

2002 추계학술발표회 논문집
한국 원자력 학회

네 구멍을 갖는 증기 분사기에서의 증기 응축 현상
The Phenomena on Condensation of Steam Jet through Four Holes
in Sparger

김병석, 손창현
경북대학교 기계공학부
대구광역시 북구 산격동 1370

김연식, 송철화
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

홍순준
(주)미래와도전
서울특별시 관악구 신림동 산56-1

요약

수조로 분사되는 증기제트의 응축현상을 파악하기 위해 실제 Sparger에서의 다중 구멍 효과에 근접한 4개의 구멍으로 실험결과를 분석하였다. 실험에서의 유량과 온도범위는 각각 $30 \sim 250 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $30 \sim 90^\circ\text{C}$ 로 다양하게 실험하였다. 증기응축 진동에 대한 주주파수 해석을 FFT 방법을 통하여 수행하였다. 이 실험결과를 토대로 응축영역도(condensation regime map)를 작성하고, 이것은 원형 Sparger에 대한 증기제트 응축 실험 준비를 위한 예비 분석 자료로 활용될 예정이다.

Abstract

An experiment of steam jet condensation for a 4-hole steam sparger was conducted to investigate multi-hole effects. The steam mass flux and the tank pool temperature are covered over $30 \sim 250 \text{ kg/m}^2\text{s}$ and $30 \sim 90^\circ\text{C}$, respectively. From the experimental data, the primary frequency of the steam condensation oscillation was evaluated using the fast fourier transform(FFT). A condensation regime map for 4-hole steam condensation was suggested and will be used to predict that of a prototypical steam sparger.

1. 서론

증기와 물의 직접 접촉 접촉 응축 현상은 증기제트 주입기, 열교환기, 해저 추진 장치등과 같은

일반 산업기기에서 관찰되며, 특히 원자로의 정상상태 운전 또는 냉각재상실사고(LOCA)와 같은 사고시에 발생하는 중요한 현상으로서 지금까지 많은 연구가 이론적 또는 실험적으로 진행되어 왔다.

현재 개발중인 한국형 차세대 원자로, 즉 신형경수로 1400(APR1400)에서 채택된 중요한 설계 개선 사항중의 하나는 격납용기내 핵연료교환수 저장탱크(IRWST)의 채택이다. IRWST는 격납용기 내부에 위치하여 비상사태 발생시 원자로 냉각에 필요한 비상노심냉각수를 제공함으로써 안전성 확보에 중요한 역할을 한다. 한편, 원자로냉각재계통(RCS)의 압력을 적절히 낮추기 위해 고온, 고압의 증기를 IRWST 수조로 방출하게 되는데, 이때 방출되는 증기와 IRWST 내의 저온의 물 사이에 직접접촉에 의한 응축 현상이 발생한다. 고온, 고압의 증기가 과냉각수로 채워진 IRWST 수조내로 지속적으로 방출됨에 따라 과냉각수의 온도가 높아지고 증기의 응축은 불안정하게 이루어진다. 이러한 불안정한 응축은 수조 내부 구조물뿐만 아니라 물을 저장하고 있는 IRWST에 극심한 동적 하중을 야기시킨다. 더우기, 매우 오랜 시간동안 증기를 방출시키기 때문에 연속적인 압력진동은 수조와 물탱크 구조물에 공명현상을 일으키게 하고, 결국은 구조물에 직접적으로 피해를 입히거나 피로를 축적시키게 된다. 따라서 IRWST 내부 구조물 설계를 위해서는 이러한 동적 특성에 대한 신뢰성 있는 자료가 필요하다.

따라서 적당한 증기분사기(Sparger) 설계와 예상되는 사고 시에 발생할 수 있는 열수력 현상을 예측하기 위해서는 증기 제트의 직접 접촉 응축 현상을 이해하는 것이 반드시 필요하다. 직접 접촉 응축시 발생하는 복잡한 현상으로 인해 이론적인 방법으로 해석하는 것은 매우 어렵다. 또한, 증기제트의 직접 접촉 응축에 대한 많은 연구에도 불구하고 자세한 현상은 아직까지 충분히 이해되지 않고 있다. 특히, 다중 구멍을 가진 증기분사기에서 직접접촉 응축현상에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다.

증기와 물의 직접 응축으로 인해 발생하는 연구는 주로 동압 하중으로 분석을 하였다. 이 중에서도 압력파의 주파수와 진동폭을 중심으로 이루어져 있는데, Chan[1]은 수직하방으로 방출되는 증기제트가 과냉각수와 응축시 발생하는 동압 특성을 직경 변화에 따라 분석하였다. 과냉각수의 온도가 70℃를 한계점으로 이상에서는 압력의 진동이 변화됨을 보고하였다.

Arinobu[2]는 수직 하방으로 방출되는 증기의 질량유속이 비교적 저유속 범위의 Chugging과 응축 진동 현상에 대해서 압력파의 특성을 실험적으로 연구하였다. 그는 응축 진동시 응축수의 온도와 노즐 직경이 증가할수록 응축시 발생하는 압력파의 주파수는 감소하여, 증기의 질량유속이 증가함에 따라 주파수도 증가한다고 주장하였다.

Fukuda[3]는 특정진동주파수를 노즐직경과 과냉각도의 함수로서 상관식을 제시하였으며, 특성진동주파수는 응축수의 온도와 노즐의 직경이 커짐에 따라 감소한다고 주장하였다.

Damasio[4]는 비교적 저유속의 증기 질량유속범위에서 실험을 수행하여 특성 진동주파수를 구하였다. 그의 실험결과에 의하면, 일반적으로 노즐 직경과 응축수의 온도가 증가함에 따라 특성진동주파수의 크기는 감소하는 반면, 증기의 질량유속이 증가함에 따라 주파수는 점점 증가하는 경향을 보였다. 특히, 그의 실험에서는 온도의 변화에 따라 주파수가 거의 변화가 없었으나, 어떤 일정 유량에 이르게 되면 주파수의 감소율이 급격하게 커짐을 제시하였다.

Aya[5]등은 압력진동을 파라미터 관점에서 해석하고, 고주파 진동에 관한 특성과 분류를 제시하였으며, 유동영역의 구분을 보고하였다.

따라서, 본 연구에서는 증기가 분출되는 정방향 분포를 갖는 네 개의 구멍을 통한 실험으

로 다중 구멍을 가진 증기분사기 응축효과를 분석하고자 한다. 수조 물 온도와 증기 유량의 함수로서 동압주파수를 분석하여 응축영역도(Condensation regime map)를 작성하였다.

2. 실험장치 및 방법

증기 발생기 계통은 물 저장탱크, 예열기, 증기발생기, 증기 공급 배관으로 구성되어 있다. 물 저장탱크는 탈염화된 물로 공급했으며, 20kW 전기가열기를 이용하여 탈염화된 물에 용해된 가스 성분을 제거시키기 위해 포화온도 가까이 까지 가열 시킨후 펌프로 물 저장 탱크 속에 있는 물을 증기발생기에 보냈다. 증기발생기는 315kW급 용량의 전기가열기가 내부에 설치되어있고, 99% 이상의 건도를 가진 증기를 계속적으로 발생할 수 있도록 설계되어 있다. 증기 발생기의 최대 작업 압력은 절대압력 상태에서 약 10 bar까지 가능하고, 최대 증기 유량은 360 kg/hr (0.1 kg/s)까지 가능하도록 설계 되어 있다. 그러나, 증기 배관과 증기의 마찰 손실 등으로 인하여 증기가 증기분사기를 통해 물 속으로 분출 시 실제 최대 증기 유량은 약 300kg/hr이며, 최대 증기 유량을 약 60초 동안 지속적으로 분출시킬 수 있다. 실제 실험에서는 증기 발생기의 윗 부분과 증기 배관에 존재하는 공기를 제거시키기 위해 처음 증기를 분출시킬 때 증기의 최대 배출 유량으로 충분한 시간동안 증기를 배출시켜 증기 배관속의 공기들을 제거시킨 후 실험을 하였다. 증기 배관은 보텍스유량계가 설치된 곳을 제외하고 모두 직경이 1 inch., schedule 80인 파이프로 연결되어 있고, 파이프는 파이버글라스로 단열되어 있다. 증기유량은 Rosemount 8800A vortex meter로서 측정되었고, 증기의 정압은 유량계 근처에서 Rosemount 3051P를 사용해서 측정되었다. 물 저장탱크의 두께는 10mm이고, SUS304인 실린더형으로 되어 있다. 실린더형의 물탱크 직경은 1.8m, 높이는 1.5m이고, 수평으로 설치되어 있으며 대기로 개방되어 있다. 수조의 원형 벽면에는 플렉시글라스가 장착된 창이 앞뒤로 2개 설치되어 있어 응축과정을 가시화 할 수 있다. 물탱크에서의 물 저장 수위는 물탱크 바닥에서 1.3m 높이에 위치에 있는 배수(Overflow)파이프를 설치하여 자동적으로 수위가 조절 가능하게 하여 항상 물탱크에 담겨있는 물의 부피는 3.3 m³으로 일정하게 유지시켰다. 물탱크의 내부에는 물탱크 속의 물이 증기를 지속적으로 분출시 물의 온도가 증가하여 수조 내의 물의 평균 온도를 유지할 수 없기 때문에 물의 온도를 일정하게 유지시키기 위해 냉각기를 설치하여 물의 온도를 일정하게 유지시켜 실험을 하였다. 냉각기의 작동유체는 수도물(Tap water)을 이용하였고, 유량조절은 볼밸브를 사용하였다.

사용된 데이터 취득장치(DAS)는 HP VXI E1401A mainframe과 온도, 정압취득을 위한 HP E1413C, 그리고 압력진동의 고속 취득을 위한 HP E9491B로 구성되어 있다. 이러한 하드웨어와 더불어 HP DA express(E9801A)가 데이터 취득을 위한 소프트웨어로 사용되었다. 온도측정을 위한 장치로는 K-type 열전대를 사용하였고, HP E1413C에 연결되어 있다. 온도는 증기 배관, 증기 분사기, 그리고 탱크 속의 물의 온도를 측정하기 위해 물이 담겨져 있는 탱크 벽 쪽에 5곳에서 골고루 배치되었다.

또한, 노즐크기는 박춘경등[6]이 추천한 10mm로 선정되어 실험을 수행하였다. 실험을 수행하는 동안 노즐을 통한 유량은 노즐 전단에 설치한 보텍스타입 유량계와 압력 및 온도 계측기를 사용하여 계산되었으며, 증기 제트가 응축시에 탱크에 발생하는 진동효과를 피하기 위해 탱크 벽에서 격리시켜 Kistler 7061B Piezoelectric 동압센서를 증기 분사기 바로 뒤에 설치하였다. 증기는 물과 직접 접촉하여 응축하면 상변화에 의한 체적의 변화로 큰 소음을

일으키게 되는데, 그러한 소음은 물탱크의 벽면에 부딪혀 공명현상을 수반한다. 공명되는 파가 순수한 응축에 의한 진동과 함께 동압센서에 포착되기 때문에 벽에 의한 공명현상을 제거한 데이터를 얻기 위해 물 탱크벽에 스폰지를 깔고루 말라놓았다. 본 실험장치의 조감도와 이용된 측정 기구들의 불확실도는 각각 Figure 1과 Table1에 요약되어 있다.

Table 1 측정기구의 불확실도

Instruments	Uncertainties
Thermocouple	0.6°C
Static Pressure	0.0005MPa (0.5kPa)
Vortex Flow meter	1.35% for reading value 4 kg/hr for 300kg/hr
Piezoelectric Pressure Sensor	Negligible delay of response (its natural frequency: 15kHz)
Steam table	0.05%

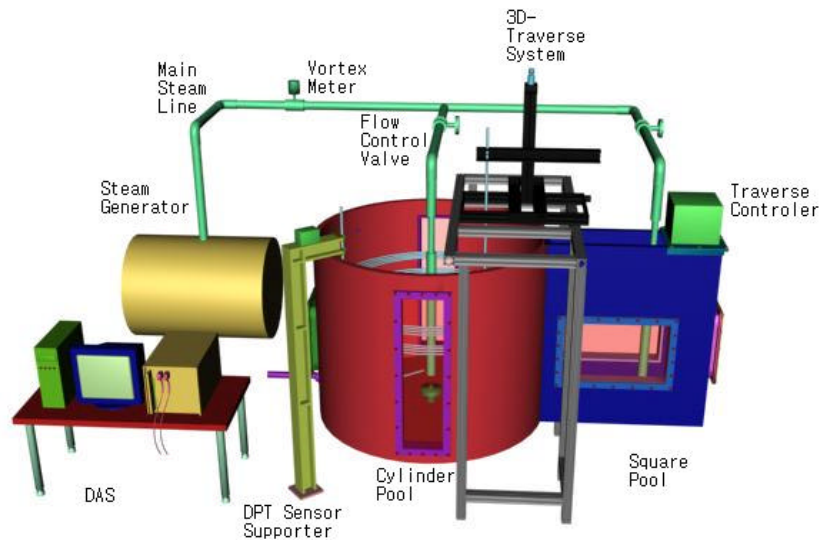


Figure 1 실험장치의 조감도

3. 실험결과

물 속으로의 증기제트 분사는 증기 유속과 수조내 물 온도에 의존하여 집중적으로 연구되

어 왔다. 본 연구에서는 4개의 구멍을 통한 증기제트의 응축영역도를 작성하였다. 기존의 하나의 노즐에 대한 응축영역도와 유사한 경향을 전반적으로 보여주었다. 그러나, 증기 유량계와 보일러 용량의 한계로 더 넓은 영역의 유량범위를 수용하지 못한 것이 향후에 해결해야 하는 문제로서 제시 되고 있다.

이제까지, 증기제트에 대한 응축영역도 작성은 수조내의 응축에 따른 진동과, 즉 동압을 측정함으로써 한계선을 찾아내는 것이었다. 본 연구에서는 마찬가지로 piezoelectric type의 동압 센서만으로 그 영역 구분을 하였지만, 수조 벽에서의 가속도 측정과 가시화를 통한 영역구분과 분석도 필요하다. 증기제트 응축시 발생하는 동압의 크기는 증기제트의 응축형태(condensation type)와 밀접한 관계가 있다. 응축형태는 크게 낮은 유량, 낮은 온도에서의 chugging, 비교적 낮은 유속에서 발생하는 응축진동(condensation oscillation), 그리고 높은 유속에서의 안정응축(stable condensation)등으로 구분짓는다.

본 실험에서는 높은 유속의 안정응축은 보이질 않았다. Figure 2에서 볼 수 있듯이 유속이 증가하면서 주주파수의 크기도 증가하고 있음을 알 수 있다. 기존의 연구결과들을 보면 $250 \sim 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 정도범위의 유량에서부터 안정응축이 나타나는데, 4 구멍에서의 결과도 유사하게 나타났다. 또한, chugging의 영역도 보이질 않는다. 홍순준등[8]이 실험한 하나의 구멍을 가진 증기분사기에서는 넓은 유속을 수용할 수 있기 때문에 주주파수로 인한 천이과정결과를 볼수 있으나, 본 실험에서는 그런 경향을 관찰할 수가 없었다. 따라서, 본 실험에서의 주된 영역은 응축진동이고, 안정응축으로 넘어가는 과도응축(transient condensation)영역은 $50 \sim 60^\circ\text{C}$ 사이의 결과를 보면, 감소하는 경향으로 판단하여 미루어 짐작된다. 대체로 온도가 높아짐에 따라 주주파수가 낮아짐을 볼 수가 있기 때문에 탱크 수조내의 물 온도에 대한 응축도의 의존성은 상당히 크다. Figure 3은 실험한 범위가 70°C 이하에서는 응축진동영역이, 그 이상에서는 기포응축진동(BCO:Bubbling Condensation Oscillation)영역이 되어 증기 일부가 응축되지 않고, 수면으로 부상한다.

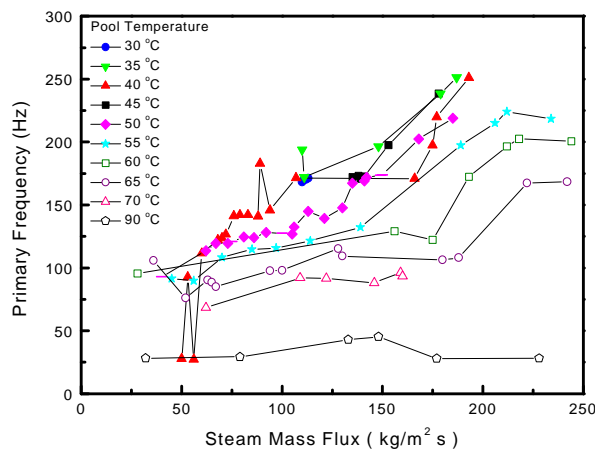


Figure 2 Primary Frequency vs Steam Mass Flux in Four Holes

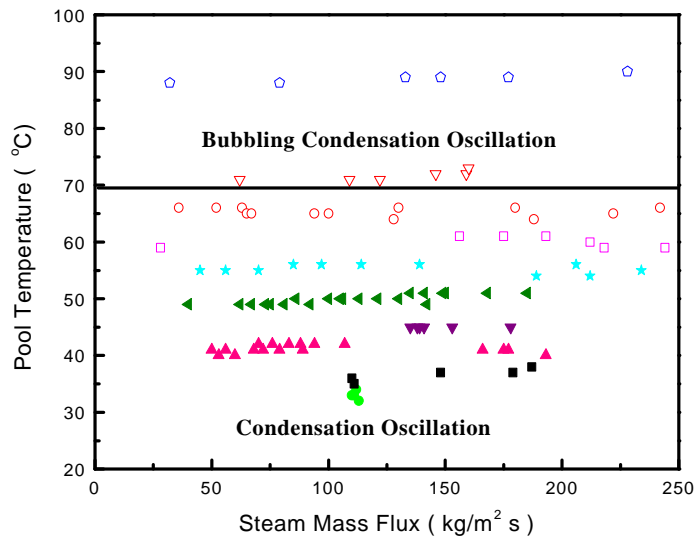


Figure 3. Condensation Oscillation and Bubbling Condensation Oscillation Regime

4. 결론

수조내로 뿜어져나오는 증기 제트의 응축현상을 분석하기 위하여 4개의 구멍을 가진 증기 분사기에서 다양한 물 온도와 비교적 낮은 유속의 범위에서 실험을 하였다. 응축도를 보면 기존의 영역과 매우 유사한 영역을 나타내 보이고 있다. 다만, 실험에서의 유량계 한계와 증기생성기 용량의 한계로서 chugging에서 응축진동으로, 응축진동에서 안정응축영역으로 천이되는 과정을 관찰할 수가 없었다. 주주파수와 온도간의 의존성은 그림에서도 알 수 있듯이 상당히 크다는 경향을 보여주고 있다. 즉, 온도가 높을수록 응축되는 정도가 작아진다. 많은 구멍을 가진 증기 분사기에 대한 응축도도 이와 유사한 경향을 가질 것이고, 다양한 유속에서의 천이과정을 살펴보는 것은 아주 중요한 과제라 생각된다.

후기

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기연구개발사업의 일환으로 이루어졌으며, 이에 대하여 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Chan, C. K., "Dynamic Pressure Pulse in Steam Jet Condensation, 6th International

- Heat Transfer Conference”, pp. 395-399, 1978
2. Arinobu, M., “Studies on the Dynamic Phenomena of Caused by Steam Condensation in Water”, Proc. of ANS-ASME-NRC Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Vol. 1, pp. 293-302, 1980
 3. Fukuda, S., “Pressure Variation Due to Vapor Condensation of a Subsonic Vapor Jet in Subcooled Liquid”, J. of Japanese Nuclear Society, Vol. 104, pp.271-278, 1982
 4. Damasio, C., Del Tin, G., Fiegna, G. and Malandrone, M., “Experimental Study on the Unstable Direct Contact Condensation Regimes”, Proc. of the 3rd Int. Topical Meeting on Reactor Thermal Hydraulics, pp. 6.C-1 ~6.C-8, 1985
 5. Aya, I. et al., “Pressure and Fluid Oscillations in Vent System due to Steam Condensation (II)”, J. of Nuclear Science and Technology, Vol. 20, pp. 213-227, 1983
 6. 박춘경 외, “Jet 형식 응축 특성에 관한 연구”, ‘99 한국원자력학회 발표논문집
 7. 김연식, “과냉각수에 분사된 증기제트의 응축에 관한 연구”, 한국과학기술원 박사학위 논문, 1996
 8. 홍순준, “증기분사기에서 증기 응축의 동적 특성 연구”, 서울대학교 박사학위 논문, 2001
 9. 조 석 외, “직접접촉응축에 관한 기술현화분석”, KAERI/AR-519/99, 1999
- USNRC, “Suppression Pool Temperature Limits for BWR Containments”, NUREG-0783, 1981