

## 원자로 물질인 $ZrO_2$ 를 이용한 증기 폭발 실험에서 용융물 거동 및 데브리의 분포

송진호\*, 김희동, 홍성완, 박익규, 신용승, 민병태, 장영조

### An Investigation of Debris Configuration and Melt-Water Interaction in Steam Explosion Experiments using $ZrO_2$

J. H. Song\*, H. D. Kim, S. W. Hong, I. K. Park, Y. S. Shin, B. T. Min, Y. J. Chang

**Key Words:** Steam Explosion, Reactor material, Debris, Molten fuel, Zirconia

#### Abstract

Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) launched an intermediate scale steam explosion experiment named Test for Real corium Interaction with water (TROI) using reactor material to investigate whether the corium would lead to energetic steam explosion when interacted with cold water at low pressure. The melt-water interaction is confined in a pressure vessel with the multi-dimensional fuel and water pool geometry. The cold crucible technology, where the mixture of powder in a water-cooled cage is heated by high frequency induction, is employed. In this paper, results of the first series of tests (TROI-1~5) were discussed. The  $ZrO_2$  jets with 5kg mass and 5cm diameter were poured into the 67cm deep water pool at 30 ~ 95 °C. Either spontaneous steam explosions or quenching was observed. The morphology of debris and pressure wave profiles clearly indicates the each case.

#### 1. 서론

원자력발전소에 중대사고가 발생하여, 노심의 핵연료가 녹았을 경우 노심 용융물 과 냉각수가 폭발적으로 반응하여, 원자로 혹은 격납건물을 파손할 가능성에 대한 연구가 지난 25년 동안 진행되었다. 단일방울분쇄[1] 등 소규모실험은 증기 폭발의 물리적 현상을 규명하고 해석적 연구에 기여하기 위하여 수행되었으며, FITS [2], ALPHA [3], KROTOS 실험[4] 등의 중간규모의 폭발실험은 증기폭발력을 측정하기 위하여 수행되었다. 특히, 원자력 발전소 중대사고시 반응을 좀더 현실적으로 모사하고자 150kg의 대량의 코륨을 사용한 FARO 실험[5]도 수행되었다. 이러한 연구 결과로

부터 1995년 Steam Explosion Review Group, 1997년 FCI Specialist Meeting에서 원자력발전소 중대 사고시 알파모드 파손확률은 일어나지 않을 것이라는 전문가의 의견에 도달하는 등, 많은 문제들이 해결되었다. 그러나, 저압 조건에서 원자로 물질인 코륨 ( $ZrO_2$ 와  $UO_2$ 의 혼합물) 과 냉각수가 반응하였을 때, 폭발적인 반응이 일어날 것인가에 대한 근본적인 질문에 대해서는 아직 뚜렷한 답을 얻고 있지 못하다. 이 문제는 원자로 용기가 파손되어 용융물이 원자로 밖으로 나와 원자로 공동 내에 있는 물과 반응할 때, 폭발적인 반응으로 인해 원자로나 그 구조물이 파손될 가능성이 있고, 격납 건물의건전성을 위협하기 때문에 원자로 안전 측면에서 중요한 문제이다. 최근, 새로운 사고 관리 전략으로 등장한 IVR 개념 (원자로용기를 냉각수에 담겨 놓음으로서 노심용융물을 원자로용기 내에 억제시키고자 함) 이 등장

\* 한국원자력연구소

하면서 관심이 기울여 지고 있다.

현재 이러한 문제들을 해결하기에는 실험자료가, 특히, 코륨을 사용한 실험이 부족한 형편이다. KROTOS 실험에서 입증되었듯이 대부분 전문가들은 산화물질의 물리적 성질이 증기폭발성 혹은 폭발력에 큰 영향을 줄 것이라는데 동의하고 있다. 하지만 기존의 노심용융물/냉각수 실험에서는 노심용융물의 구성비에 대한 고려가 충분치 않고 대체로 80대 20의  $UO_2-ZrO_2$  혼합체가 주로 사용되었다. 그리고, 대표적인 코륨/냉각수 증기폭발실험인 KROTOS 실험은 3cm의 작은 투하 직경을 사용한 1차원적인 실험으로 코륨/냉각수의 혼합체가 반경방향으로 큰 2차원적인 효과를 관측하는데 한계가 있다. 이렇게 용융물의 제트가 물과 혼합되는 현상이 일차원적 이므로 KROTOS 실험결과를 실제 원자로에서의 다차원적인 용융물과 물 반응에 적용시키는데 어려움이 있다. 따라서 용융물의 제트의 지름을 크게 하고, 냉각수 탱크가 다차원적인 모양을 가지는 실험이 필요하다.

한국원자력연구소에서는 1997년도부터 정부의 중장기과제의 하나로서 노심용융물/냉각수 반응 실험(Test for Real cOrium Interaction with water: TROI)을 수행하고 있다. 본 과제의 목표는 한국형차세대원전의 노외증기폭발에 대한 안정성 문제의 해결과 적절한 중대사고관리(severe accident management: SAM)의 제시에 있다 [6]. 또한, 용융물의 구성비, 수소발생, 다차원적 혼합이 증기폭발에 미치는 영향에 관해 체계적인 공헌을 하고자 한다. 본 논문에서는 TROI 실험장치와 TROI 실험의 일단계로 수행한  $ZrO_2$  /냉각수 반응실험 결과에 대해 논하고자 한다.

## 2. TROI 실험장치

그림 1에는 실험장치의 주요 부위와 계측 장치 배치도를 보여주고 있다. 실험장치의 주요부는 그림 1과 같이 상, 하부 압력 용기, 용융로, 슬라이딩 밸브, 반응용기로 구성되어 있다.

### 2.1 압력용기

압력용기는 반응용기를 수용하는 하부압력용기와 용융로를 수용하는 상부압력용기 두개로 구성되어 있다. 가상적인 증기 폭발에 의해 발생하는 정 하중 및 동 하중에 의해 용기 하부면이 파손되는 것을 방지하기 위해 ANSI코드 해석을 수행하여 주요 설계 인자를 결정하였다 [7].

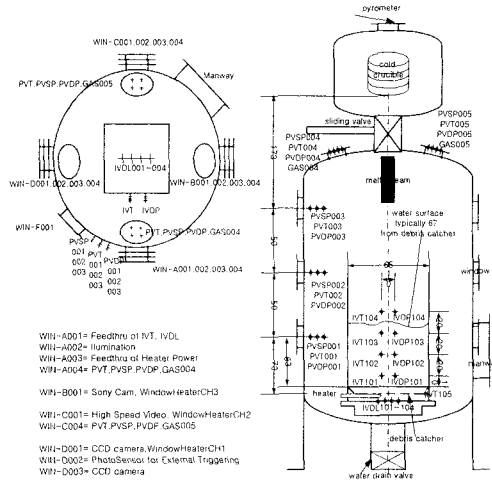


Figure 1 Test Facility and Instrumentation Layout

### 2.2 용융로

용융로는 용융로용기 내부에 설치되어 있으며, 용융로, 플러그, 펀치 등으로 구성되어 있다. 종래의 Thermite 반응 방법이나, 직접 가열 방법의 단점을 보완하기 위하여 저온용융로 (cold crucible) 기술을 적용하였다. 이 방법은 유도 가열 방법의 일종으로 냉각수가 흐르는 구리관으로 용융로를 만들고, 용융로의 내부에 세라믹재료를 넣고 가열하여 상변화에 의한 전기 저항의 변화로 용융이 되는 장치이다. 용융되는 과정에 용융로 외부에 소결층이 형성되어서 고온의 용융물과 용융로 벽면이 직접 접촉되지 않게 된다. 용융하고자 하는 세라믹 물질의 전기적인 특성에 따라 유도가열로의 제원을 결정해야 하는데, 코륨을 녹인 중전의 연구가 없어서, 코륨과 성질이 비슷한  $TiO_2$ 를 이용하여 용융 및 전달 실험을 완료하였고 그 결과는 참고 문헌 8에 자세히 논의되고 있다. 이 방법을 이용하여  $ZrO_2$ 를 성공적으로 용융하였다.

용융로용기 대부분은 냉각관으로 구성되어 있

기 때문에 용융물질이 빠져 나올 수 없는데, 용융물을 방출하고자 하는 부위에 먼저 플러그형태로 된 냉각관으로 막고 있다가 용융물을 방출할 시점에 플러그를 뺀다. 플러그가 빠진 부분은 아주 얇은(1cm이하) 용융물질 고체막이 있는데 이 부분을 공기압을 사용한 펀처로 쳐서 부수면 이 부수진 구멍으로 용융물이 빠져 나오게 된다. 그림 2에 용융로 내부에 아주 얇게 형성된 소결층과, 용융물이 배출되고 난 후 용융로의 모양에 대한 사진이 있다.

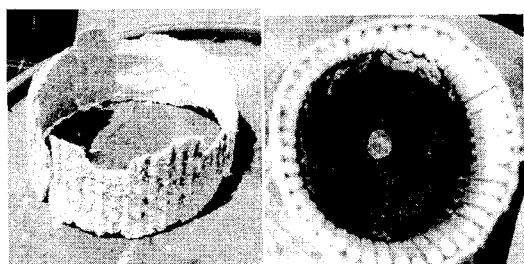


Figure 2 Sintered Layer and Crucible with Punched Hole

### 2.3 반응용기

반응용기는 650x650x1450 mm인 직사각기둥으로 되어 있으며 반응부는 4면이 두께 15mm의 pc판으로 제작되어 있어 용융물/냉각수 반응을 관측할 수 있도록 설계되었다. 반응부의 높이는 1290mm로 냉각수의 높이를 충분히 조절할 수 있다. 반응용기 한면에는 높이 20cm간격으로 열전대와 동압계를 설치할 수 있는 어댑터를 장착하였으며 냉각수 유입구를 상단부에 설치하였다.

### 2.4. 계측장치

동압을 측정하기 위한 동압센서 (piezoelectric charge mode pressure sensor model 112A, Nat'l frequency: 350kHz, Sensitivity : 1pC/PSI, PCB PIEZOTRONICS INC) 4개가 설치되었다. 2개의 동압 센서(60MPa)가 반응용기 벽면 (IVDP101, IVDP103)에 설치되어 냉각수 내부의 동압을 측정하였으며, 2개의 piezo-electric 압력 센서 (6MPa)를 압력용기 벽면 (PVDP001, PVDP002)에 설치하여 압력용기 내부 대기에서 감쇠된 압력파를 측정하였다. 반응시 압력용기 대기 및 반응용기 냉각수의 온도변화를 측정하기

위하여 총 7개의 K-type열전대를 설치하였다. 1.6mm열전대 3개를 압력용기(PVT001, PVT002, PVT003) 부위에 설치하였으며 1.0mm (ungrounded) 열전대 4개를 반응용기(IVT101, IVT102, IVT103, IVT104)부위에 설치하였다. 용융물/냉각수 반응으로 야기되는 압력용기의 압력 증가를 측정하기 위하여 압력용기 벽면 (PVSP002, PVSP003)에 절대 압력계 (Druck사, Model PMP4060, Range:0-35bar)를 설치하여 압력변화를 측정하였다

TROI 데이터 어퀴지션은 위와 같이 크게 다른 두 가지의 데이터(>10kHz, 100Hz)를 동시에 저장할 수 있게 구성이 되어있다. TROI실험에서는 Agilent사VXI 시스템(800kHz sampling/channel, 1kHz/channel)을 이용하여 1개의 제어프로그램을 이용하여 이와 같이 상이한 종류의 데이터 어퀴지션을 하였다. 동압센서의 시그널은 20 s 간격으로 샘플링하였으며, 정압과 온도 등의 시간에 따른 변화량이 느린 신호는 10ms간격으로 샘플링하였다.

4개의 CCD카메라, 1개의 디지털비디오, 그리고 1개의 고속디지털비디오카메라가 TROI실험을 위하여 사용되었다. 2개의 CCD카메라는 용융물제조 및 전달시 용융로 관측과 플러그 및 펀처작동을 감시하기 위하여 상부압력용기 가시창에 설치되었다. FCI 반응현상 관측을 위하여 3대의 30 fps 비디오와 1대의 1000 fps 고속비디오를 사용하였다. 피차체가 아주 높은 온도 (3000 °C) 로 이를 영상화하기 위해서는 광량을 감쇄시키거나 노출시간을 조정하여야 한다.

## 3. ZrO<sub>2</sub> 실험결과

TROI-ZrO<sub>2</sub> 실험에서는 약 8kg의 ZrO<sub>2</sub>를 저온 용융로에서 용융시키고 3100 °C 정도 가열하여 플러그를 제거한 후 펀처가 작동하여 대략5kg의 용융물이 방출되었다. 실험 과정을 간단히 기술하면, 먼저 냉각수를 설정치에 맞추어 가열한 후 8kg의 ZrO<sub>2</sub>분말이 채워진 용융로를 운전하여 충분히 용융물이 생성될 때까지 가열한다. 용융물 생성이 완료되면 30 fps비디오 녹화를 시작한다.

슬라이딩밸브를 개방하고 용융로의 플리그를 제거한다. 용융로의 편치를 작동하여 ZrO<sub>2</sub> 소결층을 깨고, 동시에 동적신호 계측 및 고속비디오 카메라 촬영을 위한 트리거를 발생시킨다. 용융물이 반응용기내부로 완전히 들어갔다고 판단되는 때 슬라이딩밸브를 폐쇄한다.

6 번의 TROI-ZrO<sub>2</sub> 실험에서 3 번의 자발증기폭발이 관측되었다. 이는 기존의 UO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>/냉각수 반응실험에서 자발증기폭발이 발생하지 않았던 것을 고려하며 매우 흥미로운 결과이다. 표 1, 2 에 TROI-ZrO<sub>2</sub> 초기조건 및 실험결과가 제시되어 있으며, 본 장에서는 실험결과를 측정인자 별로 논의 하고자 한다.

Table 1 Initial Conditions and Results of Tests

	ZrO <sub>2</sub> -1	ZrO <sub>2</sub> -2	ZrO <sub>2</sub> -3	ZrO <sub>2</sub> -4	ZrO <sub>2</sub> -5	ZrO <sub>2</sub> -6
Mass Released (kg) (charged), D <sub>min</sub> (cm)	5.0(8.0) 3.7	5.5(8.4) 5.2	4.9(7.8) 6.0	4.2(7.2) 2.8	2.9(6.4) 3.8	7(8.0) 5.0
Melt temperature (K)	> 3373 <sup>2</sup>	-	3200 <sup>2</sup>	3200	3900 <sup>2</sup>	> 3900 <sup>2</sup>
Sub-cooling (K)	8 K	8 K	50 K	81 K	36 K	81 K
Dynamic pressure (MPa)	1.0	-	-	2.1, 3 peaks	0.9, 2 peaks	10
Spontaneous Explosion	mild	no	no	Yes	Yes	totally damaged

Table 2 Debris Configuration

Debris (kg)	ZrO <sub>2</sub> -1	ZrO <sub>2</sub> -2	ZrO <sub>2</sub> -3	ZrO <sub>2</sub> -4	ZrO <sub>2</sub> -5	ZrO <sub>2</sub> -6
Total	2.2	5.5	4.88	4.256	3.02	No data Yet
Crust>50 mm	0.98	2.54	2.56	1.36	0.62	
Crust (10-20 mm)	-	-	-	0.76	0.58	
Pebble (10-20 mm)	0.2	2	1.12	0.18	0.04	
Particle (2-5mm)	0.67	0.67	0.77	1.116	0.74	
Particle (2-710 μm)	0.15	0.25	0.35	0.54	0.54	
Particle < 710 μm	0.04	0.04	0.08	0.26	0.5	

### 3.1 ZrO<sub>2</sub>/냉각수 반응 가시화

ZrO<sub>2</sub> 용융물을 냉각수에 전달할 때 편광필터를 장착한 고속 비디오 카메라와, 디지털 홈비디오 카메라를 이용하였다. 편광필터를 이용한 경우 빛의 분산을 막기가 어렵기 때문에 용융물 제트 직경 측정은 어려우나 용융물의 위치 및 전체적인 모양 파악이 가능하므로 용융물 제트 속도 측정이 가능할 것으로 판단된다. 그림 3에는 홈

비디오로 촬영한 ZrO<sub>2</sub>/냉각수반응 과정이다. 전체적인 혼합체의 직경은 대략20cm(한 격자가 10cm)이며 주 용융물제트로 인한 혼합체는 대략 직경이 10cm인 것으로 판단된다.

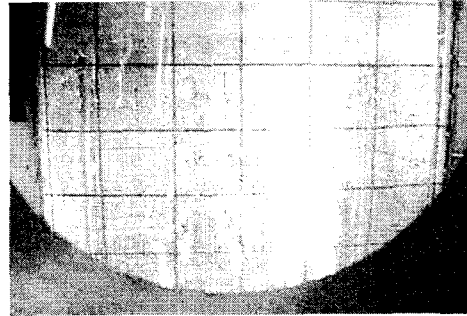


Figure 3 Shape of Melt contact with water just before explosion

### 3.2 동압 측정

ZrO<sub>2</sub>-3,4,5,6 실험에서 동압이 측정되었다. 이 실험들에서는 폭발음이 들렸고, 반응용기의 기계적인 손상이 발생되었다. 그림 4와 5에는 ZrO<sub>2</sub>-4,5에서 측정된 동압의 시간에 따른 추이를 나타낸 것이다. 하지만, 이 모든 경우에 용기가 파손되었기 때문에 실제 동압은 재어진 것 보다 훨씬 크다. 6번 실험에서는 철재 프레임에 폴리카보네이트 판을 붙인 용기 대신 벽 두께가 5mm 정도 이고, 바닥이 10 mm인 실린더 형의 스테인레스 스틸 용기에 물을 담아 실험을 수행하였는데, 폭발로 인해 용기가 종이처럼 찢어지고, 동압이 10 MPa를 측정되었다.

ZrO<sub>2</sub>-4 에서 동압의 특징은 그 피크가 2MPa에 이르지만, 폭이 없다. ZrO<sub>2</sub>-5에서의 동적압력 파는 크기는 1.0MPa로, 작지만 피크를 밀어주는 팽창 압력 파형이 수ms동안 진행됨을 보여 주고 있다. 그 폭발음 및 기계적인 파손정도를 고려할 때 TROI-5실험이 TROI-4실험에 비해 강력했으며, 이는 다음에 논의될 데브리분석에서도 일관성을 보여준다. 이렇게 증기폭발의 폭발력은 폭발 압력파의 크기보다는 그 피크압력을 밀어주는 팽창 압력파에 영향을 받음을 알 수 있다.

### 3.3 데브리 모양

물고 용융물의 반응 후, 용융물이 식고 나서

물에 가라앉은, 용융물의 테브리에 대해서, 메쉬를 사용하여 그 크기별 분석을 시도하였으며 그 결과가 표 2에 제시되어 있으며, 대표적인 크기별 사진이 그림 6에 제시되어 있다. 본 실험에서는 대표적으로 2가지 종류의 테브리가 발생되었다. 하나는 껍질형태의 것(그림 7.a)이며 또 하나는 구형알갱이 형태의 것이다. 폭발이 발생하지 않을 경우 크기가 5cm 이상인 껍질형태의

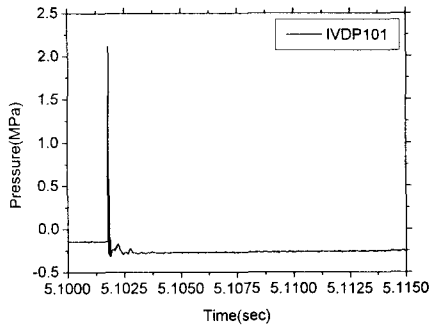


Figure 4 Dynamic Pressure Measured in ZrO<sub>2</sub>-4

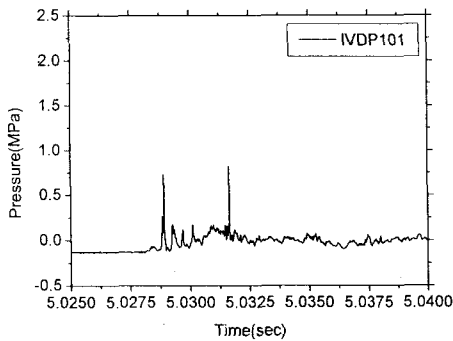


Figure 5 Dynamic Pressure measured in ZrO<sub>2</sub>-5

것과 크기가 1cm 이상인 구형 알갱이형태의 것 (그림 7.c) 들이 다량으로 수집되었다. ZrO<sub>2</sub>-1,2,3의 실험에서는 투입된 용융물의 전체 질량의 50%정도의 큰소라모양의 껍질이 수집되었으며 20%정도의 큰알갱이들이 수집되었다.

자발증기폭발이 발생한 경우에는 2mm이하의 크기를 가진 작은 구형알갱이(그림 7.e) 들이 많이 수집되었으며, 특히 0.7 mm이하의 분말형태의 것(그림 7.f)들도 매우 많이 수집되었다. 반면

에 자발증기폭발이 발생치 않은 경우에 많이 검출되었던 1cm이상의 큰 알갱이들은 현저히 감소하였으며, 폭발력이 가장 센것으로 판단되는 ZrO<sub>2</sub>-5, 6 실험에서는 1cm이상의 큰 알갱이들은 거의 관측되지 않았다. 이것은 1cm이상의 큰 알갱이들이 주로 폭발에 참여하면서 아주 작은 분말형태의 것들로 분쇄된 것으로 판단된다. 또한 자발폭발이 발생치 않았을 때는 큰 소라모양의 껍질밖에 발생치 않았으나, 자발폭발이 발생한 ZrO<sub>2</sub>-4,5에서는 1cm보다 작은 껍질과편이 형성되었다. 이것은 증기폭발 팽창 과정시에 유동이 큰 소라껍질을 부순 것으로 보인다.

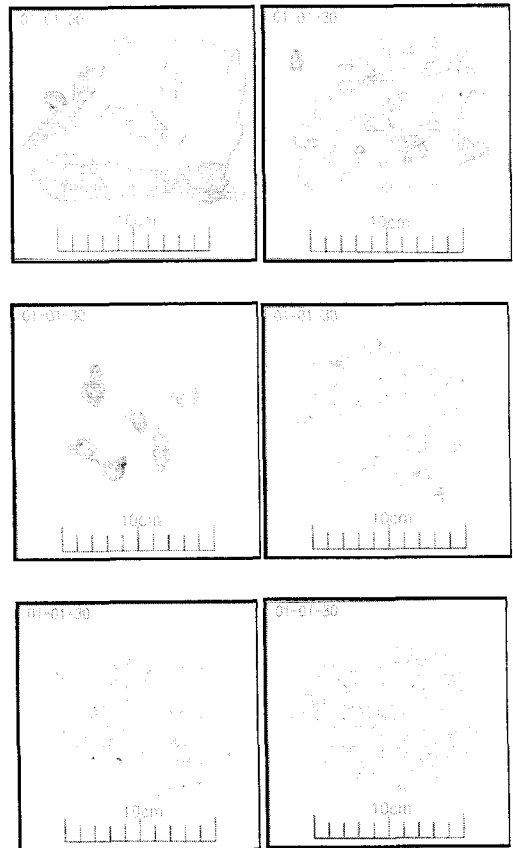


Figure 6 Debris Configuration ( a. Crust 5-10 cm, b. Crust 1-2 cm, c. Pebble, 1-2 cm, d. Particle: 2-5 mm, e: particle: 2-0.7 mm, f. powder < 0.7 mm)

증기폭발이 발생한 경우와 발생치 않은 경우에서 테브리분포의 주요차이점은 큰 알갱이들과 분

말형태의 알갱이의 비율에서 찾아볼 수 있다. 분말형태의 것들은 자발증기폭발이 발생치 않은  $ZrO_2-1,2,3$ 에서는 현저히 그 양이 적으며 자발증기폭발이 발생한  $ZrO_2-4,5$ 에서는 그양이 제법 수집되었다. 또한, 증기폭발의 강도가 상대적으로 큰  $ZrO_2-5$ 에서는 0.5kg의 분말이 수집되어 0.26kg이 수집된  $ZrO_2-4$ 와 비교할 때 폭발의 강도는 분말형태의 데브리가 수집된 정도에 비례하는 것을 알 수가 있다.

#### 4. 결론

한국원자력연구소에서는 "Test for Real Corium Interaction with water (TROI)"라고 명명된 노심용융물/냉각수 반응실험을 수행하고 있다. 이 실험을 위하여 TROI실험장치가 건립되었고, 열수력학적 인자를 측정하는 계측시스템이 구축되었다. TROI실험의 첫번째 시리즈로서 6회의  $ZrO_2$  실험이 수행되었고 주요 실험 결과는 다음과 같다.

- TROI 실험장치를 이용한  $ZrO_2$ /냉각수 반응에서 자발증기폭발이 발생하였다.
- 동압, 폭음, 반응용기의 기계적 손상, 대기압력 및 온도추이, 데브리 분석 등을 통하여 용융물/냉각수 반응에 대해 일관성 있는 평가를 할 수 있었다.
- $ZrO_2$ /냉각수 반응시 증기폭발이 발생하지 않은 경우 그 데브리 분석결과 1cm이상의 큰 알갱이들이 다량으로 수집되어 기존  $UO_2-ZrO_2$ /냉각수 실험결과에서 0.5cm이하가 주류인 것과는 대조적이다.

본 연구에서는 세계 처음으로  $ZrO_2$ /냉각수 반응에서의 자발적인 증기폭발을 관측하였다. 이것은  $ZrO_2$ 가 노심용융물의 20%정도를 차지하는 주요 물질인 것을 고려하면  $UO_2-ZrO_2$ /냉각수 반응에서도 자발증기폭발 가능성을 배제할 수 없는 것을 의미하며, 물성치의 변화에 따른 폭발성 평가의 필요성을 웅변하고 있다.

#### 후기

본 연구는 과학기술부 중장기과제에서 재정적

인 지원을 받았습니다. 이 실험준비를 위해 황인태씨가 수고하셨습니다.

#### 참고문헌

- (1)Chen, X, Luo, R, Yuen, W. W., Theofanous, T. G., 1997,"Experimental simulation of microinteractions in large scale explosions", Proc. of final program of CSNI specialist meeting on fuel coolant interactions, pp. 364-390, JAERI-Tokai, Japan.
- (2)Mitchell, D. E., Corradini, M. L., Tarbell, W. W., 1981, "Intermediate scale steam explosion phenomena:Experiments and analysis", SAND81-0124, SNL.
- (3)Yamano, N., Maruyama, Y., Kudo, T., Hidaka,A., Sugimoto, J., 1995, "Phenomenological studies on melt-coolant interactions in the ALPHA program", Nuclear Engineering and Design, Vol. 155, pp.369-389.
- (4)Huhtiniemi, I., Magallon, D. and Hohmann, H., 1997, "Results of recent KROTOS FCI tests: Alumina vs. Corium Melts", Proc. of final program of CSNI specialist meeting on fuel coolant interactions, JAERI-Tokai, Japan.
- (5) Magallon, D. and Huhtiniemi, I., 1999, "Corium melt quenching tests at low pressure and subcooling water in FARO", Proc. of NURETH-9, San-Francisco, California, U.S.A.
- (6) J. H. Song et al, 1999, "Experimental research on the multi-dimensional fuel-coolant interaction using reactor material", 한국원자력학회 추계학술대회 발표논문집.
- (7) Cho, C. R., Song, J. H., Kim, H. D., 2000, "An Assessment of the Integrity of the TROI Vessel under the Steam Explosion Loads", Proc. of Korean Nuclear Society Meeting.
- (8) Hong, S. W., Min, B. T., Song, J. H., Kim, H. D., Choi, J. K., 2000, "A Study on the Melting and Release of Refractory Materials using Induction Skull Melting", Proc. of NTHAS2.