

주석-물 시스템의 증기폭발시 발생하는 압력거동에 대한 실험적 연구

신용승* · 송진호* · 김종환* · 박익규* · 홍성완* · 김희동*

An Experimental Investigation on the Pressure Behavior Accompanying the Explosion of Tin in Water

Y.S. Shin, J.H. Song, J.H. Kim, I.K. Park, S.W. Hong and H.D. Kim

Key Words: FCI, Vapor Explosion, Pressure Pulse, Visualization

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 UO₂ and ZrO₂ 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. In this experiment, the vapor explosion generated by molten fuel water interaction is visualized using high speed camera and the pressure behavior accompanying the explosion is investigated.

1. 서론

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

* 한국원자력연구소

증기폭발을 연구하기 위해 20 kg의 UO₂ 와 ZrO₂ 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 이러한 실험변수가 증기폭발에 미치는 영향을 정량적으로 측정할 계획이다. 본 논문은 소규모 실험장치의 증기폭발 실험에 적용된 가시화 방법 및 압력거동 측정방법과 그 결과들을 보고한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 소규모 실험장치

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 있

다.

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.

반응수조는 두께 15 mm의 투명 아크릴수지를 사용하여 가로, 세로 15 cm, 깊이 65 cm의 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.

2.2 동압 측정장치

증기폭발시의 압력변동은 반응수조 측벽에 설치한 압력센서 (Piezoelectric Charge Mode Pressure Sensor, Model 112A03, Range : 10000 psi,

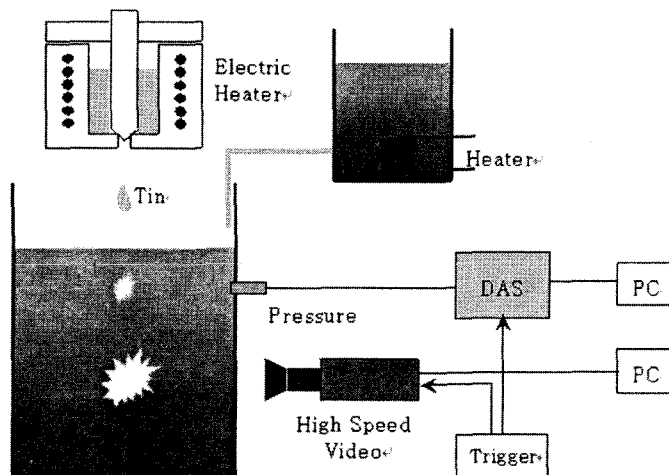


Fig. 1 Schematic of small-scale apparatus

Sensitivity : 1.248pC/PSI, PCB Inc.)와 DAS (Data Acquisition System, E1564A VXI, Dynamic Max. Signal Sampling : 800kSa/sec, Agilent 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.

2.3 가시화장치

증기폭발의 시각적 관찰을 위하여 고속 카메라를 사용하였다. 고속 카메라 시스템은 매우 짧은 시간에 발생하는 증기폭발 현상의 정량적인 가시화를 위하여 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. 본 실험의 경우 용융물의 온도가 그다지 높지 않기 때문에 광량이 절대적으로 부족하며 따라서 반응수조의 측면 양쪽에 각각 500 Watt의 조명등을 사용하여 부족한 광량을 보충하였다.

2.4 실험 조건

본 실험에서는 주석/물 시스템의 증기폭발에 대한 물리적 현상 변화를 측정하였다. 주석의 무게는 50g 으로 하였고, 자유낙하 거리는 20cm로 고정하였다. 이러한 자유낙하 거리에서 주석이 수면에 돌입할 때의 속도는 약 2.0 m/s로 계산되었다. 주석온도는 300℃ 부터 700℃까지 변화시켰으며, 냉각수온도는 20℃ 로 고정하였다.

고속카메라로 촬영한 영상과 압력센서로 계측

한 압력과 신호를 시간적으로 상호 연관(synchronization)시키기 위하여 두 계측장비가 동일한 트리거 신호에 의해 작동하도록 구성하였다. 트리거 신호의 발생시점은 용융 주석이 가열로의 노즐 출구를 나오는 시점으로 하였다.

압력센서에서 나오는 전압은 DAS의 Digitizer를 이용하여 10,000 Sampling/sec의 속도로 5초 동안 측정하였고, 증기폭발 영상은 고속카메라를 이용하여 1,000 frame/sec 의 속도로 4초동안 녹화하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 동압측정 결과

냉각수에 낙하된 용융주석이 증기폭발을 일으킬 때의 압력거동을 다양한 주석온도 범위(300 ~ 700℃)에서 측정하였다. 주석의 무게는 50g 이며 냉각수는 증류수이다. 압력과는 수면아래 10cm 의 반응수조 측벽에 장착된 압력 트랜스듀서로 측정하였고 측정된 데이터는 DAS를 이용하여 기록하였다. 각 반응조건에서 측정된 압력파를 주파수와 진폭 측면에서 분석하였고, 증기폭발시의 압력거동과 관련하여 재미있는 결과를 알 수 있었다. Fig. 2에서 알 수 있듯이, 증기폭발은 단 한번만 발생하는 것은 아니고 본 실험에서 사용된 주석무게의 경우 2, 3번의 측정가능한 증기폭발 횟수를 기록하였다. 용융주석의 무게가 적은 경우^(a) 단 한번의 증기폭발 회수를 기록하는 것에 반해 주석무게가 많은 경우(10g 이상)^(b) 여러 번의 증기폭발 회수를 기록하는 것으로 보고된 기존의 실험결과와 본 실험의 결과가 정성적으로 잘 일치함을 보이고 있다. 이러한 결과로부터 증기폭발 횟수는 주석의 무게(혹은 액적의 반경)과 밀접한 관계를 가짐을 알 수 있다.

측정결과로부터 용융주석의 온도가 올라갈수록 폭발강도(압력파의 진폭)가 증가함을 보여주고 있다. 이러한 결과는 증기폭발후 잔해물인 테브리의 형상과도 밀접한 관계를 가져 폭발강도가 클수록 용융주석이 더 잘 미립화되는 것으로 관찰되었다. 즉, 증기폭발 강도가 크다는 것은 폭발에 참여하는 주석무게가 많다는 것을 보여주며 폭발에 참여한 주석은 매우 짧게 부서진 미립자 형태의 테브리를 형성한다.

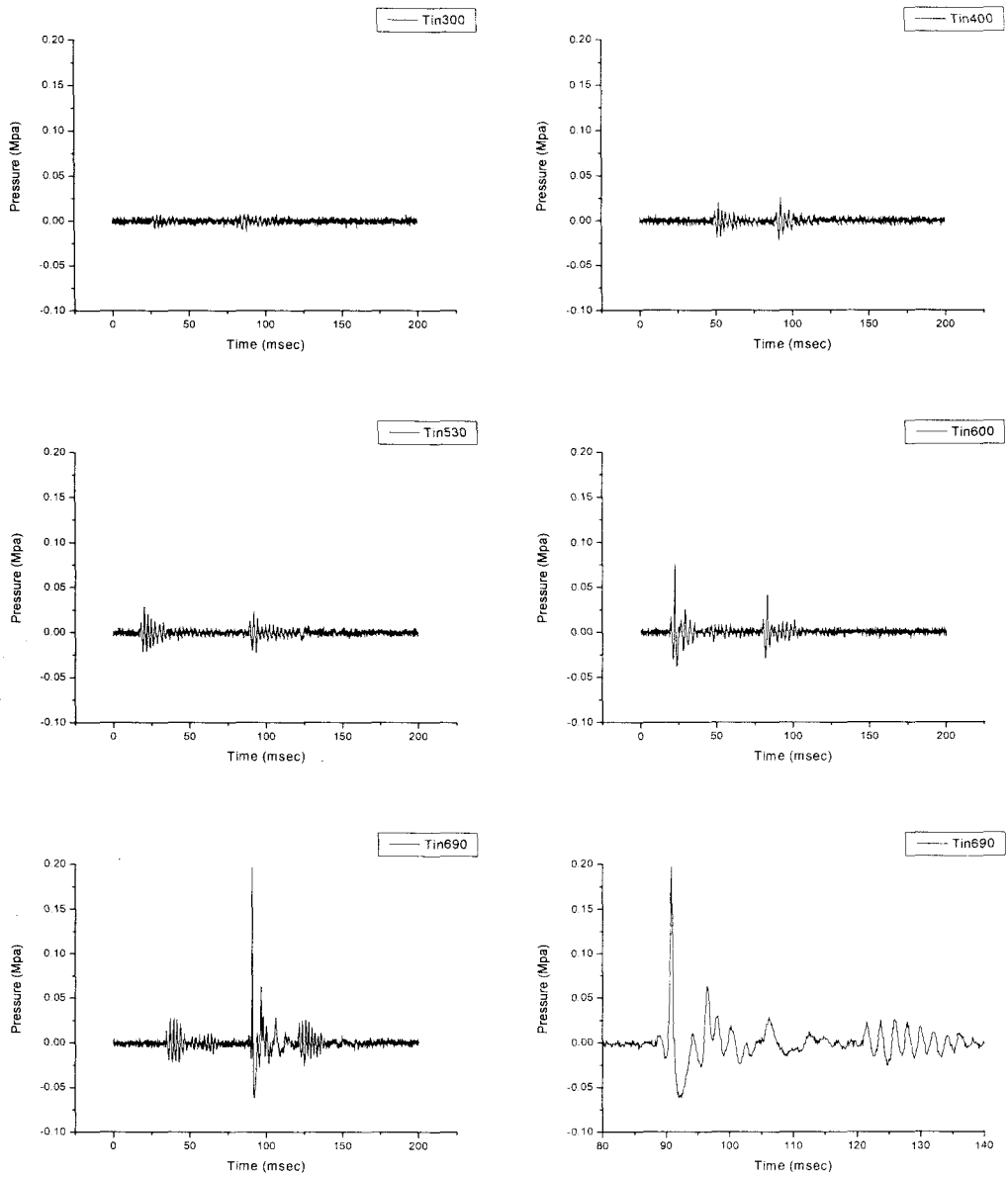
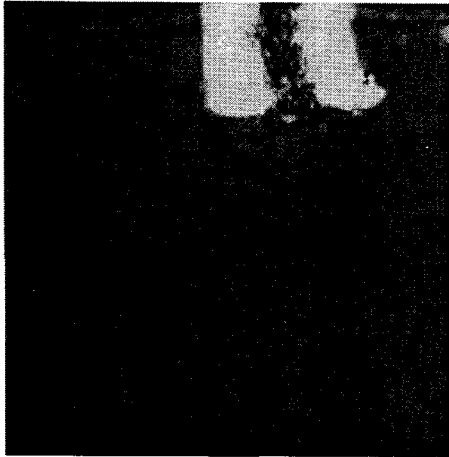
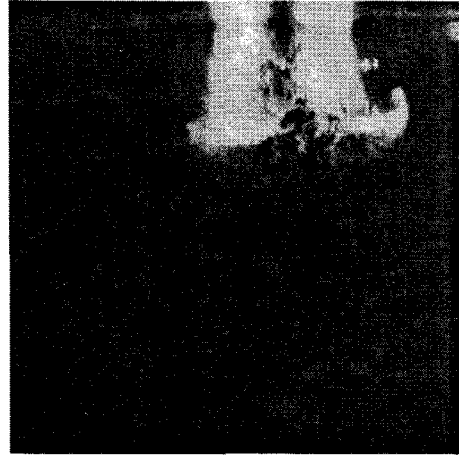


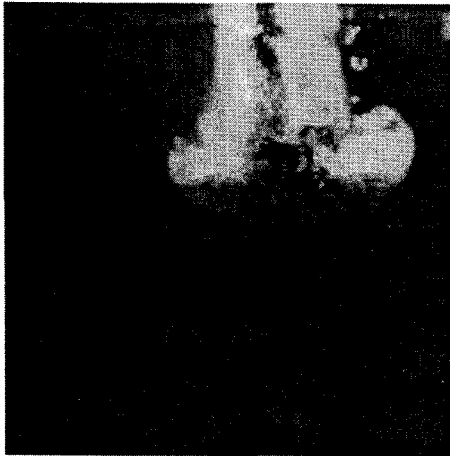
Fig 2. Behavior of pressure accompanying the explosion of tin in water



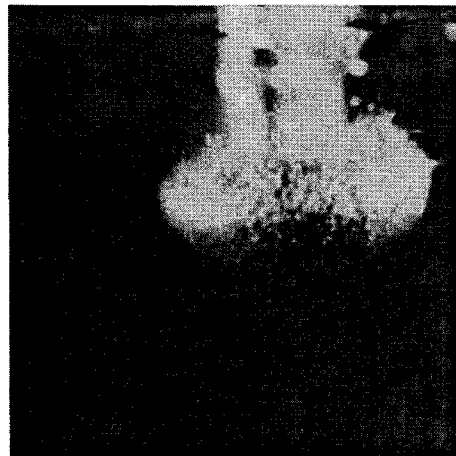
(a) 4ms



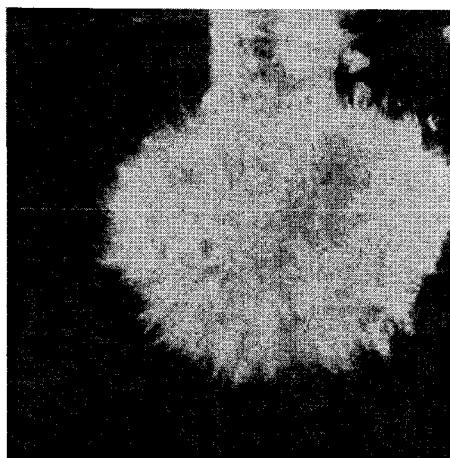
(b) 6ms



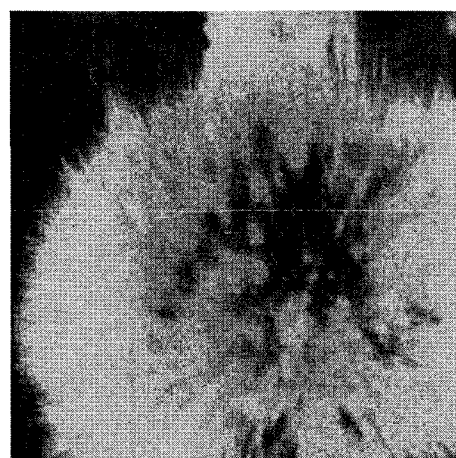
(c) 8ms



(d) 10ms



(e) 12ms



(f) 14ms

Fig 3. Vapor explosion process when the tin is dropped into water

또한, Fig. 2의 마지막 그림에서 알 수 있듯이, 폭발강도(진폭)가 크면 그 압력파의 주파수는 감소하는 것으로 즉 저주파의 파형을 보여주고 있다. 증기폭발시 파형의 진폭은 시간축을 기준으로 좌우대칭이 아니며 초기에 매우 강한 압력을 기록하고 지수함수적으로 진폭이 감소하는 것으로 측정되었다.

3.2 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 온도에 커다란 영향을 받는 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 폭발강도와 테브리의 형태가 상이함을 확인하였다.

4. 결론

수중을 낙하하는 고온 용융물의 증기폭발 실험을 수행하면서 고속 카메라를 이용하여 증기폭발 현상을 관찰하였고 압력센서를 이용하여 용융물의 온도조건이 압력거동에 미치는 영향을 측정하였다. 두 가지 별개의 측정은 트리거 장치를 이용하여 시간적으로 상호연관(Synchronize)지어 측정하여 폭발시의 영상과 압력파를 시간축 상에서 비교가능하도록 하였다. 이러한 측정을 통하여 증기폭발시의 물리적 현상의 변화정도를 정량적으로 확인할 수 있었다.

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

후기

본 연구는 과학기술부 중장비과에서 재정적인 지원을 받았으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Dullforce, T.A., Buchanan, D.J. and Peckover, R.S. 1976 Self-triggering of small-scale fuel-coolant interactions: I. Experiment, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 9, 1295
- (2) Shoji, M. and Takagi, N. 1982 Experimental study on small-scale vapor explosion initiated by dropping a drop of molten tin into water, *Trans. JSME, B*, 48, 1768
- (3) Akiyoshi, R., Nishio, S. and Tanasawa, I. 1988 Study on effect of noncondensable gas in vapor film upon vapor explosion, *Trans. JSME, B*, 54, 630
- (4) Kondo, Sa., Konishi, K., Isozaki, M., Imahori, S., Furutani, A. and Brear, D.J. 1995 Experimental study on simulated molten jet-coolant interactions, *Nucl. Eng. Des.*, 155, 73
- (5) Matsumura, K. and Naria, H. 1996 Self-triggering mechanism of vapor explosions for a molten tin and water system, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 33, 298
- (6) Matsumura, K. and Naria, H., Egasira, Y. and Ochimizu, M., 1999 Experimental study on base-triggered explosions in molten-tin/water systems, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 36, 767