

KAERI/TR-1863/2001

증기응축제트 해석 모델

Analysis Modeling on the Condensing Steam Jet

KAERI

한국원자력연구소

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 2001년도 “차세대원자로 계통해석 및 평가기술 개발”
과제의 기술보고서로 제출합니다.

2001. 6.

과 제 명 : 차세대원자로 계통해석 및 평가기술 개발

주 저 자 : 김 환 열(동력로기술개발팀)

요 약 문

물과 증기의 직접접촉에 의한 응축 열전달은 움직이는 증기/물 경계면에서 열 및 물질 전달이 이루어지는 현상으로서, 매우 큰 열전달계수를 수반하는 특징이 있기 때문에 이를 응용한 설계가 산업체의 여러 제조 공정과 증기분사기가 부착된 차세대원자로 안전감압계통 설계 등에서 광범위하게 응용되고 있다. 본 보고서에서는 수평 배관을 통해 과냉각수조로 방출되는 고온 고압의 증기제트 응축특성에 대한 2개의 이론적 해석 모델을 제시하였고, 증기제트의 형상 및 길이, 유동장 온도, 열전달계수 등을 측정한 기존의 실험결과와 비교분석 하였다. 첫 번째 해석 모델은 증기와 과냉수 사이에 국부 균질유동을 가정하고 난류 특성은 난류 확산화염에서 사용되는 $k-\epsilon-g$ 모델을 사용하여 증기응축 유동 현상을 수치해석 한 것이다. 이 모델에서 난류는 난류 운동 에너지와 운동 에너지 소멸률로 묘사되고 증기와 과냉수의 혼합률비에 대한 평균값과 변동량에 대한 미분 방정식을 추가하여 직접 풀고 혼합률비에 확률분포 함수를 적용하여 열역학 변수의 평균값을 구한다. 두 번째 해석 모델은 축대칭 좌표계에서 질량, 운동량 및 에너지 방정식과 증기/물 경계면에서의 응축 특성을 고려한 열평형 방정식을 사용하여 증기응축제트 캐비티 형상을 예측한 것이다. 이 모델에서 증기/물 경계에서의 매우 큰 열전달율은 기존의 실험을 근거로 한 유효 열전도계수에 의해 반영되었다. 제시된 2개의 해석 모델을 평가하기 위해 해석결과와 기존의 실험결과를 비교하여 만족할 만한 결과를 얻었다. 본 보고서는, 증기분사기 개발과 관련하여 가장 간단한 형태의 증기분사기로 간주될 수 있는 단일 수평 배관에서 일어나는 증기제트 응축특성에 대한 해석 모델을 제시한 것으로 추후 이를 바탕으로 좀더 복잡한 형태의 증기분사기 모델을 개발하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

SUMMARY

Phenomenon of direct contact condensation (DCC) heat transfer between steam and water is characterized by the transport of heat and mass through a moving steam/water interface. The phenomenon is broadly applied to the engineering industries as well as to the design of safety depressurization system including sparger of KNGR, since it provides some advantageous features in the viewpoint of enhanced heat transfer. This report contains two analysis models on the condensation of stable steam jets discharging into a quenching tank with subcooled water from a single horizontal pipe. The analysis results are compared with the conventional experimental ones which were performed to measure the shapes and lengths of condensing steam jet, the temperatures of the flow field and the condensation heat transfer coefficients. The first analysis model is a numerical one to analyse the condensing steam jet by employing the locally homogeneous flow approximation of two phase flow in conjunction with a $k-\epsilon-g$ model of turbulence properties. In this model, the turbulence is represented by differential equations for its kinetic energy and dissipation. A differential equation for the concentration fluctuations is solved and a clipped normal probability distribution function is proposed for the mixture fraction. The second analysis model is an analytic one to predict the configuration of condensing steam jet cavity by employing the mass, momentum and energy equations as well as a thermal balance equation with condensing characteristics at the steam/water interface for the axi-symmetric coordinates. In this model, the extremely large heat transfer rate at the steam/water interface is reflected in the effective thermal conductivity estimated from the conventional experimental results. The proposed analysis models are evaluated comparing the analysis results with the experimental ones. It shows that both results are in good agreement. In summary, this report can be used for the development of the analysis model on the complex sparger, since it proposes the analysis models on the condensing steam jet discharging from a single pipe which is considered a simple sparger.

목 차

제 1 장 서 론	1
제 1 절 배경	1
제 2 절 목적 및 범위	3
제 2 장 난류확산화염 모델을 응용한 수치 해석	6
제 1 절 지배 방정식	6
제 2 절 수치 해석	9
제 3 절 해석 결과 및 고찰	11
제 4 절 결론 및 제언	12
제 3 장 증기응축제트 캐비티 형상 해석	18
제 1 절 이론적 해석	18
제 2 절 해석 결과 및 고찰	22
제 3 절 결론 및 제언	23
제 4 장 결 론	31
참고문헌	32
사용기호	34
부록 Experimental Data for the 20 mm and 10.15 mm Nozzles	36

표 목 차

Table 1. Analysis Cases and Results	24
---	----

그 림 목 차

Fig. 1	Schematic Diagram of the SDVS for the KNGR	4
Fig. 2	Configuration of a KNGR Sparger	5
Fig. 3	Jet Model and Coordinate	13
Fig. 4	Sketch of the Assumed PDF for Mixture Fraction	13
Fig. 5	Boundary Condition	14
Fig. 6	Radial Velocity Profiles of Circular Jet ($X : 400 \text{ mm}$)	14
Fig. 7	Radial Temperature Profiles (Nozzle ID : 20 mm, Steam Mass Flux : $280 \text{ kg/m}^2\text{-s}$, Pool Temp. : $40 \text{ }^\circ\text{C}$)	15
Fig. 8	Radial Temperature Profiles (Nozzle ID : 10.15 mm, Steam Mass Flux : $309 \text{ kg/m}^2\text{-s}$, Pool Temp. : $40 \text{ }^\circ\text{C}$)	16
Fig. 9	Centerline Temperature Profiles (Nozzle ID : 20 mm, Steam Mass flux : $280 \text{ kg/m}^2\text{-s}$, Pool Temp. : $40 \text{ }^\circ\text{C}$)	17
Fig. 10	Centerline Temperature Profiles (Nozzle ID : 10.15 mm, Steam Mass flux : $309 \text{ kg/m}^2\text{-s}$)	17
Fig. 11	Conical Steam Jet (Nozzle ID : 20 mm, Steam Mass Flux : $280 \text{ kg/m}^2\text{-s}$, Pool Temp. : $40 \text{ }^\circ\text{C}$)	25
Fig. 12	Ellipsoidal Steam Jet(Nozzle ID : 10.15 mm, Steam Mass Flux : $825 \text{ kg/m}^2\text{-s}$, Pool Temp. : $55 \text{ }^\circ\text{C}$)	25
Fig. 13	Control Volume for a Conical Steam Jet	26
Fig. 14	Control Volume for an Ellipsoidal Steam Jet	26
Fig. 15	Energy Balance Diagram	27
Fig. 16	Steam Jet Cavity with the Change of Multiplication Factor (Nozzle ID : 20 mm, case 1)	27
Fig. 17	RMS Error versus Multiplication Factor (Nozzle ID : 20 mm, Steam Mass Flux : $280 \text{ kg/m}^2\text{-s}$, Pool Temp. : $40 \text{ }^\circ\text{C}$)	28
Fig. 18	Effect of Δx on the Steam Jet Shape (Nozzle ID : 20 mm, Steam Mass Flux : $280 \text{ kg/m}^2\text{-s}$, Pool Temp. : $40 \text{ }^\circ\text{C}$)	28
Fig. 19	Steam Jet Cavity with the Change of Steam Mass Flux and Pool Temp. (Nozzle ID : 20 mm)	29
Fig. 20	Steam Jet Cavity with the Change of Pool Temp. (Nozzle ID : 10.15 mm)	29
Fig. 21	Steam Jet Cavity with the Change of Steam Mass Flux (Nozzle ID : 10.15 mm)	30

제 1 장 서 론

제 1 절 배경

증기와 과냉각수가 직접 접촉하여 증기가 응축되는 열전달 현상은 물과 증기의 접촉면에서 격렬한 난류 현상이 발생하여 매우 큰 열전달계수를 수반하므로 산업체의 여러 제조 공정과 핵증기 공급계통의 설계과정 등에서 공학적으로 광범위하게 응용되고 있다. 특히 현재 개발 중인 차세대원자로에는 원자로의 과압을 방지하기 위한 안전감압계통 설계에 직접접촉 응축 열전달 현상을 응용하고 있다. Fig. 1은 차세대원자로 안전감압계통 계통도이다. 사고 발생시 원자로의 과압이 발생하면 가압기 상부에 부착되어 있는 안전방출밸브가 열려 고온 고압의 증기가 배관 끝에 부착되어 있는 증기분사기를 통해 핵연료재장전수 탱크에 저장되어 있는 과냉각수로 방출되어 과냉각수와의 직접접촉에 의해 응축된다. Fig. 2와 같은 차세대원자로 증기분사기 응축효율을 높이고 방출하중을 줄이기 위해 여러 개의 작은 구멍이 뚫어져 있다. 증기분사기의 올바른 설계를 위해서는 증기제트의 직접접촉 응축 특성을 이해하는 것은 매우 중요하다.

증기와 과냉각수와의 경계면에서 일어나는 응축 특성에 관한 정확한 메커니즘은 물리적 현상이 복잡하기 때문에 현재까지 명확하게 규명되어 있지 않고 있다. 이에 대한 연구는 실험적 연구와 해석적 연구로 나눌 수 있는데 주로 전자가 많이 수행되어 왔다. 현재까지 수행된 대부분의 실험적 연구는 국부 응축률, 국부 열전달 계수, 온도 및 압력 등을 측정하는 연구가 수행되어 왔으며, 최근에는 경계면에서 난류량에 대한 측정도 시도되고 있다. 해석적 연구는 응축 현상이 복잡하고 수학적 모델을 개발하기 위한 실험 자료가 부족하기 때문에 실험적 연구에 비해 미미한 수준이다. 증기와 과냉각수 사이의 응축 현상을 해석하기 위해서는 난류 효과를 고려하여 운동량과 에너지 보존 방정식을 풀어야 한다. 초기에는 난류 효과를 경험적으로 증기와 과냉각수 경계면에서의 유입량 등에 인위적으로 추가시켜 사용하는 방법이 사용되었고, 최근에는 난류 혼합거리 모델을 사용하는 방법도 제안되었으나 여전히 많은 경험 상수를 포함하고 있다.

증기와 과냉각수가 성층화되어 흐르면서 응축되는 유동에 대한 이론적 해석은 Linehan 등^[1], Murata 등^[2] 및 Mikielwicz 등^[3]에 의해 수행되었다. Linehan 등^[1]은 동일한 방향으로 흐르는 증기와 과냉각수 경계면에서 질량, 운

동량, 에너지 보존 방정식을 세우고, 응축률, 전단응력, 경계면에서의 속도 등에 대해 실험을 근거로 관계식을 도입한 모델을 제시하였다. Murata 등^[2]은 수평 사각 채널에서 동일한 방향으로 흐르는 증기와 과냉각수 경계면에서의 열전달계수를 수정된 $k-\epsilon$ 모델, 표면 재생 모델, 열전도 모델 등을 사용하여 제시하였다. Mikielwicz 등^[3]은 액막이 증기 속으로 방출될 때, 간단한 에너지 방정식을 상사 변수를 도입하여 풀어 액막의 열적도달거리를 구하는 방법을 제시하였고, 아울러 실험 자료와 비교하여 유효확산계수를 구하였다.

과냉각수가 주위의 증기 속으로 방출되어 응축되는 유동에 대한 이론적인 해석은 Celata 등^[4]에 의해 수행되었다. Celata 등^[4]은 과냉각수가 제트 형태로 증기 속으로 방출될 때 제트 내부의 온도 분포를 구하는 식을 실린더 좌표계에서 유도하였고, 실험 자료를 근간으로 하여 유체의 동적 효과를 고려한 등가 열전도계수의 상관식을 도출하였다.

증기제트가 과냉각 수조에 방출되어 응축되는 유동에 대한 이론적인 해석은 Weimer 등^[5], Kudo 등^[6] 및 Kim 등^[7]에 의해 수행되었다. Weimer 등^[5]은 과냉각수로 방출되는 증기제트에 대해, 증기와 과냉각수 사이에 전달률이 매우 빨라 속도와 온도가 동일한 국부적으로 균질화된 유동(locally homogeneous)으로 가정하고 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식에 대한 적분 모델을 개발하였다. 따라서 완전한 난류에 대한 현상학적 해석이라 할 수는 없으나 이론식을 사용하여 처음으로 유동 특성을 구하였다. Kudo 등^[6]은 과냉각수로 방출되는 원추형의 증기제트에 대해 경계층 방정식을 도입하고, 증기와 과냉각수 경계면에서의 난류 전달을 모사하기 위해 Prandtl-Taylor 혼합거리 모델을 사용하여 증기제트의 유동특성을 해석하였다. 증기 응축 제트는 일반적으로 초기 영역과 주 영역으로 나누어지고 증기 제트의 모양은 원추형이며 원추 길이는 증기-액체 경계를 통한 응축 열전달에 의해 제어된다고 가정하였다. 초기 영역은 경계층 이론을 가정하여 지배 방정식을 유도하였고 증기가 존재하는 영역에서는 액체에서의 난류 전달을 모사하기 위해 혼합거리 모델을 사용하였다. 주 영역은 축대칭에서의 단상 제트를 가정하여 적분 모델을 사용하여 해석하였다. 이 방법은 이전까지의 해석이 주로 실험 데이터를 이용한 상관 관계식의 개발인 것에 비해 전달률에 대한 현상학적 모델을 개발하여 유동장을 해석한 것이다. 그러나 이 해석은 지배 방정식을 풀기 위해 축대칭 좌표계를 직교 좌표계로 가정하였다. Kim 등^[7]은 증기 응축 제트의 난류 특성치를 계산하기 위해 난류 운동에너지 방정식과 난류 운동에너지 소산률 방정식에 증기와 냉각수 사이에 국부적으로 균질화된 유동을 가정하여 혼합률비(mixture fraction)에 대한

평균값과 변동량에 대한 방정식을 추가하여 수치해석을 수행하였고 증기 응축 제트의 유동 특성을 Kim등^[8]의 실험결과와 비교하였다.

제 2 절 목적 및 범위

본 보고서에서는 수평 배관을 통해 고온 고압의 증기제트가 과냉각 수조로 방출되어 응축되는 경우에 대해 응축특성에 대한 이론적 해석 모델을 제시하였고, 구경이 다른 노즐에서 증기유량을 변화시켜가며 형성되는 증기제트의 형상 및 길이, 유동장 온도, 열전달계수 등을 측정한 Kim등^[8]의 실험결과와 비교분석 하였다.

제 2장에서는 Kim 등^[7]에 의해 제시된 수치해석 모델을 소개하였고, 수치해석 으로 구한 온도와 Kim등^[8]의 실험결과와 비교하였다. 제 3장에서는 본 저자에 의해 제안된 증기제트 캐비티 형상을 예측하는 간단한 증기응축 해석 모델을 제시하였다. 안정된 형상의 증기제트에 대해 축대칭 좌표계에서 질량, 운동량 및 에너지 방정식과 증기/물 경계면에서의 응축 특성을 고려한 열평형 방정식을 사용하였고, 본 모델을 통해 예측되는 증기제트 캐비티의 형상을 Kim 등^[8]의 실험 결과와 비교하였다.

본 보고서는, 증기분사기 개발과 관련하여 가장 간단한 형태의 증기분사기로 간주될 수 있는 단일 수평 배관에서 일어나는 증기제트 응축특성에 대한 해석모델을 제시한 것으로 추후 이를 바탕으로 좀더 복잡한 형태의 증기분사기 모델을 개발하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

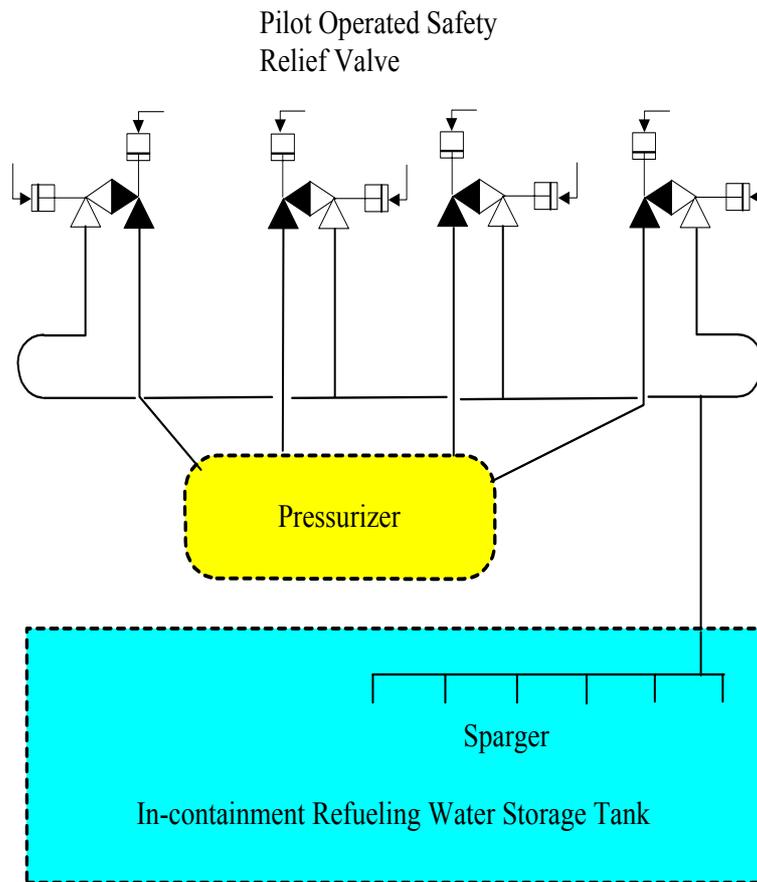


Fig. 1 Schematic Diagram of the SDVS for the KNGR

제 2 장 난류확산화염 모델을 응용한 수치 해석

제 1 절 지배 방정식

증기 응축 제트에서 이상 유동이 일정 온도하에서 혼합이 일어나는 경우, 주위 유체의 증가는 증기의 응축을 야기시켜 혼합물이 평형상태에 도달하면 밀도를 증가시키고 공극률(void fraction)은 감소한다. 증기 응축 제트의 특성을 나타내는 무차원 변수로 응축 추진력(driving potential)을 사용하는데 $B = (h_{fs} - h_{\infty}) / (h_o - h_{fs})$ 로 정의된다. 응축 추진력이 크다는 것은 노즐에서 방출되는 증기의 엔탈피와 주위 액체의 엔탈피의 차이가 작다는 것을 의미하고 이 경우 제트의 길이는 상대적으로 짧다.

예혼합되지 않은 난류 혼합 유동의 가장 큰 특징은 혼합 과정의 요동 특성이다. 난류 확산 화염 유동의 해석시 농도 요동을 고려하지 않은 모델은 좋은 결과를 보여 주지 못하는 것으로 알려져 있다. 증기 응축 제트도 증기와 과냉수의 혼합비 요동 특성이 해석 결과에 큰 영향을 미칠 것이다. 따라서 이러한 혼합비와 혼합비 요동에 대한 방정식을 난류를 고려한 지배 방정식에 포함시켜야 한다.

본 해석에서는 증기 응축 제트를 모사하기 위해 균일한 성질을 갖는 무한한 정지 유체에서의 정상 축대칭 난류 제트에 대해 얇은 전단층 근사식을 적용하였고 난류 확산 화염을 모사하기 위해 개발된 난류 연소 모델을 응축 제트에 확장하였다. 연소 모델에서 난류는 난류 운동 에너지와 에너지의 소멸률에 대한 방정식으로 모사된다. 각 상간에는 극부적으로 균질화된 유동으로 매우 빠른 열전달이 상의 경계면에서 발생하여 각 상의 속도는 같은 열역학적 평형 상태임을 가정하였다. 연소 반응인 경우 연료와 산소의 혼합비가 중요하므로 혼합비 f 를 정의하고 혼합비에 대한 평형 방정식을 유도하였다. 또 혼합비 요동에 대한 확률 분포 함수를 도입하여 혼합비와 혼합비 요동에 대한 지배 방정식을 동시에 풀어 나온 결과를 사용하여 모든 열역학 변수들을 구할 수 있다. 임의의 열역학 변수의 평균값은 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{\phi} = \int_0^1 \phi(f) p(f) df$$

증기 응축 제트에서는 연소 모델과 마찬가지로 f 는 증기와 물의 혼합비로

혼합물은 $f < f_s$ 일 때는 단상으로 가정되고 혼합이 계속 이루어질수록 주위 액체 상태로 변하고 $f=0$ 으로 접근한다. 국부 균질 유동 가정이 적용되어 두 상의 속도는 같고 각 지점에서 열역학적 평형이 유지된다. 이러한 가정하에서 유동장 내 임의의 점에서 열역학적 순간 특성(property)은 분사 유체의 양(f , mixture)과 주위 유체의 양($1-f$)이 단열적으로 혼합되어 유동의 주위 압력 하에서 열역학적 평형을 이루게 된다. 그러므로 유동 내의 스칼라 열역학적 특성들은 주어진 분사 유체와 주위 유체 조건에 대해 혼합비의 함수로 결정되어진다.

증기응축제트는 Fig. 3과 같이 증기만 존재하는 코어 영역(core region)과 증기와 과냉수가 공존하는 혼합 영역(mixing region)으로 나누어지며 각 영역의 폭과 길이는 과냉수와 증기 경계면에서의 응축 열전달과 깊은 관계가 있으며 응축에 의한 열방출은 난류 확산에 의해 주위로 전달된다. 따라서 난류 유동 효과와 증기 응축 현상은 증기 응축 제트의 특징을 결정하는 가장 중요한 현상들이다. 코어 영역과 혼합 영역을 쉽게 구별할 수 있는 방법은 온도 변화이다. 압력의 변화는 거의 없는 것으로 알려져 있다.

축대칭 좌표계로 나타낸 난류 제트에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

연속 방정식

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u})}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \bar{\rho} \bar{v}^{\circ}) = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식

$$\bar{\rho} \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{\rho} \bar{v}^{\circ} \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r(\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} \right] \quad (2)$$

$$\bar{\rho} \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{\rho} \bar{v}^{\circ} \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r(\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} \right] - \frac{2\mu v}{r^2} \quad (3)$$

혼합비 방정식

$$\bar{\rho} \bar{u} \frac{\partial \bar{f}}{\partial x} + \bar{\rho} \bar{v}^{\circ} \frac{\partial \bar{f}}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{\sigma_f} \right) \frac{\partial \bar{f}}{\partial r} \right] \quad (4)$$

$$\overline{\rho} \overline{u} \frac{\partial \overline{g}}{\partial x} + \overline{\rho} \overline{v}^o \frac{\partial \overline{g}}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{\sigma_g} \right) \frac{\partial \overline{g}}{\partial r} \right] + C_{\epsilon 1} \left(\frac{\partial \overline{f}}{\partial r} \right)^2 - C_{\epsilon 2} \overline{\rho} \frac{\epsilon g}{k} \quad (5)$$

$$\text{여기서 } f = \overline{f} + f, \quad g = (\overline{f} - f)^2$$

난류 운동 에너지 방정식

$$\overline{\rho} \overline{u} \frac{\partial \overline{k}}{\partial x} + \overline{\rho} \overline{v}^o \frac{\partial \overline{k}}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \overline{k}}{\partial r} \right) + \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u}}{\partial r} \right)^2 - \overline{\rho} \epsilon \quad (6)$$

난류 운동 에너지 소멸률 방정식

$$\overline{\rho} \overline{u} \frac{\partial \overline{\epsilon}}{\partial x} + \overline{\rho} \overline{v}^o \frac{\partial \overline{\epsilon}}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \overline{\epsilon}}{\partial r} \right) + (C_{\epsilon 1} \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u}}{\partial r} \right)^2 - C_{\epsilon 2} \overline{\rho} \epsilon) \frac{\epsilon}{k} \quad (7)$$

여기서 $\overline{\rho} \overline{v}^o = \overline{\rho} \overline{v} + \overline{\rho}' \overline{v}'$ 이고 여러 가지 모델 상수는 다음과 같다.

$$\mu_t = C_\mu \overline{\rho} \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$C_\mu = 0.09, C_{\epsilon 1} = 1.44, C_{\epsilon 2} = C_{\epsilon 2} = 1.92, C_{\epsilon 1} = 2.8$$

$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3, \sigma_f = 0.7, \sigma_g = 0.7, Sc = 0.7$$

제트의 모든 유동장에서 위 방정식과 이상 유체에 대한 상태 방정식을 사용해서 수치 해석을 수행하면 열유동 특성을 자세하게 분석할 수 있다^[9]. 혼합물비에 대한 확률분포함수 $p(f)$ 는 Fig. 4와 같이 가정되는데 $0 < f < 1$ 범위에서는 혼합물비는 정상분포를 갖고 $f < 0, f > 1$ 에서는 $f=0, f=1$ 에서의 Dirac delta 함수로 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$p[f] = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{f-\mu}{\sigma} \right)^2 \right] [u[f] - u[f-1]] + A\delta(0) + B\delta(1) \quad (8)$$

여기서

$u[f] : \text{Heaviside function}$

$$A = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{f-\mu}{\sigma} \right)^2 \right] df = P(z_o)$$

$$B = \int_1^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{f-\mu}{\sigma}\right)^2\right] df = 1 - P(z_1)$$

유동장 내 임의의 위치에서 \bar{f} 와 g 는 지배 방정식으로부터 얻어지고 다음 식들을 사용하여 μ 와 σ 을 결정하여 $p(f)$ 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{f} &= B + \int_0^1 \frac{f}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{f-\mu}{\sigma}\right)^2\right] df = 1 + (\mu-1)P(z_1) - \mu P(z_0) \\ &+ \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} \left[\exp\left(-\frac{1}{2} z_0^2\right) - \exp\left(-\frac{1}{2} z_1^2\right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

$$z = \frac{f-\mu}{\sigma}, \quad z_0 = -\frac{\mu}{\sigma}, \quad z_1 = \frac{1-\mu}{\sigma}$$

$$\text{where,} \quad P(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{s^2}{2}\right) ds$$

$$\begin{aligned} g &= B + \int_0^1 \frac{f^2}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{f-\mu}{\sigma}\right)^2\right] df - \bar{f}^2 = 1 + (\sigma^2 + \mu^2 - 1)P(z_1) - (\sigma^2 + \mu^2)P(z_0) \\ &+ \frac{\sigma^2}{\sqrt{2\pi}} \left[z_0 \exp\left(-\frac{1}{2} z_0^2\right) - z_1 \exp\left(-\frac{1}{2} z_1^2\right) \right] \\ &+ \frac{2\sigma\mu}{\sqrt{2\pi}} \left[\exp\left(-\frac{1}{2} z_0^2\right) - \exp\left(-\frac{1}{2} z_1^2\right) \right] - \bar{f}^2 \end{aligned} \quad (10)$$

혼합이 진행됨에 따라 유동은 포화 액체 상태에 해당하는 혼합비에 다다르게 되고 이 때의 혼합비는 다음과 같이 주어진다^[10].

$$f_{fs} = \frac{B}{1+B} = \frac{h_{fs} - h_{\infty}}{h_o - h_{\infty}} \quad (11)$$

혼합물은 $f \ll f_{fs}$ 에서는 단상 액체이고 혼합비가 0에 접근함에 따라 주위 과냉수 상태로 변하게 된다. 이 관계식과 확률분포함수를 사용하여 유동장 내 임의의 점에서 열역학 변수(온도, 밀도 등)의 평균값을 구할 수 있다.

제 2 절 수치 해석

본 연구에서 수치 해석은 SIMPLER^[11] 알고리즘을 기초로한 EL-2D 유한차분 방법(Finite Difference Method : FDM) 코드로 본 해석에 맞게 수정하였다. EL-2D 코드는 타원형 방정식(elliptic equation)으로 나타나는 2차원 평면 도

는 축대칭 유동을 계산하는 프로그램으로, 그 특징은 SIMPLE 알고리즘의 수정형인 SIMPLER 알고리즘을 사용하여 수렴성을 향상하여 시간을 단축하였으며 각각의 변수마다 각기 다른 격자점을 갖는 엇갈린 격자(staggered grid)를 사용하여 유동 해석시 발생하는 물리적 오류를 해결하였다. 본 해석에서는 증기응축제트에 대한 수치해석을 위해 혼합 길이 모델(mixing length model)을 사용한 기존의 EL-2D 코드를 $k-\epsilon$ 모델^[12,13]로 확장하였다.

타원형 편미분 방정식(elliptic partial differential equation)인 Navier-stokes 방정식을 계산하기 위해서는 초기조건(initial condition)과 모든 계산영역의 경계면에 경계조건(boundary condition)을 주어야 한다. 초기조건으로 노즐 출구에서 노즐 반경의 1%에 해당하는 두께를 제외하고는 모든 특성치들은 일정하다고 가정하였다.

$$x=0, \quad 2r/d \leq 0.999; \quad \overline{u}_o = \dot{m}_o / \rho_o, \quad f_o = 1, \\ k_o = (0.02 \overline{u}_o)^2, \quad \epsilon_o = 0.07 \overline{u}_o^3 / d, \quad g_o = 0$$

전단층($x=0, \quad 0.999 < 2r/d \leq 0.999$)에서 속도와 혼합비는 선형으로 변한다고 가정하였다. 주위유체의 속도, 혼합비, 혼합비 요동, 난류 운동 에너지와 소멸률의 초기 조건은 없다고 가정하였다. 본 수치 해석을 수행하기 위해 유동장에 대해 경계조건이 주워져야 한다. Fig. 5에 유동장의 경계영역과 경계조건을 표시하였다. 그림에서 축대칭선인 A-B에서는 대칭조건(symmetric condition)을 적용하였으며, E-F는 노즐의 돌출부위로 윗면에서는 벽법칙을 적용, 벽면에서는 비활 경계조건(no-slip condition)을 적용하였다. 난류 운동 에너지와 난류 소멸률에 대한 벽면 경계 조건은 평형유동을 가정하여 결정하였다. 경계면 C-D에서는 일정한 압력을 주었다. 경계면 D-E와 B-C는 Neumann 조건을 주었다.

유동장 내 전체 격자의 수는 48×40 로 하였다. FDM code에서 격자(grid) 수는 계산 시간과 유동장 해석에 있어서 유연성을 필요로 한다. 격자가 많아지면 계산시간과 많은 메모리를 차지하기 때문에 성긴 격자에서도 유동장의 특성과 잘 모사하고 수치 발산이 되지 않는 격자를 선택해야 한다. 본 수치 해석에서는 불규칙 격자를 사용하여 속도나 난류 특성치 들의 변화가 큰 영역에서는 조밀하게 격자를 구성하여 유동장에 대한 계산을 자세히 할 수 있었고 시간을 단축할 수 있었다. 또한 각 변수마다 각기 다른 격자점을 갖는 엇갈린 격자를 사용하였다.

제 3 절 해석 결과 및 고찰

난류계산 모델 중 $k-\epsilon$ 모델은 난류 현상을 가장 효과적으로 모사한다. 본 연구에서는 EL-2D의 혼합거리 모델을 $k-\epsilon$ 모델로 확장하고 코드의 검증을 위해 단상 원형 제트에 적용하였다. Fig. 6은 원형 제트에 대한 본 연구의 수치 해석 결과와 Wagnanski 와 Fiedler^[14]의 실험 결과를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 계산된 제트의 반경 방향 속도 분포가 실험치와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

수치 해석 결과를 비교하기 위해 Kim 등^[8]에 의해 수행된 증기응축제트에 대한 실험 결과를 사용하였다. 증기응축제트의 유동 조건은 증기제트가 원추형상을 갖는 노즐직경 20 mm, 증기 질량속 $280 \text{ kg/m}^2\text{-s}$ 의 경우와, 타원형상을 갖는 노즐직경 10.15 mm, 증기 질량속 $309 \text{ kg/m}^2\text{-s}$ 경우이다.

Fig. 7은 노즐직경 20 mm, 증기 질량속 $280 \text{ kg/m}^2\text{-s}$, 과냉수 온도 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 일 경우 임의의 축방향 위치($x = 40, 100, 200 \text{ mm}$)에서 반경방향에 따른 온도 분포에 대한 실험과 수치해석 결과를 나타낸다. 초기 영역 안에서는 일정 온도 영역이 존재하고 주 영역이 되면 반경방향으로 온도가 떨어지는 것을 보여준다. 축 방향 길이 $x = 40 \text{ mm}$ 에서 증기응축제트는 침투길이(penetration length)를 포함하게 되므로 반경방향 온도가 일정한 부분을 포함하며, 노즐 중심 축에서의 온도도 응축이 어느 정도 진행되어 노즐 출구 증기 온도보다 떨어진 것을 보여준다. 과냉각 상태로 유지되고 있는 수조 내에서 증기를 완전히 응축시키는 것이 공학적 측면에서 바람직하기 때문에 수조 내로 분출되는 증기 제트의 길이를 광범위한 운전조건에서 계산하는 것은 의미가 있는 일이다. 침투길이(penetration length) 끝부분의 중심축 온도는 주위 물 온도에 영향을 받는 곳으로 주위의 물과 증기가 충분히 혼합되어 응축된 효과가 나타나는 곳으로 판단된다. 따라서 축 방향 온도분포에서 온도 구배가 급격히 감소하는 부분까지의 길이가 침투 길이로 판단된다. 실험 결과는 침투 길이가 매우 짧은 것을 보여준다. 수치 해석의 결과가 정성적으로는 실험결과와 같은 경향을 보이나 실험결과에 비해 응축이 진행되는 속도는 다른 것을 보여주고 있다. 그러나 노즐로부터 멀리 떨어진 위치에서는 침투길이(penetration length)를 지나게 되므로 실험결과와 비슷한 경향을 보이고 완전히 발달된 영역에서는 거의 같은 온도 분포를 보여준다. 즉 노즐 출구로부터 멀어 멀어질수록 단상제트유동과 유사한 경향을 보여준다.

Fig. 8은 노즐 직경 10.15 mm, 증기 질량속 $309 \text{ kg/m}^2\text{-s}$, 과냉수 온도 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 일 경우 임의의 축방향 위치($x = 40, 100, 200 \text{ mm}$)에서 반경방향 온도 분포

이다. 노즐 직경 20 mm에서 나타난 경우와 유사한 결과를 보여준다.

Fig. 9는 노즐 직경 20 mm, 증기 질량속 $280 \text{ kg/m}^2\text{-s}$, 과냉수 온도 40°C 일 경우의 노즐중심 축 방향 온도 분포에 대한 결과이다. 그림에서 나타나듯이 과냉수의 온도가 동일할 경우 노즐에서 멀어질수록 중심축 온도가 낮아지는 것을 보여준다. 수치해석 결과와 실험 결과 모두 같은 경향을 보여주고 있다. 본 해석 결과와 실험 데이터의 차이는 응축 진행 속도를 정확히 예측하지 못하기 때문으로 생각된다. Fig. 10은 노즐 직경 10.15 mm, 증기 질량속 $309 \text{ kg/m}^2\text{-s}$ 인 경우 과냉수 온도에 따른 중심축의 온도 변화를 나타낸다. 실험 결과와 거의 같은 경향을 보이고 주위 과냉수 온도가 낮아질수록 중심축 온도가 낮아지는 것을 알 수 있다. 따라서 과냉수 온도가 높아질수록 응축 추진력이 커지므로 침투깊이는 응축 추진력이 클수록 증가하는 것을 보여준다.

제 4 절 결론 및 제언

증기응축제트는 주위유체의 난류 확산과 응축현상으로 매우 복잡한 열유동 현상이 일어나므로 주로 실험을 통해 연구되는 분야이다. 본 연구에서는 증기-물의 2상 유동 현상을 국부 균질유동으로 가정하여 난류 확산은 $k-\epsilon$ 2방정식 모델로 묘사하고 증기 응축은 응축시의 변동량(fluctuation)을 고려할 수 있는 난류 연소 모델을 채택하여 이론적 해석을 수행하였다. 계산을 통해 증기 코어 영역과 혼합 영역에서의 국부적인 온도 분포를 구하였다. 아직까지 이런 국부적인 온도 분포를 단순화된 가정 없이 구한 이론적 해석은 없었고 본 해석은 이 분야에 대한 이론적 연구의 가능성을 타진하는 기초 연구로 수행되었다. 본 연구를 통한 결과는 다음과 같다.

- 본 해석은 기존의 해석 방법과는 다르게 증기와 냉각수 사이의 질량 및 운동량 전달률에 대한 현상학적 모델을 사용하기 때문에 모든 유동장에서 국부적 평균 열유동 특성치(온도, 평균속도)와 난류량 들을 구할 수 있다. 따라서 실제 증기응축제트의 실험결과인 임의의 축방향 위치에서 반경방향에 따른 온도 분포를 계산하여 비교하여 만족할 만한 결과를 얻었다.
- 본 수치 해석 결과를 실험 데이터와 비교한 결과, 완전히 발달된 영역에서의 온도 분포는 비교적 정확히 예측하였고, 초기 영역에서는 수치 결과는 차이가 있었으나 정성적으로 같은 경향을 나타냈다.
- 수치 해석 결과 초기영역에서 정확한 응축 진행 속도를 예측하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 이 문제를 해결하기 위해서는 증기와 물의 경계면이 난류 확산에 미치는 영향을 고려할 수 있는 난류모델의 개발이 필요하다.

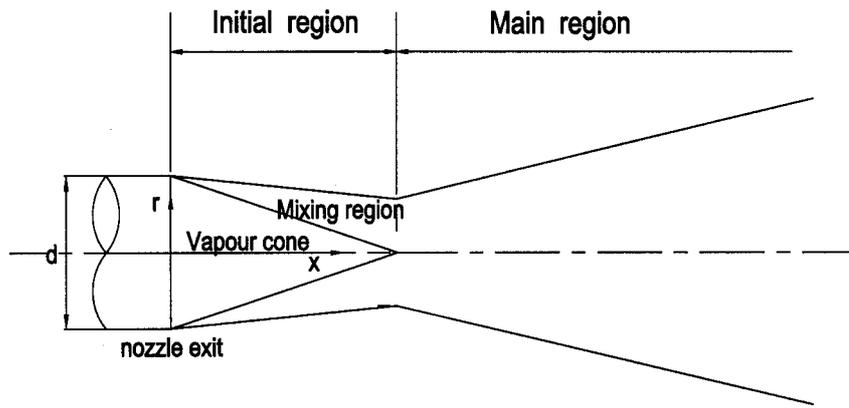


Fig. 3 Jet Model and Coordinate

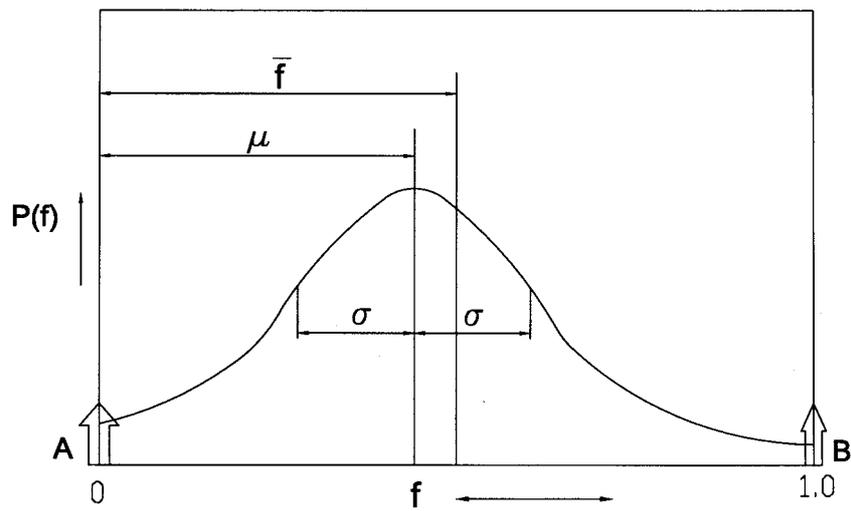


Fig. 4 Sketch of the Assumed PDF for Mixture Fraction

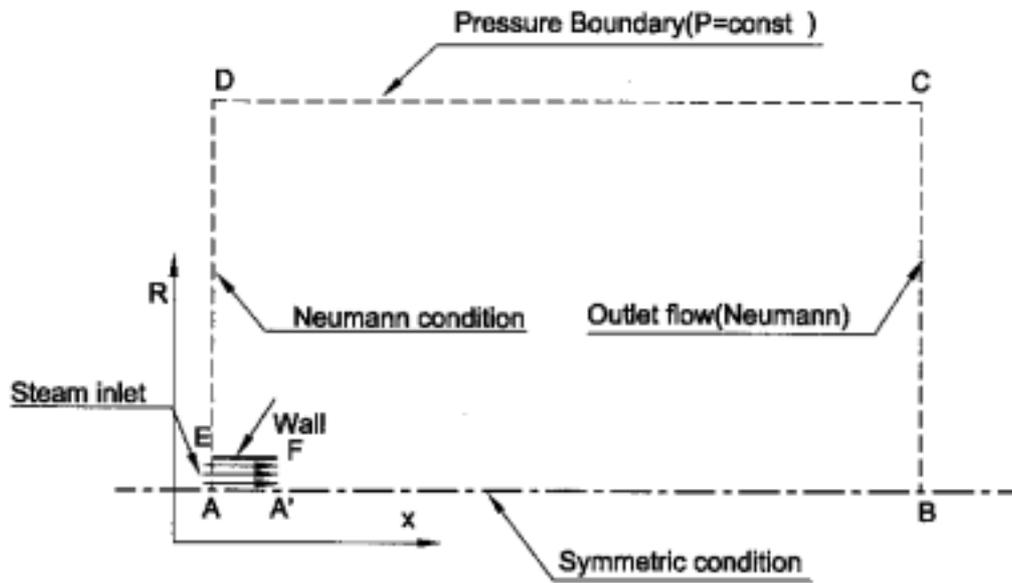


Fig. 5 Boundary Condition

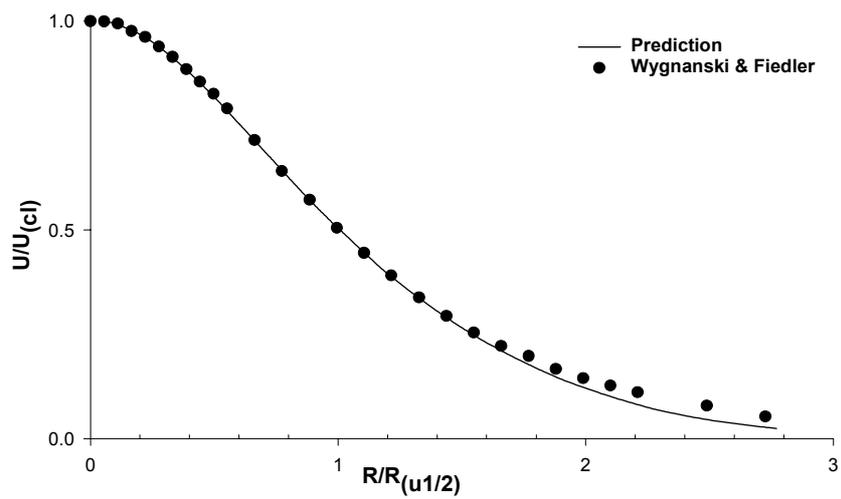


Fig. 6 Radial Velocity Profiles of Circular Jet ($X : 400 \text{ mm}$)

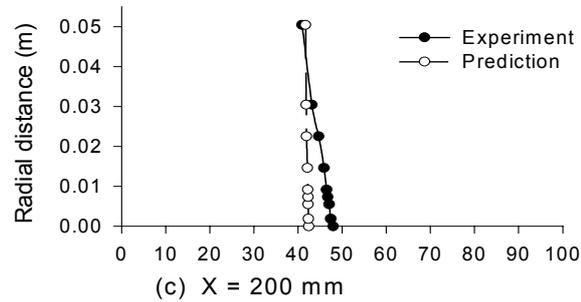
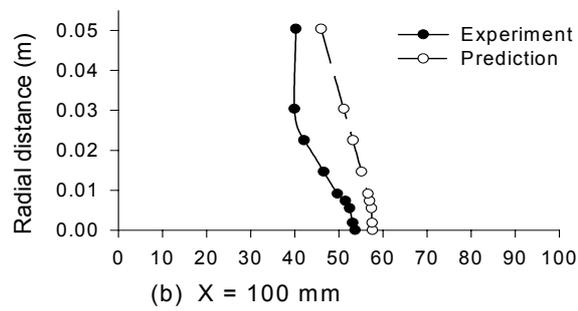
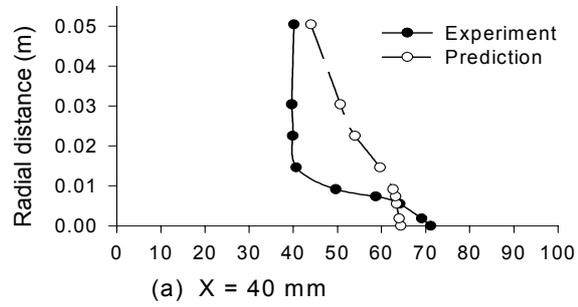


Fig. 5 Radial Temperature Profiles (Nozzle ID : 20 mm, Mass Flux : 280 kg/m²s , Pool Temp : 40^oC)

Fig. 7 Radial Temperature Profiles (Nozzle ID : 20 mm, Steam Mass Flux : 280 kg/m²-s, Pool Temp. : 40 °C)

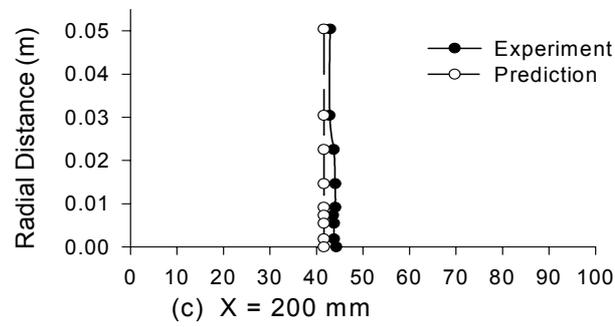
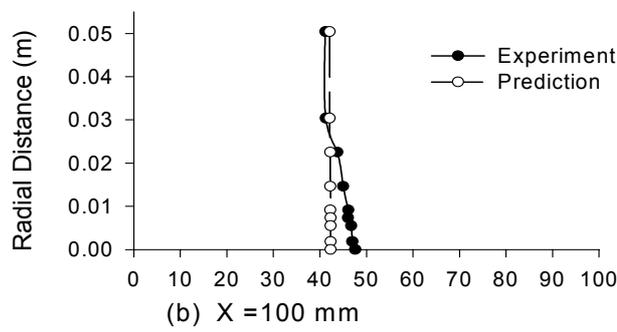
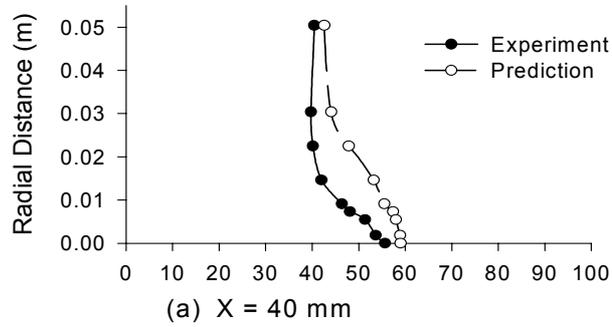


Fig. 6 Radial Temperature Profiles (Nozzle ID : 10.15 mm ,
Mass Flux : 309 kg/m²s , Pool Temp. : 40 °C)

Fig. 8 Radial Temperature Profiles (Nozzle ID : 10.15 mm , Steam
Mass Flux : 309 kg/m²-s , Pool Temp. : 40 °C)

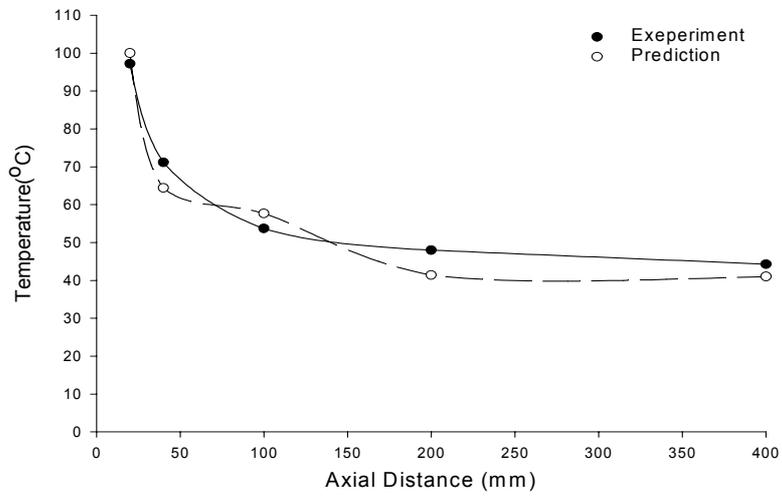


Fig. 9 Centerline Temperature Profiles (Nozzle ID : 20 mm, Steam Mass flux : $280 \text{ kg/m}^2\text{-s}$, Pool Temp. : $40 \text{ }^\circ\text{C}$)

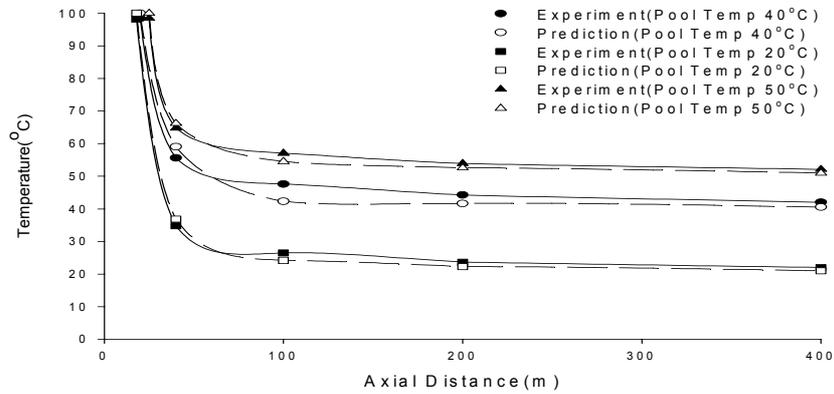


Fig. 10 Centerline Temperature Profiles (Nozzle ID : 10.15 mm, Steam Mass flux : $309 \text{ kg/m}^2\text{-s}$)

제 3 장 증기응축제트 캐비티 형상 해석

제 1 절 이론적 해석

Kim 등^[8]이 수행하였던 실험결과에 의하면 안정된 형상을 보이는 증기제트의 경우, 증기제트 캐비티는 증기제트 질량속이 작은 경우에는 원추형의 형상을 보였고 질량속이 매우 큰 경우에는 내부경계가 노즐출구 직후에 팽창 효과에 의해 타원형의 형상을 보였다(Fig. 11, Fig. 12). 해석에 사용된 해석 좌표계 및 검사체적은 Fig. 13 및 Fig. 14와 같다.

본 증기응축 모델에서 노즐 출구에서 증기제트 끝까지의 영역을 초기영역(initial region)으로, 그 하류를 주영역(main region)으로 구분하였다. 초기영역에서 증기제트 형상이 유지되는 영역을, 원추형 증기제트 캐비티인 경우에 증기원추영역(vapor cone region)으로 타원형 증기제트 캐비티인 경우에 증기타원영역(vapor ellipsoid region)으로 하였다. 또한, 증기와 주위의 냉각수가 응축되는 영역을 혼합영역(mixing region)으로 하였다. 초기영역에서 증기원추영역과 혼합영역의 경계를 내부경계(r_l), 혼합영역과 주위의 과냉각수와의 경계를 외부경계(r_2 및 r_s)라 하였다. 해석의 편의를 위해 외부경계는 축방향으로 일정하다고 가정하였다. 혼합영역에서 유체의 밀도와 비열은 과냉각수의 밀도와 비열과 같다고 가정하였다. 검사체적에서 운동량 방정식을 사용하면 혼합영역에서의 유체 속도는 다음과 같은 식으로 표시된다.

원추형 증기제트

$$u_l = \sqrt{\frac{\rho_e u_e^2 + (P_e - P)}{\rho_l}} \quad (12)$$

타원형 증기제트

$$u_l = \sqrt{\frac{\rho_e \pi r_0^2 u_e^2 + \pi r_0^2 P_e - \pi r_s^2 P_l}{\rho_l \pi r_s^2}} \quad (13)$$

증기제트 주위로부터 유입량 (entrainment rate)은 노즐 출구면과 증기제트 끝면에서 질량보존 방정식으로 구할 수 있으며 다음과 같은 식으로 표시된다.

원추형 증기제트

$$\dot{m}_{ent} = \rho_l \pi r_2^2 u_l - \rho_e \pi r_0^2 u_e \quad (14)$$

타원형 증기제트

$$\dot{m}_{ent} = \rho_l \pi r_s^2 u_l - \rho_e \pi r_0^2 u_e \quad (15)$$

초기영역에서 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$u_l \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{k_{eff}}{\rho_l c_p} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (16)$$

온도에 대한 무차원 변수와 좌표 r, x 에 대한 무차원 변수를 다음과 같은 식으로 정의한다.

$$\theta = \frac{T - T_f}{T_s - T_f}, \quad \eta = \frac{r}{\sqrt{2\varepsilon x}} \quad (17)$$

여기에서 T_f 는 과냉각수 온도이며 ε 은 다음과 같이 표시되는 상수이다.

$$\varepsilon = \frac{k_{eff}}{\rho_l c_p u_l} \quad (18)$$

이와 같은 변수들을 사용하여 식(16)을 정리하면 다음과 같은 이차 상미분 방정식으로 된다.

$$\eta \frac{d^2 \theta}{d\eta^2} + (1 + \eta^2) \frac{d\theta}{d\eta} = 0 \quad (19)$$

경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta &= 1 & \text{at } \eta &= \eta_1(x) = \frac{r_1}{\sqrt{2\varepsilon x}} \\ \theta &= 0 & \text{at } \eta &= \eta_2(x) = \frac{r_2}{\sqrt{2\varepsilon x}} \end{aligned} \quad (20)$$

이러한 경계조건을 사용하여 식을 풀면 혼합영역에서의 온도분포는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta = \frac{\int_{\eta}^{\eta_2} \frac{1}{\eta^*} e^{-\frac{1}{2} \eta^{*2}} d\eta^*}{\int_{\eta_1}^{\eta_2} \frac{1}{\eta^*} e^{-\frac{1}{2} \eta^{*2}} d\eta^*} \quad (21)$$

증기제트 형상을 예측하기 위해 Fig. 15와 같은 혼합영역의 작은 요소에 대해, 내부경계의 기울기가 일정하다고 가정하면 에너지 평형 방정식은 다음과 같이 세울 수 있다.

증기응축에 의해 들어오는 열량 ($\dot{Q}_{c(r_1)}$) + 대류에 의해 들어오는 열량 ($\dot{Q}_{conv(x)}$) + 외부 불유입에 의해 들어오는 열량 ($\dot{Q}_{ent(r_2)}$) = 대류에 의해 나가는 열량 ($\dot{Q}_{conv(x+dx)}$) + 전도에 의해 나가는 열량 ($\dot{Q}_{cond(r_2)}$)

이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

원추형 증기제트

$$\begin{aligned} & -\rho_e u_e \left(\frac{dr_1}{dx} \right) 2\pi \left(\frac{r_1 + [r_1 + dr_1]}{2} \right) dx h_{fg} + \rho_l c_p u_l \int_{r_1}^{r_2} [T(x) - T_f] 2\pi r dr \\ & = \rho_l c_p u_l \int_{r_1 + dr_1}^{r_2} [T(x+dx) - T_f] 2\pi r dr - k_{eff} \left[r \frac{\partial T}{\partial r} \right]_{r_2} 2\pi dx \end{aligned} \quad (22)$$

식 (22)을 식 (21)과 같은 온도분포를 사용하여 표현하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} & -\rho_e u_e \left(\frac{dr_1}{dx} \right) 2\pi \left(\frac{r_1 + [r_1 + dr_1]}{2} \right) dx h_{fg} + \rho_l c_p u_l (T_s - T_f) \int_{r_1}^{r_2} \theta(x) 2\pi r dr \\ & = \rho_l c_p u_l (T_s - T_f) \int_{r_1 + dr_1}^{r_2} \theta(x+dx) 2\pi r dr + k_{eff} (T_s - T_f) \frac{e^{-\frac{1}{2} \eta_2^2} 2\pi dx}{\int_{\eta_1}^{\eta_2} \frac{1}{\eta^*} e^{-\frac{1}{2} \eta^{*2}} d\eta^*} \end{aligned} \quad (23)$$

타원형 증기제트

$$\begin{aligned}
 & -\rho_e u_e \left(\frac{r_0}{r_s} \right)^2 \left(\frac{dr_1}{dx} \right) 2\pi \left(\frac{r_1 + [r_1 + dr_1]}{2} \right) dx h_{fg} + \rho_l c_p u_l \int_{r_1}^{r_2} [T(x) - T_f] 2\pi r dr \\
 & = \rho_l c_p u_l \int_{r_1 + dr_1}^{r_2} [T(x + dx) - T_l] 2\pi r dr - k_{eff} \left[r \frac{\partial T}{\partial r} \right]_{r_2} 2\pi dx \quad (24)
 \end{aligned}$$

여기에서 증기팽창이 일어나는 부분에서의 열전달은 무시하였다. 식 (24)를 식 (21)과 같은 온도분포를 사용하여 표현하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 & -\rho_e u_e \left(\frac{r_0}{r_s} \right)^2 \left(\frac{dr_1}{dx} \right) 2\pi \left(\frac{r_1 + [r_1 + dr_1]}{2} \right) dx h_{fg} + \rho_l c_p u_l (T_s - T_f) \int_{r_1}^{r_2} \theta(x) 2\pi r dr \\
 & = \rho_l c_p u_l (T_s - T_f) \int_{r_1 + dr_1}^{r_2} \theta(x + dx) 2\pi r dr + k_{eff} (T_s - T_f) \frac{e^{-\frac{1}{2} \eta^2} 2\pi dx}{\int_{\eta_1}^{\eta_2} \frac{1}{\eta^*} e^{-\frac{1}{2} \eta^{*2}} d\eta^*} \quad (25)
 \end{aligned}$$

증기제트 반경의 변화 $\left(\frac{dr_1}{dx} \right)$ 을 미소 구간 $[r_1 - r_1 + dr_1]$ 에서 일정하다고 가정하면 식(23)과 (25)의 에너지 평형방정식을 이용하여 다음과 같은 방법으로 그 값을 결정할 수 있다.

- (1) $x = 0.00$ 에서 $r_1 = r_0$ 로 초기값을 설정한다.
- (2) $x = x + dx$ 에서 $\left(\frac{dr_1}{dx} \right)$ 를 가정한다.
- (3) $x + dx$ 에서의 제트의 반경을 $r_1 + dr_1 = r_1 + \left(\frac{dr_1}{dx} \right) dx$ 에서 계산한다.
- (4) 식(19)를 이용하여 $[x + dx, r_1 + dr_1]$ 에서의 온도분포를 계산한다.
- (5) 계산된 온도분포를 식(23) 및 (25)에 대입하여 등식이 성립하는지 확인한다.
- (6) 등식이 성립할 때까지 $\left(\frac{dr_1}{dx} \right)$ 값을 재설정 하여 (2) - (5) 항을 반복한다.
- (7) 식(5)를 만족하는 $\left(\frac{dr_1}{dx} \right)$ 을 찾았으면 x 를 다시 dx 만큼 증가시키고, (2) - (6) 항을 반복한다.

제 2 절 결과 및 고찰

이론적으로 전개한 수식에서 증기제트 질량속과 수조온도에 따른 증기제트 캐비티 형상을 구하고 이를 Kim 등^[8]의 실험결과와 비교하였다. Table 1은 수행된 해석 case 및 결과를 나타낸다. 해석 case 1 - 3은 직경 20 mm인 노즐에 대한 것이고, 해석 case 4 - 8은 직경 10.15 mm인 노즐에 대한 것이다. 노즐 출구에서의 증기속도와 밀도는 실험으로 직접 측정할 수 없기 때문에 노즐 출구에서 25 cm 떨어진 배관내부에서 실험으로 측정된 온도 및 압력 데이터를 가지고 마찰이 있는 배관 유동인 Fanno 유동 관계식을 사용하여 구하였다. 노즐 출구에서의 증기속도 및 밀도는 혼합영역에서의 유체속도 u_i 을 구하는데 사용된다. 기준유효열전도계수(k_{eff_ref})는 Kim 등^[8]이 수행하였던 실험에서 구한 평균열전달계수에 노즐 반경의 1/2을 곱해 산정하였으며, 이는 유효열전도계수는 혼합영역의 위치에 따라 실제적으로 달라지지만 대략 증기제트 캐비티의 중앙에서의 값이 혼합영역의 평균적인 값으로 간주한 것을 의미한다.

제 1절에서 전개된 식들에 포함되어 있는 유효열전도계수(k_{eff})의 변화에 따라 증기제트 캐비티 형상이 어떻게 변화하는지 알아보는 계산을 수행하였다. 계산의 편의를 위해 유효열전도계수(k_{eff})를 기 산정된 기준유효열전도계수로 나눈 값을 증배계수(multiplication factor)로 정의하였고, 각각의 해석 case에 대해 증배계수 변화에 따른 증기제트 캐비티 형상을 구하였다.

Fig. 16은 case 1에 대해 증배계수 변화에 따른 증기제트 캐비티 형상을 나타낸 것으로 증배계수가 커짐에 따라 캐비티 형상이 작게 변화하는 것을 보여준다. 이 중에서 계산으로 구한 증기제트 캐비티 형상과 실험에서 측정된 증기제트 캐비티 형상을 가장 잘 예측해 주는 증배계수는, 각각의 형상간의 RMS 에러를 최소화하는 값으로 결정하였다.

Fig. 17은 case 1에 대해 증배계수 변화에 따른 RMS 에러를 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 이중 RMS 에러를 최소화하는 증배계수는 1.7이다. 이러한 증배계수를 각각의 해석 case에 대해 구하였으며, 그 결과는 Table 1에 나타나 있다.

본 계산을 수행할 때 dx 를 5 mm씩 증가시켰다. dx 를 변화시켰을 때 증기제트 캐비티 형상이 어떻게 변하는지 알아보기 위한 계산을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 18과 같이 dx 의 변화는 증기제트 캐비티 형상 계산에 아무런 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

동일한 노즐에서 증기제트 캐비티 형상이 증기 질량속 및 과냉각수 온도에

따라 어떠한 경향을 보이는지를 알아보기 위해 대표증배계수(Representative multiplication factor)를 도입하였다. 대표증배계수는 각각의 해석 case에서 구한 증배계수를 동일한 노즐에 대해 단순 산술평균하여 구하였다. 대표증배계수는 Table 1에 나타난 바와 같이 직경 20 mm 노즐의 경우 1.9로 직경 10.15 mm 노즐의 경우 3.5로 계산되었다. 기준유효열전도계수에 대표증배계수를 곱해 구한 대표유효열전도계수(k_{eff_rep})는 Table 1에 나타내었고, 이 값은 혼합영역의 물의 열전도계수(k_{mol})의 수 만배정도인 것으로 나타났다.

Fig. 19는 20 mm 노즐의 경우 증기 질량속과 수조 온도 변화에 따른 증기제트 캐비티 형상을 나타낸 것으로, 실험에서 관찰된 바와 같이 증기 질량속과 수조 온도가 증가할수록 증기제트 크기가 증가하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 20은 10.15 mm 노즐의 경우 증기 질량속이 일정할 때 과냉각수 온도변화에 따른 증기제트 캐비티 형상을 나타낸 것으로 실험에서 관찰된 바와 같이 수조 온도가 증가할수록 증기제트 크기가 증가하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 21은 10.15 mm 노즐의 경우 과냉각수 온도가 일정할 때 증기 질량속 변화에 따른 증기제트 캐비티 형상을 나타낸 것으로 역시 실험에서 관찰된 바와 같이 증기 질량속이 증가할수록 증기제트 크기가 증가하는 경향을 보인다.

제 3 절 결론 및 제언

단일 수평 배관을 통해 고온 고압의 증기제트가 과냉각수가 있는 용축탱크로 방출되어 용축되는 경우에 대해 증기제트 캐비티 형상을 예측하는 간단한 증기용축 해석 모델을 제시하고 기존의 실험결과와 비교하였다. 증기/물 경계에서의 매우 큰 열전달율은 기존의 실험을 근거로 한 유효열전도계수에 의해 반영되었다. 실험에서 관찰된 증기제트 형상을 잘 예측해주는 혼합영역에서의 대표 유효열전도계수는 물의 열전도계수의 수 만배 정도인 것으로 계산되었다. 해석 모델은, 실험에서 관찰된 바와 같이 동일한 노즐에서 증기 질량속과 수조 온도가 증가할수록 증기제트 캐비티 크기(반경 및 길이)가 증가하는 경향을 보였다. 본 해석 모델로 예측되는 증기용축제트 캐비티 형상은 축 방향에 따라 길게 늘어지는 경향을 보이고 있는 바, 계산구간 Δx 에 따라 유효열전도계수를 다르게 하여 계산을 수행하면 이를 보완할 수 있다고 판단되며 이를 위해 유효열전도계수를 예측할 수 있는 좀더 정확한 방법의 개발이 필요하다.

Table 1 Analysis Cases and Results

	case 1	case 2	case 3	case 4	case 5	case 6	case 7	case 8
$r_e(mm)$	10	10	10	5.075	5.075	5.075	5.075	5.075
$G(kg/m^2-s)$	280	280	250	825	825	825	600	460
$\rho_e(kg/m^3)$	0.679	0.679	0.620	1.652	1.652	1.652	1.206	0.940
$T_s(^{\circ}C)$	100	100	100	100	100	100	100	100
$T_1(^{\circ}C)$	40	50	40	35	55	75	55	55
$u_e(m/s)$	412.6	412.6	403.3	499.4	499.4	499.4	497.4	489.4
$h(MW/m^2-C)$	1.290	1.243	1.252	2.009	1.550	1.804	1.606	1.871
$k_{eff_ref} (KW/m^2-^{\circ}C)$	6.500	6.215	6.262	5.097	3.934	4.578	4.076	4.747
증배 계수	1.7	1.9	2.1	3.5	4.1	3.8	3.2	2.8
대표증배계수	1.9	1.9	1.9	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
$k_{eff_rep} (KW/m^2-^{\circ}C)$	12.25	11.81	11.90	17.84	13.77	17.40	14.27	16.61
$k_{mol} (W/m^2-^{\circ}C)$	0.659	0.663	0.659	0.657	0.665	0.671	0.665	0.665

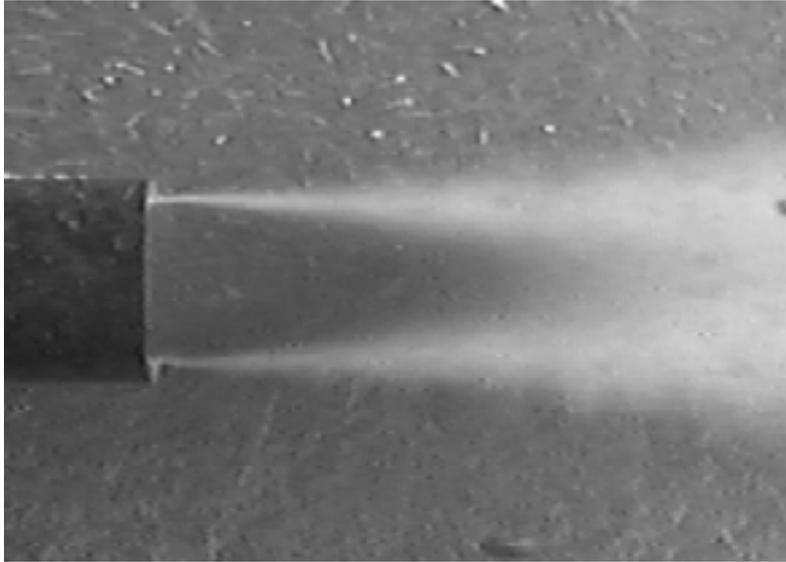


Fig. 11 Conical Steam Jet (Nozzle ID : 20 μm , Steam Mass Flux : 280 $\text{kg}/\text{m}^2\text{-s}$, Pool Temp. : 40 $^\circ\text{C}$)

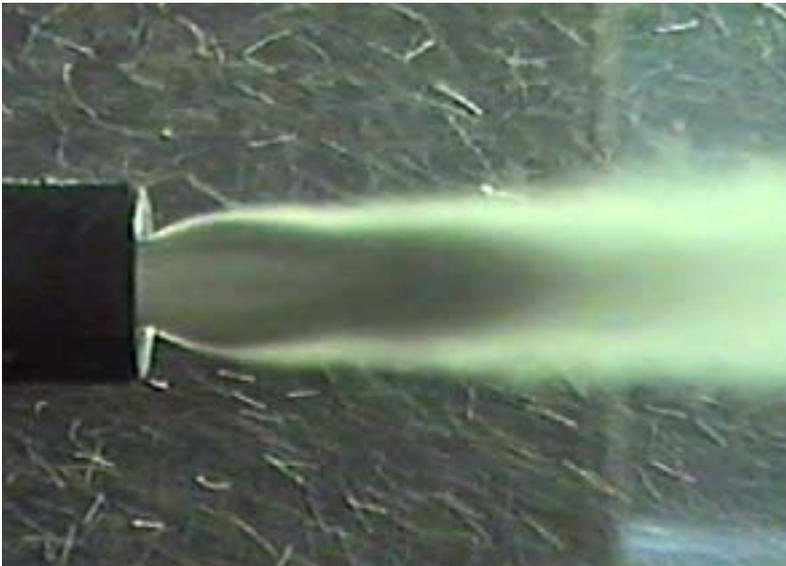


Fig. 12 Ellipsoidal Steam Jet (Nozzle ID : 10.15 μm , Steam Mass Flux : 825 $\text{kg}/\text{m}^2\text{-s}$, Pool Temp. : 55 $^\circ\text{C}$)

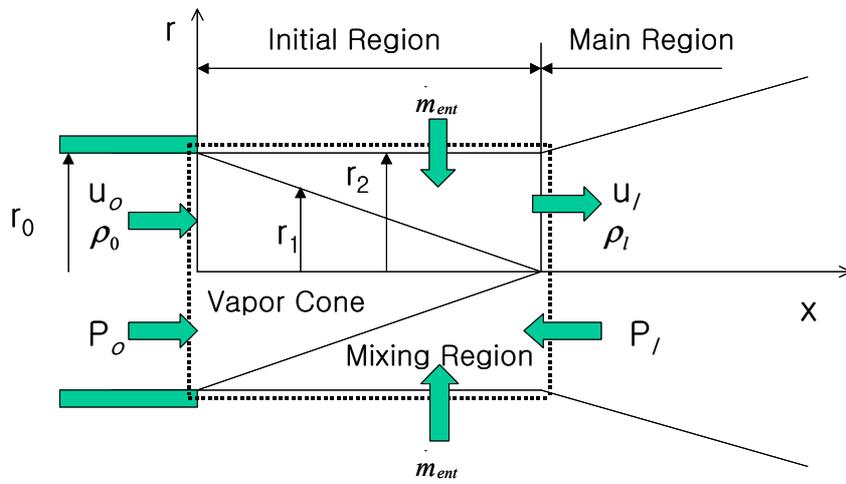


Fig. 13 Control Volume for a Conical Steam Jet

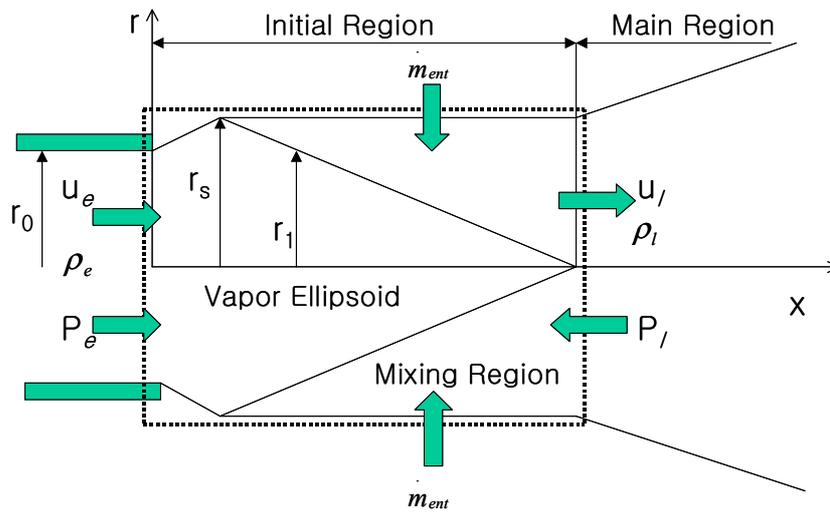


Fig. 14 Control Volume for an Ellipsoidal Steam Jet

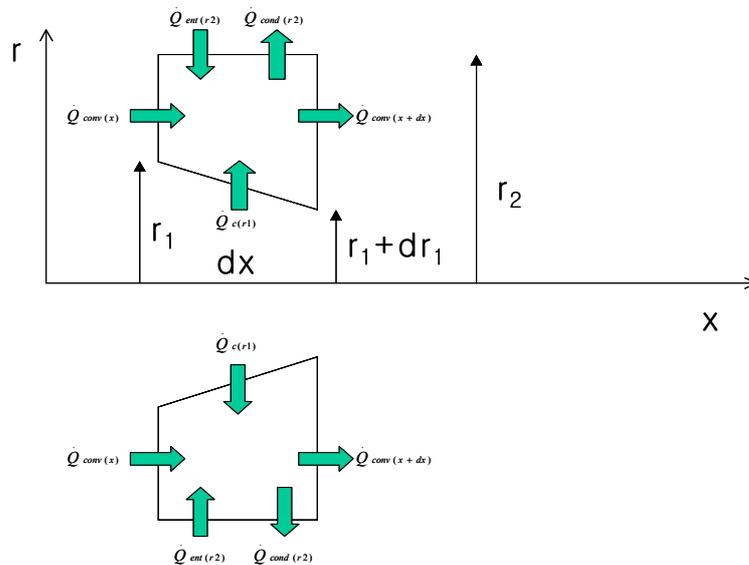


Fig. 15 Energy Balance Diagram

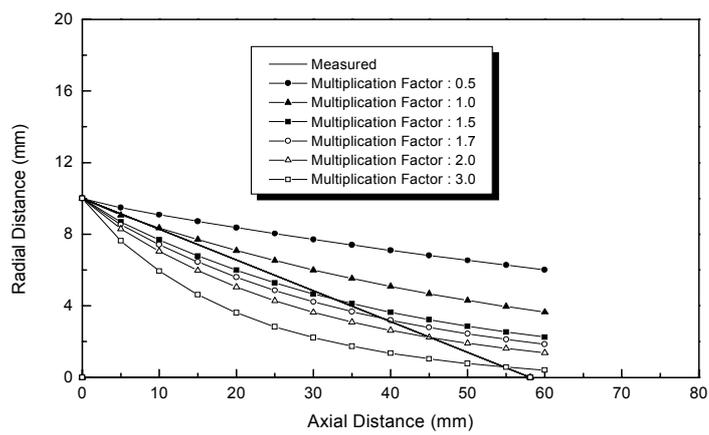


Fig. 16 Steam Jet Cavity with the Change of Multiplication Factor (Nozzle ID : 20 mm, case 1)

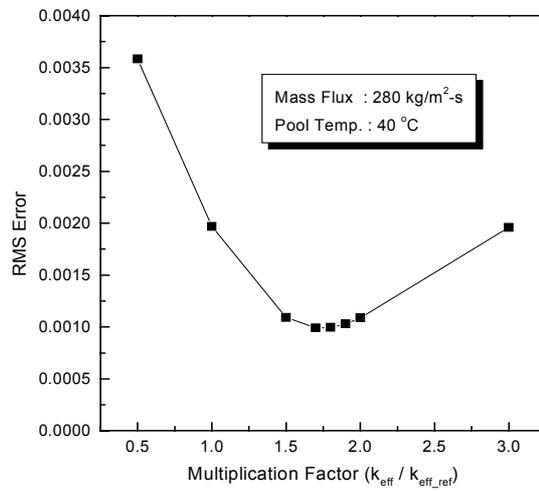


Fig. 17 RMS Error versus Multiplication Factor (Nozzle ID : 20 mm, Steam Mass Flux : 280 kg/m²-s, Pool Temp. : 40 °C)

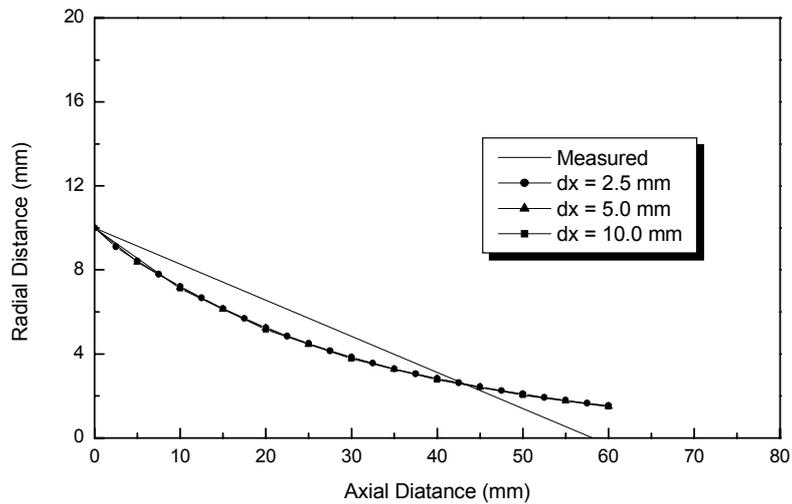


Fig. 18 Effect of Δx on the Steam Jet Shape (Nozzle ID : 20 mm, Steam Mass Flux : 280 kg/m²-s, Pool Temp. : 40 °C)

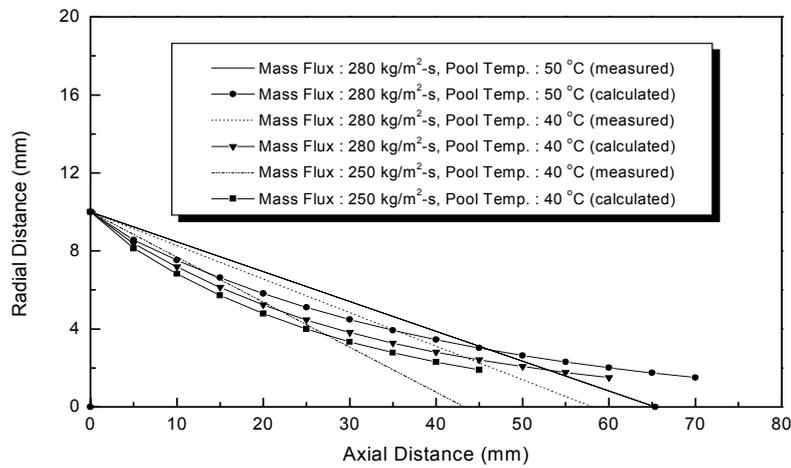


Fig. 19 Steam Jet Cavity with the Change of Steam Mass Flux and Pool Temp. (Nozzle ID : 20 mm)

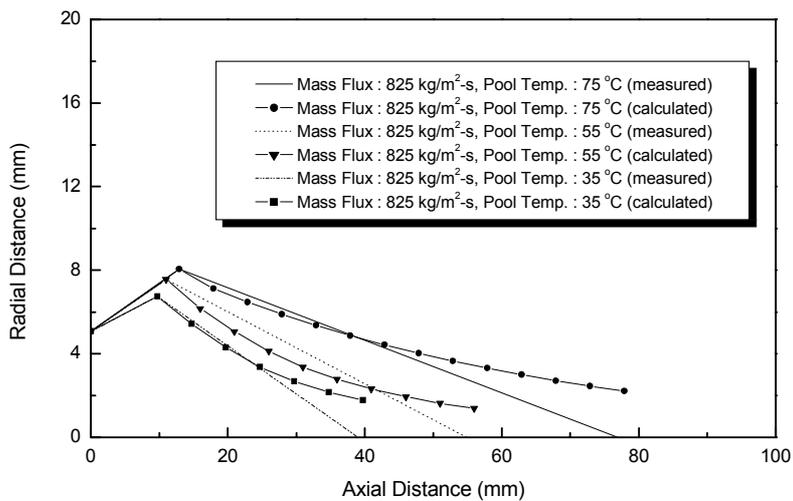


Fig. 20 Steam Jet Cavity with the Change of Pool Temp. (Nozzle ID : 10, 15 mm)

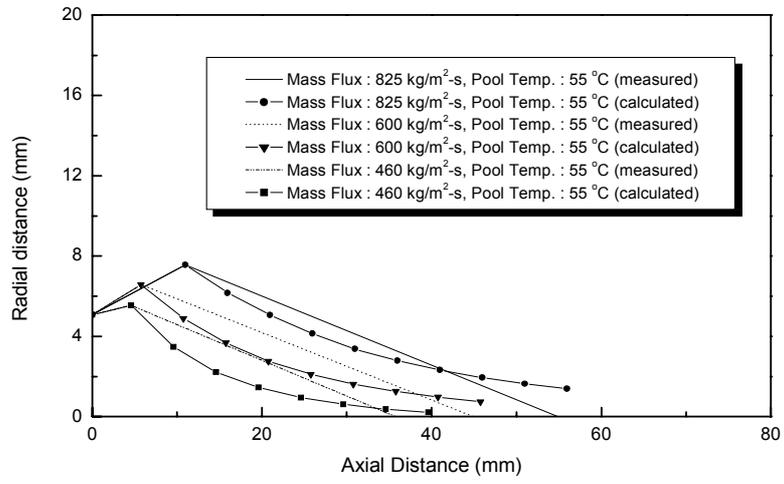


Fig. 21 Steam Jet Cavity with the Change of Steam Mass Flux (Nozzle ID : 10.15 mm)

제 4 장 결 론

증기와 과냉각수가 직접 접촉하여 증기가 응축되는 열전달 현상은 매우 큰 열전달계수를 수반하므로 이를 응용한 설계가 공학적으로 광범위하게 이루어지고 있다. 특히 현재 개발 중인 차세대원자로 안전감압계통의 설계에 이러한 현상을 직접 응용하고 있다. 사고 발생시 원자로의 과압이 발생하면 가압기 상부에 부착되어 있는 안전방출밸브가 열려 고온 고압의 증기가 배관 끝에 부착되어 있는 증기분사기를 통해 핵연료재장전수 탱크에 저장되어 있는 과냉각수로 방출되어 과냉각수와 직접접촉에 의해 응축되는데, 증기분사기의 올바른 설계를 위해서는 증기제트의 직접접촉 응축 특성을 이해하는 것은 매우 중요하다.

본 보고서에서는 가장 간단한 형태의 증기분사기로 간주될 수 있는 단일 수평 배관을 통해 고온 고압의 증기제트가 과냉각 수조로 방출되어 응축되는 경우에 대해 응축특성에 대한 두 가지 이론적 해석 모델을 제시하였고, 구경이 다른 노즐에서 증기유량을 변화시켜가며 형성되는 증기제트의 형상 및 길이, 유동장 온도, 열전달계수 등을 측정한 기존의 실험결과와 비교분석 하였다.

첫 번째 모델에서는 증기-물의 2상 유동 현상을 국부 균질유동으로 가정하여 난류 확산은 $k-\epsilon$ 2 방정식 모델로 모사하고 증기 응축은 응축시의 변동량(fluctuation)을 고려할 수 있는 난류 연소 모델을 채택하여 이론적 해석을 수행하였다. 계산을 통해 증기 코어 영역과 혼합 영역에서의 국부적인 온도 분포를 구하였으며, 기존의 실험 데이터와 비교한 결과 완전히 발달된 영역에서의 온도 분포는 비교적 정확히 예측하였고, 초기 영역에서는 수치 결과는 차이가 있었으나 정성적으로 같은 경향을 나타내었다.

두 번째 모델에서는 증기제트 캐비티 형상을 예측하는 간단한 증기응축 해석 모델을 제시한 것으로서, 안정된 형상의 증기제트에 대해 축대칭 좌표계에서 질량, 운동량 및 에너지 방정식과 증기/물 경계면에서의 응축 특성을 고려한 열평형 방정식을 사용하였다. 본 모델을 통해 예측되는 증기제트 캐비티의 형상을 기존의 실험과 비교한 결과, 실험에서 관찰된 바와 같이 동일한 노즐에서 증기 질량속과 수조 온도가 증가할수록 증기제트 캐비티 크기(반경 및 길이)가 증가하는 경향을 보였다.

본 보고서는, 증기분사기 개발과 관련하여 가장 간단한 형태의 증기분사기로 간주될 수 있는 단일 수평 배관에서 일어나는 증기제트 응축특성에 대한 해석모델을 제시한 것으로 추후 이를 바탕으로 좀더 복잡한 형태의 증기분사기 모델을 개발하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Linehan, J. H, and Grolmes, M. A.: "Condensation of a High Velocity Vapor on a Subcooled Liquid Jet in Straight Flow", *Proc. 4th Int. Heat Transfer Conf., Paris*, Vol. 6, Cs 2.6 (1970).
2. Murata, A., Hihara, E., and Saito, T.: "Prediction of Heat Transfer by Direct Contact Condensation at a Steam- Subcooled Water Interface", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 35, No. 1, pp. 101-109 (1992).
3. Mikielwicz, J., Trela, M., and Ihnatowicz, E., "A Theoretical and Experimental Investigation of Direct-Contact Condensation on a Liquid Layer", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 15, pp. 221-227 (1997).
4. Celata, G. P, Cumo, M., Farello, G. E., and Focardi, G.: "A Comprehensive Analysis of Direct Contact Condensation of Saturated Steam on Subcooled Liquid Jets", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 32, No. 4, pp. 639-654 (1989).
5. 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).
6. 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).
7. Kim, K. U., Lee, K. B., and Kim, H. Y.: "An Analytical Study on the Condensation of Submerged Vapor Jets in Subcooled Liquids", *Energy Engg. J(1999)*, Vol. 8, No. 2, pp. 333-340 (1999).
8. Kim, H. Y. *et al.*: "A Study on the Behavior of Bubble in Quenching Tank and Optimal Sparger Design", *KAERI/TR-962/98* (1998).
9. Shearer, A. J., Tamura, H. and Faeth, G. M., : "Evaluation of a Locally Homogeneous Flow Model of Spray Evaporation", *J. Energy*, 3(5), 271 (1979).
10. Chen, L. D. and Faeth, G. M., : "Condensation of Submerged Vapor Jets in Subcooled Liquids", *ASME, J. Heat Transfer*, 104, 774 (1982).
11. Patanka, S. V., : "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow" Hemisphere Publishing Corp., New York (1980).
12. Wilcox, D. C.,: "Turbulence Modeling for CFD" DWC Industries, Inc., California (1993)

13. Launder, B. E., and Spalding, D. B., : "Mathematical Models of Turbulence," Academic Press, New York (1972).
14. Wagnanski, I., and Feidler, H. E.,: "Some Measurements in the Self-Preserving Jet", *J. Fluid Mech.*, **38(3)**, 577 (1969).

사용기호

A, B	: $f = 0$ 과 1에서 Dirac Delta 함수의 면적
B	: 응축 추진력
C_i	: 난류 모델 상수
c_p	: 물 비열, $J/kg\text{-}^\circ C$
d	: 노즐 직경
f	: 순간 혼합률비
\overline{f}	: 시간 평균 혼합률비
g	: 혼합률비 요동의 계급
k	: 난류 운동에너지
k_{eff}	: 유효열전도계수, $W/m\text{-}^\circ C$
$P(z)$: z 의 확률
r	: 대칭축으로부터 반경방향 거리
T	: 온도
u	: 축방향 속도
v	: 반경방향 속도
v^o	: 반경방향 요동특성을 포함한 반경방향 속도
x	: 축방향 거리
z	: 규정화 된 f
ϵ	: 난류 운동에너지의 소멸률
μ	: 층류 점성계수, f 의 최대 확률값
μ_t	: 난류 점성계수
ρ	: 밀도
σ	: 난류 Prandtl/Schmidt 수, 정규 분포의 편차
θ	: 무차원 온도
∞	: 과냉수 조건
o, e	: 노즐 출구 조건
fs	: 포화 액체

- cl : 중심선
- $u_{(1/2)}$: 제트의 half-width에서 속도
- (-) : 시간 평균양
- (') : 요동양
- f : 액상 하첨자
- l : 혼합 영역 하첨자
- s : 증기 하첨자

부 록 : Experimental Data for the 20 mm and 10.15 mm Nozzles

Internal Dia. ID. (mm)	Mass Flux (kg/m ² -s)	Steam T(°C) at measure	Steam T(°C) at exit	Steam P(MPaA) at measure	Steam P at exit(MPaA)		Steam Den. Rho _g (kg/m ³)	Steam Vel. (m/s)		Water Vel. u _l (m/s)	Entrainment (kg/s)
					Fanno	Crane		Fanno	Crane		
20.00	250	123.90	100.80	0.182	0.104	0.104	0.620	403.33	403.33	5.51	1.616
20.00	250	123.90	100.80	0.182	0.104	0.104	0.620	403.33	403.33	5.51	1.615
20.00	280	128.90	100.80	0.207	0.115	0.104	0.679	412.61	449.07	7.45	2.204
20.00	280	128.90	100.80	0.207	0.115	0.104	0.679	412.61	449.07	7.46	2.202
20.00	280	128.90	100.80	0.207	0.115	0.104	0.679	412.61	449.07	7.46	2.200
20.00	280	128.90	100.80	0.207	0.115	0.104	0.679	412.61	449.07	7.47	2.199
10.15	309	126.76	101.22	0.229	0.104	0.104	0.635	486.23	486.23	10.04	0.770
10.15	309	126.76	101.22	0.229	0.104	0.104	0.635	486.25	486.25	10.05	0.770
10.15	309	126.76	101.22	0.229	0.104	0.104	0.635	486.25	486.25	10.05	0.769
10.15	309	126.76	101.22	0.229	0.104	0.104	0.635	486.25	486.25	10.06	0.769
10.15	350	132.00	105.00	0.262	0.119	0.116	0.719	486.91	496.24	11.73	0.901
10.15	350	132.00	105.00	0.262	0.119	0.116	0.719	486.91	496.24	11.74	0.901
10.15	350	132.00	105.00	0.262	0.119	0.116	0.719	486.91	496.24	11.75	0.900
10.15	350	132.00	105.00	0.262	0.119	0.116	0.719	486.91	496.24	11.76	0.899
10.15	350	132.00	105.00	0.262	0.119	0.116	0.719	486.91	496.24	11.77	0.899
10.15	350	132.00	105.00	0.262	0.119	0.116	0.719	486.91	496.24	9.97	0.905
10.15	350	132.00	105.00	0.262	0.119	0.116	0.719	486.91	496.24	8.72	0.891
10.15	460	140.13	113.43	0.348	0.158	0.155	0.940	489.35	498.66	15.21	1.225
10.15	460	140.13	113.43	0.348	0.158	0.155	0.940	489.35	498.66	14.68	1.240
10.15	460	140.13	113.43	0.348	0.158	0.155	0.940	489.35	498.66	14.26	1.251
10.15	460	140.13	113.43	0.348	0.158	0.155	0.940	489.35	498.66	14.01	1.258
10.15	460	140.13	113.43	0.348	0.158	0.155	0.940	489.35	498.66	13.85	1.261
10.15	460	140.13	113.43	0.348	0.158	0.155	0.940	489.35	498.66	13.43	1.271
10.15	460	140.13	113.43	0.348	0.158	0.155	0.940	489.35	498.66	12.17	1.297

Internal Dia. ID (mm)	Mass Flux (kg/m ² -s)	Steam T(°C) at measure	Steam T(°C) at exit	Steam P(MPaA) at measure	Steam P at exit(MPaA)		Steam Den. Rho _g (kg/m ³)	Steam Vel.(m/s)		Water Vel. u _l (m/s)	Entrainment (kg/s)
					Fanno	Crane		Fanno	Crane		
10.15	460	140.13	113.43	0.348	0.158	0.155	0.940	489.35	498.66	10.51	1.313
10.15	460	140.13	113.43	0.348	0.158	0.155	0.940	489.35	498.66	8.67	1.290
10.15	460	140.13	113.43	0.348	0.158	0.155	0.940	489.35	498.66	7.80	1.258
10.15	600	149.95	121.64	0.453	0.206	0.201	1.206	497.35	506.90	15.24	1.786
10.15	600	149.95	121.64	0.453	0.206	0.201	1.206	497.35	506.90	15.43	1.777
10.15	600	149.95	121.64	0.453	0.206	0.201	1.206	497.35	506.90	15.05	1.793
10.15	600	149.95	121.64	0.453	0.206	0.201	1.206	497.35	506.90	15.37	1.778
10.15	600	149.95	121.64	0.453	0.206	0.201	1.206	497.35	506.90	14.19	1.827
10.15	600	149.95	121.64	0.453	0.206	0.201	1.206	497.35	506.90	14.02	1.833
10.15	600	149.95	121.64	0.453	0.206	0.201	1.206	497.35	506.90	12.94	1.871
10.15	600	149.95	121.64	0.453	0.206	0.201	1.206	497.35	506.90	12.83	1.873
10.15	600	149.95	121.64	0.453	0.206	0.201	1.206	497.35	506.90	12.27	1.888
10.15	825	163.35	132.66	0.634	0.288	0.282	1.652	499.40	508.91	19.06	2.605
10.15	825	163.35	132.66	0.634	0.288	0.282	1.652	499.40	508.91	18.90	2.617
10.15	825	163.35	132.66	0.634	0.288	0.282	1.652	499.40	508.91	17.50	2.724
10.15	825	163.35	132.66	0.634	0.288	0.282	1.652	499.40	508.91	17.33	2.736
10.15	825	163.35	132.66	0.634	0.288	0.282	1.652	499.40	508.91	16.47	2.800
10.15	825	163.35	132.66	0.634	0.288	0.282	1.652	499.40	508.91	16.28	2.813
10.15	825	163.35	132.66	0.634	0.288	0.282	1.652	499.40	508.91	16.20	2.818
10.15	825	163.35	132.66	0.634	0.288	0.282	1.652	499.40	508.91	15.71	2.852
10.15	825	163.35	132.66	0.634	0.288	0.282	1.652	499.40	508.91	15.05	2.898
10.15	825	163.35	132.66	0.634	0.288	0.282	1.652	499.40	508.91	14.32	2.946

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 20 mm, Mass Flux = 250 kg/m²s, Pool Temp. = 30 °C)

<u>반경방향</u> <u>길이(mm)</u>	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	<u>X=400</u>
0	113.59	113.28	110	90.372	54.216	47.559	44.162	41.79	37.095	33.846
1.825	109.22	108.6	100.09	88.495	52.74	46.658	43.603	41.078	36.743	33.425
5.475	109.12	105.6	97.434	75.313	49.444	45.193	42.991	40.414	36.782	33.309
7.3	101.9	92.228	88.661	59.324	45.392	43.539	42.281	39.669	36.712	33.139
9.125	74.498	59.5	45.653	39.984	37.974	40.004	40.648	38.146	36.755	33.212
14.6	30.185	30.002	30.068	29.936	30.941	34.665	37.296	36.018	36.712	33.421
22.5	29.856	30.002	29.939	29.464	29.77	29.844	32.424	32.472	35.954	33.283
30.4	29.425	29.855	29.711	29.192	29.56	29.4	29.716	30.5	34.714	32.795
50.4	29.817	31.841	29.418	29.851	29.974	29.876	29.935	30.059	32.695	32.314

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 20 mm, Mass Flux = 250 kg/m²s, Pool Temp. = 40 °C)

<u>반경방향</u> <u>길이(mm)</u>	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	<u>X=400</u>
0	111.83	111.2	109.69	96.25	65.282	58.343	53.849	51.022	46.823	43.391
1.825	106.8	105.78	102.75	95.423	64.22	57.833	53.039	50.341	46.273	42.984
5.475	106.88	104.57	98.024	88.798	61.312	56.912	52.099	49.747	46.102	42.976
7.3	100.21	93.018	94.881	76.877	57.736	55.484	50.949	48.929	45.867	42.879
9.125	88.385	76.521	63.054	55.793	51.278	52.192	49.04	47.658	45.695	42.97
14.6	39.988	40.019	39.895	40.84	42.986	46.859	46.066	45.234	45.303	43.159
22.5	39.776	39.894	39.51	39.615	40.081	40.988	42.273	41.805	44.05	42.87
30.4	39.45	39.614	39.292	39.435	39.905	39.669	40.218	39.237	42.617	42.483
50.4	39.868	40.281	39.966	40.015	40.796	40.073	39.441	39.236	40.137	42.323

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 20 mm, Mass Flux = 250 kg/m²s, Pool Temp. = 50 °C)

<u>반경방향</u> <u>길이(mm)</u>	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	<u>X=400</u>
0	111.75	110.07	106.7	98.209	75.934	65.241	61.317	60.178	55.9	53.292
1.825	108.66	108.07	105.66	97.381	75.361	64.631	60.694	59.639	55.536	52.859
5.475	108.56	106.93	100.3	94.466	73.736	64.003	60.345	59.379	55.556	52.821
7.3	98.258	96.944	96.416	89.279	71.179	62.952	59.651	58.789	55.316	52.599
9.125	92.184	90.162	84.107	77.537	66.836	60.77	58.489	57.948	55.338	52.586
14.6	50.035	52.399	55.937	60.038	58.578	57.046	56.223	56.27	55.324	52.647
22.5	49.753	51.132	50.735	50.923	51.076	52.195	52.127	53.672	54.64	52.283
30.4	49.31	50.961	50.183	49.71	50.237	50.109	49.713	50.951	53.882	51.768
50.4	50.074	51.738	50.648	50.145	50.725	50.295	49.659	50.458	52.787	51.013

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 20 mm, Mass Flux = 280 kg/m²s, Pool Temp. = 30 °C)

<u>반경방향</u> <u>길이(mm)</u>	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	<u>X=400</u>
0	114.17	114.24	112.82	96.525	57.2	49.036	45.336	42.458	36.73	33.977
1.825	108.44	108.26	102.69	96.421	56.366	48.363	44.757	41.894	36.322	33.532
5.475	108.58	107.2	99.144	83.317	53.095	46.832	43.778	41.398	36.22	33.421
7.3	105.05	93.411	92.062	63.333	48.421	44.774	42.589	40.593	35.982	33.311
9.125	82.803	59.489	45.392	40.524	39.625	40.876	40.414	39.339	35.833	33.311
14.6	30.343	30.615	30.614	30.426	32.666	34.85	36.606	36.679	35.587	33.489
22.5	30.095	30.428	30.522	30.097	30.307	29.386	31.751	32.945	34.537	33.287
30.4	29.846	30.227	30.265	29.845	30.047	28.524	29.924	30.234	33.215	32.87
50.4	30.312	31.33	30.989	30.419	30.486	28.887	30.242	29.99	31.03	32.29

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 20 mm, Mass Flux = 280 kg/m²s, Pool Temp. = 40 °C)

<u>반경방향</u> <u>길이(mm)</u>	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	<u>X=400</u>
0	116.14	116.06	115.76	97.209	71.149	60.034	56.052	53.69	47.968	44.425
1.825	111.78	111.68	109.21	98.799	69.087	59.015	55.231	53.14	47.408	43.951
5.475	111.98	111.56	99.335	97.259	64.169	56.959	53.892	52.467	47.057	43.767
7.3	109.04	95.272	96.601	83.66	58.723	54.436	52.237	51.514	46.702	43.591
9.125	89.505	77.917	62.718	54.277	49.643	49.705	49.295	49.647	46.46	43.62
14.6	40.015	40.63	40.174	40.248	40.67	42.996	44.62	46.582	45.873	43.634
22.5	39.903	40.486	40.057	40.076	39.901	39.851	40.388	42.124	44.675	43.37
30.4	39.607	40.155	39.782	39.79	39.61	39.549	39.905	39.939	43.153	42.916
50.4	40.216	40.624	40.349	40.483	40.139	40.283	40.234	40.271	40.916	42.128

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 20 mm, Mass Flux = 280 kg/m²s, Pool Temp. = 50 °C)

<u>반경방향</u> <u>길이(mm)</u>	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	<u>X=400</u>
0	115.98	116.73	115.46	99.502	90.308	70.134	64.918	62.84	57.017	53.948
1.825	111.65	112.8	110.49	98.719	88.22	69.231	63.951	62.087	56.505	53.488
5.475	111.91	112.77	100.8	99.349	81.976	67.648	62.824	61.432	56.431	53.435
7.3	107.79	97.436	95.327	95.063	74.617	65.382	61.226	60.465	56.03	53.153
9.125	94.146	89.493	82.182	70.396	63.668	60.945	58.675	58.875	55.68	53.027
14.6	49.675	50.03	50.637	51.181	53.388	54.331	54.922	56.253	55.252	53.041
22.5	49.567	49.896	50.351	50.126	50.253	50.428	50.08	52.009	54.033	52.596
30.4	49.179	49.597	50.028	49.874	49.887	49.942	49.62	49.882	52.484	51.955
50.4	49.856	50.292	50.647	50.911	50.477	50.512	50.382	50.269	50.658	50.209

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 10.15 mm, Mass Flux = 309 kg/m²s, Pool Temp. = 30 °C)

<u>반경방향</u> 길이(mm)	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	<u>X=400</u>
0	94.96665	97.59068	88.99736	56.45418	45.58157	41.64052	38.96546	37.44196	33.90097	32.24062
1.825	97.50104	91.26257	65.23084	51.04708	43.25389	40.44461	38.28859	36.65637	33.49447	31.72206
3.65	89.77699	58.24112	45.84145	43.47848	40.56167	39.43824	37.84656	36.24629	33.4208	31.77237
5.475	43.32399	35.45665	34.8854	36.58962	37.57834	37.66536	37.07027	35.49408	33.25176	31.60095
7.3	30.08866	30.44557	31.16846	33.23674	35.6245	36.78011	36.90171	35.39943	33.59079	31.9221
10.95	29.97732	30.28368	30.65967	30.28321	31.41927	33.77127	35.34078	34.13701	33.37717	31.89134
14.6	29.9921	30.27987	30.71928	30.12204	30.18856	31.92567	33.84757	33.00118	33.18762	31.96597
22.5	29.66261	29.9623	30.38978	29.77633	29.81185	29.94203	31.0235	30.5972	32.33122	31.52608
30.4	30.26104	30.64036	31.00585	30.54308	30.47919	30.42745	30.73167	30.56097	32.36436	32.099

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 10.15 mm, Mass Flux = 309 kg/m²s, Pool Temp. = 40 °C)

<u>반경방향</u> 길이(mm)	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	<u>X=400</u>
0	95.94273	97.10383	98.4055	66.90311	55.6395	51.31769	48.99502	47.59192	44.23236	42.01555
1.825	97.56922	98.73962	84.6538	61.53845	53.67588	50.17137	48.25711	46.98061	43.78151	41.47768
3.65	94.76757	78.10354	62.4604	54.23164	51.35345	49.16286	47.67966	46.70739	43.77627	41.45574
5.475	61.39183	48.26807	46.6961	46.85091	48.13003	47.41716	46.59033	46.03314	43.57099	41.26024
7.3	42.10376	40.69662	41.325	43.36714	46.38624	46.58412	46.39602	46.10037	44.03114	41.64147
10.95	39.9692	40.18855	40.2793	40.33374	42.00291	44.02208	44.67463	44.98076	44.02542	41.5883
14.6	39.87669	40.06433	40.2021	40.20237	40.18044	41.5883	42.83261	43.73693	43.72072	41.43714
22.5	39.65044	39.71934	39.9115	39.80112	39.73746	39.84236	39.9723	41.2507	42.85025	40.96174
30.4	40.36974	40.40145	40.6143	40.49372	40.46845	40.58527	40.53068	41.15819	42.92726	41.69368

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 10.15 mm, Mass Flux = 309 kg/m²s, Pool Temp. = 50 °C)

<u>반경방향</u> <u>길이(mm)</u>	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	<u>X=400</u>
0	96.20476	97.00441	98.8914	80.11722	64.7425	60.72378	58.62402	57.04474	53.919	52.1101
1.825	98.15335	99.8249	96.5774	73.03166	63.0457	59.65733	57.93714	56.35929	53.44	51.6521
3.65	96.29011	92.31567	80.3475	65.25349	61.0904	58.63642	57.61051	56.10203	53.3428	51.5589
5.475	75.73462	65.72151	61.6216	58.09926	58.3009	57.0178	56.65612	55.37295	53.1225	51.4686
7.3	54.2686	53.83777	53.868	54.21519	56.4558	56.32662	56.42533	55.3627	53.4193	51.86
10.95	50.15087	50.43029	50.1379	50.50706	52.6514	53.86447	54.93545	54.26859	53.2572	51.9554
14.6	49.93987	50.33659	50.0435	50.2777	50.5678	51.57113	53.02381	52.9015	52.819	51.8543
22.5	49.57128	50.03929	49.714	49.88169	49.7362	49.73793	50.1368	50.5011	51.8748	51.4576
30.4	50.36569	50.88829	50.4934	50.61697	50.5666	50.5371	50.69923	50.65059	52.0327	52.1261

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 10.15 mm, Mass Flux = 350 kg/m²s, Pool Temp. = 30 °C)

<u>반경방향</u> <u>길이(mm)</u>	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	<u>X=400</u>
0	97.1508	98.3157	97.9292	60.532	48.0983	42.78969	39.891	37.6896	34.2614	32.37462
1.825	100.081	98.2997	74.1596	52.5486	45.3572	41.4958	39.1771	36.8819	33.7445	31.85129
3.65	92.6957	64.4361	48.1057	42.9244	41.687	40.15755	38.51	36.4937	33.7212	31.85391
5.475	46.9582	35.3779	34.774	34.909	37.7235	38.30385	37.4686	35.7649	33.4703	31.63123
7.3	30.2538	30.3592	30.8353	31.3611	35.2234	37.30463	37.0659	35.5679	33.7569	31.96835
10.95	30.1077	30.2517	30.4884	30.0683	30.7924	34.27839	35.0742	34.3077	33.6391	32.0096
14.6	30.0509	30.1299	30.344	30.0371	30.1575	31.69608	33.0898	32.8612	33.3099	31.95142
22.5	29.7896	29.9305	30.1582	29.8037	29.8876	29.89292	30.6875	30.6708	32.3228	31.6503
30.4	30.2824	30.4164	30.7121	30.2774	30.3277	30.33757	30.4653	30.585	32.2291	31.91542

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 10.15 mm, Mass Flux = 350 kg/m²s, Pool Temp. = 40 °C)

<u>반경방향</u> 길이(mm)	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	<u>X=400</u>
0	97.56016	98.70529	100.1203	71.90155	57.254	52.5045	49.98207	48.0272	44.25311	42.55557
1.825	100.2984	101.5269	90.74354	62.65807	54.5017	51.1548	49.00598	47.307	43.79081	42.07611
3.65	95.35598	79.66876	65.29068	54.11195	51.294	49.695	48.24995	46.6771	43.66326	42.03224
5.475	61.43426	47.57833	46.65827	46.4096	47.7931	47.9431	47.12319	45.9456	43.46728	41.91589
7.3	41.25571	40.59433	41.13888	42.59586	45.3193	46.734	46.45848	45.7618	43.67208	42.18101
10.95	40.20905	40.4601	40.43579	40.44795	41.012	43.642	44.33369	44.5601	43.581	42.30833
14.6	40.11535	40.39764	40.44866	40.43245	40.3013	41.0847	42.36531	43.1983	43.33448	42.29307
22.5	39.91222	40.16876	40.2441	40.174	40.0192	40.0116	39.96491	41.1949	42.40679	41.94068
30.4	40.29488	40.54641	40.89498	40.55571	40.4155	40.4534	40.28201	40.555	42.17672	42.27113

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 10.15 mm, Mass Flux = 350 kg/m²s, Pool Temp. = 50 °C)

<u>반경방향</u> 길이(mm)	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	<u>X=400</u>
0	97.59497	98.65355	98.81806	90.2898	66.38407	61.47456	58.88032	57.28483	53.97844	52.14142
1.825	101.7024	101.7935	99.60794	78.6468	64.04662	60.03666	57.83009	56.45179	53.42913	51.68199
3.65	96.63796	94.16484	82.32665	67.8503	61.46049	58.84075	57.33823	56.32972	53.43127	51.62382
5.475	76.3204	64.44692	61.32388	59.3767	58.05563	56.99682	56.22196	55.55391	53.25341	51.50818
7.3	54.61764	53.18522	53.7579	54.6638	55.93371	56.04005	55.80282	55.31668	53.43628	51.76091
10.95	50.29273	50.38714	50.37021	50.8284	51.88012	53.24483	53.98225	54.00133	53.36952	51.90777
14.6	50.17948	50.30727	50.30512	50.7233	50.46939	51.17941	52.04987	52.67477	52.88172	51.80644
22.5	50.04596	50.09794	50.0493	50.5697	50.25219	49.33691	49.80111	50.01497	51.82385	51.45049
30.4	50.52399	50.50325	50.55475	51.0489	50.76074	49.92199	50.17209	50.03905	51.51868	51.97715

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 10.15 mm, Mass Flux = 350 kg/m²s, Pool Temp. = 60 °C)

<u>반경방향</u> <u>길이(mm)</u>	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	<u>X=400</u>
0	97.7549	98.7145	97.8274	98.78683	75.2294	70.71757	68.70532	67.1112	63.90285	62.38079
1.825	101.475	100.608	101.085	94.1968	73.5225	69.75746	67.83032	66.3588	63.40861	61.908
3.65	97.2874	99.7648	95.7398	84.57184	71.6304	69.00334	67.41929	66.0648	63.41767	62.02054
5.475	87.3322	82.6797	78.5348	74.507	69.0295	67.77191	66.50781	65.4466	63.23289	61.87605
7.3	67.8153	66.4739	67.1091	68.28117	67.1088	67.09694	66.118	65.4046	63.47751	62.15548
10.95	60.6055	60.2781	60.6076	61.20658	63.1253	64.61358	64.6851	64.4209	63.44008	62.25132
14.6	60.4076	60.1162	60.4345	60.40907	60.8301	62.36004	62.9909	63.306	62.96229	62.11662
22.5	60.4357	59.9246	60.2259	60.13107	60.3234	60.25385	60.67514	61.3014	62.11447	61.68079
30.4	60.5568	60.4777	60.7409	60.61458	60.8727	60.81914	60.80555	60.9424	62.0768	61.98143

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 10.15 mm, Mass Flux = 350 kg/m²s, Pool Temp. = 70 °C)

<u>반경방향</u> <u>길이(mm)</u>	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	<u>X=400</u>
0	97.99408	99.81822	98.76298	98.88553	88.7186	80.46197	77.34799	75.08612	72.3652	71.46167
1.825	102.4174	100.5299	100.3015	99.15542	87.671	79.45847	76.83587	74.74589	72.0641	71.15793
3.65	99.91955	98.82521	99.6263	96.2603	85.793	78.77635	76.65395	74.74303	72.117	71.04778
5.475	93.50752	94.18535	92.79298	89.80751	82.9858	77.62265	76.20692	74.59593	72.1068	71.04444
7.3	80.21402	81.0728	81.88295	83.51182	80.7147	76.94172	76.03955	74.58591	72.3209	71.28548
10.95	70.50657	71.09117	71.0175	73.55904	75.8006	74.65481	74.98335	74.10216	72.3881	71.36321
14.6	70.30677	70.82152	70.84822	70.69897	72.5831	72.62897	73.73642	73.31252	72.2393	71.32101
22.5	70.10483	70.42908	70.68037	70.28985	70.5168	70.47462	71.17176	71.56157	71.5847	70.96481
30.4	70.58501	70.80221	70.9908	70.89996	70.9416	70.84345	70.73593	70.59741	71.6512	71.31123

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 10.15 mm, Mass Flux = 460 kg/m²s, Pool Temp. = 30 °C)

<u>반경방향</u> 길이(mm)	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	<u>X=400</u>
0	102.1332	99.01881	103.60813	68.4261	50.3673	43.993	40.6699	38.13124	34.4164	32.11712
1.825	108.314	102.549	89.74695	55.3178	47.0471	42.74	39.7734	37.19807	33.9748	31.69131
3.65	96.67968	80.00683	54.22544	44.2199	42.6282	40.917	38.7735	36.53479	33.7395	31.5895
5.475	50.30083	38.27595	35.98618	35.0663	37.8365	38.545	37.3518	35.5463	33.359	31.37469
7.3	31.76546	30.78961	31.06332	31.6717	35.3291	37.336	36.9114	35.48074	33.7734	31.89063
10.95	30.94577	30.40575	30.23338	30.5056	30.9903	33.569	34.3182	33.86474	33.3955	31.78882
14.6	30.73716	30.25031	30.06983	30.3857	29.9775	30.917	32.015	31.98385	32.8881	31.64911
22.5	30.3111	29.94251	29.69265	30.0204	29.6108	29.461	29.7117	29.58083	31.7804	31.22162
30.4	30.51471	30.23719	30.03883	30.4305	29.9191	29.856	29.8852	29.73795	30.9171	31.35609

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 10.15 mm, Mass Flux = 460 kg/m²s, Pool Temp. = 40 °C)

<u>반경방향</u> 길이(mm)	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	<u>X=400</u>
0	103.2166	99.8921	103.5027	91.4773	60.1053	54.2058	50.7962	48.7391	44.51131	42.365
1.825	108.1342	102.746	102.066	72.3853	56.8397	52.6173	49.7121	47.8482	43.9198	41.908
3.65	98.34742	93.7588	72.4132	58.4809	52.8039	50.8582	48.7923	47.208	43.73955	41.913
5.475	69.30422	52.7634	48.2161	48.0487	47.9326	48.3403	47.3036	46.21	43.28703	41.661
7.3	45.39704	42.0076	42.22726	44.0163	45.3553	47.1777	46.833	46.1683	43.6418	42.166
10.95	40.20357	40.1494	40.169	40.6172	40.8596	43.3142	44.4264	44.5976	43.25342	42.18
14.6	39.99567	39.9801	40.01259	40.0876	39.9606	40.7462	42.3202	42.9098	42.64569	41.956
22.5	39.63661	39.663	39.66879	39.6685	39.5734	39.8094	40.147	40.3089	41.58091	41.431
30.4	39.99161	40.0738	40.05265	40.1329	40.0342	40.2472	40.528	40.1825	41.43095	41.73

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 10.15 mm, Mass Flux = 460 kg/m²s, Pool Temp. = 50 °C)

<u>반경방향</u> 길이(mm)	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	<u>X=400</u>
0	103.171	99.916	103.587	99.9748	69.3328	63.247	60.7616	58.945	54.65149	52.47879
1.825	109.775	102.61	106.205	91.6244	66.4119	61.66	59.8738	58.133	54.12316	51.99289
3.65	100.708	99.882	88.8545	75.2017	62.8485	60.038	59.1878	57.82	54.1687	51.98574
5.475	81.5141	70.384	62.5274	62.148	58.5496	57.701	57.8746	56.883	53.81059	51.77903
7.3	57.4469	54.954	54.0091	56.1087	56.1788	56.669	57.5034	56.854	54.24284	52.18815
10.95	50.4324	50.423	50.4107	50.6796	51.4883	53.298	55.1028	55.234	53.84969	52.17766
14.6	50.2192	50.299	50.2603	50.4951	50.2674	50.933	52.6852	53.404	53.24339	51.85413
22.5	49.7817	49.995	49.9527	50.1718	49.8678	49.676	50.0586	50.344	52.16932	51.33605
30.4	50.2634	50.508	50.4388	50.6355	50.3633	50.191	50.3613	50.387	51.9278	51.58329

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 10.15 mm, Mass Flux = 460 kg/m²s, Pool Temp. = 60 °C)

<u>반경방향</u> 길이(mm)	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	<u>X=400</u>
0	101.884	100.8405	103.466	100.27	79.7007	72.3273	69.42248	67.8117	64.3754	62.3478
1.825	109.588	102.9124	105.8974	100.347	77.2712	71.1252	68.63737	67.2032	63.88449	61.8185
3.65	104.763	101.2585	99.95865	90.0189	74.1016	69.9007	68.10688	67.0199	64.02802	62.0012
5.475	89.4222	85.40654	79.52404	76.1439	70.1899	68.124	66.93124	66.2255	63.73333	61.7144
7.3	69.375	67.66605	67.08574	68.7799	67.9249	67.3725	66.65158	66.3278	64.09645	62.1581
10.95	60.8143	61.24615	60.44721	61.0423	63.0414	64.5608	64.70417	65.1369	63.87543	62.1001
14.6	60.6124	61.08069	60.26673	60.4801	60.5945	62.1383	62.72435	63.7147	63.3738	61.8789
22.5	60.3697	60.92858	59.99445	60.2071	59.9398	60.2424	59.95559	61.0015	62.28733	61.4705
30.4	60.7833	61.44475	60.41574	60.5847	60.395	60.682	60.07981	60.5816	62.02626	61.7451

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 10.15 mm, Mass Flux = 460 kg/m²s, Pool Temp. = 70 °C)

<u>반경방향</u> 길이(mm)	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	<u>X=400</u>
0	102.5834	102.58	104.1178	100.2831	95.0253	82.2138	78.526	77.10337	74.0215	72.4856
1.825	110.0943	103.6148	105.1285	102.3752	92.53335	81.407	77.8393	76.49755	73.553	72.0882
3.65	107.4972	101.0506	102.2047	99.23195	88.34696	80.5957	77.4469	76.33137	73.5652	72.1077
5.475	94.86389	94.9676	93.3206	89.85114	83.45866	79.0863	76.6949	75.80852	73.3432	71.9478
7.3	83.36377	80.03067	81.39824	81.97164	80.3597	78.2203	76.58	75.8748	73.714	72.323
10.95	70.85371	70.56021	70.46008	72.15595	74.30744	75.3579	74.9037	74.79214	73.4527	72.2246
14.6	70.69087	70.45125	70.27912	70.29747	71.11692	72.9467	73.0593	73.56524	73.1089	72.0849
22.5	70.18542	70.24288	70.09363	70.01399	70.14704	70.2834	70.1653	71.33674	72.1359	71.6843
30.4	70.73426	70.65463	70.54662	70.45626	70.59932	70.4615	70.2881	70.63794	71.9158	71.9921

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 10.15 mm, Mass Flux = 600 kg/m²s, Pool Temp. = 20 °C)

<u>반경방향</u> 길이(mm)	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	<u>X=400</u>
0	111.14096	93.702	99.04909	62.65997	43.49208	35.4194	31.42094	29.24275	24.60336	22.22824
1.825	116.95337	101.448	95.335	46.99373	39.72173	33.3521	30.36928	28.35345	24.24359	21.78645
3.65	100.82626	88.5033	56.15997	34.81435	34.41763	30.8988	29.05678	27.57334	24.07908	21.6608
5.475	54.53563	33.5659	30.21764	26.3288	29.07252	27.9438	27.38213	26.38435	23.85187	21.43764
7.3	24.76501	21.6658	22.93467	23.35786	25.8472	26.2093	26.73888	26.00455	24.14178	21.71778
10.95	19.73438	20.2116	20.4389	20.75219	21.34323	22.3698	24.23501	24.22738	23.95391	21.72899
14.6	19.63329	20.1306	20.39766	20.36404	20.32256	20.3385	21.92974	22.37772	23.59104	21.73018
22.5	19.74654	19.9315	20.10011	19.95134	19.81044	19.6435	19.83761	19.82164	22.41754	21.24285
30.4	20.21313	20.477	20.44558	20.25246	19.97614	20.0068	20.12228	19.93441	21.87681	21.39616

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 10.15 mm, Mass Flux = 600 kg/m²s, Pool Temp. = 30 °C)

<u>반경방향</u> <u>길이(mm)</u>	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	<u>X=400</u>
0	111.06538	93.4081	101.9103	87.46027	53.50446	45.54796	41.90754	39.03913	33.90074	31.57758
1.825	118.17097	101.8376	102.1404	62.93916	49.15833	43.77174	41.01753	38.21587	33.44655	31.08859
3.65	101.80997	96.79794	73.6711	46.94986	43.34616	41.32867	40.00282	37.47129	33.28848	30.95769
5.475	64.04066	49.94153	41.62001	36.72599	37.31179	38.47694	38.45047	36.49139	32.92084	30.7033
7.3	36.23533	33.57815	33.5257	32.88388	33.98323	36.67808	37.69111	36.16118	33.12659	30.97963
10.95	30.09367	30.25865	30.05743	30.42435	30.16924	32.62496	35.22062	34.46054	32.8126	30.96055
14.6	29.74796	30.15923	30.01832	30.33757	29.95657	30.18379	32.88888	32.53436	32.26423	30.83968
22.5	29.73223	29.92486	29.73484	30.0064	29.73461	29.57678	29.90698	29.60252	31.06618	30.30633
30.4	30.05004	30.18379	30.10272	30.35473	30.10892	29.94418	29.93202	29.37197	30.39908	30.51447

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 10.15 mm, Mass Flux = 600 kg/m²s, Pool Temp. = 40 °C)

<u>반경방향</u> <u>길이(mm)</u>	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	<u>X=400</u>
0	111.38939	94.21396	103.28	102.723	63.50803	56.23173	52.07586	50.15707	45.34482	43.1053
1.825	118.92938	103.0211	104.091	84.6271	60.02211	54.60309	50.74978	49.14665	44.82865	42.6344
3.65	107.52034	100.8691	88.7818	62.3717	55.18293	52.18148	49.22271	48.22779	44.54684	42.4997
5.475	74.88871	66.27678	54.4726	49.1235	49.82113	49.27301	47.50204	47.05787	44.13318	42.3157
7.3	46.09799	45.84836	45.1238	44.291	46.75197	47.26457	46.50068	46.54121	44.26264	42.6132
10.95	39.87336	40.41218	40.2698	40.2731	42.48905	43.00045	43.71333	44.56758	43.99394	42.5651
14.6	39.76607	40.38906	40.1818	40.0974	41.11123	40.76552	41.50152	42.82999	43.46227	42.4556
22.5	39.49475	40.14325	39.8738	39.7894	40.02904	39.81256	40.06886	40.16709	42.16241	42.0165
30.4	39.86192	40.48109	40.1408	40.1203	40.37499	40.16971	40.41433	40.49253	41.73064	42.1249

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 10.15 mm, Mass Flux = 600 kg/m²s, Pool Temp. = 50 °C)

<u>반경방향</u> 길이(mm)	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	<u>X=400</u>
0	109.699	94.854	105.247	103.644	73.226	64.925	61.472	59.234	55.07827	52.6936
1.825	117.242	103.4011	105.02958	100.5594	69.5803	63.01188	60.3385	58.35104	54.6329	52.24633
3.65	109.6425	102.4756	98.33908	80.73544	65.062	60.8263	59.12781	57.57952	54.51655	52.11353
5.475	83.47511	80.66534	69.37504	63.57312	60.0922	58.23898	57.58595	56.51069	54.2655	51.95904
7.3	57.47342	57.02185	56.55742	56.52451	57.1703	56.63561	56.91719	56.24413	54.56209	52.22106
10.95	50.11272	50.23694	50.38166	50.61721	52.381	52.91461	54.29578	54.35824	54.31461	52.19674
14.6	50.02784	50.13799	50.28439	50.28295	50.5554	50.70495	52.10614	52.51956	53.89953	52.03152
22.5	49.81684	49.89528	50.05646	49.99399	49.8116	49.87335	49.92151	50.12846	52.66762	51.39804
30.4	50.18258	50.20952	50.42982	50.37403	50.2874	50.34565	50.29583	50.36068	52.24204	51.45979

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 10.15 mm, Mass Flux = 600 kg/m²s, Pool Temp. = 60 °C)

<u>반경방향</u> 길이(mm)	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	<u>X=400</u>
0	109.193	95.4339	106.739	102.5784	89.80203	74.74089	71.38466	69.4747	65.03367	62.49141
1.825	116.982	104.254	105.875	105.129	84.1229	73.35615	70.4987	68.95041	64.66555	62.13235
3.65	113.1	103.385	102.894	95.84617	77.58212	71.62809	69.67449	68.4886	64.64099	62.18194
5.475	90.1553	91.6354	84.8221	79.4239	71.66338	69.17024	68.33004	67.66701	64.34488	61.94639
7.3	69.5104	69.822	69.9391	70.00517	68.50958	67.7948	67.69037	67.50536	64.6162	62.29472
10.95	60.4999	60.4162	60.8744	61.23399	63.04574	64.09478	65.24896	66.05816	64.40544	62.41393
14.6	60.3027	60.2953	60.7435	60.50133	60.77647	61.58876	63.00878	64.37302	63.97676	62.3362
22.5	60.0252	60.0378	60.4865	60.32204	60.21953	60.25529	60.45532	61.45167	62.81924	61.98358
30.4	60.4619	60.6186	60.8944	60.77527	60.63628	60.69827	60.66918	60.87422	62.23177	62.2785

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 10.15 mm, Mass Flux = 600 kg/m²s, Pool Temp. = 70 °C)

<u>반경방향</u> <u>길이(mm)</u>	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	<u>X=400</u>
0	110.857	95.88718	107.2235	101.07874	99.82919	87.07714	80.39451	78.18555	74.40733	72.369
1.825	119.2057	104.15458	106.3823	104.56156	98.84691	85.80756	79.97012	77.72946	73.99916	72.1182
3.65	115.2737	105.35788	103.7819	101.7816	93.8878	83.93597	79.35309	77.44026	73.89283	72.0689
5.475	95.48783	98.69194	95.25561	92.71312	87.06569	81.35032	78.37486	76.79247	73.6072	71.8402
7.3	85.14523	84.27238	82.79681	83.51421	82.40771	79.60057	77.75617	76.65252	73.77958	72.0868
10.95	73.19426	70.53375	70.56498	72.85857	75.45423	76.01022	75.67739	75.48427	73.55618	72.113
14.6	70.69683	70.38426	70.36137	70.51968	71.48146	73.10605	73.55475	74.18513	73.14896	72.0453
22.5	70.26386	70.12772	70.10817	70.30463	70.33014	70.39189	70.71352	71.58088	72.10803	71.6731
30.4	70.52469	70.50991	70.53613	70.90664	70.83272	70.81079	70.71495	70.84274	71.86722	72.0179

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 10.15 mm, Mass Flux = 825 kg/m²s, Pool Temp. = 20 °C)

<u>반경방향</u> <u>길이(mm)</u>	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	
0	119.4427	99.54047	87.0583	78.98355	45.94612	38.49888	33.22172	30.89928	25.1069	
1.825	128.591	108.9429	94.8188	53.62058	41.31937	36.23462	32.06491	29.96301	24.49274	
3.65	107.5589	100.0711	90.3859	39.39438	35.4371	33.21528	30.50088	29.11233	24.25241	
5.475	68.5122	59.79967	46.5044	30.2372	29.60181	29.7842	28.66697	27.86302	23.87595	
7.3	31.0328	27.39357	28.9759	25.09975	25.81524	27.48084	27.59051	27.35066	24.07765	
10.95	22.78184	20.32423	20.4226	20.42627	21.17085	23.04578	24.56235	25.26783	23.60129	
14.6	22.27854	20.21241	20.194	20.07794	20.36619	20.7386	21.88229	23.19312	22.8846	
22.5	21.50464	19.97518	19.7536	19.68694	20.01023	20.3197	19.09518	20.06578	21.61669	
30.4	21.56639	20.28107	20.1017	19.99402	20.49946	20.50066	19.35052	19.97494	21.00372	

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 10.15 mm, Mass Flux = 825 kg/m²s, Pool Temp. = 30 °C)

<u>반경방향</u> 길이(mm)	<u>축방향길이(mm)</u>								
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>
0	119.7659	99.2095	90.8262	103.1177	56.111	49.52263	43.91574	39.5054	35.00556
1.825	132.0629	110.103	95.4539	80.75761	51.1999	47.0786	42.61279	38.371	34.44743
3.65	112.7529	102.483	99.2524	54.50105	44.7299	43.8888	41.01705	37.2896	34.24596
5.475	77.77261	78.1142	64.4571	43.1087	38.4876	40.2739	39.07489	35.7923	33.86688
7.3	40.67206	41.0933	42.2699	36.98396	34.5389	37.71686	37.77408	34.9771	34.09409
10.95	30.869	30.5919	30.8985	31.22878	30.059	32.98044	34.63339	32.4871	33.65445
14.6	30.53259	30.3778	30.6878	30.60507	29.6719	30.52759	32.08279	30.2655	33.05697
22.5	30.15947	30.096	30.3637	30.26604	29.4144	30.02834	29.61969	27.6739	31.49557
30.4	30.49302	30.3699	30.7261	30.62534	29.7949	30.3781	30.0126	27.9839	30.65657

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 10.15 mm, Mass Flux = 825 kg/m²s, Pool Temp. = 40 °C)

<u>반경방향</u> 길이(mm)	<u>축방향길이(mm)</u>								
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>
0	120.4915	100.39782	92.54336	107.26571	66.76864	58.84933	53.90644	50.64034	45.31789
1.825	131.5076	111.57035	96.5538	102.56099	61.85126	56.80871	52.43706	49.50309	44.70444
3.65	120.7499	104.41398	102.8969	74.12982	56.24127	53.90977	50.75502	48.40422	44.37971
5.475	84.49983	90.42883	80.73735	55.70436	50.34089	50.50897	48.63333	47.0767	43.88785
7.3	52.08158	54.32987	54.54707	48.35129	46.3469	48.14219	47.32608	46.44656	44.10243
10.95	40.40288	40.53545	40.58766	41.28623	41.16129	43.91622	44.13414	44.52586	43.67733
14.6	40.2441	40.45701	40.46654	40.6673	40.83251	40.95077	41.44001	42.37032	42.94443
22.5	39.88957	40.16542	40.14992	40.32588	40.51446	39.66832	39.08181	40.21788	41.59093
30.4	40.21167	40.51852	40.49348	40.7114	41.05353	40.03834	39.45088	40.49468	40.8299

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 10.15 mm, Mass Flux = 825 kg/m²s, Pool Temp. = 50 °C)

<u>반경방향</u> <u>길이(mm)</u>	<u>축방향길이(mm)</u>								
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>
0	121.60229	99.349	94.5379	107.268	83.0082	68.16768	64.0144	61.52177	56.8144
1.825	134.31358	111.109	97.0687	108.552	76.3316	66.54524	63.0099	60.63318	56.3983
3.65	125.46443	106.652	104.17	92.3945	69.6053	64.22543	61.6941	59.84855	56.3597
5.475	90.1773	96.848	91.5918	70.2574	63.7743	61.40708	59.9703	58.61688	55.9673
7.3	66.73265	68.3035	67.5003	60.1298	59.9048	59.46063	58.959	58.12263	56.3116
10.95	51.58854	50.806	51.0995	52.0203	53.8449	55.62376	56.2982	56.29849	56.0009
14.6	51.02014	50.5762	50.6703	50.9297	51.2249	52.48451	54.0935	54.3015	55.2585
22.5	49.95775	50.2851	50.352	50.6329	50.5871	50.65488	51.2802	51.35036	53.8554
30.4	50.48084	50.6777	50.738	51.0311	51.0301	51.05352	51.3629	51.23234	52.9117

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 10.15 mm, Mass Flux = 825 kg/m²s, Pool Temp. = 60 °C)

<u>반경방향</u> <u>길이(mm)</u>	<u>축방향길이(mm)</u>								
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>
0	120.783	99.8108	95.2792	106.903	96.2605	76.5223	72.15976	70.0452	65.2253
1.825	132.824	111.374	97.4953	108.975	93.1053	75.2851	71.22683	69.328	64.675
3.65	124.854	109.004	105.077	104.241	85.1113	73.2834	70.1313	68.8219	64.6433
5.475	93.8754	99.8795	99.2448	85.9932	76.8532	70.6019	68.54486	67.8939	64.2485
7.3	77.6953	80.7676	82.2412	73.1027	72.035	68.7026	67.60835	67.5957	64.5022
10.95	61.6261	60.5931	61.6636	62.5483	64.8517	64.6138	65.02819	65.9117	64.1012
14.6	60.7533	60.4047	60.5597	60.2595	60.6391	61.4588	62.77823	64.1005	63.4238
22.5	60.2858	60.1234	60.2931	59.9939	59.724	58.9642	59.86428	61.161	62.1216
30.4	60.5182	60.3804	60.6131	60.2881	59.9694	59.3328	60.21165	60.2648	61.3942

온도 측정 결과 (단위 °C, Nozzle ID = 10.15 mm, Mass Flux = 825 kg/m²s, Pool Temp. = 70 °C)

<u>반경방향</u> <u>길이(mm)</u>	<u>축방향길이(mm)</u>									
	<u>X=0</u>	<u>X=5</u>	<u>X=10</u>	<u>X=20</u>	<u>X=40</u>	<u>X=60</u>	<u>X=80</u>	<u>X=100</u>	<u>X=200</u>	<u>X=400</u>
0	120.033	99.68447	95.6039	105.75	100.6481	92.35048	82.45229	78.87387	74.6851	72.38936
1.825	130.8739	108.7727	97.2664	107.2034	101.9406	90.7669	81.71081	78.27663	74.3413	72.11518
3.65	125.6117	111.3014	105.947	107.274	98.51074	87.90564	80.92308	77.84843	74.32604	72.19768
5.475	95.5224	100.1617	100.923	98.63114	91.31765	84.18893	79.61988	77.0266	74.03445	72.0489
7.3	88.37127	92.27108	93.3246	88.26112	85.28995	81.70175	78.90701	76.72452	74.29266	72.33953
10.95	71.89869	70.92952	73.5793	75.37531	76.97868	77.12197	76.35188	75.31952	74.08619	72.33047
14.6	70.62029	70.52612	71.6764	71.17986	72.18432	73.48561	73.88114	73.75335	73.67086	72.22748
22.5	70.18566	70.1611	71.3162	70.87159	70.3504	70.42527	70.34945	70.60265	72.53742	71.83862
30.4	70.3938	70.88375	71.6485	71.3458	70.64723	70.72186	70.28031	69.81372	72.15166	72.22152

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/TR-1863/2001					
제목/부제	증기응축제트 해석 모델				
연구책임자 및 부서명 (TR, AR인 경우 주저자)	김환열 (동력로기술개발팀)				
연구자 및 부서명					
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2001
페이지	60 pg	도표	있음(√), 없음()	크기	21 cm x 30 cm
참고사항	차세대원자로개발				
비밀여부	공개(√), 대외비(), — 급비밀		보고서종류	기술보고서	
연구위탁기관			계약번호		
초록 (15-20줄내외)	<p>본 보고서는 수평 배관을 통해 과냉각수조로 방출되는 고온 고압의 증기제트 응축 특성에 대한 2개의 이론적 해석 모델을 제시하였고, 증기제트의 형상 및 길이, 유동장 온도, 열전달계수 등을 측정한 기존의 실험결과와 비교분석 하였다. 첫 번째 해석 모델은 증기와 과냉수 사이에 국부 균질유동을 가정하고 난류 특성은 난류 확산화염에서 사용되는 $k-\epsilon-g$ 모델을 사용하여 증기응축 유동 현상을 수치해석한 것이다. 이 모델에서 난류는 난류 운동 에너지와 운동 에너지 소멸률도 모사되고 증기와 과냉수의 혼합률비에 대한 평균값과 변동량에 대한 미분 방정식을 추가하여 직접 풀고 혼합률비에 확률분포 함수를 적용하여 열역학 변수의 평균값을 구한다. 두 번째 해석 모델은 축대칭 좌표계에서 질량, 운동량 및 에너지 방정식과 증기/물 경계면에서의 응축 특성을 고려한 열평형 방정식을 사용하여 증기응축제트 캐비티 형상을 예측한 것이다. 이 모델에서 증기/물 경계에서의 매우 큰 열전달율은 기존의 실험을 근거로 한 유효열전도계수에 의해 반영되었다. 제시된 2개의 해석 모델을 평가하기 위해 해석결과와 기존의 실험결과를 비교하여 만족할 만한 결과를 얻었다.</p> <p>본 보고서는, 증기분사기 개발과 관련하여 가장 간단한 형태의 증기분사기도 간주될 수 있는 단일 수평 배관에서 일어나는 증기제트 응축특성에 대한 해석모델을 제시한 것으로 추후 이를 바탕으로 좀더 복잡한 형태의 증기분사기 모델을 개발하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이다.</p>				
주제명키워드 (10단어내외)	차세대원자로, 증기분사기, 직접접촉증기응축, 증기응축제트, 응축모델, 난류확산화염, 유효열전도계수				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/TR-1863/2001					
Title / Subtitle		Analysis Modelling on the Condensing Steam Jet			
Project Manager and Department		Hwan Yeol Kim (Power Reactor Technology Development Team)			
Researcher and Department					
Publication Place	Taejeon	Publisher	KAERI	Publication Date	2001.
Page	60 pg	Ill. & Tab.	Yes(✓), No ()	Size	21 cm x 30 cm
Note	Korean Next Generation Reactor Development				
Classified	Open(✓), Restricted() ___ Class Document		Report Type	Technical Report	
Sponsoring Org.			Contract No.		
Abstract (15-20 Lines)					
<p>This report contains two analysis models on the condensation of stable steam jets discharging into a quenching tank with subcooled water from a single horizontal pipe. The analysis results are compared with the conventional experimental ones which were performed to measure the shapes and lengths of condensing steam jet, the temperatures of the flow field and the condensation heat transfer coefficients. The first analysis model is a numerical one to analyse the condensing steam jet by employing the locally homogeneous flow approximation of two phase flow in conjunction with a $k-\epsilon-g$ model of turbulence properties. In this model, the turbulence is represented by differential equations for its kinetic energy and dissipation. A differential equation for the concentration fluctuations is solved and a clipped normal probability distribution function is proposed for the mixture fraction. The second analysis model is an analytic one to predict the configuration of condensing steam jet cavity by employing the mass, momentum and energy equations as well as a thermal balance equation with condensing characteristics at the steam/water interface for the axi-symmetric coordinates. In this model, the extremely large heat transfer rate at the steam/water interface is reflected in the effective thermal conductivity estimated from the conventional experimental results. The proposed analysis models are evaluated comparing the analysis results with the experimental ones. It shows that both results are in good agreement. In summary, this report can be used for the development of the analysis model on the complex sparger, since it proposes the analysis models on the condensing steam jet discharging from a single pipe which is considered a simple sparger.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		Korean Next Generation Reactor, Sparger, Direct Contact Steam Condensation, Condensing Steam Jet, Condensation Model, Turbulent Diffusion Flame, Effective Thermal Conductivity			