

**ZrO<sub>2</sub> 와 UO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub> 용융물의 FCI 특성에 대한 실험적 연구**

**An Experimental Study on Fuel-Coolant Interaction Characteristics on ZrO<sub>2</sub> and UO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub> Melt**

김중환, 박익규, 홍성완, 민병태, 신용승, 송진호, 김희동

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

**요 약**

한국 원자력 연구소에서 수행되는 TROI 실험에서는 원자로 노심물질을 사용하여 노심용융물과 냉각수와의 반응에 대하여 알아보고자 한다. 이 실험에서 노심물질로 ZrO<sub>2</sub>나 UO<sub>2</sub>와 ZrO<sub>2</sub>의 혼합물을 사용하였고 그 질량은 5 ~ 10kg이었으며 질량은 향후에 20kg까지 늘릴 예정이다. 이 노심물질을 저온도가니를 이용한 유도가열법에 의해 녹였다. 용융 ZrO<sub>2</sub>를 상온의 냉각수에 떨어뜨린 실험에서는 증기폭발이 두번 일어났고 한번은 일어나지 않았다. 한편 한번의 실험을 수행한 UO<sub>2</sub>와 ZrO<sub>2</sub>의 혼합물과 상온의 냉각수와의 반응 실험에서는 증기폭발이 일어나지 않았다. 이 실험들에서 구한 데이터는 압력용기와 반응용기에서의 정압과 온도 그리고 증기폭발시 발생하는 동압과 하부로의 부하였다. 그리고 ZrO<sub>2</sub>를 사용한 실험에서는 냉각수와의 반응 이후 그 입자의 평균 크기가 약 5cm 정도이었으나, UO<sub>2</sub>와 ZrO<sub>2</sub>의 혼합물을 사용한 실험에서는 그 크기가 약 2 ~ 5mm 정도로 작았다. 그리고 증기폭발의 억제에 영향을 미친다고 알려진 수소 농도를 측정하였으나 그 양이 미미하였다.

**Abstract**

TROI experiments performed at KAERI aim at identifying fuel-coolant interactions (FCI) using real reactor material melts and water. In these experiments, ZrO<sub>2</sub> or the mixture of UO<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub> was used as a molten reactor material, and the mass of the material was 5 ~ 10kg. In the future, the mass will be increased up to 20kg. This reactor material was melted in a cold crucible applying the induction heating method. Steam explosions occurred twice and did not occur once in the TROI tests with ZrO<sub>2</sub>. Meanwhile, a steam explosion happened in the test with the mixture of UO<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub>. The data acquired in the tests were static pressures and temperatures in the pressure vessel and the interaction vessel. Also, in case of a steam explosion, dynamic pressures and dynamic loads to the bottom were obtained. The mean diameter of debris obtained in the FCI test with ZrO<sub>2</sub> was about about 5cm, while that with the mixture of UO<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub> was about 2 ~ 5mm. The concentration of hydrogen which is thought to suppress a steam explosion was measured but it is negligible.

## 1. 서론

원자력 발전소에서 노심이 녹는 중대사고시에 노심용융물과 냉각수와의 반응(Fuel-Coolant Interaction)은 원전의 건전성에 많은 영향을 미친다. 그 중 하나로 용융노심과 냉각수가 폭발적인 반응을 하여 고압의 파괴적인 압력파를 동반하는 경우를 증기폭발(steam explosion or vapor explosion)이라고 한다. 원자로 압력용기 내에서 증기폭발이 일어날 경우에, 압력용기의 상부 뚜껑이 날아가 격납건물을 파손시켜 방사성 물질을 외부에 누출시킬 가능성이 있다. 이러한 사고를  $\alpha$ -mode failure 라고 하며 비록 일어나지 않으리라고 합의되었지만 안전연구에 많은 토론거리가 되어져 왔다. 또한, 노심용융물이 압력용기를 뚫고 원자로 공동(cavity)에 떨어져 증기폭발이 압력용기 밖에서 발생할 경우 이는 직접적으로 압력파가 격납건물의 손상을 가져올 수 있으므로 현재까지도 많은 논란거리가 되고 있고 앞으로도 연구되어야 할 부분이다. 이를 규명하기 위해 세계적으로 많은 연구가 수행되어져 왔는데 실제 노심물질을 사용한 실험과 노심물질의 사용이 기술적, 정치적으로 어려우므로 모사물을 사용하여 수행한 실험이 있다. 전자의 경우 JRC-Ispra 에서 수행한 150kg 의 대량의 노심물질을 사용한 FARO 실험[1,2]과 5kg 미만의 소량의 노심물질 또는 모사물인  $Al_2O_3$  를 사용한 KROTOS 실험[3,4]이 있다. 또한, 노심물질의 하나인  $ZrO_2$  와  $Zr$  을 사용한 ANL 에서 수행한 ZREX 실험[5]이 있다. 후자로써는 SNL 의 FITS 실험[6]과 JAERI 의 ALPHA 실험[7] 등이 있는데 이들은 증기폭발시 그 폭발력을 측정하기 위하여 이루어 졌다. 모사물로는 주로  $Al_2O_3$  를 사용하였는데, 이는  $Al_2O_3$  가 Thermite 반응에 의해 쉽게 얻을 수 있다는 장점과 그 온도(~2400K) 및 산화물이라는 물성이 노심물질과 비슷하여 노심물질을 잘 모사할 수 있었기 때문이다. 그러나 KROTOS 실험의 경우에 보면 비록 노심물질과 모사물이 산화물일지라도 물성치들이 다르기 때문에 그 결과는 대단히 상이하게 나타난다. 또한 KROTOS 실험은 소규모의 축방향 일차원 실험이기 때문에 노심물질과 냉각수의 혼합체가 반경방향으로 퍼져나가는 2 차원 효과를 관측하는데 문제가 있다. 그리고 FARO 실험은 대형 실험이기는 하나, 그 목적이 노심 용융물의 노심에서의 냉각에 관점을 두어 수행되었기 때문에 실험 수행 압력이 고압(5MPa)이다. 그리하여 저압에서 중,대형 규모의 노심물질을 사용한 다차원 증기폭발 실험이 세계적으로 필요하다.

한국원자력연구소에서는 이러한 세계적인 필요에 부응하여 1997 년부터 노심용융물과 냉각수와의 반응실험(Test for Real cOrium Interaction with water : TROI)을 수행하고 있다. 이 실험에서는 최대 20kg 의 용융 노심물질을 대기압 또는 약간 가압(<~5bar)된 반경이 큰 냉각수 풀에 떨어뜨려 증기폭발을 관측하는 것이다. 용융 노심물질로  $UO_2$  와  $ZrO_2$  의 혼합물을 사용하여 그 조성비가 증기폭발에 어떠한 영향을 미치는지 또 용융 노심물질과 냉각수와의 반응시 생성되는 수소가 증기폭발에 어떠한 영향을 미치는지 분석할 예정이다. 그리고 이 실험에서 구한 증기폭발시 열 에너지에서 기계적 에너지로의 변환비(conversion ratio)는 중대사고 전산코드의 입력으로 사용될 예정이다. 또한 증기폭발의 발생을 완화할 수 있는 방법을 찾아 노외 증기폭발의 안전성 문제 해결과 중대사고관리(Severe Accident Management : SAM)의 방법을 제시할 것이다. 본 논문에서는 TROI 실험의 1 단계 수행[8]에 이어 2 단계로  $ZrO_2$  와 냉각수 그리고  $UO_2$  와  $ZrO_2$  혼합물과 냉각수와의 반응 실험 결과에 대하여 논의할 것이다.

## 2. TROI 장치 설명

TROI 실험장치는 그림 1 에 나타나 있다. 실험장치는 용융로, 용융로 보호용기, 슬라이딩밸브, 압력용기와 반응용기 등으로 구성되어 있다. 본 실험에서는 저온유도가열법(cold crucible induction heating method)을 사용하였는데, 이는 도가니 직접가열 용융법이나 Thermite 반응법에 비해 불순물 유입이 훨씬 적다[9].

## 2.1. 용융로

용융로는 저온용융로(cold crucible), 플러그, 펀처 등으로 구성되어 있다. 종래의 Thermite 반응 방법이나, 직접 가열 방법의 단점을 보완하고 비용을 절감하기 위하여 저온용융로 유도가열 방법 [10]을 적용하였다. 저온용융로 방법은 용융점이 높은 내화물질을 용융하고자 할 때, 그 물질의 용융점까지 녹지 않는 재료가 거의 없으므로, 그리고 있다고 해도 그 가격이 매우 비싸므로 도가니를 대체하기 위하여 사용되는 방법이다. 이는 여러 개의 가는(~10mm) 구리관으로 실린더형 도가니 외벽을 형성하고 구리관 속으로 냉각수를 흘린다. 이렇게 만들어진 저온용융로의 내부는 용융하고자 하는 물질의 분말을 채워 유도 가열하여 그 분말을 용융시킨다. 그리하면 용융로 내부에는 고온의 용융물이 존재하지만 냉각수가 흐르는 구리관 표면에는 소결층이 형성되어서 고온의 용융물과 용융로 벽면이 직접 접촉되지 않게 된다. 유도 가열법은 코일에 고주파 전기를 흘리면 그 내부에 자장이 형성되어 코일 내부의 물질에 유도 전류가 흐르게 되는데 이 전류와 내부 물질이 지닌 저항이 결합하여 가열되는 방법이다. 그러나 내부의 물질이 산화물일 경우 상온에서는 비저항이 매우 커 가열되지 않으므로 초기 가열을 위하여 전기가 잘 통하는 탄소나 메탈로 만든 링을 넣어 초기 발화시킨다(susceptor, initiator). 그리하여 내부의 산화물이 녹기 시작하면 비저항이 줄어들어 자체로 가열되어 용융된다.

용융물을 방출하기 위해서는 수냉식 플러그를 사용하였다. 용융로 옆벽은 냉각관으로 구성되어 있기 때문에 용융물질이 빠져 나올 수 없으므로, 용융로 하부에 그 내부에 냉각수가 흐르는 플러그로 막고 있다가 용융물을 방출할 시점에 플러그를 뺀다. 플러그가 빠진 부분에도 마찬가지로 아주 얇은(3~5mm) 용융물질의 소결층이 존재하는데, 이 부분을 공기압을 사용한 펀처로 쳐서 부수면 이 부수진 구멍으로 용융물이 빠져 나오게 된다.

## 2.2. 용융로 보호용기

용융로 보호용기는 용융시키려는 노심물질을 외부와 격리하기 위하여 만들어 졌다. 이 보호용기는 용융물을 압력용기 내부로 방출할 때 이외에는 슬라이딩밸브에 의해 압력용기와 고립되지만 슬라이딩밸브의 고장 등으로 인한 증기폭발의 충격과 혹은 압력증가에 대비하여야 한다. 이러한 이유로 용융로 보호용기도 212°C, 20bar의 설계온도, 압력으로 제작되었다. 또한 용융로에서 나오는 복사열로 보호용기가 가열되는 것을 막기 위해 water jacket 형태로 설치되었다. 그리고 용융물의 온도를 2색 적외선 온도계로 측정하기 위하여 용융로용기 상단부에 직경 4 인치의 관측창을 설치하였으며, 용융로와 같은 위치에 직경 4 인치의 가시창을 설치하여 용융물의 방출여부를 관측할 수 있도록 하였다.

## 2.3. 압력용기

압력용기의 설계 압력은 25 kg의 용융물이 물과 반응하여 순간적으로 수증기를 발생시키는 것으로 하여 계산된 정압에 3 배 안전계수를 곱하여 20 bar 로 결정되었다. 증기폭발의 동하중에 대해서는 용융물의 에너지 45 MJ, 에너지 변환율 3%, 폭발과 3ms 폭을 가지는 삼각파를 가정하여 이 동하중에 대해 측면 및 윗면 안전도를 TNT 등가공식으로 계산하였고, 이 동하중에 의해 용기 하부면이 파손되는 것을 방지하기 위해 ANSI 코드계산에 의해 충분한 두께로 결정되었다[11]. 그리하여 압력용기는 여러 개의 가시창을 가진 내부직경 2000mm, 두께 30mm 인 스테인레스 스틸로 만들어졌다.

## 2.4. 반응용기

지난 실험[8]에서 증기폭발을 충분히 가시화하였기 때문에 이번에는 동적 신호를 자세히 재기 위하여 가시화를 포기하고 강건하고 가시창이 없는 반응용기를 사용하였다. 반응용기는 TROI-6 실험을 위해 내경 400mm, 높이 800mm, 두께 4mm 인 실린더 형태의 스테인레스 스틸로 만들었으나 증기폭발에 의해 용접부가 터져버려서 그 이후의 실험을 위해 다시 내경 600mm, 높이 1500mm, 두께 20mm 인 실린더 형태의 반응용기가 스테인레스 스틸로 만들어 졌다. 주요 구성부는 배출부, 데브리캐처부, 반응부로 구성되어 있다. 냉각수를 배출하기 위한 배출부는 반응용기 하단에서 압력용기 밸브연결 플랜지에 부착되어 있기 때문에 수압외에 압력을 받지 않게 설계되었다. 데브리캐처부는 반응용기 하부에 강철판을 올려놓는 구조인데 반응용기에 투입된 용융물을 담아 수거하고자 하는 것이다. 이 데브리캐처부의 하단은 물로 채워져 있기 때문에 용융물이 냉각수를 통과하는 동안 냉각정도가 낮아도 충분히 열하중을 견딜 수 있다. 반응용기 한 쪽에는 높이 20cm 간격으로 열전대와 동압계를 설치할 수 있는 홀을 설치하였고 반응용기 하부에는 부하를 짊 수 있게 load cell 을 장착하였다.

압력용기와 반응용기에 부착된 계측기의 위치별 이름이 그림 1에 제시되어 있으며 표 1에는 그림 1에 해당하는 위치별 이름이 제시되어 있다. 여기서 PV, IV 는 각각 압력용기와 반응용기를 나타내며 P, T, DP, DL 은 정압, 온도, 동압, 동적부하를 나타낸다.

## 2.5. 계측 장치

동압을 측정하기 위한 압전식 동압센서(piezoelectric charge mode pressure sensor model 112A, Nat'l frequency : 350kHz, Sensitivity : 1pC/psi, PCB PIEZOTRONICS INC) 4 개가 설치되었다. 2 개의 동압센서(10000psi)가 반응용기 벽면(IVDP101, IVDP103)에 설치되어 냉각수 내부의 동압을 측정하였으며, 2 개의 압전식 압력센서(1000psi)를 압력용기 벽면(PVDP001, PVDP002)에 설치하여 압력용기 내부 대기에서 감쇄된 압력파를 측정하였다. 또한 증기폭발시 하부로의 부하를 재기 위해 4 개의 load cell(PCB model 210B50, 50000lb<sub>f</sub>)을 반응용기 하부에 설치하였다(IVDL101, IVDL102, IVDL103, IVDL104). 모든 압력센서는 100kHz 이상의 신호를 계측할 수 있으므로, 모든 동적 신호는 20 μs 간격으로 샘플링하였다.

반응시 압력용기 대기 및 반응용기 냉각수의 온도변화를 측정하기 위하여 총 7 개의 K-type 열전대를 설치하였다. 1.6mm 열전대 3 개를 압력용기(PVT001, PVT002, PVT003) 부위에 설치하였으며 1.0mm 열전대 4 개를 반응용기(IVT101, IVT102, IVT103, IVT104) 부위에 설치하였다. 용융물과 냉각수와의 반응으로 발생하는 압력용기의 압력증가를 측정하기 위하여 압력용기 벽면(PVSP002, PVSP003)에 절대압력계(Druck 사, Model PMP4060, Range:0-35bar)를 설치하여 압력변화를 측정하였다. 이와 같은 정압, 온도 등의 시간에 따른 변화량이 느린 신호는 10ms 간격으로 샘플링하였다.

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

## 2.6. 온도 측정

용융물의 온도 측정은 용융로 보호용기 상단에 설치된 가시창을 통하여 2 색 적외선 온도계로 측정하였다. 용융물의 온도는 대부분 본 실험에서 사용한 적외선 온도계의 측정범위(최대 3100°C)를 벗어나므로 적외선 온도계의 emissivity ratio 를 1.2로 조정하고 다음과 같은 식을 사용하여 의

삼할 수 있었다.

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} + K \ln(\gamma) \quad (1)$$

여기서,  $S, T, K$ , 그리고  $\gamma$ 는 각각 실제 온도, 적외선 온도계로 측정된 온도, 적외선 온도계의 측정상수, 적외선 온도계 설정 emissivity ratio 를 나타낸다. 적외선 온도계의 측정상수는 적외선 온도계를 보정하기 위하여 2000°C 까지 측정된 데이터로부터 구하였다.

### 3. 실험진행순서

먼저 냉각수의 온도를 설정치에 맞추고,  $ZrO_2$  분말이나  $UO_2$  와  $ZrO_2$  혼합물이 담긴 저온용융로를 운전하여 충분히 녹을 때까지 가열한다. 이 때 용융물과 냉각수와의 반응시 발생가스를 측정하기 위해 실험 전에 하부의 압력용기에서 가스를 기준치로 포집을 한다. 용융물이 충분히 생성되면 슬라이딩밸브를 개방하고 용융로의 플러그를 제거한다. 그 다음 펀치를 작동하여 플러그와 용융물 사이에 생긴 소결층을 깨고, 동시에 동적신호를 계측하기 위한 트리거를 발생시킨다. 용융물이 반응용기내부로 완전히 들어갔다고 판단되는 때 슬라이딩밸브를 폐쇄한다. 용융물과 냉각수와의 반응이 끝난 후 발생가스를 측정하기 위해 압력용기에서 실험 후 가스 포집을 한다. 그리고 실험이 종결된 후 압력용기를 열어 데브리를 분석한다.

### 4. TROI 실험결과

TROI 실험은 현재까지 9 번 수행되었다. 여기서는 TROI-6 실험부터 TROI-9 실험까지를 고찰하려고 한다. TROI 실험은 TROI-1 부터 TROI-8 까지 용융물로서 100%  $ZrO_2$  를 사용하였고 TROI-9 실험에서  $UO_2$  와  $ZrO_2$  를 67 : 33 의 비율로 섞어 사용하였다. TROI-6 실험에서 TROI-9 실험까지의 실험 인자와 주요 결과는 표 2 에 나타나 있다.

#### 4.1. TROI-6 실험결과

TROI-6 실험에서는 8.21kg 의  $ZrO_2$  가 유도가열 방식으로 용융되어 그 중 4.23kg 이 상온의 물이 차있는 반응용기로 떨어졌다. 나머지는  $ZrO_2$  피막층 형태로 용융로에 남아있었다. 이 때 강력한 증기폭발이 일어나 반응용기의 용접부가 모두 찢어져 냉각수가 흘러나왔다. 그림 2 는 압력용기에서의 정압 변화를 보여 주는데 급격한 수증기의 발생으로 약 0.02MPa 정도 증가하였다가 수증기의 응축에 의해서 서서히 감소하였다. 그림 3 은 압력용기에서의 온도 변화를 보여주는데 수증기의 영향으로 약 30K 정도 상승하였다. 그림 4 는 반응용기에서의 물온도를 보여주는데 용융물 투입후 물온도가 약 23K 정도 상승하였다. 그러나 반응용기가 찢어져 물이 흘러 나왔으므로 후반부의 데이터는 신빙성이 없다. 그림 5 는 반응용기 내부에서의 동압을 보여주는데 최고치가 12MPa 까지 올라갔다. 이 실험에서 반응용기가 찢어진 것을 고려하면 동압은 그 이상 더 상승하였을 것이라 생각된다. 그림 6 은 압력용기내의 동압을 측정된 것으로 최고치가 0.08MPa 이었다. 이는 반응용기에서 발생한 동압이 기체층을 지나면서 감소하였기 때문이다. 그림 7 은 반응용기 하부로의 동적부하를 보여주고 있는데 센서의 앰프가 제대로 작동하지 않아 24kN 까지만 측정이 되었다.

#### 4.2. TROI-7 실험결과

TROI-7 실험에서는 8.185kg 의  $ZrO_2$  를 용융로에 충전하여 그 중 3.505kg 이 상온의 물이 차있는 반응용기로 떨어졌다. 이 실험에서는 증기폭발이 발생하지 않고 용융물이 냉각되었다. 그림 8 은

압력용기에서의 정압 변화인데 약 0.01MPa 정도 증가하였다가 수증기의 응축에 의해서 서서히 감소하였다. 그림 9 은 압력용기에서의 온도 변화인데 TROI-6 실험 결과와 비슷하게 약 30K 정도 상승하였다. 그림 10 는 반응용기에서의 물온도 변화인데 용융물 투입후 물온도가 약 8K 정도 상승하였다.

### 4.3. TROI-8 실험결과

TROI-8 실험에서는 7.925kg 의  $ZrO_2$  를 충전하여 4.545kg 이 상온의 물이 차있는 반응용기로 떨어졌다. 이 실험에서도 강력한 증기폭발이 일어났다. 그림 11 은 압력용기에서의 정압 변화인데 급격한 수증기의 발생으로 약 0.3MPa 정도 증가하였다. 이 수치는 다른 실험과는 달리 매우 큰 값이다. 그림 12 는 압력용기에서의 온도 변화인데 약 5K 정도 상승하였다. 그림 13 은 반응용기에서의 물온도 변화인데 용융물 투입후 물온도가 약 10K 정도 상승하였다. 그림 14 는 반응용기 내부에서의 동압을 보여주는데 최고치가 4.8MPa 까지 올라갔다. 이 그림에서 보는 바와 같이 이 실험에서는 여러 번의 증기폭발이 짧은 시간 내에 일어났다. 그림 15 은 압력용기내의 동압을 측정 한 것으로 최고치가 0.06MPa 이었다. 그림 16 은 반응용기 하부로의 동적 부하를 보여주고 있는데 이 때에도 센서의 앰프가 제대로 작동하지 않아 24kN 까지만 측정이 되었다. 그리고 용융물과 냉각수의 반응시 수소가 발생하여 증기폭발을 완화시킨다고 알려져 있으므로 이 실험에서는 수소 측정을 하였다. FCI 반응이 일어나기 전의 압력용기 내부의 수소 농도는 320ppm 이고 반응 후에는 459ppm 이었다. 이를 무게로 환산하면 FCI 반응후 수소의 질량은 0.3g 이다. 이 실험에서 미량의 수소가 발생하였으나 물의 해리에 의한 것인지 용융물의 산화에 의한 것인지 확실치 않으며 또한 생성된 수소의 양은 증기폭발을 방지할 정도는 아니었다.

### 4.4. TROI-9 실험결과

TROI-9 실험에서는 14.23kg 의  $UO_2$  와  $ZrO_2$  의 혼합물(코름)을 용융로에 충전하여 그 중 4.325kg 이 상온의 물이 차있는 반응용기로 떨어졌다. 나머지는 녹지 않고  $UO_2$  펠렛으로 남아있거나, 피막층을 형성하고 있었다. 이 실험에서는 증기폭발이 발생하지 않고 용융물이 냉각되었다. 그림 17 은 압력용기에서의 정압 변화인데 약 0.01MPa 정도 증가하였다. 그림 18 은 압력용기에서의 온도 변화인데 약 70K 정도 상승하였다. 그림 19 는 반응용기에서의 물온도 변화인데 용융물 투입후 물온도가 약 7K 정도 상승하였다. 이 실험에서도 압력용기 내의 수소 가스를 측정하였다. FCI 반응이 일어나기 전의 압력용기 내부의 수소 농도는 35ppm 이고 반응 후에는 814ppm 이었다. 이를 환산하면 FCI 반응후 수소의 질량은 0.54g 이다. 이 실험에서도 미량의 수소가 발생하였으나 이것이 증기폭발을 방지하였다고 생각하기는 어렵다. 실험 후에 냉각수에 잠겨 있는 파편층을 조사하였는데, 100%  $ZrO_2$  를 사용하여 실험한 경우와 판이하게 나타났다. 증기폭발을 하지않은  $ZrO_2$  실험에서는 크기가 수 cm 이상인 파편들이 많았으나[8], 표 2 와 그림 20 에서 보는 바와 같이 이 실험에서는 파편의 최대크기가 1cm 정도 이었으며, 전체 파편 무게의 60% 정도가 2 ~ 5mm 에 집중되어 있었다. 이로부터 용융물의 파쇄 과정이 용융물의 물성치에 유관하다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 용융물로  $Al_2O_3$  와 코름을 사용한 KROTOS 실험[4]에서도 일어났었다. 그러나 이 실험에서는 다른 실험들에 비해 용융물의 온도가 많이 낮는데 차후에 용융물의 온도를 높여 실험하여 증기폭발 여부를 알아보아야 할 것이다.

## 5. 결론

TROI-6 실험부터 TROI-9 실험을 수행하면서 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 100%의  $ZrO_2$  용융물을 상온의 냉각수와의 반응시킨 TROI-6, TROI-7 과 TROI-8 실험에서는 증기폭발이 두번은 일어나고 한번은 일어나지 않았다. 증기폭발이 발생할 때는 반응용기에 서의 동압이 12MPa 까지 측정되었다.
- $UO_2$ 와  $ZrO_2$ 의 혼합 용융물을 상온의 냉각수와의 반응을 살펴본 TROI-9 실험에서는 증기폭 발이 관찰되지 않았다.
- TROI-8 과 TROI-9 실험에서 증기폭발을 억제한다고 알려진 수소 농도를 측정하였다. FCI 반 응후 미량(최대 814ppm)의 수소가 발생하였다.
- $ZrO_2$  용융물이 냉각수와 반응할 때 파편의 크기는 약 5cm 이었으나,  $UO_2$ 와  $ZrO_2$ 의 혼합 용 융물이 냉각수와 반응할 때 파편의 크기는 2 - 5mm 이었다..

그러나,  $UO_2$ 와  $ZrO_2$ 의 혼합 용융물과 냉각수와의 반응 실험은 TROI-9 실험 한 번만을 수행하 였으므로 더 많은 실험을 수행하여 체계적인 분석을 하여야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 과제에서 재정적인 지원을 받았습니다.

## 참고문헌

1. D. Magallon, I. Huhtiniemi and H. Hohmann, Lessons learnt from FARO/TERMOS corium melt quenching experiments, Proceedings of final program of CSNI specialist meeting on fuel coolant interactions, JAERI-Tokai, Japan, May 19-21, 1997.
2. D. Magallon and I. Huhtiniemi, Corium melt quenching tests at low pressure and subcooling water in FARO, Proceedings of NURETH-9, San-Francisco, California, U.S.A. October 1999.
3. I. Huhtiniemi, D. Magallon, and H. Hohmann, Results of recent KROTOS FCI tests: Alumina vs. Corium Melts, Proceedings of final program of CSNI specialist meeting on fuel coolant interactions, 6-7, JAERI-Tokai, Japan, May 19-21, 1997.
4. I. Huhtiniemi and D. Magallon, Insight into steam explosions with corium melts in KROTOS, Proceedings of NURETH-9, San-Francisco, California, U.S.A. October 1999.
5. D. H. Cho, D. R. Armstrong and W. H. Gunther, Experiments on Interactions between zirconium-containing melt and water, NUREG/CR-5372, 1998.
6. D. E. Mitchell, M. L. Corradini and W. W. Tarbell, Intermediate scale steam explosion phenomena: Experiments and analysis, SAND81-0124, SNL, 1981.
7. N. Yamano, Y. Maruyama, T. Kudo, A. Hidaka and J. Sugimoto, Phenomenological studies on melt-coolant interactions in the ALPHA program, Nuclear Engineering and Design, Vol.155, pp.369-389, 1995.
8. 박익규 외, TROI 실험장치에서 수행된  $ZrO_2$ /냉각수 FCI 실험, 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집, 2001.
9. 홍성완, 김종환, 김희동, Skull 용융법을 이용한  $UO_2/ZrO_2$  혼합물 용융 가능성 연구, 한국원자력학회 추계학술발표회 논문집, 1998.
10. Edited by E. Kaldis, Current topics in material science, North-Holland Publishing Company, 1978.
11. J. H. Song et al., Experimental research on the multi-dimensional fuel-coolant interaction using reactor material, 한국원자력학회 추계학술발표회 논문집, 1999.

표 1. Sensor description in TROI tests

Name	Description
IVT101, 102, 103, 104	열전대, 1.0mm
IVDP101, 103	동압센서
IVDL101, 102, 103, 104	Load cell
PVSP002, 003	정압계
PVT001, 002, 003	열전대, 1.6mm
PVDP001, 002	동압센서

표 2. Initial condition & results for TROI tests (SE=Steam Explosion)

TROI test number			6	7	8	9
Melt	Composition UO <sub>2</sub> / ZrO <sub>2</sub>	[w/o]	0/100	0/100	0/100	67/33
	Maximum temperature	[K]	4300	4250	4300	3200
	Charged mass	[kg]	8.21	8.185	7.925	14.23
	Released mass	[kg]	4.23	3.505	4.545	4.325
	Free fall in gas	[m]	2.5	2.5	2.5	2.5
Test Section	Water mass	[kg]	84	189	189	254
	Height	[m]	0.67	0.67	0.67	0.90
	Water diameter	[m]	0.4	0.6	0.6	0.6
	Initial temperature	[K]	292	294	297	296
	Subcooling	[K]	81	79	76	77
Pressure Vessel	Initial pressure(air)	[MPa]	0.1	0.1	0.1	0.1
	Free volume	[m <sup>3</sup> ]	8.032	8.032	8.032	8.032
Results	Maximum PV pressurization	[MPa]	0.13	0.11	0.4	0.12
	Maximum PV heat-up	[K]	30	30	5	70
	Maximum water heat-up	[K]	-	8	10	7
	Steam explosion		SE	NO	SE	NO
	Dynamic pressure peak	[MPa]	12	-	4.8	-
Debris	Total amount	[kg]	4.23	3.505	4.545	4.325
	>6.35mm	[kg]	-	-	-	0.09
	4.75mm ~ 6.35mm	[kg]	-	-	-	0.4
	2.0mm ~ 4.75mm	[kg]	-	-	-	2.6
	1.0mm ~ 2.0mm	[kg]	-	-	-	0.815
	0.71mm ~ 1.0mm	[kg]	-	-	-	0.18
	0.425mm ~ 0.71mm	[kg]	-	-	-	0.14
	<0.425mm	[kg]	-	-	-	0.1
H <sub>2</sub> Gas	Before test	[ppm]	-	-	320	35
	After test	[ppm]	-	-	459	814

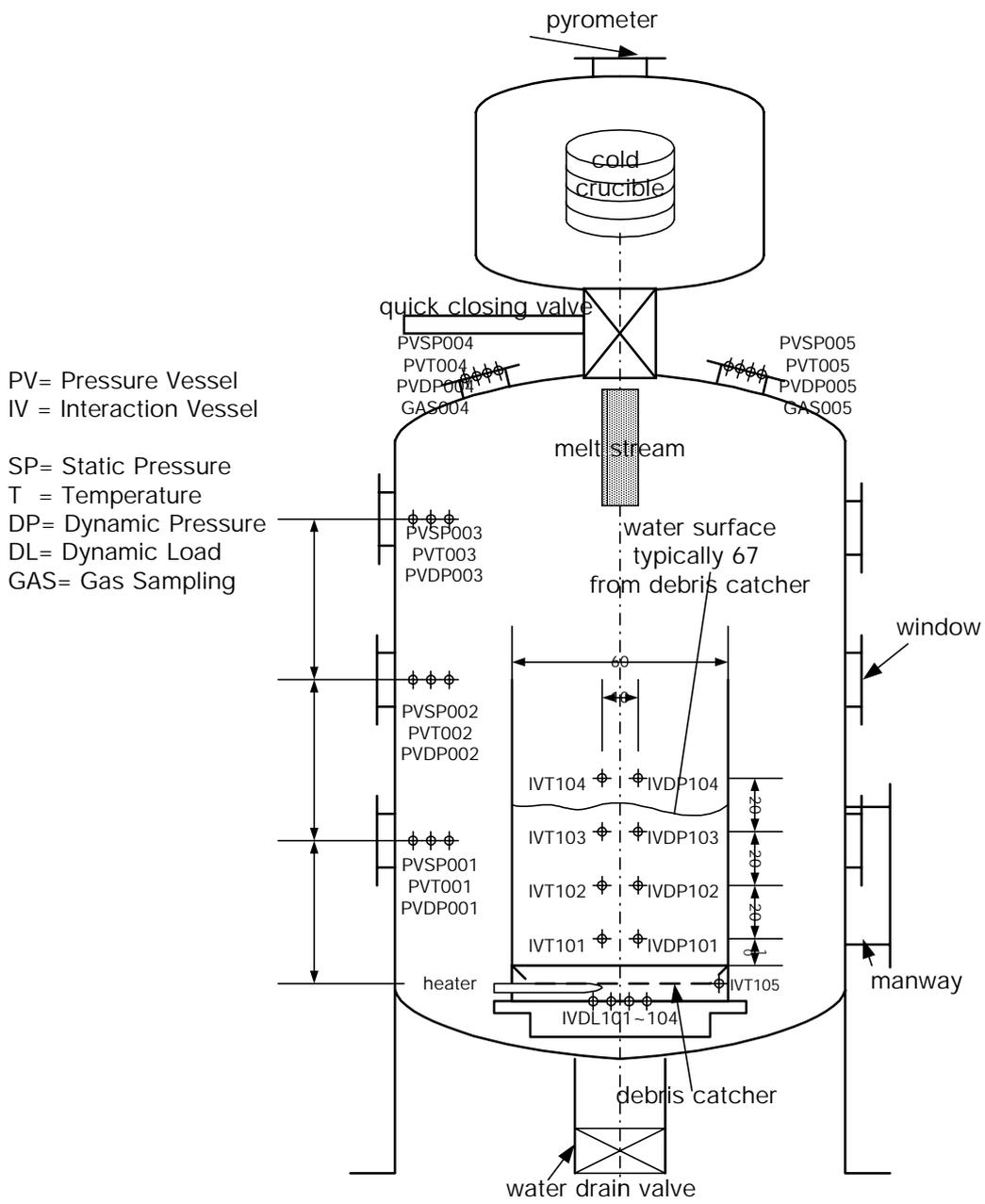


그림 1. Schematic diagram of TROI facility

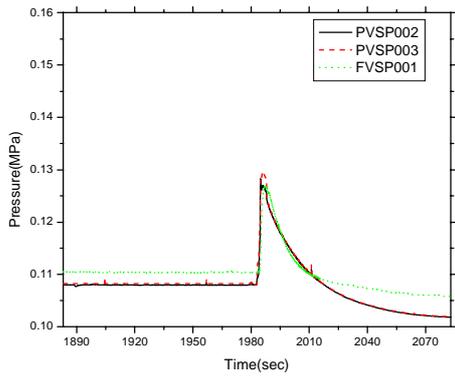


그림 2. Static pressures in the pressure vessel in TROI-6 test

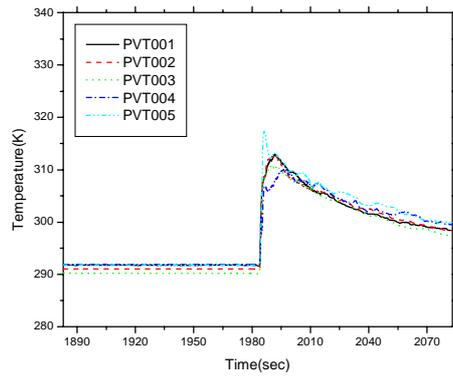


그림 3. Temperatures in the pressure vessel in TROI-6 test

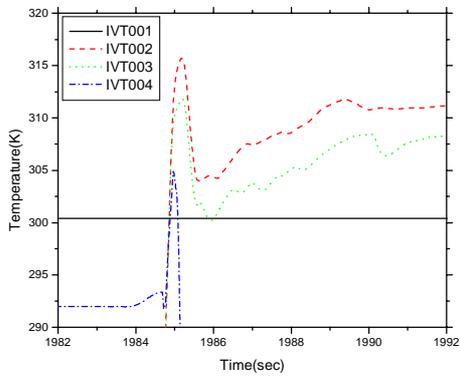


그림 4. Static temperatures in the interaction vessel in TROI-6 test

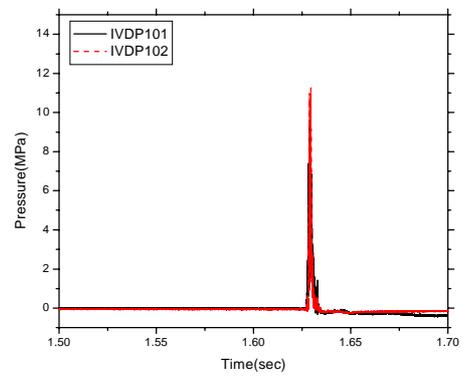


그림 5. Dynamic pressures in the interaction vessel in TROI-6 test

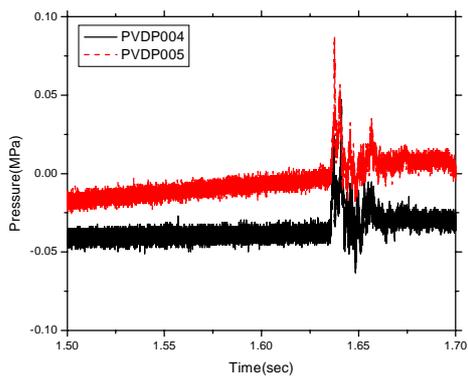


그림 6. Dynamic pressures in the pressure vessel in TROI-6 test

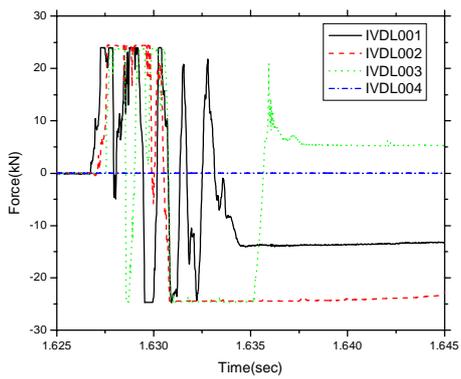


그림 7. Dynamic loads beneath the interaction vessel in TROI-6 test

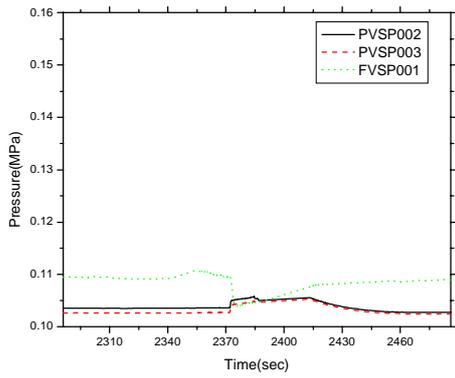


그림 8. Static pressures in the pressure vessel in TROI-7 test

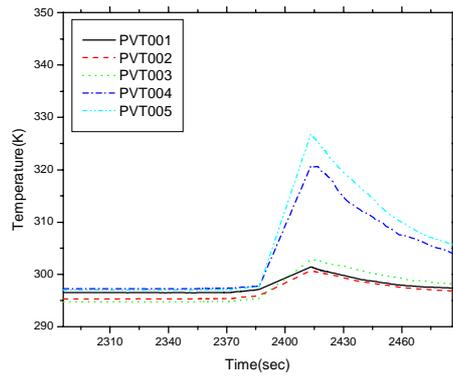


그림 9. Temperatures in the pressure vessel in TROI-7 test

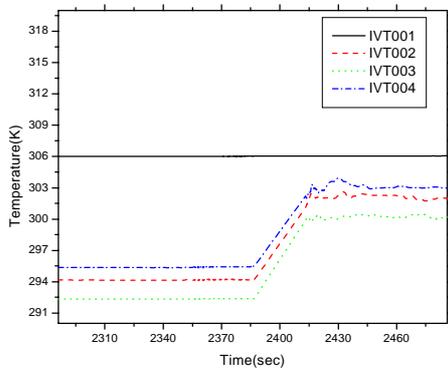


그림 10. Temperatures in the interaction vessel in TROI-7 test

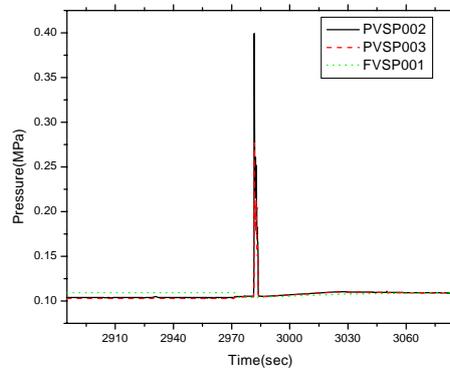


그림 11. Static pressures in the pressure vessel in TROI-8 test

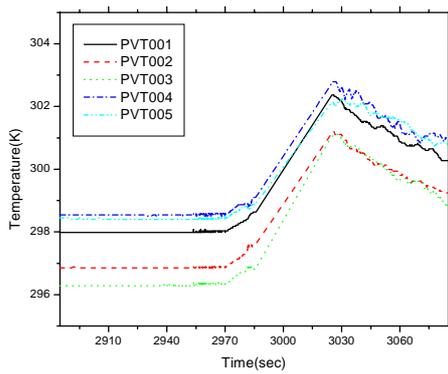


그림 12. Temperatures in the pressure vessel in TROI-8 test

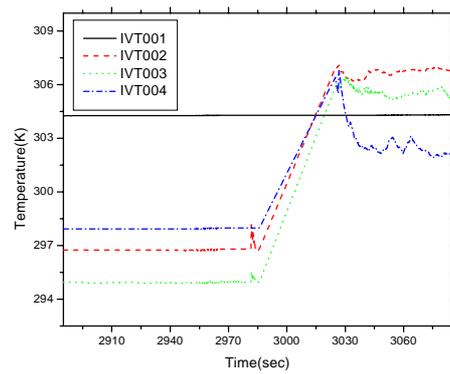


그림 13. Temperatures in the interaction vessel in TROI-8 test

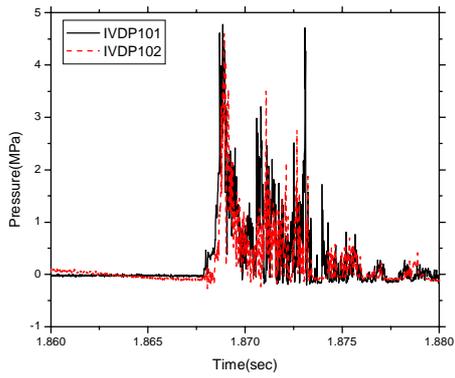


그림 14. Dynamic pressures in the interaction vessel in TROI-8 test

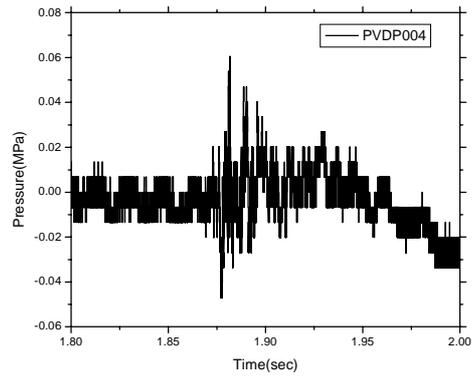


그림 15. Dynamic pressures in the pressure vessel in TROI-8 test

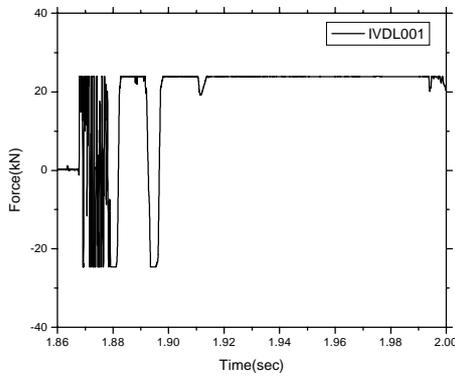


그림 16. Dynamic load beneath the interaction vessel in TROI-8 test

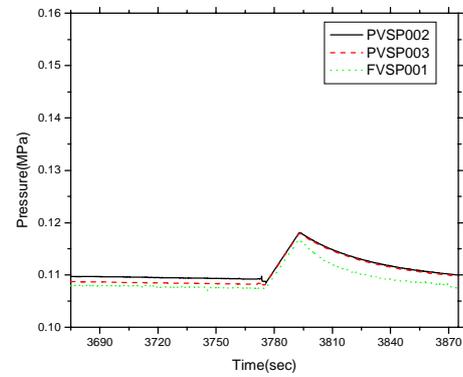


그림 17. Static pressures in the pressure vessel in TROI-9 test

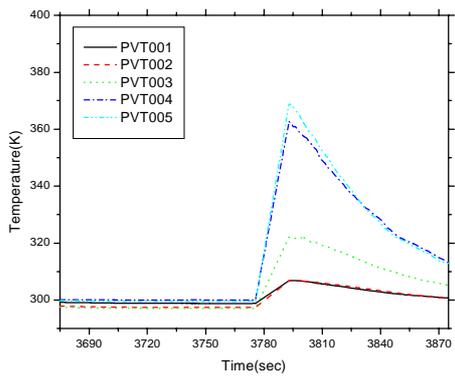


그림 18. Temperatures in the pressure vessel in TROI-9 test

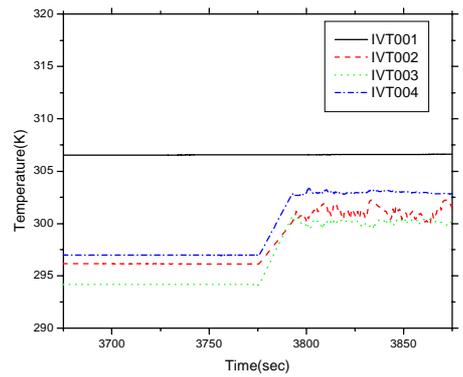
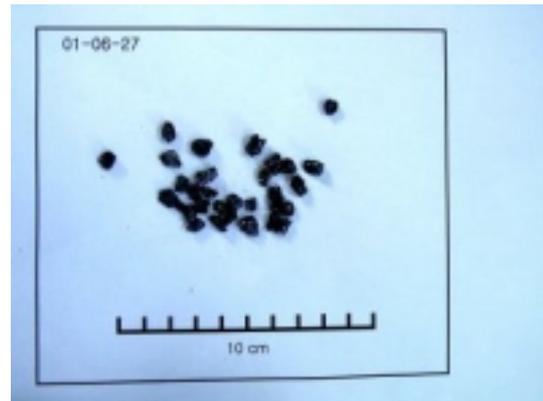


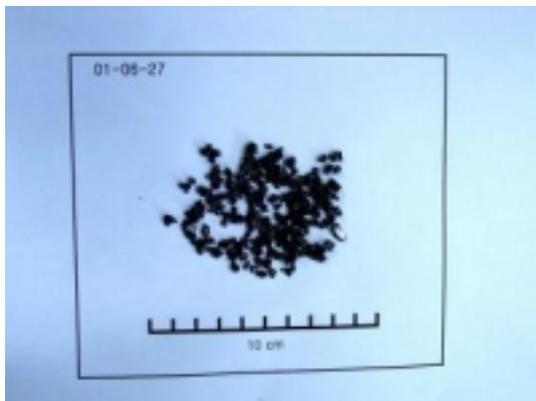
그림 19. Temperatures in the interaction vessel in TROI-9 test



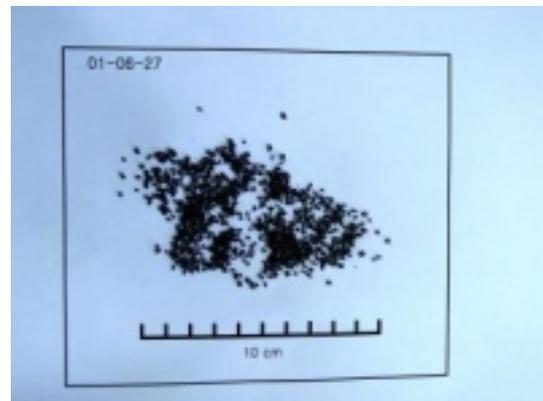
(a) Bigger than 6.35mm



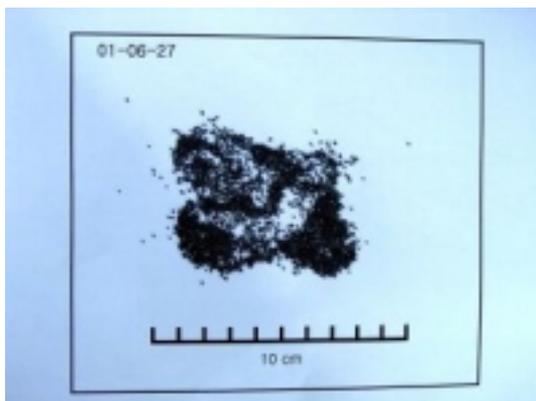
(b) 4.75mm ~ 6.35mm



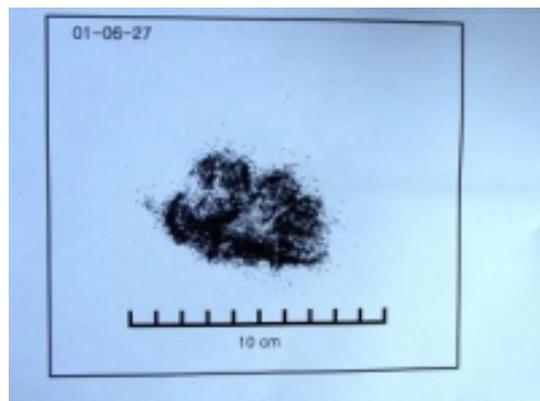
(c) 2.0mm ~ 4.75mm



(d) 1.0mm ~ 2.0mm



(e) 0.71mm ~ 1.0mm



(f) Smaller than 0.425mm

그림 20. Sieved debris collected after FCI in TROI-9 test