Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering
Vol. 29, No. 12(2017), pp.645-653
ISSN 1229-6422(Print), 2465-7611(Online)
https://doi.org/10.6110/KJACR.2017.29.12.645

엇갈림 휜을 갖는 전자기기의 열유동 모델링 및 휜 형상 최적 설계

Thermal and Flow Modeling and Fin Structure Optimization of an Electrical Device with a Staggered Fin

김치원(Chiwon Kim)[1], **이관수**(Kwan-Soo Lee)[1†] , **여문수**(Moon Su Yeo)[2]
[1]한양대학교 기계공학부, [2]인하공업전문대학 자동차과
[1]*School of Mechanical Engineering, Hanyang Univeristy, Seoul, 04763, Korea*
[2]*Department of Automotive Engineering, Inha Technical College, Incheon, 22212, Korea*

(Received August 2, 2017; revision received November 11, 2017; Accepted: November 15, 2017)

Abstract Thermal and flow modeling and fin structure optimization were performed to reduce the weight of an electrical device with a staggered fin. First, a numerical model for thermal and flow characteristics was suggested, and then, the model was verified experimentally. Using the verified model, improvement in cooling performance of the cooling system through the staggered fins was predicted. As a result, 87.5% of total heat generated was dissipated through the cooling fins, and a thermal island was observed in the rotor because of low velocity of the internal air flow through the air gap. In addition, it was confirmed that the staggered fin improves the cooling performance but it also increases the total pressure drop within the cooling system, by maximizing the leading edge effect. Based on this analysis result, the effect of each design parameter on the thermal and flow characteristics was analyzed to select the main optimal design parameters, and multi-objective optimization was performed by considering the cooling performance and the fin weight. In conclusion, the optimized fin structure improved the cooling performance by 7% and reduced the fin weight by 28% without any compromise of the pressure drop.

Key words Air cooling(공랭), Electric device(전자기기), Optimization(최적화), Staggered fin(엇갈림 휜)

† Corresponding author, E-mail: *ksleehy@hanyang.ac.kr*

기호설명

M	: 질량
ΔP	: 압력강하량 [Pa]
$\dot{Q}$	: 열전달률 [W]
R_i	: 열저항 [°C/W]
T_i	: 온도 [°C]
T_∞	: 외기온도 [°C]
X_i	: 표준설계인자
x_i	: 설계인자

Subscript

c	: 커버
ref	: 정렬 휜 배열(기준모델)
s	: 고정자
sg	: 엇갈림 휜 배열모델
w	: 권선

1. 서 론

유도전동기는 고정자의 권선(winding) 및 회전자의 동바(copper bar) 사이의 유도기전력으로 인해 구동된다. 이러한 유도전동기는 영구자석을 사용하지 않기 때문에, 상대적으로 경제적이고 열적 내구성도 높다. 또한,

정류자(brush)를 사용하지 않기 때문에 내구성 측면에서도 유리하다. 그러나 유도전동기의 권선 및 동 바에서는 joule heating에 의하여, 고정자 및 회전자 본체에서는 전자기장의 변화로 인하여 다른 전동기에 비해 상대적으로 많은 발열이 일어난다.[1, 2] 이러한 발열을 적절히 방열하지 못할 경우 전동기의 온도가 과도하게 상승하여 전동기 자체의 수명 저하 및 작동 효율 감소를 초래한다. 전동기 수명은 권선 절연체의 수명과 일치하며, 권선의 온도가 10℃ 증가 할 때마다 권선 절연체의 수명은 절반으로 감소한다.[3] 또한, 설계 온도를 넘어 설 경우 전동기의 전자기적 특성이 변화하여 효율이 급감한다.[4] 이러한 이유로 인하여 전동기의 열 특성 분석 및 적절한 냉각 시스템 설계는 필수적이다.

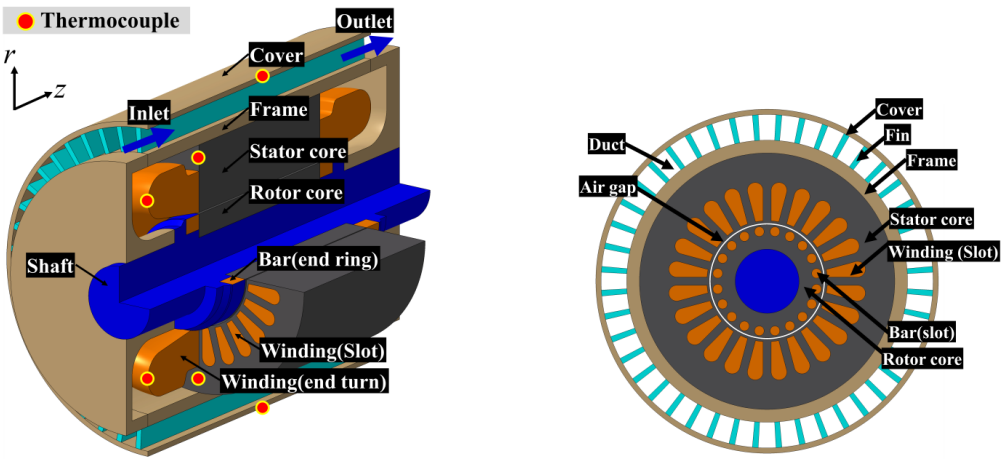
전동기의 냉각 시스템은 크게 공랭식과 수랭식으로 나눠진다. 이 중 공랭식 냉각 시스템은 작동 유체의 누수로 인한 합선 위험이 없어 안전하고, 방수 처리가 필요하지 않기 때문에 경제적이다. 이러한 장점으로 인하여 많은 전동기에서 공랭식 시스템을 사용하고 있다. 한 편, 공랭식 전동기에 대한 열해석 및 냉각시스템 최적화 연구는 주로 전산해석(CFD) 기법을 이용하여 수행 되었다.[5] Kim et al.[6]은 냉각 날개 형상을 최적화하여 전동기 냉각 성능을 향상시켰다. 또한 Kumar[7]는 전자기 현상을 고려한 전동기 휜 형상 최적화를 수행하였다. 그들은 고정자 요크(stator yoke) 부분에 위치한 냉각용 유로 및 휜을 최적화하여, 전자기적 성능을 유지 한 채 전동기의 냉각 성능을 개선하였다. Huai et al.[8]은 시간에 따른 유도전동기의 온도 상승 예측 및 이를 피드백 제어하는 공랭식 시스템을 설계 하였고, Chang et al.[9]은 다양한 휜 배열을 갖는 공랭식 냉각 시스템의 성능을 분석 한 후 전동기 냉각에 적절한 휜 배열을 제시하였다. 그러나 이러한 연구들은 모두 평휜(flat fin)을 이용한 전동기를 다루었기 때문에, 형상 개선에 따른 냉각 성능 향상 및 경량화에 한계가 따른다.

본 연구에서는 엇갈림 휜 배열을 이용한 전폐형 공랭식 유도전동기의 휜 형상 최적화를 통해 냉각 성능 향상 및 경량화를 수행하였다. 이를 위하여, 유도전동기에 대한 열 유동 특성 예측 모델을 제시하였고, 실험을 통하여 검증하였다. 나아가, 엇갈림 휜(staggered fin)을 적용 할 경우 전동기의 냉각 성능 및 유동 특성 변화를 분석하였고 최적화를 통한 경량화를 수행하였다.

2. 수학적 모델링

2.1 모델 형상

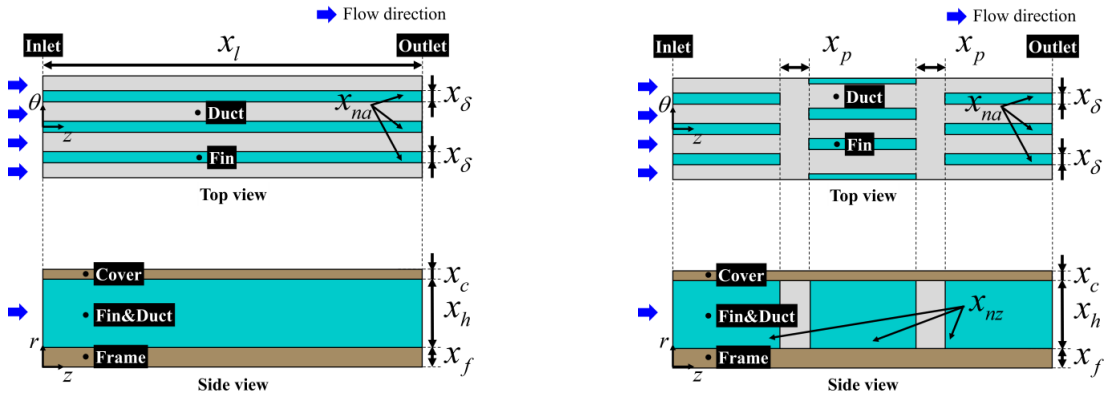
Fig. 1은 전폐형 유도전동기의 형상을 나타낸다. 대상 전동기는 고정자, 회전자, 냉각 시스템으로 이루어져 있다. 전동기의 가장 중심에는 회전축(shaft), 회전자 코어(rotor core) 및 동 바(bar)로 이루어진 회전자가 있다. 회전자의 외경은 106 mm이다. 회전자 외각에는 권선 및 고정자 코어가 있다. 고정자의 내경 및 외경은 각각 108.8, 240 mm로 회전자와 고정자 사이에는 1.4 mm의 공극이 존재한다.



(a) Isolated view (b) Cross section view

Fig. 1 Geometry of a totally-enclosed air-cooled induction motor.

 ⓒ SAREK



(a) In-line (b) Staggered

Fig. 2 Design parameters of the cooling fins.

Table 1 Definition and range of design parameters

x_i	Parameter	Range
x_{na}	Fin angular number	$40 \le x_{nz} \le 52$
x_{nz}	Fin axial number	$2 \le x_{na} \le 6$
x_h	Fin height	24 mm $\le x_h \le$ 32 mm
x_p	Fin pitch	8 mm $\le x_l \le$ 20 mm
x_δ	Fin thickness	3 mm $\le x_\delta \le$ 7 mm
x_f	Frame thickness	12 mm $\le x_f \le$ 14 mm
x_c	Cover thickness	4 mm $\le x_c \le$ 6 mm

고정자 외각에는 휜(fin), 프레임(frame) 및 커버(cover) 이루어진 냉각 시스템이 있다. 이때, 프레임, 커버 및 각 휜 사이의 빈 공간을 덕트(duct)로 명명하였다. 작동 유체인 공기는 입구(inlet)로 들어와 덕트에서 전동기를 냉각 시킨 후, 출구(outlet)로 배출된다. 덕트 유량은 외부 팬에 의해 총 $\dot{m}$ = 0.2 kg/s로 유지된다. 휜의 재질은 알루미늄 합금 6,061(ρ = 2,700 kg/m^3, k = 180 W/m · ℃이다. 휜의 종류는 기준(reference) 모델의 경우 정렬(in-line) 휜, 엇갈림(staggered) 및 최적(optimum) 모델의 경우 엇갈림 휜 이다. Fig. 2는 정렬 휜 및 엇갈림 휜의 형상 및 설계인자를 나타낸다. 각 설계인자들에 대한 설명 및 범위를 Table 1에 나타냈다. 이때, 휜의 총 길이는 x_l = 350 mm로 동일하다.

2.2 수치해석모델

전산 해석 모델링을 위해 다음과 같은 가정을 사용하였다.

(1) 3차원 정상상태, 난류유동이다
(2) 공기는 이상 기체이다
(3) 복사열전달을 무시할 수 있다.[10]

질량, 운동량, 에너지 보존 법칙에 대한 방정식은 다음과 같다.

Continuity

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

Momentum

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu+\mu_t)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right] \tag{2}$$

Energy

$$\rho C_p \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j T) = k_{eff}\frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} + (\tau_{ij})_{eff}\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{3}$$

유도전동기에서는 인가전류 및 유도전류에 의해 권선, 동 바, 고정자 코어, 회전자 코어에서 발열이 발생한다. 이러한 발열 정보는 오직 전자기 해석을 통하여 도출 할 수 있다. 본 연구에서는 FEM 기반의 상용 소프트웨어인 MAXWELL ver 13을 이용하여 발열 분석을 수행하였다. 각각의 부품에서의 발열량을 Table 2에 나타냈다.

2.3 수치 해석 방법

Fig. 3은 유도전동기 모델에 대한 계산영역을 나타낸다. 격자 수 및 해석 시간을 줄이기 위하여 회전 방향에 대하여 1/2 주기 모델을 사용하였으며, 이 때, x = 0 평면을 기준으로 축 방향에 대한 주기 조건을 사용하였다. 또한 실험 조건과 동일한 T_∞ = 25℃ 및 h_∞ = 20.4 W/m^2 · K을 최외각 경계조건으로 사용하였다. 난류모델의 경우. k-ε standard, k-ε RNG, k-ω standard, k-ω SST model 을 이용한 온도 및 총 압력 강하량 해석 결과를 실험 결과와 비교하여 가장 낮은 오차를 보인 k-ω SST model를 선택하였다. 격자 의존성의 경우 300~1,200만 개 수준에서 수행하였으며, 결과적으로 권선의 최대 온도 변화가 0.5% 이내인 800만 개 수준의 육면체 격자를 선정하였다. 이때, 난류모델의 신뢰성 확보를 위하여 벽면 첫 격자의 높이를 y^+ < 5을 만족하는 수준으로 생성하였다.

Table 2 Heat generation rate in the induction motor

Part	Heat generation rate[W]	Volumetric heat generation rate[W/m^3]
Winding	970	184,795
Stator core	1,672	335,492
Bar	855	2,196,270
Rotor core	503	545,414
Total	4,000	-

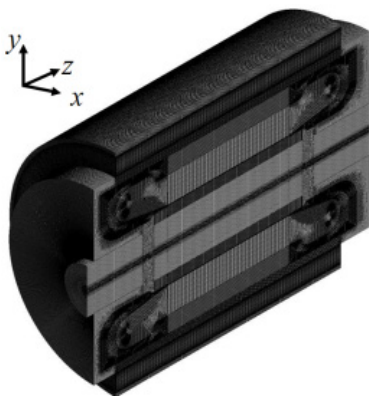


Fig. 3 Computational domain.

ⓒ SAREK

3. 실험 및 검증

전산해석 결과의 타당성을 검증하기 위하여 전폐형 공랭식 유도전동기의 온도 측정 실험결과를 해석 결과와 비교하였다. Table 3은 외기 온도 T_∞ = 25℃ 및 덕트 유량 $\dot{m}$ = 0.2 kg/s인 조건에서의 실험결과 및 해석 결과를 나타낸다. 권선, 고정자, 덮개에 대하여 각각 2 지점에서 온도를 열전대(type-T)와 데이터 수집 장치를 이용하여 측정하였다. 이때, 냉각 성능 평가 지표인 열저항 R_i은 다음과 같이 정의한다.

$$R_i = \frac{T_i - T_\infty}{\dot{Q}_{total}} \tag{4}$$

열저항 측정 결과의 최대 불확실도는 3.4%이다. 검증 결과, 본 모델은 권선, 고정자, 프레임 표면에서 최대 5% 이내의 오차를 나타냈다.

4. 결과 및 고찰

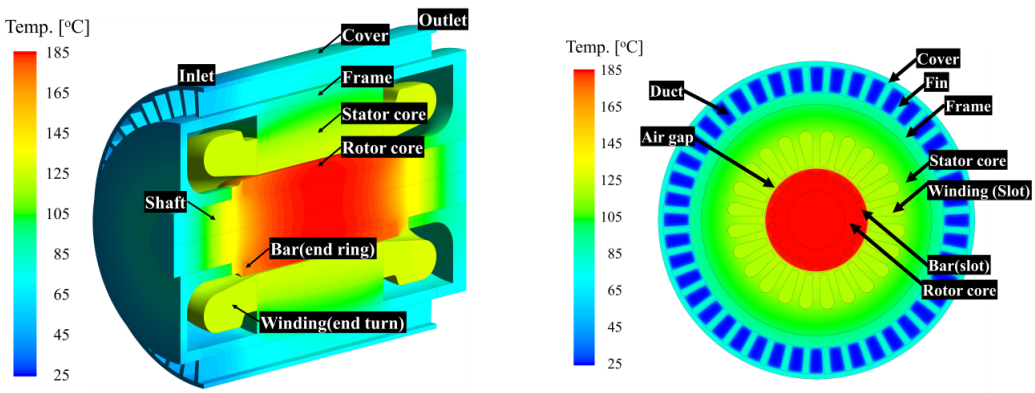
해석 모델을 바탕으로, 전폐형 공랭식 유도전동기에 대한 열 특성 예측을 수행하였다. 또한, 엇갈림 휜 배열 적용 시 전동기의 열유동 특성 변화를 예측하고, 휜 형상 최적화를 통해 냉각 성능 개선 및 경량화를 수행하였다.

4.1 기준 모델 열유동 특성 분석

Fig. 4는 정렬 휜을 갖는 기준 모델의 열적 특성을 해석한 결과이다. 외기 온도는 T_∞ = 25℃이며 덕트 유량은 $\dot{m}$ = 0.2 kg/s이다. 설계 인자는 x_{na} = 44, x_h = 28 mm, x_δ = 5 mm, x_f = 12 mm, x_c = 5 mm이다. 해석 결과, 전동기에서 열적으로 가장 주요한 권선에서의 냉각 성능은 $R_{w.ref}$ = 0.0251℃/W이며, 휜 질량은 총 M_{ref} = 6.0 kg으로 나타났다. 냉각 경로 분석 결과 전체 발열량의 87.5%가 냉각 휜을 통해 방열되었다. 이와 같이 전폐형

Table 3 Comparison of experimental and numerical results

Part	Winding R_w[℃/W]	Stator R_s[℃/W]	Cover R_c[℃/W]
Experience	0.0256	0.0187	0.0132
CFD	0.0251	0.0180	0.0126
Error[%]	1.9%	3.6%	4.6%



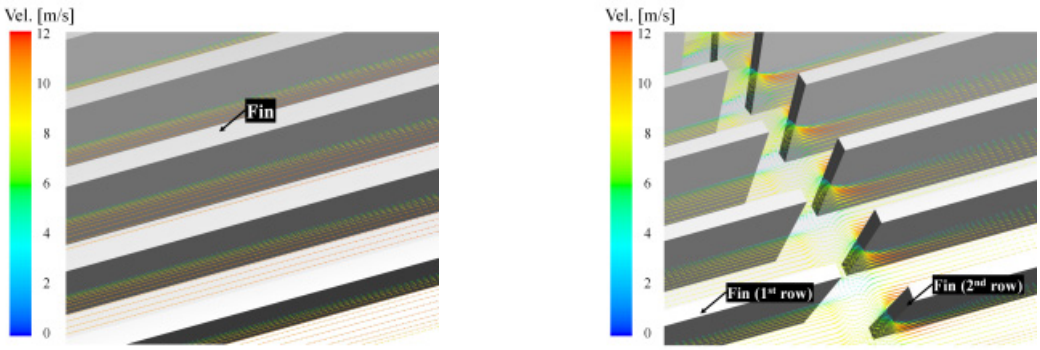
(a) Isolated view (b) Cross section view

Fig. 4 Temperature distribution of induction motor with in-line cooling fins.

전동기에서 냉각 휜이 방열에 지배적인 영향을 미치는 원인은 외부 공기가 전동기 내부로 유입되지 않는 밀폐형 구조를 가지기 때문이다. 상대적으로 정체되어 있는 내부 공기에 의한 대류 열전달이 활발하지 않기 때문에, 각 부품에서의 발열은 대부분 전도 열전달을 통해 고정자 및 고정자와 접해 있는 휜을 통해 방열된다. 따라서 반지름 방향에 대하여, 전동기 내부 온도는 회전자에서 가장 높으며 휜에 가까워질수록 낮아진다. 한편, 축 방향의 경우, 고정자와 휜이 맞닿아 있는 중심부에서 최대 온도를 가지나, 입/출구 측 공기 온도 차(16℃)로 인해 최대 온도는 출구 측으로 편향되어 나타난다.

4.2 엇갈림 휜 배열 효과 분석

평 휜(flat fin)의 경우, 선단효과에 의해 입구 부근에서 열전달이 가장 활발히 일어나며, 유동 방향으로 갈수록 열전달계수가 급감한다. 이때, 기존 평 휜을 개량한 엇갈림 휜 배열을 사용할 경우 선단효과를 극대화시킴으로써 이러한 문제를 개선시킬 수 있다. Fig. 5는 기준 모델에서의 정렬(in-line) 휜 및 엇갈림(staggered) 휜에 대한 속도 벡터 분포를 나타낸다. 이때 각 휜의 설계 인자는 Table 4와 같다. 정렬 휜의 경우, 입구에서 멀어 질수록 속도장이 수렴하여 비교적 단조로운 유속 분포를 나타낸다. 반면 엇갈림 휜의 경우 휜의 배열이 달라지는 구간에서 기존의 속도 경계층이 파괴되고 재생성되기 때문에 선단효과가 극대화된다. 이로 인해, 엇갈림 휜의 경우 동일한 형상조건을 갖는 정렬 휜에 비해 냉각성능이 월등히 높아진다. Fig. 6은 기준 모델에서의 정렬(in-line) 휜 및 엇갈림(staggered) 휜에 대한 온도 분포를 비교하여 나타낸다. 해석 결과, 엇갈림 휜 배열을 적용 할 경우 휜 및 프레임 전체에서 온도가 낮아지는 효과가 나타났다. 엇갈림 휜 배열을 사용할 경우의 냉각 성능은 권선 기준 $R_{w.sg}$ = 0.0219℃/W이며, 휜 질량은 총 M_{sg} = 5.4 kg으로 나타났다. 이는 기존 정렬 휜과 비교하여 냉각 성능이 13% 향상되었으며, 10% 경량화 된 결과이다. 이와 같이 엇갈림 휜 배열 적용 시 정렬 휜과 비교하여 전동기 냉각 성능 향상 및 경량화에 매우 효과적이다. 한편, inlet 및 outlet 간 압력 강하량의 경우 엇갈림 휜 배열 사용 시 기존 대비 36% 증가하였다. 따라서, 엇갈림 휜 배열을 사용하여 휜 최적화를 수행하기 위해서는, 설계 인자들과 냉각 성능, 질량, 압력 강하량을 모두 고려해야 한다.



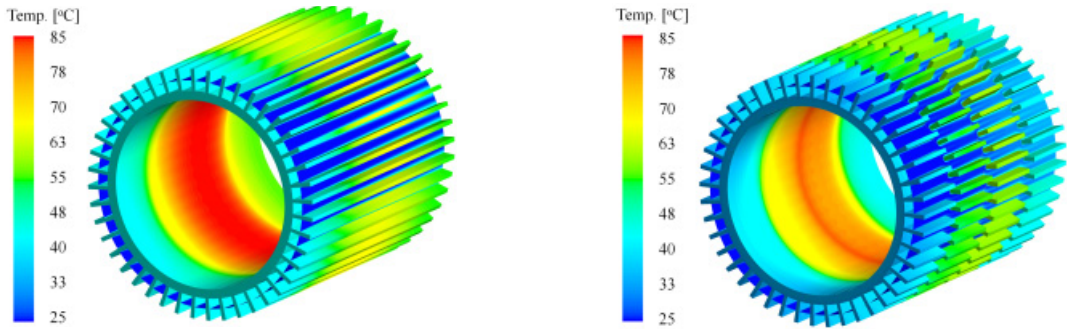
(a) In-line (b) Staggered

Fig. 5 Velocity vector in the ducts with in-line and staggered fins.

Table 4 Value of design parameters of the cooling fins

x_i	In-line	Staggered
x_{na}	44	44
x_{nz}	-	4
x_h	28 mm	28 mm
x_p	-	12 mm
x_δ	5 mm	5 mm
x_f	12 mm	12 mm
x_c	5 mm	5 mm

ⓒ SAREK



(a) In-line (b) Staggered

Fig. 6 Temperature distribution of cooling fins with in-line and staggered fins.

4.3 설계 인자 영향도 분석

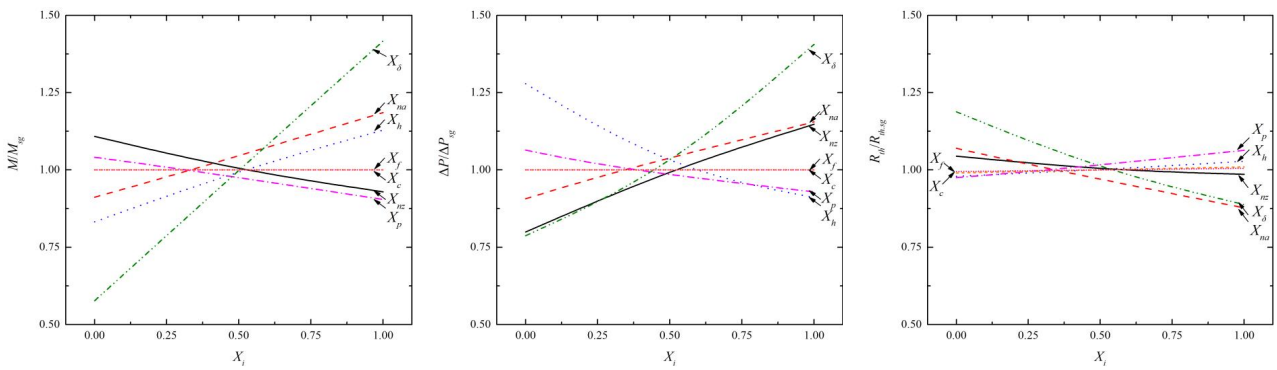
각 설계 인자들이 전동기 열유동 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 영향도 분석을 수행하였다. 이때 동일한 해석 조건(T_∞ = 25℃, $\dot{m}$ = 0.2 kg/s)을 부여하였으며, 각각의 설계 인자들을 다음과 같이 무차원화 하였다.

$$X_i = \frac{x_i - x_{i.\min}}{x_{i.\max} - x_{i.\min}} \tag{5}$$

Fig. 7은 휜 질량, 압력 강하량, 냉각 성능에 대한 설계 인자들의 영향도를 나타낸다. 주어진 설계 인자들의 탐색 범위에서(Table 1 참고), 휜 질량에 대한 설계 인자의 영향이 가장 크게 나타났다. 단일 설계 인자의 경우, 휜 두께(x_δ)가 휜 질량(M), 압력 강하량(ΔP), 냉각 성능(R_i)에 모두에서 가장 큰 영향을 미쳤다. 반면, 프레임 두께(x_f) 및 커버 두께(x_c)의 경우 모든 특성에 대하여 1% 이내의 영향을 미쳤다. 따라서, 냉각 성능, 압력 강하량, 질량에 대항 영향력이 상대적으로 큰 휜 개수(x_{na}), 휜 열(x_{nz}), 휜 높이(x_h), 휜 피치(x_p), 휜 두께 (x_δ)을 최적 설계 인자로 선정하였다.

4.4 최적설계

냉각 휜의 경량화 및 냉각 성능 향상을 위한 최적 설계를 수행하기 위하여 표준 설계 인자 X_{na}, X_{nz}, X_h, X_p, X_δ에 대한 최적화를 수행하였다. 이때, 전동기 열유동 특성에 영향력이 상대적으로 낮은 프레임 두께(x_f) 및 커버 두께(x_c)는 기준 케이스와 동일하게 고정하였다. 이때, 목적 함수와 구속 조건은 다음과 같다.



(a) Mass (b) Pressure drop (c) Thermal Resistance

Fig. 7 Effects of design parameters on the mass, pressure drop and thermal resistance of cooling fins.

Find	X_{na}, X_{nz}, X_h, X_p, X_δ
To Minimize	$M/M_{ref}+R_w/R_{w.ref}$
Subject to	$0 \le X_{na} \le 1$
	$0 \le X_{nz} \le 1$
	$0 \le X_h \le 1$
	$0 \le X_p \le 1$
	$0 \le X_\delta \le 1$
	$M/M_{ref} \le 1$
	$\Delta P/\Delta P_{ref} \le 1$
	$R/R_{ref} \le 1$

냉각 휜 형상 최적화 시, 상용 최적 설계 프로그램인 PIAnO^{TM} 2017을 사용하였다. 메타모델 생성을 위하여 직교 배열표 $L_{27}(3^5)$를 사용하여 총 27개의 실험점을 선정하였다. 각각에 실험점에서, 전산 해석 기법을 이용하여 냉각 휜의 질량, 압력 강하량 및 열저항을 계산하였으며, 각각에 대한 메타모델을 Kriging 모델을 이용하여 생성하였다. 최종적으로 메타모델 및 진화 알고리즘을 이용하여 최적의 설계 변수값을 도출하였다. 유전 알고리즘에서, 일 점 교배(one-point crossover), 단순 돌연변이(simple mutation) 엘리트 선택(elitism selection)을 이용하여 자손 해(offspring)를 도출하였다. 이때, 진화 알고리즘에 사용한 인자들은 다음과 같다.

- Population size : 200
- Mutation probability : 0.01
- Selection probability : 0.15

최적 해가 30세대 이상 지속 될 경우 수렴한 것으로 간주하였으며, 해석 결과 90세대 이후 최적 해에 수렴하였다. Fig. 8은 최적 해에 대한 냉각 휜을 나타낸다. 최적 해의 설계 인자는 x_{na} = 46, x_{nz} = 3, x_h = 29.6 mm, x_p = 16.4 mm, x_δ = 3.6 mm이며, 이때 질량 및 열저항은 각각 R_w = 0.0233 °C/W, M = 4.3 kg이다. 이는 기존 정렬 휜과 비교하여 냉각 성능이 7% 향상되었으며, 28% 경량화 된 결과이다.

5. 결 론

본 연구에서는 전폐형 공랭식 유도전동기의 열유동 모델링 및 냉각 휜 최적 설계를 수행하였다. 이를 위하여 전산 해석 기반의 열유동 예측 모델을 제시하였으며 실험을 통하여 검증하였다. 또한, 정렬 휜을 갖는 기준 모델의 열유동 특성을 예측하였으며, 냉각 휜에 엇갈림 휜 배열을 적용 할 경우 나타나는 열유동 특성 변화를 예측하였다. 해석 결과, 전폐형 전동기의 경우 냉각 휜이 방열에 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타났다.

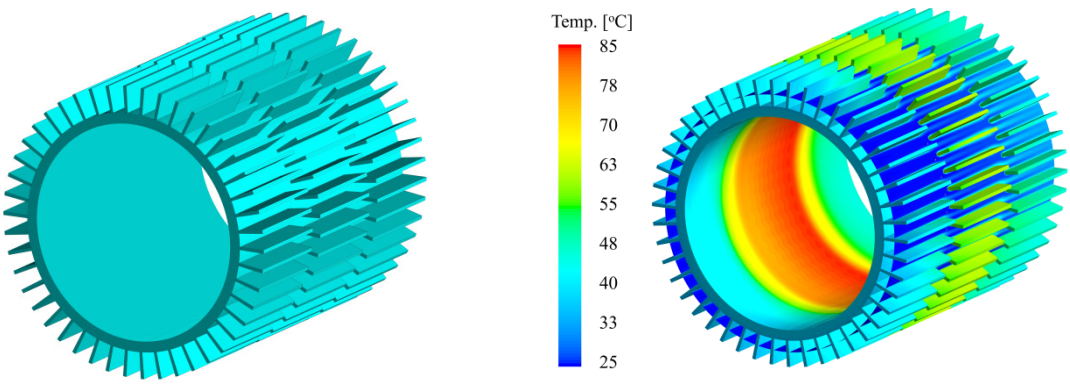


Fig. 8 Optimum solution of the cooling fins.

ⓒ SAREK

또한 엇갈림 휜 배열 적용 시, 정렬 휜 대비 냉각 성능 상승 및 경량화를 달성 할 수 있으나, 총 압력 강하량이 크게 상승할 수 있음을 확인하였다. 이를 고려하여 최적 설계를 수행 한 결과, 기존 정렬 휜 대비 압력 강하량 손실 없이 냉각 성능이 7% 향상되었으며, 28% 경량화 된 냉각 구조를 제시하였다.

후 기

본 연구는 2017년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20162010103830, 20164010200860).

References

1. Kim, C. and Lee, K.-S., 2017, Numerical investigation of the air-gap flow heating phenomena in large-capacity induction motors, International Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 110, pp. 746-752.
2. Schiferl, R. and Lipo, T. A., 1989, Core Loss in Buried Magnet Permanent-Magnet Synchronous Motors, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 4, No. 2, pp. 279-284.
3. Bonnett, A. H., 2001, Operating temperature considerations and performance characteristics for IEEE 841 motors, Ieee Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 4, pp. 1120-1131.
4. Yoon, M. K., Jeon, C. S., and Kauh, S. K., 2002, Efficiency increase of an induction motor by improving cooling performance, Ieee Transactions on Energy Conversion, Vol. 17, No. 1, pp. 1-6.
5. Boglietti, A., Cavagnino, A., Staton, D., Shanel, M., Mueller, M., and Mejuto, C., 2009, Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of Electrical Machines, Ieee Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 3, pp. 871-882.
6. Kim, M. S., Lee, K. S., and Um, S., 2009, Numerical investigation and optimization of the thermal performance of a brushless DC motor, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 52, No. 5-6, pp. 1589-1599.
7. Kumar, A., Marwaha, S., Marwaha, A., and Kalsi, N. S., 2010, Magnetic field analysis of induction motor for optimal cooling duct design, Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 18, No. 2, pp. 157-164.
8. Huai, Y., Melnik, R. V. N., and Thogersen, P. B., 2003, Computational analysis of temperature rise phenomena in electric induction motors, Applied Thermal Engineering, Vol. 23, No. 7, pp. 779-795.
9. Chang, C.-C., Kuo, Y.-F., and Wang, J.-C., Chen, S.-L., 2010, Air cooling for a large-scale motor, Applied Thermal Engineering, Vol. 30, No. 11-12, pp. 1360-1368.
10. Boglietti, A., Cavagnino, A., Parvis, M., and Vallan, A., 2006, Evaluation of radiation thermal resistances in industrial motors, Ieee Transactions on Industry Applications, Vol. 42, No. 3, pp. 688-693.