

## ZrO<sub>2</sub>를 이용한 증기폭발 실험

송진호\* · 김희동\* · 홍성완\* · 박익규\* · 신용승\* · 민병태\* · 김종환\* · 장영조\*  
(2001년 6월 28일 접수, 2001년 10월 19일 심사완료)

### Steam Explosion Experiments using ZrO<sub>2</sub>

Jin Ho Song, Hee Dong Kim, Seong Wan Hong, Ik Kyoo Park, Yong Seung Shin,  
Byung Tae Min, Jong Hwan Kim, Young Jo Chang

**Key Words:** Steam Explosion(증기폭발), Cold Crucible(저온 용융로), Corium(코튬)

#### 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 molten reactor material would lead to energetic steam explosion when interacted with cold water at low pressure. The melt-water interaction experiment is performed in a pressure vessel with the multi-dimensional fuel and water pool geometry. The novel concept of cold crucible technology, where powder of the reactor material in a water-cooled cage is heated by high frequency induction, is firstly implemented for the generation of molten fuel. In this paper, the test facility and cold crucible technology are introduced and the results of the first series of tests were discussed. The 5 kg of molten ZrO<sub>2</sub> jet was 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 indicate the differences between the two cases.

#### 1. 서론

원자력발전소에 중대사고가 발생하면 원자로 내부의 핵연료 온도가 증가하여 핵연료와 노내 구조물이 녹아 노심 용융물이 생성된다. 용융된 핵연료에서는 잔열(Decay Heat)이 계속 발생되므로 이를 냉각시키기 위해 냉각수를 주입되게 되는데, 이 때 용융물과 냉각수가 격렬하게 반응하여 증기 폭발(Steam Explosion) 현상이 발생하고 이로 인한 큰 동하중이 발생할 가능성이 있다.

증기 폭발현상에 의해 원자로용기 혹은 격납건물이 파손될 가능성에 대한 연구가 지난 30여년

동안 진행되었다.<sup>(1)</sup> 증기폭발의 물리적 현상을 규명하기 위한 단일 액적의 파쇄 거동 실험,<sup>(2)</sup> 증기폭발을 야기하는 기본적인 물리현상이라고 생각되는 막비등의 안전성에 대한 해석적인 연구,<sup>(3)</sup> 증기 폭발 에너지를 정량적으로 측정하기 위한 중간 규모의 실험 연구들인 Fully Instrumented Test Series (FITS),<sup>(4)</sup> Assessment of Loads and Performance of containment in a Hypothetical Accident (ALPHA),<sup>(5)</sup> KROTOS,<sup>(6)</sup> 또 원자력 발전소 중대사고시의 조건에 가까운 상황을 모사하기 위해 150kg의 대량의 코튬(원자로 내의 핵연료 물질과 노내의 구조물이 용융되어 섞인 혼합물을 통칭하는 조어로 UO<sub>2</sub>와 ZrO<sub>2</sub>가 주요 성분 임)을 사용한 Fuel Melt and Release Oven (FARO),<sup>(7)</sup> Zirconia와 Zr 금속의 증기 폭발성 평가를 위한 Zirconium EXplosion (ZREX)<sup>(8)</sup> 등의 연구가 수행되었다. 이러한 연구 결과로부터 1997년 증기폭발 전문가 회의<sup>(9)</sup>에서, 원자력발전소 중대사고시 증기 폭발에 의해 원자로 용기가 파손되고, 원자

\* 한국원자력 연구소

† 책임저자, 회원, 한국원자력연구소

E-mail: dosa@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-2850 FAX : (042)861-2574

로 용기의 일부가 비산되어 격납 건물을 파괴시키는 형태의 파손은 일어나지 않을 것이라는 결론에 도달하는 등 많은 실제적인 문제들이 해결되었다.

그러나, 원자로 외부 격납 건물 내로 용융물이 배출되었을 경우에 해당되는 저압 조건에서 원자로 물질인 코륨의 용융물과 냉각수가 반응하였을 때, 증기폭발이 일어날 것인가에 대해서는 아직 뚜렷한 답을 얻고 있지 못하고 있다. 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 건물의 건전성을 위협하기 때문에 원자로 안전 측면에서 중요한 문제이다. 한편, 아주 고온의 물질을 다루고, 초고속 현상이며, 열역학적으로 초임계 (Super critical) 조건을 다루는 어려움 때문에 증기 폭발의 물리적인 현상이 아직 명확히 규명되지 않고 있어 증기 폭발로 인한 동하중을 평가하는데 불확실도가 아주 큰 실정이다.

현재 이러한 문제들을 해결하기에는 실험자료가, 특히, 원자로 핵연료 물질을 사용한 실험 자료의 부족이 가장 큰 현안이다. KROTOS 실험<sup>(6)</sup> 결과에서는 핵연료 물질 대신 상사물인 알루미늄을 이용한 실험에서는 아주 큰 규모의 증기 폭발 현상이 관찰되었지만, 실제 원자로 핵연료 물질과 가까운 약 80대 20의 무게 비율을 가지는  $UO_2-ZrO_2$  혼합물이 사용된 경우, 증기 폭발 에너지가 아주 작은 것으로 관찰되었다. 따라서, 대부분 전문가들은 산화물질의 물리적 성질이 증기 폭발의 크기에 큰 영향을 줄 것이라는데 동의하고 있다. 하지만, 이러한 실험 결과가 KROTOS 실험의 독특한 결과인지, 일반적인 현상인지에 대하여 명확한 규명이 이루어지지 않고 있다.

따라서, 본 연구에서는 1997년부터 노심용융물/냉각수 반응실험 (Test for Real cOrium Interaction with water:TROI)을 수행하였다. 본 연구의 최종 목표는 한국형 차세대원전의 노외증기폭발에 대한 안전성 문제의 해결과 가동중 원전에 대한 적절한 중대사고 관리 (Severe Accident Management: SAM)의 제시에 있다.<sup>(10)</sup>

중전의 노심용융물/냉각수 실험에서의 한계였

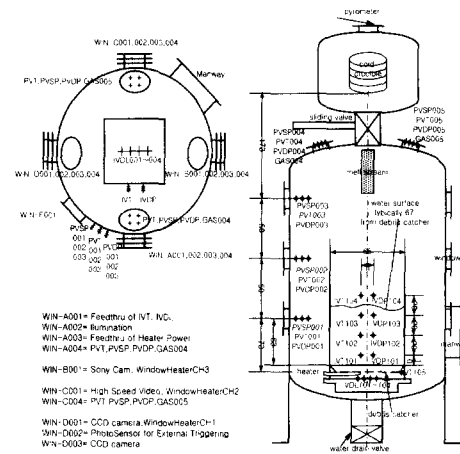


Fig. 1 Test facility and instrumentation layout

던, 핵연료 용융물의 상사물로 약 80대 20의  $UO_2-ZrO_2$  혼합물만이 사용된 점, 용융물과 냉각수가 아주 좁은 실린더 내에서 일차원적으로 반응하는 것, 용융물이 용융점 온도 보다 충분히 과열되지 않은 점 등, 실제 원자로 조건과 다른 점을 개선하여 실험을 수행하고자 하였다. 본 논문에서는 TROI 실험장치와 TROI 실험의 일 단계로 수행한  $ZrO_2$ /냉각수 반응실험 결과에 대해 논하고자 한다.

## 2. TROI 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 주요 부위와 계측 장치 배치도를 보여주고 있다. 실험장치의 주요부는 상부 압력 용기, 용융로, 슬라이딩밸브, 하부 압력 용기, 반응용기로 구성되어 있다.

### 2.1 압력용기

압력용기는 반응용기를 내부에 설치할 수 있는 하부압력용기와 용융로를 설치하는 상부압력용기 두개로 구성되어 있다. 가상의 증기 폭발에 의해 발생하는 동 하중에 의해 용기 하부면이 파손되는 것을 방지하기 위해 ANSYS코드 해석을 수행하여 주요 설계 인자를 결정하였다.<sup>(11)</sup>

### 2.2 용융로

종래의 Thermitite 반응 방법이나,<sup>(4)</sup> 직접 가열

방법<sup>(6)</sup>은 원자로 핵연료 물질인 UO<sub>2</sub>와 ZrO<sub>2</sub> 혼합물의 용융온도가 아주 높으므로, 용융물을 가둘 수 있는 용기의 재질 선택에 아주 많은 어려움을 겪고 있었으며, 3000 °C 이상의 고온을 견디기 위해 Tungsten 등이 사용되었다. 또한 고온에서 용융물과 도가니가 화학적으로 반응하여 불순물이 들어가는 등의 공학적인 문제들이 야기되었다.

본 연구에서는 기존의 용융 방법의 단점을 혁신적으로 개선하기 위해 저온 용융로 (cold crucible) 개념<sup>(12)</sup>을 도입하고 이를 이용하여 핵연료 물질의 용융기술을 개발 및 적용하였다.<sup>(13)</sup> 본 실험에서 개발 및 사용된 용융로는 상부 용융로용기 내부에 설치되어 있으며, 용융로, 플러그, 펀처 등으로 구성되어 있다.

저온 용융로의 개념은 유도 가열 방법의 일종으로 구별될 수 있다. 냉각수가 흐르는 구리관으로 용융로를 만들고, 용융로의 내부에 산화물 혹은 세라믹재료를 넣고 가열하여 상변화에 의한 전기 저항의 변화로 용융이 되도록 하는 것이다. 용융되는 과정에 용융물과 용융로 사이에 소결층이 형성되어서 고온의 용융물과 용융로 벽면이 직접 접촉되지 않게 된다.

용융하고자 하는 세라믹 물질의 전기적인 특성에 따라 유도가열로의 체원을 결정해야 하는데, 코팅을 녹인 종전의 연구가 없어서, 코팅과 성질이 비슷한 TiO<sub>2</sub>를 이용하여 용융 및 전달 실험을 완료하였고 그 결과는 참고 문헌 (13)에 자세히 논의되고 있다. 유도 가열로의 운전 주파수는 50 kHz, 용량은 150 kW로 결정되었다. 이 방법을 이용하여 약 5 - 20 kg의 ZrO<sub>2</sub>를 성공적으로 용융하였다.

증기 폭발 실험을 수행하려면 용융로로부터 용융물을 반응용기로 전달해야 하는데, 이를 위해 Fig. 2에서 보여지는 것과 같은 저온 용융로의 구조를 개발하였다. Fig. 2는 용융로의 절반을 보여주고 있다. 저온 용융로의 주요 체원으로 용융로의 내부 직경은 142 mm, 높이는 200 mm, 동관의 지름은 14 mm, 동관의 숫자는 36개, 그리고 플러그의 지름은 83 mm 이다.

용융로의 바닥에 생성하고자 하는 용융물 제트의 크기에 해당하는 구멍을 내고, 이 구멍을 플

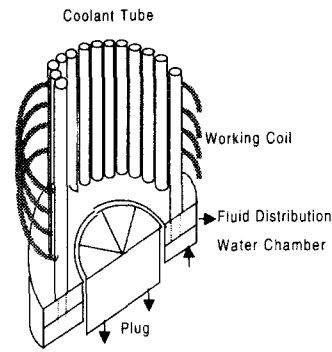


Fig. 2 Cold crucible

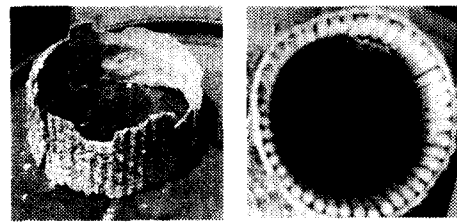


Fig. 3 Sintered layer and crucible with punched hole

러그 형태로 된 냉각관으로 막고 있다가 용융물을 방출할 시점에 플러그를 뺀다. 플러그가 빠진 부분은 아주 얇은 소결층이 형성되는데, 이 소결층을 공기압을 사용한 펀처로 쳐서 부수면 이 부쉬진 구멍으로 용융물이 빠져 나오게 된다. Fig. 3에 용융로 벽면에 아주 얇게 형성된 소결층과, 용융물이 배출되고 난 후 용융로의 모양에 대한 사진이 있다.

### 2.3 용융물

용융물은 원자로 핵연료 물질과 같거나 유사한 재료를 사용해야 한다. 핵연료와 원자로 내부의 구조물이 녹은 상태에서 용융물의 성분은 핵연료 물질인 우라늄, 핵연료 집합체를 구성하는 Zr, 원자로 구조물인 철 등이다. 핵연료가 고온에 도달하게 되면, 구성 성분들이 대부분 산화가 되어 주 성분은 UO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 이며 산화가 되지 않은 Zr, Stainless Steel 등을 포함한다. 물론 사고 경위나 원자로 핵연료의 특성에 따라 다소 다

**Table 1** Thermo-physical properties of molten metal

	Corium	ZrO <sub>2</sub>	Alumina
Density (kg/m <sup>3</sup> )	7,990	5,990	2,600
Specific Heat (kJ/kgK)	0.533	0.815	1.4
Conductivity (W/ mK )	3.45	1.4	8
Melting temperature (K)	2,873	2,973	2,325
Heat of Fusion (MJ/liter)	3.17	4.23	4.05

른 조성 성분을 가진다.

핵연료 물질인 UO<sub>2</sub>의 취급은 국제 원자력 기구 등에서 그 사용을 제한하고 있기 때문에 원자로 물질을 이용한 실험이 용이하지 않다. 한국 원자력 연구소의 중수로 가공 공장에서 감손 우라늄을 구할 수 있어서 앞으로 코륨을 이용한 증기 폭발 실험을 수행할 예정이다.<sup>(10)</sup>

일단계의 실험들에서는 코륨과 성질이 가장 유사하며, 원자로 핵연료 물질인 ZrO<sub>2</sub>를 이용한 증기 폭발 시험을 하였다. ZrO<sub>2</sub>는 UO<sub>2</sub>와 아주 유사한 물질이어서 (Table 1 참조) 다른 상사물에 비해 증기 폭발과 관련된 거동이 코륨과 유사할 것으로 기대된다.

Cho<sup>(8)</sup>는 ZrO<sub>2</sub>와 Zr의 혼합물에 대한 증기 폭발 거동을 연구했다. 이 경우에는 외부적인 기폭을 하였을 경우 에너지가 큰 증기 폭발이 관찰되지는 하였지만, 자발적인 증기 폭발이 발생하지 않았다. 이 실험은 혼합물에서 ZrO<sub>2</sub>의 최대 비율이 40%에 머물러서 ZrO<sub>2</sub>만의 특성이 평가되지 못했고, 용융물의 양이 1 kg으로 작았다는 점, 일차원적으로 용융물과 냉각수를 반응시켰다는 점등이 실제 원자로 조건과 비추어볼 때 개선될 부분이었다.

#### 2.4 반응용기

원자로 물질을 이용한 종전의 실험인 ZREX<sup>(8)</sup>나 KROTOS<sup>(6)</sup>의 경우 반응용기가 10 cm 이하의 실린더 형태로 되어서, 용융물이 물과 반응하여 기포가 발생하면 기포가 발생한 위치 전체 단면에 기포가 차게 된다. 특히, 5기압 이하의 낮은 압력에서는 기체와 액체의 밀도 비율이 아주 커서 이런 현상이 두드러지게 된다. 기포가 차게 되면 용융물과 액체의 접촉이 줄어들고, 발생된 동압이 흡수될 수 있으므로, 증기 폭발을 완화할 수

있는 가능성이 있다. 따라서 이런 일차원적 실험의 한계를 개선하고자 반응용기의 단면을 용융물의 제트 반지름 크기 (본 실험에서는 약 5 cm)의 10 배 정도로 선택하여, 그 효과를 살펴보고자 하였다.

본 실험에서 사용된 반응용기는 650 x 650x 1450 mm인 직사각형으로 되어 있으며 반응부는 철제 프레임외의 4면이 두께 15mm의 폴리 카보네이트판으로 제작되어 있어 용융물/냉각수 반응을 관측할 수 있도록 설계되었다. 반응용기 한 면에는 높이 20cm간격으로 열전대와 동압계를 설치할 수 있는 어댑터를 장착하였으며 냉각수 유입구를 상단부에 설치하였다.

#### 2.5 계측장치

동압을 측정하기 위한 동압센서 (Piezoelectric charge mode pressure sensor model 112A, Frequency: 350kHz, Sensitivity : 1pC/PSI, PCB PIEZOTRONICS INC) 4개가 설치되었다. 2개의 동압 센서(최대: 60MPa)가 반응용기 벽면 (IVDP101, IVDP103)에 설치되어 냉각수 내부의 동압을 측정하였으며, 2 개의 piezo-electric 압력 센서 (최대: 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-type 열전대를 설치하였다. 1.6mm 열전대 3개를 압력용기 (PVT001, PVT002, PVT003) 부위에 설치하였으며 1.0mm (ungrounded) 열전대 4개를 반응용기 (IVT101, IVT102, IVT103, IVT104) 부위에 설치하였다. 용융물/냉각수 반응으로 야기되는 압력용기의 압력증가를 측정하기 위하여 압력용기 벽면 (PVSP002, PVSP003)에 절대 압력계 (Druck사, Model PMP4060, Range:0-35bar)를 설치하여 압력변화를 측정하였다

TROI 데이터 획득장치는 위와 같이 크게 다른 두 가지의 데이터(>10kHz, 100Hz)를 동시에 저장할 수 있게 구성이 되어있다. TROI 실험에서는 Agilent사 VXI 시스템(800kHz sampling/channel, 1kHz/channel)을 이용하여 1개의 제어프로그램을 이용하여 이와 같이 상이한 종류의 데이터 획득

을 하였다. 동압센서의 시그널은  $2 \times 10^{-5}$  초 간격으로 샘플링하였으며, 정압과 온도 등의 시간에 따른 변화량이 느린 신호는 10ms간격으로 샘플링하였다.

4개의 CCD카메라, 1개의 디지털비디오, 그리고 1개의 고속디지털비디오카메라가 TROI실험을 위하여 사용되었다. 2개의 CCD카메라는 용융물 용융 및 전달시 용융로 관측과 플러그 및 펀처작동을 감시하기 위하여 상부압력용기 가시창에 설치되었다. 피사체가 아주 높은 온도 (3000 °C) 이므로 이를 가시화하기 위해서는 광량을 감쇄시키거나 노출시간을 조절하였다.

### 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 대략 5kg의 용융물이 방출되었다.

실험 과정을 간단히 기술하면, 먼저 반응 용기의 냉각수를 설정치에 맞추어 가열한 후 일정 온도에 유지 시킨다. 8kg의 ZrO<sub>2</sub>분말이 채워진 용융로를 운전하여 충분히 용융물이 생성될 때까지 가열한다. 용융물 생성이 완료되면 30 fps비디오 녹화를 시작한다. 슬라이딩밸브를 개방하고 용융로의 플러그를 제거한다. 용융로의 펀처를 작동하여 ZrO<sub>2</sub> 소결층을 깨고, 동시에 동적신호 계측 및 고속비디오카메라 촬영을 위한 트리거를 발생 시킨다. 용융물이 반응용기내부로 완전히 들어갔다고 판단되는 때 슬라이딩밸브를 폐쇄한다. 용융 도중에 용융물의 온도를 이색 파이로미터 (Two-color pyrometer, IR-GAP, CHINO)<sup>(14)</sup>를 이용하여 용융물의 온도를 측정한다.

6번의 ZrO<sub>2</sub> 실험에서 3번의 자발증기폭발이 관측되었다. 이는 기존의 UO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>/냉각수 반응 실험 및 ZrO<sub>2</sub>/Zr의 증기 폭발 실험에서 자발증기폭발이 발생하지 않았던 것을 볼 때 아주 대조적인 결과이다.

Table 2에 실험의 용융물의 온도, 충전한 파우더의 무게, 용융이 되어 반응용기에 전달된 용융물의 양 등의 초기조건과, 반응 도중 발생한 정압, 동압, 그리고 테브리의 크기 분포등 실험결



Fig. 4 Thick crust on the top of the crucible

과가 제시되어 있다. 본 장에서는 실험결과를 측정인자 별로 논의 하고자 한다. 6번째 실험에서는 정량적인 자료가 제한적으로 얻어져서, 표에 나타내지 않았다.

#### 3.1 용융물 온도 측정

용융물온도는 용융로에서 ZrO<sub>2</sub>를 용융하는 도중에 상부압력용기에 설치된 가시창을 통하여 이색 파이로미터<sup>(14)</sup>로 측정하였다. 이색 파이로미터는 두 파장을 이용하여 온도를 재는데, 온도를 재는 대상 물체가 Grey body에 가까울 경우 물체의 emissivity를 알 필요가 없이 온도를 잴 수 있다. 온도 측정 오차는 2000 °C 이상에서는 2% 정도이다.

온도 측정을 하려면 용융물의 표면에서 나오는 빛을 Pyrometer로 볼 수 있어야 한다. 따라서 저온 용융을 할 때 용융물의 표면을 볼 수 있도록 충전된 파우더의 중심 부분에 미리 구멍을 뚫어 놓고 용융중에 그것이 유지되는 방법을 개발하였다. Fig. 4에는 용융후에 용융로 상부에 형성된 두꺼운 소결층과 온도 측정을 위해 형성시킨 구멍이 나타나있다. 위 부분의 소결층과 용융물 사이에는 빈 공간이 형성되는데, 이것은 초기에 파우더로 충전한 부분의 공극률이 높으므로, 용융이 되면서 용융물은 하부로 주저 않는 반면, 상부의 파우더는 소결이 되기 때문이다.

그런데, 파이로미터로 용융물의 온도 측정을 하자,  $ZrO_2$  용융물의 온도는 대개 본 실험에서 사용한 파이로미터의 측정범위 ( $3100\text{ }^\circ\text{C}$ ) 를 벗어났다.  $ZrO_2$  의 용융점이  $2700\text{ }^\circ\text{C}$ 인 것을 고려하면, 유도가열로 인해 용융물의 과열도가 아주 높아지는 것을 알 수 있다. 파이로미터의 측정범위를 벗어난 경우, 제작자는 파이로미터의 emissivity 비율을 조절한 후 보간표를 이용하여 온도측정을 하기를 권유하였다. 외삽할 경우의 계측 오차가 정량화되어 있지 않아 온도측정의 오차가 크리라고 생각하지만 대안이 없어서 이 방법을 이용하여 온도 측정을 수행하였다. 용융물의 온도가 아주 고온이어서, 상용의 계측기로 이 이상의 온도를 측정하기가 어려운 것이 문제점이다. 이 부분에 대해서는 앞으로 연구가 좀더 진행될 필요가 있다.

### 3.2 $ZrO_2$ /냉각수 반응 가시화

$ZrO_2$  용융물의 제트를 자유낙하시켜서 반응용기의 물과 반응시키는 과정 중에 용융물의 제트와 냉각수가 반응하는 과정을 가시화 하고자 하였다. 용융물의 온도가 아주 고온이므로 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 가능하다.

Fig. 5에는 홈 비디오로 촬영한  $ZrO_2$ /냉각수반응 모양인데, 증기 폭발 현상이 발생하기 바로 전의 모양이다. 전체적인 혼합체의 직경은 대략 20cm(한 격자가 10cm)이며 주 용융물제트로 인



Fig. 5 Shape of melt contact with water before explosion

한 혼합체는 대략 직경이 10cm인 것으로 판단된다.

중전의 실험들은 물과 용융물의 반응과정이 압력 용기 내분에서 이루어져서 가시화가 이루어진 자료가 거의 없다. 최근 KROTOS 실험<sup>(6)</sup>에서 가시화가 시도되었으나 용융물과 물의 반응과정을 가시화 한 것은 본 연구가 처음이다. 위의 가시화 자료로부터 알 수 있는 것은, 증기폭발이 발생하기 바로 전까지 용융물이 그 모양을 잘 유지하고 있으며, 용융물의 덩어리가 어느 정도 크기에 도달했을 때 증기 폭발이 발생하는 것을 알 수 있었다. 용융물이 아주 고온이고, 증기 폭발 현상이 1ms 이하의 아주 짧은 시간에 발생하는 현상이기 때문에, 아직까지는 가시화된 자료로부터 공간에 따른 용융물, 기포물, 액체분을 등을 정량화하거나 물리적인 현상을 규명하려면, 이러한 극한 조건에서의 특별한 계측 기법이 개발이 우선되어야 할 것이다. 하지만, 본 연구에서 확보된 가시화 자료 및 기술이 증기 폭발 현상에 대한 정성적인 평가를 하는데 도움을 준다는 측면에서 큰 의의가 있다고 하겠다.

### 3.3 동압 측정

$ZrO_2$ -3, 4, 5, 6 실험에서 동압이 측정되었다. 이 실험들에서는 큰 폭발음이 들렸고, 반응용기가 파손되었다.

Fig. 6과 7은  $ZrO_2$ -4에서 측정된 동압의 시간에 따른 추이를 나타낸 것이다. 하지만, 이 모든 경우에 용기가 파손되었기 때문에 실제 동압은 재

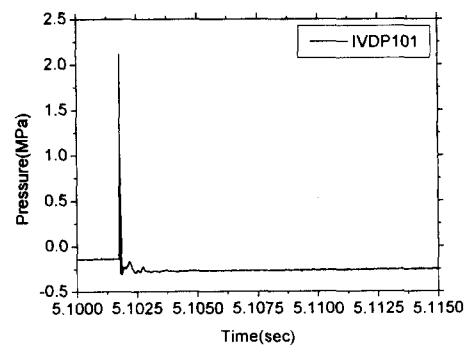


Fig. 6 Dynamic pressure measured in ZrO2-4

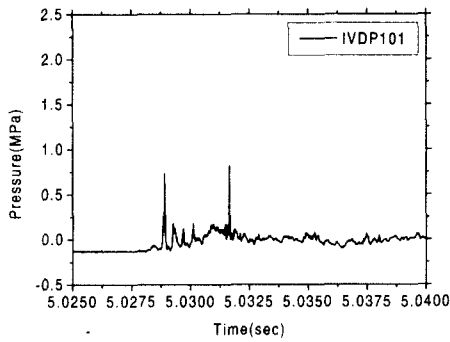


Fig. 7 Dynamic pressure measured in ZrO<sub>2</sub>-5

어진 것 보다 훨씬 클 것으로 판단된다. 6번 실험에서는 철재 프레임에 폴리카보네이트 판을 붙인 용기 대신 벽 두께가 5mm 정도 이고, 바닥 두께가 10 mm인 실린더 형의 스테인레스 스틸 용기에 물을 담아 실험을 수행하였는데, 증기 폭발로 인해 용기가 종이처럼 찢어지고, 동압이 10 MPa로 측정되었다.

ZrO<sub>2</sub>-4 에서 동압의 특징은 그 피크가 2MPa에 이르지만, 폭이 없다. 반면, ZrO<sub>2</sub>-5에서의 동적압력파는 크기는 1.0MPa로 작지만, 동압이 발생된 기간이 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 피크 압력을 밀어주는 팽창 압력파의 크기에 영향을 받음을 알 수 있다.

3.4 하부 용기 온도 및 압력

Table 2에서 보면 자발 증기폭발이 발생한 ZrO<sub>2</sub>-4, 5의 경우 하부 압력용기의 압력 증가분은 0.03 MPa로서 자발증기폭발이 발생하지 않은 ZrO<sub>2</sub>-2, 3의 경우 0.01MPa인것에 비해 매우 크다. 이 두 경우에 대한 비교를 ZrO<sub>2</sub> 2와 5를 중심으로 살펴보자.

Fig. 8, 9 에서는 ZrO<sub>2</sub>-2,5 실험에 대한 시간에 따른 하부압력용기의 대기압력의 시간에 따른 추이를 나타낸 것이다. 자발 증기폭발이 발생한 ZrO<sub>2</sub>-5에서는 그 압력증가분 뿐만 아니라 증가율

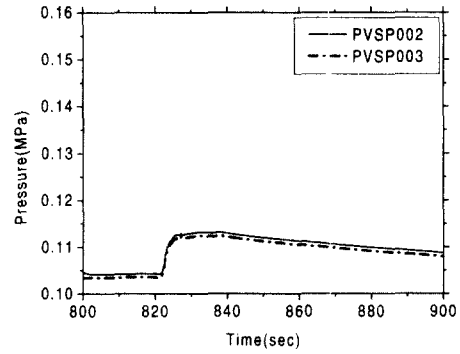


Fig. 8 Static pressure in the containment for ZrO<sub>2</sub>-2

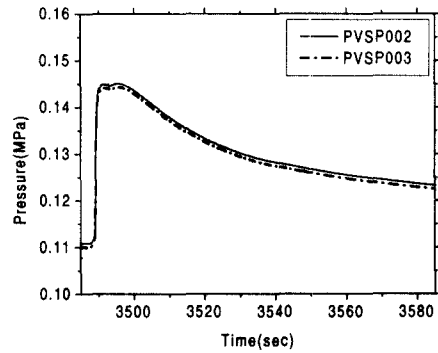


Fig. 9 Static Pressure in the containment for ZrO<sub>2</sub>-5

에 있어서도 그 반응이 매우 격렬함을 알 수 있다. 또한 ZrO<sub>2</sub>-5 대기압력 파형의 피크부분에서는 압력의 급격한 증가 후 약간 감소하였다가 다시 증가하는 것을 보 수 있는데 첫번째 피크는 증기폭발팽창과정으로 인한 대기의 압축과정으로 판단되며, 두번째 피크는 용융물로부터 열전달로 인한 것으로 판단된다.

Table 2와 Fig. 10, 11에서 보여주는 압력용기 대기온도의 추이는 대기압력의 추이와 일관성을 보여주고 있다. Table 2에서 제시된 바와 같이 자발증기폭발이 발생한 ZrO<sub>2</sub>-4,5 실험에서의 대기온도증가분은 25K로 자발증기폭발이 발생하지 않은 ZrO<sub>2</sub>-1,2,3의 15K에 비해 거의 1.7배에 달한다. Fig. 10 에서 ZrO<sub>2</sub>-5의 대기온도증가는

Table 2 Initial conditions and results of tests

TROI test number		Unit	1	2	3	4	5
Melt	Composition UO <sub>2</sub> / ZrO <sub>2</sub> /Zr	[w/o]	0/99/1	0/99/1	0/99/1	0/99/1	0/98/2
	Temperature	[K]	>3373	>3373	>3373	>3373	3900
	Charged mass	[kg]	8.01	8.4	7.8	7.2	6.4
	Initiator mass	[kg]	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Released mass	[kg]	5	5.5	4.88	4.2	2.9
	Initial jet diameter	[m]	0.037	0.052	0.060	0.028	0.038
	Free fall in gas	[m]	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Test Section	Water mass	[kg]	283	283	283	283	283
	Height	[m]	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
	Cross section	[m <sup>2</sup> ]	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42
	Initial temperature	[K]	365	365	323	292	337
	Subcooling	[K]	5	8	50	81	36
Pressure Vessel	Initial pressure(air)	[MPa]	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Free volume	[m <sup>3</sup> ]	8.032	8.032	8.032	8.032	8.032
Results	Maximum PV pressurization	[MPa]	0.02	0.008	0.01	0.03	0.035
	Maximum PV heat-up	[K]	15	20	25	37	40
	Maximum water heat-up	[K]	4	10	10	-	-
	Steam explosion		SS	NO	NO	SE	SE
	Dynamic pressure peak	[MPa]	1	-	-	2.1	0.9
Debris	Total amount	[kg]	2.2	5.5	4.88	4.256	3.02
	Crust(>50mm)	[kg]	0.98	2.54	2.56	1.36	0.62
	Crust(10~20mm)	[kg]	-	-	-	0.76	0.58
	Particle(10~20mm)	[kg]	0.2	2	1.12	0.18	0.04
	Particle-dominated(2~5mm)	[kg]	0.67	0.67	0.77	1.116	0.74
	Particle(710m~2mm)	[kg]	0.15	0.25	0.35	0.54	0.54
	Fine particle(<710 m )	[kg]	0.04	0.04	0.08	0.26	0.5

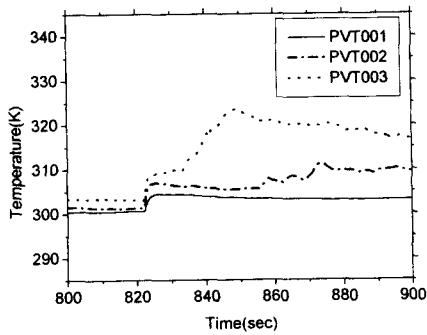


Fig. 10 Containment temperature measured in ZrO<sub>2</sub>-2

ZrO<sub>2</sub>-2에 비해서 매우 빠르다. 특히 ZrO<sub>2</sub>-5의 대기온도는 대기압력과 같이 2개의 피크치를 가지고 있다.

3.5 원자로 물질의 기폭성 평가

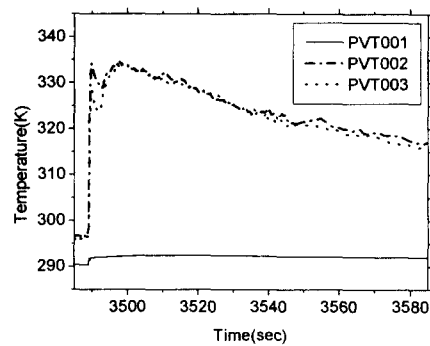


Fig. 11 Containment temperature measured in ZrO<sub>2</sub>-5

코륨을 이용한 KROTOS<sup>(6)</sup> 실험에서는 자발 폭발이 발생하지 않아서, 강제 기폭을 하여 증기 폭발 실험을 수행하였다. 강제 기폭이란 화약 혹은 초 고압의 압축 개스를 사용하여 강제로 압력파를 발생시켜 증기 폭발이 용이하게 일어나도록



유도하는 것이다. 그러나 그 경우에도 증기폭발이 발생하지 않았다. 한편, ZrO<sub>2</sub>와 Zr의 혼합물 1 kg을 이용한 ZREX 실험<sup>(8)</sup>에서는 자발 폭발은 하지 않았지만, 외부기폭을 하였을 경우 증기 폭발이 발생하였다.

일반적으로 금속이 산화물보다 폭발성이 좋으므로, 두 실험의 차이가 Zr의 영향일 것이라고 여겨졌다. 따라서 본 연구에서는 기폭성이 덜 있다고 믿어지는 ZrO<sub>2</sub> 만을 이용하여 증기 폭발 실험을 수행하였다. 본 실험 결과와 추후에 수행될 코틀 실험 결과를 1:1 로 비교하면 용융물의 물성치에 대한 효과를 분명히 볼 수 있기 때문이다.

또한 실제 원자로 조건과 가깝도록, 용융물의 양을 5 kg 정도로 하고, 용융물의 온도도 충분한 과열도를 유지하였고, 용융물과 물의 반응을 1차원적으로 하지 않고 물과 용융물의 반응 과정중 생성되는 증기가 용융물과 물의 반응 영역을 다 채우지 않아서 과냉각수(subcooled water)가 충분히 공급될 수 있도록 하였다.

그런데, 본 연구에서 자발 폭발이 발견되었다는 사실은 원자로 물질이 잘 폭발하지 않을 것이라는 최근의 결론들<sup>(1, 9)</sup>과 배치된다는 점에서 주목할만한 실험 결과이다. 원자로 핵연료 물질은 UO<sub>2</sub>와 ZrO<sub>2</sub>의 혼합물인데, ZrO<sub>2</sub>가 폭발한다면, UO<sub>2</sub>가 증기 폭발을 억제하는 특별한 성질이 있다고 밝혀지기 전에는 원자로 물질의 증기 폭발의 개연성을 시사하고 있기 때문이다. 본 연구와 종전의 연구와 다른 점인 고온의 용융물, 3차원적인 용융물과 냉각수 반응 형태가 자발 폭발의 이유일 것이라는 가능성도 제시한다. 앞으로 코틀에 대한 추가의 시험을 통해 정확한 이유 및 폭발력의 크기에 대해 규명될 것으로 기대된다.

3.6 데브리 모양

물과 용융물의 반응 후, 용융물이 식고 나서 물에 가라앉은 용융물의 데브리를 수거하여, 메쉬를 사용하여 그 크기별 분석을 시도하였다. 그 결과가 Table 2에 제시되어 있으며, 대표적인 크기별 사진이 Fig. 12에 제시되어 있다. 본 실험에서는 대표적으로 2가지 종류의 데브리가 발생되었다. 하나는 껍질형태의 것(Fig. 12.a)이며 또 하

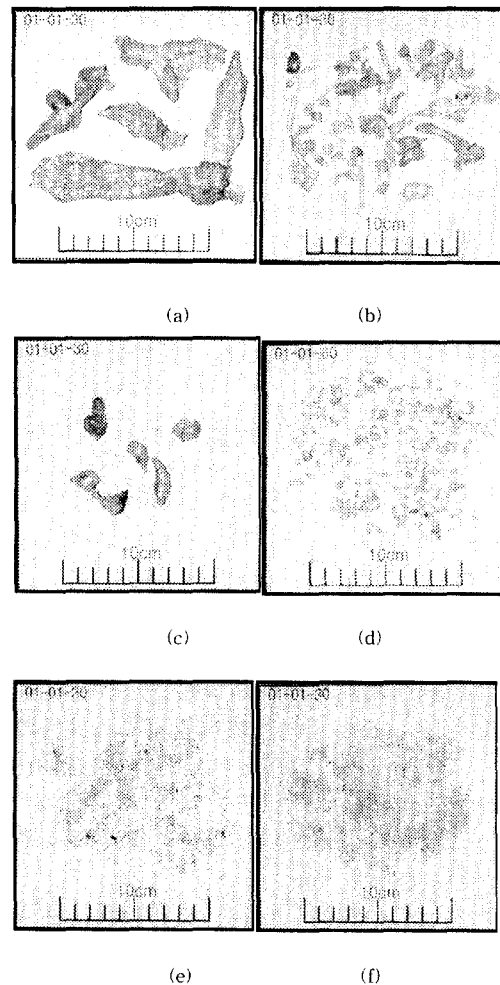


Fig. 12 Debris Configuration ( a. Crust 5-10 cm, b. Crust 1-2 cm, c. Pebble, 1-2 cm, d. Particle: 2-5 mm, e: particle: 2-0.7 mm, f: powder < 0.7 mm)

나는 구형알갱이 형태의 것이다. 폭발이 발생하지 않았을 경우 크기가 5cm 이상인 껍질형태의 것과 크기가 1cm이상인 구형 알갱이형태의 것(Fig. 12.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 2mm 이하의 크기를 가진 작은 구형알갱이(Fig. 12.e) 들이 많이 수집되었으며, 특히 0.7 mm 이하의 분말형태

의 것(Fig. 12.f)들도 매우 많이 수집되었다. 반면에 자발증기폭발이 발생치 않은 경우에 많이 검출되었던 1cm 이상의 큰 알갱이들은 현저히 감소하였으며, 폭발력이 가장 센것으로 판단되는  $ZrO_2$ -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  $ZrO_2$ -4,5에서는 1cm보다 작은 껍질파편이 형성되었다. 이것은 증기폭발 팽창 과정시에 유동이 큰 소라껍질을 부순 것으로 보인다.

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

한편,  $ZrO_2$ /냉각수 반응시 증기폭발이 발생하지 않은 경우 그 데브리 분석결과 1cm이상의 큰 알갱이들이 다량으로 수집되어 기존  $UO_2$ - $ZrO_2$ 를 이용한 실험 결과들<sup>(6,7)</sup>에서 데브리의 분포가 0.5cm이하가 주류인 것과는 대조적이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 "Test for Real cOrium Interaction with water (TROI)" 라고 명명된 노심용융물/냉각수 반응실험을 수행하였다. 이 실험을 위하여 TROI실험장치가 건립되었고, 열수력학적 인자를 측정하는 계측시스템이 구축되었다. TROI실험의 첫번째 시리즈로서 6 회의  $ZrO_2$  실험이 수행되었고 주요 실험 결과로 (1) TROI 실험장치를 이용한  $ZrO_2$ /냉각수 반응에서 자발증기폭발이 발생하였다. (2) 동압, 폭음, 반응용기의 기계적 손상, 대기압력 및 온도 추이, 데브리 분

석 등을 통하여 용융물/냉각수 반응에 대해 일관성 있는 평가를 할 수 있었다.를 들 수 있다.

본 연구에서는 처음으로  $ZrO_2$ /냉각수 반응에서의 자발적인 증기폭발을 관측하였다. 이 실험 결과는  $ZrO_2$ 가 노심용융물의 20%정도를 차지하는 주요 물질인 것을 고려하면  $UO_2$ - $ZrO_2$ /냉각수 반응에서도 자발증기폭발 가능성을 배제할 수 없다는 면에서 주목할만하다. 기존의 코륨을 이용한 실험에서 증기 폭발이 발생하지 않았으므로, 원자로 물질의 경우에 증기 폭발을 고려하지 않아도 될 것이라는 최근의 다소 성급한 결론을 재조명할 필요성을 제시한다.

본 연구에서 소개된 TROI 실험 장치와 시설을 이용하여, 앞으로 코륨을 이용한 실험이 진행된다면 원자로 안전의 주요 미해결 쟁점중의 하나인 원자로 물질의 기폭성 및 그 폭발력에 대해 좀더 명확히 규명될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기과제에서 재정적인 지원을 받았습니다. 이 실험준비를 위해 황인태씨가 수고하셨습니다.

#### 참고문헌

- (1) Bertoud, G., 2000, "Vapor Explosions," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, pp. 573-611.
- (2) Patel, P. D. and Thefanous, T. G., 1981, "Hydrodynamic Fragmentation of drops," *J. Fluid Mech.*, Vol. 103, pp. 207-223.
- (3) Kim, B. J., 1992, "Film Boling Heat Transfer Characteristic in Liquid-liquid system," 대한기계학회논문집, 16(1), pp.87-94.
- (4) Mitchell, D. E., Corradini, M. L., Tarbell, W. W., 1981, "Intermediate Scale Steam Explosion Phenomena: Experiments and Analysis," SAND 81-0124, SNL.
- (5) 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.
- (6) Huhtiniemi, I. and Magallon, D. 1999, "Insight into Steam Explosions with Corium Melts in KROTOS," CD Rom of Ninth International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-9), San Francisco, California, U.S.A.
- (7) Magallon, D. and Huhtiniemi, I., Hohmann H., 1999, "Lessons Learnt from FARO/TERMOS Corium Melt Quenching Experiments," *Nucl. Eng. Des.* 189, pp. 223~238.
- (8) Cho, D. H., 1998, "'Experiment on Interactions between Zirconium-Containing Melt and Water," NUREG/CR-5372, Argonne National Laboratory.
- (9) Speis, T. P. and Basu, S., 1997, "Fuel Coolant Interaction Phenomena in Reactor Safety: Current Understanding and Future Research Needs," *Proceedings of the OECD/CSNI specialist meeting in Fuel Coolant Interactions*, Japan, pp. 23~35.
- (10) Song, J. H. et al, 1999, "Experimental Research on the Multi-dimensional Fuel-Coolant Interaction Using Reactor Material," 한국원자력학회 추계학술대회 발표논문집.
- (11) Cho, C. R., Song, J. H., and Kim, H. D., 2000, "An Assessment of the Integrity of the TROI Vessel under the Steam Explosion Loads," *Proc. of Korean Nuclear Society Meeting*.
- (12) Skerka, R. F., R. A. Hartzell, and Farr, B. J., 1980, "Instability Phenomena during the Heating and Melting of Ceramics," *Journal of Crystal Growth*, 50, pp.783~800.
- (13) Hong, S. W., Min, B. T., Song, J. H., Kim, H. D., and Choi, J. K., 2000, "A Study on the Melting and Release of Refractory Materials using Induction Skull Melting," *Proc. of NTHAS2*. Fukuoka.
- (14) CHINO, IR-A Series Two-Color Radiation Thermometer IR-AQ, No. INE-208.