

공기방울이 주석-물 시스템의 증기폭발에 미치는 영향에 대한 연구

Study on Effect of Air Bubble upon Vapor Explosions with Tin-Water System

신용승, 김종환, 홍성완, 송진호, 김희동

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

증기폭발현상은 원자력 발전소의 중대사고시 안전성 평가와 관련된 매우 중요한 문제 중의 하나이다. 이 현상에 대한 다수의 연구에도 불구하고 규명되어야 할 많은 문제들이 있다. 이러한 배경을 바탕으로 본 연구소는 증기폭발 현상을 연구하기 위해 UO_2 와 ZrO_2 를 사용하는 증기폭발 모사실험(TROI test)을 수행하고, 이와 병행하여 소규모 실험장치를 이용한 주석-물 시스템에 대한 증기폭발 실험도 수행하고 있다. 본 실험에서는 냉각수 내의 공기방울이 증기폭발에 미치는 영향을 정성적으로, 정량적으로 알아보려고 하였다. 이를 위하여 주석-물 시스템에 대한 소규모 실험에서 공기방울을 체계적으로 변화시켜가며 공기방울이 증기폭발에 미치는 영향을 조사하였다. 용융주석은 50g, 용융주석의 온도는 $550^{\circ}C$, 냉각수의 온도는 $24^{\circ}C$, $50^{\circ}C$, 공기방울은 void fraction기준으로 0, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0 %로 하였다. 반응수조 벽면에 부착된 2개의 동압센서로 증기폭발시의 동압변화를 측정하였고, 일부 실험조건에 대해서는 고속카메라를 이용하여 1000 frame/sec로 증기폭발 현상을 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. Besides TROI tests, 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 vapor explosion was observed while air bubble and water temperature were systematically varied. The mass and temperature of tin are 50g and $550^{\circ}C$, respectively. Water temperature is set to $24^{\circ}C$ and $50^{\circ}C$. Void fraction of air bubble ranges from 0 to 10%. Pressure pulse, the strength of vapor explosion, was measured using dynamic pressure sensors attached in reactor tube wall. as a function of void fraction. In addition, a high speed video filming up to 1000 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 사

고의 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, 그 중의 하나로 주석을 이용한 소규모 증기폭발 실험이 있다. 주석은 231.9 °C의 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. Akiyosi 등[2]은 증기막 내의 비응축성 가스가 증기폭발에 미치는 영향을 조사하여, 증기막에 비응축성 가스가 존재하면 증기폭발 발생 확률이 낮아진다고 보고하였다. 최근에는 Matsumura와 공동 연구자들이 소규모 증기폭발에 대한 실험적, 해석적 연구를 활발히 진행하고 있다. Matsumura 등[4]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[5]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. 기존 모델을 검증하고 더 나아가 모델을 보완하기 위해서는 증기폭발에 관계하는 다양한 실험변수들을 체계적으로 변화시켜 가며 광범위하게 실험 데이터를 구축하는 필요하다 하겠다.

이러한 배경을 바탕으로 원자력 연구소에서는 증기폭발을 연구하기 위해 UO₂와 ZrO₂를 사용할 수 있는 증기폭발 모사실험(TROI test)를 수행하고 있다. 또한 증기폭발 현상을 보다 정량적으로 연구하기 위해, 소규모 실험장치를 이용하여 TROI 실험과 별도로 진행시키고 있

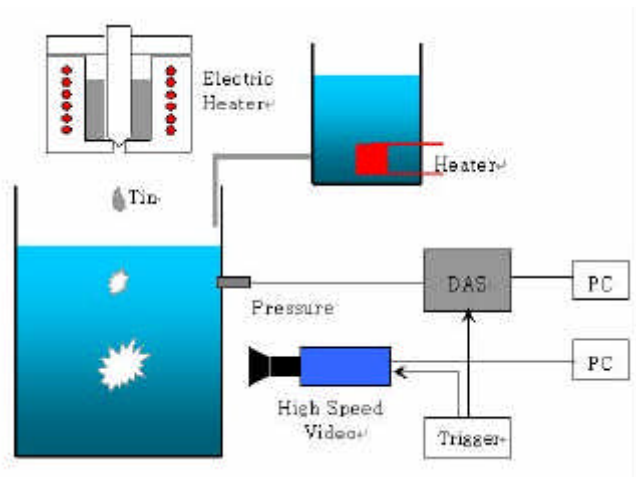


그림 1. 실험장치의 개략도

다. 소규모 실험장치를 이용한 실험에서는 증기폭발에 대하여 영향을 주는 것으로 알려진 실험 변수들을 체계적으로 변화시켜 가며 debris의 모양 관찰, 고속카메라를 이용한 현상의 가시화 그리고 압력과 측정을 통하여 이러한 변수들이 증기폭발 현상에 미치는 영향을 정량적으로 연구하는데 주목적을 두었다.

소규모 주석-물 시스템에서 계획된 일련의 실험의 일환으로 냉각수에 투입된 공기방울이 증기폭발 현상에 미치는 영향을 조사하는 실험을 수행하였다. 본 논문은 실험에 사용된 장치, 실험방법 및 조건 그리고 그 실험결과 등을 보고한다.

2. 실험장치

실험장치의 개략도를 그림 1에 나타내었다. 실험장치는 크게 금속을 전기가열시켜 일정온도로 용융시킨 후 액적상태로 반응수조에 낙하시키는 용융물 공급장치, 용융물과 냉각수가 증기폭발 현상을 일으키는 반응수조, 반응수조에 부착되어 냉각수의 온도를 조절하는 냉각수 온도조절장치와 반응수조에 공기방울을 공급하는 공기방울공급기, 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. 전기 가열로에 일정량의 주석을 투입한 후 전기 가열하여 주석이 일정 온도까지 도달하면 가열로 상단에 위치한 핸들을 뽑아 용융주석이 액적의 상태로 반응수조에 수직낙하하게 되어 있다. 용융주석의 온도는 가열로 내에 설치한 K-Type 열전대와 PID 컨트롤러에 의해 제어된다.

반응수조(그림 2 참조)는 가로, 세로 30cm, 높이 110cm의 사각통 형태로, 3면은 시각적 관찰을 위하여 두께 15mm의 투명 아크릴수지로 제작하였고, 나머지 한 면은 온도센서와 동압센서의 부착을 위하여 스텐인레스판으로 제작하였다. 용융주석이 가열로 노즐의 출구를 나와 반응수조의

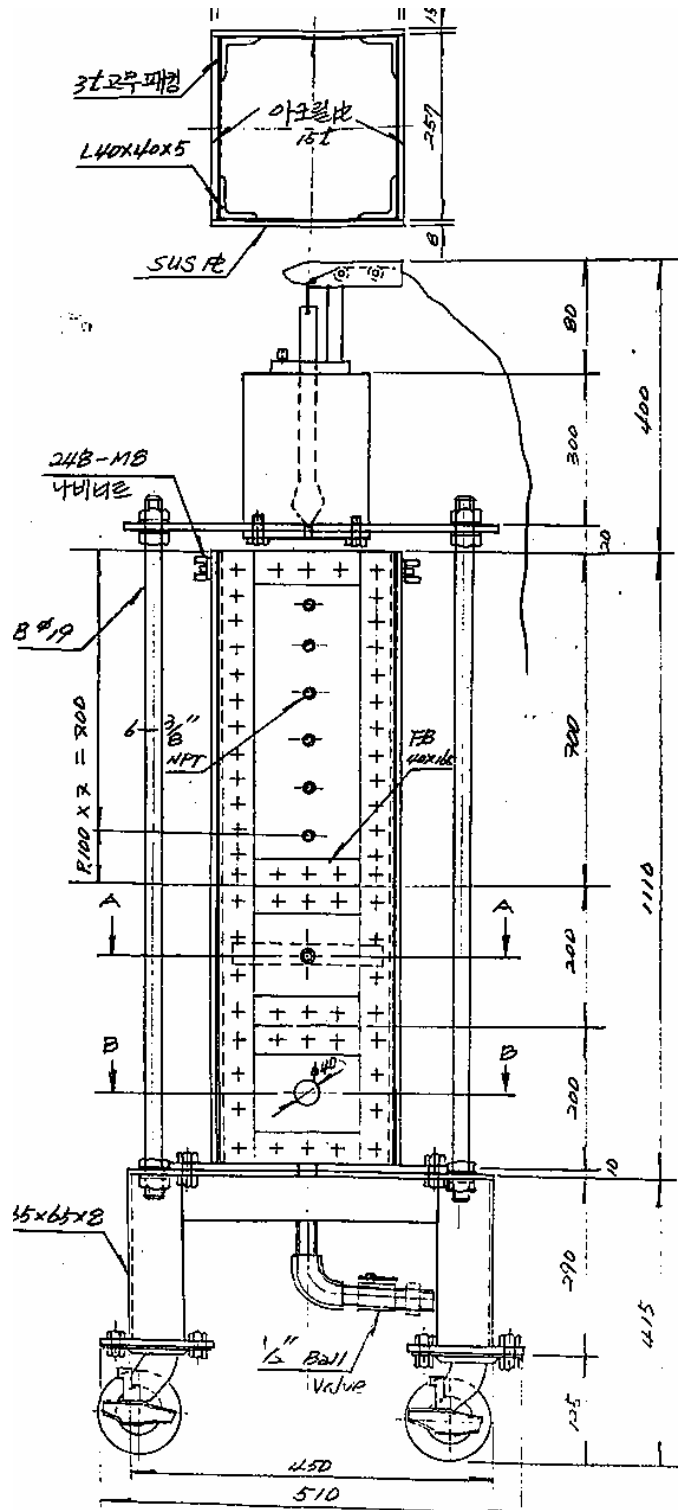


그림 2 실험장치의 상세도

수면에 돌입하기까지의 자유낙하거리는 반응수조의 수면높이를 조절함으로써 조절 가능하다.

냉각수 온도조절장치는 전기히터, K-type 열전대, On-Off 컨트롤러로 구성되어 있다. 전기히터는 반응수조의 가장 하부에 위치하고 있으며, 열전대는 반응수조의 중간부분에 위치하고 있어 실제 증기폭발이 발생하는 위치에서의 냉각수 온도를 측정하도록 하였다.

공기방울 공급기는 냉각수용 전기히터 바로 위에 위치하며 반응수조에 공기방울을 공급하는 역할을 한다. 공기는 외부의 압축공기를 이용하였고 정량적인 공기공급을 위하여 정압계와 유량계를 설치하였다. 그림 3에서와 같이, 공기방울 공급기는 사각형의 평판에 5개의 원형으로 된 다공성 금속을 부착한 형태로 되어 있다. 공기방울은 나오는 초기에는 공기방울이 나오는 위치에서만 공기방울이 관찰되지만 일정거리를 올라가면 공기방울끼리 서로 혼합되어 공기방울이 반응수조에 전체적으로 균일하게 분포하게 된다. 공기방울에 의한 Void fraction은 공기방울 투입전의 수면높이와 투입후의 수면높이의 차를 이용하여 계산하였다.

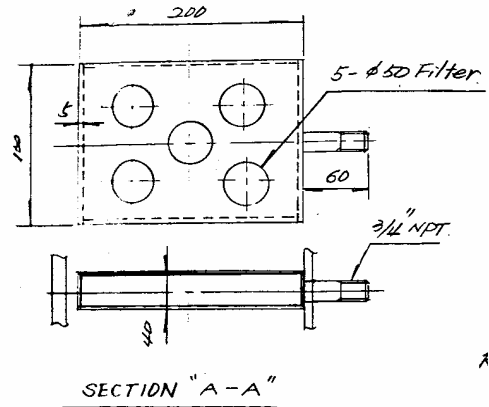


그림 3. 공기방울 공급기

증기폭발시의 압력변동은 반응수조의 스테인레스 벽면에 설치한 압력센서 (Piezoelectric Charge Mode Pressure Sensor, Model 112A03, Range : 1000psi, 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 로우패스 필터와 앰프(Dual Mode Amplifier, Model 443A, PCB Inc.)를 통과한 후 DAS로 입력된다.

증기폭발의 시각적 관찰을 위하여 경우에 따라 고속 카메라 시스템 (Phantom V4.0, CMOS Type, Pixel Resolution : 512×512, Max Recording Speed : 1000 frame/sec, Visiblesolutions Inc.)을 사용하였다.

3. 실험방법 및 조건

공기방울이 증기폭발에 미치는 영향을 조사하기 위하여 주석-물 시스템에 대한 소규모 실험에서 공기방울의 투입량을 체계적으로 변화시켜가며 실험을 조사하였다. 용융주석의 질량과 온도는 각각 각각 50g, 550℃로 고정하였고, 자유낙하거리는 20cm로 하였다. 이러한 자유낙하 거리에서 주석이 수면에 돌입할 때의 속도는 약 2.0m/s로 계산된다. 냉각수의 온도는 24℃, 50℃ 두가지를 사용하였다. 공기방울의 투입량은 void fraction 기준으로 0, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0 %로 하였다. void fraction은 공기방울 투입 전후의 반응수조 수면의 높이차를 이용하여 계산하였다. 즉, 공기방울 투입 전후의 수면의 높이차를 반응수조에 투입된 공기의 양으로 계산하였다. 공기방울을 투입하면 수면이 올라가는데 이 때 수면이 계속 움직이기 때문에 얼마나 올라갔는지를 눈으로 정확히 알기 어렵다. 따라서 일정시간 동안 수면의 움직임을 비디오로 촬영한 후 시간에 대한 평균값을 수면의 높이로 하였다. 본 실험을 하기에 앞서 공기유량과 void fraction에 대한 캘리브레이션 실험을 먼저 수행하였다. 동일한 실험조건(냉각수온도 2가지, void fraction 5가지)에서 각각 10번씩의 반복실험을 수행하였다.

증기폭발시의 폭발압력은 반응수조의 스테인레스 벽면에 부착된 2개의 동압센서로 측정된다. 압력센서에서 나오는 신호는 기본적으로 3kHz 정도의 노이즈가 있기 때문에, 센서의 신호를 1kHz 로우패스 필터를 먼저 통과시킨 후 앰프를 거쳐 DAS의 입력단자로 들어가게 구성하였다. DAS의 제어 및 데이터 저장은 IEEE1394를 통하여 PC가 담당하며, 이를 위하여 DAS 제어용 프

로그래 (VEE 언어)을 제작하였다. DAS에서 측정하는 동압의 샘플링 간격은 20 μ s로 셋팅하였다.

일부 실험조건에 대해서는 고속카메라를 이용하여 1000 frame/sec 촬영속도로 증기폭발 현상을 관찰하였다. 고속 카메라의 제어도 IEEE 1394를 통하여 PC가 담당한다. 카메라 렌즈는 초점거리 30cm 의 Nikon 105 mm 매크로 렌즈를 사용하였고, 1000 frame/sec 이상의 고속 촬영시 광량이 부족하기 때문에 반응수조의 측면 양쪽에서 각각 500 Watt의 조명등을 사용하여 광량을 보충하였다.

고속카메라로 촬영한 영상과 압력센서로 측정한 압력과 신호를 상호 연관시키기 위하여 두 계측장비가 동일한 트리거 신호에 의해 작동하도록 구성하였다. 이를 위하여 용융물이 가열로의 노즐출구를 통과할 때 트리거 신호가 발생하도록 장치를 구현하였고, 이 때 나오는 트리거 신호가 동시에 고속카메라와 DAS의 트리거 입력단자에 들어가도록 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

다음 그림 4은 동압센서로 측정된 전형적인 압력 파형의 예이다. 증기폭발시 파형의 진폭은 시간축을 기준으로 좌우대칭이 아니며 초기에 매우 강한 압력을 기록하고 지수함수적으로 진폭이 감소하는 것으로 측정되었다. 또한, 폭발강도(진폭)가 크면 그 압력파의 주파수는 감소하는 것으로 즉 저주파의 파형을 보여주고 있다.

그림 4에서는 증기폭발이 단 1번 발생하였지만 경우에 따라서는 2, 3번의 측정가능한 증기폭발 횟수를 기록하였다.

표 1은 주석온도 550 $^{\circ}$ C, 냉각수온도 24, 50 $^{\circ}$ C, void fraction 0, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0 %에서의 실험조건에서 각각 10번씩의 반복실험하여 획득한 증기폭발 강도에 대한 측정값을 통계처리하여 나타낸 것이다. 그림 4는 표 1의 통계값중 평균값과 표준편차만을 냉각수 온도 24 $^{\circ}$ C, 50 $^{\circ}$ C에 대하여 나타낸 것이다.

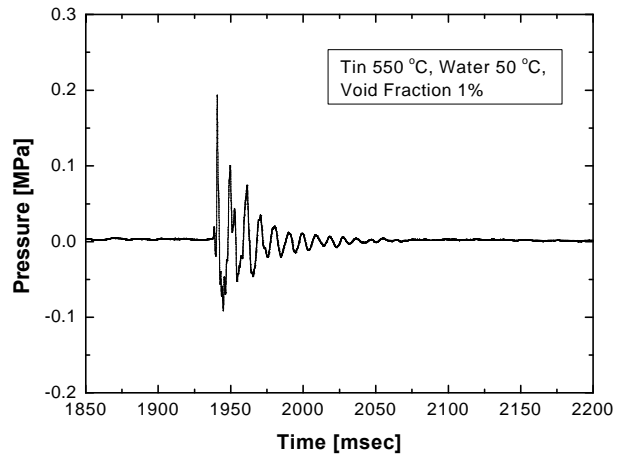


그림 4. 증기폭발시 발생하는 전형적인 압력파형

표 1. 실험조건별 증기폭발강도의 통계치

	Void Fraction	Mean	SD	Min	Max
Tin 550 $^{\circ}$ C Water 24 $^{\circ}$ C 반복 10회	0.0%	0.0125	0.01078	0.00441	0.03943
	0.5%	0.01174	0.00751	0.00446	0.02373
	1.0%	0.01047	0.00826	0.00231	0.02571
	5.0%	0.00632	0.00413	0.00181	0.01531
	10.0%	0.00269	0.0018	0.00096	0.00707
Tin 550 $^{\circ}$ C Water 50 $^{\circ}$ C 반복 10회	0.0%	0.02855	0.03339	0.00303	0.10928
	0.5%	0.01415	0.01187	0.00181	0.03905
	1.0%	0.02022	0.00986	0.00248	0.03211
	5.0%	0.00874	0.00911	0.00219	0.02874
	10.0%	0.00242	0.00173	0.00055	0.00607

먼저, 냉각수 온도가 증기폭발의 강도에 미치는 영향에 대해서 살펴보면 본 실험의 결과는 기존에 발표된 실험결과들과 정성적으로 동일한 결과를 나타내고 있다. 즉, cut-off temperature(이 온도 이상의 냉각수 온도에서는 증기폭발현상이 일어나지 않는다)를 초과하지 않은 범위내에서는 냉각수의 온도가 증가할수록 증기폭발의 강도는 증가하는 것으로 보고되고 있는데, 본 실험결과도 냉각수 온도를 제외한 나머지 실험변수가 동일한 경우 냉각수 온도가 올라갈수록 확실히 증기폭발 강도가 증가하는 것으로 측정되었다.

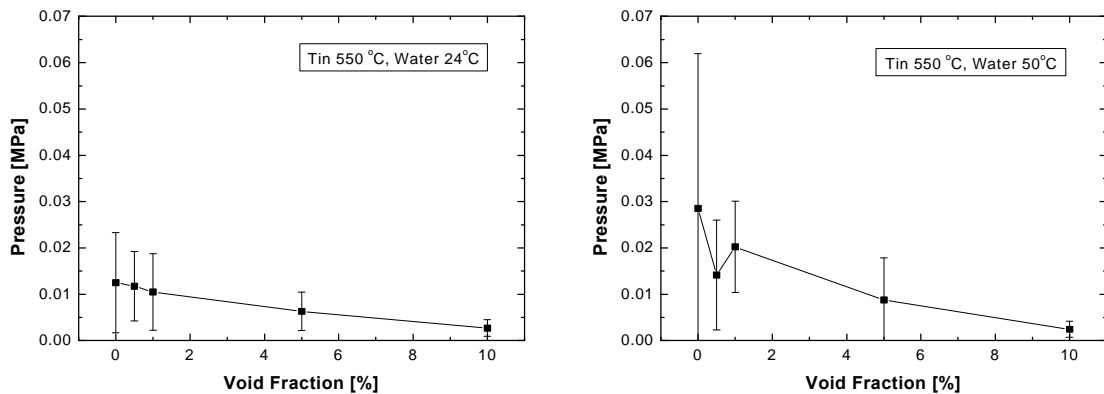


그림 5 냉각수 온도 24°C, 50°C에서의 Void Fraction에 따른 증기폭발 강도의 변화

공기방울이 증기폭발에 미치는 영향에 대해서는 실험결과를 전체적으로 고찰하여 볼 때, Void Fraction이 1% 미만인 경우에는 냉각수 중의 공기방울이 주석-냉각수 증기폭발현상에 증대한 영향을 미치지 못하는 것으로 여겨진다. 그림 5에서 알 수 있듯이 void fraction이 증가할수록 전반적으로 증기폭발 강도의 평균값은 감소하는 경향을 나타내고 있으나(일부 구간에서는 역전) 표준편차값이 너무 크기 때문에 공기방울의 효과가 있다고 하더라도 그 효과는 아주 미미한 실정이다. 이렇게 거시적 실험조건(용융물의 질량, 냉각수 온도, 용융물 온도, 자유낙하 거리, Void Fraction)이 동일한 조건하에서의 반복실험에서 증기폭발 강도의 표준편차가 크다고 하는 것은 용융물이 냉각수와 어떠한 형태로 접촉하는가 하는 것이 증기폭발에 더 증대한 영향을 미치는 인자일 수 있음을 암시하고 있다. 즉, 용융주석과 물의 접촉시의 비동일성이 증기폭발 강도의 비동일성과 깊은 연관이 있을 수 있다고 생각할 수 있다. 이러한 추론은 고속카메라로 촬영한 영상에서 매 실험마다 냉각수와 접촉하는 용융물의 형태가 다르게 나타난다고 하는 관측결과에 기반을 두고 있다. 이러한 용융물과 냉각수의 접촉형태가 증기폭발에 미치는 영향은 용융물의 질량이 커지면 커지수록 낙하하는 형태가 더욱 다양해 질 것이므로 그 영향이 더 증대될 것으로 생각되어진다.

그러나 Void Fraction이 5%, 10%로 증가함에 따라 공기방울의 효과가 확실하게 나타나고 있다. 즉, 이 정도로 공기방울을 투입하면 증기폭발 강도의 평균값이 감소함과 동시에 표준편차도 확실하게 감소하는 경향을 보이고 있다. 증기폭발강도 완화라는 관점에서 볼 때, 본 실험의 결과는 Void fraction 기준으로 5% 이상 충분히 공기방울이 투입되어야만 공기방울에 의한 증기폭발 강도 완화의 효과를 기대할 수 있음을 보여주고 있다.

5. 결론

본 실험에서는 소규모의 주석-물 시스템을 이용하여 공기방울이 증기폭발에 미치는 영향을 조사

하여 다음과 같은 실험결과를 관찰하였다.

- 증기폭발 반복실험을 통하여 용융물의 온도, 질량, 자유낙하거리, 냉각수의 온도, 양 등의 실험 변수가 동일하더라도 증기폭발시의 폭발강도는 그 표준편차가 매우 크게 나타남을 관찰하였다. 이것은 용융물과 냉각수의 접촉형태가 증기폭발에 중대한 영향을 미치는 인자임을 암시한다고 할 수 있다.
- 냉각수의 온도가 증가할수록 증기폭발의 강도가 증가하게 측정되었다.
- Void Fraction 1% 미만의 적은 공기방울 투입시에는 공기방울의 영향이 거의 나타나지 않지만, Void Fraction %5 이상으로 넘어가는 범위에서는 공기방울에 의한 증기폭발 강도의 완화 효과를 기대할 수 있다.

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. 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)
3. 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)
4. 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)
5. 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)