의하였다. 그리고, 이러한 고찰을 통해 향후 증기폭발 연구의 방향을 제안하고자 한다.

2. 증기폭발 기폭성

증기폭발은 그 기폭방식에 의하여 기폭폭발과 어떤 제어할 수 없는 요인에 의한 자발폭발의 두 가지로 나눌 수 있으며, 기폭이 어떤 인위적인 수단(화학적 폭탄)일 경우에는 외부기폭폭발로 불린다. 증기폭발 기폭은 그 과정이 매우 복잡하고 매우 짧은 시간에 일어나며 그 위치 또한 불확실하여 실제 대규모실험을 통하여 분석 가능한 관측결과가 보고된 적이 없다. 하지만, 소규모실험을 통한 관측을 통해 알려진 기폭의 메카니즘은 용융입자를 둘러싼 증기막의 제거로 급격한 용융입자의 분쇄와 이로 인한 급격한 열전달과 수증기발생으로 인하여 국부적 압력파가 발생하는 과정이다[Corradini et al., 1988].

기폭을 일으키는 수증기막의 붕괴는 열적인 측면과 수력학적인 측면의 요인에 따른다. 먼저, 열적인 측면으로는 용융입자의 표면온도가 최소막비등온도(minimum film boiling temperature)이하로 내려가게 되면 용융입자를 둘러싸고 있는 수증기막이 불안정하게 된다. 이러한 방식의 수증기막 붕괴는 용융주석-냉각수 실험[Dullforce, 1976]과 같이 비교적 용융점이 낮은 용융물질을 사용한 실험에서 나타난다. 하지만, 실제 노심용융물의 온도는 3000K이상으로 매우 높아 이러한 방식의 기폭은 중요한 메커니즘이 될 수 없다. 수력학적인 측면에서 용융입자의 표면온도가 최소막비등온도 이하로 내려가지 않은 상태에서 냉각수가 용융물과 직접 접촉하도록 강제되는 경우가 있다. 이런 방식은 외부 압력펄스, 냉각수의 벌크유동(bulk flow), 국부적 냉각수 포획 등의 메커니즘이 있다. 먼저, 외부 압력펄스는 냉각수-수증기막 경계의 냉각수를 용융물쪽으로 움직이도록 하며, 냉각수의 속도가 충분히 크면 냉각수는 용융물과 직접 접촉하여 기폭이 발생한다. 냉각수의 벌크유동의 경우에는 압력파가 존재하지 않는 상태에서 냉각수의 벌크유동이 용융입자를 지나가게 될 경우 수증기막이 용융물로부터 대류되어 제거된다. 국부적 냉각수 포획의 경우에는, 냉각수가 용융물의 내부나 용융물과 용기벽면 사이에 포획되어, 냉각수의 온도가 균질비등온도까지 과열된다. 균질비등온도에 이르면 냉각수가 증기로 플래싱되어 냉각수를 둘러싸고 있는 용융물을 냉각수로 발사하여 용융물과 냉각수의 직접 접촉을 야기하여 기폭이 발생한다. 위와 같이 기폭은 복잡한 현상이어서 기폭을 모델링하고 정량화하는 것은 어려운 일이며, 특히 자발기폭의 발생은 무작위성이 크다.

2.1. 실험적 연구

기폭현상에 대한 실험적 연구는 크게 고온의 고체표면을 사용한 실험과 단일용융입자를 사용한 실험 두 가지로 나뉜다.

Inoue 와 Bankoff(1981a)는 프레온113과 에탄올을 사용하여 전기가열방식의 니켈튜브내에서 크기가 0.1-0.5MPa이고 성장시간이 80 μ sec-300msec인 압력펄스를 사용하여 고온의 고체표면에서 수증기막 붕괴실험을 실시하였다. 수증기막 붕괴는 압력파의 크기가 초기압력의 3 배 이상이고 그 성장시간이 150msec 이하일 경우에 발생하였다. 이후 Inoue는 물속에 잠긴 플래티늄박막을 이용한 실험에서는 수증기막의 붕괴를 측정하기가 어려웠으나 0.5MPa크기의 압력파일 때 부분적인 붕괴가 있었으며 압력파의 성장시간이 감소되었을 때 그 붕괴부분이 좀더 넓어졌다.

Naylor(1985)는 냉각수 풀안에 끝부분이 반구인 황동봉을 770K까지 가열하고 기저압력하에서 물의 과냉각도를 0-80K 로 변화시키면서 기폭의 유무에 따른 수증기막 붕괴실험을 실시하였다. 이 실험에서 필름붕괴는 수증기막의 평균 두께가 냉각수/수증기 경계면파의 높이와 표면거칠기의 합보다 작을 때 붕괴된다고 보고하였다.

냉각수탱크에 용융물 단일입자의 거동을 연구하기 위하여도 많은 실험들이 수행되었다. 이러한 연구에는 비교적 용융점이 낮은 다양한 물질들을 사용하였으며 수증기막 붕괴와 이에 따른 용융물분쇄 과정에 대한 많은 정보를 주었다. Dullforce 등(1976)은 용융주석입자를 냉각수에 떨어뜨리는 수백 개의 실험을 수행한 후 자발폭발이 일어나는 용융물온도-물온도를 결정짓는 TIZ(Temperature Interaction Zone)를 결정하였다. 또한, TIZ의 경계는 용융물의 종류, 용융물의 질량, 수증기막의 파손에 필요한 시간 등의 세 가지의 요인에 의해 결정된다고 보고하였다.

Corradini 등(1988)은 ANL에서 Nelson에 의해 수행된 스테인리스 스틸, 금속코름, 산화코름을 사용한 실험을 분석한 결과는 다음과 같다: (1) 어떤 용융구성에 있어서는 폭발이 발생하지 않았는데 이것은 비응축성가스의 존재(특히 금속용융물의 경우에는 수소의 발생)로서 설명될 수 있다.(2) 냉각수의 온도가 고온이고 기저압력이 고압일 때 폭발은 억제될 수 있는데 이것은 수증기막이 안정되기 때문이다. (3) 기폭크기의 증가는 약한 기폭에서는 일어나지 않는 폭발이 발생할 수 있다.

이러한 수증기막 붕괴를 근거로 한 기폭조건을 파악하는 실험 외에도 기폭을 억제하는 방안에 대한 연구도 수행되었다. Long(1957)은 용융알루미늄과 냉각수 반응실험에서 폭발을 억제할 방안 - (1) 철망(wire grill)을 사용하여 냉각수와 접촉하기 전에 미리 분쇄시킨다. (2) 용기바닥을 그리스나 오일로 코팅하면 증기폭발을 억제할 수 있다. -을 마련하였다. Nelson과 Guay(1986)는 주석 용융입자, 철-알루미나 용융물 50kg의 낙하실험에서 글리세롤과 cellulose-gum을 사용하여 냉각수의 점도를 증가시켜 증기폭발이 억제됨을 관찰하였다. 냉각수의 점도의 증가는 증기막 붕괴후에 냉각수의 용융물로의 마이크로제트 현상을 억제하여 용융물의 분쇄가 없는 것으로 보인다. 이러한 기폭억제방법은 용융물을 사용하는 산업체에 어느 정도 응용이 가능하나, 냉각수 성질변화 혹은 원자로벽면 재질변화 등을 이루어야 하는 만큼 원자로 안전성에 응용성은 아주 떨어진다.

2.2. 이론적인 연구

대부분의 기폭에 관한 모델들은 용융물, 수증기막, 냉각수 slug로 구성된 1차원적인 모델을 가정

하는 매우 비슷한 접근법을 사용하고 있다. 용융물을 둘러싸는 수증기막의 부분은 이상적인 기학적 구조를 가진 것으로 가정되며, 냉각수-수증기 경계면에서 압력파의 도달전에 막비등은 정상상태인 것으로 가정한다. 이러한 가정하에 질량, 운동량, 에너지에 대한 보존식을 사용하여 그 계의 천이변화를 모델링한다. 많은 모델들이 이와 같은 방법을 사용하고 있으며 차이점은 보존식의 복잡성과 물리적 과정이 모델링되는 과정 등이다.

실험과 비교하여 개발된 최초의 상세모델에서는[Inoue et al., 1981b] 기화와 응축에 대해서 완전한 비평형 운동 이론이 수증기막과 냉각수의 경계면에서 이용되었다. 이동 중인 수증기와 냉각수 경계면으로부터 거리의 2 차함수를 갖는 온도분포를 가정하여 냉각수 slug에서는 열전도방정식을 사용하였으며, 수증기막으로부터 증기가 빠져나가는 양은 무시되었다. 나아가 수증기막에서의 열저장을 무시하고 응축 혹은 기화율을 결정하기 위하여 냉각수와 수증기 사이의 경계면에 열평형을 적용하였으며, 따라서 냉각수-수증기 경계면의 온도는 국부적 포화온도로 지정된 이들은 좀더 간단한 모델도 개발하였다. 프레온 113에 대한 계산결과는 선택된 기화 및 응축에 대한 보정계수가 적절히 설정되어야 함을 보여주었다. 또한, 비응축성가스의 존재는 경계면에서 물질전달을 방해하기 때문에 보정계수를 줄이는 것에 대한 논의도 포함하고 있다. 수증기막 붕괴의 정의는 필름의 두께가 표면거칠기와 같은 크기일 때이다. 여기서 다시 수증기막으로부터 질량유동이 허용된 모델이 개발되었는데, 이 모델로 계산결과 가파른 전면을 갖는 압력파가 천천히 성장하는 압력에 비해서 좀더 효율적으로 증기막을 붕괴시키는 것으로 나타났다. 또한 붕괴거동은 기저압력에 매우 민감한데 이는 기저압력이 높을 경우 수증기막에는 좀더 많은 질량과 에너지가 포함되어 있기 때문이다.

Knowles(1985)는 수증기층에서 열전달과 냉각수 slug의 동력학에 대해 좀더 자세한 처리를 시도하여 냉각수 slug에서 질량과 운동량방정식을 계산하는 일차원적인 모델을 개발하였다. 이 모델에서는 냉각수의 압축성이 추가되어 가해진 압력펄스의 상세한 거동을 모델링하였으며 냉각수층과 용융물층에서 온도분포를 가정하기보다는 직접 전도방정식을 유한차분하여 계산하였다. 낮은 온도로 둘러싸여진 낮은 압력하의 수증기막 붕괴를 관측하여 유체의 입자속도와 압력펄스의 지속시간의 곱이 증기막의 두께보다 크다면 수증기막 붕괴는 발생하는 붕괴 조건을 제안하였다. 이 모델을 사용한 계산은 고온의 용융물에서는 기화에 의해 수증기막의 안정성이 유지되었다. 고압하에서는 이 모델은 안정적인 수치해를 획득할 수가 없었는데 이러한 이유로 그는 붕괴하는 동안 수증기는 준안정상태에 있기 때문이라고 주장하였다.

비록 많은 모델들이 개발되었지만 기폭발생에 대한 한계를 예측하는데 있어 신뢰성 있는 모델은 없는 것이 현실이다. 이들 모델은 초기 증기막 두께와 구조 등에 있어서 항상 불확실성이 존재하고 기폭특성에 대해 알려지지 않은 실제상황에 적용하기는 힘들다. 모델 예측치로부터 기저압력이 높거나 용융물의 온도가 높은 경우에 기폭은 좀더 복잡하다는 것이 판명되었다. 압력이 증가함에 따라 증기 질량과 에너지밀도는 증가하고 기화에 필요한 잠열은 감소하며, 따라서 증기막은 압축 또는 응축되기도 어려워지는 반면 냉각수 slug의 침투부분에서는 기화하기가 쉬워진다. 그러

나, 이러한 과정의 실질적인 수증기막 구조에서 정량화는 이루어지지 않고 있다.

3. 증기폭발 폭발성

기폭에 관한 많은 실험과 이론적인 분석들이 단일용융입자에 대한 기폭성 해석에 대해 많은 도움을 주는 것은 사실이나, 실제로 대규모 증기폭발의 경우에 있어서 폭발성을 설명하기에는 부족하다. 이는 단일용융입자에 대한 연구로 주로 압력 및 온도의 영향에 관한 것으로 국한되며, 또한 실험 및 분석에 사용된 물질들이 모사물이기 때문이다. 대규모증기폭발의 경우 국부적 매질의 분포, 온도, 기하학적 구조 등의 혼합체의 조건은 매우 다양하며, 단일용융입자로 설명하는 데는 한계가 있다.

대규모 증기폭발의 폭발성은 기폭성과 폭발성의 두 가지의 개념으로 나누어 설명할 수 있다. 기폭성이란 주어진 혼합체가 쉽게 기폭이 발생하는가의 척도가 될 수 있으며, 폭발성이란 기폭이 일단 이루어진 상태에서 폭발전파가 얼마나 강력하게 전달될 수 있는가 하는 문제이다. 즉, 증기폭발현상이 기폭의 연쇄반응이라고 생각하여 기폭성과 폭발성을 동일시 하기도 한다. 그러나, 본 연구에서는 대규모증기폭발에서 열수력조건이 확정된 혼합체에서 폭발전파확률 및 폭발력등을 기폭성(자발기폭, 외부기폭)과 구분하기 위하여 대규모증기폭발의 경우 폭발성으로 명명한다. 이러한 폭발성에 대해 논의할 만한 실험과 이론적인 모델은 그리 많지 않다. 본 논문에서는 Ispra에서 실시된 KROTOS 실험결과와 Sehgal의 모델에 대해서 논의 하고자 한다.

3.1. 실험결과 분석

FCI에 관련된 많은 실험들이 있지만 그중에서도 KROTOS 실험 [H.Hohmann et al., 1993, 1995]은 주석(Tin), 알루미늄(Al_2O_3), 코롬(UO_2/ZrO_2) 등의 다양한 용융물을 사용하여 1차원적으로 잘 정제된 증기폭발 실험데이터를 제공하고 있다. 본 연구에서는 주로 KROTOS 실험으로부터 코롬과 냉각수의 반응시 주요 특징을 분석하였다. 몇 개의 중요인자를 선정하여 이들을 중심으로 설명하였지만, 각각의 항목이 물리적으로 연결되어 있음은 주지해야할 점이다. 예를 들어 실험초기조건이 같은 상태에서 용융물이 냉각수로의 침투속도가 빠르다면 입자의 크기는 작아질 것이고, 이에 따라 열전달 면적이 커져서 혼합체내에서의 증기분율도 커질 것이다.

냉각수로의 침투에 대한 정보는 직접적인 관찰이 이루어지지 않았지만 축 방향으로 설치한 열전대의 손상정보로서 알 수 있다. 과냉각상태의 냉각수의 경우 코롬의 속도가 알루미늄에 비해 상당히 빠른 낙하속도를 보이고 있으며 포화온도 근처의 냉각수의 경우에도 다소 빠른 낙하속도를 보이고 있다. 이것은 알루미늄이 코롬에 비해 밀도가 낮아 냉각수표면 근처에서 빨리 감속하기 때문이다. 두 물질 모두 일정거리(break-up length)를 지난 후에는 약 0.4-0.6m/s의 같은 속도를 유지되고 있는데, 이것은 밀도가 무거운 코롬입자의 평균직경이 알루미늄에 비해 상당히 작아져서

밀도차를 마찰력으로 보상하고 있기 때문이다.

입자크기의 경우 알루미늄을 사용한 증기폭발이 발생한 실험의 경우에는 상당히 작게 나타났으나 폭발후의 입자크기는 여기서 논외이다. 증기폭발이 발생하지 않은 경우 질량평균직경은 알루미늄이 실제 용융물 보다 훨씬 크게 나타났는데, 이것은 알루미늄이 코름보다 냉각수내에서 낙하속도가 더 느리기 때문이다. 평균직경은 곧바로 열전달과 관련되어 혼합체의 증기분율을 결정짓게 되며, 반경방향으로의 용융물 진행에도 영향을 미치게 된다. 이렇게 적절한 크기의 입자분포는 기폭이 제공되면 증기폭발을 발생시킬 수 있는 적절한 혼합체를 이루게 된다.

증기분율은 혼합매질의 압축성을 결정짓기 때문에 증기폭발 전파단계에서 압력파의 성장전파에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 증기폭발 실험에서는 측정기술의 한계로 증기분율의 직접 측정은 불가능하나 냉각수의 수위변화를 토대로 평균적인 값을 예측하고 있다. KROTOS 실험에서 주석, 알루미늄 용융물을 사용한 실험에서 혼합체의 증기분율은 각각 0.1 과 0.04로 예측되었으며, 이때 폭발최고압력은 각각 10MPa과 50MPa이상이라는 결과를 보여주고 있다. 코름, 알루미늄을 사용한 실험에서 각각의 수위를 보면 코름의 경우가 증기 발생율이 훨씬 크다는 것을 예측할 수 있다. 이때 코름의 경우에는 폭발적인 반응은 없었으며 알루미늄의 경우에는 폭발적인 반응이 자발적으로 생성되었다. 이러한 실험의 결과는 코름의 경우 혼합과정에서 용융물파쇄가 잘 되어 증기분율을 높였으며, 높은 기포분율은 코름의 혼합영역에서 냉각수를 고갈시켜 증기폭발의 전파를 억제하는 것을 알 수 있다. 이는 알루미늄에 대해서도 거의 포화상태 냉각수를 사용하는 경우에 기폭이 억제될 수 있다는 것과 같은 맥락이다.

수소발생이 문제가 되는 것은 비응축성가스의 존재가 기폭성에 영향을 미치기 때문이다. 최근 FARO 실험[D.Magallon et al., 1997]에서는 상당량의 수소가 코름-냉각수 반응시 발생하였다. 사용된 용융물 성분이 KROTOS 실험에서 사용한 코름과 동일하기 때문에 KROTOS 실험에서도 수소발생 가능성이 매우 높으며, 발생한 수소는 수위증가와 가압률을 더욱 증가시키어서 혼합과정에 영향을 미쳤을 것이다.

3.2. 폭발성에 관한 이론적 연구

T.N.Dinh et al.(1998)등은 증기폭발력은 기폭이 발생하여 압력파가 전달되기 직전의 혼합체 조건에 의해 좌우된다고 가정하고, 기폭직전까지 혼합과정이 진행되는 동안 용융입자의 조건을 결정할 수 있는 3가지의 과정을 토대로 증기폭발의 기폭성과 폭발성 계산 모델을 제안하였다. 그들은 이들 3가지 과정 -용융입자의 감속, 일련의 용융입자 파쇄, 고화-은 서로 상충하면서 혼합조건을 만들어 간다고 가정하면서 각 과정의 시간척도를 비교함에 의해서 폭발성 내지 기폭성을 결정할 수 있다고 보았다.

용융입자의 감속과정은 액상-액상 계에 대해서 상수질량을 가진 고품구와 같은 시각으로 용융입자 감속 시간척도를 모델링하였고, 용융입자의 파쇄에 필요한 시간척도는 무차원 용융물 파쇄시간

을 이용하였다. 용융입자 감속시간척도와 파쇄 시간척도비를 비교하면 밀도가 무거운 용융물이 냉각수 깊은 곳에서 파쇄과정이 이루어짐을 알 수 있다. 충격파에 의해 부과된 가속에 의한 용융물의 분쇄거동은 용융물의 상태가 어떠한에 따라 달라질 수 있으며, 고화된 입자는 분쇄되기 어렵다. 고화의 진행은 용융물의 성질에 따라 달리 진행되며, 금속용융입자에서는 열전도도가 높아서 용융입자 내부의 온도장이 거의 일정한데 반해 산화물의 경우는 열전도도가 나빠서 용융입자 내부가 과열상태에 있더라도 고화된 껍질이 외부에 형성될 수 있다. 용융물의 성분이 여러 개일 경우에는 액체, 고체, mushy의 세 가지 상이 존재할 수 있다. 내부적 결정화에 의하여, mushy에서 용융물은 점도와 표면장력이 높아져서 거의 단단한 입자로 고려될 수 있다. 위와 같은 용융입자의 조건을 고려하여 충분히 단단하여 외부힘에 저항할 수 있는 용융입자의 크기에 비례하는 고화의 시간척도를 구하였다. 이 고화의 시간척도와 용융입자 분쇄계산을 이용한 코롬의 고화시간은 알루미늄에 비해 1/5로 매우 짧았다.

또한 이들은 Theofanous 등(1995)에 의해 제안된 micro-interaction 개념에 위의 용융물 고화시간개념을 접목시킨 후에, 폭발시간척도내에 포획된 모든 냉각수가 기화되면서 열확학적 효율 1/3로 일을 생산한다는 가정하에 에너지변환비식을 도출하였다. KROTOS 실험에 이 에너지변환비식을 적용한 결과 알루미늄과 코롬의 에너지변환비가 각각 1%와 0.01% 정도로 알루미늄에 비해서 코롬의 에너지변환비가 상당히 낮은 것으로 나타났다. 따라서 실제 용융물은 기폭성 및 폭발성이 매우 낮은 특성을 가질 수 있다는 해석적 결과를 보이고 있다.

4. 노심용융물과 냉각수의 반응에 있어서 기폭성과 폭발성

지금까지 기폭성과 폭발성에 관한 연구를 종합해보면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 코롬같은 고온의 용융물은 용융물의 온도가 최소막비등온도이하로 떨어져서 생기는 기폭은 기대할 수 없으며, 압력펄스파, 냉각수 벌크유동 등의 외부요인으로 인한 수력학적요인에 의해 발생한다.
- 2) 고온의 용융물을 사용하거나 고압하에서는 수증기막 질량과 에너지의 양이 커서 기폭성이 떨어지며, 수력학적 요동의 크기를 크게 하여야 기폭이 발생한다.
- 3) 기폭성 혹은 폭발성은 혼합체의 열수력적 조건(증기분율, 용융입자크기, 고화정도)에 의해 크게 달라진다.
- 4) 비응축성가스의 존재는 수증기막의 제거의 방해물로 작용하여 기폭의 방해요인이 된다.

Ispra에서 수행된 KROTOS 실험을 근거로 코롬과 냉각수와의 반응실험의 특징은 모사물질인 알루미늄을 사용한 결과와 비교되어 다음과 같은 상이한 특징을 보이고 있는 것으로 알려져 있다.

- 1) 코롬은 그 밀도가 알루미늄보다 커서 냉각수내에서의 낙하속도가 크다. 따라서, 코롬의 파쇄정도는 알루미늄보다 크다.

- 2) 산화물질의 경우 열전도도가 낮아서 입자표면에서 고화층 형성이 잘 되며, 입자크기가 작을수록 고화시간은 짧아진다.
- 3) 수위변화로 예측한 결과 코름실험의 경우 알루미늄에 비해 증기발생율이 크다.
- 4) 코름을 사용한 냉각실험인 FARO실험에서 수소발생이 측정되었는 바 KROTOS 코름실험에서도 혼합과정동안 비응축성가스인 수소가 발생된 것으로 예측된다.

위와 같은 근거로 볼 때 KROTOS 실험과 같은 1차원적인 증기폭발 실험에서 코름의 기폭성과 폭발성은 알루미늄에 비해 떨어지는 결론을 얻을 수 있다. KROTOS 실험에서 코름 실험시 전혀 증기폭발이 발생하지 않는 이유는 명확히 밝혀지지 않았으며 지속적인 코름 실험은 중단상태이다. 또한, 위와 같은 코름과 냉각수의 반응실험의 특징은 1차원적 실험에 근거한 것으로 이를 용융물의 거동이 2차원이상인 원자로중대사고시에 직접 적용하는 것은 타당하지가 못하다.

그림 1과 같이 용융물이 KROTOS 실험과는 달리 단면적이 큰 상태로 냉각수와 반응할 경우 냉각수로의 침투깊이가 상당히 낮은 상태에서 증기폭발이 발생할 수 있으며, 이러한 때는 1차원 실험으로부터 얻은 “냉각수로의 침투깊이가 커서 용융입자가 작게 파쇄되어 다량의 증기생성이 야기되고, 용융입자표면의 고화로 기폭성과 폭발성이 떨어진다”는 가정은 그 타당성을 갖지 못할 것이다. 물론 ALPHA 실험 등에서는 2차원적인 실험을 실시하여 다차원 실험데이터를 획득하였으나, 1차원과 2차원의 차이를 규명하지 못하였으며 특히 이 실험도 코름이 아닌 모사물을 사용하였다.

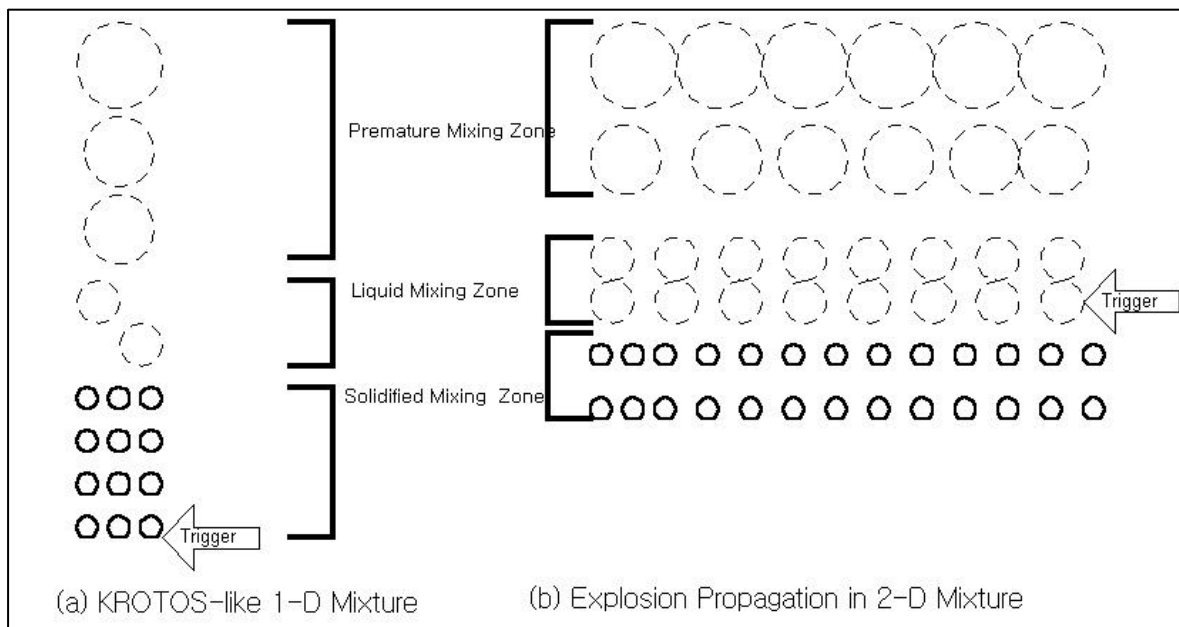


그림 1. 1차원적 혼합체와 2차원적 혼합체에서 기폭의 차이점

이와 같은 방법 외에도 다차원 증기폭발 전산코드를 사용한 접근방법도 생각할 수 있으나, 이러

한 전산코드에 사용되는 모델들은 대부분 모사실험을 토대로 하거나 저압의 2상 유동에서 적용되고 있는 개념을 사용하는 등 불확실성이 내포되어 있다. 또한, 이들 전산코드들은 알루미늄 등의 모사물질의 실험을 이용한 실험을 어느 정도 예측하고 있으나, 코롬과 냉각수의 반응에 있어서 증기폭발 실험데이터의 부족 등으로 원자로사고에 직접 적용하기는 어려운 상태이다.

이렇게 코롬과 냉각수의 증기폭발 실험자료 등이 부족하여 증기폭발을 설명하려는 모델 또는 실험적인 설명들에 많은 불확실성이 존재한다. 따라서 지금까지 코롬과 냉각수의 반응해석에 관련된 이러한 문제를 해결하기 위해서는 2차원 이상의 실험을 실시하는 것이 타당할 것이다.

5. 결론 및 제언

고온의 용융물을 사용할 경우와 기저압력이 높을 경우 증기막의 질량과 에너지량이 커서 증기막의 안정성으로 인해 기폭이 발생하려면 저압의 경우에 비해 그 크기가 크고 성장시간이 짧은 압력펄스가 필요한 것으로 나타났다. 단일용융입자에 관한 실험 및 이론적 연구는 기폭의 기본적인 메커니즘을 설명하는데 많은 도움을 주고 있다. 그러나, 실험의 거의 전부가 모사용융물을 사용하거나 모사냉각수를 사용한 것들이어서 실제 용융물일 경우 그 데이터 값의 확장성이 문제가 되고 있다. 이론적 모델의 경우에도 증기막의 두께 및 구조 등의 불확실성을 제거하지 못하고 있다. 단일입자를 사용한 기폭조건실험 및 모델링에 있어서 TIZ, 기폭하한치 등의 실제 용융물을 사용한 확장이 요구되며 이를 이용한 모델의 타당성 검토도 요구된다.

대규모 증기폭발 실험의 경우 주어진 시스템에 있어서 그 측정기술에 따라 기폭전의 혼합체의 조건 및 폭발성과 폭발압력 등의 데이터를 제공한다. KROTOS 실험에서는 주석, 알루미늄 등의 모사물질을 사용한 실험에서는 증기폭발 현상을 관측할 수 있었으며, 특히 알루미늄의 경우에는 100MPa의 폭발압력을 보이는 강력한 폭발현상을 보여주었다. 코롬을 사용한 실험의 경우 과냉각수를 사용하거나 고압가스 기폭장치를 이용하여 기폭을 시도하였지만, 증기폭발 현상은 발생하지 않았다.

Shegal 모델에서는 위의 KROTOS 결과를 용융물감속 시간척도, 용융물파쇄 시간척도, 용융물고화 시간척도 등 세가지 과정과 함께 Theofanous가 제안한 micro-interaction의 개념을 이용하여 KROTOS 실험조건에서 알루미늄과 코롬에 있어서 폭발성 및 에너지 전환비를 비교하여 코롬의 폭발성이 알루미늄보다 낮음을 증명하였다. 그러나, 그 모델 예측치 조차도 기폭의 시간적 조건에 의해 폭발력이 달라짐을 보여주고 있으며, 모델에 사용된 micro-interaction의 개념은 단일용융입자의 충격류브실험에서 관측된 현상일 뿐 실제 용융물과 냉각수의 반응에서의 적용성에 대해서는 계속적으로 연구되고 있는 분야이다.

또한, 증기폭발 해석에서 자주 인용되고 있는 KROTOS 실험은 잘 정제된 데이터를 생산하여 증기폭발 현상규명, 증기폭발 해석모델 검증 등에 많은 도움을 주고 있다. 그러나, 이 실험은 1 차원적이어서 실제 원자로 중대사고시 FCI 현상이 2 차원이상으로 일어나는 점을 감안할 때

KROTOS 실험보다 확장된 기하학조건하에서 노심용융물과 같은 물질을 사용한 실험이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 중장기과제에서 재정적 지원을 받았습니다.

참고문헌

- M.F.Young, IFCI: An integrated code for calculation of all phases of fuel-coolant interaction, NUREG/CR-5084, 1987.
- 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, Japan, May 19-21, 1997.
- W.W.Yuen and T.G.Theofanous, The prediction of 2D thermal detonations and resulting damage potential, Nucl. Eng.Desg., Vol.155, pp.289-309, 1995.
- I.K.Park, G.C.Park and K.H.Bang, Multi-phase flow modeling of vapor explosion propagation, Journal of the Korea Nuclear Society, Vol.28, pp. 103-117, 1996.
- K.H.Bang, I.K.Park, G.C.Park, TRACER-II: A complete model for mixing and propagation of vapor explosions, proceedings of final program of CSNI specialist meeting on fuel coolant interactions, 6-7, JAERI-Tokai, Japan, May 19-21, 1997.
- M.L.Corradini, B.J.Kim and M.D.Oh, Vapor explosions in light water reactors: a review of theory and modelling, Prog.Nucl.Energy, Vol.22, pp. 1-177, 1988.
- T.A.Dullforce, D.J.Buchanan and R.S.Pecckover, Self-triggering of small-scale fuel-coolant interactions: I, Experiments, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 9, pp.1295-1303, 1976.
- A.Inoue and S.G.Bankoff, Destabilisation of film boiling due to arrival of a pressure shock: Part I experimental, J.Heat Trans., Vol. 103, 459-464, 1981a.
- A.Inoue and S.G.Bankoff, Destabilisation of film boiling due to arrival of a pressure shock: Part II analytical, J.Heat Trans., Vol. 103, 465-471, 1981b.
- P. Naylor, Film boiling destabilisation, PhD Thesis, University of Exeter, 1985.
- M.L.Corradini, Modeling film boiling destabilization due to a pressure shock arrival, Nucl. Sci. Eng., Vol.84, pp 196-205, 1983.
- J.B.Knowles, A mathematical of vapor film destabilisation, AEE Winfrith Report: AEEW-R1933, 1985.
- G.Long, Explosions of molten aluminum in water - cause and prevention, Metals Prog., Vol.

71, pp. 107-112, 1957.

L.S.Nelson and K.P.Guay, Suppression of steam explosions in tin and Fe- Al_2O_3 melts by increasing the viscosity of the coolant, High Temperatures-High Pressure 18, pp. 107-111, 1986.

I.Huhtiniemi, H.Hohmann, D.Magallon, FCI experiments in the corium/water system, NURETH-7, 1995.

I.Hohmann, D.Magallon, H.shins, A.Yerkess, FCI experiments in the aluminumoxide/water system, CSNI-FCIs, Santa Barbara, 1993.

D.Magallon, I.Huhtiniemi, H.Hohmann, Lessons learnt from FARO/THRMOS corium melt quenching experiments, CSNI-FCIs, Japan, May 19-21, 1997.

T.N.Dinh, A.T.Dinh, J.A.Green, and B.R.Sehgal, An assessment of steam explosion potential in molten-fuel coolant interaction experiments, 6th International Conference on Nuclear Engineering, ICON-6563, May 10-14, 1998.

X. Chen, W.W. Yuen and T.G. Theofanous, "On the Constitutive Description of the Microinteractions Concept in Steam Explosions," Proc. of 7th Int. Mtg. on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, pp. 1586-1606, Saratoga Springs, New York, Sept, 1995.

D.F.Fletcher, Steam explosion triggering: a review of theoretical and experimental investigations, Nucl.Eng.Des., Vol. 155, pp. 27-36, 1995.