2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

TROI 실험에서 외부기폭에 의한 증기폭발 현상 연구

Phenomenological Studies of Steam Explosions Triggered by an External Trigger in the TROI Experiment

김종환, 박익규, 홍성완, 민병태, 송진호, 김희동

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

용융물과 냉각수가 반응할 때 발생하는 증기폭발은 자발적으로 일어날 수도 있지만 외부의 기폭요인에 의하여 일어나는 수도 있다. 이러한 현상을 연구하기 위하여 TROI 실험에서는 코륨 용융물을 냉각수와 반응시킬 때, 자발적인 기폭이 일어나기 전에 외부에서 기폭하여 증기폭발을 유도하였다. 이 논문에서는 자발적인 증기폭발과 외부기폭에 의한 증기폭발에 대한 실험 하나씩을 기술하였다. 외부기폭장치로는 화약(PETN 1g)을 사용하였으며, 이 장치는 성공적으로 증기폭발을 기폭시켰다. 이 실험에서 최대 15.0MPa 의 동압과 180kN 의 동하중을 얻었다.

Abstract

A steam explosion resulting from an interaction between molten material and coolant may occur not only spontaneously, but also externally by external triggering factors. In order to study this phenomenon, an external trigger was applied to the TROI steam explosion experiment. The external trigger led to a triggered steam explosion, as it was applied before a possible triggering of a spontaneous steam explosion. In this paper, both a spontaneous steam explosion test and a triggered steam explosion test using an external trigger are described. An explosive (PETN 1g) was used as the external trigger and it successfully triggered a steam explosion. From this triggered steam explosion test, the maximum dynamic pressure and dynamic load recorded 15.0MPa and 180kN, respectively.

1. 서론

원자로에서 노심이 녹는 중대사고 발생시 용융노심이 냉각수와 반응하여 증기폭발을 일으킬 수 있으며 이로 인해 원자로 압력용기와 격납건물이 손상되어 방사성 물질을 격납건물 외부로 유출시키고 나아가 대중의 안전을 위협할 수도 있다. 그리하여 증기폭발은 중대사고 연구에서 중요한 쟁점이 되어왔고, 이에 대한 많은 연구들이 수행되어 왔다. 실험적 연구들로는 소규모의 실험[1], 중간 규모의 실험[2, 3, 4], 그리고 노심 원물질을 이용한 실험[5, 6, 7], 그리고 증기폭발을 억제하기 위한 방법을 모색한 실험[8, 9, 10] 등이 있다.

지금까지의 증기폭발 연구에서 많은 소득이 있었지만, 아직까지 코륨이 증기폭발을 일으키는지, 그렇다면 열에너지에서 기계적 에너지로의 변환률이 얼마인지 등에 대한 쟁점이 남아 있다[11]. 코륨의 기폭성에 대해서는 지금까지 ANL 의 ZREX 실험[4]이나 JRC-Ispra 의 FARO/KROTOS 실험[5, 6, 7] 등이 있으며 이 연구에서는 zirconia 나 코륨의 자발적인 폭발이 일어나지 않는다고

알려져 왔다. 그러나 원자력 연구소에서 수행한 TROI 실험[12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]에서는 zirconia 나 코륨 용융물이 자발적으로 증기폭발을 일으킨 경우가 있었다. 그리고 자발적인 증기폭발이 일어나지 않은 경우라도 원자력발전소에서 중대사고시에는 외부요인에 의하여 증기폭발이 발생할 수 있으므로, 외부에서 강제기폭하여 발생하는 증기폭발에 대하여 연구할 필요성이 있다. 이 논문에서는 화약을 외부기폭장치로 사용하여 강제기폭시켜서 발생하는 증기폭발에 대하여 논하려 한다.

2. TROI 장치 및 실험 순서

TROI 실험장치는 그림 1 에 나타나 있다. 실험장치는 용융로, 용융로 보호용기, 슬라이딩밸브, 압력용기와 반응용기 등으로 구성되어 있다. 용융로로는 고온(>3000K)의 용융물을 담을 수 있게 수냉식 도가니(Cold crucible)를 사용하였다. 여기에 사용된 가열방법은 유도 가열법으로 가열로의 최대 출력은 150kW, 주파수는 50kHz 이다. 이 논문에 논술된 코륨 용융물의 구성비는 모두 UO_2 와 ZrO_2 가 무게비로 70 : 30 이었다.

압력용기와 반응용기에는 많은 계측장비가 설치되어 있다. 압력용기에는 온도 센서, 고정식 동압계, 정압계, 가스 포집 장치 및 고속 카메라가 설치되어 있고, 반응용기에는 온도 센서, 고정식 동압계, underwater dynamic pressure sensor 및 동하중 센서 설치되어 있다. 반응용기로는 두 종류가 사용되었는데, 하나는 가로와 세로 60cm, 높이 120cm, 두께 1cm 인 폴리카보네이트 판으로 세면이 구성된 가시화 반응용기로 TROI-33 실험에 사용되었고, 다른 하나는 직경 60cm, 높이 150cm, 두께 2cm 의 강건한 철제 원통형 반응용기로 TROI-34 실험에 사용되었다. 가시화 반응용기에는 그 특성상 동하중 센서와 외부기폭장치인 화약을 설치하지 않았다. 외부기폭장치인 화약은 한국화약에서 주문제작한 PETN 1g 으로 철제 원통형 반응용기의 벽면에, 바닥면으로부터 15cm 상부에 설치하였다. 화약은 코륨 용융물이 냉각수를 지나 바닥면에 닿는 시점(자발폭발 시점)보다 먼저 폭발하여 자발적인 증기폭발을 방지하고 외부기폭을 가능하게 하였다. 화약은 설정된 시간에 current pulse generator 로부터 40V, 6A 의 전력을 받아 폭발한다. TROI-34 실험에 사용된 주요 계측 인자와 사양이 표 1 에 나타나 있다.

용융물의 온도측정은 용융로 보호용기 상단에 설치된 가시창을 통하여 2 색 적외선 온도계(IRCON 1500~3500°C)로 측정하였다. TROI-33 과 TROI-34 실험에서는 용융물 내부에 한쪽 끝이 막힌 텅스텐 튜브를 설치하여 회색체 조건(grey-body condition)에서 용융물과 텅스텐 튜브가 열평형을 이루게 하여 용융물의 내부온도를 간접적으로 측정하였다.

여러 개의 K-type 열전대가 반응용기의 물온도와 압력용기의 대기온도를 측정하기 위하여 설치되었다. 그리고 고정식 압전형 압력계(Piezoelectric pressure transducer, PCB Piezotronics Inc., Model 112A, maximum range: 60MPa 과 20MPa)가 증기폭발시 동압을 재기 위해 반응용기와 압력용기의 벽면에 각각 설치되었으며, 또 반응용기 벽면에서의 동압 외에도 물속에서의 동압을 측정하기 위해 물속에 떠 있는 underwater dynamic pressure transducer(PCB Model W138A26, maximum range : 160MPa)를 설치하였다. 또, 정압계(Druck Co., Model PMP4060, maximum range: 3.5MPa, Rosemount model 1511: 2.0MPa)가 압력용기와 용융로 보호용기에 설치되어 정압을 측정하였다. 그리고, 증기폭발시 반응용기 하부로의 동하중을 측정하기 위해 동하중계(PCB Model W217B, maximum range : 500kN)를 반응용기 하부에 설치하였다. 데이터 획득 장치로 VXI system(Agilent Technology)을 사용하였다. 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 반응용기에 화약을 설치하고 냉각수를 원하는 위치까지 채운다. 그리고, 수냉식 도

가니에 용융할 물질(코륨)을 충전한다. 이때 충전한 물질이 산화물이기 때문에 상온에서는 전기전도도가 낮아 유도가열을 받지 않으므로 발화제로 금속 Zr 링을 넣어 둔다. 이렇게 하여 유도가열을 시작하면 Zr 링이 유도받아 온도가 상승하고, 또 이 링이 산화하면서 많은 열을 발생한다. 이때 발생한 열로 주위의 코륨이 녹아 전기 전도도가 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 하부로 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 물속으로 떨어지고, 반응용기 바닥에 닿기 전, 지정된 시간에 current pulse generator 로부터 전력을 받아 화약이 폭발하고, 이 폭발이 증기폭발을 기폭시킨다. 반응이 끝난 후 발생 수소의 분석을 위해 내부 기체를 포집하며, 파편을 수거하여 파편 분석을 하였다.

3. TROI 실험 결과

무게비로 70 : 30 인 코륨(UO_2 : ZrO_2) 용융물을 사용하여 TROI-33 실험과 TROI-34 실험을 수행하였다. TROI-33 실험에서는 약 12.230kg 의 용융물을 수심 67cm 의 사각 가시화용 반응용기 속에 채워져 있는 상온의 냉각수에 낙하시켰다. 이 실험에서는 폭약을 사용한 외부기폭을 하지 않았으며, 자발적인 증기폭발이 일어났다. TROI-34 실험에서는 용융 코륨 10.520kg 을 강건한 철제 반응용기에 67cm 의 깊이로 채워져 있는 과냉도 32K 의 냉각수에 떨어뜨려 반응시켰다. 이 때 용융물이 반응용기 바닥에 닿기 전인 펀처가 도가니 하부의 소결층을 뚫은 후 1.17 초에 폭약을 이용한 강제외부기폭을 시켰다. TROI-33 실험과 TROI-34 실험의 실험 조건과 주요 결과는 표 2 에 나타나 있다.

3.1. TROI-33 실험결과

TROI-33 실험에서는 18.880kg 의 UO_2 펠렛과 ZrO_2 분말의 혼합물(70:30 코륨, UO_2 : ZrO_2)을 용융로에 충전하고 용융하였다. 그 중 약 12.230kg 의 용융물이 대기압, 상온의 물이 67cm 의 수심으로 채워져 있는 반응용기로 낙하하였다. 나머지 코륨은 용융로에 피막층 형태로 남아 있었다. 이 실험에서는 한 변의 길이가 60cm 인 사각 가시화 반응용기를 사용하였고, 강제외부기폭을 하지 않았으며 자발 증기폭발이 발생하였다. 그림 2 는 IRCON 사의 2 색 적외선 온도계로 측정한 용융물의 온도를 나타내는데, 용융물의 온도는 최대 3700K 까지 증가하였으나, 그 이후 코륨 속의 불순물에서 발생하는 가스로 인하여 온도측정이 잘 이루어지지 않았다. 용융물이 펀처의 작동에 의하여 방출될 때(동적 신호의 trigger 시간, t = 0.000 초) 시간은 용융시작 후 6781.6052 초이었다. 그림 3 은 고속 카메라로 촬영한 증기폭발의 자발적인 기폭 모습으로 용융물이 반응용기 바닥에 닿을 때에 발생하였다. 그림 4 는 반응용기 중앙에 설치되어 있는 열전대에서 발생한 신호로 용융물이 그 열전대들을 지나면서 온도가 상승하는 것을 보여준다. 반응용기의 바닥에 설치된 IVT201 과 IVT205 열전대의 온도가 상승하는 시간이 각각 6782.925 초와 6782.905 초로 이는 또 다시 동적신호의 triggering 이후의 시간으로 환산하면 각각 1.32 초와 1.30 초가 된다. 상기의 두 열전대는 약간의 거리를 두고 설치되어 있으므로 용융물이 먼저 도달한 시간을 바닥에 처음 접촉하는 시간으로 생각하면 동적신호의 triggering 후에 반응용기의 바닥에 도달하는 시간을 1.30 초라고 할 수 있다. 이 시간은 강제외부기폭 실험에서 외부기폭 시간을 결정하는데 참고자료로 사용되었다. 그림 5 는 자발적인 증기폭발이 일어났을 때, 물속에서 측정된 동압을 보여주는데 최대 9.0MPa 의 동압

이 관측되었다. 이 실험에서는 IVDP103 과 UWDP101 의 두 압력계만 작동을 하였으며, UWDP101 의 최대 압력이 먼저 그리고 높게 나타난 것은 이 압력계가 폭발지점에 더 가까이 설치되었기 때문으로 생각된다. 그림 6 은 그림 5 의 동압 그림을 bubble growth 의 측면에서 다시 구성하여 그린 것이다[19]. UWDP101 의 신호에 의하면 강력한 압력파가 생성되기 전에 4 번 정도의 압력신호 변동이 발생하였는데, 이는 용융물과 냉각수가 반응할 때 반복적인 bubble 의 생성과 파괴 과정이 있었다고 보여진다. 그리고 동적신호의 수집 후 1.2705 초에 강력한 압력파가 생성되었는데, 이것은 bubble 이 깨어지면서 강력한 증기폭발을 유도한 것으로 생각된다. 이 bubble 은 UWDP101 부근에서 생성 후에 파괴되어 강력한 동압을 기록하였으며, 벽에 부착된 IVDP103 에도 신호가 도달하였으나 거리가 멀어 그 강도는 약하였다. 동적신호 수집 후 1.2745 초에 IVDP103 에서 약 3MPa 의 동압신호가 측정되었으며, 또한 UWDP101 에서도 약한 신호가 측정되었는데, 이는 다른 bubble 이 IVDP103 부근에서 폭발을 일으켰기 때문이라 생각된다. 이 실험에서는 동하중계를 설치하지 않아 동하중을 측정하지 못하였다.

3.2. TROI-34 실험결과

TROI-34 실험에서는 지름 60cm 인 실린더형 철제 반응용기를 사용하여 실험을 수행하였다. 이 실험에서는 10.520kg 의 용융물이 반응용기 속의 32K 과냉도, 대기압의 수심 67cm 의 물과 반응하였다. 그림 7 은 적외선 온도계로 측정한 용융물의 온도 변화를 나타내는데 최고 3670K 까지 상승하다가 발생가스의 영향으로 적외선 온도계의 온도측정이 방해를 받았다. 이 실험에서 용융물의 방출은 용융 시작 후 5409.832 초에 이루어졌다. 그림 8 은 용융로에서 방출된 용융물의 선단을 보여준다. 이 실험에서 폭약을 이용한 강제외부기폭은 용융물 방출 후 1.17 초에 이루어지도록 설정하였다. 그림 9 는 물속에서 측정한 동압신호를 보여준다. 이 그림에서 외부기폭에 의한 압력파가 최고 9.0MPa 의 크기를 갖고 1.1775 초에 나타났으며, 그 이후 1.1782 초에 15.0MPa 의 크기를 지닌 증기폭발에 의한 압력파가 관측되었다. 이 실험에서 설정한 강제기폭시간과 그것에 의한 압력파가 발생하는 시간에 약간의 차이가 있는데, 이는 강제기폭시간을 조절하는 타이머의 부정확도에 의한 것으로 생각된다. 그리고 외부기폭장치를 사용한 실험에서 발생하는 외부기폭에 의한 압력파를 calibration 하는 실험을 동일한 반응용기에서 용융물의 주입없이 수행하였으며, 그 결과는 그림 10 에 나타나 있다. 이 실험에서는 동적신호 수집후 1.27 초에 폭약이 폭발하게 타이머를 설정하였다. 그림 10 에서 보는 것처럼 1.285 초에 동압이 측정되었으며, 그 최대치는 약 10MPa 이었다. TROI-34 실험과 calibration 실험에서 폭약을 사용한 외부기폭에 의한 압력파의 크기와 time delay 에 큰 차이가 없으므로 이 신호를 외부기폭에 의한 신호라고 생각하였다. 그림 11 은 TROI-34 실험에서 반응용기 하부로의 동하중을 보여주는데, 최대 180kN 의 동하중이 14ms 의 폭으로 발생하였다. 이 그림에서 강제외부기폭에 의한 동하중이 1.1776 초에 한번 발생하였고 그 이후 증기폭발에 의한 동하중이 비교적 길게 발생하였다.

4. 결론

TROI-33 실험과 TROI-34 실험을 수행하면서 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 70 : 30 코륨(UO_2 : ZrO_2)을 사용한 자발폭발 실험에서 용융물이 반응용기 바닥에 닿을 때 증기폭발이 발생하였다.
- 자발폭발이 일어나기 전에 화약을 이용한 강제외부기폭 실험에서 증기폭발이 유도되었다.
- 강제외부기폭을 시행한 실험에서는 강제기폭에 의한 동압과 동하중이 관측되었으며, 그 후

에 증기폭발에 의한 동압과 동하중이 관측되었다. 이 때 증기폭발의 최대 강도는 동압과 동하중이 각각 15.0MPa 과 180kN 으로 나타났다.

이상에서 증기폭발은 자발적으로 그리고 외부기폭에 의해서도 발생할 수 있으므로 자발적인 증기폭발이 일어나지 않는 다른 성분비의 코륨에 대해서도 강제외부기폭을 수행하여 그 폭발성을 알아보아야 한다. 그리고 원자로에서 실제 중대사고 조건인 가압 조건하에서 증기폭발 실험을 수행하여 증기폭발 발생 여부를 알아보려 한다.

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. K. M. BECKER and K. P. Lindland, “The Effects of Surfactants on Hydrodynamic Fragmentation and Steam Explosions,” KTH-NEL-50, RIT in Sweden(1991).
9. 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).
10. 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).
11. 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).
12. J. H. SONG, I. K. Park, Y. S. Sin, J. H. Kim, S. W. Hong, B. T. Min and H. D. Kim, “Spontaneous Steam Explosions Observed In The Fuel Coolant Interaction Experiments Using Reactor Materials,” *Journal of Korean Nuclear Society*, **33**, *No. 4*, 344-357 (2002).
13. 박익규 외, “TROI 실험장치에서 수행된 ZrO_2/냉각수 FCI 실험,” *한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집* (2001).
14. 김종환 외, “ZrO_2 와 UO_2/ZrO_2 용융물의 FCI 특성에 대한 실험적 연구,” *한국원자력학회 추계학술 발표회 논문집* (2001).
15. 김종환 외, “TROI 장치에서 코륨 용융물을 이용한 증기폭발에 대한 실험적 연구,” *한국원자력학회 춘계학술 발표회 논문집* (2002).

16. 김종환 외, “최근 TROI 실험에서 증기폭발 발생 유무에 대한 고찰,” *한국원자력학회 추계학술 발표회 논문집* (2002).
17. 김종환 외, “TROI 실험에서 냉각수의 수심과 용융물 성분이 증기폭발에 미치는 영향에 관한 연구,” *한국원자력학회 춘계학술 발표회 논문집* (2003).
18. 김종환 외, “TROI 실험에서 코륨의 성분비 변화가 증기폭발 발생에 미치는 영향,” *한국원자력학회 추계학술 발표회 논문집* (2003).
19. Private discussions with Dr. Lloyd S. Nelson at the SNL.

표 1. Sensor descriptions in the TROI-34 test

Parameter	Sensing location	Sensor description
Melt temperature	Top window	IRCON pyrometer (1500 ~ 3500°C)
Coolant temperature	IVT101 ~ IVT103	0.5mm, Thermocouple
Dynamic pressure in the coolant	IVDP101 ~ IVDP103	PCB model 112A <60MPa
Under-water dynamic pressure	UWDP101 ~ UWDP102	PCB model W138A26 <160MPa
Dynamic load at the test section bottom	IVDL101	PCB model W217B <500kN
Ambient temperature in the pressure vessel	PVT001 ~ PVT005	1.0mm, Thermocouple
Static pressure in the furnace vessel	FVSP001	Rosemount model 1511 <2.0MPa
Static pressure in the pressure vessel	PVSP004, PVSP005	Druck model PMP4060 <3.5MPa
Dynamic pressure in the pressure vessel	PVDP004, PVDP005	PCB model 112A <20MPa
Melt velocity	IVT201 ~ IVT208	0.5mm, Thermocouple
Gas Sampling for Hydrogen detection	GAS005	Gas sampling bottle
FCI phenomena visualization	13 windows available	30pps videos and 1000pps video

표 2. Initial conditions & results of the TROI tests

	TROI test number	Unit	33	34
Melt	Initial Charge Composition UO2 / ZrO2 /Zr	[w/o]	69/30/1	69/30/1
	Temperature	[K]	3700 (max)	3670 (max)
	Charged mass	[kg]	18.880	17.130
	Initiator mass	[kg]	0.15	0.15
	Released mass	[kg]	12.230	10.520
	Plug/puncher diameter	[cm]	8.0/6.5	8.0/6.5
	Initial jet diameter	[cm]	8.0	8.0
	Free fall in gas	[m]	3.8	3.35
Test Section	Water mass	[kg]	241	189
	Initial height	[cm]	67	67
	Final height	[cm]	58	37
	Cross section	[m2]	0.36	0.283
	Initial temperature	[K]	296	341
	Sub-cooling	[K]	77	32
Pressure Vessel	Initial pressure(air)	[MPa]	0.116	0.110
	Initial temperature	[K]	296	307
	Free volume	[m3]	8.023	8.023
Results	Maximum PV pressurization	[MPa]	0.042	0.048
	Time to reach peak	[sec]	3	2.5
	Maximum PV heat-up	[K]	50	51
	Time to stabilize	[sec]	40	11
	Maximum water heat-up	[K]	40	21
	Time to stabilize	[sec]	40	10
	Steam explosion		SE	SE
	Dynamic pressure peak	[MPa]	9.0	15.0
	Duration	msec	0.4	0.1
	Impulse	kN	-	180
	Duration	msec	-	14
Debris	Total	[kg]	12.230	10.520
	>6.35mm	[kg]	0.030	0.320
	4.75mm ~ 6.35mm	[kg]	0.240	0.535
	2.0mm ~ 4.75mm	[kg]	1.090	4.170
	1.0mm ~ 2.0mm	[kg]	3.080	1.885
	0.71mm ~ 1.0mm	[kg]	1.110	0.840
	0.425mm ~ 0.71mm	[kg]	3.065	1.300
	<0.425mm	[kg]	3.615	1.470
H2 gas	Before/After the interaction	[ppm]	4/2	2/10
	Mass	[g]	0.001	0.007
Timing	Time to reach the bottom	[sec]	1.30	1.36
	Time to trigger externally	[sec]	-	1.17

***** SE : Steam Explosion

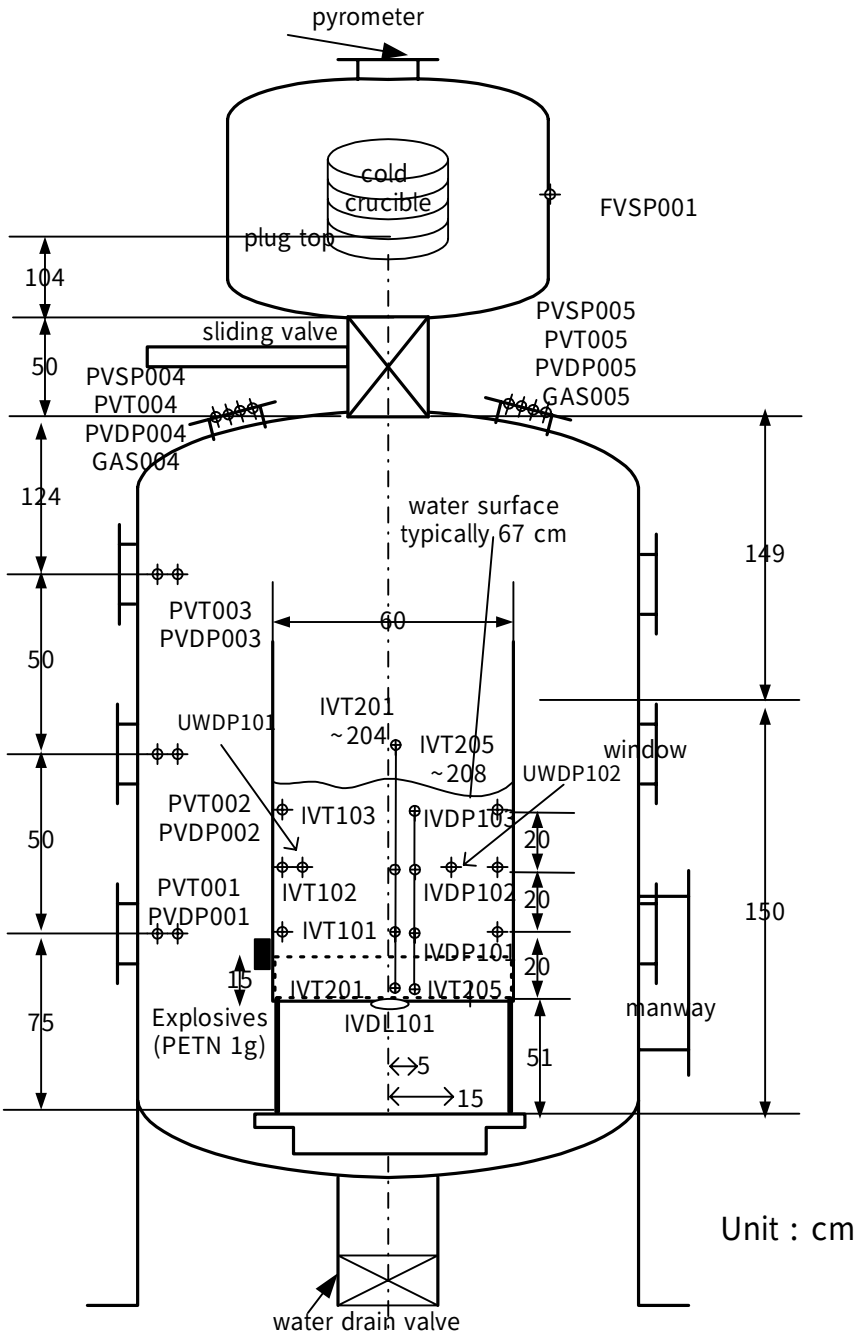

그림 1. Schematic diagram of the TROI-34 test facilities

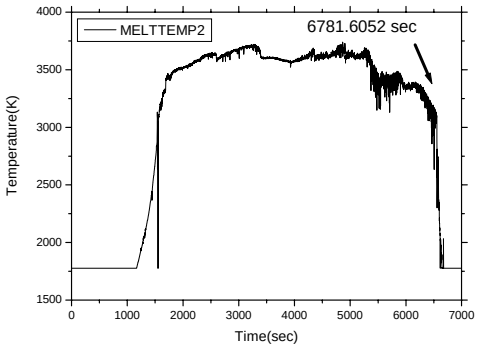

그림 2. Melt temperature in the TROI-33 test

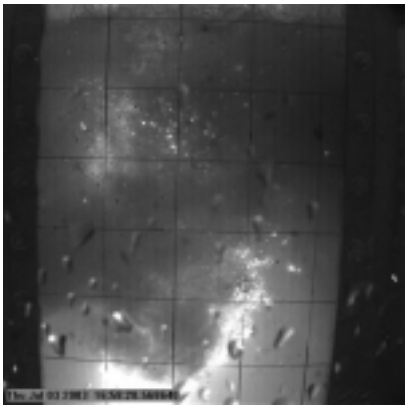

그림 3. Photograph of melt-water interaction in the TROI-33 test

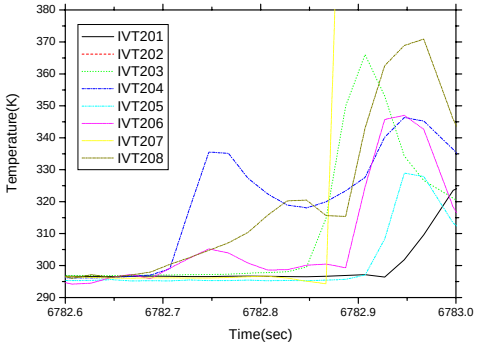

그림 4. Failure thermocouple signals in the TROI-33 test

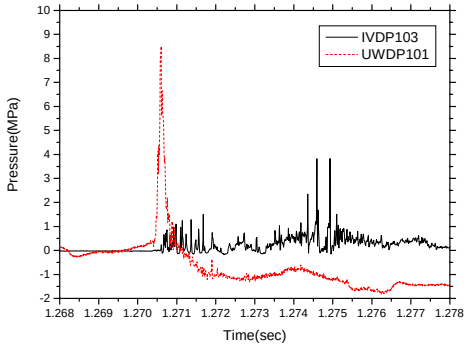

그림 5. Dynamic pressures in the TROI-33 test

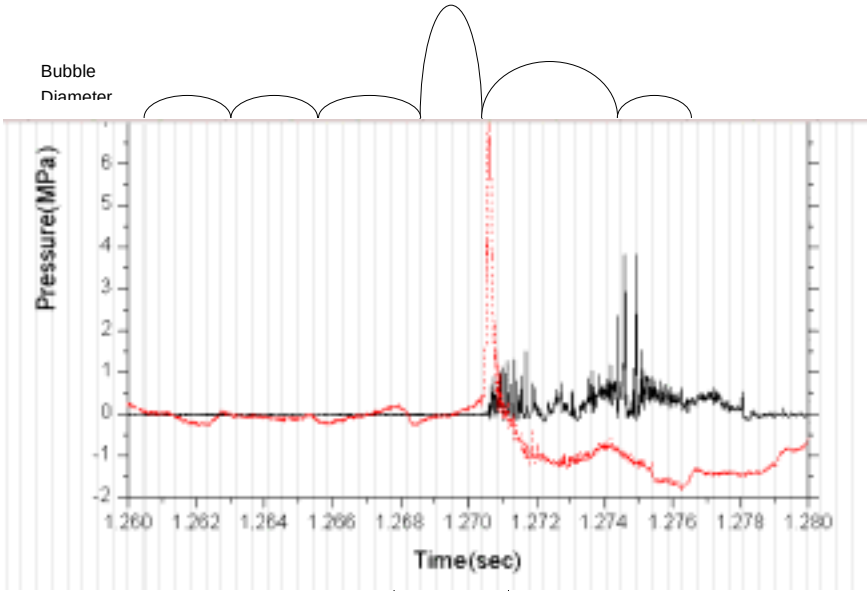

그림 6. Schematic plot of typical bubble growth in the vicinity of the underwater transducer

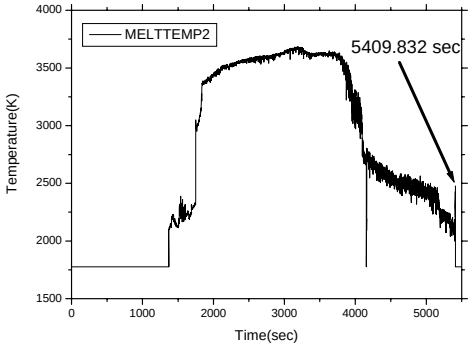

그림 7. Melt temperature in the TROI-34 test

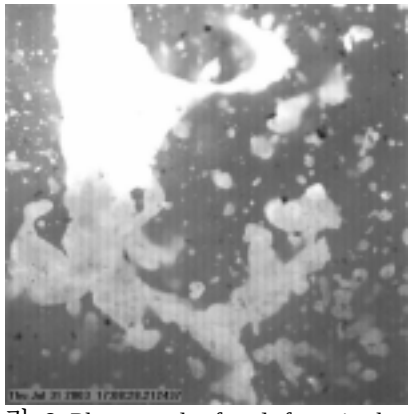

그림 8. Photograph of melt front in the air in the TROI-34 test

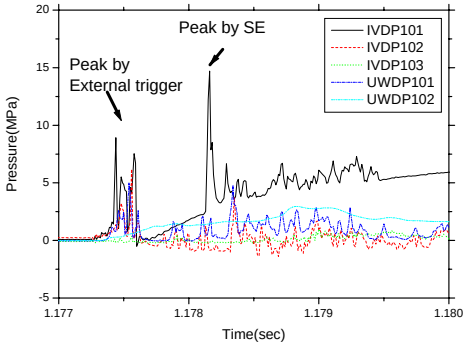

그림 9. Dynamic pressures in the TROI-34 test

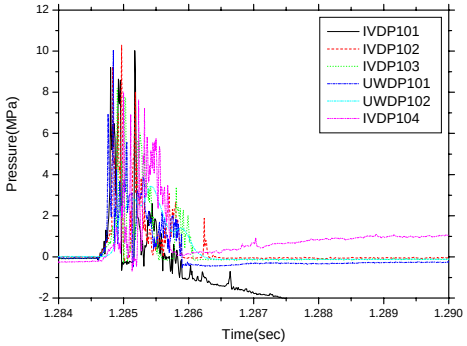

그림 10. Dynamic pressures in the calibration test

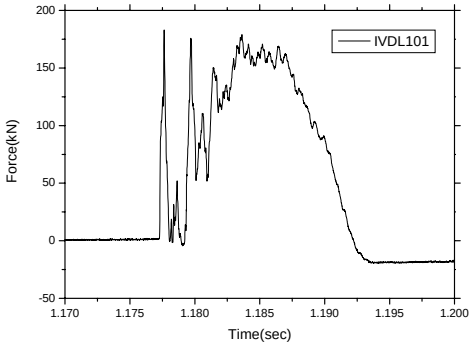

그림 11. Dynamic load in the TROI-34 test