2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

최근 TROI 실험에서 증기폭발 발생 유무에 대한 고찰

Observations on Occurrences of Steam Explosions in the Recent TROI Experiments

김종환, 박익규, 홍성완, 민병태, 신용승, 송진호, 김희동

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

최근의 TROI 실험에서는 원자로 노심 용융물질인 코륨과 zirconia 를 사용하여 노심용융물과 냉각수와의 반응시 증기폭발의 발생 유무에 대하여 관찰하였다. 이 실험에서는 용융물로 두 종류의 코륨과 zirconia 를 사용하였다. 두 종류의 코륨의 성분비는 UO_2 와 ZrO_2 이 무게비로 70 : 30 과 80 : 20 이었으며, 그 질량은 5 ~ 10kg 이었다. 이 실험에서 70 : 30 코륨과 zirconia 를 용융물(~5cm 직경)로 대기압, 상온의 냉각수와 반응시키는 경우에는 증기폭발이 발생하여 각각 0.8MP 과 11.5MPa 의 동압이 관측되었고, 또 210kN 과 250kN 이상의 동하중이 각각 관측되었다. 그러나 80 : 20 코륨을 용융물(~2cm 직경)로 실험한 세 경우 증기폭발이 발생하지 않았다. 고속 카메라로 촬영한 사진을 살펴보면, 증기폭발이 일어난 경우 용융물이 연속적인 제트의 형태로 냉각수에 주입되었으나, 증기폭발이 일어나지 않은 경우 용융물이 불연속적인 작은 방울의 형태로 주입되었다. 이로부터, 용융물이 작은 방울의 형태로 주입될 때에는 용융물이 빨리 고화되어서 증기폭발을 억제한 것으로 추정된다.

Abstract

In the recent TROI experiments, the occurrences of steam explosions have been observed using the melt of corium and zirconia. In these experiments, two types of corium melts and a zirconia melt were used as a molten reactor material. The compositions (UO_2 : ZrO_2) of the corium were 70 : 30 and 80 : 20 in weight percent and the mass of the corium was 5 ~ 10kg. In case of the interaction between 70 : 30 corium melt jet (~5cm in diameter) and water at room temperature and at atmospheric pressure, a steam explosion occurred accompanying pressure waves of 0.8MPa and a dynamic load of 210kN. With zirconia melt jet (~5cm in diameter), a more explosive steam explosion occurred accompanying pressure waves of 11.5MPa and a dynamic load greater than 250kN. However, in three cases of the interactions between 80 : 20 corium jet (~2cm in diameter), no steam explosions occurred. From the high-speed photography, a thick continuous melt jet was observed falling down to the water just before a steam explosion while small discrete melt droplets were observed in case of no steam explosion. From this observation, it is concluded that the melt injecting to the water in the form of small discrete droplets was solidified in the air. It is believed to be the cause of the suppression of a steam explosion.

1. 서론

증기폭발은 노심용융 사고에서 기인하는 현상으로 원자로 압력용기나 격납건물의 건전성을 해쳐 방사성 물질을 격납건물 외부로 유출시키고 나아가 대중의 안전을 위협할 수 있는 현상이다. 그리하여 증기폭발은 중대사고 연구에서 중요한 쟁점이 되어왔고, 이에 대한 많은 실험적, 해석적 연구들이 수행되었다. 실험적 연구들로는 소형 실험[1], 중간 규모의 실험[2, 3, 4], 그리고 노심 원물질을 이용한 실험[5, 6, 7], 그리고 폴리머 수용액을 사용하여 증기폭발을 억제하기 위한 실험[8, 9] 등이 있다.

비록 지금까지의 증기폭발 연구에서 많은 소득이 있었지만, 아직까지 증기폭발이 하부반구의 건전성에 영향을 미치는지, 또 코륨이 증기폭발을 일으키는 지에 대한 쟁점이 남아 있다[10]. 지금까지 ANL 의 ZREX 실험[4]이나 JRC-Ispra 의 FARO/KROTOS 실험[5, 6, 7]에서는 zirconia 나 코륨의 자발적인 폭발이 일어나지 않는다고 알려져 왔다. 그러나 원자력 연구소에서 수행한 TROI 실험에서는 zirconia 나 코륨에서 증기폭발이 발생한 경우가 있었다[11, 12, 13]. 그리하여 본 논문에서는 TROI 증기폭발 실험 결과를 기술하고 또 고속 카메라 기법을 이용하여 용융물의 주입 형태에 따른 증기폭발의 발생 유무를 알아 보려고 한다.

2. TROI 장치 및 실험 순서

TROI 실험장치는 그림 1 에 나타나 있다. 실험장치는 용융로, 용융로 보호용기, 슬라이딩밸브, 압력용기와 반응용기 등으로 구성되어 있다. 용융로 보호용기와 압력용기는 212°C 에서 20 기압의 압력을 견디게 설계되었다. 용융로 보호용기는 고온(>3000K)의 용융물을 담는 도가니가 설치되어 있으므로 용융물에서 발생하는 복사열을 지탱할 수 있도록 water jacket 으로 설치되어 있다. 여기에 사용된 가열방법은 유도 가열법으로 출력 150kW, 주파수 50kHz 를 사용하였다.

압력용기와 반응용기에는 많은 계측장비가 설치되어 있다. 압력용기에는 온도 센서, 동압계, 정압계, 가스 포집 장치 및 고속 카메라가 설치되어 있고, 반응용기에는 온도 센서, 동압계 및 동하중 센서가 설치되어 있다. 주요 계측 인자와 사양이 표 1 에 나타나 있다.

용융물의 온도 측정은 용융로 보호용기 상단에 설치된 가시창을 통하여 2 색 적외선 온도계(IRCON 1500~3500°C)로 측정하였다. TROI-14 와 TROI-15 실험에서 용융물의 온도측정은 용융물의 상부 피막층에 미리 만들어 놓은 구멍을 통하여 내부 용융물의 표면온도를 측정하였고, TROI-16 부터 TROI-18 실험까지는 용융물 내부에 한쪽 끝이 막힌 텅스텐 튜브를 설치하여 용융물 내부온도를 간접적으로 측정하였다.

여러 개의 K-type 열전대가 반응용기의 물온도와 압력용기의 대기온도를 재기 위하여 설치되었다. 그리고 압전형 압력계(Piezoelectric pressure transducer, PCB Piezotronics Inc., Model 112A, maximum range: 60MPa 과 20MPa)가 증기폭발시 동압을 재기 위해 반응용기와 압력용기에 각각 설치되었다. 또, 정압계(Druck Co., Model PMP4060, maximum range: 3.5MPa)가 압력용기와 용융로 보호용기에 설치되어 정압을 측정하였다. 데이터 획득 장치로 VXI system(Agilent Technology)을 사용하여 정압이나 온도와 같은 느린 신호와 증기폭발시의 빠른 동적 신호를 한꺼번에 받을 수 있었다. 또 실험의 가시화를 위해 고속 카메라와 홈 비디오 그리고 CCD 카메라를 사용하였다. 고속 카메라는 Phantom V4.0 으로 512×512 pixel 에서 1000 frames/sec 까지 촬영할 수 있었다. 그리고 CCD 카메라를 이용하여 코륨의 용융과정을 감시할 수 있었다.

실험 순서는 먼저 수냉식 도가니에 용융할 물질(코륨이나 zirconia)을 충진한다. 이때 충진한 물질이 산화물이기 때문에 상온에서는 전기전도도가 낮아 유도가열을 받지 않으므로 발화제로 금속 Zr 링을 넣어 둔다. 이렇게 하여 유도가열을 시작하면 Zr 링이 유도 받아 온도가 상승하고, 또 이 링이 산화하여 많은 열을 발생한다. 이때 발생한 열로 주위의 코륨이나 zirconia 가 녹아 전기 전

도도가 급격히 증가하여 유도가열이 가능하게 된다. 유도가열의 영향으로 용융물의 온도가 충분히 상승하여 과열도를 지니면, 수냉식 도가니의 하부면을 구성하고 있던 수냉식 plug 을 공압 실린더를 이용하여 제거한다. 이 때에도 용융물의 하부면이 수냉식 plug 의 영향으로 소결되어 있으므로, 용융물이 흐르지 않는다. 곧 원뿔형의 puncher 를 공압을 이용하여 작동시켜, 소결된 용융물의 하부면을 뚫는다. 이 시점이 모든 동적 신호 수집 및 고속 카메라를 작동시키는 triggering 시간이 된다. 그 이후, 용융물이 반응용기 속의 물 속으로 떨어져 반응을 일으키고, 반응이 끝난 후 파편을 수거하여 파편 분석을 하였다.

3. TROI 실험 결과

코륨과 zirconia 를 용융물로 사용하여 TROI-14 실험부터 TROI-18 실험까지 5 번의 실험을 수행하였다. TROI-14 실험은 UO_2 와 ZrO_2 를 70 : 30 의 비율로 섞어 용융물로 사용하였다. 이때, 수냉식 plug 의 직경과 puncher 의 직경은 각각 8cm 와 6.5cm 였다. TROI-15 실험에서는 zirconia 용융물을 사용하였으며 plug 및 puncher 의 직경은 TROI-14 실험과 같았다. TROI-16 ~ TROI-18 실험에서는 UO_2 와 ZrO_2 의 무게비가 80 : 20 인 코륨을 용융물로 사용하였으며, 그 때의 plug 직경과 puncher 의 직경은 각각 8cm 와 3.5cm 이었다. TROI-14 실험에서 TROI-18 실험까지의 실험 인자와 주요 결과는 표 2 에 나타나 있다.

3.1. TROI-14 실험결과

TROI-14 실험에서는 13.7kg 의 UO_2 펠렛과 ZrO_2 분말의 혼합물(70:30 코륨)을 용융로에 충전하여 그 중 6.545kg 의 용융물이 상온, 대기압의 물이 67cm 까지 차있는 반응용기로 떨어졌다. 나머지는 녹지 않고 UO_2 펠렛으로 남아있거나, 피막층을 형성하고 있었다. 그림 2 는 IRCON 사의 2 색 적외선 온도계로 측정한 용융물의 온도 변화를 나타내는데 용융물 방출 전에 3000K 정도까지 온도가 상승하였다. 그림 3 은 용융물의 방출 모습으로, 연속적인 제트 형태로 방출되었다. 이 용융물 제트는 반응용기 속의 물과 반응하여 증기폭발을 일으켰다. 그림 4 는 증기폭발 시 물속에서의 동압을 보여주는데, 용융물 방출 후(puncher 작동 후) 약 1.23 초만에 0.8MPa 의 동압이 발생하였다. 그림 5 는 반응용기 하부로의 동하중을 보여주며, 최대 약 210kN 의 동하중이 측정되었다. 그림 6 은 압력용기 내에서의 대기의 온도를 보여 주는데, 최대 30K 까지 증가하였다. 이는 용융물의 복사열 및 용융물과 물과의 반응시 생성된 수증기에 의하여 온도가 증가하였으며, 높은 곳에 설치된 열전대에서 더 많은 온도 상승이 있었다. 실험 후에 냉각수에 잠겨 있는 파편층을 조사하였는데 그 결과는 표 2 와 그림 7 에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 파편의 평균 크기는 1 ~ 4.75mm 이었으며(56%), 증기폭발의 영향으로 미세 파편(0.71mm 이하)이 비교적 많이(26%) 발생하였다.

3.2. TROI-15 실험결과

TROI-15 실험에서는 9.5kg 의 ZrO_2 분말을 용융로에 충전하여 그 중 2.280kg 의 용융물이 상온, 대기압의 물이 67cm 까지 차있는 반응용기로 떨어졌으며 나머지는 수냉식 도가니에 피막층을 형성하고 있었다. 그림 8 은 IRCON 사의 2 색 적외선 온도계로 측정한 용융물의 온도 변화를 나타내는데 용융물 방출 전에 3750K 정도까지 온도가 상승하였다. 용융 초기에 보이는 온도 상승은 금속 Zr 링의 산화에 의하여 발생한 것이라 추정된다. 그림 9 는 용융물의 방출 모습으로, 역시 연속적인 제트 형태로 방출되었다. 이 용융물 제트와 반응용기 속의 물이 반응하여 강력한 증기폭발을 일으켰다. 그림 10 은 증기폭발 시 물속에서의 동압으로, 용융물 방출 후 약 1.33 초만에 11.5MPa 의 크기로 발생하였다. 그림 11 은 반응용기 하부로의 동하중으로, 센서의 최대 측정치인 250kN

이상으로 측정되었다. 그림 12 는 압력용기 내에서의 대기의 온도를 보여 주는데, 최대 5K 까지 증가하였다. 이 수치는 TROI-14 실험에 비하여 작은 값인데, 이 실험에서 용융물의 질량이 작고, 또 용융물의 열에너지가 수증기를 생성하기 보다는 기계적 에너지(압력파, 동하중)로 많이 변환되었기 때문이라 생각된다. 실험 후에 파편층을 분석하였으며 그 결과는 표 2 와 그림 13 에 나타나 있다. 그림에서 보는 것처럼 강력한 증기폭발의 영향으로 미세 파편(0.71mm 이하)이 매우 많이 (42%) 발생하였다.

3.3. TROI-16 실험결과

TROI-16 실험에서는 14.0kg 의 80 : 20 코륨(UO_2 : ZrO_2)을 용융로에 충전하여 7.21kg 의 용융물이 상온, 대기압의 물이 67cm 까지 차있는 반응용기로 떨어졌다. 이 실험에서는 증기폭발이 일어나지 않았다. 그림 14 는 IRCON 사의 2 색 적외선 온도계로 측정한 용융물의 온도를 보여준다. 이 실험에서는 한쪽 끝이 막힌 텅스텐 튜브를 실험 전에 코륨 속에 장착하여 용융물이 생성되었을 때 뜨거워진 텡스텐 튜브의 내부 온도를 측정하는 간접 온도 측정방법을 사용하였다. 이렇게 하여 온도측정에 회색체(grey body) 조건을 만족할 수 있었다. 용융물의 온도는 용융물 방출 전에 3250K 정도까지 상승하였다. 이 그림에서 보이는 온도의 갑작스런 감소는, 용융 중에 텅스텐 튜브가 가열되어 미세하게 움직이므로 적외선 온도계의 초점이 튜브의 구멍에 맞지 않아 발생하였다. 그때마다 초점을 다시 맞추어서 온도를 측정하였다. 그림 15 는 반응용기 속의 물의 온도로 용융물이 주입된 후, 온도가 최대 17K 까지 상승하였다. 그림 16 은 압력용기 내에서의 대기의 온도를 보여주는데, 최대 110K 까지 증가하였다. 이 수치는 TROI-14 와 15 실험에 비하여 매우 큰 값인데, 이 실험에서 증기폭발이 일어나지 않아 용융물의 열에너지가 복사열로 전달되거나 혹은 수증기를 생성하여 압력용기 내의 대기 온도가 많이 상승하였으리라 생각된다. 실험 후에 파편층을 분석하였으며 그 결과는 표 2 와 그림 17 에 나타나 있다. 이 실험에서 증기폭발이 일어나지 않았으므로, 미세파편의 양은 거의 무시할 만큼 적고(1%), 6.75mm 이상의 큰 파편들이 많이(45%) 생성되었다.

3.4. TROI-17 실험결과

TROI-17 실험은 TROI-16 실험의 반복 실험으로 수행되었다. TROI-17 실험에서는 16.0kg 의 80 : 20 코륨(UO_2 : ZrO_2)을 용융로에 충전하여 7.855kg 의 용융물이 상온, 대기압의 물이 67cm 까지 차있는 반응용기로 떨어졌다. 그림 18 은 텅스텐 튜브를 용융물에 장착하여 측정한 용융물의 온도를 보여준다. 용융물의 온도는 용융물 방출 전에 3500K 정도까지 상승하였다. 그림 19 는 용융물의 방출 모습으로, 불연속적인 작은 방울들이 물속으로 낙하하는 모습이 발견되었다. 이는 직경이 작은 puncher 를 사용하였기에, 용융물의 방출 구멍이 작아서 생긴 현상이라고 생각된다. 이 실험에서도 증기폭발이 발생하지 않았는데, 이는 작은 용융물 방울들이 물과 접촉하기 전, 쉽게 고화되거나 혹은 고상 온도(solidus temperature)에 가까워 물에 낙하하는 순간 고화되어 증기폭발이 억제된 것으로 보인다. 그림 20 은 반응용기 속의 물의 온도로 용융물이 주입된 후, 온도가 최대 12K 까지 상승하였다. 그림 21 은 압력용기 내에서의 대기의 온도를 보여 주는데, 최대 90K 까지 증가하였다. 그러나 이 수치들은 TROI-16 실험에 비하여, 더 고온의 그리고 더 많은 양의 용융물이 주입되었음에도 불구하고, 작게 나타났다. 아마도 텅스텐 튜브의 위치에 따라 용융물의 온도가 달라질 수 있으므로 온도 측정시에 텅스텐 튜브의 위치선정이 중요하다. 실험 후에 파편층을 분석하였으며 그 결과는 표 2 와 그림 22 에 나타나 있다. 이 실험에서도 증기폭발이 일어나지 않았으므로, 미세파편의 양은 적고(6%), 2mm 이상의 큰 파편들이 많이(77%) 생성되었다.

3.5. TROI-18 실험결과

TROI-18 실험은 TROI-17 실험의 반복 실험으로 수행되었다. TROI-18 실험에서는 16.0kg 의 80 : 20 코륨(UO_2 : ZrO_2)을 용융로에 충전하여 9.055kg 의 용융물이 상온, 대기압의 물이 67cm 까지 차 있는 반응용기로 떨어졌다. 그림 23 은 용융물의 온도를 보여주는데 이는 용융물 방출 직전에 3500K 정도까지 상승하였다. 그림 24 는 용융물의 방출 모습으로, 불연속적인 용융물 방울들이 물 속으로 낙하하는 모습이 발견되었다. 이 실험에서도 증기폭발이 발생하지 않았는데, 이는 TROI-17 실험과 매우 비슷하다. 그림 25 는 반응용기 속의 물의 온도로 용융물이 주입된 후, 온도가 최대 17K 까지 상승하였다. 그림 26 은 압력용기 내에서의 대기의 온도를 보여 주는데, 최대 80K 까지 증가하였다. 실험 후에 파편층을 분석하였으며 그 결과는 표 2 와 그림 27 에 나타나 있다. 이 실험에서도 증기폭발이 일어나지 않았으므로, 미세파편의 양은 매우 적고(5%), 가장 많은 파편의 양(38%)이 발견된 파편의 크기는 2 ~ 4.75mm 이었다.

4. 결론

TROI-14 실험부터 TROI-18 실험을 수행하면서 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 코륨(UO_2 : ZrO_2 = 70 : 30) 용융물을 상온의 물과 반응시킨 TROI-14 실험과 zirconia 용융물을 물과 반응시킨 TROI-15 실험에서 증기폭발이 발생하였으며, TROI-15 실험에서 동압은 최대 11.5MP, 동하중은 250kN 이상으로 측정되었다.
- 코륨(UO_2 : ZrO_2 = 80 : 20) 용융물을 상온의 물과 반응시킨 TROI-16 실험부터 TROI-18 실험까지 에서는 증기폭발이 발생하지 않았다.
- 증기폭발이 발생하였을 때 용융물의 주입 형태는 연속적인 제트 형태이었으며, 증기폭발이 발생하지 않았을 때 용융물의 주입 형태는 불연속적인 작은 방울 형태이었다.

향후에 원자로에서의 중대사고 경우와 비슷한 용융물 주입 형태(직경 ~5cm 의 제트)와 수위(약 150cm) 조건에서 약 20 ~ 30kg 의 코륨 용융물을 상온 및 고온, 그리고 대기압 및 가압 조건의 물과 반응시켜 증기폭발 실험을 수행할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 과제에서 재정적인 지원을 받았습니다.

참고문헌

1. K. MATSUMURA and H. Nariai, “Self-Triggering Mechanism of Vapor Explosions for a Molten Tin and Water System,” *Journal of Nuclear Science and Technology*, **33**, *No.4*, 298-306 (1996).
2. D. E. MITCHELL, M. L. Corradini and W. W. Tarbell, “Intermediate scale steam explosion phenomena: Experiments and analysis,” SAND81-0124, SNL(1981).
3. 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*, **155**, 369~389 (1995).
4. D. H. CHO, D. R. Armstrong and W. H. Gunther, “Experiments on interactions between Zirconium-containing melt and water,” NUREG/CR-5372 (1998).
5. D. MAGALLON, I. Huhtiniemi, and H. Hohmann, “Lessons learnt from FARO/TERMOS corium melt quenching experiments,” *Nuclear Engineering and Design*, **189**, 223-238 (1999).

6. D. MAGALLON and I. Huhtiniemi, “Corium melt quenching tests at low pressure and subcooled water in FARO,” *Nuclear Engineering and Design*, **204**, 369-376 (2001).
7. I. HUHTINIEMI and D. Magallon, “Insight into steam explosions with corium melts in KROTOS,” *Nuclear Engineering and Design*, **204**, 391-400 (2001).
8. M. F. DOWLING, B. M. Ip and S. I. Abdel-Khalik, “Suppression of Vapor Explosions by Dilute Aqueous Polymer Solutions,” *Nuclear Science and Engineering*, 113, 300-313 (1993).
9. K. H. BANG and G. D. Jeun, “Minimum Film Boiling Temperatures for Spheres in Dilute Aqueous Polymer Solutions and Implications for the Suppresion of Vapor Explosions,” *Journal of Korean Nuclear Society*, **27**, *No.4*, 544-554 (1995).
10. J. H. SONG, I. K. Park, Y. J. Chang, Y. S. Shin, J. H. Kim, B. T. Min, S. W. Hong and H. D. Kim, “Experiments on the interactions of molten ZrO2 with water using TROI facility,” *Nuclear Engineering and Design*, 213, 97-110 (2002).
11. **박익규 외**, “TROI **실험장치에서 수행된** ZrO_2/**냉각수** FCI **실험**,” ***한국원자력학회 춘계학술 발표회 논문집*** (2001).
12. **김종환 외**, “ZrO_2 **와** UO_2/ZrO_2 **용융물의** FCI **특성에 대한 실험적 연구**,” ***한국원자력학회 추계학술 발표회 논문집*** (2001).
13. **김종환 외**, “TROI **장치에서 코륨 용융물을 이용한 증기폭발에 대한 실험적 연구**,” ***한국원자력학회 춘계학술 발표회 논문집*** (2002).

표 1. Sensor descriptions in the TROI tests

Parameter	Sensing location	Sensor descriptions
Melt temperature	Top window	IRCON pyrometer (1500 ~ 3500°C)
Coolant temperature	IVT101 ~ IVT103	1.0mm dia., K-type thermocouple
Melt velocity	IVT104 ~ IVT109	0.5mm dia., K-type thermocouple
Dynamic pressure in the coolant	IVDP101 ~ IVDP103	PCB model 112A <60MPa
Dynamic load at the test section bottom	IVDL101	PCB model 210B50 <250kN
Atmosphere temperature in the pressure vessel	PVT001 ~ PVT005	1.0mm dia., K-type thermocouple
Transient pressure in the furnace vessel	FVSP1	Druck model PMP4060 <3.5MPa
Transient pressure in the pressure vessel	PVSP002, PVSP003	Druck model PMP4060 <3.5MPa
Dynamic pressure in the pressure vessel	PVDP004, PVDP005	PCB model 112A <20MPa
Gas Sampling for Hydrogen detection	GAS005	Gas sampling bottle
FCI phenomena visualization	13 windows available	30pps videos and 1000pps video

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

	TROI test number	Unit	14	15	16	17	18
Melt	Initial Charge Composition UO_2 / ZrO_2 /Zr	[w/o]	69/30/1	0/99/1	79/20/1	79/20/1	79/20/1
	Temperature	[K]	3000	3750	3250	3500	3500
	Charged mass	[kg]	13.7	9.5	14.0	16.0	16.0
	Initiator mass	[kg]	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Released mass	[kg]	6.545	2.280	7.210	7.855	9.055
	Plug diameter	[cm]	8	8	8	8	8
	Puncher diameter	[cm]	6.5	6.5	3.5	3.5	3.5
	Free fall in gas	[m]	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
Test Section	Water mass	[kg]	189	189	189	189	189
	Initial Height	[cm]	67	67	67	67	67
	Final height	[m]	-	-	-	-	-
	Cross section	[m^2]	0.283	0.283	0.283	0.283	0.283
	Initial temperature	[K]	285	290	288	286	288
	Sub-cooling	[K]	88	83	85	87	85
Pressure Vessel	Initial pressure(air)	[MPa]	0.105	0.104	0.1	0.11	0.116
	Free volume	[m^3]	8.032	8.032	8.032	8.032	8.032
Results	Maximum PV pressurization	[MPa]	0.015	0.007	0.7	0.027	0.015
	Time to reach peak	[sec]	2	3	<1	4	8
	Maximum PV heat-up	[K]	30	5	110	90	80
	Time to stabilize	[sec]	<1	30	20	<1	<1
	Maximum water heat-up	[K]	12	41	17	12	17
	Time to reach peak	[sec]	<1	20	15	4	4
	Steam explosion		SE	SE	NO	NO	NO
	Dynamic pressure peak	[MPa]	0.8	11.5	-	-	-
	Duration	μsec	0.5ms	0.25ms	-	-	-
	Impulse	kN	210	>250	-	-	-
	Duration	μsec	13ms	10ms	-	-	-
Debirs	Total	[kg]	6.545	2.280	7.210	7.855	9.055
	>6.35mm	[kg]	0.290	0.465	3.285	2.365	1.670
	4.75mm ~ 6.35mm	[kg]	0.455	0.135	1.420	1.125	1.415
	2.0mm ~ 4.75mm	[kg]	2.525	0.275	1.740	2.600	3.455
	1.0mm ~ 2.0mm	[kg]	1.145	0.330	0.560	1.070	1.595
	0.71mm ~ 1.0mm	[kg]	0.475	0.120	0.125	0.275	0.440
	0.425mm ~ 0.71mm	[kg]	0.630	0.245	0.080	0.300	0.405
	<0.425mm	[kg]	1.025	0.710	0.000	0.120	0.075
H_2 gas	Before/After the interaction	[ppm]	93/1200 &331	4/3	83/1000	50/789	98/15
	Mass	[g]	0.79	0.002	0.66	0.52	0.01

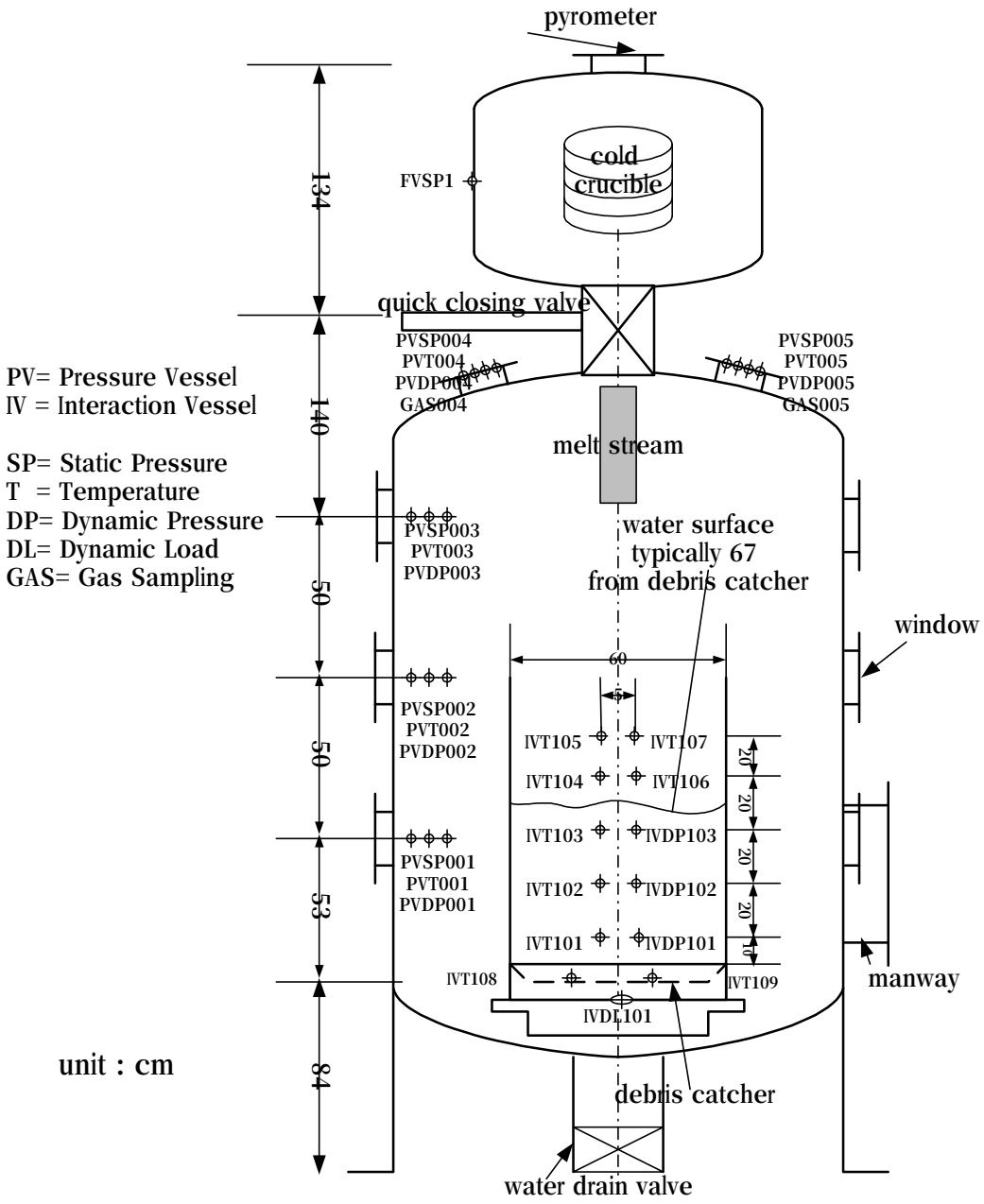

그림 1. Schematic diagram of TROI facility

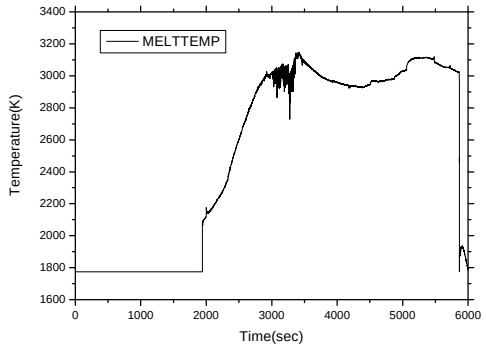

그림 2. Melt temperature in the TROI-14 test

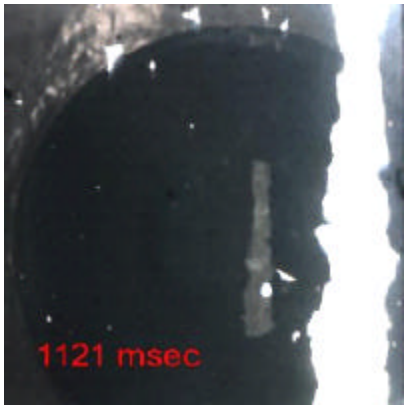

그림 3. Photograph of melt injection in the TROI-14 test

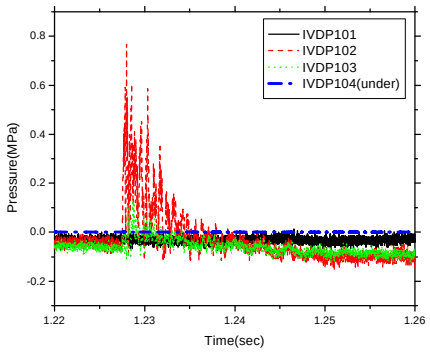

그림 4. Dynamic pressures in the interaction vessel in the TROI-14 test

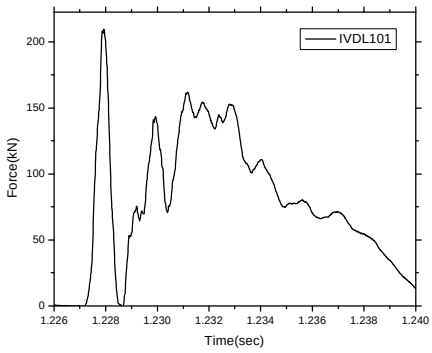

그림 5. Dynamic load onto the interaction vessel in the TROI-14 test

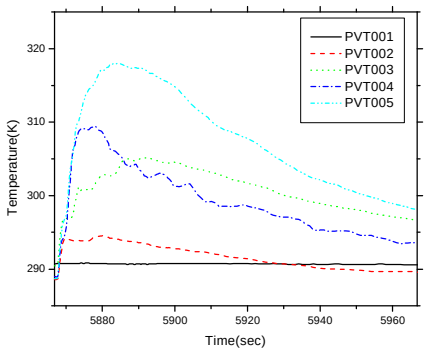

그림 6. Temperatures in the pressure vessel in the TROI-14 test

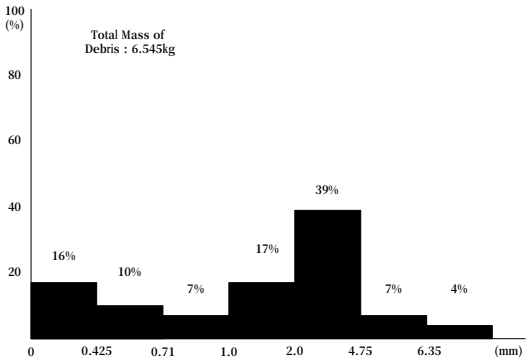

그림 7. Sieved debris distribution in the TROI-14 test

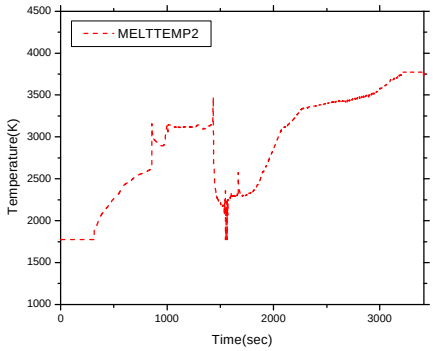

그림 8. Melt temperature in the TROI-15 test

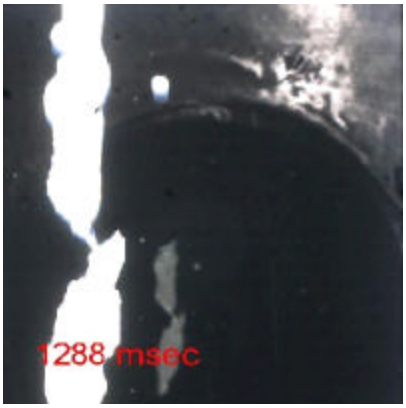

그림 9. Photograph of melt injection in the TROI-15 test

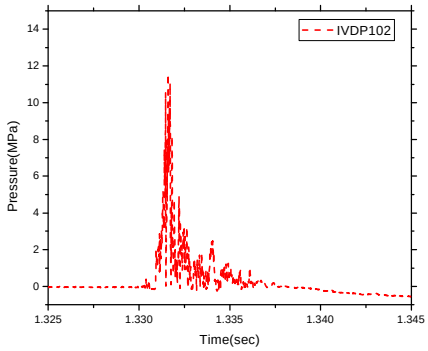

그림 10. Dynamic pressures in the interaction vessel in the TROI-15 test

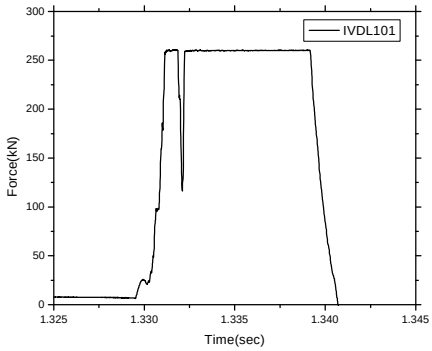

그림 11. Dynamic load onto the interaction vessel in the TROI-15 test

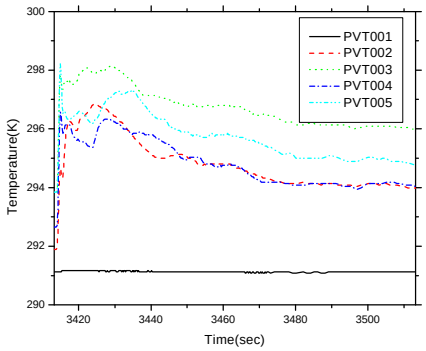

그림 12. Temperatures in the pressure vessel in the TROI-15 test

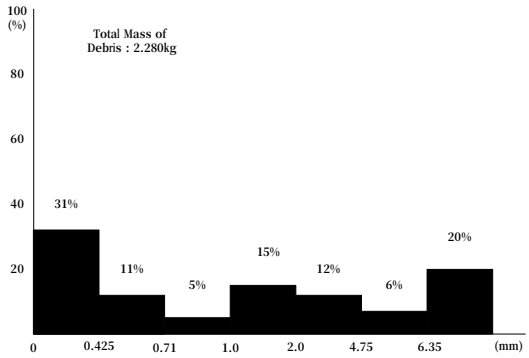

그림 13. Sieved debris distribution in the TROI-15 test

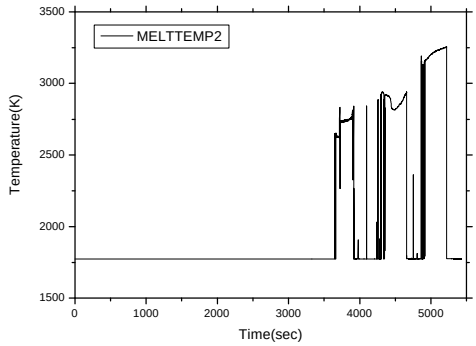

그림 14. Melt temperature in the TROI-16 test

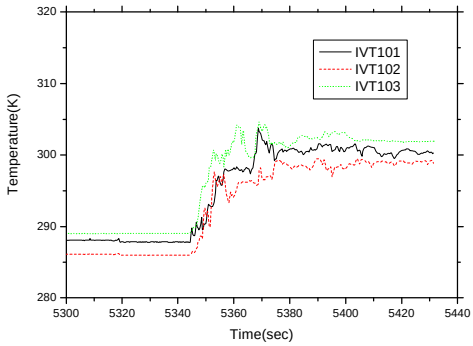

그림 15. Water temperatures in the interaction vessel in the TROI-16 test

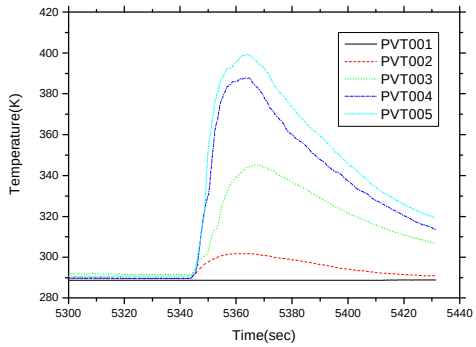

그림 16. Temperatures in the pressure vessel in the TROI-16 test

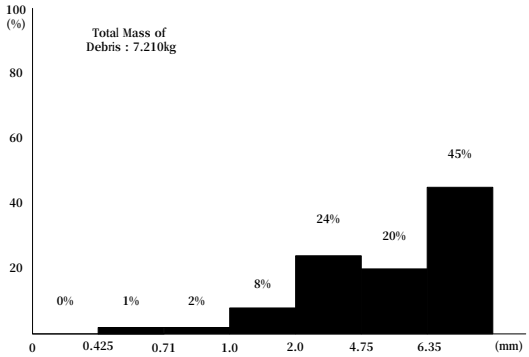

그림 17. Sieved debris distribution in the TROI-16 test

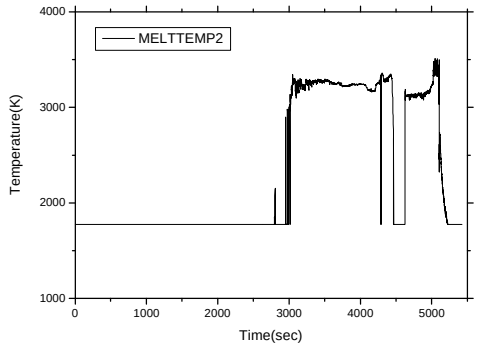

그림 18. Melt temperature in the TROI-17 test

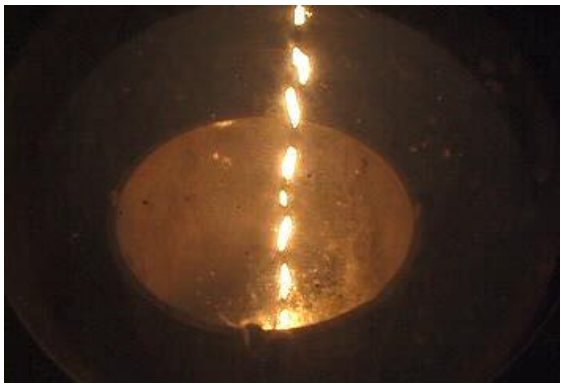

그림 19. Photograph of melt injection in the TROI-17 test

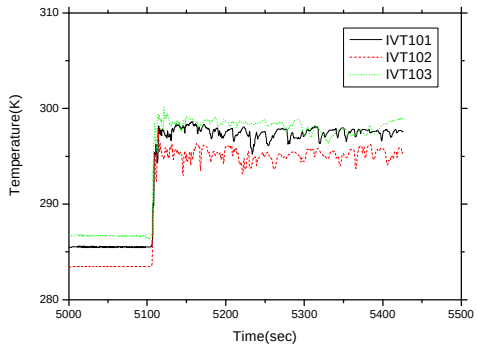

그림 20. Water temperatures in the interaction vessel in the TROI-17 test

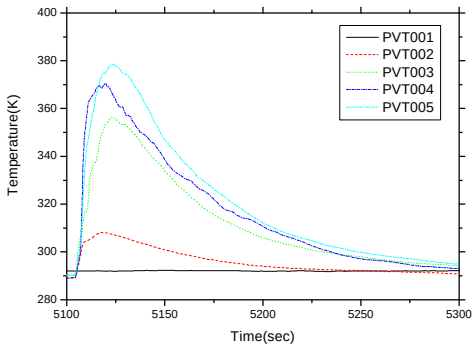

그림 21. Temperatures in the pressure vessel in the TROI-17 test

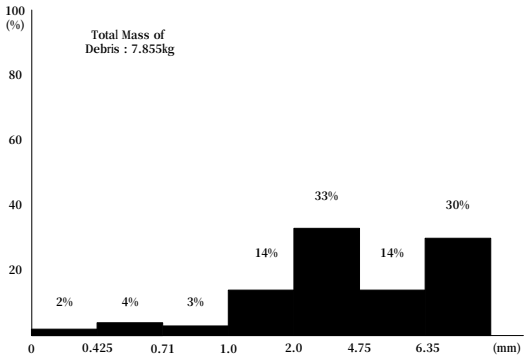

그림 22. Sieved debris distribution in the TROI-17 test

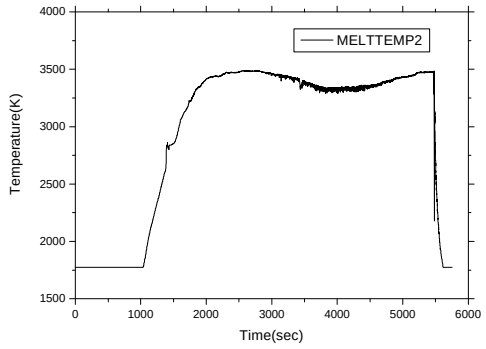

그림 23. Melt temperature in the TROI-18test

그림 24. Photograph of melt injection in the TROI-18 test

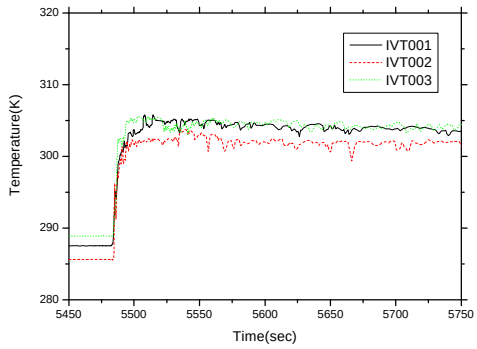

그림 25. Water temperatures in the interaction vessel in the TROI-18 test

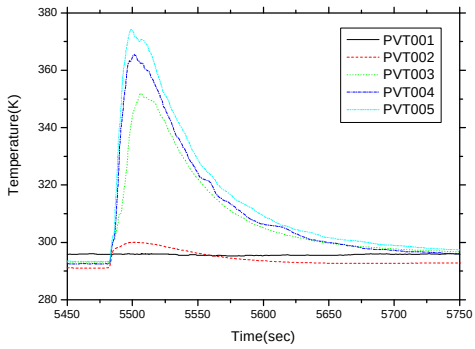

그림 26. Temperatures in the pressure vessel in the TROI-18 test

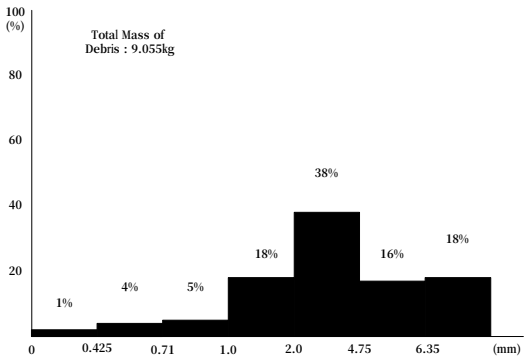

그림 27. Sieved debris distribution in the TROI-18 test