2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

IRWST에서 증기의 직접접촉 응축과 공기기포 진동현상에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Direct Contact condensation of steam and Air bubble Oscillation in IRWST

윤덕현, 이영연, 김무환
포항공과대학교

배윤영, 박종균
한국원자력연구소

요약

KNGR에 설치할 IRWST의 최적설계를 위하여 증기의 직접 접촉응축과 공기기포의 진동현상을 관찰, 분석하고 그로부터 발생되는 압력진동의 특성을 파악하였다. 연구 결과, 스팀의 경우 쳐깅영역에서는 압력파의 생성율이 풀의 냉각수 온도보다 증기의 질량유속에 의존하였고, 응축진동과 안정응축 영역에서는 진동수가 냉각수의 온도 증가에 따라 큰 폭으로 감속하였으며, 노즐 직경이 클수록 진동수가 감소하였다. 압력의 RMS 진동폭은 응축진동 영역의 최고 질량유속에서 가장 큰 값을 나타냈으며, 이 후 안정응축 영역의 경계치에서 갑작스런 감소를 보였다. 공기기포의 경우 이전의 실험은 주로 작은 기포에 국한되어 IRWST에 적용하기 어렵기 때문에 본 실험에서는 거대 공기기포를 만들고 이에 따른 진동수 변화를 관찰하였다. 그 결과 거대 공기기포의 형성으로 인한 진동수는 방출된 공기의 양이 증가할수록 감소함을 보였다.

Abstract

We investigated and analyzed the direct contact condensation of steam and the oscillation of air bubble. And we characterized the pressure oscillation resulting from those. The experiment result showed as follows. In chugging region, the high pressure pulse generation rate was little affected by the subcooled water temperature but increased with increasing the steam mass flux. In the region of condensation oscillation and stable condensation, the variation of frequency of dynamic pressure was decreased with increasing of the water temperature. And decreased as increasing nozzle diameter. The amplitude of pressure oscillation was maximum at the boundary between these two region, and remarkably decreased in the stable condensation region. In the case of air bubble, showed that the frequency of air bubble oscillation decreased with increasing the quantity of injected air.

1. 서론

냉각재 계통으로부터 IRWST로의 증기 방출 및 응축 현상에는 배관 내에 존재하는 물과 공기의 방출현상도 수반되어 일어난다. 이러한 현상 중에서 공기의 방출에 의해 형성된 대형 공기기포의 진동과 증기의 직접접촉 응축으로부터 발생하는 압력의 진동은 구조물의 안

전성에 심각한 영향을 줄 수 있다는 것이 알려져 있다. 이러한 압력의 진동으로 인한 하중 자체는 문제가 되지 않을 수 있으나 그 진동수는 구조물과의 공진으로 인해 직접적인 피해를 줄 수 있으므로 기포의 진동과 증기의 응축으로부터 발생하는 압력진동의 진동수는 구조물에 대한 영향의 평가에 있어 중요한 의미를 갖는다.

기존의 연구에 의하면 증기가 정체되어 있는 수조 내부로 분사되는 경우 증기의 응축에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 증기의 질량유속, 수조 냉각수의 과냉각도 그리고 분사노즐의 직경으로 알려져 있으며 이러한 조건의 변화에 따라 증기의 응축현상과 이에 따른 압력의 진동은 다양한 특성을 나타내게 된다[1].

본 연구에서는 증기의 응축현상이 다르게 나타날 수 있는 증기의 질량유량과 수조 냉각수 온도의 전 범위에 대한 실험을 수행함으로써 응축의 현상이 변화하는 경향과 그에 따른 압력진동의 특성을 파악하고자 하였다. 또한 압력진동의 발생에 대한 본질적인 이해를 위하여 증기/물의 경계면의 거동을 압력진동과 동시 측정하고 이를 분석하였다. 또한 물 속으로 분사되는 공기로부터 형성되는 대형 기포의 진동 특성을 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 현재까지 공기 기포의 거동에 관한 대부분의 연구는 작은 기포에 국한되어 왔으며 IRWST에서와 같이 고압의 공기가 짧은 시간동안 급격하게 방출된 후 대형 기포를 형성하여 진동하는 현상에 적용시키기에는 무리가 있다. 그러므로 본 연구에서는 압축된 공기가 짧은 시간동안 수조 내로 분사될 때 일어나는 대형 기포의 형성 과정과 수조 내에서의 거동을 관찰하였으며 분사되는 공기의 초기 압력과 분사된 공기의 양에 따른 기포의 진동현상을 분석하였다.

2. 증기 응축 실험

2.1 실험 장치

증기의 직접 접촉 응축 현상을 분석하기 위한 본 실험 장치는 Fig. 1와 같이 증기발생 및 유량 조절장치와 응축 실험부로 구성된다. 보일러에서 발생되어 증기라인을 통해 실험부로 공급되는 증기의 질량유량은 증기의 부피유량, 온도, 압력의 측정을 통해 계산하며 밸브의 개도를 조절함으로써 그 질량유량을 조절한다. 실험부에서 수조로 유입되는 증기는 수평방향으로 분사되며 수조 내에서 응축으로 발생되는 압력파와 수조 내의 냉각수 온도를 측정하기 위한 측정장비가 설치되었고 가시화를 위해 고속 카메라를 사용하였다.

2.2 시험부 (test section)

Fig. 2는 증기를 과냉의 냉각수 속으로 분사시키기 위한 수조와 분사 노즐, 그리고 냉각수의 온도측정을 위한 RTD 및 응축에서 발생되는 압력변동을 측정하기 위한 압력센서, 증기/물 경계면의 거동을 가시화하기 위한 고속 카메라를 나타낸다. 수조는 8 mm 두께의 스테인레스로 높이와 너비가 600 mm인 정 육면체형으로 제작되었다. 응축현상의 관찰과 고속 카메라를 통한 가시화를 위해 수조 벽면에는 관측 창을 설치하였으며 응축현상으로 인해 벽면이 흔들리는 것을 최소화하기 위하여 벽면에 수직인 방향으로 두께 8 mm, 너비 30 mm의 스테인레스 판을 바둑판 모양으로 용접하여 보강하였다. 또한 응축으로부터 발생된 압력파와 수조 벽면과의 상호작용을 최소화하여 증기응축으로부터 생성된 압력파의 진동수를 정확히 측정하기 위해 수조내부의 벽면에 30 mm 두께의 방음 스폰지를 부착하였다. 수조 벽면에는 overflow 라인을 설치하여 수조 내 냉각수의 높이와 부피가 각각 500 mm, 0.18 m^3를 유지하도록 하였다. 증기는 분사노즐로부터 수평방향으로 분사되며 쳐깅 영역에서 분사 노즐 내부에서의 증기/물 경계면의 거동을 관찰하기 위해 투명한 폴리카보네이트 튜브로 제작하였으며 수면으로부터의 잠김 깊이는 350 mm를 유지한다.

2.3 실험 방법 및 범위

본 연구에서는 질량 유속, 수조 내 물의 온도, 노즐 직경에 따른 압력진동의 특성을 파악하고자 하는 것이므로 이에 따라 Table 1과 같은 실험 변수와 범위에서 실험을 수행하였다. 증기의 분사노즐은 내경 3/8, 4/8, 5/8, 6/8 inch의 네 가지 크기를 사용하였다. 3/8 inch 노즐에서는 쳐깅에서 안정응축 영역까지 전 영역의 질량 유속을 포함하고 있으며 4/8 inch 에

서는 응축진동 영역까지, 그리고 5/8, 6/8 inch 에서는 쳐깅 영역에 대한 실험을 수행하였다. 쳐깅 영역에서는 질량 유속을 20 kg/m^{2}sec씩 증가시켜 가면서 세부적인 경향을 파악하였고 그 외의 영역에서는 50 kg/m^{2}sec 마다 실험을 수행하였다. 수조 내 냉각수의 온도 실험범위는 30~90 ℃ 까지이다.

2.4 실험결과

증기의 질량유속이 낮은 영역에 속하는 쳐깅에서부터 높은 질량유속의 안정응축 영역까지 전반에 걸친 압력진동의 특성을 분석하였다(Fig 3~5). 쳐깅 영역에서는 불규칙적인 압력파가 간헐적으로 생성된다. 이 영역에 대해서는 이러한 압력파의 생성율을 파악하여 실험조건에 따라 변화하는 경향을 분석하였다. 응축진동과 안정응축의 영역에서는 쳐깅영역에 비해 고주파의 압력파가 생성되며 질량유량이 증가하여 응축진동에서 안정응축 영역으로 변함으로써 압력의 진동폭이 확연히 감소함을 알 수 있다. 이런 고주파의 진동이 발생하는 두 영역에서는 FFT 기법을 사용하여 압력 진동의 주파수를 분석하였으며 다음 식과 같이 나타내어지는 RMS(Root Mean Square) 압력을 이용하여 고주파 진동의 진동폭 및 구조물에 미칠 수 있는 압력의 하중을 분석하였다.

$$RMS\ pressure = \frac{\sum_{i=1}^{N}\sqrt{(p_m - p_i)^2}}{N}$$

2.4.1 쳐깅 영역

앞에서 언급한 바와 같이 저 유량의 쳐깅 영역에서는 펄스의 형태로 간헐적인 압력파가 생성되고 그 주기 또한 일정하지 않았다. 이러한 특성으로 인해 높은 질량유량에서와 같은 FFT기법을 통한 주파수의 분석은 불가능하므로 본 연구에서는 압력파가 생성되는 회수를 측정하여 질량유속과 수조 내 냉각수의 온도 변화에 따른 생성율을 분석하였다. 이는 고 유량에서의 진동수와 같은 의미를 가진 것으로 볼 수 있다. 6/8 inch 노즐에 대하여 질량유속의 증가에 따른 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 수조 내 냉각수의 온도가 70 ℃ 이하인 경우 질량유속이 60 kg/m^{2}sec까지 질량유속의 증가에 따라 압력파의 생성율도 점진적으로 증가하다가 80 kg/m^{2}sec 에서는 이러한 경향에서 벗어나 급격한 증가를 보인다. 이는 응축패턴의 변화와 관련이 있는 것으로 판단된다. 즉, 증기/물의 계면이 주기적으로 분사노즐 안으로 유입되는 영역과 질량유속이 증가하여 계면이 분사노즐 끝단에서만 크게 진동하는 영역의 경계가 60~80 kg/m^{2}sec 사이에 존재하는 것으로 보인다. 또한 냉각수 온도가 80 ℃인 경우는 증기의 질량유속에 관계없이 버블링 응축진동 영역에 속하므로 쳐깅영역에서 나타나는 압력파의 생성율의 변이가 나타나지 않고 있다. Fig. 7는 각각의 질량유속에서 온도에 따른 변화를 보여주고 있다. 질량유속이 60 kg/m^{2}sec 까지는 온도에 따른 변화가 미미하나 80 kg/m^{2}sec 부터는 압력파 생성율의 증가와 함께 온도에 따른 변화폭도 크게 증가하고 있다.

위의 결과를 통해 증기의 질량유속이 낮은 영역에서(G<80 kg/m^{2}sec) 압력파의 발생율은 증기의 질량유속에 따라 큰 변화가 발생하며 온도에 따른 변화는 그에 비해 작다고 할 수 있다. 즉, 이 영역에서의 증기의 응축 현상에 영향을 미치는 주요 인자는 증기의 질량유속이며 냉각수 온도의 영향은 크지 않은 것으로 보인다.

진동수는 10 kg/m^{2}sec에서 10 Hz 이하, 20~60 kg/m^{2}sec 에서는 20~50 Hz의 범위에 있다. IRWST 구조물은 30 Hz 정도의 고유진동수를 갖는 것으로 알려져 있으므로 구조물과의 공진의 가능성을 고려할 때 극히 위험한 범위에 있음을 알 수 있다. 이 질량유속의 범위에 대해 3~7 Hz의 압력파가 생성된다는 연구 결과[2]가 있었으나 본 연구의 결과와는 많은 차이를 보이고 있다.

Fig. 8은 증기/물 계면의 거동과 압력파의 발생의 관계를 알아보기 위해 고속 카메라와 압력측정을 동기화 시켜 얻은 결과를 나타내고 있다. 노즐 끝에서 생성된 증기 기포는 그 크기가 커지고 아래 부분이 잘록해져 노즐 끝에서 떨어져 나가며 순간적으로 응축이 일어

난다. Fig. 9에 나타낸 압력변화와의 시간과 비교해 볼 때 압력파는 증기 기포가 노즐로부터 떨어져 나가 응축이 일어나는 순간에 발생함을 알 수 있다. 압력파 생성 후에 보이는 몇 번의 진동은 증기의 응축현상과 관련이 없이 수조벽면이나 분사노즐의 진동에 의한 것으로 판단된다.

2.4.2 응축진동 및 안정응축 영역

- 진동 주파수

질량유속에 따른 진동수의 변화를 Fig. 10에 나타내었다. 질량유속의 증가에 따라 큰 변화는 나타나지 않고 있으며 냉각수의 온도가 30, 40 ℃의 경우 300 kg/m^{2}sec에서, 그리고 그 이상의 온도에서는 350 kg/m^{2}sec에서 약간 증가하는 경향을 보인다. 이는 응축 영역에서 안정 응축영역으로의 변이가 일어나면서 나타나는 현상으로 압력의 진동폭이 이 두 질량유속의 값을 경계로 하여 확연하게 감소하는 것을 통해 확인할 수 있다[2][3]. 또한 냉각수의 온도가 증가함에 따라 안정응축의 영역으로 전환되는 질량유속이 증가하고 있음을 알 수 있다. 즉, 냉각수의 온도가 증가하면 안정적인 응축이 일어나기 위한 증기의 최소 질량유속의 값이 증가한다. Fig. 11은 수조 내 냉각수의 온도에 따른 진동수의 변화를 나타내고 있다. 온도의 증가에 따라 압력의 진동수는 감소하며 질량유속에 따른 변화에 비해 매우 큰 감소를 나타내고 있다. 이는 냉각수의 온도가 증가함에 따라 응축률이 감소되어 증기기포의 크기가 커지고 그 결과 증기 기포의 진동 주기가 길어지면서 그에 따라 발생되는 압력의 진동수는 감소하게 되는 것으로 보인다.

Fig. 12은 같은 질량유속에서 노즐의 직경에 따른 진동수의 변화를 나타내고 있다. 노즐의 직경이 다른 세 경우 모두 전 온도영역에 대해 같은 경향으로 감소하고 있으나 직경이 증가함에 따라서 전체적으로 진동수는 감소하는 경향을 나타내고 있다.

- 진동폭

RMS 압력을 이용하여 진동폭을 분석하였으며 질량유속의 증가에 따른 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 전반적으로 질량유속의 증가와 함께 RMS 압력도 증가하는 경향을 보이고 있고 온도에 따라 300 kg/m^{2}sec과 350 kg/m^{2}sec에서 급격히 감소한다. 이는 진동수의 분석에서 언급한 바와 같이 응축진동 영역에서 안정응축 영역으로의 변화를 나타낸다고 할 수 있으며 냉각수 온도가 80 ℃의 경우는 버블링 응축진동 영역에 속하므로 이러한 경향에서 벗어나고 있다. 최대의 진동폭은 250 kg/m^{2}sec과 300 kg/m^{2}sec, 즉 응축 진동영역의 최대 질량유속에서 나타났다.

3. 공기기포 실험

3.1 실험 장치

본 실험 장치는 Fig. 14와 같이 수조와 공기 분사장치 그리고 압력 측정 및 밸브제어 장치로 구성된다. 공기 압축기로부터 공급된 공기는 솔레노이드 밸브를 지나 다공의 분사노즐을 통해 분사된다. 수조는 600×600×600mm 크기의 정육면체형으로 제작되었고 분사노즐은 수조의 바닥 면으로부터 150 mm 높이의 중앙에 설치되어 잠김 깊이는 400 mm, 벽면으로부터의 거리는 300 mm를 유지한다. 분사노즐은 hole의 개수를 달리하여 24 hole, 8 hole 두 가지를 사용하였다. 압축기로부터 공급되는 공기의 압력과 밸브의 개방 시 분사 노즐 내에서의 압력을 측정하기 위해 밸브의 전, 후단(PT3,PT2)에 압력센서(pressure transducer)를 설치하였으며 수조 내에 설치된 압력센서로(PT1)부터 공기 기포의 진동에 의한 압력 변화를 측정하였다.

3.2 실험 방법 및 범위

수조 내에서 노즐을 통해 분출된 공기에 의해 형성된 대형 기포가 진동하는 현상에서 가장 큰 변수가 되는 것은 기포의 크기이므로 그에 따는 기포의 진동수를 측정하기 위해서 Table 2와 같은 변수와 범위에서 실험을 수행하였으며 밸브 전단의 공급 압력과 밸브의 개

방시간을 변화시킴으로써 분출되는 공기의 총 양을 조절한다. 압력의 실험범위는 1~7기압까지이며 공기 분출에 따른 압력의 변화를 밸브 전단에 설치된 압력센서와 오실로스코프로 확인 후 가압 함으로써 같은 압력조건의 실험에서 일정한 압력을 유지할 수 있도록 하였다. 밸브의 개방시간이 길어질수록 노즐로부터 방출된 공기의 많은 부분이 대형기포를 형성하지 못하고 작은 기포의 형태로 떠오르는 현상이 일어나므로 밸브의 개방시간은 0.05~0.3초까지의 범위에서 실험을 수행하였다.

3.3 공기기포의 진동 특성 분석

분사노즐의 hole을 통해 수조의 물 속으로 분출된 공기가 몇 개의 큰 기포로 형성되어 상승하는 현상이 관찰되었으며 그러한 공기 기포의 거동과 이에 따른 수조 내에서의 압력 변화를 Fig. 15~16에 나타내었다. Fig. 16에 나타난 바와 같이 공기의 분출이 시작되는 순간 수조 내에서는 피크 압력이 나타나며 밸브가 닫히고 공기의 공급이 중단되는 시점에 압력의 주기적인 진동이 시작된다. 수조 내에서의 이러한 압력의 진동은 공기기포의 진동으로 인한 것이며 공기기포가 진동하게 되는 과정은 다음과 같다. 압축된 공기가 방출됨에 따라 주위의 물을 가속시키게 되고 그 결과 물의 모맨텀에 의해 기포내의 압력은 평형압력 이하로 떨어지게 된다. 밸브가 닫히고 공기의 공급이 중단되는 순간에 분출된 공기는 큰 기포를 형성하고 있으며 이때 기포의 크기는 최대, 압력은 최소가 된다. 기포내의 낮은 압력으로 인해 기포는 주위의 물을 기포의 중심방향으로 가속시키며 압축되고 그 결과 기포내 압력이 상승하여 한계점에 도달하면 다시 팽창하게 된다[4].

Fig. 15에서와 같이 생성된 큰 기포는 이러한 압축, 팽창과정을 반복하면서 상승하게 되며 본 연구에서는 이로부터 전달되는 수조 내에서의 압력 변동을 측정함으로써 기포의 진동수를 도출하였다. Fig. 16에서 대략 0.2초에서 0.5초까지 보이는 압력의 진동이 이러한 기포의 진동으로 인한 것으로 판단되므로 본 연구의 진동수 분석에서는 그 영역의 압력신호를 분석하였다. 기포의 진동으로 인한 압력의 변동 이후 보이는 미세한 변동은 기포들간의 상호 작용에 의한 것으로 보인다.

밸브의 개방시간과 밸브 전단의 초기압력 변화에 따라 각각의 분사노즐에 대한 기포의 진동수는 Fig. 17~18과 같이 나타났다. 밸브의 개방시간과 초기 압력의 증가에 따라 분출된 공기의 양이 증가하고 형성된 기포의 크기가 증가하면서 진동수가 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 초기 압력이 1bar인 경우에는 밸브의 개방시간에 따른 결과가 그러한 경향에서 벗어나고 있는데 이 경우에는 hole을 통해 분출된 공기가 큰 기포를 형성하지 못하고 초기 압력이 높은 경우에 비해 작은 크기의 기포들이 형성되었기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 증기의 직접 접촉 응축 및 거대 공기기포 형성으로 인한 압력의 진동현상을 실험을 통해 분석하였다. 증기 응축영역선도의 모든 영역을 포함하고 있는 실험 범위에서 증기의 질량 유속, 냉각수의 온도 그리고 노즐의 직경에 따른 압력의 진동특성과, 수조내로 분출된 공기의 양에 따른 공기기포의 진동수를 해석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 쳐깅 영역에서 압력파의 생성율은 냉각수의 온도보다는 증기의 질량 유속에 따른 변화가 컸으며 그 값이 급격하게 증가하는 질량유속의 경계가 존재하였다.
2) 쳐깅 영역에서의 압력파는 노즐 끝에서 성장된 증기기포가 순간적인 응축으로 인해 소멸되는 순간에 발생하였다.
3) 응축진동과 안정응축영역의 진동수는 냉각수 온도의증가에 따라 큰 폭으로 감소하였으며 노즐 직경의 증가에 따라 감소하였다.
4) 압력의 진동폭은 응축진동영역의 최고 질량유속에서 가장 큰 값을 나타냈으며 안정응축영역에서 급격히 감소하였다.
5) 거대 공기기포의 형성으로 인한 진동수는 방출된 공기의 양이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다.

본 연구 결과를 통해 IRWST로 증기가 방출될 때 구조물의 안전성과 관련하여 고려해야 할 가장 중요한 변수는 증기의 질량유속이 낮은 영역(G<80 kg/m^{2}sec)에서는 증기의 질량유속이며 질량유속이 높은 영역에서는 냉각수의 온도라는 것을 알 수 있다. 공기기포의 진동에서는 방출된 공기의 양이 중요한 변수로 작용함을 알 수 있지만 공기의 방출 속도 및 기포의 초기 압력, 벽면이 기포의 진동에 미치는 영향 등을 파악하기 위해서는 추가의 실험과 분석이 요구된다.

본 논문은 과학 기술부의 원자력 연구개발 사업 및 NRL 과제 일환으로 수행되었습니다.
실험에 많은 도움을 주신 KAERI의 배윤영, 박종균 박사님께 깊이 감사드립니다.

참고 문헌

[1] P. J. Kerney, G. M. Feath, and D. R. Olson, "Penetration Characteristics of a Submerged Steam Jet", AIChE J., Vol. 18, No. 3, pp. 548–553, 1972

[2] S. Cho, C. H. song, C. K. Park, S. K. Yang, and M. K. Chung, "Experimental Study on Dynamic Pressure Pulse in Direct Contact Condensation of Steam Jets Discharging into Subcooled Water",NTHAS98, pp. 291–298, 1997

[3] Y. S. Kim, "An Investigation of Direct Contact Condensation of Steam Jet in Subcooled Water", PhD. Dissertation, KAIST, 1996

[4] S. Cho, S. K. Yang, H. J. Chung, S. Y. Chun, " Characteristics of Air Clearing Loads of a Sparger, Proc. of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, 2000

[5] M. E. Simpson and C. K. Chan, "Hydrodynamics of a Subsonic Vapor Jet in Subcooled Liquid", J. of Heat Transfer, Vol. 104, pp. 271–278, 1982

[6] I. Aya and H. Nariai, "Evaluation of Heat-transfer Coefficient at Direct Contact Condensation of Cold Water and Steam", Nucl. Eng. and Des., Vol. 131, pp. 17–24, 1991

[7] C. K. Chan. and C. K. B. Lee, "A Regime Map for Direct Contact Condensation", Int. J. Multiphase Flow. 8, No. 1, pp. 11–20, 1982

Inner diameter of nozzle	Mass flux (kg/m^{2}sec)	Temperature(^{o}C)
3/8 inch	20, 40, 60, 80, 100	30~90 ^{o}C
	120, 150, 200, 250, 300, 350, 400	
4/8 inch	20, 40, 60, 80, 100	30~90 ^{o}C
	120, 150, 200	
5/8 inch	20, 40, 60, 80, 100, 120	30~90 ^{o}C
6/8 inch	20, 40, 60, 80, 100	30~90 ^{o}C

Table 1. Experimental parameters and ranges (steam)

분사노즐에서 hole의 개수	밸브 전단 압력(bar)	분사시간(sec)
8 hole	1, 3, 5, 7	0.05, 0.1, 0.2, 0.3
24 hole	1, 3, 5, 7	0.05, 0.1, 0.2, 0.3

Table 2. Experimental parameters and ranges (Air)

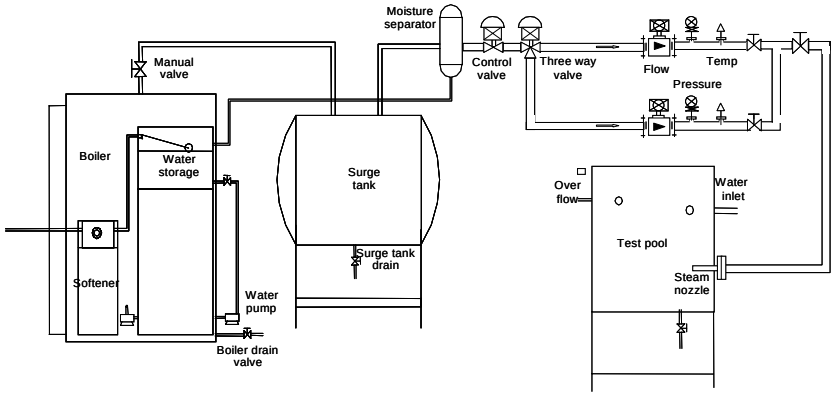


Fig.1 Schematic diagram of experimental facilities

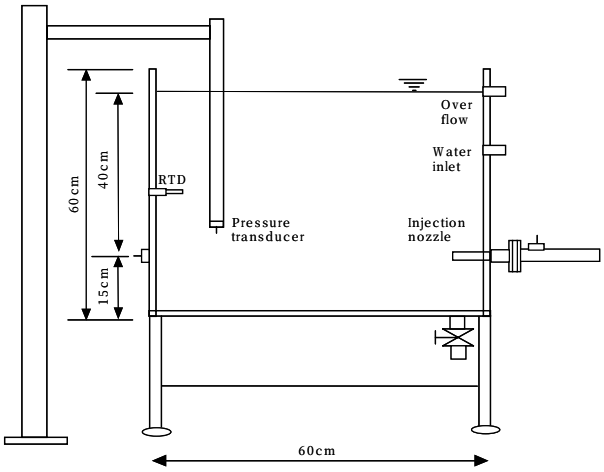


Fig.2 Schematic diagram of test section

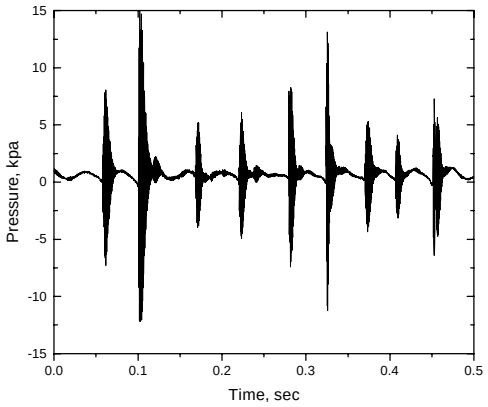


Fig.3 Chugging region
(G=20 kg/m^{2}sec, T=40 ^{o}C)

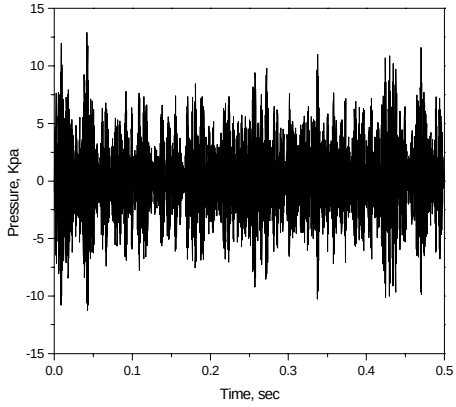


Fig.4 Condensation oscillation
(G=200 kg/m^{2}sec, T=40 ^{o}C)

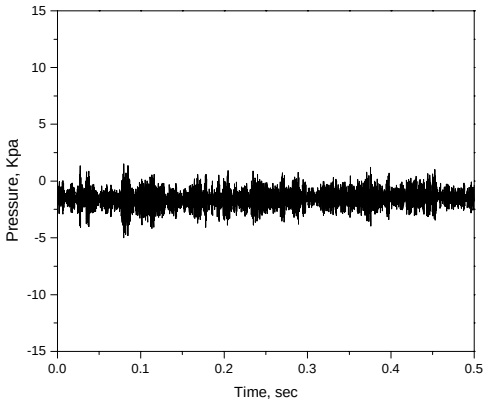


Fig5. Stable condensation
(G=200 kg/m^{2}sec, T=40 ^{o}C)

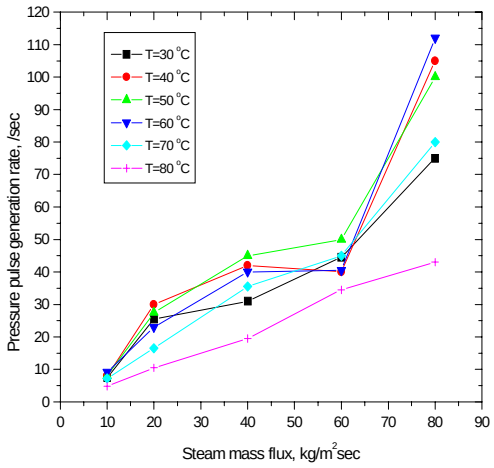


Fig.6 Pressure pulse generation rate with steam mass flux in chugging region (d=6/8 inch)

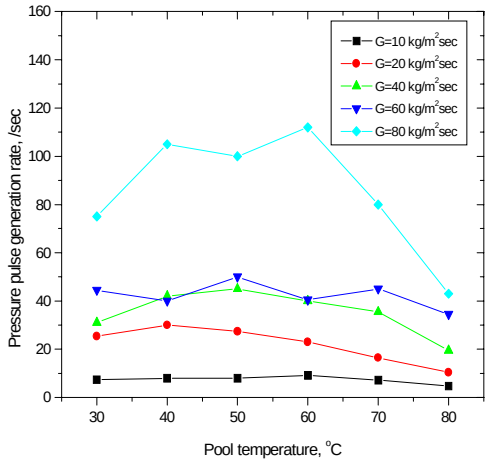


Fig.7 Pressure pulse generation rate with pool temperature in chugging region (d=6/8 inch)

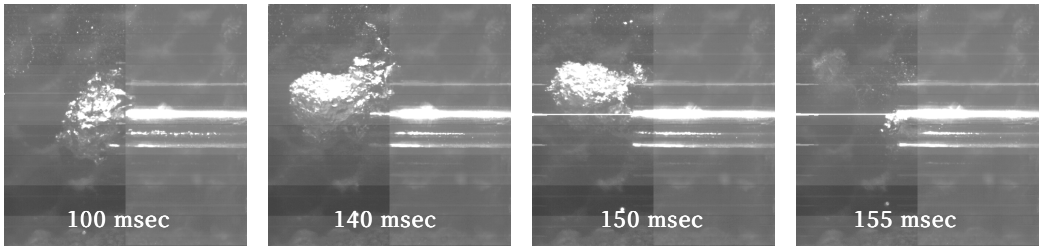


Fig.8 Time history interface variaton with necking phenomenon

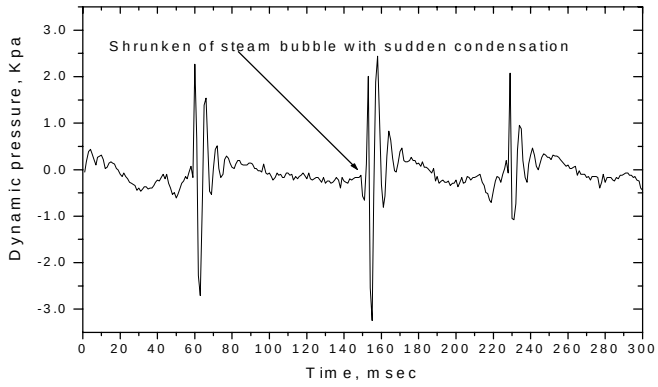


Fig.9 Time history of pressure with interface variaton

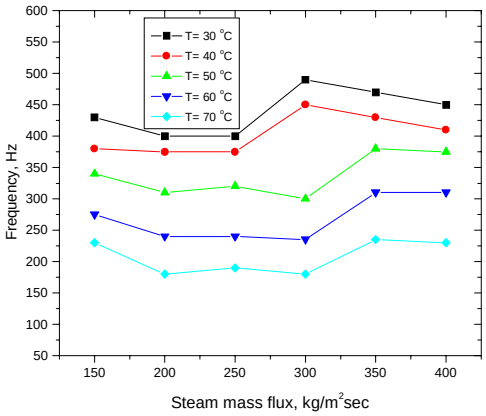


Fig.10 Frequency variation with Steam mass flux (d=3/8 inch)

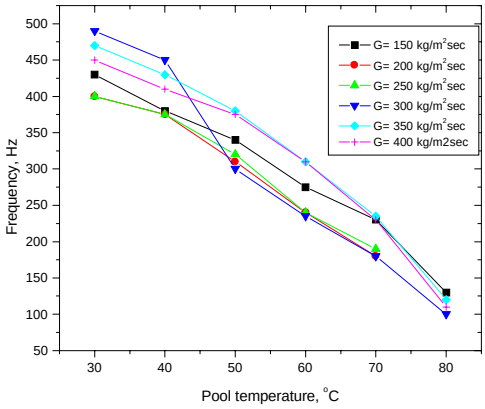


Fig. 11 Frequency variation with pool temperature (d=3/8 inch)

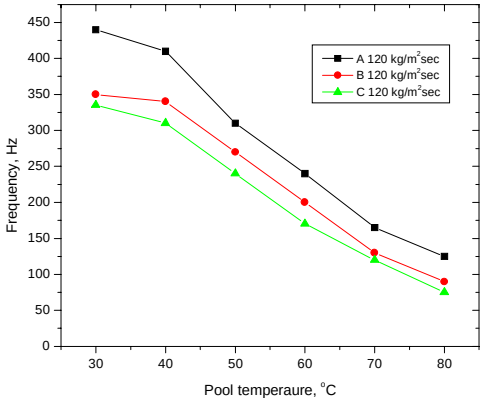


Fig.12 Frequency variation with nozzle diameter
(A: 3/8inch B: 4/8inch C:6/8inch)

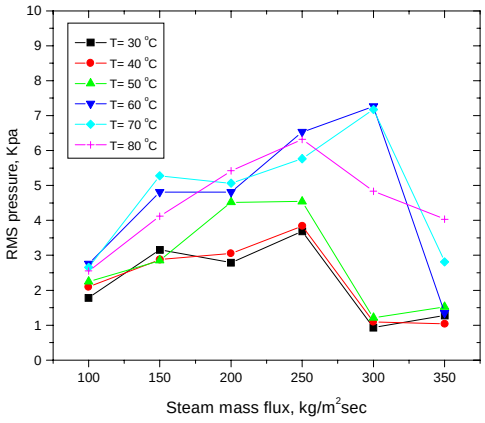


Fig.13 Frequency variation with steam mass flux (3/8 inch)

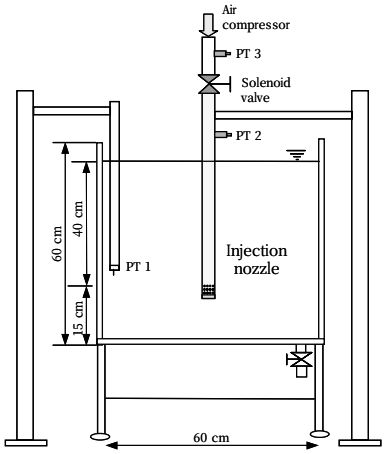
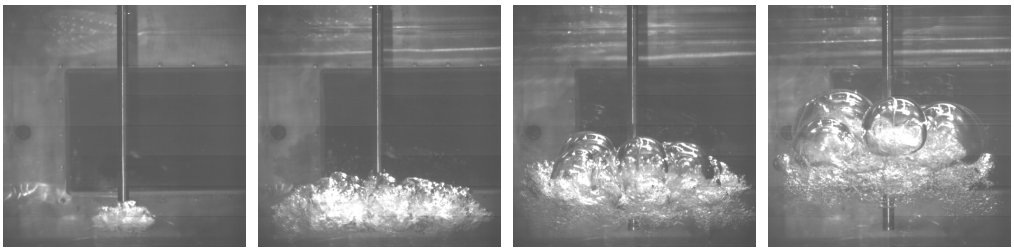


Fig. 14 Schematic diagram of experimental facilities



0 sec 0.05 sec 0.1 sec 0.15 sec

Fig. 15 Time history of air cloud formation

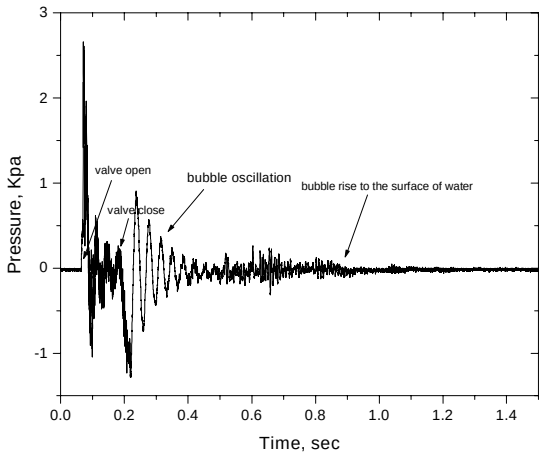


Fig. 16 Time history of pressure with air cloud oscillation

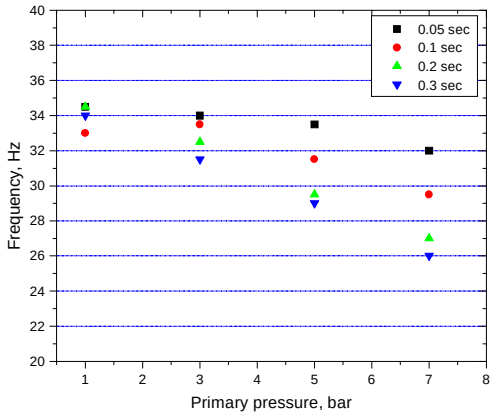


Fig. 17 Frequency variation with primary pressure nozzle with 8 hole

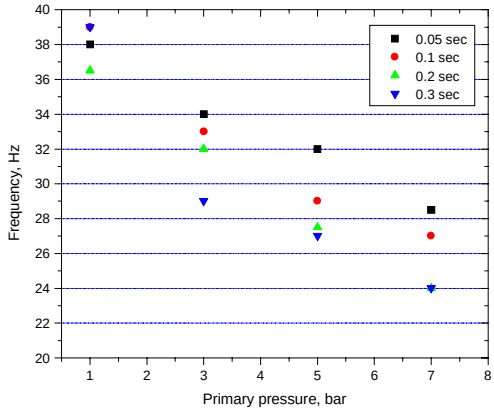


Fig. 18 Frequency variation with primary pressure nozzle with 24 hole