

과냉각수조에서 증기응축 특성에 관한 실험적 연구

김환열 · 조 석 · 송철화 · 정문기 · 최상민*

한국원자력연구소, *한국과학기술원

Experimental Study on Characteristics of Steam Condensation in a Sub-cooled Water Pool

Hwan Yeol Kim, Seok Cho, Chul Hwa Song, Moon Ki Chung and Sang Min Choi*

Korea Atomic Energy Research Institute *Department of Mechanical Engineering, KAIST

요 약

과냉각수조로 분사되는 증기의 직접접촉 응축특성을 알아보기 위하여 다섯 개의 수평 노즐에 대해 증기 질량유량과 수조 온도를 여러 가지로 변화시키면서 실험적 연구를 수행하였다. 증기응축현상을 육안 관찰과 고속 비디오 카메라를 사용한 방법으로 분석한 결과, 안정된 증기제트인 경우 증기 질량속과 수조온도가 변화함에 따라 타원형 및 원추형 증기제트 형상이 나타나는 것을 관찰하였다. 증기제트 팽창비, 증기제트 길이 및 응축열전달계수를 구하였고, 증기 질량속, 수조온도 및 노즐 내경이 미치는 영향을 분석하였다. 증기제트 길이와 응축열전달계수를 증기 질량속 및 응축추진 포텐셜의 함수로 나타낸 상관식을 구하였다. 증기제트 내부와 주위 수조온도 분포를 구했으며 증기 질량속, 수조온도 및 노즐 내경이 미치는 영향을 분석하였다. 처깅, 천이처깅, 응축진동, 안정응축, 방울응축진동 및 간헐진동응축 등 여섯 가지 영역으로 구분된 응축 영역도를 작성하였다. 그 외, 수조 벽면에서의 동압을 측정하였고, 증기 질량속과 수조온도에 따라 변화하는 증기 응축모드와 동압과는 밀접한 연관성이 있음을 확인하였다.

Abstract — Experimental study on characteristics of direct contact condensation of steam discharged into a sub-cooled water pool has been performed using five different sizes of horizontal nozzle over a wide range of steam mass fluxes and pool temperatures. Steam condensation phenomena have been observed visually and by taking pictures of steam jets using a high speed video camera. Two different steam jet shapes such as ellipsoidal shape and conical shape were typically observed for a stable steam jet, depending on the steam mass flux and pool temperature. The steam jet expansion ratio and the steam jet length as well as the condensation heat transfer coefficients were determined. The effect of steam mass flux, pool temperature, and nozzle diameter on these parameters were also discussed. Empirical correlations for the steam jet lengths and the condensation heat transfer coefficients as a function of steam mass flux and condensation driving potential were established. The axial and radial temperature distributions in steam jet and in surrounding water were measured. The effect of steam mass flux, pool temperature, and nozzle diameter were also discussed. The condensation regime map, which consists of six regimes such as chugging, transient chugging, condensation oscillation, stable condensation, bubble condensation oscillation, and intermittent oscillation condensation, were established. In addition, the dynamic pressures at the pool wall were measured. The close relation of dynamic pressure and steam condensation mode, which is also dependent on steam mass flux and pool temperature, was found.

1. 서 론

대량의 증기가 과냉각 수조로 방출되어 물과의 직접

접촉에 의해 응축되는 현상은 원자력 발전소 운전 중 및 산업체의 제조공정에서 일어난다. 직접접촉에 의한 응축 열전달 현상은 매우 큰 열전달계수를 수반하므로 광범

위하게 응용되고 있지만, 물리적 현상이 복잡하기 때문에 이에 관한 정확한 메커니즘은 현재까지 규명되어 있지 않고 있으며, 이에 관한 연구는 주로 실험에 의존하고 있다.

Weimer 등¹¹⁾은 증기-물 및 에틸렌글리콜-이소옥탄의 경계에 대해서 응축되는 제트의 길이를 구하였다. 밀폐 탱크에서 실험을 수행하였기 때문에 탱크내의 압력이 변화함에 따른 제트 길이의 영향을 관찰할 수 있었다. 복잡한 응축 진동이 발생하지 않는 초경 유동에 대하여 실험을 수행하였고, 제트의 응축 현상에 대한 모델링을 노즐 출구 부근의 등엔트로피 구역과 그 이후의 난류 혼합 구역으로 구분하여 제시하였다.

Kudo 등¹²⁾은 원추형상의 증기제트에 대해 실험 및 이론적 해석을 수행하였는데 이론적 해석에서는 증기제트를 노즐에서 비교적 가까운 초기영역과 먼 주영역으로 구분하였다. 초기영역은 Prandtl-Taylor의 혼합거리이론을 적용한 경계층 이론을 도입하여, 난류확산에 의해 열전달이 발생한다고 가정하여 지배 방정식을 유도하였다. 주영역은 축대칭에서의 단상제트를 가정하여 적분 모델을 사용하여 해석하였다.

Del Tin 등¹³⁾은 고속의 증기가 과냉각수 내로 분출되어 응축되는 경우에 증기 제트길이 및 유동장의 온도와 압력을 측정하였으며, Kudo 등¹²⁾에 의해서 수행되었던 경계층방정식을 수정하여 얻은 해석적 결과와 비교하였다.

Kerney 등¹⁴⁾은 증기제트의 와해가 일어나지 않는 초킹 상태에서 증기제트의 길이를 수조온도 및 증기 질량

속 등의 변수로 표시하는 실험을 수행하였다. 분출되는 증기 제트를 분석한 결과 노즐의 출구 압력이 주위 수조의 압력 보다 상당히 큰 경우에 증기제트가 급격히 팽창되어 노즐 출구 부근의 증기제트 직경은 노즐 출구 직경 보다 커짐을 보였다.

Chun 등¹⁵⁾은 수직관 및 수평관 노즐에서 과냉각수로 증기가 방출되는 실험을 수행하여 증기제트 길이와 응축열전달 계수를 구하였으며, 증기응축시의 영역도(regime map)를 작성하였다.

본 실험에서는 수평직관노즐을 통하여 안정된 형상을 갖는 증기제트가 응축탱크로 방출되면서 응축되는 현상을 종합적으로 관찰하고 분석하였다. 내경이 5 mm에서 20 mm까지의 다섯 가지 노즐에 대해 증기 질량속과 수조온도를 변화시키면서 과냉각 수조로 안정된 형상의 증기제트가 방출되는 모습을 고속 비디오 카메라를 사용하여 촬영하여 증기제트 최대 직경, 증기제트 길이 및 응축열전달계수를 구하였다. 무치원화된 증기제트 길이와 응축 열전달계수를 증기 질량유량 및 응축추진 포텐셜의 함수로 나타낸 상관식을 구하였고 증기제트 내부와 주위 물의 온도분포를 구했으며, 증기 질량속, 수조 온도 및 노즐 내경이 미치는 영향에 대한 분석을 수행하였다. 또한 본 실험에서는 증기 질량속과 수조온도를 좌표로 하는 응축영역도(condensation regime map)를 처깅(chugging), 천이처깅(transient chugging), 응축진동(condensation oscillation), 안정응축(stable condensation), 방울응축진동(bubble condensation oscillation) 및 그리

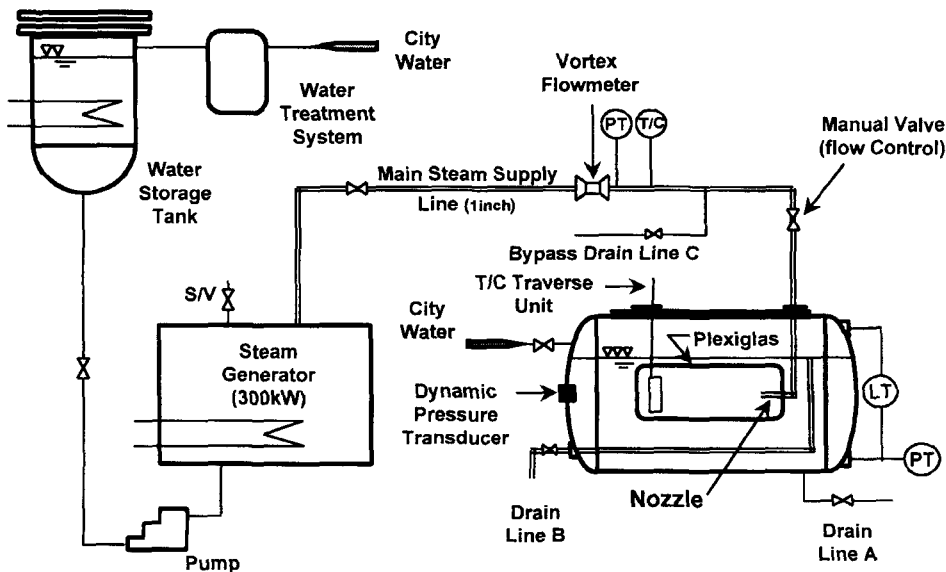


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

고 간헐진동응축(intermittent oscillation condensation) 등의 여섯 가지 영역으로 구분하여 제시하였다. 수조 벽면에서의 동압을 측정하였고, 증기 질량유량과 수조온도에 따라 변화하는 증기 응축모드와 동압과의 관련성에 대한 분석을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1에 나타난 바와 같이 실험장치는 증기발생기, 응축탱크, 증기공급배관, 배수배관 및 관련 밸브와 계측기 등으로 이루어져 있다. 증기발생기는 315 kW의 열량을 갖는 전열기에 의해 99% 진도를 갖는 증기를 만들어낸다. 응축탱크는 과냉각수가 들어있는 직경이 1 m이고 길이가 1.5 m인 수평 실린더형으로 상부가 대기로 개방되어 있고 육안관찰과 고속 비디오 촬영을 위한 관찰창이 벽면에 설치되었다. 또한 증기제트 및 물의 온도분포를 구할 수 있도록 탱크 상부에는 최대 15개의 열전대를 장착할 수 있는 열전대 이송장치가 설치되었고 탱크내 물 온도를 측정하기 위해 다섯 개의 열전대가 탱크벽면과 노즐부근에 설치되었다. 증기공급배관은 증기발생기에서 생성된 증기를 응축탱크로 전달하는 직경이 2.54 cm인 배관으로 와동형태의 증기유량계, 수동 유량조절밸브, 격리밸브, 압력계 및 열전대가 설치되어 있으며, 실험이 진행되는 동안 포화증기를 유지시키기 위해 배관표면이 단열처리 되었다. 배수배관은 응축탱크의 과냉각수를 배수하기 위해 탱크에 설치되었다. 유량계를 비롯한 모든 계측기에 대해 보정(calibration)을 실시하였다. 계측기 신호는 자료취득장치를 통해 처리되었다.

증기제트 형상을 촬영하기 위해 할로젠등(halogen lamp)을 고속 비디오 카메라가 설치된 반대측 관찰창에서 비추었으며 촬영의 일관성을 유지하기 위해 실험이 진행되는 동안 할로젠등과 고속 비디오 카메라를 일정한 곳에 위치하도록 하였다. 안정한 형상을 유지하는 증기제트는 관성력이 부력에 비해 매우 커 노즐 중심축을 기준으로 상하가 대칭인 모습을 보였다. 증기제트 형상 촬영 실험은 물 온도가 상승하여 불안정한 증기제트 형상이 나타날 때까지 계속되었다.

Table 1. Test conditions.

노즐내경 (mm)	증기 질량속 (kg/m ² ·s)	수조온도 (°C)
20	250~280(25~250)*	35~50(20~95)
15.5	250~440(50~380)	35~75(20~95)
10.15	300~825(105~815)	35~80(20~95)
7.1	460~1045	35~80
5	870~1188(425~1190)	35~80(20~95)

*괄호안의 값은 응축영역도작성 및 동압측정 실험조건임.

응축영역도 작성 및 탱크 벽면의 동압 측정을 위한 실험은 증기제트 형상촬영 실험보다 광범위한 증기 질량속 및 수조온도에서 수행되었다.

실험에 사용된 노즐 내경 및 실험조건은 Table 1에 나타나 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 증기제트 형상

Table 1에 나타난 바와 같이 내경이 서로 상이한 다섯 개의 단일 노즐에 대하여 증기 질량속과 수조온도를 변화시켜 가면서, 안정된 형태를 보이는 제트형상에 대하여 고속 비디오를 촬영하였다. 촬영된 비디오 테이프를 scanning하여 정지화면을 얻었고, 정지화면은 PAINT SHOP PRO software를 사용하여 편집하였다. 안정된 증기제트 형상은 원추(cone) 형상이나 타원(ellipsoid) 형상을 보이는 것이 관찰되었다. 증기 질량속이 작을수록 수조온도가 낮을수록 원추 형상을 나타내며, 증기 질량속이 클수록 수조온도가 높을수록 타원 형상을 나타내었다. Fig. 2 및 3은 전형적인 원추 형상과 타원 형상의 증기제트를 보여준다.

증기제트 타원형의 형상을 유지하는 경우, 증기제트의 팽창현상이 발생되어 노즐 출구 직후의 증기제트 직경보다 증기제트의 진행 방향으로 어느 정도 떨어진 곳의 증기제트 직경이 크게 된다. 이는 노즐 상류의 압력과 배압의 차이에 의해 발생하는 underexpanded jet에 의한 팽창파(expansion wave) 현상으로 설명될 수 있다. 또한 이는 노즐 출구 가까운 부근에서는 증기제트가 팽창되는 효과가 주위 물에 의해 응축되는 효과보다 크다는 것을 의미한다.

팽창비(expansion ratio)는 노즐 내경에 대한 최대 증기제트 직경을 나타낸다. Fig. 4는 5 mm 노즐에 대하여

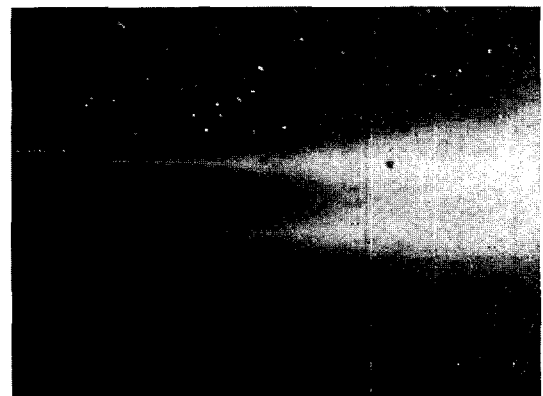


Fig. 2. Conical cavity (nozzle ID: 20 mm, mass flux: 280 kg/m²·s, pool temp.: 40°C).

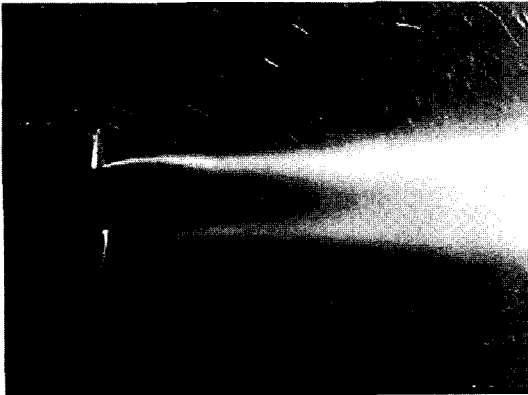


Fig. 3. Ellipsoidal cavity (nozzle ID: 10.15 mm, mass flux: 600 kg/m²-s, pool temp.: 40°C).

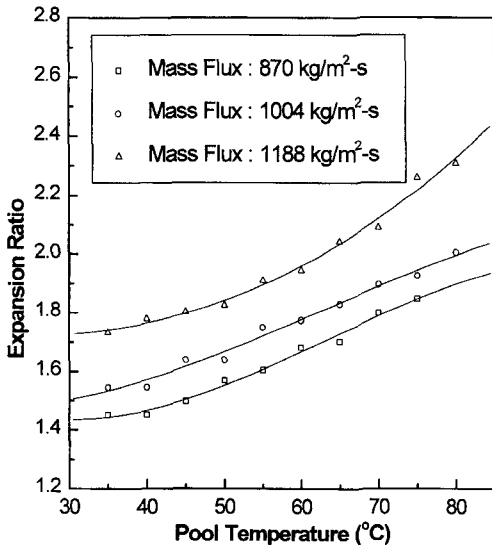


Fig. 4. Expansion ratio vs. pool temp. (nozzle ID: 5 mm).

증기 질량속과 수조온도 변화에 따른 증기 팽창비를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 증기 질량속이 동일할 때 수조온도가 증가할수록, 또한 수조온도가 동일할 때 증기 질량속이 증가할수록 팽창비가 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 다른 노즐에 대해서도 유사하였다. 증기 질량속과 수조온도가 동일한 경우 노즐 내경이 팽창비에 미치는 영향은 미미하였다.

본 실험조건에서 증기 팽창비는 1.05~2.31 사이에 있는 것으로 나타났다.

3-2. 증기제트 길이

증기를 과냉각 상태를 유지하고 있는 수조내에서 완

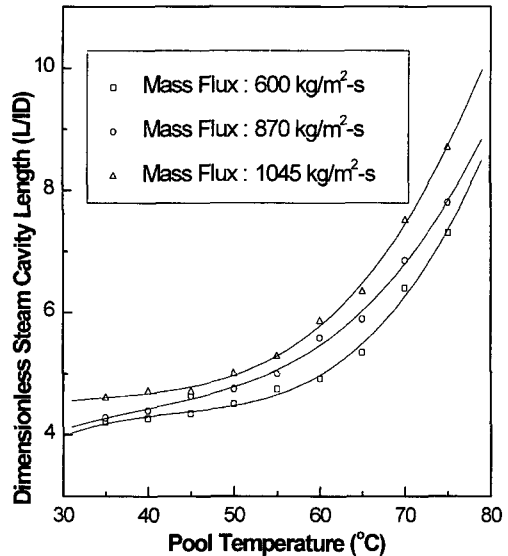


Fig. 5. Dimensionless steam cavity length vs. pool temp. (nozzle ID: 7.1 mm).

전히 응축시키는 것이 공학적 측면에서 바람직하기 때문에 응축탱크 내로 분출되는 증기제트 길이를 광범위한 운전 조건에 따라 계산하는 것은 의미가 있는 일이다. 증기제트 길이는 고속 비디오 카메라로 촬영된 증기 제트 형상을 PAINT SHOP PRO에 있는 여러 가지 그림 편집 기능을 사용하여 구하였다. 각각의 그림마다 동일한 편집 조건에서 증기 제트 길이를 구하기 위해 명암(contrast) 및 밝기(brightness)를 일정하게 유지하여 발생할 수 있는 오차를 최소화하였다. 7.1 mm 노즐에 대해 증기제트 길이를 노즐 내경으로 나눈 무차원화된 증기제트 길이는 Fig. 5에 나타나 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 증기 질량속이 동일할 때 수조온도가 증가할수록, 또한 수조온도가 동일할 때 증기 질량속이 증가할수록 무차원화된 증기제트 길이가 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 다른 노즐에 대해서도 유사하였다. 증기 질량속과 수조온도가 동일한 경우 노즐 내경이 무차원화된 증기제트 길이에 미치는 영향은 미미하였다. 본 실험조건에서 구한 무차원화된 증기제트 길이는 2.05~11.3 사이에 있는 것으로 나타났다. Kerney 등¹⁴에 의해 수행된 바와 같이 무차원화된 증기제트 길이를 증기 질량속과 응축추진 포텐셜(condensation driving potential)의 함수로 구한 상관식은 식(1)과 같다.

$$\frac{l}{d_i} = 0.503B^{-0.70127} \left(\frac{G}{G_m} \right)^{0.47668} \quad (1)$$

여기서 l은 증기제트 길이, d_i는 노즐 내경, G는 증기

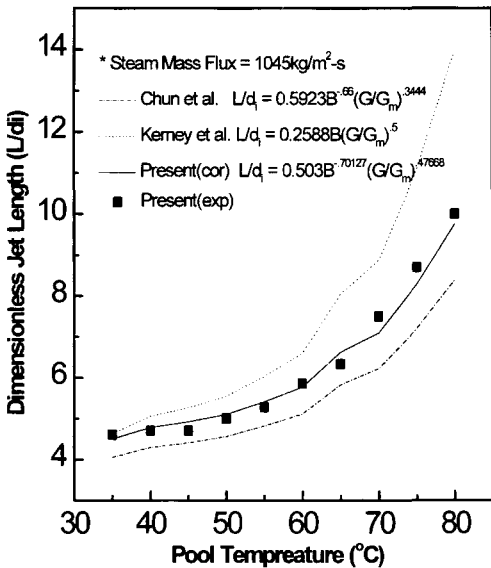


Fig. 6. Comparison of steam cavity lengths with other correlations (nozzle ID: 5 mm).

질량속을 나타낸다. 또한 B는 $C_p(T_s - T_i)/(h_s - h_i)$ 로 표시되는 응축추진 포텐셜(condensation driving potential)이며 C_p 는 물의 비열이고 $G_m = 275 \text{ kg/m}^2\text{-s}$ 로서 대기압에서 임계 증기 질량속을 나타낸다. 이 상관식은 증기 질량속이 증가할수록 응축추진 포텐셜이 감소할수록 무차원화된 증기제트 길이가 증가하는 것을 보여주고 있다. Fig. 6은 타 연구자^{14,15}에 의해 제시된 상관식과 본 연구의 상관식에 의해 구한 증기제트 길이를 비교한 것이다. 증기 질량속이 증가할수록 수조온도가 증가할수록 증기제트 길이가 증가하는 정성적 결과는 일치하고 있으나 정량적 결과는 차이가 있음을 보여주고 있다. 이는 상관식을 만들기 위해 수행되었던 증기 질량속 및 수조온도 범위 등의 실험조건이 서로 다르며 증기제트 끝부분을 결정하는 방법이 서로 다른 이유로 판단된다.

3.3. 응축열전달계수

응축열전달계수를 계산하는 데에는 다음과 같은 식이 사용되었다.

$$h = \frac{G A_c (h_g - h_l)}{A \Delta T} \tag{2}$$

여기에서 G는 방출된 증기 질량속, h_g 는 수조로 유입된 증기 엔탈피, h_l 는 응축수 엔탈피, A는 증기제트와 응축수 경계에서의 단면적, ΔT 는 증기제트와 응축수의 온도차를 나타낸다. 실제적으로 증기제트 경계면은 매우 거칠어 응축수와 증기제트 사이에 실제로 일어나는 열전

달 면적을 산정하는 것은 지극히 어려운 일이므로, 해석의 편이를 위해 Chun 등¹⁵ 및 Aya 등¹⁶에 의해 수행된 바와 같이 증기제트와 탱크 내부 물 경계는 매끈한 것으로 가정하고 경계면의 단면적을 계산하였다. 이와 같은 가정은 응축열전달계수를 계산하는데 어느 정도 오차를 초래하리라고 생각되지만 계산 값의 차수(order)를 변화시킬 정도로 크지는 않은 것으로 판단된다. 수조온도는 탱크에 설치된 5개의 열전대 온도를 평균한 산술 평균 온도를 사용하였다. 증기제트 온도는 증기제트 내부의 축방향 온도를 직접 측정하여 이를 산술 평균한 결과를 사용하였다.

계산된 응축열전달계수는 $1.24 \times 10^6 \sim 2.06 \times 10^6 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$ 정도의 매우 큰 수치로서 타 연구자^{15,18}에 의해 제시된 열전달계수와 동일한 차수였다. 이는 과냉각수로 직접 증기를 방출되어 응축시키는 방법이 응축탱크의 공간상 제약을 고려할 때 매우 유효한 냉각방식이 됨을 의미한다. 응축열전달계수의 상관식을 3.2장에 기술된 방법과 유사하게 증기 질량속과 응축추진 포텐셜(condensation driving potential)을 사용하여 구한 결과는 식(3)과 같다. 여기서 C_p 와 G_m 은 양변의 차원을 맞추기 위해 사용되었다.

$$h = 1.4453 C_p G_m B^{0.03587} \left(\frac{G}{G_m} \right)^{0.13315} \tag{3}$$

식(3)에 의하면 증기 질량속이 동일할 때 수조온도가 감소할수록, 또한 수조온도가 동일할 때 증기 질량속이 증가할수록 응축열전달계수가 증가함을 알 수 있다.

다섯 종류의 노즐에 대하여 실험을 수행하였기 때문에 노즐 내경 변화의 수는 수조온도나 증기 질량속 변화의 수에 비해 작아서 노즐 내경은 실험 상관식의 변수로 포함되지 않았지만 실험 데이터를 분석한 결과 수조 온도와 증기 질량 유량이 동일할 때 노즐 내경이 작을수록 응축열전달계수는 증가하는 것으로 나타났다.

3.4. 오차분석

앞에서 구한 증기제트 길이와 응축열전달계수 상관식에 대해 계측기에 의해 발생되는 오차분석을 수행하였다¹⁷. 독립변수 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 등으로 표시되는 물리량 N은 다음과 같은 식으로 표시된다고 하자.

$$N = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \tag{4}$$

여기에서 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 등이 측정된 변수로서 각각 $\pm \delta x_1, \pm \delta x_2, \pm \delta x_3, \dots, \pm \delta x_n$ 의 오차를 가진다고 하면 N의 오차 δN 은 다음과 같이 표시된다.

$$N \pm \delta N = f(x_1 \pm \delta x_1, x_2 \pm \delta x_2, x_3 \pm \delta x_3, \dots, x_n \pm \delta x_n) \tag{5}$$

함수 f를 Taylor 급수로 전개하고 고차항을 무시하여

정리하면 식(6)과 같은 오차의 절대값을 구할 수 있다.

$$\delta N = \left| \delta x_1 \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| + \left| \delta x_2 \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| + \left| \delta x_3 \frac{\partial f}{\partial x_3} \right| + \dots + \left| \delta x_n \frac{\partial f}{\partial x_n} \right| \quad (6)$$

실험에 사용된 증기유량계의 오차는 ±3.5%이고 열전대의 오차는 ±1.5%이다.

무차원화된 증기제트 캐비티 길이 상관식의 계측기에 의한 오차는 증기 질량속과 과냉각도의 편미분치의 절대값으로 표시되므로 이를 정리하면 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned} \delta \left(\frac{1}{d_i} \right) &= \left| \delta G \frac{\partial \left(\frac{1}{d_i} \right)}{\partial G} \right| + \left| \delta \Delta T \frac{\partial \left(\frac{1}{d_i} \right)}{\partial \Delta T} \right| \\ &= \left| 0.47688 \frac{\delta G}{G} \left(\frac{1}{d_i} \right) \right| + \left| 0.70127 \frac{\delta \Delta T}{\Delta T} \left(\frac{1}{d_i} \right) \right| \\ &= 0.0272 \left(\frac{1}{d_i} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

응축열전달계수 상관식의 계측기에 의한 오차는 증기 질량속과 과냉각도의 편미분치의 절대값으로 표시되므로 이를 정리하면 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned} \delta h &= \left| \delta G \frac{\partial h}{\partial G} \right| + \left| \delta \Delta T \frac{\partial h}{\partial \Delta T} \right| \\ &= \left| 0.13315 \frac{\delta G}{G} h \right| + \left| 0.03587 \frac{\delta \Delta T}{\Delta T} h \right| \\ &= 0.0052h \end{aligned} \quad (8)$$

3-5. 증심축방향 온도분포

Fig. 7은 원추 형상을 보이는 증기 질량속이 280 kg/m²-s인 20 mm 노즐의 증심축방향 온도분포를, Fig. 8은 타원 형상을 보이는 증기 질량속이 600 kg/m²-s인 10.15 mm 노즐의 증심축방향 온도분포를 나타낸다. 그림에서 보여지는 바와 같이 증심축 온도분포는 노즐에서 가까운 영역과 노즐로부터 멀리 떨어진 영역에서 서로 상이한 특성을 보여준다.

노즐에서 가까운 영역에서 증심축 온도는 수조온도가 낮을수록 온도가 낮아진다거나 또는 노즐에서 멀리 떨어질수록 온도가 낮아지는 경향을 보이지 않고, 수조온도나 노즐 중심에서의 거리와 무관한 경향을 보인다. 이는 주위의 물과 증기가 섞여 응축되는 효과가 증심축까지 미치지 못하기 때문이다. Fig. 7의 경우 주어진 탱크 물 온도에서 증심축 온도는 축 방향의 거리에 따라 변동폭이 심하지 않은 단조로운 모양을 이루고 있음을 알 수 있다. 이는 20 mm 노즐의 경우 원추 형상을 이루고 있어 증기제트에서 팽창파에 의해 온도가 요동치는 현상이 발생하지 않은 것으로 판단된다. 그러나 Fig. 8에서 보여지듯이 증기제트 형상이 타원형을 이루는 경우

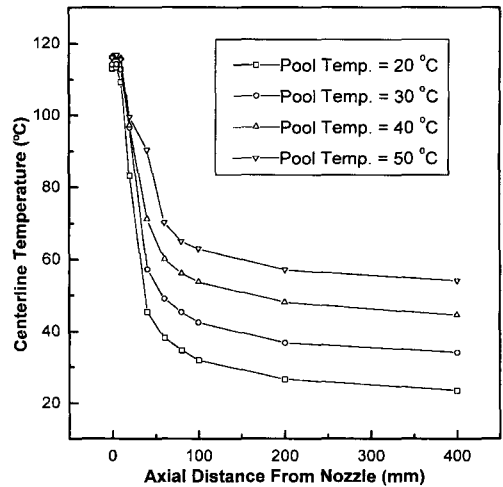


Fig. 7. Axial temp. profile (nozzle ID: 20 mm, mass flux: 280 kg/m²-s).

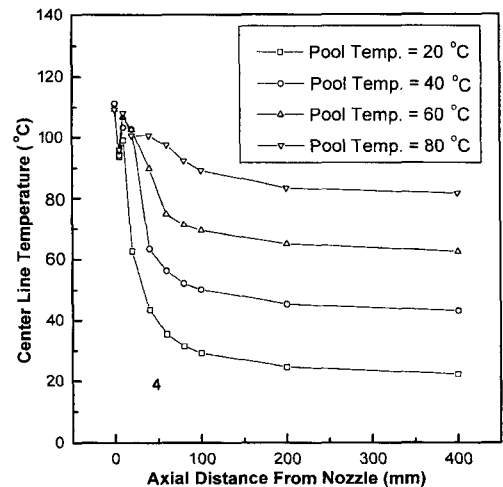


Fig. 8. Axial temp. profile (nozzle ID: 10.15 mm, mass flux: 600 kg/m²-s).

에는 주어진 수조온도에서 증심축 온도가 단조로운 분포를 보이는 것이 아니고 축 방향의 거리에 따라 감소했다 증가하는 경향을 보인다. 온도 증감폭은 약 25°C 정도였다. 이는 underexpanded jet에서 발생하는 팽창파가 온도에 영향을 미치는 것에 기인한 것으로 판단된다. Underexpanded jet에서는 노즐 출구면(exit plane)의 압력이 배압(back pressure) 보다 크기 때문에 노즐에서 방출되는 압축성 유체는 먼저 팽창되었다가 압축되는 일련의 과정을 거치게 된다. 따라서 팽창되는 부분에서는 온도가 감소하게 되며 압축되는 부분에서는 온도가 증가하게 되는데, 증기가 과냉각수에서 응축되는 본 실험

에서도 underexpanded jet에서 나타나는 온도요동 현상이 관찰되었다. 노즐 내경이 다른 노즐의 경우에도 이와 유사한 경향이 나타났다.

노즐로부터 멀리 떨어진 영역에서 중심축 온도는 주위 물 온도가 동일할 경우 노즐에서 멀리 떨어질수록 낮아졌으며 또한 동일한 축 방향 거리에서 주위 물 온도가 낮아질수록 낮아지는 경향을 보이고 있다. 특히 증기제트 끝부분에서 중심축 온도는 주위 물 온도 변화에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 증기제트가 원추 형상을 나타내든지 타원 형상을 나타내든지에 무관하게 나타났다. 이 영역은 주위의 물과 증기가 충분히 섞여 응축된 효과가 나타나는 곳으로 판단된다. 노즐 내경이 다른 노즐의 경우에도 이와 유사한 경향이 나타났다.

3-6. 반경방향 온도분포

Fig. 9는 원추 형상을 보이는 증기 질량속이 280 kg/m²-s인 20 mm 노즐의 반경방향 온도분포, Fig. 10은 타원 형상을 보이는 증기 질량속이 600 kg/m²-s인 10.15 mm 노즐의 반경방향 온도분포를 나타낸다. Fig. 9에 도시된 그림 중에 노즐 중심으로부터 축방향으로 떨어진 거리 X=5 mm, 10 mm 및 40 mm인 경우는 증기제트가 포함된 반경방향 온도분포를 보여주고 있는데, 증기제트 내부의 온도는 중심축에서 멀리 떨어질수록 낮아지는 것으로 보아 팽창과에 의한 온도요동 현상은 발생하지 않는 것으

로 판단된다. 특히 X=40 mm인 경우는 증기제트 끝부분을 포함하는 것으로 이곳에서는 이미 주위 물과 어느 정도 응축반응이 일어나 최대 온도가 비교적 낮음을 알 수 있다. X=100 mm의 경우는 증기제트를 포함하지 않은 것으로 반경방향 온도가 중심축에서 멀리 떨어질수록 낮아지는, 단상제트와 유사한 경향을 보여주고 있다. Fig. 10에 도시된 그림 중에 노즐 중심으로부터 축방향으로 떨어진 거리 X=5 mm 및 10 mm인 경우는 증기제트가 포함된 반경방향 온도분포를 보여주고 있는데, 증기제트 최대온도가 중심축이 아닌 축에서 약간 떨어진 곳에서의 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 3.5에서 언급한 바와 같이 underexpanded jet에서 발생하는 온도요동 현상이 일어나고 있음을 보여준다. X=40 mm 및 100 mm인 경우는 증기제트를 포함하지 않은 것으로 반경방향 온도가 중심축에서 멀리 떨어질수록 낮아지는, 단상제트와 유사한 경향을 보여주고 있다.

3-7. 응축영역도(condensation regime map)

증기 질량속과 수조온도의 변화에 따른 응축영역도를 Fig. 11에 표시하였다. 본 응축영역도는 처깅(chugging, C), 천이처깅(transient chugging, TC), 응축진동(condensation oscillation, CO), 안정응축(stable condensation, SC), 방울응축진동(bubble condensation oscillation, BCO) 및 간헐진동응축(intermittent oscillation condensation, IOC) 등의 여섯 영역으로 구성되었다. 증기 질량속이 증가함

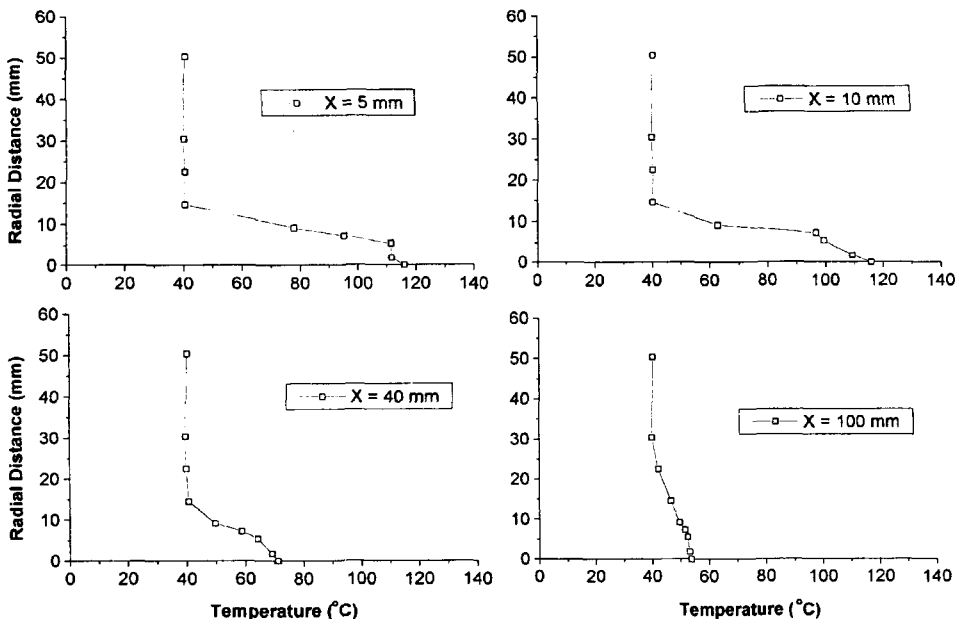


Fig. 9. Radial temp. profile (nozzle ID: 20 mm, mass flux: 280 kg/m²-s, pool temp.: 40°C).

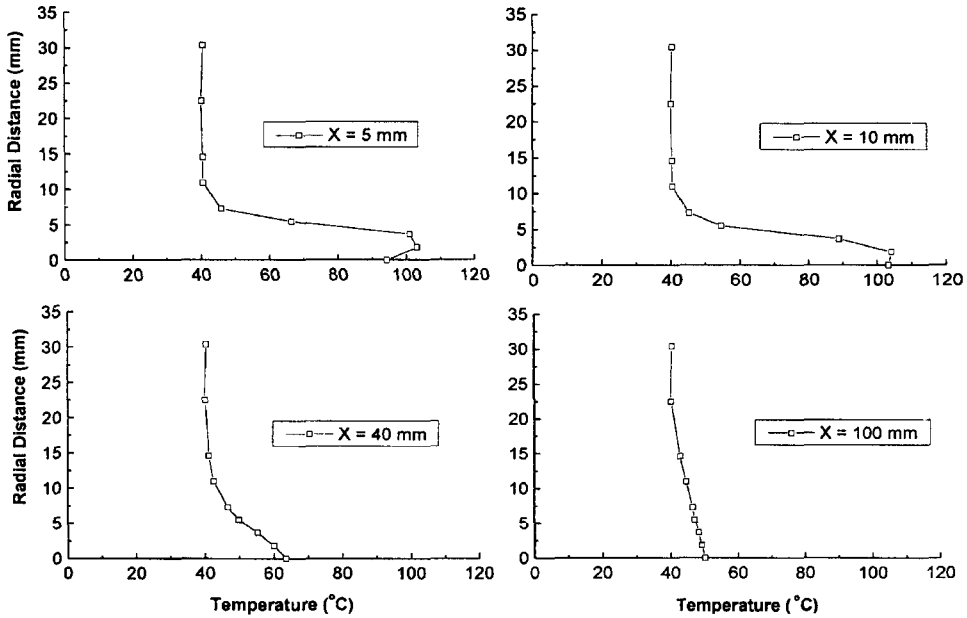


Fig. 10. Radial temp. profile (nozzle ID: 10.15 mm, mass flux: 600 kg/m²-s, pool temp.: 40°C).

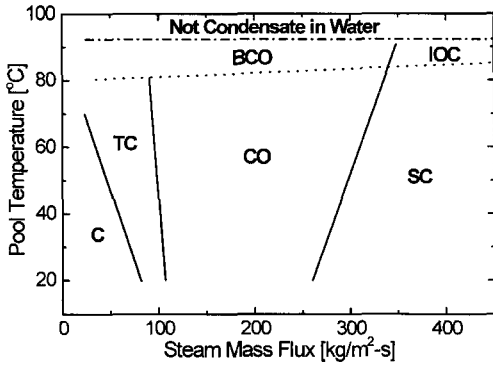
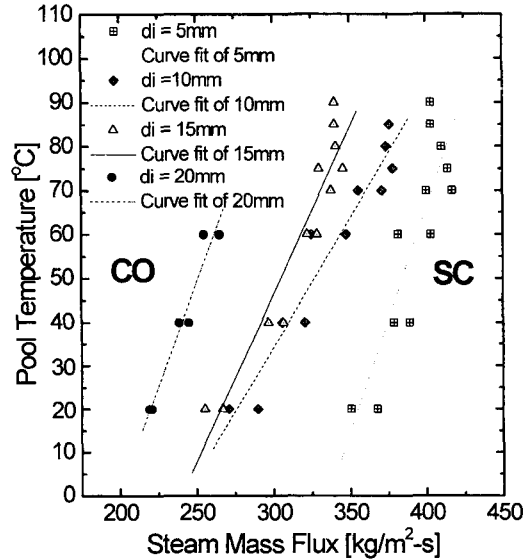


Fig. 11. Condensation regime map.

에 따라서 응축모드는 처깅, 천이처깅, 응축진동, 그리고 안정응축 등으로 변하게 된다. 응축진동영역에서는 물-증기의 경계가 노즐출구의 바깥부분에서 유지되거나 경계면의 심한 진동으로 인하여 증기제트가 일정한 모양을 유지하지 못하고 시간에 따라서 불규칙하게 변화한다. 그러나 안정응축조건에서는 물-증기 경계면에서의 응축율과 증기의 공급량이 평형을 이루어 원추형이나 타원형 등과 같은 일정한 모양의 증기제트를 형성하게 된다. 또한 응축모드는 수조온도에도 영향을 받는다. Fig. 11에서 확인할 수 있듯이 응축진동이나 안정응축영역이 온도가 80°C 이상으로 상승함에 따라서 방울응축진동영역과 간헐진동응축영역으로 바뀌어 알 수 있다. 방울응축



CO : Condensation Oscillation
SC : Stable Condensation

Fig. 12. Typical transient boundaries between CO and SC.

진동영역은 응축수의 온도가 증가함에 따라서 응축율이 감소하게 되어 분사된 증기가 제트형상을 이루지 못하고 증기방울을 형성하여 응축되는 현상을 말한다. 90°C

이상의 조건에서는 증기제트가 응축수내에서 제대로 응축하지 못하고 자유수면위로 상승하는 것이 관찰되었고, 온도의 상승과 더불어 이러한 현상은 더욱 확실하게 관찰되었다. 응축진동영역은 응축수의 온도가 상승함에 따라서 폭이 상대적으로 커짐을 알 수 있는데 이것은 응축수의 온도가 상승함에 따라서 안정응축조건을 유지하기 위해서는 증기 질량속이 증가 해야함을 의미한다. 응축영역도는 타 연구자^{[51][6]}에 의해 제시된 응축영역도와 유사한 경향을 보였다.

응축진동영역과 안정응축영역의 경계는 증기 질량속과 수조온도 그리고 노즐의 크기와 관계가 있는 것으로 알려져 있다^{[3][8]}. 응축진동과 안정응축은 증기제트의 형상과 압력과의 세기 등에서 현저한 차이를 보이고 있으므로 쉽게 구별할 수 있으나 노즐의 크기에 따라서 불안정영역에서 안정영역으로 바뀌는 증기의 경계질량속에는 차이가 있음이 관찰되었다. Fig. 12는 노즐의 크기에 따른 응축진동과 안정응축영역의 경계질량속을 Table 1에 나타난 바와 같이 4종류 노즐에 대한 실험치를 최소자승법을 사용하여 표시하였다. 그럼에서 보듯이 노즐의 크기가 증가할수록 증기의 경계질량속은 감소하는 것을 알 수 있다.

3-8. 동압(dynamic pressure) 특성

Table 1에 나타난 바와 같이 4종류의 노즐을 사용하여 응축수의 온도와 증기의 질량속을 변화하여 벽면에서의 동압을 측정하였다. 동압측정 센서는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 노즐 출구에서 방출되는 증기가 직접 향하는 곳에 탱크바닥 면에서 50 cm 노즐 출구에서 약 120 cm 정도 떨어진 곳에 설치되었다. 확률밀도함수(probability density function)의 95%에 해당하는 폭을 동압크기로 결정하였다. Fig. 13과 14는 10.15 mm와 15.5 mm 노즐의 경우에 증기 질량속의 변화에 따른 벽면에서의

동압크기를 나타낸다. 수조온도가 낮은 영역에서의 동압은 온도에 비례하여 증가하고 일정 과냉각도에서 최대치를 보인 후 포화온도에 접근함에 따라서 동압은 다시 작아지는 경향을 보였다. 점선은 불안정영역에서의 동압이며 실선은 안정영역에서의 동압을 나타내는데, 수조온도가 낮은 경우에는 증기 질량속이 경계질량속 이하(불안정응축 영역)에서의 동압이 경계질량속 이상(안정응축 영역)의 경우에 비하여 크게 관찰되었다. 증기의 질량속이 경계질량속을 넘어서면 증기제트는 안정상태가 되고 이 경우에는 응축수의 온도에 따라 동압이 현격한 차이를 보이게 된다. 경계질량속 이하의 경우 동압은 증기 질량속이 증가함에 따라서 증가하였으나 경계질량속 초과시 동압은 반대의 경향을 보였다. 앞에서 설명한 바와 같이 증기의 경계질량속은 노즐에 따라서 차이가 있으며 수조온도와도 관련이 있다. 본 실험에서 사용한 10.15 mm와 15.5 mm 노즐의 경우 경계질량속은 250~360 kg/m²·s 정도로 관찰되었다. Fig. 12과 13, 14를 비교해보면 동압은 응축모드와 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. 실험한 증기 질량속 범위에서 최대동압은 수조온도가 60~80°C에서 관찰되었고 수조온도가 포화온도에 접근할수록 동압은 작게 관찰되었다.

이와 같이 일정한 온도범위에서 최대동압이 발생하게 되는 이유는 최대동압이 발생하기 위해서는 큰 증기방울이 급격히 응축되어야 하는데 큰 증기방울이 생성되기 위해서는 응축수의 온도가 높을수록 바람직하며 증기방울의 빠른 응축을 위해서는 낮은 응축수온도가 필요하기 때문이라고 Chun^[10]과 Sonin^[11] 등은 설명하고 있다. 또한 최대동압이 관찰되는 온도는 증기 질량속과 관련이 있으며 Fig. 15에 증기 질량속에 따른 최대동압이 발생하는 온도를 표시하였다. 노즐의 크기에 따라서 약간의 차이는 있으나 최대동압이 발생하는 온도는 증기 질량속이 증가할수록 증가하였다. 이와같은 경향은 Del

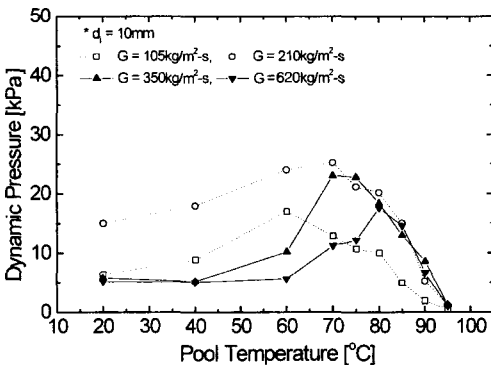


Fig. 13. Variation of dynamic pressure at the wall (nozzle ID: 10.15 mm).

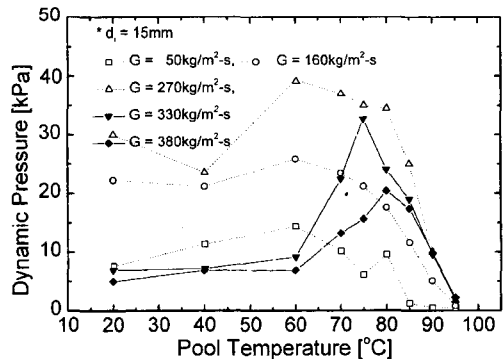


Fig. 14. Variation of dynamic pressure at the wall (nozzle ID: 15.5 mm).

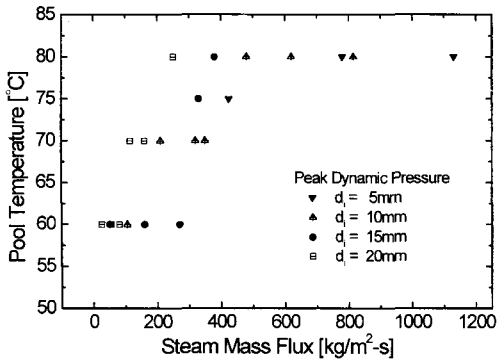


Fig. 15. Distribution of peak dynamic pressure with the variation of steam mass flux and pool temp.

Tin 등^[3], Cho 등^[9], Sonin^[11] 등에 의해서도 관찰된 바 있다.

4. 결 론

안정된 형상을 유지하는 증기제트 형상은 증기 질량속이 작고 수조온도가 낮을수록 원추 형상을 보였고 증기 질량속이 크고 수조온도가 높을수록 타원 형상을 보였다. 증기제트가 타원형의 형상인 경우, 상류의 압력과 배압의 차이에 의해 발생하는 underexpanded jet에 의한 팽창파에 의해 증기제트가 팽창하는 현상이 발생되었다. 증기제트 팽창비는, 증기 질량속이 동일할 때 수조온도가 증가할수록 또한 수조온도가 동일할 때 증기 질량속이 증가할수록 증가하였다. 증기제트 길이는, 증기 질량속이 동일할 때 수조온도가 증가할수록 또한 수조온도가 동일할 때 증기 질량속이 증가할수록 증가하였다. 응축열전달계수는 증기 질량속이 동일할 때 수조온도가 감소할수록 또한 수조온도가 동일할 때 증기 질량속이 증가할수록 증가하였다. 증기제트 내부에서 중심축방향 및 반경방향 온도는 주위 물 온도와는 무관하게 나타났으며, 특히 타원 형상을 보이는 경우 팽창파가 온도에 영향을 미쳐 온도가 축방향 거리 및 반경방향 거리에 따라 요동치는 결과를 나타내었다. 증기제트 끝부분을 포함한 유동장 하류는 증기와 물의 응축이 잘 이루어져 단상 제트의 온도분포와 비슷한 경향을 나타내었다.

증기 질량속이 44~1190 kg/m²-s 이고 수조온도가 20~95°C인 범위에서의 응축영역도를 측정, 천이 측정, 응축 진동, 안정응축, 방울응축진동 및 간헐진동응축 등 여섯 가지 영역으로 구분된 제시하였다. 탱크 벽면에서의 동압은 응축모드와 밀접한 관련이 있으며 불안정영역에서 상대적으로 큰 동압이 관찰되었다. 최대동압은 수조온도가 60~80°C 범위에서 관찰되었으며, 증기 질량속이 증

가할수록 최대동압이 발생하는 온도는 증가하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 계획의 일환으로 수행되었으며, 본 연구를 위해 지원해주신 과학기술부 관계자 여러분께 심심한 사의를 표합니다.

사용기호

- A : 응축열전달 면적, m²
- A_c : 노즐출구 면적, m²
- B : 응축추진 포텐셜, C_p(T_s-T_f)/(h_s-h_f)
- C_p : 물 비열, J/kg·°C
- d_i : 노즐 내경, m
- G : 증기 질량속, kg/m²-s
- G_m : 대기압에서 임계 증기 질량속, kg/m²-s
- h : 응축열전달계수, W/m²-°C
- h_s : 증기 엔탈피, J/kg
- h_f : 물 엔탈피, J/kg
- l : 증기제트 캐비티 길이, m
- T_s : 증기 온도, °C
- T_f : 물 온도, °C

참고문헌

1. Weimer, J.C., Faeth, G.M. and Olson, D.R.: "Penetration of Vapor Jets Submerged in Subcooled Liquids", *AIChE J.*, Vol. 19, No. 3, pp. 552-558 (1973).
2. Kudo A, Egusa T. and Toda, S.: "Basic Study of Vapor Suppression", *Pro. 5th Int. Heat Transfer Conf. Tokyo*, Vol 3, pp. 221-225 (1974).
3. Del Tin, G., Lavagno, E. and Malandrone, M.: "Pressure and Temperature Measurements in Vapour Condensing Jet", *Proc. 7th Int. Heat Transfer Conf. Munchen*, Vol. 6, pp. 159-164 (1982).
4. Kerney, P.J., Faeth, G.M. and Olson, D.R.: "Penetration Characteristics of Submerged Jet", *AIChE J.*, Vol. 18, No. 3, pp. 548-553 (1972).
5. Chun, M.H. and Kim, Y.S.: "An Investigation of Direct Condensation of Steam Jet in Subcooled Water", *Int. Comm.. Heat Transfer*, Vol. 23, No. 7, pp. 947-958 (1996).
6. Aya, I. and Nariai, H.: "Evaluation of Heat Transfer Coefficient at Direct Condensation of Cold Water and Steam", *Nucl. Eng. & Des.*, Vol. 131, pp. 17-24

- (1991).
7. Doebelin, E.O.: Measurement System: Application and Design, 4th ed. McGrawal Hill, New York, pp. 58-60 (1977).
 8. Cumo, M., Farello, G.E. and Ferrari, G.: "Heat Transfer in Condensing Jets in Water", Proc. of 6th Int. Heat Transfer Conf., Toronto, Vol. 5, pp. 101-106 (1978).
 9. Cho, S., Song, C.H., Park, C.K., Yang, S.K. and Chung, M.K.: "Experimental Study on Dynamic Pressure Pulse in Direct Contact Condensation of Steam Jets Discharging into Subcooled Water", NTHAS98, Pusan, Vol. 1, pp. 291-298 (1998).
 10. Chun, J.H.: "Scaling Laws and Rate Correlations for Steam Condensation on Turbulent Water", Ph. D. thesis, MIT, U.S.A. (1983).
 11. Sonin, A.A.: "Suppression Pool Dynamics Research at MIT", NUREG/CP-0048, pp. 400-421 (1984).