2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

용융주석과 물에 의한 자발적 증기폭발에 관한 연구

A Study on Spontaneous Vapor Explosions with Molten Tin and Water

신용승, 박익규, 김종환, 송진호, 김희동

한국원자력원구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

증기폭발현상은 원자력 발전소의 중대사고시 안전성 평가와 관련된 가장 중요한 문제이다. 이 현상에 대한 다수의 연구에도 불구하고 규명되어야 할 많은 문제들이 있다. 이러한 현황에서 본 연구소는 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. 소규모 실험장치를 이용한 증기폭발 실험에서, 용융주석 50 g을 냉각수 반응수조에 낙하시켜 증기폭발 현상을 관찰하였으며, 용융주석의 온도는 250 - 800 ℃, 냉각수온도는 20 - 88 ℃ 의 범위에서 체계적으로 변화시켰다. 실험을 통하여 주석/물 시스템에 대한 temperature interaction zone (TIZ) 을 결정하였고, 증기폭발의 강도를 측정하기 위해 폭발시의 압력파 변동을 측정하였으며, 현상의 시각적 관찰을 위하여 2000 frame/sec 의 속도로 현상을 고속 촬영하였다.

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 about vapor explosion. So, KAERI launched a real material experiment called TROI using 20 kg of UO_2 and ZrO_2 to investigate the vapor explosion. Before running the experiment, 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. Vapor explosion was initiated by dropping a drop of 50 g molten tin into the water pool. A spontaneous vapor explosion was observed while tin temperature and water temperature were systematically varied. The temperature interaction zone (TIZ) for tin/water system within which a spontaneous steam explosion occurred was determined from the experiment. Pressure pulse, the strength of vapor explosion, was also measured as a function of tin temperature and water temperature. In addition, a high speed video filming up to 2000 flame/sec was taken in order to visually investigate the behavior of a spontaneous vapor explosion.

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.

증기폭발의 메커니즘과 발생조건을 연구하기 위해 실험장치의 규모가 다른 여러 가지 연구가 수행되어 왔으며[4], 그 중의 하나로 주석을 이용한 소규모 증기폭발 실험이 있다. 주석은 231.9 ℃ 의 비교적 낮은 용융점을 가지며, 독성이 낮고, 대기압에서 물과 접촉시 증기폭발이 잘 발생하기 때문에 소규모 증기폭발 실험의 용융물 금속으로 많이 이용되어 왔다. Dullforce 등[1]은 12 g의 주석에 대하여 주석온도와 냉각수온도를 체계적으로 변화시켜가며 약 300번에 걸친 실험을 통하여 주석/물 시스템에 대한 TIZ (Thermal Interaction Zone)을 최초로 발표하였다. 실험을 통하여 주석온도 및 냉각수온도가 증가하면 폭발이 발생하기까지 걸리는 지연시간이 증가하며, TIZ 이외의 온도영역에서는 폭발이 발생하지 않음을 보고하였다. Shoji 등[2]은 주석온도, 냉각수온도, 대기압력이 증기폭발 발생확률, 폭발강도, 지연시간 등에 미치는 영향을 조사하였고, 증기폭발이 증기막 붕괴와 매우 밀접한 관련이 있는 현상임을 보고하였다. Akiyosi 등[3]은 증기막 내의 비응축성 가스가 증기폭발에 미치는 영향을 조사하여, 증기막에 비응축성 가스가 존재하면 증기폭발 발생확률이 낮아진다고 보고하였다. 최근에는 Matsumura와 공동 연구자들이 소규모 증기폭발에 대한 실험적, 해석적 연구를 활발히 진행하고 있다. Matsumura 등[5] 은 증기폭발의 자발적 트리거링 메커니즘에 대하여, 용융주석과 냉각수 사이에 존재하는 증기막의 perturbed oscillation의 안정성이 폭발여부와 관계한다고 가정하였다. 그는 증기막의 지배방정식에 대한 선형 안정성 해석을 시도하여 특정한 온도조건 (TIZ) 하에서는 증기막이 자발적으로 불안정하게 되어 결국 증기막이 붕괴된다고 보고하였다. 또한, Matsumura 등[6]은 용융물과 냉각수의 물성치가 자발적 증기폭발에 미치는 영향도 조사하여 용융물의 물성치, 특히 표면장력 및 점성 등이 증기폭발 발생 여부에 지대한 영향을 미친다고 보고하였다.

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. 기존 모델을 검증하고 더 나아가 모델을 보완하기 위해서는 증기폭발에 관계하는 다양한 실험변수 들을 체계적으로 변화시켜 가며 광범위하게 실험 데이터를 구축하는 필요하다 하겠다.

이러한 현황을 바탕으로 원자력 연구소에서는 증기폭발을 연구하기 위해 20 kg의 UO_2와 ZrO_2를 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 통하여, 기존에 보고된 TIZ를 재평가하고, TIZ에 대한 이론적 해석적 연구를 개선하고자 함에 그 주된 목적을 두고 있다. 또한, 부차적 목적으로 계측장비의 검증, 계측기술의 개발 등을 통하여 TROI 실험을 뒷받침하고자 하였다.

본 논문은 소규모 실험장치의 구조, 실험방법, 계측장비의 구성, 그리고 소규모 실험장치를 이용한 실험의 첫 단계로 수행된 주석/물 시스템의 증기폭발에 대한 실험 결과(TIZ 결정, debris의 모양,

압력파 측정, 현상의 가시화) 등을 보고한다.

2. 실험장치 및 방법

실험장치의 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.

증기폭발의 시각적 관찰을 위하여 고속 카메라 시스템 (Phantom V4.0, CMOS Type, Pixel Resolution : 512×512, Max Recording Speed : 32000 frame/sec, Visiblesolutions Inc.)을 사용하였다. 고속카메라의 제어도 IEEE 1394를 통하여 PC가 담당하게 되어 있다. 카메라 렌즈는 초점거리 30 cm 의 Nikon 105 mm 매크로 렌즈를 사용하였고, 2000 frame/sec 이상의 고속 촬영시 광량이 부족하기 때문에 반응수조의 측면 양쪽에서 각각 500 Watt의 조명등을 사용하여 광량을 보충하였다.

고속카메라로 촬영한 영상과 압력센서로 계측한 압력파 신호를 상호 연관시키기 위하여 두 계측장비가 동일한 트리거 신호에 의해 작동하도록 구성하였다. 현 단계에서는 트리거 신호가 수동으로 작동되게 되어 있으며, 트리거 신호의 발생시점은 용융주석이 가열로의 노즐 출구를 나오는 시점으로 하였다.

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

먼저 실험의 첫 단계로 주석/물 시스템의 증기폭발에 대한 TIZ 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. 증기폭발 후 잔해물의 형태를 관찰하기 위해 debris를 매 실험조건마다 수거하였다. TIZ 결정 실험에서는 압력파의 측정과 고속카메라의 촬영을 수행하지 않았다. TIZ 실험 수행 후 몇 개의 주석온도와 냉각수온도 조건에서 압력파의 측정과 고속 카메라 시스템을 이용한 촬영을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 일반적 특징

주석/물 시스템의 TIZ 실험 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 ●은 증기폭발이 발생한 것을 의미하며, ×는 폭발이 발생하지 않은 것을 의미한다. 타 연구자의 비교를 위하여 12 g 의 주석에 대하여 TIZ 실험을 수행한 Dullforce의 실험결과를 실선으로 표시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 증기폭발은 모든 주석온도, 냉각수온도 조건에서 발생하는 것이 아니고 특정한 온도조건에서만 발생하며, 이러한 특정온도 영역을 TIZ (Thermal Interaction Zone)라고 한다. 본 실험결과는 Dullforce의 실험결과와 비교할 때 정량적으로 약간의 차이가 있으나 이것은 주석무게와 주석 낙하방법의 차이에 기인한 것으로 생각되며 정성적으로는 동일한 경향을 보임을 확인할 수 있다. 증기폭발이 발생하는 구간과 발생하지 않는 구간의 경계를 cut-off boundary라 하며,그림에서와 같이 왼쪽의 수직라인과 우상측의 경사진 라인으로 나눌 수 있다. 동일한 냉각수온도에서 폭발의 강도(혹은 폭발에 참여하는 주석질량의 비율)는 우상측의 cut-off line으로 갈수록 강해지는 경향을 보이고 있다.

우상측 cut-off line을 경계로 안쪽에서는 거의 100%의 주석질량이 폭발에 참여하며, 바깥쪽에서는 전혀 폭발이 발생하지 않아, 폭발의 여부를 쉽게 확인할 수 있다(on-off behavior). 한편 동일한 냉각수온도에서 주석온도가 수직의 cut-off line으로 다가갈수록, 폭발의 강도가 점점 떨어져 폭발에 참여하는 주석이 질량이 점점 감소하는 경향을 보이고 있다. 용융주석이 수면에 돌입한 후 폭발하기까지 걸리는 시간은 우상측의 cut-off line으로 다가갈수록 커지는 경향을 보이고 있다. 즉, TIZ 범위 내에서는 냉각수온도와 주석온도가 증가할수록 폭발강도와 폭발까지의 지연시간이 증가하는 경향을 나타내고 있다.

냉각수온도가 증가할수록 폭발할 수 있는 주석온도의 범위가 좁아지는 사실을 확인할 수 있으며, 이것은 냉각수온도가 증가할수록 비등막이 붕괴되기 어려워 진다는 것을 의미한다. Inoue, Corradini 등은 각각 그들이 제시한 모델을 이용하여, 냉각수온도가 올라갈수록 비등막이 더 잘 유지될 수 있음을 이론적으로 해석하였다. 또한, 냉각수온도가 일정온도(본 실험에서는 약 75℃) 이상이 되면 주석온도에 관계없이 폭발이 발생하지 않았다. 이것은 냉각수온도가 이 온도이상이 되면 용융금속의 온도에 상관없이 증기막이 붕괴되지 않는다는 것을 의미한다. 이러한 현상에 대해 Matsumura는 vapor/water interface의 perturbation를 해석하여, 특정 수온이상이 되면 비등막이 지속적으로 안정한 상태를 유지하기 때문에 증기막이 붕괴되지 않는다고 보고하였다.

Fig. 3은 몇 가지 온도 조건에서 수거한 debris (증기폭발 후 잔해물)의 사진이다. 냉각수온도는 65℃ 로 고정되어 있으며 주석온도에 따라 debris 의 형태가 어떻게 변화되고 있는 가를 보여주고 있다. (a), (b)의 경우 폭발이 발생하지 않았으며 주석이 여러 개로 작은 조각으로 나누어져 있음을 알 수 있다 (fragmentation). (c)의 경우 매우 큰 폭발음과 함께 증기폭발 현상이 발생하였으며, 거의 100 % 용융주석이 폭발에 참여하여 주석이 매우 작게 미립화되어 있음을 알 수 있다. 주석의 온도가 감소함에 따라 폭발의 강도는 점점 감소하며 (d), (e), (f) 에서 보는 바와 같이 폭발에 참여하는 용융주석의 비율이 점점 감소함을 알 수 있다.

3.2 고속촬영 및 압력파 측정폭발

Fig. 4는 50 g의 용융주석을 반응수조에 낙하시킬 때의 증기폭발 현상을 1000 frame/sec로 촬영한 고속사진의 한 예로, 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 버섯머

리의 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. 증기폭발이 발생하는 과정에서 예리한 압력파가 발생하며, 측정된 압력파 측정결과 중의 하나를 Fig. 5에 나타내었다. 증기폭발은 순간적으로 생기나, 압력파을 자세히 보면 발생압력에는 몇 개의 최고피크가 있고 정압 (+ pressure)과 부압 (– pressure)이 존재함을 알 수 있다. 이러한 경향은 기존의 소규모 주석/물 시스템에 대한 증기폭발 실험에서도 관측된 바 있다.

4. 결 론

수중을 낙하하는 용융주석에 생기는 소규모의 증기폭발 실험을 수행하여, 물/주석 시스템의 TIZ를 결정하였고, 증기폭발 현상의 고속촬영과 증기폭발시의 압력파을 측정하였다. 이러한 실험을 통하여 실험장치, 계측장비의 성능 등을 파악하였고, 앞으로 수행될 증기폭발 실험의 기초를 마련하였다. 서론에서도 서술한 바와 같이 본 논문은 소규모 증기폭발 실험의 첫 단계로 증기폭발 현상의 구현 및 계측장비의 성능파악 및 작동 등에 많은 중점을 두었다. 향후, 소규모 실험장치를 이용한 실험의 주 목적이라 할 수 있는 기존 발표된 TIZ의 재평가, TIZ에 대한 이론적 연구의 개선 등을 위하여 증기폭발에 영향을 미치는 실험변수를 다양하게 변화시켜 가며 실험을 수행할 계획이다. 이를 위하여 본 실험에서 다루지 못하였던 부분 (재현성 실험 등) 을 추가적으로 실험할 계획이며, 점진적으로 용융물 질량, 용융물 및 냉각수의 물성치 등을 변화시켜가며 이러한 실험변수가 증기폭발에 미치는 영향 등을 정량적으로 분석할 계획이다.

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)

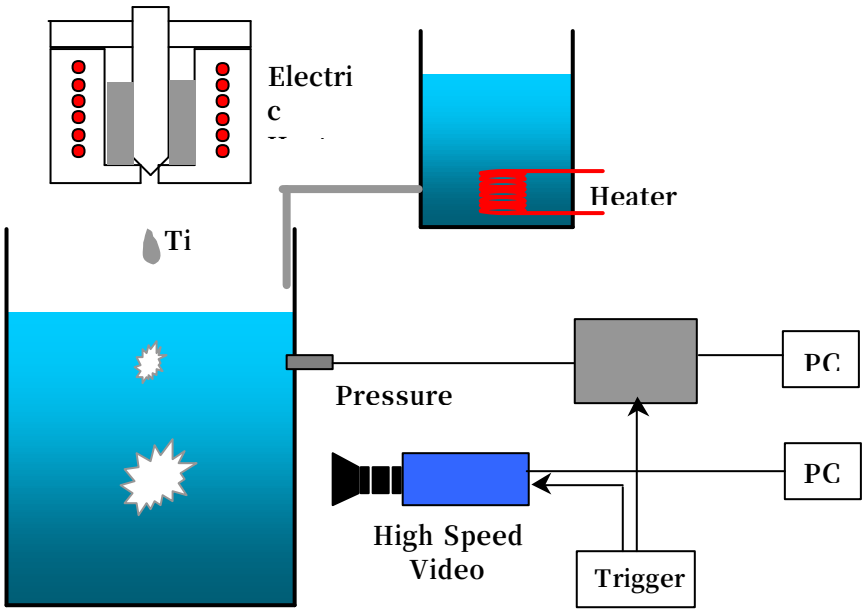


Fig. 1 Schematic of the apparatus

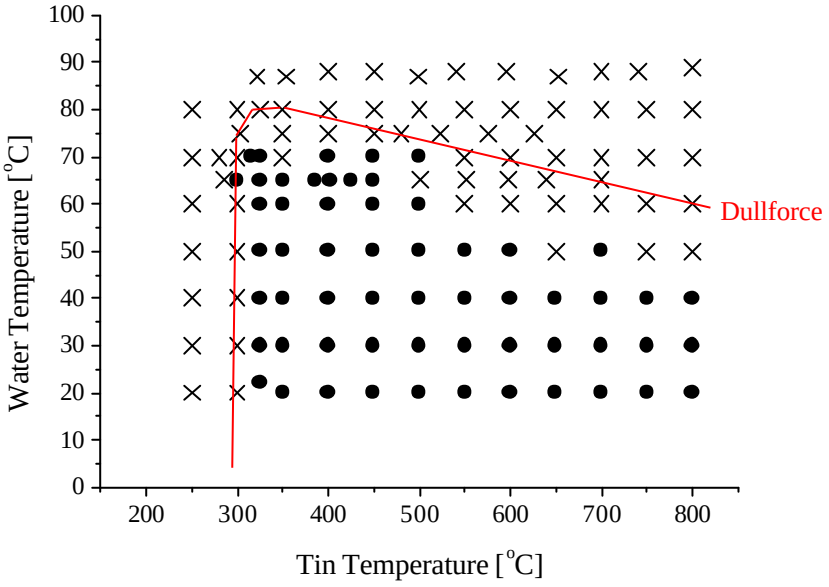


Fig. 2 Temperature interaction zone for 50 g of tin dropped through 20 cm into water

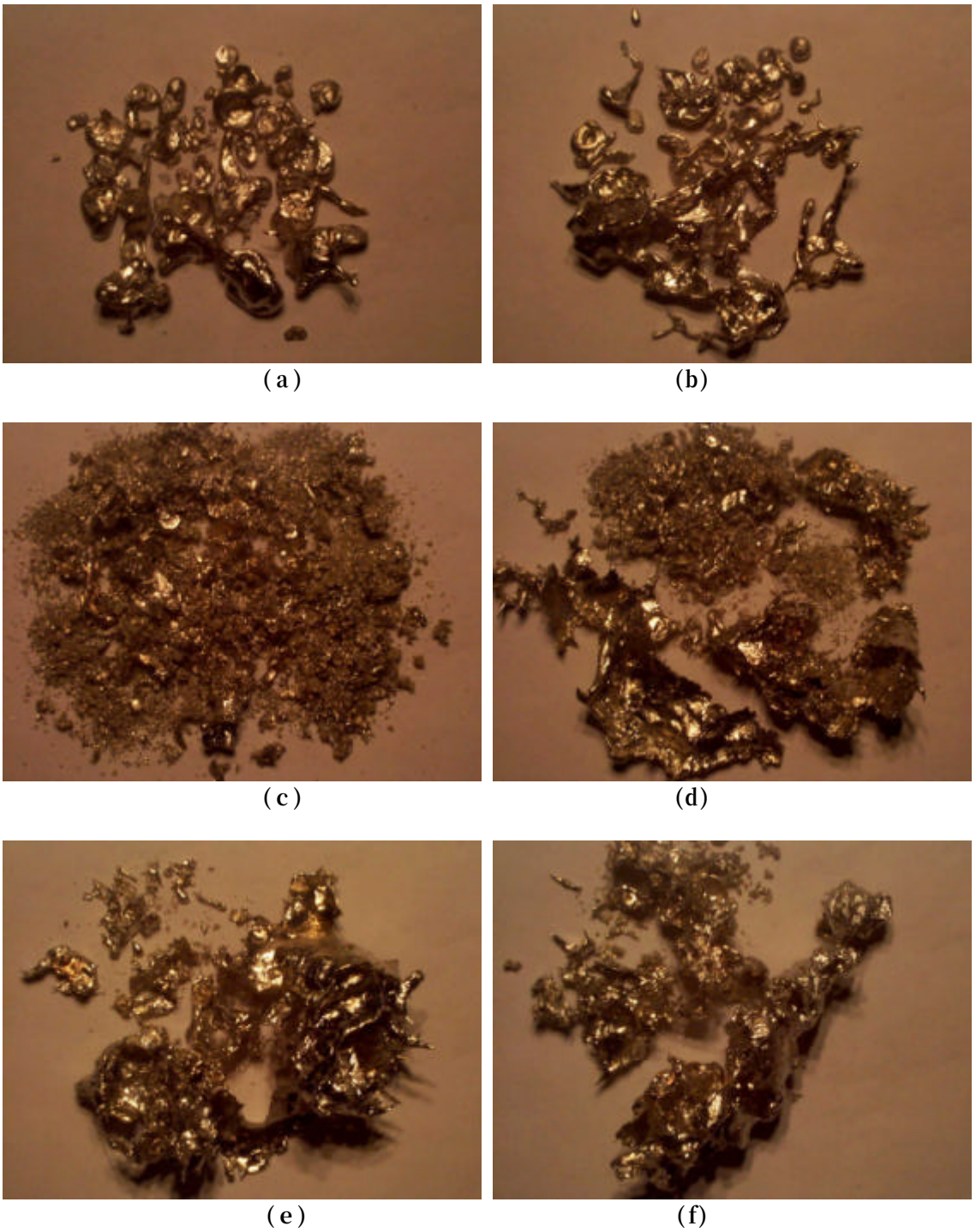
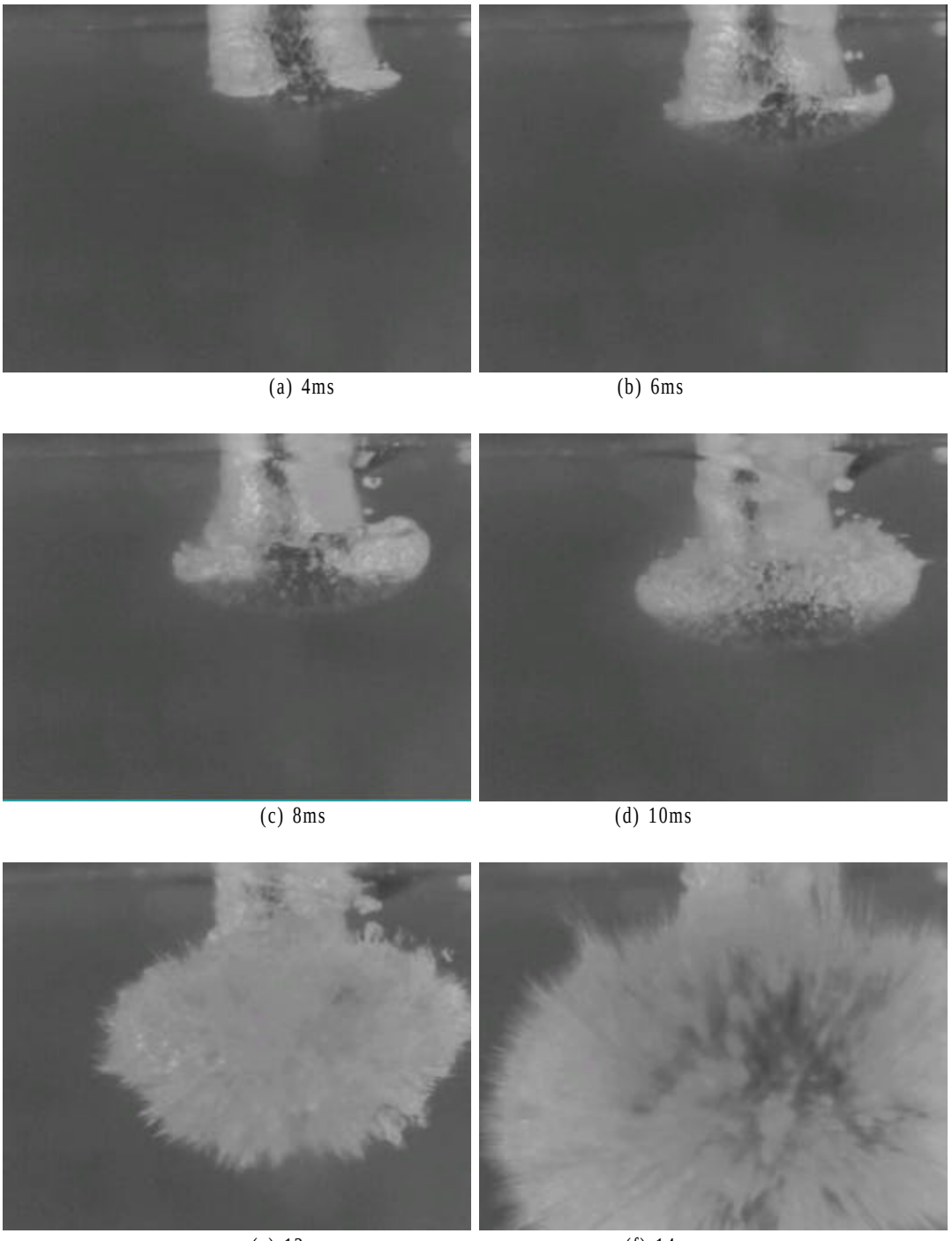


Fig. 3 Morphology of the selected debris
(a) water 65℃, tin 650℃, (b) water 65℃, tin 550℃
(c) water 65℃, tin 450℃, (d) water 65℃, tin 400℃
(e) water 65℃, tin 350℃, (f) water 65℃, tin 300℃



(a) 4ms (b) 6ms

(c) 8ms (d) 10ms

(e) 12ms (f) 14ms

Fig. 4 Vapor explosion process when the tin is dropped just above the water surface. water 30℃ , tin 625℃

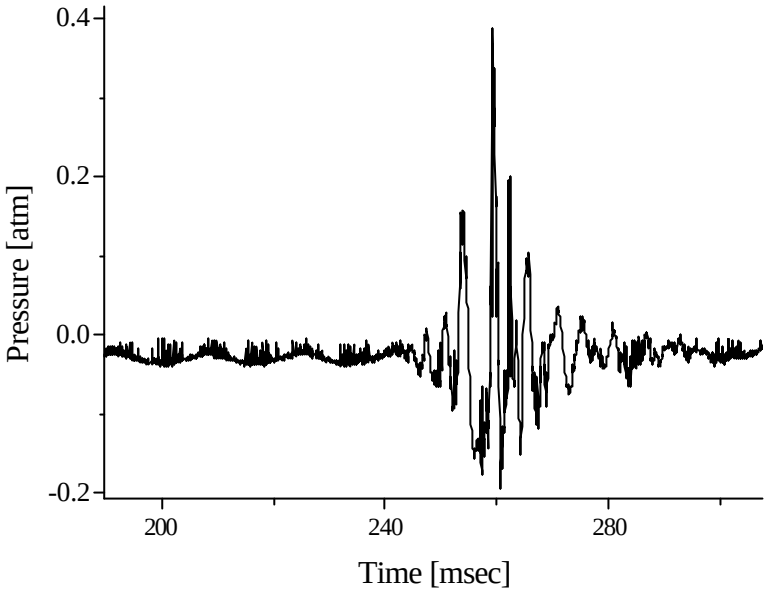


Fig. 5 Pressure pulse during the vapor explosion process