

유동 비등 시 hypervapotron 핀 슬롯 내부 유동 특성의 CFD 분석

이구빈* · 강인엽* · 김일진** · 김형대*†

CFD Analysis of Internal Flow Characteristics between Hypervapotron Fin Slots under Flow Boiling

Gubin Lee*, In Yeop Kang*, Iljin Kim**, Hyungdae Kim*†

Key Words : Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Hypervapotron(하이퍼베이프포트론), Subcooled flow boiling(과냉 유동 비등), Two-phase flow(이상 유동), Vortex flow(와류 유동)

ABSTRACT

This study develops a two-dimensional CFD framework to analyze internal flow and boiling behavior in hypervapotron structures. The model couples an interfacial heat transfer approach with an extended RPI wall boiling model to capture vortex-induced phase-change phenomena. Grid sensitivity analysis identified a 250 μm mesh ($y^+ \approx 40$) as optimal, resolving key vortex structures and providing stable thermal gradients without numerical artifacts. In single-fin simulations, boiling initiated at $t \approx 0.5$ s, and the primary vortex soon dominated bubble transport, replicating the “vapotron effect” of vapor ejection and liquid replenishment. Array simulations showed that low heat flux (1 MW/m²) supported stable cooling, while high heat flux (2 MW/m²) induced vapor film formation and bubble accumulation. These findings underscore the importance of combined boiling models and mesh resolution for accurate thermal analysis of ultra high heat-flux cooling systems, such as hypervapotron.

1. 서 론

고열유속 냉각 기술은 원자력 발전소를 비롯하여 고성능 반도체, 인공지능 데이터 센터, 첨단 레이저 시스템 등 다양한 분야에서 시스템의 안전성과 성능 확보를 위한 핵심 기술로 주목받고 있다. 특히 핵융합로의 디버터(divertor)는 플라즈마 입자가 수직 충돌하며 10-20 MW/m²에 이르는 극한 열부하를 견뎌야 하므로, 이를 안정적으로 냉각할 수 있는 고성능 열전달 구조의 확보가 필요하다.

이를 위해 swirl tube, screw tube, hypervapotron 등의 고열유속 냉각 기법이 제안되어 왔으며, 이 중 hypervapotron은 냉각 채널 내부에 냉각수 방향과 수직으로 배치된 핀 구조를 통해 유체 전단에 의해 발생하는 와류가 핀 내 기포 배출과 응축을 촉진하는 방식이다. 이 구조는 고열유속 조건에서도 안정

적인 비등 상태를 유지하며 효과적인 열제거 성능을 제공한다.

Hypervapotron은 Joint European Torus(JET)에서 20년 이상 운전되며 그 우수성이 실증되었으며⁽¹⁾, 이를 기반으로 국제핵융합실험로 ITER의 대체 냉각 방식으로도 검토되고 있다. Hypervapotron의 기본 원리와 구조적 특성을 검토함과 동시에, 다양한 핀 배열과 기하학적 설계 변수를 정량적으로 분석하여 핀 구조의 배열에 의해 열전달 성능이 향상되는 메커니즘에 대한 연구가 지속적으로 진행되어 왔다.

Cattadori et al.은 가시화 실험을 통해 hypervapotron 내부에서 발생하는 vapotron 효과를 관찰하였으며, 이는 핀 내부 공간이 증기로 채워졌다가 과냉의 주유동 유체에 의해 급속히 응축되며 차가운 액체가 주기적으로 다시 유입되는 순환 현상으로 설명한다.⁽²⁾ 해당 현상은 모든 핀에서 동시다발적으로 발생하지만, 특히 유속이 낮은 조건에서 관찰됨을

* 경희대학교(Kyung Hee University)

** 한국원자력연구원(Korea Atomic Energy Research Institute)

† 교신저자, E-mail : hdkims@khu.ac.kr

보고하였다. Escourbiac et al.은 hypervapotron 채널의 임계열유속 측정 실험을 수행하여 채널 폭에 따른 냉각 성능의 변화를 평가하였다.⁽³⁾ 이러한 hypervapotron의 구조물 특성과 냉각 성능 간의 상관관계를 실험적으로 검증하는 연구가 이루어져 왔다.⁽⁴⁻⁷⁾ 그러나 고열유속을 견디기 위한 금속 재질의 냉각 채널 내부 유동을 직접 가시화하는 데에는 여전히 한계가 존재하여, 이를 보완하기 위해 전산유체역학 기반의 수치해석 연구가 병행되고 있다.

Milnes et al.은 Ansys CFX를 기반으로 hypervapotron 내부 유동 및 열전달을 체계적으로 분석하였으며⁽⁸⁾, 난류 모델 및 격자 수에 대한 민감도 분석과 함께 RPI wall boiling 모델을 적용하여 기초적인 해석 기법을 제시하였다. 이후 연구들 역시 hypervapotron 냉각 채널의 성능 검증 및 임계열유속 측정을 중심으로 전산 해석⁽⁹⁻¹²⁾ 및 실험 연구가 지속되어 왔으나, hypervapotron 핀 내부의 유동 특성을 기반으로 냉각 성능을 평가하는 전산 해석 방법론은 아직 정립되지 않은 실정이다.

본 연구는 CFD를 이용하여 유동 비등 시 hypervapotron 핀 슬롯 내부에서 발생하는 와류 유동 특성을 모의함으로써 hypervapotron의 냉각 성능 향상 메커니즘을 분석하는 것을 목적으로 한다.

2. Numerical CFD Methodology and case setup

Hypervapotron 해석에는 전산유체역학 오픈소스 소프트웨어인 OpenFOAM이 활용되었으며, 특히 가열 벽면에서의 유체 간의 열전달, 비등 및 응축 현상과 같은 다양한 물리적 현상을 반영하기 위해 multiphase-EulerFoam 솔버를 활용하였다. Hypervapotron의 주요 냉각 메커니즘인 와류 유동을 모의하기 위하여 난류 모델로는 $k-\omega$ SST 모델이 적용되었다. Hypervapotron 냉각 채널 내 핀 내부에서는 비등으로 인한 증기가 생성되고, 주유동 유체와 접촉하며 급속히 응축되는 특징적인 상변화 현상이 동반된다. 이러한 현상을 수치적으로 구현하기 위해 Interfacial heat transfer model 모델을 적용하였으며, 가열 벽면에서 발생하는 열전달 모의는 extended RPI wall boiling 모델을 통해 모의되었다. 이러한 2유체 모델과 난류 모델의 적용은 hypervapotron 냉각 채널에서의 물리적 특성을 반영할 수 있도록 구성되었으며, 유사한 채널 크기를 대상으로 한 선행 연구들^(8, 23)에서도 유효성이 검증되었다.

2.1 Interfacial heat transfer model

Hypervapotron 냉각 채널에서는 핀 내부에서 비등으로 인해 기포가 생성된 후, 과냉의 주유동 유체와 접촉함으로써 기포가 응축되는 물리 현상이 발생한다. 이에 따라, 솔버 내 상변화 모델은 계면에서 발생하는 열전달을 계산하기 위하

여 two-resistance 접근법을 사용하며, 그 상세 내용은 방정식 (1-3)과 같다.

$$\dot{q}_{int,l} = K_{int,l}(T_{int} - T_l) + \left(\frac{dm_l}{dt}\right)_{int} H_{int,l} \quad (1)$$

$$\dot{q}_{int,v} = K_{int,v}(T_{int} - T_v) + \left(\frac{dm_v}{dt}\right)_{int} H_{int,v} \quad (2)$$

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{int} = -\left(\frac{dm_v}{dt}\right)_{int} = \left(\frac{dm_l}{dt}\right)_{int} \quad (3)$$

여기서, $H_{int,l}$ 과 $H_{int,v}$ 는 각각 계면에서의 액체 및 기체의 엔탈피를 나타내며, T_{int} 는 기체-액체상 간의 계면 온도이다. 계면 온도가 포화 온도에 도달하고 계면을 통한 열적 평형이 유지될 경우, 상변화에 따른 질량 전달은 방정식 (4)와 같이 계산된다. 열전달 계수(K_l , K_v)는 열전달 모델로부터 산정된다.

$$\left(\frac{dm_l}{dt}\right)_{int} = \frac{K_{int,l}(T_{sat} - T_l) + K_{int,v}(T_{sat} - T_v)}{H_{int,v} - H_{int,l}} \quad (4)$$

기존의 널리 쓰이는 Ranz-Marshall 상관식을 통해 계면 열전달을 모의할 경우, 응축 열전달량이 과대 예측되어 생성된 기포가 빠르게 응축되는 현상을 개선하고자 Nusselt 수를 고정된 선행 연구⁽¹³⁾를 참고하여 hypervapotron 상변화 해석에서는 Nusselt 수를 2로 고정하여 열전달 계수를 모델링하였다. 상변화에 따른 질량 유속이 계산된 후에는, 계면 온도가 방정식 (5)와 같이 나타난다.

$$T_{int} = \frac{K_{int,l}T_l + K_{int,v}T_v + \left(\frac{dm_l}{dt}\right)_{int}(H_{int,v} - H_{int,l})}{K_{int,l} + K_{int,v}} \quad (5)$$

방정식 (5)는 방정식 (4)를 기반으로 계면 온도(T_{int})를 계산하기 위한 관계식이다. 방정식 (4)의 질량 전달률($\frac{dm_l}{dt}$)은 유체의 온도와 포화 조건 등의 열역학적 경계 조건에 따라 계산되며, 계산 과정에서 반복적으로 갱신되어 방정식 (5)에 적용된다. 이러한 절차를 통해 계면에서의 증발 및 응축 거동을 반영함으로써, 상변화 해석의 물리적 정확성을 확보하고자 하였다.

2.2 Extended RPI wall boiling model

가열된 표면에서 발생하는 열은 일반적으로 가열 표면으로부터 액상으로 전달된다. 이러한 열전달 과정을 모의하기 위하여 벽면 비등 모델이 채택되었고, 그 중에서도 extended

RPI wall boiling 모델을 적용하였다.⁽¹⁴⁻¹⁵⁾

Extended RPI wall boiling 모델은 가열 벽면에서의 열 유속을 대류(convection), 증발(evaporation), 그리고 급냉(quenching) 열전달의 세 가지 메커니즘에 고기공률 상황에서 기체 상에 의한 열전달 메커니즘을 반영하기 위해 추가적인 모델링이 이루어졌다. Extended RPI wall boiling 모델은 방정식 (6)으로 정의되며, 하위 모델은 방정식 (7-10)로 정의된다.

$$q''_w = (q''_c + q''_e + q''_q)f(\alpha_t) + (1-f(\alpha_t))q''_v \quad (6)$$

$$q''_c = h_c A_1 (T_w - T_f) \quad (7)$$

$$q''_e = \gamma(H_{v,sat} - H_f) \quad (8)$$

$$q''_q = h_q A_2 (T_w - T_f) \quad (9)$$

$$q''_v = h_v (T_w - T_f) \quad (10)$$

방정식 (6)에서 분할 함수(partitioning function)인 $f(\alpha_t)$ 는 액체 체적 분율(α_t)에 따른 액상 열전달 기여도를 결정한다. 고기공률 상황에서, 액체 체적 분율이 0에 가까워지면 기체 상이 차지하는 체적 분율($1-\alpha_t$)이 커지고, 열전달 과정에서 q''_v 의 영향이 가중된다. 방정식 (7-10)의 h_c, h_q, h_v 는 각 메커니즘에서의 열전달 계수를 나타내며, A_1 은 비등의 영향을 받지 않는 영역을 나타내고 A_2 는 비등의 영향을 받는 영역으로 정의된다. 추가로, 방정식 (8)의 γ 는 증발 질량 유속(evaporation mass flux)을 의미한다.

Extended RPI wall boiling 모델을 해석에 적용하기 위해서는 열전달 기여도를 결정하는 데 필수적인 핵생성 위치 밀도(N), 기포 이탈 직경(D_d), 기포 이탈 빈도(F), 증발 질량 유속(γ) 등의 매개변수가 필요하다. 이러한 매개변수들은 wall boiling sub-model에 의해 계산되며, 방정식 (11-14)로 정의된다.⁽¹⁶⁻¹⁸⁾

$$D_d = \max[\min(D_{max}, D_{ref} e^{-\frac{\Delta T_{sp}}{\Delta T_{ref}}}), D_{min}] \quad (11)$$

$$F = \sqrt{\frac{4g(\rho_l - \rho_v)}{3\rho_l D_d}} \quad (12)$$

$$N = C_n N_{ref} \left(\frac{\Delta T_{sup}}{\Delta T_{ref}}\right)^n \quad (13)$$

$$\gamma = \frac{\pi D_d^3}{6} \rho_v F N \quad (14)$$

2.3 Partitioning function

분할 함수(partitioning function)는 extended RPI wall boiling model에서 중요한 역할을 한다. 분할 모델은 상변화가 포함된 이상 유동 조건에서 벽면의 열전달 분포를 체계적으로 구분하고, 기공률에 따른 열전달 기여도를 결정한다. 분할 모델은 방정식 (15)와 같이 표현되며, 임계 액상 체적 분율(α_{crit})은 0.2로 설정되었다.⁽¹⁹⁾

$$f(\alpha_t) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{2} e^{-20(\alpha_t - \alpha_{crit})}, & \alpha_t \geq \alpha_{crit} \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_t}{\alpha_{crit}}\right)^{20\alpha_{crit}}, & \alpha_t < \alpha_{crit} \end{cases} \quad (15)$$

분할 함수(partitioning function)는 액상 체적 분율에 따라 달라지며, 기공률에 따라 달라지는 지배적인 열전달 메커니즘을 반영한다. 액체 체적 분율(α_t)이 낮을 때는 대류, 증발, 급냉에 의한 열전달 메커니즘이 지배적이며, 액체 체적 분율(α_t)이 높을 때는 기체에 의한 열전달이 지배적이다.

2.4 Case setup for 2D hypervapotron simulation

2.4.1 Single hypervapotron fin structure

단일 hypervapotron 핀 구조물을 대상으로 격자 해상도에 따른 내부 유동 및 열전달 특성의 수치적 민감도를 분석하여, 계산 정확도의 최적 지점을 도출하고자 하였다. 특히 격자 크기를 변화시키며 해석을 수행하였으며, 1차 및 2차 유동 구조를 모두 신뢰성 있게 재현할 수 있는 적정 격자 구성을 도출하였다.

단일 hypervapotron 핀(높이 6 mm × 너비 3 mm, 중횡비 = 2)을 대상으로 2차원 전산 해석을 수행하였으며, 격자 크기는 750 μm부터 25 μm까지 균일한 정사각형 격자로 구성하였다. Fig. 1은 각 세분화 단계별 격자 해상도 구성을 나타낸다. 해석 조건은 Table 1과 2에 제시하였다.

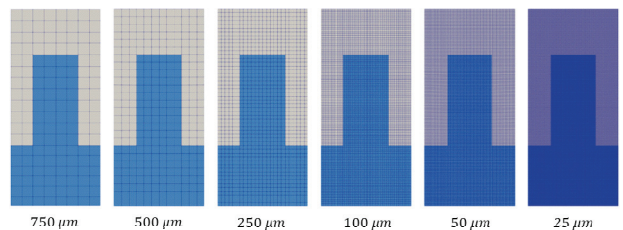


Fig. 1 Computational mesh configuration for single hypervapotron flow simulation

Table 1 Initial and boundary conditions for single hypervapotron flow analysis

Initial conditions	
Fluid	Water
Solid	CuCrZr
Pressure	500 kPa($T_{sat}=424.98$ K)
Temperature	404.98 K
Boundary conditions	
Mass flux[$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]	1000
Average Fluid velocity[m/s]	1.127
Inlet subcooling[K]	20
Applied heat flux[MW/m^2]	1
Water(at 500 kPa)	
Density[kg/m^3]	887.13
Specific heat[$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$]	4404.48
Thermal conductivity[$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]	0.671
Viscosity[$\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$]	0.00015
CuCrZr	
Density[kg/m^3]	8910
Specific heat[$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$]	390
Thermal conductivity[$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]	340

2.4.3 Hypervapotron fin array

2차원 hypervapotron 핀 배열은 Fig. 2에 도시된 바와 같이, 100 mm 길이 구간에 내에 일정 간격으로 반복되는 주기적 핀 구조로 구성하였다. 전체 해석 영역의 높이는 13 mm이며, 그 중 고체층 3 mm, 유체층 6 mm, 핀 높이 4 mm로 설정하였다. 핀은 폭 3 mm, 간격 3 mm 설계하여 실제 hypervapotron 형상을 반영하도록 하였다. 수치 안정성과 해석 일관성을 확보하기 위해 고체 및 유체를 포함한 전체 영역에 대해 균일한 정사각형 격자를 적용하였다. 이를 통해 영역 간 보간 오차를 줄이고, 핀 배열 규모에서 발생하는 와류 유동 및 복합 열전달 예측의 신뢰성을 확보하였다. 해석 조건은 앞서 수행된 단위 핀 구조 해석(Table 1-2)과 동일하게 설정하였으며, 인가된 열유속은 각각 $1 \text{ MW}/\text{m}^2$ (저열유속), $2 \text{ MW}/\text{m}^2$ (고열유속)의 조건에서 해석이 수행되었다.

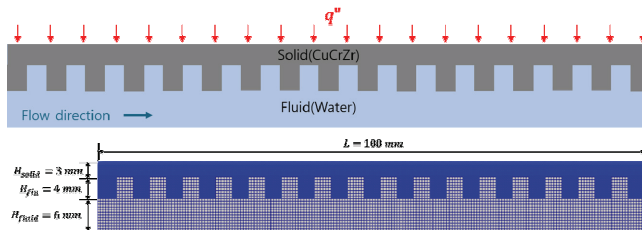


Fig. 2 Schematic and geometric configuration of hypervapotron fin array

3. Results and discussion

3.1 Single hypervapotron fin structure

3.1.1 Conjugate heat transfer

격자 크기 변화에 따른 열전달 해석을 수행하여, Fig. 3에 고체와 유체의 온도장을 비교하였다. Fig. 3(a)는 고체 및 유체 해석 영역의 전반적인 온도 분포를 나타내며, Fig. 3(b)는 고체와 액체가 만나는 계면에서의 온도 분포를 나타낸다.

1) 저해상도 격자($750 - 500 \mu\text{m}$): 와류가 충분히 형성되지 않아 핀 슬롯 내부로의 유체 유입이 제한되며, 그 결과 고체 핀의 온도가 유체 온도보다 약 18% 높게 나타났다. 이는 $250 \mu\text{m}$ 격자의 결과가 약 11%인 것과 비교하였을 때, 열전달 성능 저하가 명확히 드러난다.

2) 중간 격자($250 - 100 \mu\text{m}$): 핀 가장자리에서 유체로 명확한 온도 구배가 나타나며, 와류에 의한 혼합 효과가 효과적으로 반영되었다. Fig. 3(b)의 P1 - P6 지점(고체-액체 계면)에서 온도장이 일관되게 형성되었다.

3) 고해상도 격자($50 - 25 \mu\text{m}$): 두 개의 와류(1차 & 2차)가 완전하게 형성되며, 1차 와류 영역에서는 벽면 온도는 낮고 2차 와류 영역은 상대적으로 높은 양상이 나타났다. 이는 두 와류 간 유체 교환이 제한적이기 때문으로 판단된다. 전체적인 온도 분포는 $250 - 50 \mu\text{m}$ 범위 결과와 큰 차이를 보이지 않았으나, 고해상도 격자에서 핀 슬롯 내부에서의 1차, 2차 와류의 제한된 유체 교환은 열전달 성능이 과소평가 될 수 있음을 시사한다. 따라서, 열전달 효율성과 계산 비용을 고려한다면 $250 \mu\text{m}$ 격자가 가장 적절한 선택으로 판단된다.

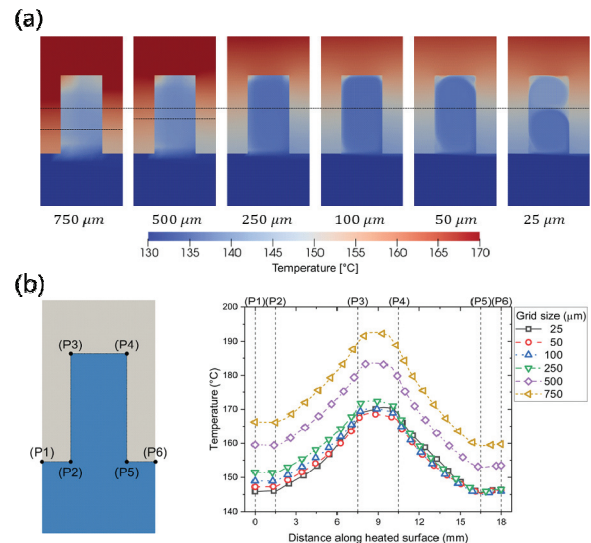


Fig. 3 Effect of different mesh size on (a) the solid-liquid temperature distribution in fin structure and (b) temperature distribution along the interface of solid-liquid surface

3.1.2 Internal flow pattern with phase change

Fig. 4는 상변화 조건에서 핀 슬롯 내 시간에 따른 유동 구조의 변화를 나타낸다.

1) $t < 0.4\text{ s}$ (단상 유동): 핀 슬롯 내부에는 채널 간 유체의 전단력에 의해 형성된 안정적인 1차 및 2차 와류 구조가 포착되었다. 슬롯 내부의 유속은 주유동 채널의 유속(\vec{v}_{bulk}) 보다 상대적으로 낮은 유속을 보였다.

2) $t = 1.0 - 1.2\text{ s}$ (비등 발생): 가열 벽면에서 비등이 발생하고, 그에 따른 기포 생성 및 밀도 변화가 나타나면서 유동 구조가 변화하였다. 핀 슬롯 내부의 2차 와류가 약해지고 와류 유동 유선의 비대칭성이 증가하였다.

3) $t \approx 1.3\text{ s}$ (이상 유동): 2차 와류가 소멸하고, 하나의 지배적인 1차 와류가 형성되었다. 이때의 핀 슬롯 내부 유선 분포는 단순화되고 1차 와류에 의한 슬롯 중심부 순환 유동의 범위가 넓어지며, 슬롯 내부의 저속 영역은 상대적으로 축소되었다.

$25\ \mu\text{m}$ 크기의 격자는 과도 상태의 2차 와류까지 정밀하게 모의할 수 있으나, 계산 비용이 급증하고 y^+ 값에 의한 비물리적 온도 상승과 수치 불안정성이 증가할 위험이 있다⁽²¹⁻²²⁾. 반면, $250\ \mu\text{m}$ 의 격자($y^+ \approx 40$)는 비등에 따른 주요 유동 및 온도 구배를 안정적으로 포착하면서도 계산 효율성을 유지하므로, hypervapotron 핀의 상변화 CFD 해석의 최적점으로 판단된다. 따라서, 물리적 정확도와 계산 효율성을 고려하여 $250\ \mu\text{m}$ 의 격자 hypervapotron 구조의 해석 기준으로 채택하였다.

3.2 Hypervapotron fin array

단일 hypervapotron 핀 해석의 경우에는 핀 슬롯 내부 유동 포착에 중점을 두어, 와류 유동에 의한 열전달 성능을 확인하였다. 하지만, 실제 hypervapotron 활용은 배열 구조로 이루어지므로 냉각 채널의 전반부 핀에서 발생한 기포가 채널 후반부 핀의 열전달 성능에 영향을 미친다. 따라서, 저열유속 및 고열유속 조건에서 시간에 따른 온도 분포 및 기포 체적 분율의 변화를 관찰하여 핀 배열 내에서의 비등 특성과 유동 현상을 비교하였다.

3.2.1 Low heat flux(1 MW/m^2)

저열유속 조건에서의 해석 결과에 따르면(Fig. 5), 벽면 온도가 포화 온도에 도달하는 $t \approx 0.5\text{ s}$ 시점에서 첫 비등이 형성되었다. 이후 $t = 1.0\text{ s}$ 까지 핀 슬롯 내부에서 생성된 기포가 반시계 방향의 와류 흐름을 따라 이동하였으며 형성된 와류는 기포를 효과적으로 병합하여 핀 슬롯을 통해 벌크 유체 영역으로 토출되었다. 채널 내 주유동에 의해 토출된 기포가 출구 방향으로 전달됨에 따라 과냉 유체에 의해 응축되는 현상이 포착되었다.

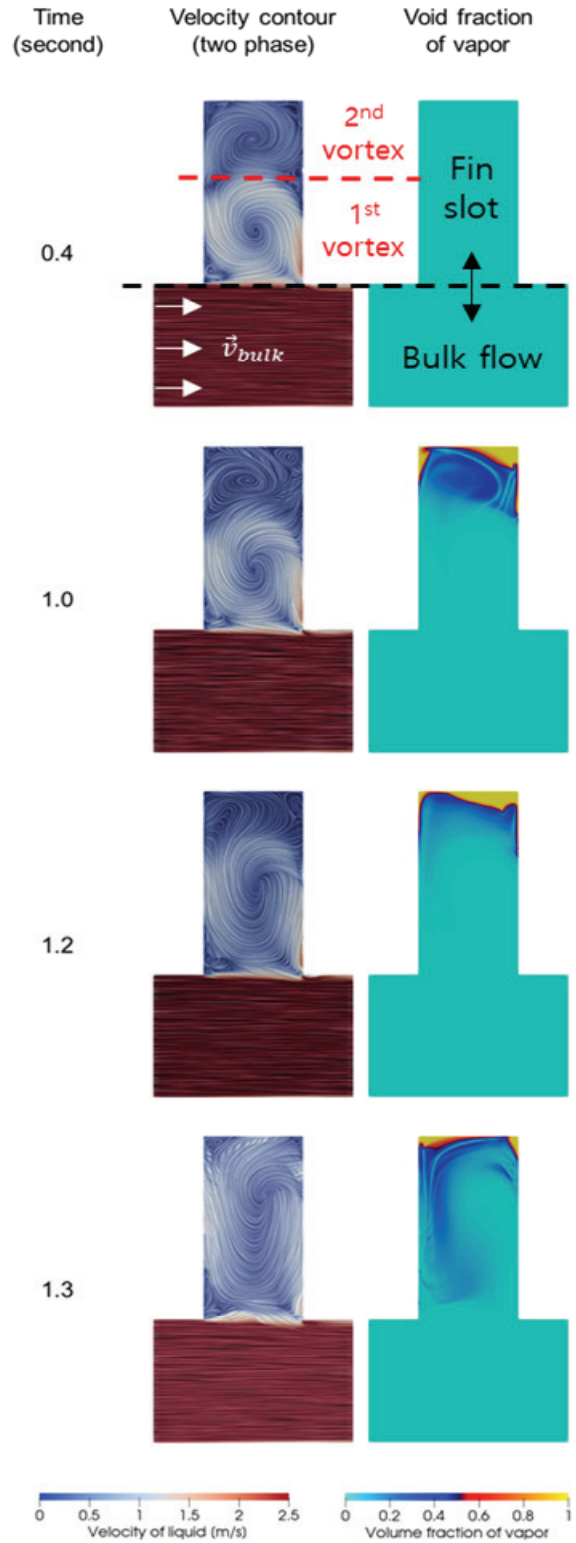


Fig 4. Time dependent two phase flow patterns and void fraction during phase change in a fin structure

3.2.2 High heat flux(2 MW/m^2)

고열유속 조건(Fig. 6)에서는 약 $t \approx 0.5\text{ s}$ 시점에 핀 슬롯 내부가 기포로 채워지며, 이후 핀 슬롯으로부터 기포가

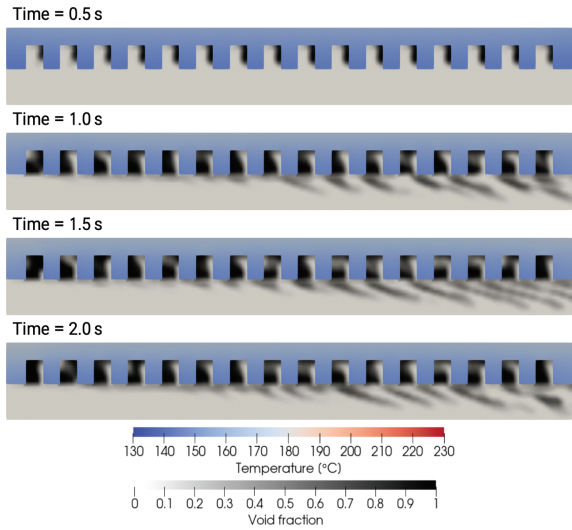


Fig. 5 Solid temperature and void fraction distribution in a hypervapotron fin array under low heat flux conditions

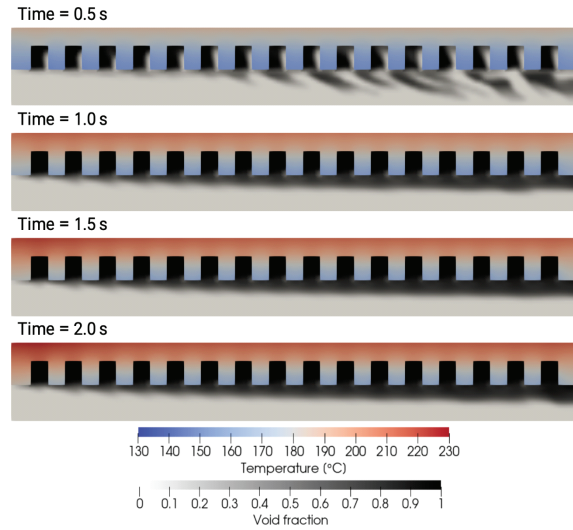


Fig. 6 Solid temperature and void fraction distribution in a hypervapotron fin array under high heat flux conditions

주유동에 의해 분리되어 토출되었다. 저열유속 조건과 비교하여 짧은 시간에 기포 체적 분율이 증가한 비등 양상이 고열유속 조건에서 보여진다. $t > 1.0$ s 이후에는 기포 체적 분율이 핀 슬롯 내 매우 커지게 되며, 핀 상부에는 슬러그 형태의 기포를 형성하여 핀 표면을 둘러싸고, 주 유동의 유체가 핀 슬롯 내부로 재진입하는 것이 제한되었다. 이어서 $t \approx 1.5$ s 이후에는 기포의 토출이 지속적으로 이루어지지만, 일부 기포는 핀 슬롯 내 정체되는 양상을 보였다. 이는 단일 hypervapotron 핀 해석으로는 확인이 제한되었으며, 냉각 채널 전반부에서 기포가 핀으로부터 토출되고 채널 후반부의 기공률에 영향을 미치는 것을 hypervapotron 핀 배열 해석을 통해 포착되었다. 결과적으로, 고열유속 조건에서 hypervapotron 핀 배열 해석을 통해 단일 핀 해석으로는 확인하기 어려운 기포 상호작용의 열수력 현상을 hypervapotron 핀 배열 해석으로 파악할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 hypervapotron 핀 구조물 내부의 와류 유동에 따른 열전달 성능을 확인하기 위해, 2차원 CFD 해석 케이스를 수립하고 이를 단일 및 배열 핀 구조에 적용하였다.

단일 핀 구조물에서의 상변화 해석은 $250 \mu\text{m}$ 격자 크기를 적용한 이상 유동 해석 결과를 계산 비용과 수치적 안정성을 고려했을 때 최적 격자로 제시하였고, 시간에 따라 변화하는 1차 및 2차 와류 유동 특성을 분석하였다.

Hypervapotron 핀 배열 해석에서는 저열유속 조건과 고열유속 조건에서 각각 해석을 수행하였으며, 핀 슬롯 내 기포의 생성, 토출 그리고 정체 현상까지 열유속에 따라 변화하는 hypervapotron 구조물 내 기공률 양상을 시간에 따라 분석하였다.

종합적으로, 상변화 조건에서의 유동 및 열전달 특성을 모사하기 위해 interfacial heat transfer 모델과 extended RPI wall boiling 모델을 통합하여 적용하였으며 핀 슬롯 내부에서 발생한 기포가 주유동 유체와 접촉하면서 응축되고, 와류 유동에 의해 발생하는 반복적인 기포 토출 및 액체 재유입 현상(vapotron 효과)을 수치적으로 재현하였다. 이러한 결과는 hypervapotron 핀 구조의 상변화 해석에서는 가열 벽면과 기체-액체 계면에서의 상변화를 고려한 열전달 모델링이 필수적이며, $250 \mu\text{m}$ 의 격자 크기가 계산 효율성과 함께 물리적 현상의 재현성을 확보할 수 있는 최적의 조건임을 보인다.

본 해석 방법론은 hypervapotron 기반 고열유속 냉각 시스템의 성능 최적화를 위한 정량적 설계 도구로 활용될 수 있으며, 향후 실험 데이터와의 비교를 통한 모델 적합성 검증 및 3차원 해석 확장 연구에 기반을 제공할 수 있다.

후 기

이 논문은 2022년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT CT-22-022, 초고열유속 냉각시스템 특화 연구실). 또한 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원을 받아 수행한 연구 과제임 (No. RS-2023-00244330).

References

(1) Falter, H. D., Graham, M. J., Kirk, A. J., Lindsay, A., Mayer, M., Okuda, S., and Ulrickson, M., 1993, "Thermal test results of the JET divertor plates," In High Heat Flux Engineering, A.

- M. Khounsary, Ed., SPIE, pp. 162–172.
- (2) Cattadori, G. C., Gaspari, G. P., Celata, G. P., Cumo, M., Mariani, A., and Zummo, G., 1993, “Hypervapotron technique in subcooled flow boiling CHF,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 7, No. 3, pp. 230–240.
 - (3) Escourbiac, F., Schlosser, J., Merola, M., and Bobin Vastra, I., 2003, “Experimental optimisation of a hypervapotron® concept for ITER plasma facing components,” *Fusion Engineering and Design*, Vol. 66–68, pp. 301–304.
 - (4) Baxi, C. B., 1995, “Comparison of swirl tube and hypervapotron for cooling of ITER divertor. In *Proceedings of 16th International Symposium on Fusion Engineering*”, IEEE, Vol. 1, pp. 186–189.
 - (5) Chang, S. H., and Baek, W.-P., 2003, “Understanding, predicting, and enhancing critical heat flux,” In *Proceedings of the 10th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10)*.
 - (6) Tivey, R., Akiba, M., Driemeyer, D., Mazul, I., Merola, M., and Ulrickson, M., 2001, “ITER R&D: Vacuum Vessel and In-Vessel Components: Divertor Cassette,” *Fusion Engineering and Design*, Vol. 55, No. 2–3, pp. 219–229.
 - (7) Lim, J. H., 2023, “Heat-transfer characteristics of hypervapotron channels in sub-cooled flow boiling conditions,” Ph.D. Thesis, Pohang University of Science and Technology.
 - (8) Milnes, J., 2010, “Computational Modelling of the HyperVapotron Cooling Technique for Nuclear Fusion Applications,” Ph.D. Thesis, Cranfield University.
 - (9) Pascal-Ribot, S., Saroli, A.-F., Grandotto, M., Spitz, P., Escourbiac, F., 2007, “3D numerical simulations of hypervapotron cooling concept,” *Fusion Engineering and Design*, Vol. 82, No. 15–24, pp. 1781–1785.
 - (10) Rupp, I., and Peniguel, C., 2001, “SYRTHES conduction et rayonnement thermique—manuel utilisateur et tutorial de la version 3.3,” User Manual.
 - (11) Guelfi, A., et al., 2007, “NEPTUNE: A New Software Platform for Advanced Nuclear Thermal Hydraulics,” *Nuclear Science and Engineering*, Vol. 156, No. 3, pp. 281–324.
 - (12) Liu, W., et al., 2022, “Numerical investigation of the critical heat flux in a 5×5 rod bundle with multi-grid,” *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 54, No. 5, pp. 1914–1928.
 - (13) Milnes, Joseph, Alan Burns, and Dimitris Drikakis. “Computational modelling of the HyperVapotron cooling technique.” *Fusion Engineering and Design* 87.9 (2012): 1647–1661.
 - (14) Kurul, N., and Michael Z. Podowski. “Multidimensional effects in forced convection subcooled boiling.” *International Heat Transfer Conference Digital Library*. Begel House Inc., 1990.
 - (15) Del Valle, Victor H., and D. B. R. Kenning. “Subcooled flow boiling at high heat flux.” *International Journal of Heat and Mass Transfer* 28.10 (1985): 1907–1920.
 - (16) Tolubinsky, V. I., and D. M. Kostanchuk. “Vapour bubbles growth rate and heat transfer intensity at subcooled water boiling.” *International Heat Transfer Conference 4*. Vol. 23. Begel House Inc., 1970.
 - (17) Cole, Robert. “A photographic study of pool boiling in the region of the critical heat flux.” *AIChE Journal* 6.4 (1960): 533–538.
 - (18) Lemmert, M., and J. M. Chawla. “Influence of flow velocity on surface boiling heat transfer coefficient.” 1977 (1974).
 - (19) J. Lavieville, E. Quemerais, S. Mimouni, M. Boucker, and N. Mechitoua, “NEPTUNECFD V1.0 theory manual,” 2005.
 - (20) Ghia, U., Ghia, K. N., and Shin, C. T., 1982, “High-Resolutions for incompressible flow using the Navier-Stokes equations and a multigrid method,” *Journal of Computational Physics*, Vol. 48, No. 3, pp. 387–411.
 - (21) Dong, X., Zhang, Z., Liu, D., Tian, Z., and Chen, G., 2018, “Numerical investigation of the effect of grids and turbulence models on critical heat flux in a vertical pipe,” *Frontiers in Energy Research*, Vol. 6.
 - (22) Yang, S., Ren, B., Yang, L., Chen, C., Lu, Q., and Wei, Z., 2024, “Investigation of the impact of near-wall mesh size on the transition from microscopic wall boiling mechanism to macroscopic multiphase-CFD models,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 244, p. 122678.
 - (23) Wardle, Kent E., and Henry G. Weller. “Hybrid multiphase CFD solver for coupled dispersed/segreated flows in liquid-liquid extraction.” *International Journal of Chemical Engineering* 2013.1 (2013): 128936.