

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2026.34.1.026>
 ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

스크램제트 엔진 재생냉각 채널에서 가열 벽면 위치에 따른 JP-8 모사연료의 초임계 열전달 특성

고상호*, 길유창**, 박성우***

Supercritical Heat Transfer Characteristics of a JP-8 Surrogate Fuel in a Scramjet Regenerative Cooling Channel under Different Heated-Wall Locations

Sangho Ko*, Yuchang Gil**, Sungwoo Park***

ABSTRACT

Scramjet engines operating under hypersonic conditions require regenerative cooling using jet fuel to mitigate severe thermal loads. Under supercritical conditions, pronounced variations in thermophysical properties can significantly alter the flow and heat transfer behavior. In this study, the supercritical heat transfer characteristics of JP-8 fuel in a scramjet regenerative cooling channel were numerically investigated using a surrogate fuel formulated via a genetic algorithm. At an operating pressure of 3 MPa, abrupt changes in density and specific heat near the pseudo-critical temperature induce buoyancy effects, leading to buoyancy-driven rotational and secondary flows. The flow and heat transfer characteristics were found to be highly dependent on the heated wall location. In the side-wall heating case, asymmetric rotational flow and isolated dead zones were observed, which were associated with locally unfavorable heat transfer performance. In contrast, the bottom- and top-wall heating cases exhibited enhanced secondary flow development and improved flow mixing. Although the total heat absorbed by the fuel remained similar across all cases, the wall temperature distributions varied markedly depending on the heating configuration. These results demonstrate that buoyancy-driven flow structures play a critical role in determining supercritical heat transfer behavior in regenerative cooling channels.

Key Words : Genetic Algorithm(유전 알고리즘), Surrogate Fuel(모사연료), Supercritical(초임계), Regenerative Cooling Channel(재생 냉각 채널), Buoyancy(부력)

1. 서 론

스크램제트 엔진을 적용한 극초음속 비행체는 비행

중 공력가열로 인한 동체 표면 온도 상승과 더불어 엔진 내부에서도 연소 및 고속 유동에 의해 심각한 열하중에 노출된다(Han et al., 2025). 이러한 고온 환경은 엔진 성능 저하뿐만 아니라 구조 건전성과 운용 안정성에도 직접적인 영향을 미치므로, 효과적인 열관리 기술이 필수적으로 요구된다(Zhu et al., 2018). 이와 같은 열관리 문제를 해결하기 위한 방법 중 하나로 재생냉각 채널이 활용되며, 제트연료를 연소 이전에 냉매로 사용하여 엔진 내부에서 발생하는 열을 흡수함으로써 열하중을 완화한다(Bao et al., 2010).

Received: 28. Jan. 2026, Revised: 19. Feb. 2026,

Accepted: 10. Mar. 2026

* 한국항공대학교 항공우주및기계공학과

** 한국항공대학교 스마트항공모빌리티학과

*** 한국항공대학교 항공우주및기계공학부

연락처자 E-mail : sungwoo.park@kau.ac.kr

연락처자 주소 : 경기도 고양시 덕양구 항공대학로 76

한국항공대학교

극초음속 비행 조건에서 재생냉각 채널 내부의 연료는 고온·고압 환경에 놓이게 되며, 이로 인해 임계점을 초과하여 초임계 상태로 전환될 수 있다. 초임계 상태의 연료는 기존 액체 연료와 다른 유동 및 열전달 특성을 나타내며, 이는 냉각 성능과 연료 공급 특성에 영향을 미칠 수 있다(Huang et al., 2016; Xie et al., 2022). 따라서 재생냉각 채널 내 초임계 연료 거동을 이해하는 것은 스크램제트 엔진의 안정적인 운용과 신뢰성 확보를 위해 중요하다.

한편, 실제 운용 환경에서는 중력에 의해 부력이 발생하며, 이는 연료 유동 특성에 영향을 미친다(Huang and Li, 2018). 상대적으로 밀도가 낮은 연료가 채널 상부로 이동하면서 유동 비대칭성이 강화될 수 있고, 이 과정에서 열전달이 저하되는 영역이 나타나 열전달 열화(heat transfer deterioration, HTD)가 발생할 수 있다(Sun et al., 2019). 또한, 연료 질량 유량과 벽면 열 유속 조건에 따라 냉각 성능은 크게 달라질 수 있으므로(Li et al., 2021), 다양한 운용 조건을 고려한 채널 내부 유동 및 열전달 특성에 대한 체계적인 분석이 필요하다.

기존 연구에서는 *n*-decane과 같이 제트연료를 대체할 수 있는 단일 화학종을 활용한 연구가 주로 수행되어 왔다(Li et al., 2019; Li et al., 2020; Chen et al., 2021). 그러나 Jet-A 및 JP-8과 같은 실제 제트연료는 복잡한 혼합물로서 온도 변화에 따른 급격한 물성치 변화뿐만 아니라 연료를 구성하는 탄화수소의 종류와 조성에 따라 유동 및 열전달 특성이 크게 달라질 수 있어, 단일 화학종만으로 실제 연료 거동을 정밀하게 모사하는 데에는 한계가 있다. 이에 따라 전산해석에서는 소수의 대표 탄화수소로 구성된 모사연료를 도입하여 화학 조성을 단순화하면서도 실제 연료의 주요 물성을 효과적으로 재현하고, 해석 결과의 신뢰도를 향상시킬 수 있는 접근이 필요하다(Dooley et al., 2010).

또한 실제 스크램제트 엔진 재생냉각 채널에서는 연료 물성뿐만 아니라 채널 형상 및 가열 조건이 초임계 열전달 거동에 중요한 영향을 미친다. 스크램제트 엔진 연소실은 Fig. 1에 도시된 바와 같이 사각 단면으로 구성되며, 이를 둘러싸는 재생냉각 채널의 배치에 따라 채널 내 가열 벽면의 위치가 달라진다(Luo et al., 2021). 그러나 가열 벽면 위치 변화가 초임계 유동 구조 및 열전달 분포에 미치는 영향에 대한 체계적인 연구는 아직 제한적이다. 이에 본 연구에서는 JP-8 모사연료를 적용하여 재생냉각 채널 내 초임계 열전달 거

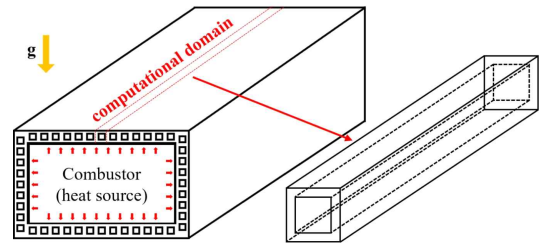


Fig. 1. Schematic of the regenerative cooling channel

동을 해석적으로 분석하고, 가열 벽면 위치 변화에 따른 유동 구조 변화와 열전달 특성을 비교하여 냉각 성능 관점의 시사점을 제시하고자 한다.

II. 모사연료 구성

2.1 모사연료 구성 방법

본 연구에서는 기존 연구와 동일한 방식으로 모사연료를 구성하기 위해 유전 알고리즘 기반의 최적화 기법을 적용하였다(Son et al., 2026). 알고리즘 내 화학종 선택 과정에서 조성은 체계적으로 탐색할 수 있도록 실제 연료의 특성을 모사 가능한 화학종 후보군(surrogate palette)을 구성하였다. 후보군은 *n*-alkanes, *iso*-alkanes, *cyclo*-alkanes 및 aromatics의 네 가지 계열로 분류된 총 16종의 화학종으로 구성되며, 이는 제트연료를 구성하는 주요 화학종 계열을 대표하도록 선정되었다.

알고리즘에서 개체를 선별하기 위한 목적함수의 평가 항목은 Table 1에 제시한 바와 같이 MW(분자량), DCN(유도세탄가), LHV(저위발열량), TSI (threshold sooting index) 및 H/C ratio와 함께 298.15 K, 1

Table 1. Objective functions used in genetic algorithm optimization

Objective function 1	Objective function 2
MW	5 temperature points on the distillation curve
DCN	
LHV	
TSI	
H/C ratio	
Density (298.15K, 1 atm)	

atm에서의 밀도와 증류곡선 상 5개 온도 지점을 포함하여 구성하였다. 또한 각 평가 항목에 대해 목표 연료와의 물성 차이가 최소화되도록 최적화를 수행함으로써 JP-8 연료의 특성을 반영한 모사연료 조성을 확정하였다.

모사연료 구성 과정에서는 각 계열에서 한 개의 화학종을 무작위로 선택하여 초기 조성을 생성한 후, 최적화 과정을 통해 물성치 오차가 최소화되는 물질을 조합을 결정하였다. 화학종 후보군과 목적함수 평가 방법 등 유전 알고리즘의 세부 적용 절차는 선행 연구에 상세히 제시되어 있다(Son et al., 2026).

2.2 모사연료의 물성치

재생냉각 채널 내 열전달 현상을 정밀하게 분석하기 위해서는 온도에 따라 변화하는 연료 물성치의 영향을 고려하는 것이 중요하다. 밀도, 점도, 열전도도 및 비열과 같은 온도 종속적인 물성치는 연료가 가열되면서 나타나는 유동 구조 변화와 열전달 특성에 지배적으로 작용한다.

이에 본 연구의 유전 알고리즘 기반 모사연료 구성 과정에서는 분자량, 저위발열량 등 온도에 독립적인 특성뿐만 아니라, 온도에 종속적인 물성치(밀도 등)도 함께 고려하여 실제 제트연료의 특성을 재현하고자 하였다. 구성된 JP-8 모사연료의 조성은 Table 2에 제시하였으며, Table 3과 같이 주요 물성치를 계산하여

Table 2. Chemical compositions of surrogate fuel

Species	Mole fraction
<i>n</i> -Tetradecane	0.344
<i>iso</i> -Dodecane	0.244
Decalin	0.197
1,2,4-Trimethylbenzene	0.213

Table 3. Properties of jet fuels and surrogate fuel

Properties	JP-8	Surrogate fuel
MW [kg/kmol]	161.0	162.6
DCN	50.1	50.1
LHV [MJ/kg]	43.3	43.3
TSI	23.0	22.9
H/C ratio	1.93	1.96

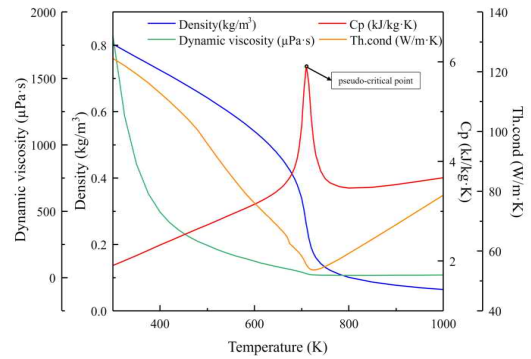


Fig. 2. Thermophysical properties of JP-8 surrogate fuel

Shrestha 등(2014)이 보고한 실제 JP-8 실험값과 비교한 결과, 물성치 차이는 2% 이내로 나타났다.

또한 화학 조성을 바탕으로 NIST SUPERTRAPP을 이용하여 온도 종속 물성치를 산정하였다(Huber, 2007). 먼저 300~1,000 K 범위에서 20 K 간격으로 물성치를 계산하고, 변화가 급격한 구간에서는 온도 간격을 추가로 세분화하여 총 50개 지점의 값을 확보하였다. 그 결과, Fig. 2에 나타난 바와 같이 본 연구에서 적용한 작동 압력 3 MPa는 JP-8의 임계 압력(2.34 MPa)보다 높은 조건이며(Edwards, 2002), 모사연료의 유사 임계온도(T_{pc})인 약 710 K 부근에서 물성치가 급격히 변화한다. 이러한 물성치 변화는 재생냉각 채널 내 유동 구조와 열전달 거동에 직접적인 영향을 미치므로, 본 연구에서는 열유동 특성을 정밀하게 예측하기 위해 계산된 온도 종속 물성치를 열전달 해석에 적용하였다.

III. 열전달 해석

3.1 채널 형상 및 격자 구성

해석에 사용된 채널 형상은 스크램제트 엔진의 재생냉각 채널을 모사한 것으로, 사각 단면 채널로 구성하였다. 계산 영역은 Zhang 등(2016)이 제안한 형상을 참고하여 설정하였으며, 채널의 내측 변 길이는 2 mm, 외측 변 길이는 3 mm로 정의하여 벽 두께는 0.5 mm이다. 시험 구간(test section)의 길이는 열전달이 충분히 발달하도록 1,000 mm로 설정하였고, 유동의 발달과 안정화를 고려하여 시험 구간 전후에 각각 150 mm 길이의 입구(inlet) 및 출구(outlet) 구간을 추가하였다. 채널 형상에 대한 개략도는 Fig. 3에 제시하였다.

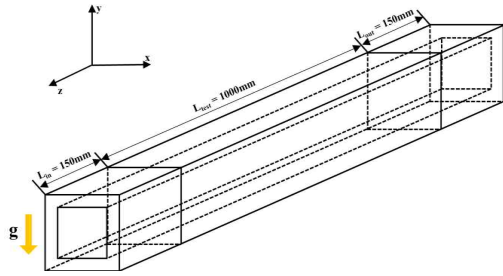


Fig. 3. Schematic of the geometric model

격자 생성을 위해 ANSYS meshing을 사용하였으며, 유동 경계층에서의 정밀한 해석을 위해 벽면 인접 영역의 무차원 거리인 y^+ 가 1 이하($y^+ \leq 1$)를 만족하도록 첫 층 격자 두께(first layer thickness)를 $9.65 \times 10^{-7}m$ 로 설정하였다. 유동 진행 방향인 z 축 방향에는 0.3 mm의 균일 격자 간격을 적용하였으며, 전체 계산 영역은 약 2,300만 개의 격자로 구성되었다.

3.2 수치해석적 기법 및 경계조건

채널 내 유동 및 열전달 특성을 해석하기 위해 전산 유체해석 프로그램인 ANSYS Fluent 2021R1을 사용하였다. 수치해석 설정은 Zhang 등(2016)이 제시한 조건을 참고하여 Table 4와 같이 적용하였으며, 모든 잔차(residual)가 10^{-5} 이하에 도달할 때까지 계산을 수행하였다.

경계조건은 선행연구의 조건을 참고하여 설정하였다(Heiser and Pratt, 1994). 작동 압력은 JP-8의 임계 압력(2.34 MPa)보다 높은 3 MPa로 설정하여 초임계 압력 조건을 확보하였다. 스크램제트 엔진의 항속 조건에서의 재생냉각 채널 환경을 고려하여 열유속을 $2.5 MW/m^2$, 질량유량을 $0.005 kg/s$ 로 설정하였다. 열유속은 Fig. 4와 같이 a) 측면 벽면 가열, (b) 하부 벽면 가열, (c) 상부 벽면 가열의 세 가지 경우로 구분하여 벽면에 부여하였다. 측면 벽면 가열의 경우 좌측 또는 우측 어느 한쪽을 가열하더라도 유동 및 열전달 특성

Table 4. Numerical setup and models

Numerical setup	Model
해석 조건	3-D, 정상 상태
해석 기법	SIMPLEC
난류 모델	SST k- ω

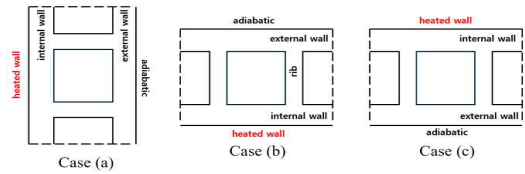


Fig. 4. Schematic diagram of computational domain

이 좌우 대칭적으로 나타남을 확인하였으며, 이에 해석의 일관성과 효율성을 고려하여 좌측 벽면 가열 조건에 대해서만 수치해석을 수행하였다. 열이 인가되지 않는 나머지 외벽은 모두 단열 조건으로 설정하였고, 벽재질은 SUS 304로 설정하여 해당 재료의 열물성을 반영하였다. 또한, 실제 재생냉각 시스템에서 다수의 채널이 나란히 배치되는 특성을 고려하여, 해석 영역의 횡 방향 경계에는 주기(periodic) 조건을 적용하였다. 중력 효과를 고려하기 위해 중력 가속도는 $-y$ 방향으로 작용하도록 설정하였다.

IV. 결 과

4.1 초임계 유체의 물성 변화 특성

Fig. 2에 나타낸 바와 같이, 작동 압력이 작동 유체의 임계 압력 이상인 경우 유사임계온도(pseudo-critical temperature) 부근에서 물성치가 급격히 변화한다. 유사임계온도 이하 구간에서는 상대적으로 높은 밀도와 점도 특성으로 인해 액체와 유사한(liquid-like) 거동을 보이는 반면, 유사임계온도 이상 구간에서는 밀도와 점도가 감소하며 증기와 유사한(vapor-like) 거동으로 전이된다. 따라서 재생냉각 채널 내 유동에서 밀도 구배의 변화를 분석함으로써 물성 급변이 나타나는 위치를 파악할 수 있다.

Fig. 5는 하부 벽면 가열 조건(Case (b))에서 채널 중앙면($x=0$)의 YZ 평면에서의 밀도 및 온도 분포를 나타낸다. Fig. 5의 결과에 따르면, JP-8 모사연료의 유사임계온도인 약 710 K 부근에서 벽면 인접 영역의 밀도가 급격히 감소하는 경향이 나타난다. 또한, 하부 벽면 가열 조건임에도 불구하고, 벽체 전도에 의해 상부 벽면 인근 유동 역시 일부 가열되는 현상이 관찰된다. 이로 인해 벽면 인접 영역에서 먼저 밀도가 감소하기 시작하며, 하류로 진행됨에 따라 벽면 유동과 중심

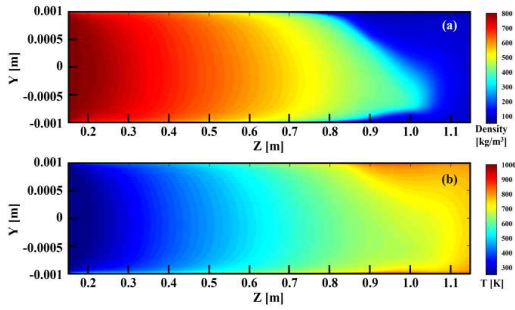


Fig. 5. YZ-plane contours for the bottom heating case: (a) density, (b) temperature

유동이 혼합되어 단면 전반에 걸쳐 고온-저밀도 유동으로 전환되는 특성이 나타난다.

4.2 부력 효과

일반적으로 밀도 구배가 존재하는 유동장에서 중력이 작용하면 부력에 의해 상대적으로 밀도가 낮은 유체가 상승한다. 이러한 부력 효과는 재생냉각 채널 내에서도 나타난다. 벽면 가열에 따라 하부 벽면 인접 영역의 유동이 우선적으로 가열되며, 유사임계온도를 초과하는 구간에서 밀도가 급격히 감소한다. 이때 형성된 저밀도 유체는 부력에 의해 채널 상부 방향으로 이동하므로, 직접적으로 가열되지 않은 상부 영역에서도 저밀도 유동이 상대적으로 두드러지게 나타난다.

부력 효과의 영향은 유동 발달 정도에 따라 서로 다른 양상으로 나타난다. 초기 구간에서는 벽면 인접 영역만이 유사임계온도인 710 K를 초과하여 중심부와 벽면 인접 영역 사이에 큰 밀도 차이가 형성되며, 이로 인해 혼합이 제한된다. 반면 충분히 발달한 하류 구간에서는 가열된 유체가 단면 전반에서 유사임계온도를 초과하면서 채널 내부에 저밀도 영역이 확장되고, 밀도 분포가 상대적으로 균일해지는 경향을 보인다. 이처럼 온도에 따라 달라지는 물성 변화는 채널 내 유동 비대칭성과 열전달 특성에 직접적인 영향을 미친다.

4.3 가열 벽면 위치에 따른 비교

가열 벽면의 위치에 따른 재생냉각 채널 내부 유동 및 열전달 특성의 차이를 분석하기 위해, YZ 평면과 XY 평면에서의 유동 구조를 case 별로 비교하였다. 앞선 절에서 논의한 바와 같이, 국부적인 밀도 차이에 의한 부력 효과는 모든 case에서 공통적으로 나타났지

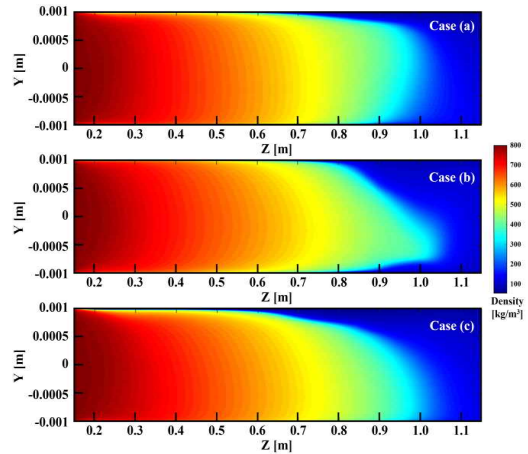


Fig. 6. Density distribution on the YZ-plane

만, 가열 벽면의 위치에 따라 저밀도 유동의 이동 경로와 유동 구조가 달라지면서, 밀도 분포의 비대칭성이 서로 다른 양상으로 형성되었다.

Fig. 6의 YZ 평면 결과에 따르면 가열 벽면 인접 유동이 투입되는 열유속에 의해 우선적으로 가열되며, 이 과정에서 저밀도 유동이 형성된다. 이후 저밀도 유동은 부력에 의해 상부로 이동하고, 이에 따라 채널 단면 내 유동 분포가 비대칭적으로 변화한다. 이러한 상승 유동의 형성 위치는 가열 벽면의 위치에 의해 결정되므로, case에 따라 밀도 분포 및 유동 구조의 차이가 나타난다.

유동 진행 방향에 따른 특성을 비교하기 위해 Fig. 7에 XY 평면의 밀도 분포 및 유선을 도시하였다. 부력의 영향으로 가열 벽면 부근에서 형성된 고온-저밀도 유동이 상부로 이동하면서 횡방향 순환 유동(secondary flow)이 유도되며, 이는 채널 내부 유동의 혼합 특성에

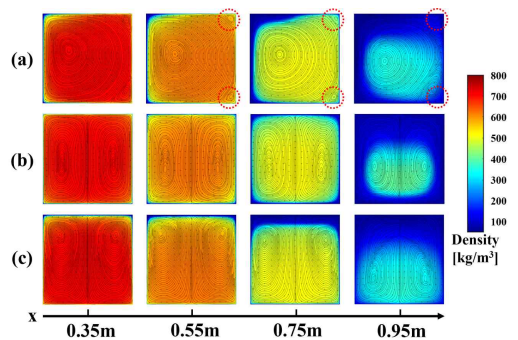


Fig. 7. Density contours and streamlines on the XY-plane at selected axial positions (z=0.35-0.95m)

Table 5. Area fraction of mixing-limited region

Z [m]	Area fraction [%]			
	0.35	0.55	0.75	0.95
Case (a)	3.39	2.76	2.26	3.78
Case (b)	1.12	1.03	1.29	0.92
Case (c)	0.32	0.32	0.39	2.05

영향을 미친다. 특히 case (a)의 경우, 좌측 벽면 가열에 의해 단면 내 비대칭적인 회전 유동이 형성되고, 이에 따라 채널 우측 모서리 부근에는 secondary flow가 충분히 발달하지 못하는 저혼합 영역이 형성된다. 본 연구에서는 이러한 영역을 dead zone으로 구분하였으며, 해당 영역에서는 유선이 주 순환 구조와 분리되어 모서리 부근에 고립되는 양상이 관찰된다(Chen et al., 2020). 반면 case (b)와 case (c)에서는 모서리 부근까지 secondary flow가 비교적 고르게 침투하여 dead zone이 뚜렷하게 나타나지 않았다.

이처럼 dead zone으로 인한 혼합 제한 영역을 정량적으로 평가하기 위해 아래 식과 같은 XY 단면 횡방향 속도 성분인 V_{xy} 를 도입하였다. 이때 각 단면에서 국부 V_{xy} 가 단면 평균값의 10% 이하인 영역을 혼합 제한 영역으로 정의하고, 해당 영역의 단면 대비 면적 비율을 Fig. 7과 같은 위치에서 산정하여 Table 5에 정리하였다.

$$V_{xy} = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1)$$

분석 결과, Case (a)에서 국부 V_{xy} 가 낮은 영역의 비율이 가장 크게 나타나 혼합이 상대적으로 제한됨을 확인하였다. 반면 case (b)와 case (c)에서는 secondary flow 중심부의 분포 및 강도 차이에 따라 혼합 제한 영역의 면적 비율이 다르게 나타났으며, 전반적으로 case (a)에 비해 낮은 값을 보였다. 이를 통해 가열 벽면 위치에 따른 secondary flow 구조 차이가 단면 내 혼합 특성 및 dead zone 형성에 미치는 영향을 정량적으로 비교할 수 있었다.

이러한 유동 구조의 차이는 열전달 특성에도 직접적인 영향을 미치며, 이는 Fig. 8에 제시된 벽면 온도(wall temperature)와 평균 온도(bulk temperature) 분포를 통해 확인할 수 있다. 여기서 벽면 온도는 벽면 인접 유동의 온도를 평균한 값이며, 평균 온도는 채널 단면 전체 유동의 평균 온도를 의미한다. 해석 결과,

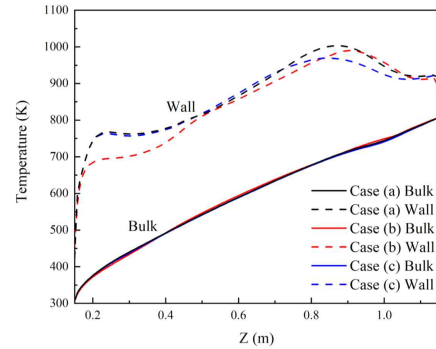


Fig. 8. Wall and bulk temperature distributions along the channel

유동 구조가 대칭적인 특성을 보이는 case (b)와 case (c)에서는 벽면 온도 분포에 차이가 나타났으나, 평균 온도는 세 case 모두에서 유사한 경향을 보였다.

한편, 벽면 온도의 최대값은 case (a), (b), (c)에서 각각 1003 K, 990 K, 969 K으로 나타났으며, dead zone이 가장 뚜렷하게 형성된 case (a)에서 가장 높은 값을 보였다. 이는 dead zone으로 인해 단면 내 혼합이 제한되면서 국부적인 열전달 저하가 발생하고, 그 결과 벽면 온도가 상승했음을 시사한다. 이로부터 채널에 인가된 열유속이 동일하더라도 가열 벽면 위치에 따라 유동 구조와 혼합 특성이 달라지며, 이에 따라 국부 고온 영역의 형성 위치와 분포가 변화하여 벽면 부근의 열거동이 상이하게 나타남을 확인할 수 있다.

V. 결론 및 고찰

본 연구에서는 스크래페트 엔진 재생냉각 채널에서 JP-8 연료의 초임계 열전달 특성을 분석하기 위해, 유전 알고리즘 기반으로 구성된 JP-8 모사연료를 적용한 수치해석을 수행하였다. 모사연료는 분자량, 밀도, 저위발열량 등 주요 연료 특성을 기준으로 실제 JP-8 연료의 특성을 재현하였으며, 문헌 대비 2% 이내의 오차를 확보하였다. 또한, NIST SUPERTRAPP을 이용해 산정한 온도 종속 물성치를 재생냉각 채널의 열전달 해석에 적용함으로써, 초임계 조건에서의 물성 변화가 유동 및 열전달 거동에 미치는 영향을 반영하였다.

작동 압력 3 MPa 조건에서 JP-8 모사연료는 유사 임계온도(약 710 K) 부근에서 밀도 및 점도의 급격한 변화를 보였으며, 이에 따라 유동 거동이 액체와 유사한 특성에서 증기와 유사한 특성으로 전이되는 양상이

나타났다. 특히 밀도 구배가 크게 형성되는 구간에서 부력 효과가 두드러졌고, 가열 벽면 위치에 따라 유동 구조와 열전달 특성이 상이하게 변화하였다. 하부 벽면 가열 조건에서는 벽면 인접 영역에서 형성된 고온저밀도 유동이 상부로 이동하면서 secondary flow가 유도되었으며, 결과적으로 단면 내 유동 혼합이 촉진되는 특성이 확인되었다. 반면 측면 벽 가열 조건에서는 단면 내 회전 유동이 강화되면서 주 유동과 분리되어 혼합이 제한되는 dead zone이 형성되었고, 이는 국부적인 열전달 저하 가능성을 증가시키는 요인으로 작용하였다.

이상의 결과는 재생냉각 채널 내 초임계 연료의 열전달 특성이 열유속 조건뿐만 아니라 가열 벽면 위치, 중력에 따른 부력 효과, 그리고 이에 의해 형성되는 2차 유동 구조에 의해 크게 영향을 받음을 보여준다. 따라서 스크램제트 엔진 재생냉각 시스템의 설계 및 해석 과정에서는 초임계 물성 변화와 함께, 가열 위치에 따른 유동 구조 변화 및 dead zone 발생 가능성을 종합적으로 고려해야 한다.

References

- Han, Z., Zhou, W., Zhao, X., and Jia, Z., "Experimental study on convective heat transfer characteristics of supercritical pressure RP-3 kerosene in serpentine tubes", *Applied Thermal Engineering*, 268, 2025, p.125954.
- Zhu, Y., Peng, W., Xu, R., and Jiang, P., "Review on active thermal protection and its heat transfer for airbreathing hypersonic vehicles", *Chinese Journal of Aeronautics*, 31, 2018, pp.1929-1953.
- Bao, W., Qin, J., Zhou, W. X., and Yu, D. R., "Effect of cooling channel geometry on re-cooled cycle performance for hydrogen fueled scramjet", *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 2010, pp.7002-7011.
- Xie, G., Xu, X., Lei, X., Li, Z., Li, Y., and Sunden, B., "Heat transfer behaviors of some supercritical fluids: A review", *Chinese Journal of Aeronautics*, 35(1), 2022, pp.290-306.
- Huang, D., Wu, Z., Sunden, B., and Li, W., "A brief review on convection heat transfer of fluids at supercritical pressures in tubes and the recent progress", *Applied Energy*, 162, 2016, pp.494-505.
- Huang, D., and Li, W., "A brief review on the buoyancy criteria for supercritical fluids", *Applied Thermal Engineering*, 131, 2018, pp.977-987.
- Sun, F., Li, Y., Manca, O., and Xie, G., "An evaluation on the laminar effect of buoyancy-driven supercritical hydrocarbon fuel flow and heat transfer characteristics", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 142, 2019, p.118414.
- Li, Y., Markides, C. N., Sunden, B., and Xie, G., "Heat transfer deterioration in upward and downward pipe flows of supercritical n-decane for actively regenerative cooling", *International Journal of Thermal Sciences*, 168, 2021, p.107066.
- Li, Y., Xie, G., and Sunden, B., "Flow and thermal performance of supercritical n-decane in double-layer channels for regenerative cooling of a scramjet combustor", *Applied Thermal Engineering*, 180, 2020, p.115695.
- Li, Y., Sun, F., Sunden, B., and Xie, G., "Turbulent heat transfer characteristics of supercritical n-decane in a vertical tube under various operating pressures", *International Journal of Energy Research*, 43, 2019, pp.4652-4669.
- Chen, Y., Li, Y., Liu, D., Sunden, B., and Xie, G., "Influences of accelerating states on supercritical n-decane heat transfer in a horizontal tube applied for scramjet engine cooling", *Aerospace Science and Technology*, 109, 2021, p.106424.
- Dooley, S., Won, S. H., Chaos, M., Heyne, J., Ju, Y., Dryer, F. L., et al., "A jet fuel surrogate formulated by real fuel properties", *Combustion and Flame*, 157, 2010,

- pp.2333-2339.
13. Luo, S., Xu, D., Song, J., and Liu, J., "A review of regenerative cooling technologies for scramjets", *Applied Thermal Engineering*, 190, 2021, p.116754.
 14. Son, J., Gil, Y., Ko, S., Shin, D., and Park, S., "Development of jet surrogate fuel formulated by genetic algorithm", *Fuel*, 408, 2026, p.137590.
 15. Shrestha, A., Zheng, Z., Badawy, Z., Henlein, N., and Schihl, P., "Development of JP-8 surrogates and their validation using ignition quality tester", *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 7(1), 2014, pp.337-351.
 16. Huber, M. L., "NIST thermophysical properties of hydrocarbon mixtures database (SUPERTRAPP), Version 3.2", National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2007.
 17. Edwards, T., "'Kerosene' fuels for aerospace propulsion - composition and properties", *AIAA Conference Papers*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002.
 18. Zhang, S., Qin, J., Xie, K., Feng, Y., and Bao, W., "Thermal behavior inside scramjet cooling channels at different channel aspect ratios", *Journal of Propulsion and Power*, 32(1), 2016, pp.57-70.
 19. Heiser, W. H., and Pratt, D. T., "Hypersonic airbreathing propulsion", American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, VA, 1994.
 20. Chen, Y., Li, Y., Sunden, B., and Xie, G., "The abnormal heat transfer behavior of supercritical n-decane flowing in a horizontal tube under regenerative cooling for scramjet engines", *Applied Thermal Engineering*, 167, 2020, p.114637.