

안테나 배열형 고출력 모듈의 냉각을 위한 공랭식 유로 형상 최적화 연구

이주현*, 윤세진, 이정민, 허재훈
한화시스템

A Study on the Optimization of Air-Cooled Flow Channels Shape for Cooling of Antenna Array-Type High-Power Module

Ju-Hyun Lee*, Se-Jin Yoon, Jung-Min Lee, Jae-Hun Heo
Hanwhasystems, Korea

요약 최근 전자 기술의 발전으로 방위산업을 비롯한 다양한 산업 분야에서 고출력 소형 전자 부품이 널리 적용되고 있으며, 이로 인한 다양한 열적 문제에 직면하고 있다. 본 연구는 균일한 간격으로 배열된 안테나의 고발열, 고열유속 부품의 냉각을 위한 공랭식 유로 형상에 대한 최적화에 대하여 수행하였다. 다양한 냉각 핀 유형, 단면 및 길이와 관련된 기하학적 매개변수에 따른 열 성능 영향에 대한 연구로서 이전에 제시된 연구보다 더 많은 형상 매개변수가 고려되었다. 특히, 기존의 최적화 형상 연구들은 부품의 최대 작동 온도와 최대 압력 강하에 초점을 맞춘 반면, 본 연구는 부품의 작동온도, 최대압력 강하와 함께 배열된 부품간의 온도 편차를 줄이기 위한 핀 형상 최적화에 중점을 두었다. 다양한 기하학적 형상에 따른 열적 성능을 평가하기 위한 성능 지수를 정의하여 열적 성능을 비교하고, 최적화된 냉각 핀 형상을 제시하였다.

Abstract Recently, with the development of electronic technology, small high-power electronic components have been widely applied in various industrial fields, including the defense industry, but researchers are facing various thermal problems. This study was conducted on the optimization of an air-cooled flow-path shape for cooling high-heat-flux components of an antenna arranged at uniform intervals. We studied the effect of the thermal performance on geometric parameters related to different cooling fin types, cross-sections, and lengths, and more geometric parameters were considered than in previous studies. While previous studies on optimized shapes focused on the maximum operating temperature and maximum pressure drop of components, this study focused on optimizing the fin shape to reduce the temperature deviation between the components, as well as the operating temperature and maximum pressure drop of the components. A performance factor was defined to evaluate the thermal performance according to various geometries, the thermal performance was compared, and an optimized cooling fin shape is proposed.

Keywords : Antenna, Air Cooling Heat Exchange, Multi-Channel Heatsink, Performance Factor, Shape Optimization, Temperature Deviation

*Corresponding Author : Ju-Hyun Lee(Hanwhasystems, Korea)

email: juhyun.lee@hanwha.com

Received July 10, 2023

Revised August 3, 2023

Accepted August 10, 2023

Published August 31, 2023

1. 서론

최근 전자 기술의 급격한 발전으로 인해 민수영역 뿐만 아니라 방산분야를 포함한 광범위한 산업영역에서 부품 소형화 및 집적화가 진행되고 있다. 감시 정찰 분야의 핵심 장비인 레이더 안테나 또한 최근 기술 트렌드를 반영하여 기존의 기계식 레이더(MSA: Mechanical Scanned Array)에서 능동 전자식 위상배열 안테나(AESA: Active Electronically Scanned Array, 이하 AESA)로 급격히 진화되고 있으며 항공기를 비롯한 함정, 지상 무기체계 등 다양한 플랫폼에 확대 적용되고 있다.

AESA 안테나는 고출력, 고발열 반도체 소자가 균일한 간격으로 집적화된 상태로 배열되어 있어 장치의 안정적인 성능 확보 및 동작, 부품의 수명 보장을 위하여 안정적이고 효율적인 냉각 구조 및 냉각시스템이 필연적으로 요구된다. Z.He 등[1]은 전자장비 손상 원인의 55%가 온도에 의해서 발생한다고 하였는데, F-16, F-35 항공기 등에 탑재 운용되고 있는 AESA와 지상, 함정 플랫폼에 탑재되는 다기능 레이더 안테나 냉각은 높은 열전달 계수와 안정적인 냉각성능을 기대할 수 있는 액냉 방식을 적용하고 있다. 이러한 냉각 방식은 고가의 냉각 부품으로 구성되며, 별도의 냉각장치를 필요로 하는 경우 추가적인 무게와 공간을 필요로 하는 단점을 가지게 된다.

최근 AESA 기술의 국산화와 이를 뒷받침하는 부품 솔루션의 다양화는 기존 고성능 레이더에만 국한되었던 AESA 기술이 향후 저가형 및 소형 플랫폼(예-무인기, 회전익, 저속 항공기, 차량/전차 등)에 확산될 수 있는 가능성을 주었으며, 이에 따른 플랫폼의 특성, 조건, 안테나 성능/기능, 제품 비용 등이 고려된 다양한 냉각 솔루션 개발의 필요성이 증가하고 있다.

향후 고출력 레이더의 경우에는 소자의 열유속이 현재 보다 급격히 증가하여 현열을 이용한 냉각방식에서 잠열을 이용한 냉각방식으로 개발의 패러다임이 전환될 수 있으며, 출력이 낮거나 다수의 송수신 채널이 필요치 않은 중저가형 안테나의 경우 비용/제원적 측면에서 액냉보다 구조가 간단한 공냉 구조의 적용을 고려해 볼 수 있다. 이전부터 전자장비에 대한 다양한 공랭식 구조가 연구되어 왔는데, Youngchan-Yoon 등[2]은 서로 마주 보고 있는 방열핀의 높이에 따라 겹쳐질 때의 압력 손실과 냉각 영향에 대하여 연구하였으며 Khurram altaf 등[3]은 공기 덕트내 사각 방열핀 컷팅 될 때의 열적 성능 영향에 관하여 분석 제시하였다. Christian Bunnagel 등[4]은 전원모듈의 위치별 온도 분포를 균일하게 유지하

기 위해 덕트 입구에 V자 형상의 핀 배열 형상을 적용하여 채널 길이 방향으로 온도 구배를 최소화하는 연구를 진행하였으며, Sihao Qian 등[5]은 공랭식 배열 안테나에서 사각 방열핀의 기하학적 형상이 안테나 냉각 성능에 미치는 영향을 분석하였으나, 이는 입구에서 출구까지 핀 형상이 균일한 조건에 국한되었다.

일반적인 배열 부품과 달리 고출력 반도체 송수신 부품은 온도에 따른 성능적 영향이 크기 때문에 부품 허용 온도 범위 내 동작뿐만 아니라, 부품 위치별 온도 편차를 최소화하는 냉각 설계 전략이 필요하다. 탑재 플랫폼에 따라 전자장비 냉각을 위해 공급해 줄 수 있는 냉각 조건(유량, 압력)이 제한적이므로 냉각 유로가 길고 길이 방향으로 고열유속이 발생하는 고출력 증폭기(HPA: High Power Amplifier, 이하 HPA)를 가진 AESA 냉각 구조에서 압력 강하를 최소화함과 동시에 열전달을 극대화하고, 배열된 부품 위치에 따른 온도 편차 최소화를 하기 위한 냉각핀의 기하학적 형상 최적화는 매우 중요하다. 이전 연구 대부분이 냉각핀의 단면 형상 또는 길이 방향 하나의 형상 최적화에 집중되어왔다면, 본 연구는 단면과 길이 방향의 형상을 복합적으로 고려한 다양한 Case Study를 통하여 최적의 냉각핀 형상 도출하기 위한 연구가 수행되었다. 또한 열적 성능 평가를 위하여 성능 지수를 도입하여 최적화된 냉각핀 형상을 제시하였다.

2. 본론

2.1 연구대상 및 조건

Fig. 1(a)는 대표적인 안테나 형상으로, 냉각핀을 가지는 덕트 중앙에 냉각 공기가 흐르는 구조로 덕트 양측면에 송수신 모듈(TRM: Transmit Receive Module, 이하 TRM)이 일정한 간격으로 조립된다. TRM에서 발생한 열은 냉각핀으로 전도되고, 냉각핀을 통해 대류 열교환 된다. 각 발열원 위치 및 방열핀, 덕트 형상은 Fig. 1(b)의 단면 형상과 같다.

Table 1은 본 연구에 적용된 냉각공기 공급조건 및 외기조건, 발열량 조건을 정리한 것이다. TRM에서 발생하는 발열량은 안테나 동작모드에 따라 변경되나, 정상 상태에서 가장 Normal 하게 운용되는 파형의 duty 및 단위소자 발열을 적용하였다. 냉각공기 공급조건은 안테나에 공급되는 전체 유량을 기준으로 덕트에 조립된 TRM의 수량에 따라 할당된 값을 사용하였다.

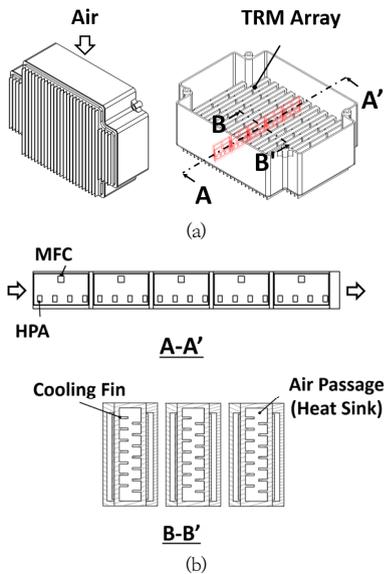


Fig. 1. Subject of research
(a) Antenna Figure, (b) Section view

Table 1. Heat value and cooling air supply conditions

Item		Value
Boundary Conditions	Inlet Temp.	27 °C
	Inlet flow rate	0.625 lb/min
	Outside Temp.	27 °C
Heat Value	Heat Value per TRM	8.21 W
	Total Heat Value (TRM 10 EA)	82.1 W

냉각 공기 온도는 덕트 입구에서 출구 방향으로 갈수록 열교환을 통하여 점점 증가하며, 냉각 공기 공급 조건이 동일하더라도 냉각핀의 기하학적 형상에 따라 내부 압력 강하량, TRM 동작 온도는 차이가 나게 된다. TRM의 온도를 낮추기 위해서는 냉각핀의 전열 면적을 증가시키는 방향의 설계 방안이 요구되지만, 이는 내부 압력 강하 증가, 냉각핀 제작의 복잡성을 야기할 수 있으므로 덕트 및 냉각핀 구조와 성능 간의 상충 관계는 필연적이다. 본 연구는 덕트의 기하학적인 형상 치수가 고정된 상태에서 냉각핀의 타입과 기하학적 형상을 변경시키면서 최적화를 수행하였다. 이를 위해 Table 2와 덕트 내부의 총 압력 손실, TRM 최대 동작 온도($T_{HPA,max}$)를 성능 기준으로 설정하고, TRM 간 동작 온도 편차($T_{HPA,d}$) 최소화를 추가적인 성능 요소로 고려하였다. TRM 최대 동작 온도($T_{HPA,max}$)의 경우 부품의 내구성과 성능저하를 고려하여 60 °C 이하를 목표로 설정하였으며, 압력강하량은

안테나로 공급되는 냉각공기의 공급 압력을 고려하여 400 Pa 이하로 설정하였다.

Table 2. Trade-off case study conditions

Condition	Pressure Drop (Pa)	$T_{HPA,max}$ (°C)
Performance Condition	Less than 400	Less Than 60

검토 대상 핀의 기하학적 형상은 Fig. 2에 나타난 것과 같이 가장 보편적으로 사용되는 핀 구조 중 하나인 동일 높이 핀(CHF: Constant Height Fin, 이하 CHF), 출구 방향으로 핀의 높이가 연속적으로 증가하는 핀(TF: Tapered Fin, 이하 TF), 구간별로 증가하는 핀(VHF: Variable Height Fin, 이하 VHF) 3 종을 기본 모델로 하였으며, TF 형상에 대해 컷팅 핀 조건을 추가한 핀(TCF: Tapered Cutting Fin, 이하 TCF)과 VHF 형상에 대해 컷팅 핀 조건을 추가한 핀(VHCF: Variable Height Cutting Fin, 이하 VHCF)에 대하여 냉각 공기 흐름 간 핀 컷팅에 의한 유동 흐름과 냉각 성능에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

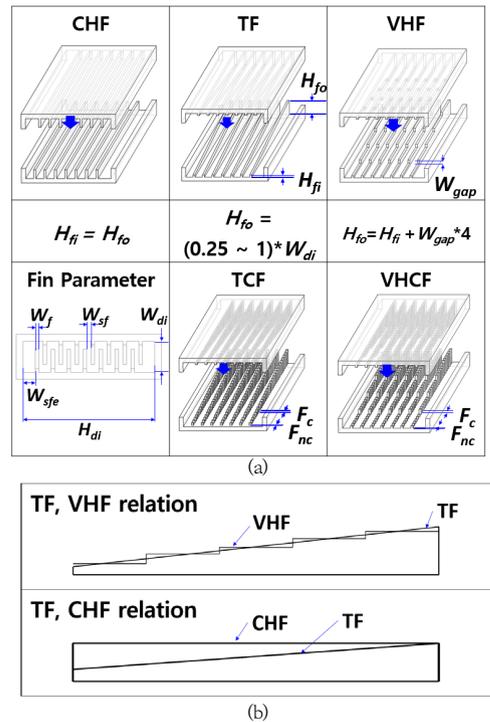


Fig. 2. Fin geometric parameter Case Study Conditions
(a) Fin shape and dimensional conditions
(b) Shape relation of 3 Fin Case

Fig. 2(a)에서 좌우 덕트 내부 핀 수량은 동일하며, 한 면의 핀 위치 중심은 반대편의 핀 간격 중심 위치에 위치 되도록 배치하였다. 핀 폭(W_f)은 기계 가공성 및 냉각 성능을 고려하여 최소 0.8 mm에서 1.4 mm 이하의 범위로 정하였으며, 덕트 최하단과 최상단 핀이 위치한 마지막 부분의 핀 간격(W_{sfe})는 최소 0.8 mm 이상이 되도록 핀 개수(N)를 Eq. (1), (2)를 통하여 결정하였다.

$$2W_{sfe} + 2NW_f + (2N-1)W_{sf} = H_{di} \quad (1)$$

$$W_{sfe} \geq 0.8 \quad (2)$$

여기서, W_s 는 핀과 핀 간의 폭으로 정의되며, 핀의 높이가 변경되는 TF, VHF 채널에서의 H_f 는 덕트 출구의 핀 높이로 정의된다. 핀의 높이가 변화하는 TF, VHF 채널에서 H_f 는 덕트 입구의 핀 높이, H_o 는 덕트 출구의 핀 높이로 정의된다. 덕트 입구의 전체 크기는 폭(W_{di})와 높이(H_{di})로 정의된다.

TCF, VHCF에 대한 Case Study는 TF, VHF 형상에 대한 결과를 바탕으로 Eq. (3)으로 정의되는 압력 손실, TRM 온도 편차, TRM 온도로 정의한 성능 지수가 좋은 기하학적 형상 조건에 대하여 핀 길이 방향으로 핀의 길이와 커팅 길이의 비가 1:1(형상 'α'), 1:2(형상 'β'), 2:1(형상 'γ')인 조건에 대하여 수행하였다.

$$P_f = \frac{1}{\left(\frac{T_{HPA,max}}{T_{HPA,max,0}}\right) \times \left(\frac{\Delta T_{HPA,d}}{\Delta T_{HPA,d,0}}\right)^{(1/3)} \times \left(\frac{\Delta P}{\Delta P_0}\right)^{(1/3)}} \quad (3)$$

Fig. 3은 본 연구에 적용된 핀의 기하학적 형상에 따른 Case Study 방법을 나타낸 것이다. 핀 종류 및 기하학적 형상에 대한 정의 후, 해석 결과를 통한 성능지수 비교분석을 진행하고 커팅핀 조건 추가에 따른 유체 흐름 변화 영향을 분석 평가하였다.

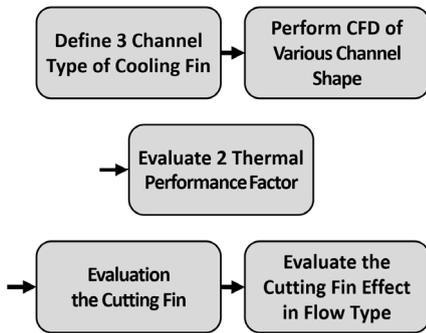


Fig. 3. Flow of the review report

핀의 기하학적 최적 조건 도출을 위한 Case 조건은 Table 3과 같다.

Table 3. Conditions for changing the geometric shape

#Class 1	W_f	Class 2	H_o	Class 3	$F_n:F_{nc}$
1	0.8	A	$0.25W_{di}$	α	1:1
2	0.9	B	$0.5W_{di}$	β	1:2
3	1.0	C	$0.75W_{di}$	γ	2:1
4	1.1	D	$1.0W_{di}$		
5	1.2				
6	1.3				
7	1.4				

기하학적 조건명은 '채널#Class1-Class2-Class3'로 정의되는데, 여기서 'Class 1'은 동일한 크기로 변경되는 W_f 와 W_{sf} 를 나타내며 0.8 mm부터 1.4 mm 까지 0.1 mm 간격으로 변경되는 7가지 case에 대하여 1~7로 대응된다. 'Class 2'는 H_o 조건을 나타내며, 덕트 입구의 높이(W_{di})에 대하여 $0.25W_{di}$, $0.5W_{di}$, $0.75W_{di}$, W_{di} 에 해당되는 높이 조건에 대하여 A~D로 대응된다. 'Class 3'은 커팅핀에 대한 조건을 나타내며, 커팅된 길이를 F_c 라하고 커팅되지 않은 Fin의 길이를 F_{nc} 라고하면, $F_c:F_{nc} = 1:1$ 인 경우, α , $F_n:F_{nc} = 1:2$ 인 경우를 β , $F_n:F_{nc} = 2:1$ 인 경우를 γ 로 대응된다. 커팅하지 않은 핀의 경우에는 'Class 3'을 기재하지 않는다.

2.2 수치해석 모델

냉각핀 형상 최적화를 위한 수치 해석에 적용된 지배 방정식인 연속 방정식, 운동량 보존방정식은 Eq. (4)-(5)와 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u \quad (5)$$

여기서, ρ 는 밀도, u 는 속도, μ 는 동점성계수, p 는 압력이 된다. 유체와 고체에 대한 에너지 방정식은 Eq. (6)-(7)과 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot (\rho u C_p T) = k \nabla^2 T \quad (6)$$

$$\nabla^2 T = 0 \quad (7)$$

여기서, C_p , T , k 는 각각 정압 비열, 온도, 열전도도가 된다. $\frac{dT}{dz}$, h , T_∞ , T_s 를 길이 방향의 온도 구배, 열전달 계수, 유체의 온도, 냉각핀의 온도라 하면 핀 표면에서 대류 열교환은 Eq. (8)과 같이 표현된다.

$$-k \frac{dT}{dz} \Big|_{x=0} = h [T_\infty - T(x=0,t)] \quad (8)$$

수치해석 모델링 및 계산은 열유동 CFD 해석 Tool인 Siemens 사의 FloEFD (ver 2205)을 이용하여 수행되

었으며, 해석 모델 격자 및 경계 조건은 Fig. 4에 나타나 있다. 해석 영역은 280 mm x 57 mm x 320 mm, 적용 메시의 수는 TF#3-C 기준, 1,504,244개가 사용되었다. 수치 해석시 $k-\epsilon$ 난류 모델을 적용하였으며, 메시의 민감도 test를 위하여 TF#3-C 형상에 대한 Re 수 5,389 인 조건에 대하여 해당 메시 수에서 채널 출구 온도값이 수렴되는 것을 확인한 후 case study를 수행하였다.

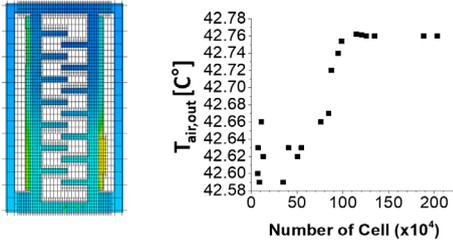


Fig. 4. Result of mesh sensitivity simulation

2.3 해석결과

Fig. 5는 냉각핀 타입 3종(CHF, TF, VHF)에 대한 28 개의 형상 조건 #1-A ~ #7-D에 대한 평균 열전달 계수 및 압력 강하를 계산한 결과이다. 핀 타입에 관계없이 W_f 와 H_{fo} 가 증가하면 평균 열전달계수와 함께 총 압력 강하도 증가한다.

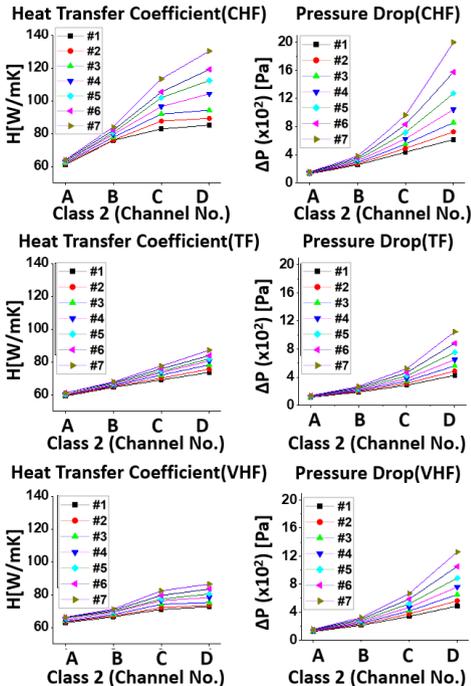


Fig. 5. Average heat transfer coefficient and pressure drop

CHF 채널은 동일 조건의 TF, VHF 조건에 비하여 압력강하가 높은 특징을 보여 주었으며, 동일한 W_f 에서 H_{fo} 가 증가할수록 압력 강하는 지수적으로 증가하는 경향을 보인다. 동일한 냉각 공기가 공급되는 조건이므로 H_{fo} 증가에 따라 Re수는 감소하는 특성을 보인다. 길이 방향으로 점진적으로 높이가 증가하는 TF 채널은 H_{fo} 증가에 따라 열전달계수가 비교적 선형적으로 증가하는 특성을 보인다. 반면에 CHF, VHF 채널에서는 W_f 가 작을수록 H_{fo} 가 $0.75 W_{di}$ 에서 W_{di} 로 증가하더라도 압력 강하는 증가하지만, 열전달계수는 크게 증가하지 않는다. TF와 VHF 채널의 경우, 길이 방향으로 선형적으로 높이가 증가하는 TF 채널이 계단식으로 높이가 증가하는 VHF 채널에 비해 상대적으로 압력 강하가 낮은 경향을 보인다.

Fig. 6은 각 채널 형상에 대한 HPA의 온도와 HPA간의 온도 편차를 계산한 것이다.

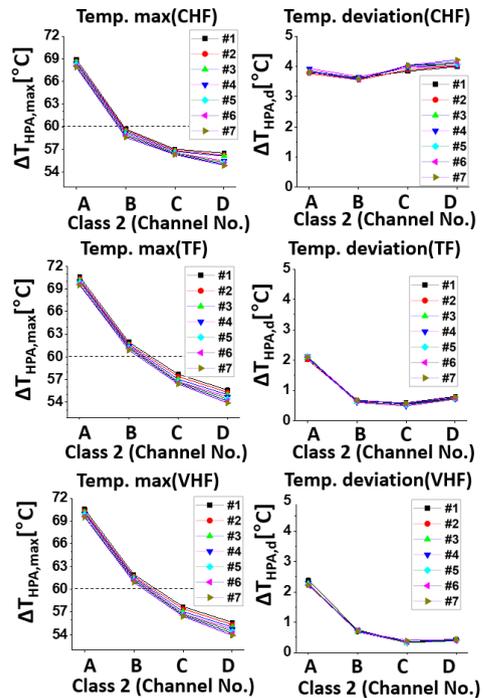


Fig. 6. HPA Temp. and Temp. deviation

채널 형상과 무관하게, W_f 와 H_{fo} 가 증가함에 따라 HPA의 동작 온도는 낮아진다. 특히, TF, VHF 채널에서는 목표 설계 온도인 60 °C 이하를 충족하기 위해서는 W_f 에 관계없이 H_{fo} 는 $0.75 W_{di}$ 이상이어야 하고, CHF 채널에서는 H_{fo} 가 $0.5 W_{di}$ 이상이어야 한다. 길이방향으로 높이가 가변 되는 TF, VHF 채널은 동일한 조건의

CHF 채널보다 낮은 HPA의 온도 편차를 보여준다. 이는 다채널로 배열되는 HPA의 동작 온도를 최대한 균일하게 유지하기 위한 설계 전략으로 길이방향의 핀 높이를 조절하는 것이 이점이 있다는 것을 보여 준다. 28개 형상에 대한 성능을 정량적으로 비교하기 위하여, 설계 기준과 관련된 성능 지수를 이용한 핀의 평가가 필요하다. 만약 위치별 온도 편차가 중요치 않는 시스템이라면, 유체가 통과하는 관로 유로 형태에서 가장 보편적으로 사용하는 Eq. (9)로 성능지수[6]를 사용한다. 하지만 본 연구에서는 HPA의 동작 온도와 HPA 위치에 따른 온도 편차의 차이를 중요하게 고려하기 위하여 Eq. (9)를 변형한 Eq. (3)을 성능지수로 고려하였다.

$$P_f = \left(\frac{Nu}{Nu_0} \right) / \left(\frac{\Delta P}{\Delta P_0} \right)^{1/3} \quad (9)$$

여기서, P_f 는 성능 지수, Nu , ΔP 은 각 조건에서의 누셀수와 압력강하를 나타내며, Nu_0 , ΔP_0 는 각 조건과 비교를 위한 기준이 되는 채널 형상의 누셀수와 압력 강하로 정의된다. 본 연구에서는 기준 채널 형상을 보편적으로 많이 사용되는 사각 채널 형상인 CHF의 #3-D채널로 정의하였다.

Fig. 7은 성능 지수와 설계 목표를 충족하는 핀 형상 조건을 나타낸 그림이다. Fig. 7(a)에서 HPA의 온도 편차가 고려되지 않은 경우 TF, VHF 채널은 CHF 채널에 비해 상대적으로 높은 성능지수를 가지며, W 가 낮을수록 상대적으로 높은 성능지수를 갖는다. 하지만 HPA 온도 편차 및 최대 온도 조건이 고려된 Fig. 7(b)에서는 동

일한 핀 폭 조건에서는 H_{fo} 가 -3인 조건이 높은 성능지수를 가지며, 그 중 TF#1-3 조건은 성능지수 3.2로 가장 높은 값을 가진다. TF 채널에서는 동일한 핀 폭 조건에서 3의 조건이 4조건보다 높은 성능지수를 보이는데, 이는 3보다 4조건이 $T_{HPA,max}$ 가 감소함에도 불구하고, 온도 편차와 압력 강하량이 증가함에 기인한다. 이 효과는 VHF 채널 형상에서는 2에서 3조건으로 변경될 경우에 발생한다.

28개 조건중 설계 기준을 충족하는 경우는 Fig. 7(c)의 13가지 조건이며, CHF는 가장 많은 7개 조건에서 설계기준을 충족하나, TF, VHF 채널보다 HPA의 동작온도는 높게 형성된다. 압력 강하 기준이 pass and fail 조건으로 고려한다면, TF와 VHF는 CHF 채널보다 HPA 동작온도, 온도 편차 관점에서 상당한 이점이 있음을 알 수 있다. 앞에서 언급된 것과 같이 W 가 증가하면 압력 강하가 증가하고, H_{fo} 가 감소하면 HPA 온도 증가하는 경향으로 인하여 다른 조건들은 설계 기준을 충족하지 못한다. 이를 종합적으로 고려하면, TF 채널 구조는 HPA 온도, 덕트 내 압력 강하, HPA 온도 편차 최소화 측면에서 VHF 채널 구조보다 조금 더 효과적인 구조가 될 수 있다.

Fig. 8은 TF, VHF, CHF #2-C의 채널 길이 방향의 압력, HPA 온도변화를 나타낸 그림이다. 덕트의 입구를 좌측, 출구를 우측으로 하여 덕트 중앙의 단면의 압력 변화, 덕트에 조립된 TRM의 온도변화를 보여준다. Fig. 8(a)에서 CHF 채널의 압력 강하가 TF, VHF 채널에 비

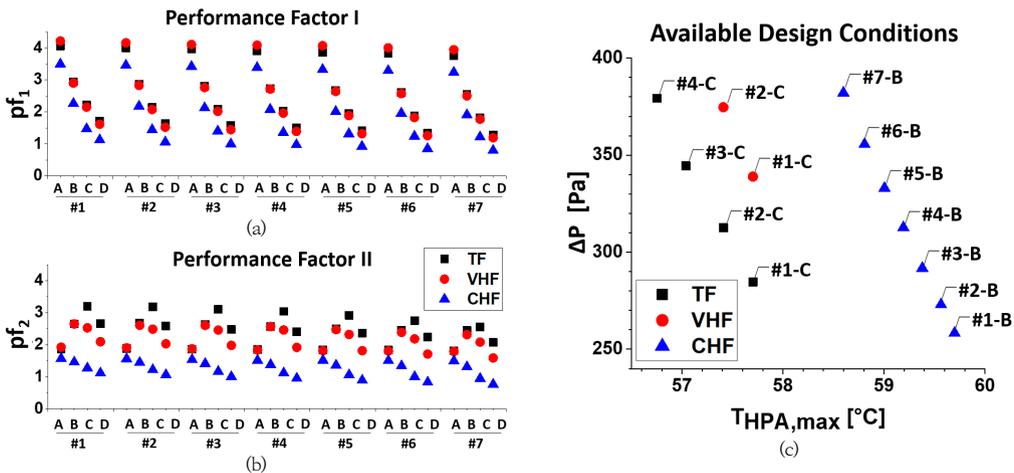


Fig. 7. Performance Factor and Available design conditions (a) Performance Factor I (HPA Temp deviation not considered), (b) Performance Factor II (HPA Temp. deviation considered), (c) Available design conditions for pressure drop, HPA Temp. (HPA Temp. deviation considered)

해 길이 방향으로 확연하게 크게 발생한다. CHF 채널은 길이 방향으로 냉각핀 높이가 변경되지 않기 때문에 길이 방향으로 거의 일정하게 압력강하가 증가하지만, 출구 방향으로 냉각핀 높이가 증가하는 TF, VHF는 출구 부근에서 급격하게 압력강하가 증가하는 특성을 보인다. Fig. 8(b)의 HPA 최대 온도는 CHF 채널에서 입구측 HPA와 출구측 HPA 온도 차이가 확연하게 크게 나타난다. VHF 채널은 계단식으로 높이가 가변 되는 구조이기 때문에 Fig. 8(a)에서와 같이 높이 가변부에서의 압력 강하 영향으로 인해 TF 채널보다 압력강하가 상대적으로 높게 나타난다.

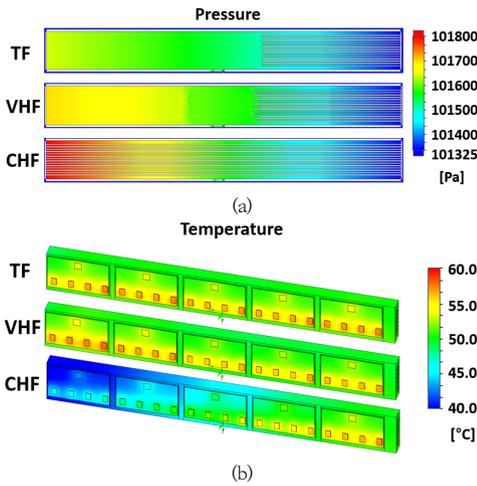


Fig. 8. #2-3 TF, VHF, CHF Analysis result
(a) Pressure(each channel) (b) Temperature(each channel)

Fig. 7 결과로부터 성능 지수 및 설계 기준을 충족하는 TF, VHF 조건 6개에 대한 TCF, VHCF 채널의 평균 대류 열전달계수, 압력 강하, 성능 지수를 분석하여 Fig. 9에 나타내었다. 핀의 길이가 커팅 길이와 같거나 큰 A, C 조건에서는 대류 열전달계수가 커팅하지 않은 TF, VHF 보다 약 20 % 이상 개선되지만, 압력 강하는 300 % 이상 증가한다. 기존의 TF, VHF 채널을 커팅하기 전 형태를 기준으로 비교한 성능 지수 값은 1.0 이하로 설계 기준 충족 측면에서나, 열 성능 측면에서 커팅한 핀은 이점이 없다는 것을 확인하였다.

Fig. 10은 #2-C 조건에 대한 Re 값 변화에 따른 TF, VHF, TCF, VHCF 채널의 열전달 계수, 압력강하, 성능 지수를 나타낸 것이다. TCF, VHCF의 경우 커팅 형상은 'A'로 하였으며, 입구의 유량이 동일한 조건의 CHF#2-3 형태를 성능 지수를 평가하는 기준으로 하였다. 모든 채널 형상에 대해 Re 값이 증가하게 되면 열전달계수는 증

가하게 되고, 압력 강하 값은 지수 함수 형태로 증가한다. 특히 커팅핀 형상에서는 압력 강하의 증가폭이 더 크게 발생한다.

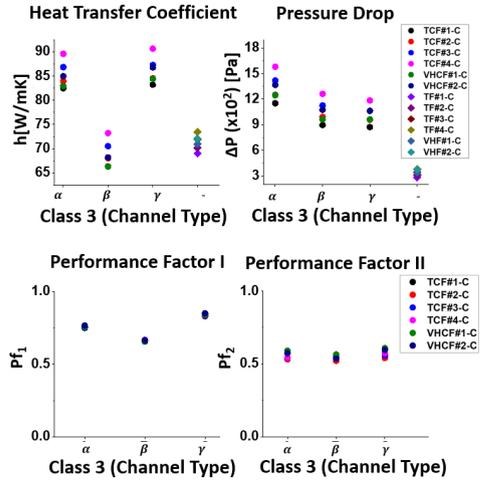


Fig. 9. TCF, VHCF heat performance

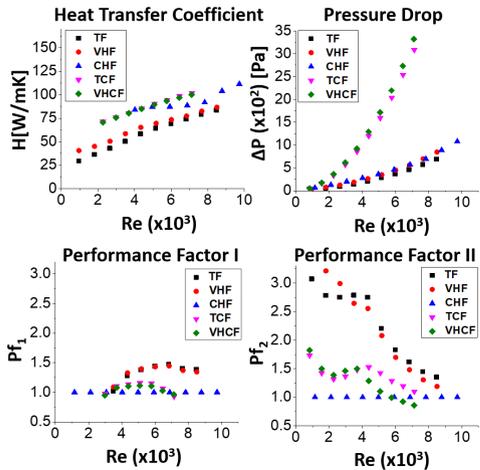


Fig. 10. Thermal performance change according to Re

Pf₁의 경우 Re값의 증가에 따라 증가하다 감소하는 경향을 보이는데, TCF, VHCF인 커팅 형상 채널에서는 Re값이 3,000 이하, 7,000 이상의 경우, Pf₁ 값이 1보다 낮은 값을 가지며, Re값이 3,000~7,000 사이에서는 Pf₁값이 1보다 큰 값에서 증가하다 감소하는 경향이 나타난다. 특정 범위의 Re에서 커팅핀은 이점을 가질 수 있지만 유속이 더욱 빨라지게 되면 열전달계수의 증가 대비 압력 강하의 큰 증가폭으로 인하여 Pf₁의 값이 낮아진다. CHF 채널은, 성능지수를 평가하는 기준 채널이므

로 Pf_1 과 Pf_2 모두 1이 된다. TF와 VHF 채널은 모든 Re 영역에서 Pf_2 가 높은 값을 가지므로 해당 영역에서는 입구와 출구의 핀 높이를 다르게 설계하는 것이 압력 강하, 최대 HPA 온도 및 온도 편차 최소화 측면에서 이점을 가질 수 있다는 것을 보여준다. 하지만 VHCF는 Re 6,000 이상에서는 Pf_2 가 1보다 낮은 값을 가진다.

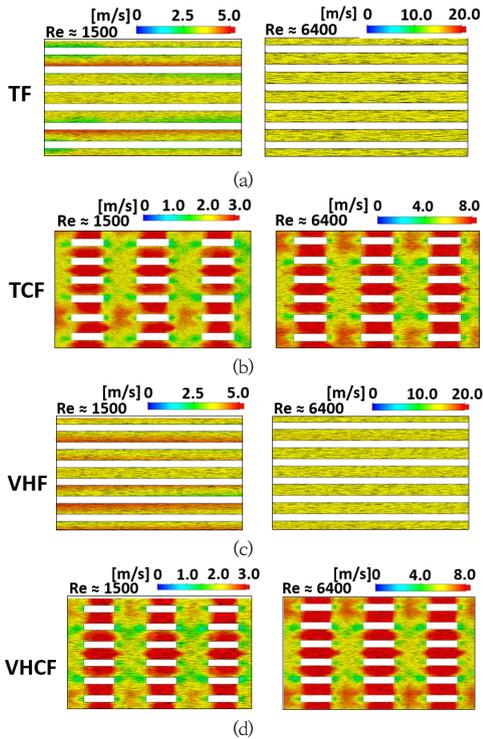


Fig. 11. #2-3 Velocity contour comparison for laminar and turbulent area
(a) TF, (b) TCF, (c) VHF, (d) VHCF

Fig. 11(a)-(b)는 TF 채널에 대해 층류인 $Re \approx 1,500$ 와 난류인 $Re \approx 6,400$ 에서의 속도장을 각각 비교한 것이다. Fig. 11(c)-(d)는 VHF 채널에 대해 층류인 $Re \approx 1,500$ 와 난류인 $Re \approx 6,400$ 에서의 속도장을 비교한 것이다. TCF와 VHCF는 층류 유동에서 핀과 핀사이 vortex 유동이 발생하며, 이로 인해 열전달계수는 증가하나, 압력 강하가 급격히 증가 현상이 유발된다.

28개 채널 형상에 대한 case study와 컷팅핀에 대한 분석을 통하여 냉각핀 형상에 따른 열적 성능에 대한 분석이 수행되었으며 TF 채널의 성능지수 $2(Pf_2)$ 값이 평균 1.8로 CHF 평균값인 1.1 대비 1.7배, VHF 평균값인 1.6 대비 1.1배 높은 값을 갖는 것을 확인하였다. 또한

컷팅핀의 경우, 성능지수 $2(Pf_2)$ 의 평균값이 0.56으로 컷팅하지 않은 핀이 1.8배 높은 값을 갖는 것을 확인하였다. 이를 통해 TRM의 균일한 냉각성과 압력강하를 고려하면, TF 채널이 VHF, CHF, 컷팅 핀보다 이점을 갖는 것을 성능지수를 통해 확인하였다.

3. 결론

안테나 TRM의 공기 냉각 구조 최적화를 위한 냉각핀 기하학적 형상 변수에 대한 수치해석법을 통한 분석이 수행하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 기존 성능 지수 방식에서 배열 소자의 온도 편차를 고려한 새로운 성능 지수 평가 방식이 제시되었다.
- 2) 본 연구 논문에서 제시한 중첩형 양면핀 Tapered Fin의 성능지수 $2(Pf_2)$ 평균값 1.8, Variable Height Fin의 성능지수 $2(Pf_2)$ 평균값 1.6과 보편적으로 많이 사용하는 Continuous Height Fin의 성능지수 $2(Pf_2)$ 평균값 1.1을 비교해 보았을 때, Tapered Fin이 가장 높은 값이다. 따라서 해당 핀의 구조가 본 논문의 경계조건에서 덕트 양면에 배열된 열원의 온도 편차를 감소시키고, 압력 강하량을 감소시키는 효율적 구조이다.
- 3) 난류 영역에서 Tapered Cutting Fin, Variable Height Cutting Fin는 큰 압력 강하로 인해 높은 공급 압력을 필요로 하므로, 큰 이점을 얻지 못한다.
- 4) 본 연구에서 사용된 방법론을 이용하면, 냉각 공기 공급조건 및 냉각 채널의 기하학적 형상, 설계 목표 조건 변경에 따른 최적의 냉각핀 형상을 도출할 수 있다.

References

- [1] Ziqiang He, Yunfei Yan, Zhien Zhang, "Thermal management and temperature uniformity enhancement of electronic devices by micro heat sinks: A review" *Energy*, Vol.216, 119223, Feb. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119223>
- [2] Y. C. Yoon, D. R. Kim, K. S. Lee, "Cooling performance and space efficiency improvement based on heat sink arrangement for power conversion electronics", *Applied Thermal Engineering*, Vol.164, 114458, Jan. 2020.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114458>

- [3] Khurram Altaf, Adeel Tariq, Syed Waqar Ahmad, Ghulam Hussain, T.A.H. Ratlamwala, Hafiz Muhammad Ali, "Thermal and hydraulic analysis of slotted plate fins heat sinks using numerical and experimental techniques", *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol.35, 102109, Jul. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102109>
- [4] Christian Bünnagel, Shafiu Monir, Andrew Sharp, Alecksey Anuchin, Olivier Durieux, Ikea Uria, Yuriy Vagapov, "Forced air cooled heat sink with uniformly distributed temperature of power electronic modules", *Applied Thermal Engineering*, Vol.199, 117560, Nov. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117560>
- [5] Sihao Qian, Chaoliu Ge, Shunxi Lou, Yiqun Zhang, Guanheng Fan, Wei Wang, "Experimental and numerical investigations of the transmitting antenna in microwave wireless power transmission with forced air cooling system", *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol.199, 101933, May. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101933>
- [6] E. Hosseinirad, M. Khoshvaght-Aliabadi and F. Hormozi, 2019, "Effects of splitter shape on thermal-hydraulic characteristics of plate-pin-fin heat sink (PPFHS)", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 143, 118586. Nov. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118586>

이 주 현(Ju-Hyun Lee)

[정회원]



- 2016년 2월 : 한양대학교 기계공학부 (기계공학사)
- 2015년 12월 ~ 현재 : 한화시스템 기계설계팀 선임연구원

<관심분야>

기계/재료, 국방과학

윤 세 진(Se-Jin Yoon)

[정회원]



- 2016년 2월 : 고려대학교 기계공학과 (기계공학사)
- 2015년 12월 ~ 현재 : 한화시스템 기계설계팀 선임연구원

<관심분야>

기계/재료, 국방과학

이 정 민(Jung-Min Lee)

[정회원]



- 2014년 2월 : 전북대학교 기계시스템공학부 (기계공학사)
- 2016년 2월 : 성균관대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2016년 1월 ~ 7월 : SK하이닉스 장비기술팀 선임연구원
- 2016년 7월 ~ 현재 : 한화시스템 기계설계팀 전문연구원

<관심분야>

기계/재료, 국방과학

허 재 훈(Jae-Hun Heo)

[정회원]



- 2003년 2월 : 아주대학교 기계공학과 (기계공학사/전자공학사)
- 2022년 2월 : 성균관대학교 기계공학과 (기계공학석사)
- 2002년 11월 ~ 현재 : 한화시스템 기계설계팀 수석연구원

<관심분야>

기계/재료, 국방과학