2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

증기폭발에 대한 가시화 연구

Visualization Study on the Vapor Explosion Phenomena

신용승, 박익규, 장영조, 김종환, 홍성완, 민병태, 송진호, 김희동

한국원자력원구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

증기폭발현상은 원자력 발전소의 중대사고시 원자로 용기 및 격납건물의 건전성을 위협하므로 원자로의 안전성 평가와 관련된 매우 중요한 문제이다. 그러나, 현상이 아주 짧은 시간에 일어나고 비평형 상태에서 일어나기 때문에, 지난 30여년의 연구에도 불구하고 현상에 대한 근본적인 규명이 이루어지지 않고 있다. 한국원자력 연구소에서는 증기폭발 현상을 연구하기 위해 20 kg의 UO_2 와 ZrO_2 를 사용하는 증기폭발 모사장치 (TROI)를 제작, 운용하고 있다. 또한 TROI 실험과 병행하여 소규모 실험장치를 이용한 주석/물 시스템에 대한 증기폭발 실험도 수행하고 있다. 실험을 수행함에 있어 다양한 계측장비를 사용하여 증기폭발시의 물리적 변화를 측정하고 있다. 현상을 물리적으로 이해하기 위하여 가장 근본적인 것이 용융물/냉각수 반응과정을 가시화하는 것이므로, 이를 구현하기위한 가시화 장치를 고속 카메라, CCD 카메라, 캠코더를 사용하여 구축하였다. 가시화 연구를 통하여 증기 폭발 시 용융물과 냉각수 사이에서 일어나는 여러 가지 물리적 현상들을 시간대별로 이해할 수 있었다.

Abstract

Vapor explosion is one of the most important problems encountered in severe accident management of nuclear power plants. In spite of many efforts, a lot of questions still remain for the fundamental understanding of vapor explosion phenomena. Therefore, KAERI launched a real material experiment called TROI using 20 kg of UO_2 and ZrO_2 to investigate the vapor explosion phenomena. In addition, a small-scale experiment with molten-tin/water system was performed to quantify the characteristics of vapor explosion and to understand the phenomenology of vapor explosion. A number of instruments were used to measure the physical change occurring during the vapor explosion. The vapor explosion generated by molten fuel submerged in water is visualized using high speed camera, CCD camera and camcoder.

.

1. 서 론

증기폭발현상은 오래 전부터 금속공장, 제지공장 등 고온의 용융금속을 취급하는 공장에서 사고의 형태로 경험된 바 있고, 최근에는 원자력 발전소의 중대사고시 안전성 평가와 관련하여 그 중요성이 부각되면서 다수의 연구가 보고되어 왔다. 이러한 연구들에 의해 증기폭발이 일어나기 위해서는 증기막 붕괴가 선행되어야 한다는 것과 같은 몇몇 사실들이 밝혀지기는 했지만 이 현상이 매우

짧은 시간 안에 발생하는 복잡한 현상이기 때문에 증기폭발현상의 메커니즘이 충분히 규명되어 있지는 못하다.

증기폭발이란 고온 용융물 액체가 저온 냉각수 액체와 접촉할 때의 열전달 과정에서 저온 냉각수 액체가 고압의 증기를 발생하여 폭발하면서 주위에 충격파를 전달하는 현상이다. 증기폭발에 영향을 주는 변수로 알려진 것은 1) 용융물과 냉각수의 물성치 (비열, 열전도도, 표면장력, 점성, 밀도, 용융점…), 2) 초기 용융물과 냉각수의 온도, 3) 용융물과 냉각수의 양, 4) 대기 압력, 5) 용융물과 냉각수가 접촉하는 방식, 5) 용융물과 냉각수의 접촉시 발생가스의 조성 등이 있으며, 이러한 다양한 인자들로 인하여 증기폭발 현상을 정확히 이해하고 예측하는 것은 용이한 문제가 아니다.

그러나 전술한 바와 같이 증기폭발 현상이 워낙 복잡한 현상이기 때문에 가장 간단한 주석/물 시스템에 대한 증기폭발 현상에 대해서도 그 메커니즘이 완전히 규명되지 않은 실정이다. 증기폭발을 설명하기 위해 발표된 기존의 모델에 대해서 논란의 소지가 많으며, 특정 실험결과와 상반되는 경향도 있어 발표 모델의 적합성 여부에 대한 검증 등이 필요한 실정이다.

이러한 현황을 바탕으로 원자력 연구소에서는 증기폭발을 연구하기 위해 20 kg의 UO_2 와 ZrO_2 를 사용할 수 있는 증기폭발 모사장치 (TROI)를 제작하여 증기폭발 실험을 수행하고 있다. 또한 증기폭발 현상을 보다 정량적으로 연구하기 위해, 소규모 실험장치를 이용한 실험계획을 수립하여 TROI 실험과 별도로 진행시키고 있다. 소규모 실험장치를 이용한 실험에서는 증기폭발에 대하여 영향을 주는 것으로 알려진 실험 변수들을 체계적으로 변화시켜 가며 debris의 모양 관찰, 고속카메라를 이용한 현상의 가시화 그리고 압력파 측정을 수행하였다. 본 논문은 Troi 실험과 소규모 실험장치의 증기폭발 실험에 적용된 가시화 방법 및 그 결과를 보고한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 소규모 실험 장치

소규모 실험 장치의 개략도를 Fig 1.에 나타내었다. 장치는 크게 용융금속을 액적 상태로 떨어뜨리는 용융물 공급장치, 용융물과 냉각수가 증기폭발 현상을 일으키는 반응수조, 온도 조절된 냉각수를 반응수조에 공급하는 물탱크, 압력변동을 측정하는 압력측정 시스템, 현상의 시각적 관찰을 위한 고속 카메라 시스템으로 나눌 수 있다.

용융물 공급장치로는 용융주석의 액적이 일정한 직경을 유지하면서 반응수조에 투입될 수 있도록 하기 위해, 기존에 많이 사용되어 왔던 도가기 형태가 아닌 노즐 형태를 채용하였다. 가열로에 일정량의 주석을 투입한 후 전기 가열하여 주석이 일정온도까지 도달하면 가열로 상단에 위치한 핸들을 뽑아 용융주석이 액적의 상태로 낙하하게 되어 있다. 용융주석의 온도는 가열로 내에 설치한 K-Type 열전대의 측정치로 하였다.

증기폭발시의 압력변동은 반응수조 측벽에 설치한 압력센서 (Piezoelectric Charge Mode Pressure Sensor, Model 112A03, Range : 1000 psi, Sensitivity : 1.161pC/PSI, PCB Inc.)와 DAS (Data Acquisition System, HP E8404A VXI, Dynamic Signal Sampling : 100/50kHz, Hewlett Packard Inc.)로 측정하였다. 압력센서에서 나오는 신호는 기본적으로 노이즈가 많기 때문에 Low Pass Filter (30k, Dual Mode Amplifier, Model 443A, PCB Inc.)를 먼저 통과시킨 후 DAS의 입력단자에 연결하였다. DAS의 제어 및 데이터 저장은 IEEE 1394를 통하여 PC가 담당하며, 이를 위하여 DAS 제어용 프로그램 (coding language : VEE)을 제작하였다.

반응수조는 두께 15 mm의 투명 아크릴수지를 사용하여 가로, 세로 15 cm, 깊이 65 cm 의 사각통으로 제조하였다. 용융주석이 가열로 노즐의 출구를 나와 반응수조의 수면에 돌입하기까지의 자유낙하거리는 반응수조의 수면높이를 조절함으로써 조절 가능하다. 반응수조의 냉각수온도를 조절하

기 위하여 히터가 부착된 물탱크를 제작하였고, 이 물탱크에서 온도 조절된 물을 반응수조에 공급함으로써 반응수조의 냉각수온도를 원하는 온도로 유지할 수 있다.

본 실험에서는 주석/물 시스템의 증기폭발에 대한 TIZ(Thermal Interaction Zone) 결정 실험을 수행하였다. 주석의 무게는 50 g 으로 하였고, 자유낙하 거리는 20 cm로 고정하였다. 이러한 자유낙하 거리에서 주석이 수면에 돌입할 때의 속도는 약 2.0 m/s로 계산되었다. 주석온도는 250 ℃ 부터 800 ℃까지, 냉각수온도는 20 ℃ 부터 88 ℃ 까지 체계적으로 변화시켰다.

2.2 Troi 실험 장치

Troi 실험 장치의 개략도를 Fig 2.에 나타내었다. 실험장치의 주요부는 압력용기 상하부, 용융로, 슬라이딩밸브, 반응용기로 구성되어 있다. Troi 실험장치에 대한 자세한 사양과 실험방법 등은 본 춘계 학술대회 논문집의 "TROI 실험장치에서 수행된 ZrO_2/냉각수 반응실험"을 참고하기 바란다.

2.3 가시화 장치

증기폭발의 시각적 관찰을 위하여 고속 카메라, CCD 카메라, 캠코더를 사용하였다. 고속 카메라 시스템은 매우 짧은 시간에 발생하는 증기폭발 현상의 정량적인 가시화를 위하여 사용되었다. Troi 실험의 경우 증기폭발의 모니터링 등을 위하여 CCD 카메라(4대), 캠코더(1개)가 같이 사용되었다. 고속 카메라(Phantom V4.0, Visiblesolutions Inc)는 CMOS Type 이며, 512 pixel × 512 pixel 의 화소크기에서 최대 1000 frame/sec를 촬영이 가능하다. 또한 화소크기를 감소시키면 frame rate를 증가시킬 수 있다. 고속 카메라의 제어는 IEEE 1394를 통하여 PC로 하게 된다. 촬영된 영상은 먼저 고속 카메라의 메모리에 저장되며 영구적인 보관을 위하여 PC에 전송될 수 있다. 고속 카메라에 사용된 렌즈는 초점거리 30 cm 의 Nikon 105 mm 매크로 렌즈를 사용하였다. 고속 카메라를 1000 frame/sec 이상의 고속으로 촬영할 경우 일반적인 조명하에서는 거의 대부분 광량이 부족하다. 소규모 실험의 경우 용융물의 온도가 그다지 높지 않기 때문에 광량이 절대적으로 부족하며 따라서 반응수조의 측면 양쪽에 각각 500 Watt의 조명등을 사용하여 부족한 광량을 보충하였다. Troi 실험의 경우에는 용융물의 온도가 매우 고온(3000K 이상)인 관계로 자체발광에 의하여 고속촬영이 가능하다. 오히려 올바른 촬영을 위하여 조리개와 노출시간을 적절히 조정하여 광량을 충분히 감소시킬 필요가 있다. Troi 실험에서 모니터링을 위해 사용된 CCD 카메라와 캠코더의 경우 용융물의 광량이 너무 강하기 때문에 조리개와 노출시간만으로는 올바른 촬영이 불가능하였고, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 각 카메라의 렌즈 앞에 편광필터를 장착하여 들어오는 광량을 감소시켰다. CCD 카메라와 캠코더에서 촬영된 동영상은 일반 비디오 테이프에 저장하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 소규모 실험장치의 가시화 결과

Fig. 3는 50 g의 용융주석을 반응수조에 낙하시킬 때의 증기폭발 현상을 1000 frame/sec로 촬영한 영상으로 시간은 용융주석이 수면에 돌입하는 시점을 기준으로 하였다. 용융주석은 수면에 돌입 후 물의 저항으로 인해 하단부가 평편해 지면서 마치 거꾸로 된 버섯모양으로 변하며, 막 비등 상태에 놓이게 된다(a, b, c, d). 이후, 그림에서는 잘 나타나지 않았지만 일반적으로 버섯머리의 끝부분에서 증기막이 파괴되어 이곳으로부터 증기폭발이 발생하여 용융주석 전체로 폭발이 전파된다(e, f). 증기막의 붕괴는 용융주석 전체에 미친 후 증기포가 성장하여 최대가 된 후 이후 수축하게 된다.

소규모 실험장치에서의 증기폭발은 용융주석의 온도와 냉각수의 온도에 매우 커다란 영향을 받

는 것으로 관측되었다. 즉, 특정한 온도영역 조건(TIZ, Thermal Interaction Zone)에서만 증기폭발이 발생하며 이 온도조건을 만족시키지 못하는 영역에서는 증기폭발 현상이 발생하지 않았다. 또한 증기폭발이 동일하게 관측된다 하더라도 온도조건에 따라 폭발강와 데브리의 형태가 상이함을 확인하였다. 증기폭발시 예리한 압력파가 발생하며, 이 압력파을 측정해 보면 몇 개의 최고피크가 있고 정압 (+ pressure)과 부압 (– pressure)이 번갈아 가며 존재함을 알 수 있다.

3.2 Troi 실험 장치에서의 가시화 결과

Fig. 4는 2.9 kg의 용융 ZrO2를 반응수조에 낙하시킬 때의 증기폭발 현상을 1000 frame/sec로 촬영한 영상이다(실험 번호 TROI-5). 다소의 과다노출이 있기는 하지만 초고온의 용융 ZrO2가 낙하하는 동안의 형태, 속도(차후에 속도를 계산하기 위해 아크릴 수조통에 10 cm 간격으로 선을 표시), 냉각수와 접촉한 후의 물리적 변화 등을 측정할 수 있었다. 그림에서 알수 있듯이 초기에는 작은 알갱이의 용융물 들이 낙하하고 이어서 용융물의 메인 스트림이 낙하한다. 작은 알갱이의 용융은 냉각수와 접촉한 후 막 비등 상태를 계속유지하며 증기폭발을 일으키지 않는다. 그러나 질량이 많은 메인 스트림의 경우 냉각수에 돌입하고 잠시 후 증기폭발 현상을 일으켰다. 실험후 수거된 데브리의 분석결과 증기폭발 현상이 일어난 경우 증기폭발이 발생하지 않은 경우보다 미세한 데브리의 양이 훨씬 더 많았다. 이것은 냉각수와 접촉하는 용융물의 단면적이 증기폭발하는 경우가 훨씬 더 크다는 것을 의미한다.

4. 결 론

수중을 낙하하는 고온 용융물의 증기폭발 실험을 수행하면서 고속 카메라를 이용하여 증기폭발 현상을 관찰하였다. 소규모 실험장치의 경우 용융물과 냉각수의 온도조건에 따라 증기폭발의 유무 및 폭발강도 등이 다르게 나타남을 확인하였다. Troi 실험의 가시화를 통해 ZrO2 용융물이 낙하할 때의 형상, 속도, 용융물과 냉각수가 접촉할 때의 물리적 변화, 폭발의 유무 등을 확인할 수 있었다.

향후 조건이 허용되는 범위 안에서 각종 실험조건(용융물 질량, 용융물 및 냉각수의 물성치 등)을 체계적으로 변화시켜 가며 각각의 조건이 증기폭발에 미치는 영향을 현상학적으로 분석할 계획이다. 이러한 가시화 데이터들은 증기폭발의 메커니즘을 규명하고, 증기폭발에 대한 모델링을 함에 있어 매우 가치 있는 정보를 제공할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 중장기과제에서 재정적인 지원을 받았으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Dullforce, T.A., Buchanan, D.J. and Peckover, R.S., "Self-triggering of small-scale fuel-coolant interactions: I. Experiment," J. Phys. D: Appl. Phys., 9, 1295 (1976)
2. Shoji, M. and Takagi, N., "Experimental study on small-scale vapor explosion initiated by dropping a drop of molten tin into water," Trans. JSME, B, 48, 1768 (1982)
3. Akiyoshi, R., Nishio. S. and Tanasawa, I., "Study on effect of noncondensable gas in vapor film upon vapor explosion," Trans. JSME, B, 54, 630 (1988)
4. Kondo, Sa., Konishi, K., Isozaki, M., Imahori, S., Furutani, A. and Brear, D.J., "Experimental study on simulated molten jet-coolant interactions," Nucl. Eng. Des., 155, 73 (1995)

5. Matsumura, K. and Naria, H., "Self-triggering mechanism of vapor explosions for a molten tin and water system," J. Nucl. Sci. Technol., 33, 298 (1996)
6. Matsumura, K. and Naria, H., Egasira, Y. and Ochimizu, M., "Experimental study on base-triggered explosions in molten-tin/water systems," J. Nucl. Sci. Technol., 36, 767 (1999)
7. **홍성완, 박익규, 김희동, "노심 용융물과 냉각수 반응시 증기 폭발 가능성 고찰", 한국 원자력 학회 추계 학술대회 발표논문집**, 213 (1999)

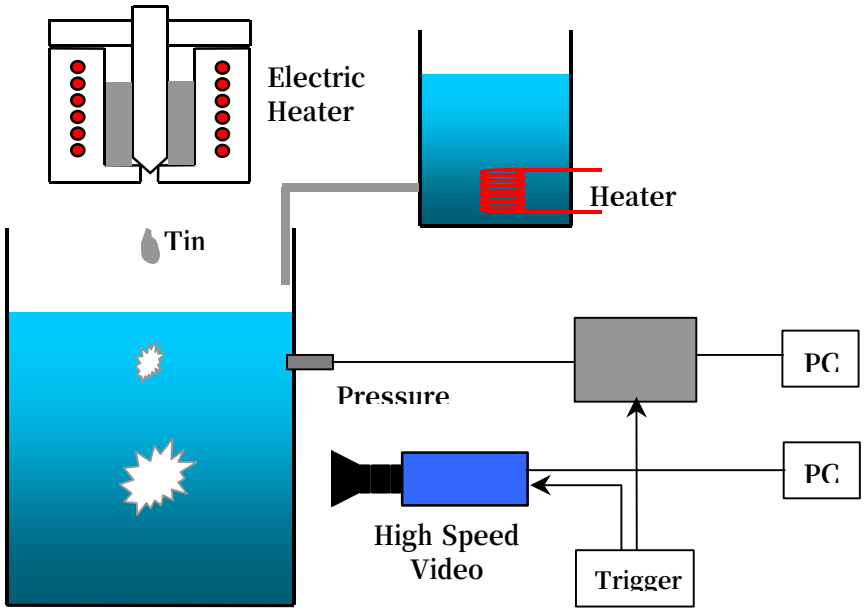


Fig. 1 Schematic of small-scale apparatus

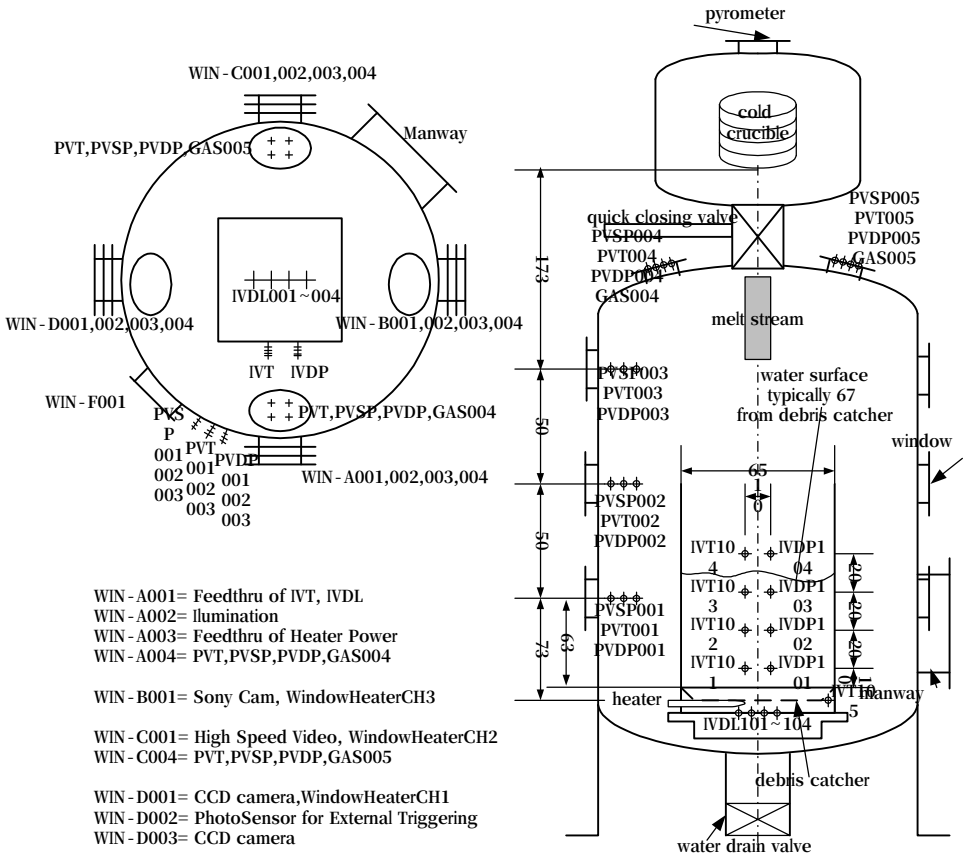
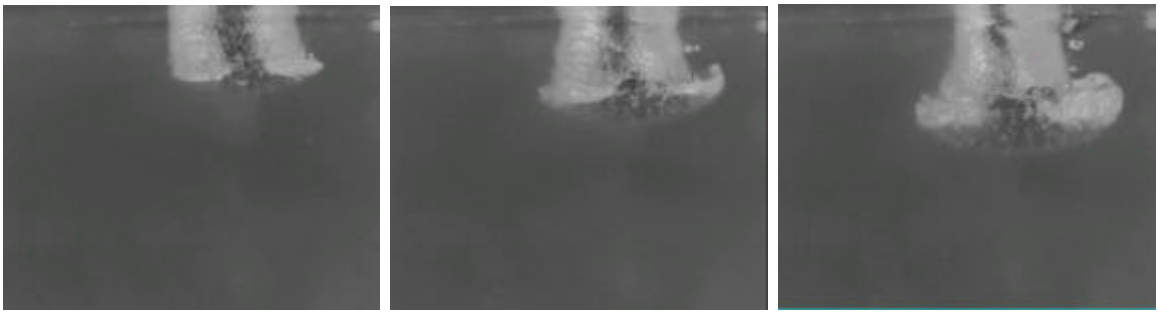
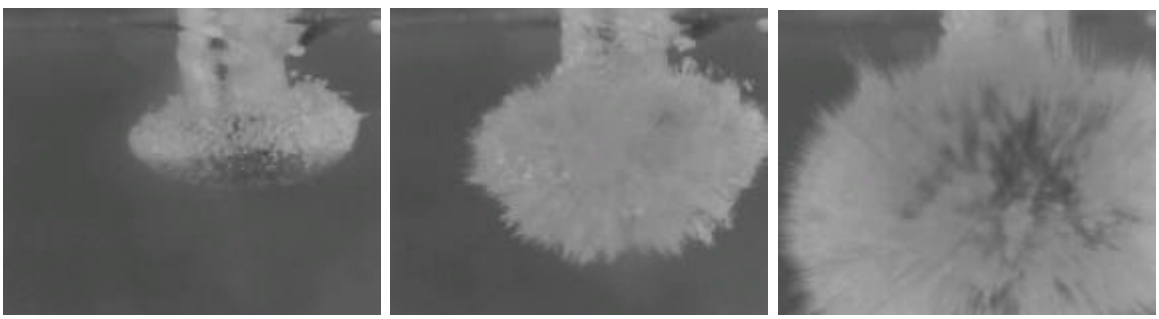


Fig. 2 Schematic of Troi apparatus



(a) 4ms (b) 6ms (c) 8ms



(d) 10ms (e) 12ms (f) 14ms

Fig. 3 Vapor explosion process when the tin is dropped just above the water surface. water 30℃ , tin 625℃

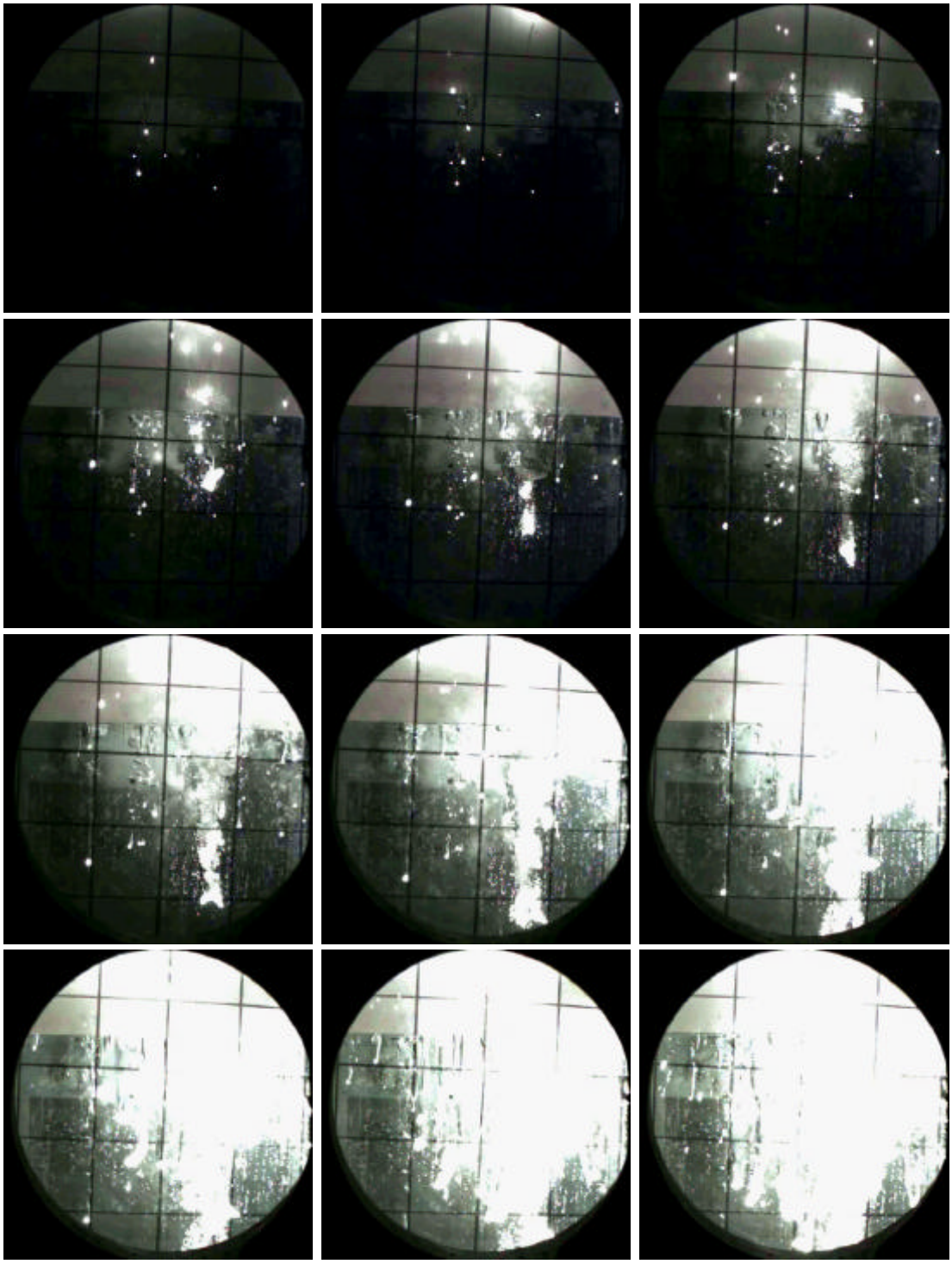


Fig. 4 Interaction process when molten ZrO2 is dropped into water
Time interval : 0.01sec