

원자로 제어봉과 결합된 하이브리드 히트파이프의 CFD 해석

정영신* · 김경모* · 김인국* · 방인철*†

CFD Analysis of a Concept of Nuclear Hybrid Heat Pipe with Control Rod

Yeong Shin Jeong*, Kyung Mo Kim*, In Guk Kim*, In Cheol Bang*†

Key Words : Hybrid Heat Pipe(하이브리드 히트파이프), Heat Pipe(히트파이프), Passive Decay Heat Removal System(PDRS, 피동형 잔열제거계통), Computational Fluid Dynamics (CFD, 전산유체역학)

ABSTRACT

After the Fukushima accident in 2011, it was revealed that nuclear power plant has the vulnerability to SBO accident and its extension situation without sufficient cooling of reactor core resulting core meltdown and radioactive material release even after reactor shutdown. Many safety systems had been developed like PAFS, hybrid SIT, and relocation of RPV and IRWST as a part of steps for the Fukushima accident, however, their applications have limitation in the situation that supply of feedwater into reactor is impossible due to high pressure inside reactor pressure vessel. The concept of hybrid heat pipe with control rod is introduced for breaking through the limitation. Hybrid heat pipe with control rod is the passive decay heat removal system in core, which has the abilities of reactor shutdown as control rod as well as decay heat removal as heat pipe. For evaluating the cooling performance hybrid heat pipe, a commercial CFD code, ANSYS-CFX was used. First, for validating CFD results, numerical results and experimental results with same geometry and fluid conditions were compared to a tube type heat pipe resulting in a reasonable agreement between them. After that, wall temperature and thermal resistances of 2 design concepts of hybrid heat pipe were analyzed about various heat inputs. For unit length, hybrid heat pipe with a tube type of B₄C pellet has a decreasing tendency of thermal resistance, on the other hand, hybrid heat pipe with an annular type B₄C pellet has an increasing tendency as heat input increases.

1. 서 론

2011년 3월, 규모 9.0의 지진과 쓰나미로 인해 후쿠시마 원자력 발전소 내에 전력 공급 능력이 상실되어 안전시스템에 의해 원자로가 정지했지만, 정지 이후 발생한 잔열의 적절한 냉각이 이루어지지 못하여 원자로 내부 장전된 연료봉의 온도가 높아져 노심이 용융(meltdown)되었다.⁽¹⁾ 후쿠시마 사고 이후, 원자력 발전소에 대하여 발전소 정전사고(SBO, Station BlackOut)와 그 연장 상황에 대한 취약성이 밝혀지면서 전력 공급에 관계없이 작동 가능한 피동형 원자로 잔열 냉각 계통의 중요성이 대두되었다.

히트파이프는 양단이 막힌 관 내 작동 유체의 상변화로 인한 잠열을 이용하여 적은 온도 차에도 열을 효과적으로 전달하는 장치이다.⁽²⁾ 히트파이프는 크게 증발부, 단열부, 응축부로 구분된다. 증발부에서 열을 흡수해 작동 유체가 증발하여 기체가 되고 단열부를 지나 응축부에 도달하여 열을 방출하며 응축되어 내부에 설치된 워(wick) 구조를 따라 다시 증발부로 돌아오는 과정을 반복하며 열을 전달하는 순환 폐회로를 형성한다. 히트파이프의 작동유체는 워 구조에 의한 모세관력에 의해 증발부와 응축부 사이를 순환하기 때문에, 작동하는데 외부 전력이 필요 없다는 장점을 가지고 있다. 히트파이프는 주로 전자기기들의 냉각장치로 많이 쓰이며 일

* 울산과학기술대학교, 기계 및 원자력공학부(UNIST, School of Mechanical and Nuclear Engineering)

† 교신저자, E-mail : icbang@unist.ac.kr

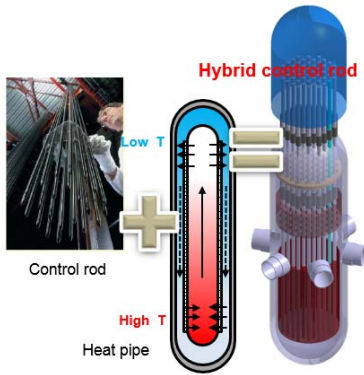


Fig. 1 Concept of the hybrid heat pipe with control rod
(The left picture is obtained from [9])

반적으로 CPU와 같은 작은 발열제품의 열을 제거하는데 주로 사용되지만, 그 크기와 사용 분야에 대해서는 방대한 범위를 가지고 있기 때문에 다양한 분야에서 연구가 활발히 진행되고 있다. 원자력 분야에서도 히트파이프를 냉각계에 적용하는 연구가 꾸준히 수행되고 있다. Singh et al.에 의해 thermal diode 역할의 히트파이프를 이용한 원자로 격납 건물 내 사용 후 핵연료 저장조에 사용될 수 있는 비상 노심 냉각계통 개념이 제안되었고, 계산 결과 사고 시 사용 후 핵연료의 잔열을 충분히 제거할 수 있었다.⁽³⁾ Mochizuki et al.에 의하여 BWR 노심에 적용될 수 있는 loop type 히트파이프 비상냉각계통의 개념이 제안되었고, 개략적인 열제거 용량과 기대효과에 대한 연구가 수행되었다.⁽⁴⁾ Syridenko는 WWER에서의 히트파이프를 이용한 피동 비상 냉각 계통의 설계를 제안하여, 증발부를 노심에 두고 응축부는 외부 공기 또는 추가적으로 설치된 수조에 두는 방식을 제안하였다.⁽⁵⁾ Nam et al.은 APR1400 격납건물 피동냉각계통으로 다발형 써모사이폰을 적용한 개념을 제안하였으며, 제거 열량 및 열전달 계수를 구하여 붕괴열 제거에 충분한 열적 성능을 예비 검증하였다.⁽⁶⁾

본 연구에서는 히트파이프에 CFD 적용 검증을 위하여 관형 히트파이프에 대한 해석 조건과 동일하게 진행된 실험 결과와 상용 CFD를 이용한 해석 결과를 비교함으로써 수행된 사전 검증 내용을 포함하여, 제어봉과 결합된 하이브리드 히트파이프의 설계 후보군에 대하여 열유속에 따른 성능해석 및 적용 타당성을 검토하는 것을 목적으로 하였다.

2. 하이브리드 히트파이프 소개

하이브리드 히트파이프는 원자로 내 제어봉과 결합되어 내부에 반응도 제어를 위한 B₄C 펠릿이 삽입된 형태로 제어봉 역할을 하며 내부 증기통로를 확보하여 히트파이프의 역할도 함으로써, 원자로 반응도 제어 및 정지(shutdown)의 역할과 동시에 발생하는 잔열을 제거할 수 있게 고안된 신개

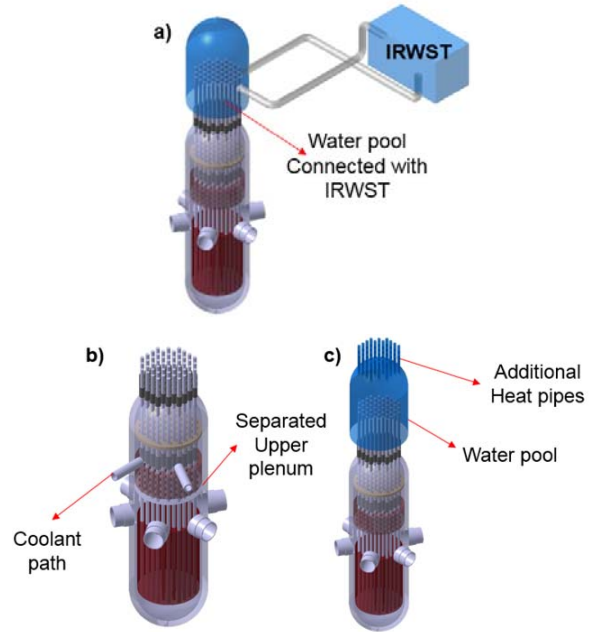


Fig. 2 Schematic for designs of hybrid heat pipe cooling system

념 노내 피동형 잔열 냉각 계통을 의미한다. Fig. 1은 제어봉과 결합된 하이브리드 히트파이프의 개념도를 나타낸다.

후쿠시마 후속조치로써 PAFS(Passive Auxiliary Feed-water System), Hybrid SIT(Safety Injection Tank), 원자로압력용기와 격납용기 내 재장전수탱크(IRWST, In-containment Refueling Water Storage Tank)의 위치 재조정 등과 같은 피동형 안전 계통들이 제안되었지만, 이들 중 대부분은 원자로냉각을 위한 급수 공급을 중심으로 개발되었기 때문에, 사고 시 원자로 내부에 급수 공급이 불가능한 상황에 대해서는 제한적인 활용을 가지며 충분히 냉각되지 않은 원자로 내부 핵연료가 용융되어 외부로 방사성 물질의 누출로 이어질 가능성을 가지고 있다.

제어봉과 결합된 하이브리드 히트파이프는 노 내 기존 제어봉이 있던 위치를 대신하여 위치하며 사고 시 중력에 의해 자동으로 떨어지는 제어봉의 원리를 이용하여 노심에 삽입되어 정지 후 발생하는 잔열을 제거하는 이점을 가진다. 제어봉과 결합된 하이브리드 히트파이프는 기존 제어봉을 대체하여 기존 원자력발전소의 구조 변경 없이 바로 도입될 수 있고, 더 나아가 열침원 냉각 시스템 설치로 냉각 성능을 확보할 수 있다. Fig. 2는 하이브리드 히트파이프가 제어봉과 결합되어 노내 피동형 잔열냉각계통을 구성하는 전체적인 개요 및 냉각 성능 확보를 위한 다양한 시스템 설계들을 보여준다. Fig. 2의 (a)는 응축부에 설치된 냉각수조의 냉각수가 IRWST와 연결되어 냉각 성능을 확보한 설계를, (b)는 원자로압력용기 내부를 분리시켜 부수적인 채널을 통한 냉각재 순환에 의한 냉각 성능을 확보한 설계를, (c)는 응축부 냉각수조에 추가적인 히트파이프를 도입하여 냉각 성능을 확

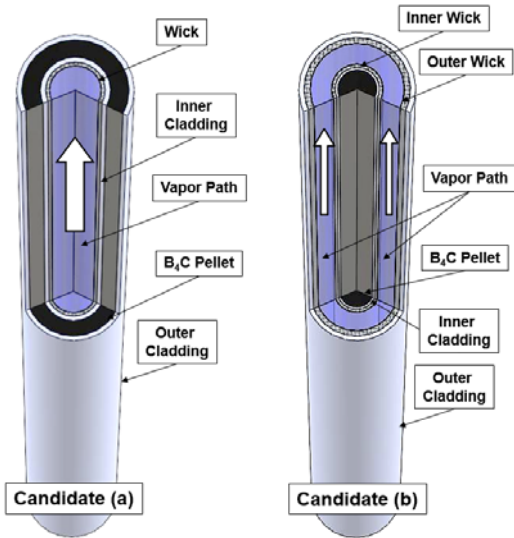


Fig. 3 Sectional view of hybrid heat pipe candidate (a) and (b)

보한 설계를 나타낸다.

제어봉과 결합된 하이브리드 히트파이프의 내부에 삽입된 B₄C 펠릿에 대해 (a) 중심부에 원통형으로 삽입되어 동심형의 증기 통로를 가지는 형태; (b) 튜브 형태로 삽입되어 중심부에 원형의 증기 통로를 가지는 형태인 두 가지로 설계될 수 있다. Fig. 3은 두 가지 형태의 설계 후보군의 내부 구조에 대한 단면도를 보여준다. 각 후보군은 서로 동일한 반응도 제어능력을 가진다고 가정한다.

3. 형상 및 수치해석 방법

3.1 형상 및 해석 조건

Table. 1은 히트파이프에 CFD 해석 적용 검증을 위해 수행되었던 관형 히트파이프와 하이브리드 히트파이프의 형상 조건 및 경계 조건을 나타낸다.

관형 히트파이프와 하이브리드 히트파이프의 해석 형상은 실제 제어봉과 동일한 외경을 가진다. 증발부와 단열부, 응축부 사이의 길이 비는 원자로 압력용기 기준, 열이 발생하는 노심 부분과 응축부가 될 수 있는 상부 플레넘, 이외 부분의 길이 비를 적용하여 총 길이 1000 mm에서 350 mm : 150 mm : 500 mm으로 각각 설정하였다. 응축부는 주변에 워터 자켓을 설치한 실험 조건과 동일하게 11 °C의 물이 0.3 kg/s의 유량 조건을 가진다. 히트파이프 내부 설치된 워 구조에 대해서 실험에서 사용된 다공성(ϵ , porosity) 0.62, 투과성(K , permeability) $1.93 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ 을 가지는 SS wire 100-mesh에 해당하는 조건을 설정하였다.⁽⁷⁾

작동 유체는 물로 설정되어 증발부 부피에 대해 작동 유체가 차지하는 부피를 의미하는 fill ratio를 100%에 해당

Table. 1 Geometry and Boundary Condition of tube type heat pipe and hybrid heat pipe (a) and (b)

Parameter		Value
Total length		1000 [mm]
Length ratio (Evaporator:Adiabatic:Condenser)		350 : 150 : 500 [mm]
Outer Cladding OD		19.05 [mm]
Cladding thickness		0.866 [mm]
B ₄ C pellet OD (for case (a) of hybrid heat pipe)		8.36 [mm]
Vapor path OD (for case (b) of hybrid heat pipe)		8.36 [mm]
Wick	Type	SS 100-mesh
	Thickness	1 [mm]
	Porosity[7]	0.62
	Permeability[7]	$1.92 \times 10^{-10} \text{ [m}^2\text{]}$
Condenser type		Water jacket (11 °C, 0.3 kg/s)
Working fluid		Water
Fill ratio		100 [%]

하는 물이 증발부에 차있는 조건으로 선정하여 해석이 수행되었다.

관형 히트파이프에 대해서 이와 동일한 형상과 조건으로 실험이 수행되어 결과와 비교되었다. 관형 히트파이프와 하이브리드 히트파이프 설계 후보군 해석에서 내부 구조 이외의 조건은 모두 동일하게 설정되어 추후 이루어질 검증 실험에 대하여 참고 자료가 될 수 있도록 설정하였다.

3.2 수치 해석 방법

본 연구에서는 관형 히트파이프의 성능 및 제어봉과 결합된 하이브리드 히트파이프의 성능을 분석하기 위하여 상용 CFD 코드인 ANSYS-CFX을 사용하여 수치해석을 위한 계산을 수행하였다.

Fig. 4는 본 연구에 적용한 관형 히트파이프 및 하이브리드 히트파이프의 계산 격자 모습을 보여준다. 격자는 ANSYS Meshing을 사용하여 생성하였으며, 관형 히트파이프와 하이브리드 히트파이프에 대해서 전체 유동 해석 도메인을 구성하였다. 상변화로 인한 열전달이 일어나는 증기 통로에 대해 5겹의 prism mesh를 쌓아 요소를 조밀하게 구성하였다.

히트파이프 내부의 유동장과 열전달을 계산하기 위해서 지배방정식으로 질량 보존방정식, 압축성 Reynolds Averaged Navier Stokes Equation, 에너지 방정식을 사용하고, 난류 모델로 SST 모델을 사용하였다. 상변화를 동반한 내부 이상 유동을 해석하기 위해서 ANSYS-CFX에서 제공하는 inter-

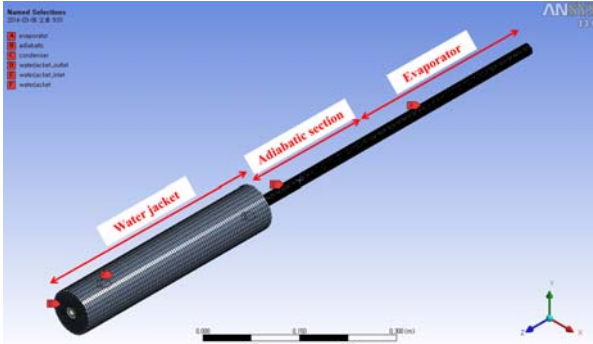


Fig. 4 Schematic of numerical grids and domain of hybrid heat pipe

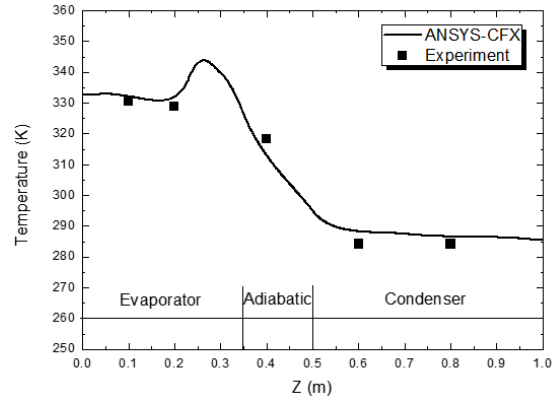


Fig. 5 Wall temperature distribution of heat pipe (L=1000 mm, OD=19.05 mm, Q=150 W)

phase transfer 모델로 1 mm 길이 scale의 mixture model 과, 질량 전달에 대해서는 지정된 포화 온도에서 thermal phase change 조건을 설정하였다. 포화 온도는 히트파이프 작동 압력을 포화 압력으로 가지도록 설정하였다. 상 간 열 전달은 two resistance 모델을 사용하였다. 식 (1)은 상 α 에 대한 운동량 방정식을 나타낸다.⁽⁸⁾

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha U_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha (\rho_\alpha U_\alpha \otimes U_\alpha)) \\ = -r_\alpha \nabla \rho_\alpha + \nabla \cdot (r_\alpha \mu_\alpha (\nabla U_\alpha + (U_\alpha)^T)) \\ + \sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ U_\beta - \Gamma_{\beta\alpha}^- U_\alpha) + S_{M\alpha} + M_\alpha \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서 r_α 는 상 α 의 부피율, $\Gamma_{\alpha\beta}$ 는 상 β 에서 상 α 로 전달되는 단위 부피당 유량을, M_α 는 다른 상이 존재함에 따라 상 α 에 작용하는 계면력을 의미한다.

윅 구조 내부 유동을 모사하기 위해서 일반적으로 널리 사용되는 방법인 윅 영역을 다공성 물질(porous media)로 처리하는 방법을 적용하였다. ANSYS-CFX에서는 다공성 매질에 대해서 등방 손실 모델(isotropic loss model)을 사용하여 i 방향 운동량 손실항을 식 (2)와 같이 정의하고, 이에 따른 부피 다공률 γ 와 투과율 K 에 따른 질량보존 방정식과 운동량 보존방정식은 식 (3), (4)와 같이 정의한다.⁽⁸⁾

$$S_{M,i} = -\frac{\mu}{K} U_x - K_{loss} \frac{\rho}{2} |U| U_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \gamma \rho + \nabla \cdot (\rho K \cdot U) = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\gamma \rho U) + \nabla \cdot (\rho (K \cdot U \otimes U)) \\ - \nabla \cdot (\mu_e K \cdot (\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot U)) = \gamma S_M - \gamma \nabla p \end{aligned} \quad (4)$$

K 는 투과성(permeability), K_{loss} 는 2차 손실항(quadratic loss coefficient)를 의미하고, 이는 동압 수두(dynamic

head)에 대한 압력구배를 의미한다. U 는 실제 속도, μ_e 는 유효 점성도, S_M 은 운동량 생성항을 나타낸다.

이에 따라 CFD 해석 검증을 위한 관형 히트파이프의 해석 및 제어봉과 결합된 하이브리드 히트파이프의 냉각 성능 평가를 위한 CFD 해석이 진행되었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 관형 히트파이프의 CFD 해석

하이브리드 히트파이프의 성능 해석에 앞서, 히트파이프의 CFD 해석에 대한 검증을 위하여 관형 히트파이프에 대한 해석이 수행되었고, 이와 동일한 조건으로 수행된 실험 결과와 비교하여 해석의 신뢰성 검증 과정을 진행하였다. Fig. 5는 관형 히트파이프에 대하여 외벽 온도에 대하여 수행된 실험 측정값과 계산 결과 값의 비교를 나타낸다.

150 W 열유입 조건에서 관형 히트파이프의 계산 결과와 실험 결과가 타당한 범위 내에서 일치하는 것을 확인하여 히트파이프의 CFD 해석 능력을 검증할 수 있었다. 증발부 말단에서 계산 결과 온도가 상승하는 경향은 상변화 완료 후 벽면의 열유속이 직접적으로 증기로 전달되어 벽면 온도가 포화온도 근처에서 형성되지 않고 국소적인 과열상태가 일어난 것이라 해석할 수 있다. 이 부분의 비교를 위해서는 실험 장치에서 더 조밀한 측정점과 히트파이프 내부 벽면 근처 증기온도의 측정이 필요하며, 전체적으로 히트파이프의 전체적인 평균 온도에 대해서는 동일한 경향을 보였다.

4.2 하이브리드 히트파이프의 CFD 해석

하이브리드 히트파이프는 삽입되는 B₄C 펠렛의 형태에 따라 내부 구조를 다르게 가질 수 있는데, 앞서 언급하였던 (a)

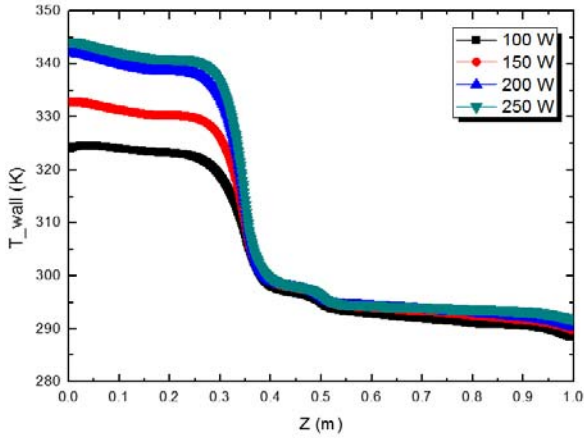


Fig. 6 Wall temperature distribution of hybrid heat pipe design candidate (a) as a function of heat input

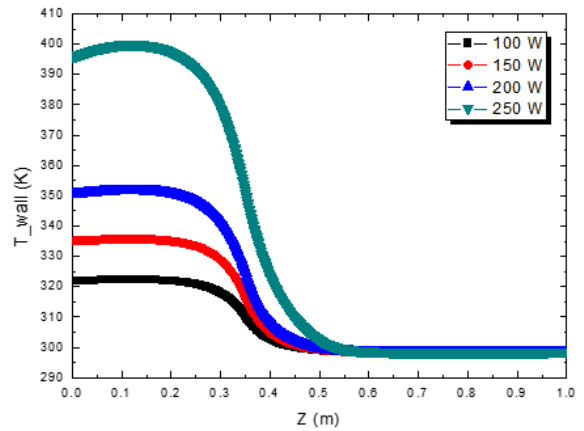


Fig. 8 Wall temperature distribution of hybrid heat pipe design candidate (b) as a function of heat input

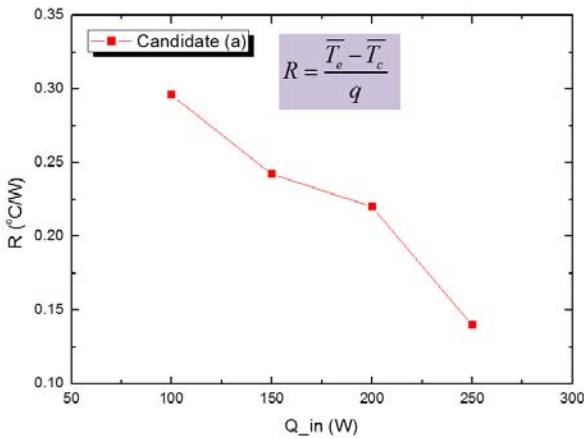


Fig. 7 Thermal resistance of hybrid heat pipe design candidate (a) as a function of heat input

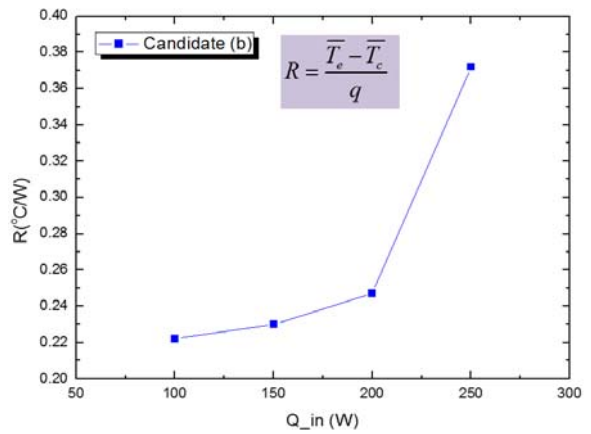


Fig. 9 Thermal resistance of hybrid heat pipe design candidate (b) as a function of heat input

튜브형 B₄C 펠릿이 삽입되어 증심부에 원형 증기통로를 가지는 형태와 (b) 원통형 B₄C 펠릿이 삽입되어 동심형 증기통로를 가지는 형태인 두 가지 설계 디자인을 가질 수 있다. 본 연구에서는 앞서 수행되었던 관형 히트파이프의 CFD 해석과 실험을 비교하여 얻은 해석 검증용 기반으로 하여 두 가지 설계 형태에 대해서 열유입 100 W, 150 W, 200 W, 250 W의 경우에 대한 CFD 해석을 진행, 냉각 성능을 비교하였다. 성능 분석에는 히트파이프의 열전달 능력을 평가할 수 있는 지표인 열저항을 사용하였고, 이는 식 (5)와 같이 증발부 평균 온도(\bar{T}_e)와 응축부 평균 온도(\bar{T}_c)로 계산할 수 있다.

$$R = \frac{\bar{T}_e - \bar{T}_c}{q} \quad (5)$$

4.2.1 Candidate (a)

하이브리드 히트파이프 설계 후보군 (a)에 대하여 CFD 계

산을 수행하였다. Fig. 6은 설계 후보군 (a)에 대하여 다양한 열유속 조건에 대한 외벽 온도 분포를 나타낸다. Fig. 7은 이에 따라 계산된 하이브리드 히트파이프 설계 후보군 (a)에 대한 열저항을 나타낸다. 증발부 외벽 온도는 100 W부터 열유입이 커질수록 더 높아지는 경향을 보였다. 또한 열저항이 열유입이 커질수록 작아지는 것을 보아, 증발부에서 흡수한 열에 대해 응축부에서 열 방출이 충분히 이루어지며 히트파이프를 통한 열제거가 이루어짐을 확인하였다.

4.2.2 Candidate (b)

하이브리드 히트파이프 설계 후보군 (b)에 대하여 CFD 계산을 수행하였다. Fig. 8은 다양한 열유속 조건에 대한 외벽 온도 분포를 나타낸다. Fig. 9는 이에 따라 계산된 하이브리드 히트파이프 설계 후보군 (b)에 대한 열저항을 나타낸다. 설계 후보군 (b)의 해석 결과 열유입이 커질수록 외벽 온도가 커지는 것을 확인할 수 있었다.

특히, 250 W 조건일 때, 설계 후보군 (b)의 외벽 온도가 크게 증가하는 경향을 나타내었다. 외벽 온도 분포가 증발부에 대해서 Fig. 7과 같은 모양을 이루고 있는 것으로 보아, 250 W는 길이 1 m의 하이브리드 히트파이프에 대해서 설계에 따른 열전달 한계점 중 비등한계를 넘는 값임을 판단할 수 있고, 이는 히트파이프를 통해 열제거가 원활히 이루어지지 않음을 의미한다. 이는 열유입이 250 W에 도달했을 때 열저항이 급격하게 커지는 경향으로도 확인할 수 있었다.

5. 결 론

후쿠시마 사고 이후 원자로 정지 후 피동형 잔열제거계통의 필요성이 대두됨에 따라, 열전달 효율이 높고 작동에 대해서 완전 피동형의 특성을 가지는 히트파이프와 제어봉을 결합한 하이브리드 히트파이프 냉각계통의 개념을 제안하였다. 제어봉과 결합된 하이브리드 히트파이프는 사고 시 중력에 의해 자동으로 낙하하는 제어봉과 결합되어 원자로 내부 반응도를 제어하고 원자로 안전정지의 역할을 할 뿐만 아니라, 내부 작동유체의 상변화에 따른 효율적인 열전달로 정지 후 발생하는 잔열을 노내에서 직접 제거할 수 있는 이점을 가지고 있다. 이에 따른 하이브리드 히트파이프의 냉각 성능을 평가하기 위해서 상용 CFD 코드인 ANSYS-CFX를 이용하여 계산이 이루어졌고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 히트파이프의 CFD 해석 검증은 위하여 동일 조건의 실험이 수행되어 결과가 비교되었다. 외벽 온도 분포에 대해 계산 결과와 실험 측정 결과가 타당한 범위 내에서 일치하는 것으로 보아, 히트파이프의 성능 분석에 CFD 해석 방법 및 이후 수행될 성능 분석에 대한 검증이 이루어졌다.
- 2) 하이브리드 히트파이프의 설계 후보군 (a)와 (b)에 대해서 다양한 열유입 조건에 대해서 외벽 온도 분포 및 열저항 경향을 통해 냉각성능이 분석되었다. 하이브리드 히트파이프의 설계 조건에 따라 열유입에 따른 열저항의 경향이 달라짐을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 국책연구사업임 (No. 2013M2A8A1041442)

References

- (1) Mochizuki, M., Nguyen, T., Singh, R., Nguyen, T., Sugihara, S., Mashiko, K., Saito, Y., and Wuttijumong, V., 2011, "Nuclear Reactor Must Need Heat Pipe for Cooling", *Frontiers in Heat Pipes*, Vol. 2, 033001.
- (2) Reav, D. A., Kew, P. A., 2006, "Heat Pipes", Elsevier, Atlanta, pp 29~30.
- (3) Singh, R., Mochizuki, M., 2011, "Heat Pipe Based Emergency Cooling System for Removing Decay Heat from Nuclear Power Reactor and Spent Fuel Pool", *Japan Association of Heat Pipe Meeting*, Tokyo, Japan.
- (4) Mochizuki, M., Singh, R., and Nguyen, T., 2014, "Heat Pipe Based Passive Emergency Core Cooling System For Safe Shtutdown of Nuclear Power Reactor", *Applied Thermal Engineering*, doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.07.004.
- (5) Sviridenko, I. I., 2008, "Heat Exchangers Based on Low Temperature Heat Pipes for Autonomous Emergency WWER Cooldown Systems", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, pp. 327~334.
- (6) 남경호, 박준석, 김상녕, 2013, 다발형 써모사이폰을 적용한 APR1400 격납건물 피동냉각계통 개념설계, 대한기계학회 2013년도 학술대회, pp. 3434~3439.
- (7) Mwaba, M. G., Huang, X., and Gu, J., 2006, "Influence of Wick Characteristics on Heat Pipe Performance", *International Journal of Energy Research*, Vol. 30, pp. 489~499.
- (8) ANSYS, 2012, "ANSYS CFX user guide".
- (9) from google image.