

<응용논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.11.1091>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

방산용 전자장비의 팬 선정 및 검증에 관한 연구[§]

진성은* · 김환구* · 윤의열*[†] · 전희호* · 이승준*

* LIG넥스원 기계기술팀

A Study on Alternative Fan Selection and Verification in Military Electronic Equipment

Sung Eun Jin*, Hwan Gu Kim*, Eui Youl Yoon*[†], Hee Ho Jeon* and Seung Jun Kim*

* Mechanical Engineering Team, LIGNex1 Co., Ltd

(Received January 20, 2017 ; Revised August 24, 2017 ; Accepted September 2, 2017)

Key Words: Military Electronic Equipment(방산용 전자장비), Fan Selection(팬 선정), Thermal Design(방열 설계), Electronic Cooling(전자냉각), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학)

초록: 상용(Commercial type) 냉각 팬이 적용된 방산용 전자장비는 생산 기간 중 팬 단종이 빈번하게 발생된다. 팬 단종 문제의 해결을 위해서는 대체 팬 선정이 필요하며, 고온 동작 시험 등의 장비 성능 및 신뢰성 검증이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 생산 과정에서 활용 가능한 효과적인 대체 팬 선정 및 검증 방법에 대해 연구하였다. 먼저, 장비 냉각에 필요한 유량 및 압력을 계산하여 대체 팬을 선정하였고, 신뢰성을 확보한 CFD 방열 해석 모델을 활용해 팬 선정의 타당성을 검증하였다. 이후 대체 팬을 장비에 적용하여 고온 운용 시험을 수행하였다. 그 결과 장비는 고온 환경에서 정상적인 기능을 발휘하였으며, 주요 부품 및 내부 공기 온도는 열적으로 안정된 상태임을 확인하였다.

Abstract: Sales of commercial-type cooling fans intended for application in military electronics are often discontinued during equipment production. This results in requirements for alternative fan selection as well as equipment performance and reliability tests, such as high-temperature operation testing. This study deals with alternative fan selection and verification methods that can be used during the production process. First, an alternative fan was selected by calculating the flow and pressure required to effectively cool the equipment, then the feasibility of the selected fan was verified using a reliable CFD heat dissipation analysis model. Following this, a high-temperature operation test was performed using the alternative fan in the equipment. Results demonstrated that the equipment satisfied its required function in a high-temperature environment, and the main parts as well as internal air temperature were found to be thermally stable.

- 기호설명 -

Q : 유량
 q : 시스템 내부 발열량
 ρ : 밀도
 C_p : 공기 비열
 ΔT : 허용 가능 시스템 내부 온도 변화
 $T_{allowable}$: 허용 가능 시스템 내부 온도

T_{air} : 대기 온도
 P : 압력
 $P_{fan}(Q)$: 유량에 따른 팬 정압
 R : 유동 저항

1. 서론

방산용 전자장비는 긴 개발기간과 양산 기간, 소량 생산의 특징이 있다. 따라서 원활한 생산을 위해서는 제품 제작에 필요한 주요 부품을 지속적으로 확보하는 것이 무엇보다 중요하다. 하지

[§] 이 논문은 대한기계학회 2016년도 학술대회(2016. 12.14.-16., 강원랜드 컨벤션센터) 발표논문임.

[†] Corresponding Author, yooneuiyoul@lignex1.com

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

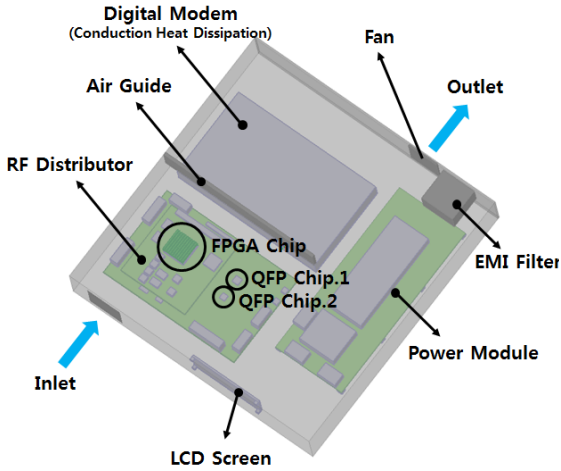


Fig. 1 System of electronic equipment

체 선정 및 검증을 통해 생산 과정에서 효과적으로 활용 가능한 팬 대체 선정 방안을 제시하고자 한다. 먼저, 보수적인 가정 및 경험적 관계식을 활용하여 방열을 위한 팬 선정의 주요 변수를 계산하고, CFD(Computational Fluid Dynamics) 방열 해석을 수행하여 대체 팬을 선정하였다. 이후 대체 팬 적용 장비에 대해 고온 운용시험, 열 안정성 분석을 수행하여 고온 신뢰성을 검증하였다. Fig. 1은 대상 장비의 주요 모듈과 소자 정보에 대한 개략 형상을 나타내고 있으며, 대체 팬 선정 및 검증의 세부 절차는 Fig. 2와 같다.

2. 대체 팬 선정

대체 팬 선정 시, 수급 가능한 팬이 장비의 냉각을 적절히 수행할 수 있는지 판단하는 것이 무엇보다 중요하다. 만약 적절한 냉각을 수행하지 못할 경우에는 장비에 대한 전반적인 방열 구조 재설계를 수행해야 하므로 수급 가능 팬의 장비 적용 가능 여부를 빠르고 정확하게 판단할 필요가 있다.

본 연구에서는 이에 대한 방안으로 이론적인 계산과 CFD 방열해석을 수행하였다. 통상적으로 CFD 방열해석은 해석모델 구성과 신뢰성 확보 등의 절차로 인해 검토 시간이 많이 소모되는 것으로 알려져 있지만, 생산 과정에서는 시제 장비를 활용해 신뢰성 확보를 비교적 빠르고 정확하게 진행할 수 있는 이점이 있다. 팬 선정의 주요 변수인 최소 유량과 작동 압력을 계산하여 수급 가능 팬의 장비 적용 가능 여부를 검토하였으며, 이후 신뢰성을 확보한 해석모델로 방열해석을 수행하여 대체 팬을 최종적으로 선정하였다.

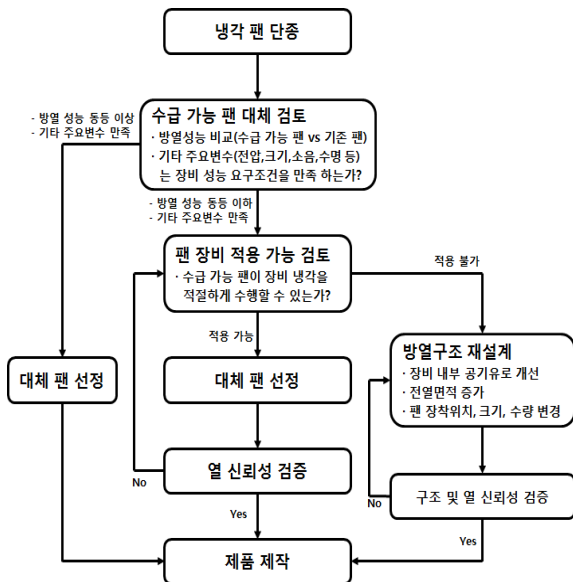


Fig. 2 Procedure for alternative fan selection and verification

만 강제 대류 방식의 방열구조가 적용된 전자장비의 핵심 부품인 냉각 팬은 상용(Commercial Type) 부품이 적용된 경우가 많아 제조사의 사정에 따른 부품 단종 등 수급 애로 문제가 자주 발생되고 있는 실정이다.

팬 단종이 발생할 경우 문제 해결을 위해 장비 냉각에 적합한 대체 팬 선정 및 고온 신뢰성 재검증이 요구된다. 만약 적합한 대체 팬이 없는 경우에는 장비 내부 공기유로(Air flow Path) 개선 및 전열면적(Heat Transfer Area) 증가, 팬 크기 및 수량 변경 등의 방열 구조 재설계를 함께 진행해야 하며 구조 신뢰성 재검증이 추가적으로 필요하다.

본 논문에서는 통신용 전자 장비의 냉각 팬 대

2.1 냉각 팬 선정

장비 냉각에 필요한 최소 유량은 수식 (1), (2)를 이용해 계산한 결과 3.2CFM(Cubic Feet per Minute)으로 나타났다. 계산을 위한 발열량은 장비의 열 안정성 확보를 위해 장비 소모 전력의 100%로 가정하였으며, 밀도와 비열은 표준 대기 상태로 가정하였다. 그리고 허용 가능 내부 온도는 Table 1에 나타난 Power Module의 허용 운용 온도 값에 약 20%의 안전율을 적용하여 65°C로 선정하였다. 마지막으로, 외부 대기 온도는 장비의 고온 운용 조건인 43°C를 적용하였다.

$$Q = \frac{q}{\rho \cdot C_p \cdot \Delta T} \tag{1}$$

Table 1 Thermal Spec. of component & system

System & components	Power consumption	Operating temperature
System	40.0W	Air : 43 °C (System operating temperature)
Power module	13.0 W	Air : 80 °C
Digital modem	18.0 W	Air : 60 °C (Conduction heat dissipation)
RF distributor	7.0 W	-
QFP Chip.1	1.5 W	Max junction:150°C ($\theta_{ja} = 38.0^\circ\text{C}/\text{W}$)
QFP Chip.2	0.5 W	Max junction:150°C ($\theta_{ja} = 38.0^\circ\text{C}/\text{W}$)
FPGA chip	4.0 W	Max junction:120°C ($\theta_{ja} = 7.25^\circ\text{C}/\text{W}$)
EMI filter	1.5 W	Air : 85 °C
LCD Screen	0.5 W	Air : 80 °C

Table 2 Calculation of pressure drop

Type of Pressure Drop	Head Loss @3.2CFM (mmH_2O)	Note
Filter_Air	2.56	Size : 54x36x3mm Area ratio: 30.0%(assumption)
Filter_EMI	0.16	Inlet & Outlet
Filter.1	0.15	Size : 54x36mm Area ratio : 41.3%(Datasheet)
Filter.2	0.01	Size : 54x36mm Area ratio : 79.6%(Datasheet)
Expansion	0.00	Inlet Equivalent Dia : 49.8mm Outlet Equivalent Dia : 176.5mm
Air guide (Nozzle)	0.05	Inlet Equivalent Dia : 176.5mm Outlet Equivalent Dia : 52.6mm Length of Nozzle : 2mm
Housing (Duct)	0.12	Cross Section Area : 86x12mm Length of Pipe : 430mm
Compression	0.02	Inlet Equivalent Dia : 176.5mm Outlet Dia : 50mm
Pressure Drop (P1-P4)	3.07	-

$$\Delta T = T_{allowable} - T_{air} \quad (2)$$

팬 작동 압력은 시간, 비용 측면에서 효율적이라 판단되는 유동 회로망 모델(FNM : Flow Network Modeling)을 이용해 계산하였다. 시스템 내부 유동 경로는 Fig. 3과 같이 가정하였으며, 이후 질량보존 관계식과 압력/유동 저항관계식을 활용하였다. 장비 내부의 대표적인 유동 절점들에 대한 압력을 P1, P2, P3, P4라 하고, 유량은 앞서 계산한 3.2CFM이 입구와 출구, 그리고 RF Distributor과 Power Module에서 일정하게 흐른다고 가정하였다. 이에 따라 시스템의 압력 손실은 식 (6)에 의해 결정된다.

$$P_2 - P_1 = -R_{12}Q^2 \quad (3)$$

$$P_4 - P_3 = -R_{34}Q^2 + P_{fan}(Q) \quad (4)$$

$$P_3 - P_2 = -R_{23}Q^2 \quad (5)$$

$$P_4 - P_1 = -(R_{12} + R_{23} + R_{34})Q^2 + P_{fan}(Q) \quad (6)$$

유동저항은 필터, 유로 확대/축소 손실, 유동 가이드(노즐), 하우징(덕트)과 같은 여러 가지 전자부품 및 유동요소들에 대한 경험적 상관관계식⁽⁶⁾을 이용해 계산하였으며, 관련 계산 조건 및 결과는 Table 2에 나타내었다. 계산에 필요한 조건 중 확인이 어려운 값은 보수적인 가정

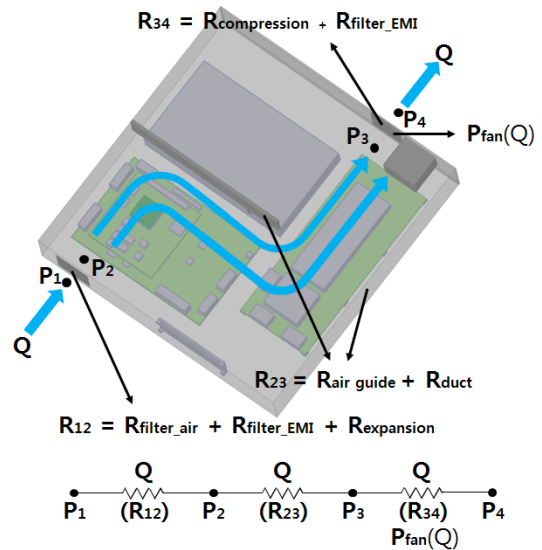


Fig. 3 Flow network model

을 통해 도출하였다. 에어필터의 면적 비는 30%로 가정하였으며, 하우징(덕트)의 단면적은 내부 모듈, PCB 및 와이어 등의 저항을 고려하여 실제 단면적의 20%로 축소 가정하여 계산을 수행하였다. 계산 결과 3.2CFM의 공기가 흐를 경우 시스템에 약 3.1 mmH₂O의 압력손실이 발생된다. Table 3은 계산된 유량 및 압력 값과 장비 성능 요구조건을 바탕으로 도출한 팬 요구 성능과 대체 팬 2종의 정보를 나타내고 있다.

Table 3 Allowable fan spec & info. of replaceable fan

	Allowable fan spec	Original fan (Maker: ETRI)	Replaceable fan. 1 (Maker: ETRI)	Replaceable fan. 2 (Maker: 동양)
Max. Air Flow	-	16.3CFM	14.2CFM	13CFM
Max. Pressure	-	8.0mmH ₂ O	6.2mmH ₂ O	4.3mmH ₂ O
Air Flow (@ 3.1mmH ₂ O)	3.2CFM	6.5CFM	5CFM	3.5CFM
Size (mm)	50x50x15	50x50x15	50x50x15	50x50x15
Voltage (Vdc)	5	5	5	5
Noise (dB)	Max. 36	36	28	29
Lifetime (hour)	40,000	70,000	70,000	43,900

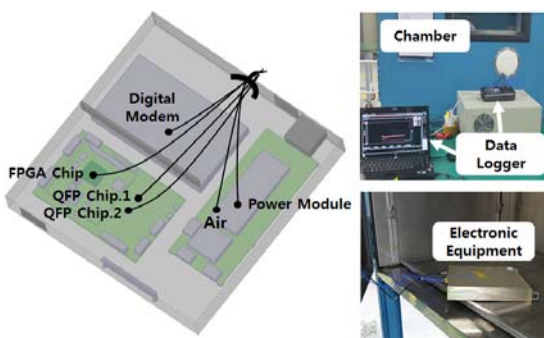


Fig. 4 Measuring temperature in system

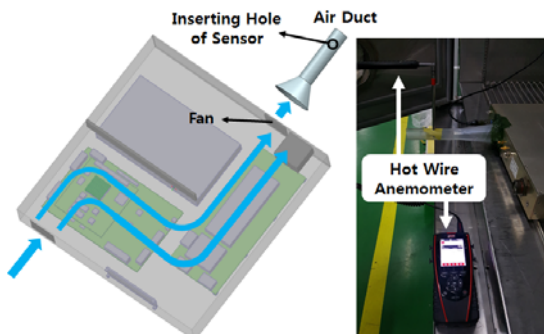


Fig. 5 Measuring volume flow of fan outlet

2.2. 팬 선정 타당성 검증

2.2.1 해석모델 신뢰성 검증

계산을 통해 선정된 대체 팬이 장비의 냉각을 적절히 수행할 수 있는지 확인하기 위해 CFD 방열해석을 수행하였다. 이에 앞서 방열해석 모델의 신뢰성 검증을 수행하였으며, 기존 팬이 장착된 장비의 주요 부품 및 내부 공기 온도, 팬 유량을 측정 한 후 이를 동일한 외부조건으로 수행된 방열 해석 결과와 비교하였다.

온도 측정은 대표적인 접촉식 온도 측정방법인 열전대(Thermo-Couple)를 이용하였으며, 유량 측정은 열선 풍속계(Hot Wire Anemometer)를 이용하

였다. 측정 방법에 대한 세부 정보는 Fig. 4 및 Fig. 5에 나타내었다. 장비를 고온 조건인 43℃로 유지되는 항온 항습 조에 넣고 주요 모듈 및 소자들이 열평형 상태에 도달할 때까지 구동시킨 후 온도 및 유량을 측정하였으며, 온도 측정 시 시스템 내부 공기 온도는 면적 대비 발열량이 가장 높은 Power Module 주변부를 측정하였다. 그리고 유량은 측정 오차가 가장 적을 것이라 판단되는 팬 출구에서 실시하였으며, 측정 지점의 공기 유속을 일정한 상태로 유지하기 위하여 Fig. 5에 나타난 것처럼 덕트를 이용하였다.

방열 해석은 상용 소프트웨어인 Icepak17.0을 통해 수행하였으며, 해석 시 사용된 난류모델 및 경계조건은 Table 4와 같다. 여기서, 발열량은 주요 모듈 및 소자에 대한 경험적 가정치를 차등 적용한 값이다. 발열량 산정을 위해 Table 1의 소모 전력 값 대비 30%로 발열량을 가정하여 상온조건으로 해석을 수행한 후, 해석과 동일한 조건에서 구동하는 장비의 온도 값을 측정하여 이를 비교하였다. 대부분의 모듈 및 소자는 해석 결과 및 측정값의 차이가 5% 이내 임을 확인하였고, 5% 이상 차이가 나는 QFP Chip. 1과 QFP Chip. 2에 대해서는 각각 보정치를 적용하여 5% 이내로 차이가 나도록 발열량을 선정하였다. 그리고 팬 경계조건은 해석 프로그램에서 제공하는 ‘Non-Linear Curve’ 기능을 활용하여 압력 및 유량의 성능곡선 형태로 입력하였으며, 제품 Data Sheet를 바탕으로 유량 및 압력 정보를 기입하였다. 또한, 팬 입/출구의 Air 및 EMI 필터 경계조건은 Table 2에 나타난 값을 동일하게 입력하였다. 해석 모델의 형상은 수렴 향상을 위해 육면체 형태로 간략화 하였으며, 주요 모듈 및 경계층에 더욱 많은 격자가 구성되도록 하였다. 그리고 격자 구성의 적절성 확인을 위해 격자수 변화에 따른 해석 결과의 차이를 분석하였

Table 4 Info. of calculation and boundary condition

Turbulent model		Zero equation	
Environmental condition		43 °C, 1atm	
Heat dissipation	System	12W	(30% of power consumption)
	Power module	3.9W	
	Digital modem	5.4W	
	RF distributor	2.1W	(15%)
	QFP Chip.1	0.225W	
	QFP Chip.2	0.1W	
	FPGA Chip	1.2W	
	EMI filter	0.45W	(30%)
LCD screen	0.15W		

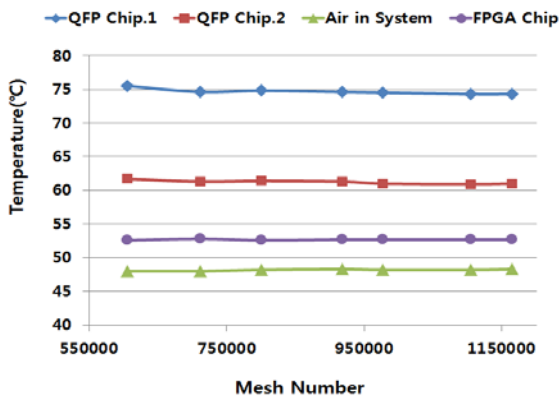
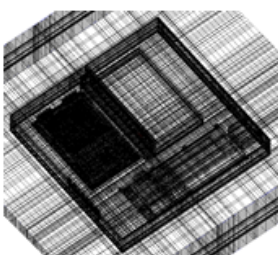


Fig. 6 Analysis of CFD results by mesh number



- Number of Mesh**
 - Num. Elements : 710903
 - Num. Nodes : 7575123
- Quality of Mesh**
 - Face Alignment : 0.385
 - (Elements less than 0.05 are severely distorted)

Fig. 7 Information of meshing

다. 분석 결과, Fig. 6에 나타난 것처럼 격자수가 55만개 이상일 경우 주요 해석 값의 차이에 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다. 이를 바탕으로 격자 구성을 Fig. 7과 같이 최종 완료하였다.

위 과정을 통해 구성된 해석모델로 방열 해석을 수행한 후 그 결과를 Fig. 8 및 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에 나타난 것처럼 방열해석 결과는 실제 온도 및 유량 측정값과 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 온도 오차 범위는 최대 7.7% 이내이

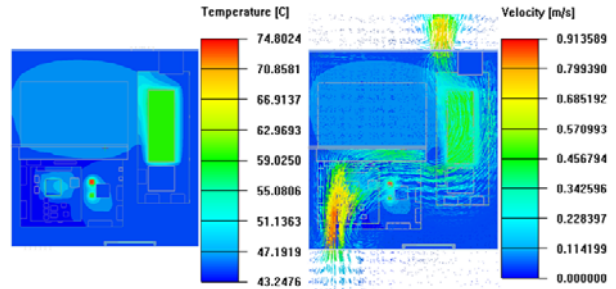


Fig. 8 Temperature contour & air flow distribution

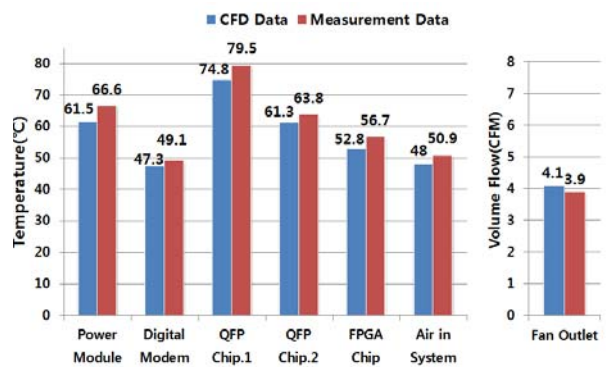


Fig. 9 Comparison of CFD & measurement

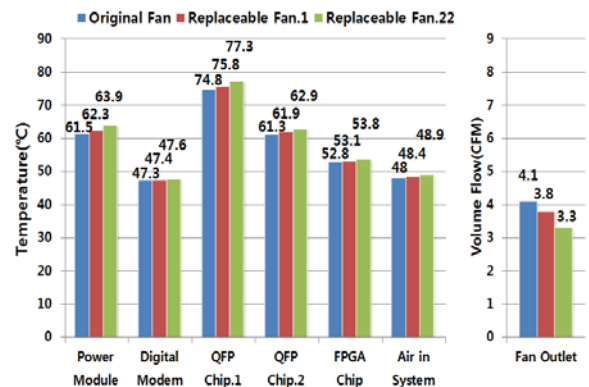


Fig. 10 Comparison of CFD results

며 유량 오차는 4.9%이다. 이는 발열량의 가정에 의한 오차, 케이블 유동저항 및 유체 마찰 등 해석 시 고려되지 않은 변수에 의한 오차, 측정에 의한 오차 등으로 판단된다.

2.2.2 방열해석

앞 절을 통해 검증된 해석 모델에 대체 팬 정보를 입력하여 방열해석을 수행한 후 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 해석 결과, Replaceable Fan. 1을 장비에 적용할 경우 주요 부품의 온도가 원팬 대비 최대 1°C 상승하며, Replaceable

Table 5 Thermal stability analysis of systems installed replaceable fan

	Air flow	Air in system	Chip.1	Chip.2	Chip.3
Allowable Temperature	3.2 CFM	65℃	100℃ (Case Tmep.)	100℃ (Case Tmep.)	80℃ (Case Tmep.)
Original Fan	4.1 CFM	48.0℃	74.8℃	61.3℃	52.8℃
Replaceable Fan. 1	3.8 CFM	48.4℃	75.8℃	61.9℃	53.1℃
Replaceable Fan. 2	3.3 CFM	48.9℃	77.3℃	62.9℃	53.8℃

Fan. 2를 적용할 경우에는 최대 2.5℃ 상승할 것으로 예측된다. 하지만 이는 원품 팬 대비 1.3%와 3.9% 수준의 변화율이므로 미미한 수준으로 판단된다.

해석 결과 값을 바탕으로 장비의 열 안정성을 분석하여 Table 5에 나타내었다. 여기서 허용 가능 온도는 장비의 열 안정성 확보와 2.2.1장의 해석모델 신뢰성 검증 결과에 따른 오차를 고려해 보수적인 값으로 선정하였다. 시스템 내부 공기 온도는 앞서 2.1장과 동일하게 65℃로 선정하였으며, 주요 소자의 허용가능 케이스 온도는 제품 데이터 시트에 나타난 허용 기준 대비 30~40%의 안전율을 적용하여 선정하였다. 분석 결과, 대체 팬 2종 모두 장비 냉각에 필요한 최소 유량인 3.2CFM 이상이 발생된다. 그리고 내부 공기 온도 및 주요 부품 온도는 허용 가능 온도 대비 각각 24.8%, 22.7% 이상의 마진을 확보하고 있다. 따라서 대체 팬은 장비의 방열 구조 변경 없이 적용 가능할 것으로 판단된다.

3. 시험 검증

대체 팬 선정의 타당성을 입증하기 위해 선정된 대체 팬을 실제 장비에 적용한 후 고온 운용 시험을 수행하였다. 시험 시료는 대체 팬 중 성능이 상대적으로 낮은 Replaceable Fan.2를 적용하였다. 항온 항습 조에 대체 팬이 적용된 장비를 넣은 후 고온 운용 시험을 수행하였으며, 제품 성능 요구 조건에 명시된 표준 시험절차의 요구 기능이 정상 작동함을 확인하였다.

또한, 2.2.1절의 Fig. 4 및 Fig. 5와 동일한 방법으로 대체 팬 장착 장비의 주요부품 및 내부 대

Table 6 Thermal stability verification of system installed replaceable Fan. 2

	Air flow	Air in system	Chip.1	Chip.2	Chip.3
Allowable temperature	3.2 CFM	65℃	100℃ (Case Tmep.)	100℃ (Case Tmep.)	80℃ (Case Tmep.)
System installed replaceable Fan. 2	3.2 CFM	52.2℃	80.0℃	64.5℃	58.0℃

기 온도, 팬 출구 유량을 측정한 결과 장비는 열적으로 안정된 상태임 확인하였다. 관련 분석 결과는 Table 6과 같다.

4. 결론

본 연구에서는 방산용 전자장비 생산 과정에서 자주 발생하는 냉각 팬 단종문제의 효과적인 해결방안을 모색하였다. 보수적인 가정과 경험적 관계식을 활용하여 팬 선정에 필요한 주요 변수를 계산하였으며, 신뢰성을 확보한 CFD 방열해석 모델을 이용해 장비 냉각에 적합한 대체 팬을 선정하였다. 이후 대체 팬을 장비에 적용하여 고온 운용 시험을 수행한 결과, 장비는 고온 환경 조건에서 정상적인 기능을 발휘하였으며, 주요 부품 및 내부 공기 온도는 열적으로 안정된 상태임을 확인하였다.

그러므로 상기 기술된 대체 팬 선정 및 검증 과정은 군용 전자장비 생산 중 발생하는 상용 팬 단종 문제, 전자장비 방열설계 등에 폭넓게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

(References)

- (1) Lee, C., Yun, J. H. and Gwon, O. K., 2007, "Selection and Noise Evaluation Methods of the System Electronic Cooling Fan," *Korean Society for Fluid Machinery.*, Vol. 10, No. 3, pp. 33~38.
- (2) Lee, W. H., Yu, Y. J. and Kim, H. Y., 2011, "A Study on the Thermal Design for A Signal Processor in the Micro-Wave Seeker," *The Korean Society For Aeronautical And Space Sciences.*, Vol. 39, No. 1, pp. 76~83.
- (3) Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Lavine, A. S. and

- Bergman, T. L., 2005, "Introduction to Heat Transfer," JOHN WILEY & Sons.
- (4) Kwon, S. J., Kim, S. Y., Kim, G. S. and Byun, C., 2016, "Thermal Design of Electronic Packages and Systems," *Korea Advanced Institute of Science and Technology*.
- (5) Kim, J. Y., 2014, "ICEPAK Basic," TSNE.
- (6) "www.pressure-drop.com".