미세노즐을 통해 수직분사된 수증기의 직접접촉응축 영역도

이수관† · 배성효* · 김무환**

The regime map for the direct contact condensation of steam vertically injected through a mini nozzle

Sookwan Lee, Song-Hyo Bae and Moo Hwan Kim

Key Words : direct contact condensation(직접접촉응축), regime map(영역도), mini nozzle(미세노즐)

Abstract

Steam was vertically discharged into water through mini nozzles of various diameters (d=0.115, 0.520, 1.55mm). The condensation was observed and categorized into several types of condensation regimes for each of the nozzles. Compared with the regimes in the previous researches, the regimes of 'internal necking with attached bubble' and 'internal chug with detached bubble' were newly observed. Depending on a nozzle, some regimes expanded, shrank, or moved in the regime map. For the nozzle of 1.55mm, the regime map was similar to Chan and Lee (1982) except that the regime of 'internal chug' was not observed. For the nozzle of 0.115mm, the regime of 'internal chug' appeared even at high pool temperature.

기호설명

d	노즐 내경	[mm]
G	스팀 질량유속	[kg/m^{2}s]
T	온도	[^{o}C]

하첨자

pool	테스트 풀
steam	스팀발생기 내의 스팀

1. 서 론

액체 속으로 분사한 증기의 직접접촉 응축은 응축기, 보일러, 그리고 핵반응기 냉각시스템과 같은 다양한 2 상 유동 시스템에서 관찰된다.

직접접촉 응축은 계면에서 열 및 물질 전달이 동시에 발생한다는 점에서 흥미롭고 복잡한 현상이다. 이러한 응축과정에 대한 열전달 계수는 난류 액막 응축과정에 대한 값보다 상당히 크다. 그리고 풀 온도와 스팀 질량유속에 따라, 다양한 응축 영역들이 관찰된다. 또한 각 응축영역에서 전형적인 압력파동이 나타나고, 압력파동의 주기는 계면 운동의 주기와 일치한다.

지금까지 물속으로 분사된 스팀의 직접접촉 응축에 관한 많은 연구들이 수행되어 왔지만, 몇몇 연구자들만이 300kg/m^{2}s 보다 큰 스팀 질량유속에서 미세노즐로 실험을 수행하였다. Kerney 외(1972)는 이전 연구들의 실험범위(d ≥ 3㎜)를 확대하고자 0.4 와 11.2㎜ 사이의 내경을 갖는 노즐을 갖고 스팀제트의 수평분사시 형성된 초크유동에 대한 실험을 수행하였다. Cumo 외(1978)는 소형의 감압시스템에서 열전달 현상을 연구하고자 내경 1㎜ 의 수직노즐을 가지고 실험을 수행하였다. 그들은 스팀질량유속과 풀 과냉도에 대해서 안정성도(stability map)와 안정된 스팀원추에 대한 열전달 계수의 상관식을 알아냈다.

Chan 과 Lee(1982)는 2 가지 기준(노즐출구로부터 스팀영역의 위치와 수증기 기포들이 스팀영역에서 떨어지는 위치)을 갖고 응축영역을 7 가지(타원형 제트, 타원형 진동기포, 진동기포 I[영역 3], 진동

† 포항공과대학교 환경공학부
E-mail : star@postech.ac.kr
TEL : (054)279-8106 FAX : (054)279-3199
* 한국과학기술기획평가원
** 포항공과대학교 기계공학과/환경공학부

원추형 제트, 진동기포 II[영역 5], 쳐그, 진동계면)로 분류하였다. 그리고 쳐그는 3 가지 다른 영역으로 나누었다: 내부쳐그, 기포 분리가 있는 외부쳐그, 그리고 감싸는 기포가 있는 외부쳐그. 그들은 각 영역의 특징들을 자세히 기술하였다[Chan 과 Lee(1982)의 논문을 참고하시오.].

본 연구의 목적은 미세노즐에서 발생하는 직접접촉 응축에 대한 영역도를 작성하는 것이었다. 그 이유는 직접접촉응축에서 응축영역도는 주된 관심사이고 앞서 이 범위에서 작성된 적이 없었기 때문이다. 이전에 작성된 응축영역도(Chan 과 Lee, 1982; Nariai 와 Aya, 1986; Cho 외, 1998) 중에서 Chan 과 Lee(1982)의 영역도를 참고하였는데, 우리와 같이 스팀을 수직으로 분사하였고 각 응축영역에 대해서 자세히 기술하였기 때문이다. 본 논문에서는 응축영역과 그 영역도에 관한 결과들을 제시하였고, 새로운 영역들과 응축영역도의 변화에 대해서 논의하였다.

2. 실험

2.1 스팀 질량유량의 보정

본 실험에 앞서 어떠한 스팀유량계도 실험범위에 적절하지 않았다. 따라서 스팀발생기의 스팀온도를 바꾸어서 스팀유량을 조절하면서, 보정용 풀 속에 있는 응축수의 질량을 측정하여 스팀질량유속을 보정하는 방법을 선택하였다. 그리고 각 노즐에 대한 보정 그래프를 작성하는 데 있어, 정상상태와 '스팀온도 대 스팀유량'이라는 2 가지 기준을 세웠다. 실제로 Table 1 에서 보여주는 실험범위에 해당하는 정상상태의 스팀온도와 스팀질량유속에서 질량유량이 측정되었다. 그리고 나서 각 노즐에 대해 수평 좌표인 스팀온도와 수직좌표인 스팀질량유속을 갖는 보정 그래프를 작성하였다.

Fig.1 에서 보여주는 바와 같이 스팀발생기, 온도조절기, 과열히터, 보정용 풀, 전자저울, 컴퓨터로 실험장치를 구성하여, 보정을 수행하였다.

Table 1 Test range of steam mass flow rate

노즐내경(d), mm	스팀온도(T_{steam}), °C	질량유속(G), kg/m²s
1.55	98.65 - 118.2	2.862 - 185.8
0.520	98.78 - 117.0	22.60 - 259.0
0.115	99.08 - 130.0	121.0 - 1251

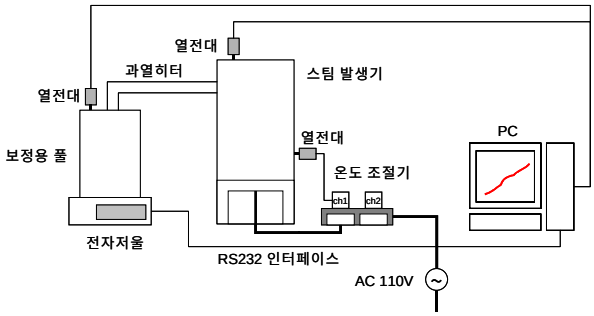

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus for steam mass flow calibration

제작된 스팀발생기는 최대 0.35g/s 의 스팀을 만들어 내었다. 이 스팀발생기에 증류수를 채우고 진공펌프로 증류수에 용해된 기체를 제거하였다. 그리고 온도조절기를 사용하여 스팀발생기 내 스팀온도를 특정 스팀질량유량에 해당하는 온도로 조절하였다.

가볍고 단열성의 폴리스티렌 컵을 보정용 풀로 사용하여, 컵의 벽면에 이슬이 맺히는 것을 방지하고 전자저울의 최대측정용량에 맞추었다. 세 가지 다른 내경(d=0.115, 0.520, 1.55mm)의 노즐들을 사용하였고, 투명한 석영관으로 노즐을 제작하여 내부에서 발생하는 현상(예, 쳐그)을 관찰하였다. 그리고 가는 열전대를 삽입하여 노즐 내부의 스팀온도를 측정하였다.

2.2 압력파의 측정과 응축영상의 촬영

Fig.2 에서 보여주는 바와 같이, 석영 사각수조, 석영 원형관, 이머전 히터(immersion heater), 압력센서, 열전대, 노즐로 테스트 풀을 구성하였다. 풀의 열용량과 확대경의 초점거리를 감안하여 수조의 총부피가 115×115×180mm^3 이 되도록 제작하였다. 그리고 원형 관을 수조 안에 넣어, 사각수조의 모서리 영향을 방지하였다.

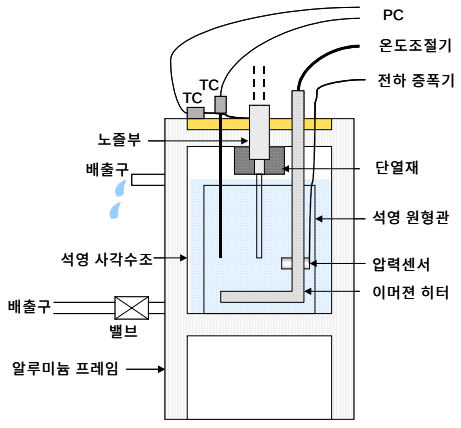

Fig. 2 Schematic diagram of the test pool

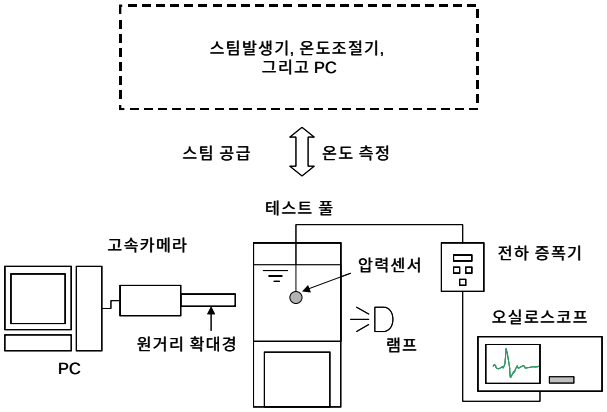

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus combined with the pressure measuring system and the high-speed camera system

본 연구에서는 용해기체를 제거하지 않은 증류수를 풀에 채우고 풀온도 10°C 와 90°C 사이에서 실험을 수행하였다.

Fig.3 은 압력측정 시스템과 고속촬영 카메라 시스템을 보여준다. 압력측정 시스템은 압전센서(KISTLER, 7031), 전하 증폭기(KISTLER, 5011B), 그리고 디지털 오실로스코프(Tektronix, TDS3034)로 구성하였다. 고속촬영 카메라 시스템은 고속촬영카메라(REDLAKE, motionXtra HG-100K), 원거리 확대경(INFINITY, InFocus™ Model KC), 할로겐 램프, 광섬유 램프(Volpi, INTRALUX 6000-1), 2mW He-Ne LASER(Spindler & Hoyer, 35-2), 그리고 PC로 구성하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 응축영역

응축영역을 압력파동과 계면운동에 의해 구분 지었고, 이를 Chan 과 Lee(1982)의 기준에 따라 여러 영역으로 분류하였다. 내경이 1.55mm 인 노즐의 경우, 응축영역을 7 가지 영역으로 분류하였다: 진동계면(oscillatory interface), 부착기포가 있는 내부넥킹(internal necking with attached bubble), 진동기포 I(oscillatory bubble I), 분리기포가 있는 외부쳐그

Fig. 4 Photoghraph of ‘ internal necking with attached bubble’ regime for the nozzle of 1.55mm

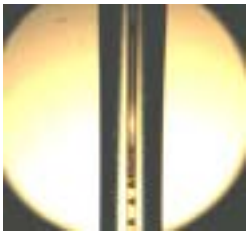

Fig. 5 Photograph of ‘ internal chug with detached bubble’ regime for the nozzle of 0.115mm

(external chug with detached bubble), 감싸는 기포가 있는 외부쳐그(external chug with encapsulating bubble), 타원형 진동기포(ellipsoidal oscillatory bubble), 진동기포 II(oscillatory bubble II).

Fig.4 에서 보여준 ‘부착기포가 있는 내부넥킹(internal necking with attached bubble)’ 영역을 제외하면, 응축 영역들이 Chan 과 Lee (1982)와 유사했다. 이 영역은 노즐 밖에서의 기포 형성과 노즐 안에서의 연이은 넥킹에 의해 특징 지워진다. 그리고 이 내부넥킹은 노즐 내벽에 형성된 액막이 두꺼워져 노즐을 막으면서 발생한다. 풀 온도가 증가함에 따라, 부착기포의 크기가 커졌고 내부넥킹이 더 빈번하게 발생하였다.

내경이 0.520mm 인 노즐의 경우, 새로이 관찰된 응축영역이 없었다. 내경이 0.115mm 인 노즐이 경우, Fig.5 에서 보여준 바와 같이 낮은 질량유속에서 ‘분리기포가 있는 내부쳐그(internal chug with detached bubble)’ 영역이 관찰되었다. 이 영역은 노즐 내 계면의 강한 수직진동으로부터 발생한 기포분리에 의해 특징짓는다. 그리고 분리된 기포는 노즐을 따라 아래로 내려와서 밖으로 분사된다. 풀 온도가 올라감에 따라, 분리된 기포들이 노즐 출구에서 서로 뭉치기도 하였다.

모든 노즐에 대해 노즐 주변에서 흥미로운 유동들이 관찰되었다. 기포류가 노즐의 주변에서 발생하였고, 회전류가 응축하는 기포의 주변에서 관찰되었다. 풀 온도와 질량유속이 증가함에 따라, 이러한 유동들은 더 멀리까지 나아갔다. 특히, 기포류는 높은 풀 온도에서 방향을 바꾸어 노즐 출구 위로 나아갔다.

3.2 응축영역도(condensation regime map)

Fig.6–8 에서 보여주는 바와 같이 각 노즐에 대한 응축영역도를 작성하였다. 노즐에 따라, 어떤 영역은 확대하거나 축소하거나 혹은 이동하기도 하였다. 노즐직경이 감소함에 따라, ‘분리 기포가 있는 외부쳐그’ 영역은 더 큰 질량유속 구역으로 이동하였다.

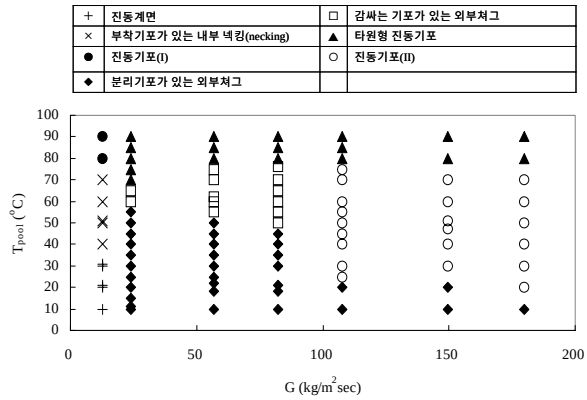

Fig. 6 Condensation regime map for the nozzle of 1.55mm

내경이 1.55mm 인 노즐의 경우, '진동기포 I' 영역이 축소되고 '내부쳐그' 영역이 관찰되지 않은 것을 제외하면 Chan 과 Lee(1982)의 응축영역도와 유사했다. 내경이 0.520mm 인 노즐의 경우, 내경이 1.55mm 인 노즐과 비교했을 때 '진동기포 I' 영역은 확대되었고 '분리기포가 있는 외부쳐그' 영역은 축소되었다. 내경이 0.115mm 인 노즐의 경우, '분리 기포가 있는 내부쳐그' 영역이 높은 풀 온도에서 관찰되었다. 게다가, '분리 기포가 있는 외부쳐그' 영역과 '진동기포 II' 영역은 800kg/m^{2}s 보다 큰 질량유속에서 나타났다. 이전의 연구들(Kerney 외, 1972; Cumo 외, 1978)에 의하면, 800kg/m^{2}s 보다 큰 질량유속에서 기포분리가 없는 증기원추가 보고되었다.

응축영역에서의 이러한 차이는 다음과 같이 2 가지 경우로 설명할 수 있다. 하나는 미세의 직접접촉 응축이 갖는 특성시간이 그들의 카메라 노출시간보다 짧아서 여러 영상들이 겹치는 경우이고, 다른 하나는 내경이 0.115mm 인 노즐의 경우 그들이 사용한 노즐의 크기보다 훨씬 더 작아서 노즐 출구에서 넥킹이 더 쉽게 발생하는 경우이다.

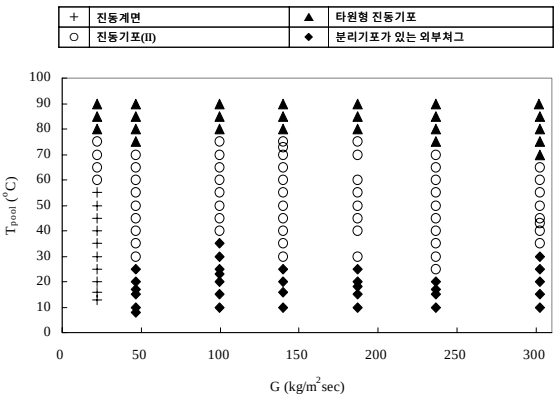

Fig. 7 Condensation regime map for the nozzle of 0.520mm

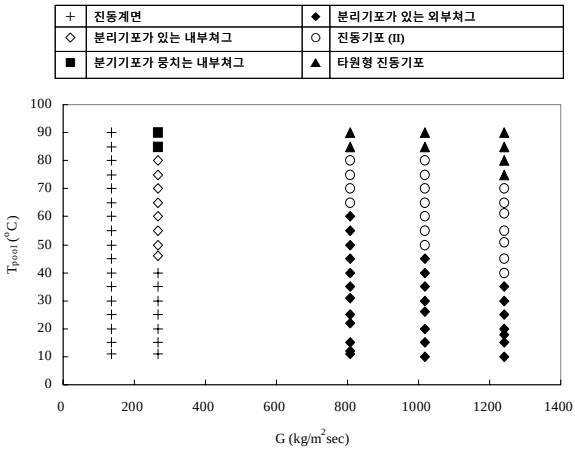

Fig. 8 Condensation regime map for the nozzle of 0.115mm

4. 결 론

고속카메라와 압력측정 장비를 사용하여, 미세영역의 직접접촉 응축에 대한 연구를 수행하였다. 특히, 미세영역의 빠른 계면운동에도 불구하고 '외부쳐그' 영역을 확인하는 데 있어 측정된 압력파동 데이터가 매우 유용하였다.

낮은 질량유속에서 '부착기포가 있는 내부넥킹'과 '분리 기포가 있는 내부쳐그'라는 새로운 영역이 관찰되었다. 노즐에 따라, 어떤 영역은 확대하거나 축소하거나 혹은 이동하기도 하였다. 그리고 모든 노즐에 대해, 기포류와 회전류가 노즐 주변에서 관찰되었다.

마지막으로, 미세노즐을 사용하여 발생하는 직접접촉 응축현상을 연구하는 데 있어 소량의 스팀유량을 측정하는 유량계의 개발이 요구된다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실사업(NRL)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

(1) Chan, C.K. (1978). "Dynamic pressure pulse in steam jet condensation," Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf., Tokyo, Vol. 3, pp.221-225.

(2) Cho, S., Song, C.-H., Park, C.-K., Yang, S.-K., and Chung, M.-K. (1998). "Experimental study on dynamic pressure pulse in direct contact condensation of steam jets discharging into subcooled water," NTHAS98: First Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety, pp.291-297.

(3) Cumo, M., Parello, G.E., and Ferrari, G. (1978). "Direct heat transfer in pressure-suppression systems,"

Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf., Toronto, Vol. 5, pp.101-106.
(4) Kerney, P.K., Faeth, G.M., and Olson, D.R. (1972). “Penetration characteristics of a submerged steam jet,” AIChE Journal, Vol. 18, pp.548-555.
(5) Nariai, H. and Aya, I. (1986). “Fluid and pressure oscillations occurring at direct contact condensation of steam flow with cold water,” Nuclear Engineering and Design, Vol. 95, pp.35-45.