

# 전력 반도체용 양면 방열 모듈의 내부 유동 특성에 관한 수치 해석적 연구

김 성<sup>1,2†</sup> · 정순영<sup>1</sup> · 김광호<sup>1</sup> · 차동안<sup>1</sup> · 김명복<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한국생산기술연구원 산업에너지연구부문, <sup>2</sup>과학기술연합대학원대학교 융합제조시스템공학전공, <sup>3</sup>한국생산기술연구원 목적기반모빌리티그룹

## A Numerical Study on the Internal Flow Characteristics of Double-side Cooling Module for Power Semiconductor

SUNG KIM<sup>1,2†</sup>, SOON-YOUNG JEONG<sup>1</sup>, KWANG-HO KIM<sup>1</sup>, DONG-AN CHA<sup>1</sup>, MYUNG-BOK KIM<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Industrial Energy R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology, 89 Yangdaegiro-gil, Ipjang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan 31056, Korea

<sup>2</sup>Major in Convergence Manufacturing System Engineering, University of Science and Technology, 217 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea

<sup>3</sup>Purpose Built Mobility Group, Korea Institute of Industrial Technology, 6 Cheomdangwagi-ro 208beon-gil, Buk-gu, Gwangju 61012, Korea

†Corresponding author :  
ks2928@kitech.re.kr

Received 16 July, 2025  
Revised 29 July, 2025  
Accepted 4 August, 2025

**Abstract >>** In this study, the flow characteristics and uniformity of a double-side cooling module were investigated through computational fluid dynamics. Numerical simulations were performed by solving the three-dimensional steady Reynolds-averaged Navier-Stokes equations. In order to improve the cooling performance of a double-side cooling module, the internal flow of the double-side cooling module must be uniform. The flow characteristics and flow uniformity of double-side cooling module were precisely analyzed using numerical analysis results. The flow characteristics of the double-sided cooling module were analyzed and discussions were conducted to improve flow uniformity.

**Key words :** Power semiconductor(전력 반도체), Double-side cooling module(양면 방열 모듈), Computational fluid dynamics(전산유체역학), Cooling performance(냉각 성능), Flow uniformity(유동 균일성)

## 1. 서론

전력 반도체(power semiconductor)는 전력의 변환 및 제어를 목적으로 사용되는 핵심 소자로 높은 전압과 전류를 안정적으로 처리할 수 있는 능력을 갖추고 있다. 이러한 특성으로 인해 전력 반도체는 가전제품, 전기자동차, 산업용 기계, 재생에너지 시스

템, 통신 장비, 데이터 센터 등 다양한 분야에서 전력 관리의 핵심 요소로 널리 사용되고 있다.

전력 반도체는 전력의 생성, 변환, 전송, 소비 전 과정에 걸쳐 중요한 역할을 수행한다. 예를 들어 태양광 발전 시스템에서는 생성된 직류(direct current) 전력을 교류(alternating current)로 변환하여 전력망에 연결하는 역할을 하며 풍력 발전 시스템에서는

발전기 제어 및 전력 변환을 통해 효율적인 전력 생산을 가능하게 한다. 이처럼 전력 반도체는 에너지 효율 향상과 전력 시스템의 안정성 확보에 기여하며 지속 가능한 에너지 관리 기술로서의 중요성이 날로 증가하고 있다. 수소 생산 분야에서도 수전해 장치에 공급되는 전력을 정밀하게 제어해야 하며 이 과정에서 전력 반도체 기반 인버터와 컨버터가 중요한 역할을 한다. 연료전지 시스템에서는 전력 흐름의 제어를 통해 출력 전력을 일정하게 유지하고 급변하는 부하 조건에 대응할 수 있어야 한다. 이처럼 수소 기반 전력 시스템의 신뢰성과 효율성은 전력 반도체 소자의 성능과 직결된다.

그러나 전력 반도체는 동작 중 다량의 열을 발생시키는 특성이 있다. 이 열을 효과적으로 제거하지 못할 경우 소자의 성능 저하, 수명 단축 및 시스템의 신뢰성 문제로 이어질 수 있다. 따라서 전력 반도체의 열 관리 기술은 시스템의 전반적인 성능과 안정성 확보를 위해 매우 중요한 요소이다. 따라서 본 연구에서는 양면 방열 전력 반도체 모듈의 내부 유동 특성을 computational fluid dynamics (CFD)를 활용하여 정밀하게 분석하였다. 양면 방열 모듈의 냉각성

능이 향상되려면 양면 방열 모듈 형상 내부 유동이 균일하게 흘러야 한다<sup>1)</sup>. 따라서 양면 방열 모듈 형상의 내부 유동 특성을 분석하여 내부 유동 균일성 향상을 위한 개선 사항을 파악해야 하므로 양면 방열 모듈의 내부 유통 특성을 체계적으로 분석하였다.

## 2. 양면 방열 모듈 형상 분석

양면 방열 모듈의 내부 유로 형상은 Fig. 1에 나타내었다. 양면 방열 모듈 형상은 유체의 입구부와 출구부가 대칭적으로 구성되어 있으며 유체는 중앙에 위치한 발열판 및 핀(pin) 배열 기준으로 상하 방향으로 분기되어 흐르는 구조를 갖는다. 발열판은 양면 방열 모듈 내부 유로를 따라 유동 방향에 직각으로 배열되어 있으며 동일한 형상을 가진 3개의 발열판이 등간격으로 배치되어 있다. 이러한 배치는 유동의 분포 균일성과 냉각 효율 향상에 영향을 미치는 주요 설계 요소로 작용하며 발열판을 통과하는 유동의 형상 및 분포 특성이 전체 모듈의 열적 성능에 결정적인 역할을 한다.

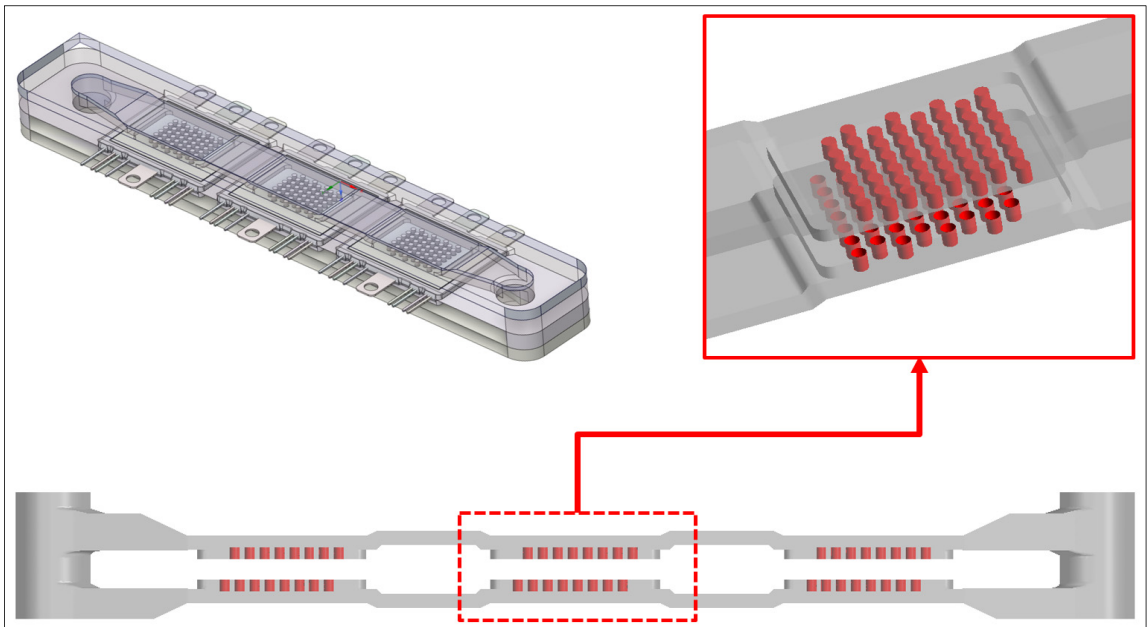


Fig. 1. Three-dimensional shape of double-side cooling module for power semiconductor

### 3. 수치 해석 방법

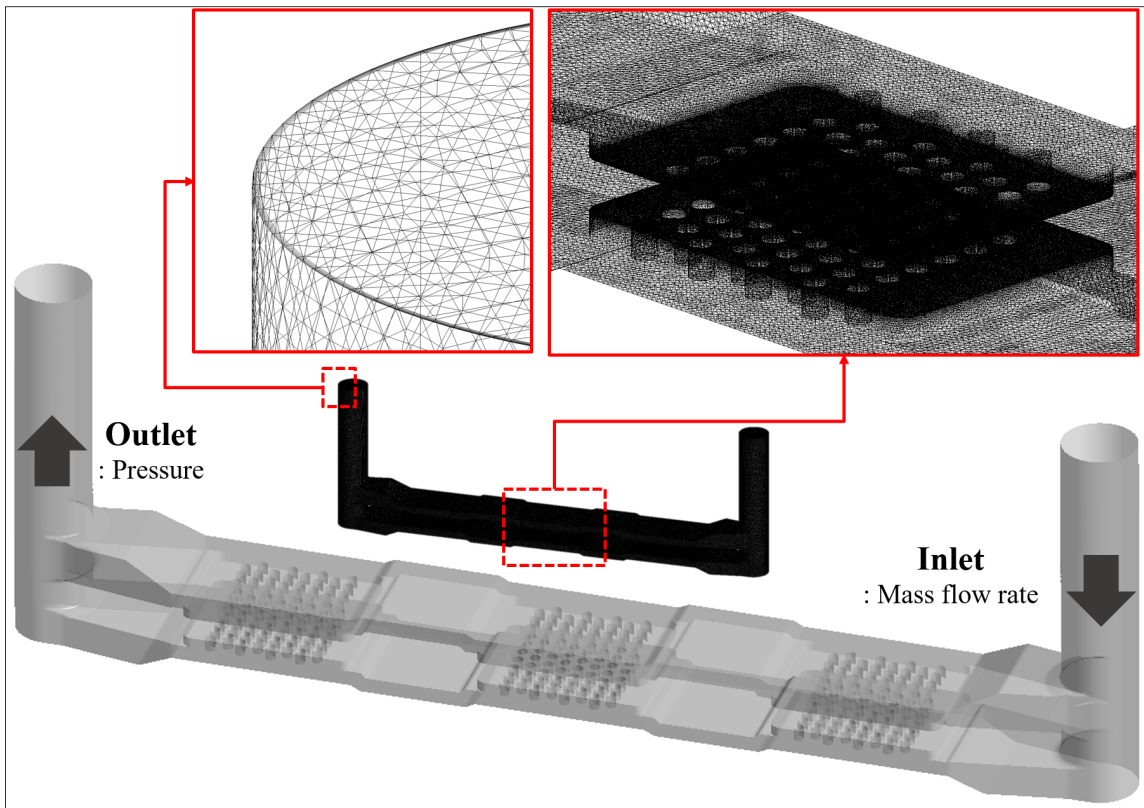
양면 방열 모듈 형상의 내부 유동 흐름 분석을 위하여 상용 CFD 코드인 ANSYS CFX-21 (Ansys, Cannonsburg, PA, USA)을 이용하여 유동 해석을 수행하였다<sup>2)</sup>. 양면 방열 모듈 형상은 Solid Works (Solid-Works, Waltham, MA, USA) 프로그램을 이용하여 생성하였고 격자계는 ICFM-CFD (Ansys)를 사용하여 비정렬 격자계(unstructured grid)로 생성하였다<sup>3)</sup>. Fig. 2는 양면 방열 모듈 형상의 격자계(grid system) 및 경계 조건(boundary condition)을 보여준다. 양면 방열 모듈 형상의 격자계는 격자 테스트를 수행한 후에 약 580만 개로 고정하여 수치 해석을 수행하였다. 양면 방열 모듈 형상의 경계 조건에서 입구부는 냉각수의 질량 유량(mass flow rate)을 주었고 출구부에는 대기압(atmospheric pressure) 조건을 주었다. 양면 방열 모듈 형상의 입구 및 출구부 형상은 수치 해

석 수렴성을 위해 일정한 면적을 갖는 원통형 형상으로 구현하였다.

양면 방열 모듈 형상의 비압축성 난류 흐름(turbulent flow) 분석을 위해 3차원 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 이용하였다<sup>4)</sup>. 난류의 흐름을 분석하기 위해 난류 모델(turbulent model)은 유동 박리(flow separation)의 예측에 유리한 shear stress transport model을 사용하였다<sup>5)</sup>. 작동 유체(working fluid)의 냉각수 조건은 Table 1에 나타내었다.

**Table 1.** Condition of working fluid

Fluid property	Value
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1,082
Specific heat (J/kg-K)	3,300
Conductivity (W/m-K)	0.4
Viscosity (kg/m-s)	0.0046



**Fig. 2.** Grid system and boundary conditions for the double-side cooling module for power semiconductor

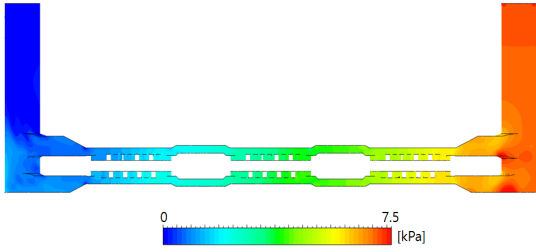


Fig. 3. Pressure contour (Q=10 L/min)

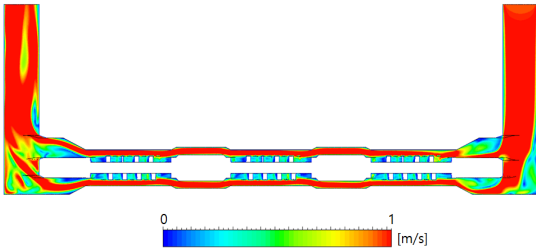


Fig. 4. Velocity contour (Q=10 L/min)

#### 4. 수치 해석 결과 분석

양면 방열 모듈 형상의 내부 유동 흐름 분석은 압력 및 속도 분포를 이용하여 분석하였으며 Fig. 3 및 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3을 보면 입구부에서 출구부까지 압력 분포를 확인할 수 있으며 입구 및 출구부 압력 차이가 약 7.5 kPa임을 확인할 수 있다. Fig. 4를 보면 양면 방열 모듈 형상의 내부 속도 분포를 확인할 수 있으며 발열판 핀 영역에서는 속도가 없어 유동이 흐르지 않는 것을 확인하였다. 양면 방열 모듈 형상의 냉각 성능은 발열판 핀 배열 영역의 내부 유동 흐름이 매우 중요하므로 양면 방열 모듈 형상 내부 및 발열판 핀 배열 영역의 유동 흐름을 정밀하게 분석하여 Fig. 5에 비교 분석하였다. 이때 발열판 기준으로 상하 방향으로 6개의 면을 지정하여 정밀하게 분석하였다<sup>6)</sup>.

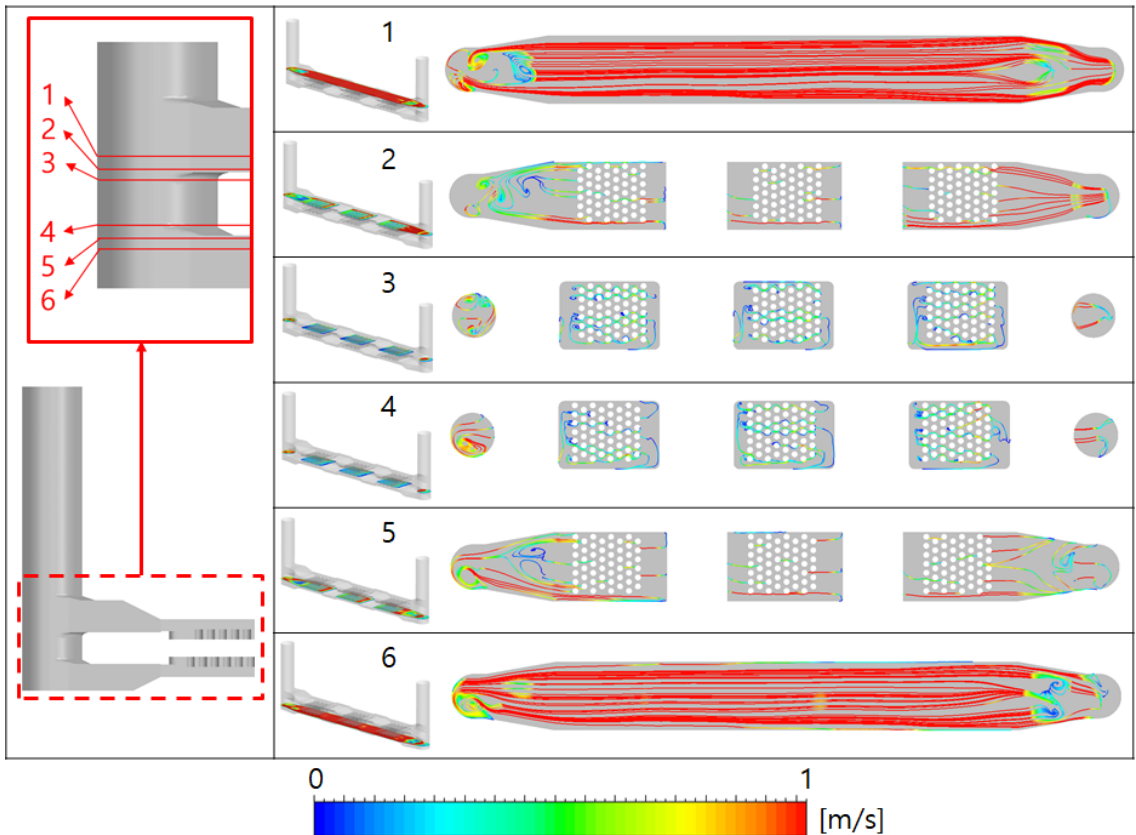


Fig. 5. Comparison of the streamline at the double-side cooling module (Q=10 L/min)

Fig. 5를 보면 발열판 및 핀을 기준으로 상하 방향의 핀 배열 영역에서는 유체 유동 흐름이 발생하지 않음을 확인하였고 핀 주변에서 관찰되는 속도 분포가 매우 낮은 수준으로 유지되었다. 특히 핀이 밀집된 영역에서는 유체가 자유롭게 통과할 수 있는 유로가 확보되지 않기 때문에 핀에 의해 유동이 물리적으로 차단되는 현상이 발생한다. 유체는 상대적으로 저항이 낮은 핀이 존재하지 않는 개방 유로를 우선적으로 따라 흐르므로 핀 배열이 존재하지 않는 영역에서만 유체가 흐르는 것을 확인할 수 있다.

유체의 속도 변화에 따른 양면 방열 모듈 형상의 내부 유동 특성을 Fig. 6에 나타내었다. 유량은 5-15 L/min 범위에서 유체 속도 변화가 양면 방열 모듈 형상의 내부 유동 흐름에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 6을 보면 유량 증가에 따라 모듈 내부 주요 유로에서는 평균 유속이 증가하며 유체 흐름이 보다 빠르게 형성되는 경향을 보였다. 그러나 이러한 유속 증가에도 불구하고 발열판에 결합된 핀 배열 영역 내부에서는 여전히 유동이 발생하지 않거나 극히 미약한 속도 분포만이 형성되는 것으로 확인하였다. 이

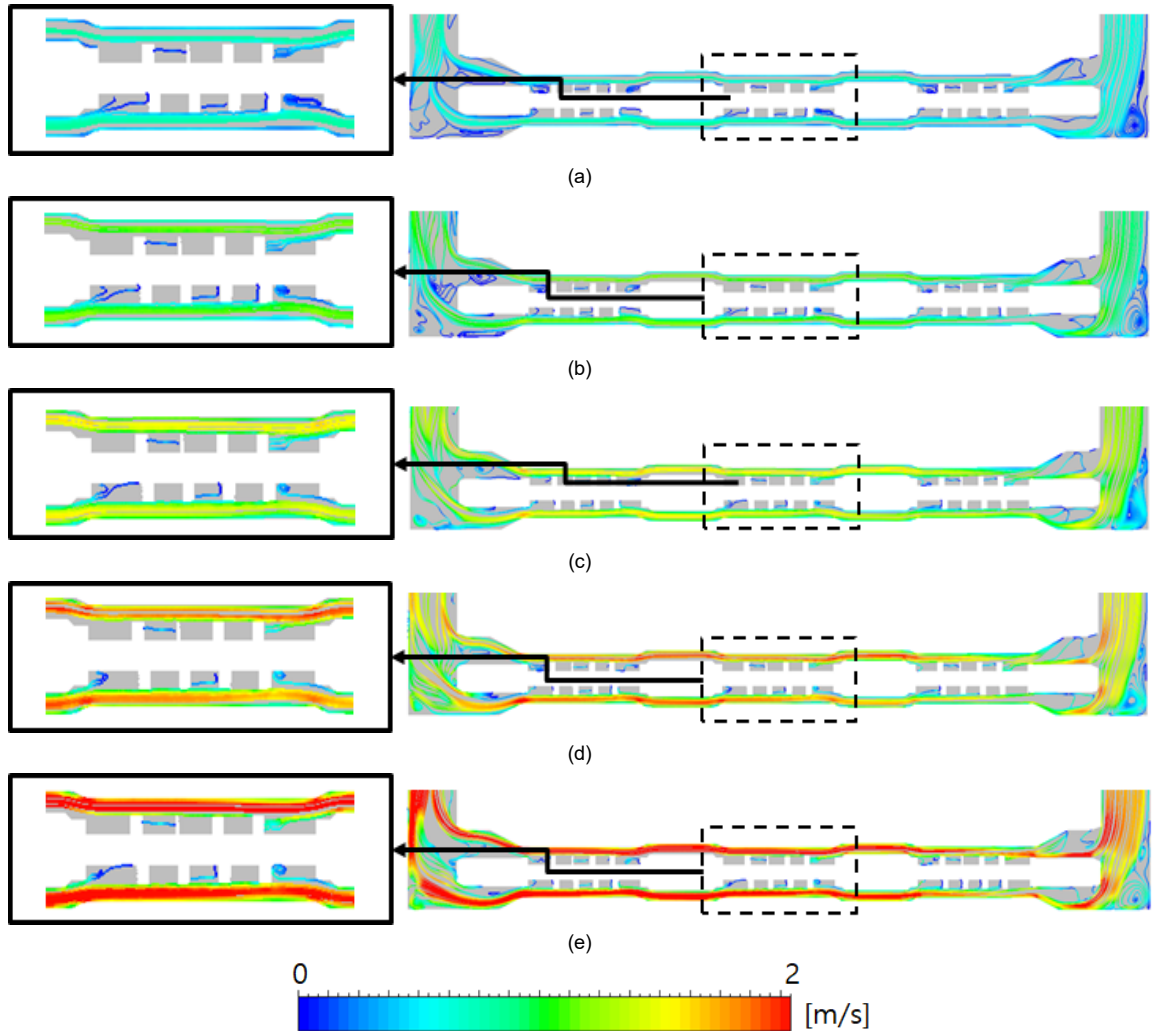


Fig. 6. Comparison of the streamline at the double-side cooling module according to flow rate. (a) 5.0 L/min. (b) 7.5 L/min. (c) 10.0 L/min. (d) 12.5 L/min. (e) 15.0 L/min

러한 현상은 핀 배열 영역이 유체의 흐름을 방해하고 있음을 의미한다. 핀 배열 영역은 유체의 유동 분리(flow separation) 현상이 발생할 가능성이 높으므로 유량이 증가하더라도 핀 내부로 유체가 실질적으로 흐르지 않고 유동은 주로 핀이 배치되지 않는 영역인 저항이 낮은 핀이 존재하지 않는 개방된 유로로 유체가 흐르게 된다.

양면 방열 모듈 형상의 내부 유동 특성을 종합적으로 분석해 보면 핀의 배열 영역에서는 유체의 유동 흐름을 방해하여 유체가 흐르지 않은 것을 확인하였다. 그리고 핀의 형상 및 배치에 따른 양면 방열 모듈 형상의 내부 유동 특성을 분석하여 내부 유동 균일성 향상을 위한 핀 형상 및 배치 설계가 필요함을 확인하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 양면 방열 모듈 형상의 내부 유동 특성을 CFD를 이용하여 분석하였으며 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 양면 방열 모듈 형상의 방열판에 결합된 핀 배열 영역에서는 핀의 규칙적인 배열 구조에 의해 유체의 유동 흐름을 방해하여 속도 분포가 낮은 수준에 머무르는 정체 영역이 형성되었다.
- 2) 핀이 존재하지 않는 개방 유로에서는 상대적으로 낮은 유동 저항으로 인해 유체가 흐르는 것을 확인하였으며 이에 따른 양면 방열 모듈 내부의 유동 균일성이 균일하지 않음을 확인하였다.
- 3) 핀 배열 영역은 유체의 유동 흐름을 방해하는 형상이므로 유량이 감소 및 증가하여도 내부 유동 균일성에 대한 변화는 없음을 확인하였다.
- 4) 양면 방열 모듈의 냉각 성능 향상을 위해서는 핀 배열 영역의 유동 저항을 개선하고 내부 유동 균일성을 확보할 수 있도록 핀 형상 및 배치

에 대한 구조적 설계가 필요함을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국산업기술평가지원(KEIT)의 지원을 받아 “양면 방열 SiC 전력 모듈 국산화 기반 250 kW급 EV 인버터 수요 연계 기술 개발(No. RS-2025-02219164)” 사업으로 수행되었습니다.

## References

1. H. I. Kim, Y. S. Cho, S. Y. Chae, and D. Y. Jung, “A numerical study on cooling performance improvement of cyclor for the vehicle lithium polymer battery”, 2011 Autumn Conference of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 2011, 2011, pp. 1542-1547. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE02041889>.
2. Ansys, “Ansys CFX: turbomachinery CFD software”, Ansys, 2021. Retrieved from <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx>.
3. D. Lee, S. B. Ma, S. Kim, J. Y. Kim, C. Kang, and J. H. Kim, “A numerical study on the flow uniformity according to chamber shapes used for test of the semi-conductor chip”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 31, No. 5, 2020, pp. 480-488, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.5.480>.
4. C. G. Jeong, H. S. Lee, and C. W. Lee, “Numerical analysis of ball strainer screen module blockage effects”, Journal of Power System Engineering, Vol. 19, No. 1, 2015, pp. 83-89, doi: <https://doi.org/10.9726/kspse.2015.19.1.083>.
5. A. Hellsten, S. Laine, A. Hellsten, and S. Laine, “Extension of the k-omega-SST turbulence model for flows over rough surfaces”, In: 22nd Atmospheric Flight Mechanics Conference; 1997 Aug 11-13; New Orleans, LA, USA, pp. 252-260, doi: <https://doi.org/10.2514/6.1997-3577>.
6. S. Kim, Y. S. Choi, H. Y. Kim, T. G. Kim, S. W. Lee, and J. H. Kim, “Design of composite head for compound processing machine on the improved suction performance”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 31, No. 1, 2020, pp. 144-150, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.1.144>.