

영구자석 모터의 냉각유로에 대한 수치해석적 연구

남궁근* · 주원구*† · 손석우** · 김준호** · 박준영*** · 김병국**** · 구대현****

A Numerical Study on the Cooling channel of Permanent Magnet Motor

Geun Nam Gung*, Won-Gu Joo*†, Seok Woo Son**, Jun Ho Kim**,
Jun Young Park**, Byong Kuk Kim****, Dae Hyun Koo****

Key Words : Cooling channel(냉각유로), Thermal analysis(열 해석), Permanent magnet motor(영구자석 모터), Computational fluid dynamics(전산유체역학)

ABSTRACT

This paper describes thermal analysis of a cooling channel in high-speed permanent magnet motor for a 75 kW, 73,000 rpm class turbo-compressor. To cope with the demagnetization risk of permanent magnet motor in the turbo-compressor, the numerical analysis was performed to the cooling channels and the model of the PM motor. Two types of the cooling channel, water cooling channel and air cooling channel, are compared. The air cooling channel is excellent with respect to cooling performance. Also, the cooling performance according to the shape of the air cooling channel was conducted.

1. 서 론

최근 산업용 기계에 사용되는 냉각 팬이나 공기 블로워 구동용 고속 회전기 개발의 필요성이 대두되고 있다. 고속 회전을 얻기 위하여 과거에는 엔진, 유도기와 증속 기어 등을 사용하였지만 소음, 중량, 효율저감 등의 단점을 가지고 있다. 고밀도 영구자석 개발로 인하여 소형화, 고효율화 등이 가능한 고속 영구자석 모터가 대안으로 떠오르고 있으며, 영구자석 모터를 활용한 산업용 기계에 대한 연구가 국내외적으로 활발하게 진행되고 있다. 다양한 분야에서 영구자석 모터를 활용하기 위한 열 특성에 대한 연구가 활발히 진행 중이며^(1,2), 영구자석 모터의 발열 억제가 필수적인 요소이므로 냉각방법에 대한 연구 또한 많은 기관에서 수행 중이다^(3,4).

소형 압축기의 경우 적은 유량과 높은 토출 압력이 요구되는 곳에서 활용되기에 고효율을 위해 고속회전 구동이 필수적이다. 원심압축기의 고속 운전을 위해서는 영구자석 모터

를 이용하는 것이 구조적으로 유리하다. 반면에 영구자석 모터의 손실에 의해 발생하는 발열에 대해서는 부피가 작아 열 전달이 불리하다는 단점이 있다. 손실에 의한 과도한 발열은 영구자석 모터의 효율과 압축기의 공력성능에 영향을 미치기 때문에 발열억제를 위한 냉각유로 설계가 필요하다. 압축기용 영구자석 모터에 대한 열 특성 해석 및 설계에 대해서는 많은 연구가 진행 중이지만^(5,6), 영구자석 모터의 열 특성을 고려하여 냉각유로에 대한 해석까지 진행한 연구는 부족하다.

본 논문은 영구자석 모터를 이용한 고속 터보 공기압축기에 대한 냉각유로의 냉각성능을 해석하고, 냉각유로의 형상 변화에 따른 열 유동 특성을 고찰하였다. Fig. 1은 영구자석 모터를 이용한 터보 압축기의 구성을 나타내었다. 터보 압축기는 2단 공기압축기이며, 상부의 1단 임펠러, 하부의 2단 임펠러, 회전축, 영구자석 모터, 냉각유로 및 자기베어링 등으로 구성된다. Table 1은 영구자석 모터의 사양 및 재질을 나타낸다.

* 연세대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Yonsei University)

** (주)대주기계 (DaeJoo Machinery)

*** 한국기계연구원 (Korea Institute of Machinery and Materials)

**** (주)브이지엠 (VGM)

† 교신저자, E-mail : joo_wg@yonsei.ac.kr

Table 1 Rated specification and materials of PM motor

Rated specifications			
Output [kW]	75	Rotating speed [rpm]	73,000
Materials			
	k [W/m·K]	C _p [J/kg·K]	
Permanent magnet (NdFeB-N42UH)	8.9	502	
Sleeve (Inconel 718)	11.2	435	
Shaft (STS304)	16.2	502	

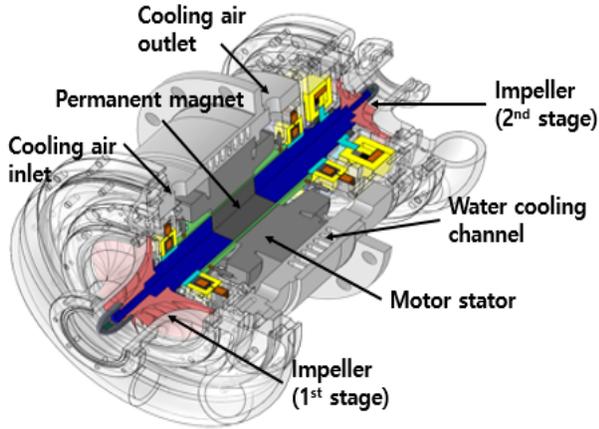


Fig. 1 Main part of turbo compressor

2. 해석모델 및 조건

2.1 해석모델

본 연구에서는 냉각유로의 수치해석을 위해 압축기의 하우징(housing), 영구자석 모터(permanent magnet motor) 그리고 냉각유로(cooling channel)를 해석영역으로 구성하였다. 압축기의 냉각유로는 Fig. 2와 같이 하우징 상단부의 수냉 유로(water cooling channel)와 압축기 내부의 공냉 유로(air cooling channel)를 포함하고 있다.

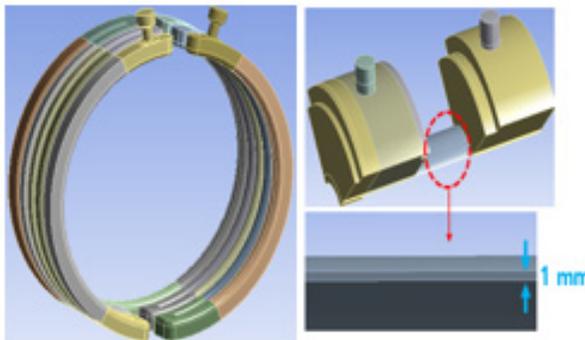


Fig. 2 Modeling view of cooling channels : water cooling channel (left), air cooling channel (right)

2.2 수치해석방법

상용 유동해석 프로그램인 ANSYS CFX 17.1을 이용하여 터보 압축기의 냉각 유로 해석을 진행하였다. 냉각 유로의 내부 유동영역은 삼차원 정상상태 Reynolds Averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식에 의해 유동해석이 수행되었다. 오일러 기술법을 기반으로 한 근사해석 기법인 유한체적법(Finite Volume Method)으로 이산화 된 연속 방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식을 지배방정식으로 사용했다.

(i) 연속 방정식:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \tag{1}$$

(ii) 운동량 방정식:

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \cdot U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau \tag{2}$$

여기서, $\tau = \mu[\nabla U + (\nabla U)^t - \frac{2}{3}\delta \nabla \cdot U]$

(iii) 에너지 방정식:

$$\frac{dq}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho(gh + \frac{u^2}{2} + e)dV + \int_{cs} \rho(gh + \frac{u^2}{2} + e + \frac{p}{\rho})(u \cdot \hat{n})dA \tag{3}$$

본 연구에서는 냉각유로의 냉각성능에 영향을 미치는 축 틈새를 통과하는 냉각공기의 유동을 기준으로 레이놀즈수(Reynolds number)를 판단하였다. 축 틈새를 통과하는 냉각공기의 레이놀즈수는 약 12,000이며, 일반적으로 얇은 유막을 갖는 베어링에서 레이놀즈수가 약 4,000에 도달하면 유체 유동이 층류에서 난류로 천이가 시작된다. 이에 따라 1 mm의 작은 틈새를 통과하는 본 연구의 유동을 난류유동으로 판단하여 수치해석을 수행하였다.

냉각 매체의 난류 모델은 유동박리 및 경계층 모사에 우수한 k-w 기반의 SST (Shear Stress Transport) 모델을 사용하였다. k-w 기반 SST 모델은 벽면 인근에서 k-w를, 그 이외의 영역에서는 k-ε 모델을 적용하여 두 모델의 단점을 보완하여 장점을 살린 모델이다.⁽⁷⁾ 상용 유동해석 프로그램인 ANSYS CFX 17.1에서 k-w와 k-ε 모델은 난류 점성항인 μ_t 에서 차이를 보이고 있으며, 각 수식은 아래와 같다.

$$k-w \text{ 모델} : \mu_t = \rho \frac{k}{w} \tag{4}$$

$$k-\varepsilon \text{ 모델} : \mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

Table 2 Number of nodes for main components

Mesh type	Housing	Shaft	Water cooling channel	Air cooling channel	Total nodes
Hybrid	7.2×10^6	1.3×10^6	4.6×10^6	1.4×10^6	1.0×10^7

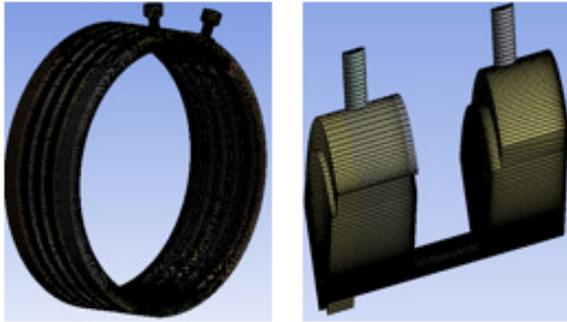


Fig. 3 Grids of cooling channels : water cooling channel (left), air cooling channel (right)

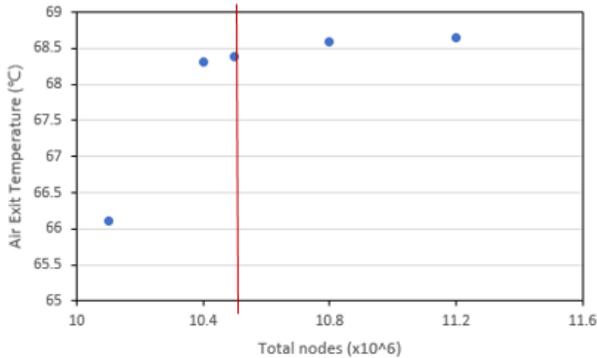


Fig. 4 Grid dependency test

또한, 수치해석을 이용한 해석 결과에 주요한 영향을 미치는 격자계는 격자 생성의 용이성을 고려한 비정렬 격자계와 해석의 수렴성 및 경제성을 고려한 정렬 격자계를 병행한 혼합 격자계로 생성하였다.

Table 2와 같이 주요 부분에 대한 격자를 구성하였다. Fig. 3은 냉각유로의 격자를 나타내었다. Fig. 4는 격자 의존성 확인 결과를 나타내었으며, 약 1,050만 개의 격자를 형성하였다.

본 연구에서는 터보 압축기 내의 영구자석 모터의 냉각을 위해 두 종류의 냉각유로를 사용하였다. 냉각유로 중 수냉 유로는 고정된 입구유량 0.1 kg/s를 가지며, 냉각 매체로 15°C의 물을 사용하였다. 공냉 유로의 경우 고정된 입구압력 180 kPa을 가지며, 냉각 매체로 25°C의 공기를 사용하였다.

Table 3 Boundary conditions of cooling fluids

Water cooling channel	
Inlet (Mass flow)	0.1 kg/s
Outlet (Static pressure)	101,325 Pa
Temperature	15

Air cooling channel	
Inlet (Total pressure)	180 kPa
Outlet (Static pressure)	101,325 Pa
Temperature	25

또한 냉각유로의 냉각 매체와 압축기의 고체부분이 만나는 면에는 열 유속 보존조건을 설정하여 고체-유체간의 열 전달 현상을 모사하였다. 이와 함께 고체간의 열 전달 현상을 모사하여 터보 압축기의 영구자석 모터 주위를 흐르는 유동과 고체에 의한 열 전달 현상을 실제처럼 모델링하였다. 본 연구에 사용된 냉각유로의 경계조건은 Table 3에 표기하였다.

2.3 열원분석

본 연구에서 사용된 모터는 영구자석 모터로서, 고정자 코어, 축 그리고 영구자석으로 구성된다. 영구자석 모터의 발열원이 되는 손실은 동손, 철손 그리고 기계손 등이 있으며, 온도 상승에 크게 영향을 미치는 손실은 동손과 철손이다.

동손 P_{copper} 는 권선의 저항에 의해 발생하는 열 손실로써, 도체에 흐르는 전류밀도의 제곱에 비례하고 권선의 저항 값에 비례한다. 고정자의 권선에서 발생하는 동손은 식 (6)에 의해 계산된다. 여기서 ρ_{cu} , J 은 각각 권선의 저항, 전류밀도를 나타낸다.

$$P_{copper} = \rho_{cu} J^2 [W/m^3] \quad (6)$$

철손은 일반적으로 시변자계에 의해 생기는 히스테리시스 손(hysteresis loss)과 와전류손(eddy current loss)로 구분되어진다. 히스테리시스 손은 철심의 자구의 변화에 따른 에너지 손실에 기인한다. 이는 자성체의 성질에 의하여 발생하며, 식 (7)에 의해 계산된다. 여기서 f , B_m 은 각각 자속의 주파수, 최대자속 밀도를 나타낸다.

$$P_h = k_h f B_m^n [W/m^3] \quad (7)$$

와전류손은 철심의 도전율에 의해 발생되며, 철심 내부에서 시변자속에 의하여 유기된 전류의 형성에 기인한다. 와전류손은 식 (8)에 의해 계산된다.

$$P_e = k_e f^2 B_m^2 [W/m^3] \quad (8)$$

철손 P_{core} 는 히스테리시스손과 와전류손의 합으로 식 (9) 와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 k_h, k_e 는 각각 히스테리시스 손실계수, 와전류 손실계수이며, n 은 Steinmetz 상수이다⁽⁸⁾.

$$P_{core} = P_h + P_e = k_h f B_m^n + k_e f^2 B_m^n \quad [W/m^3] \quad (9)$$

Table 4 Electric losses of PM motor

Copper Loss [W]	Core Loss [W]	Total [W]
663	918	1,581

본 연구에서 사용된 터보 압축기용 영구자석모터의 회전자(Rotor)는 수직으로 배치되며 압축기 하우징의 중간에 모터 고정자(Stator)가 위치한다. 73,000 rpm의 고속으로 회전할 때, 모터 고정자에서는 코일에 흐르는 전류에 의한 동손이 발생한다. 회전자에서는 주로 와전류에 의한 열로 인해 온도 상승이 발생한다. Table 4에는 대상 영구자석 모터의 설계 손실 값을 바탕으로 계산한 전자기적 손실 값이다.

영구자석 모터의 온도 상승 해석 시 동손은 고정자의 코일부, 철손은 회전자의 영구자석과 고정자의 코일부에 열원으로 모델링하였다. 실제로 철손은 고정자 코어의 치(tooth)와 표면에, 와전류손은 영구자석과 슬리브 표면과 모서리에 집중되지만 수치해석 시에는 영구자석과 코일부의 체적에서 균일하게 발생한다고 가정하였다.

3. 해석결과

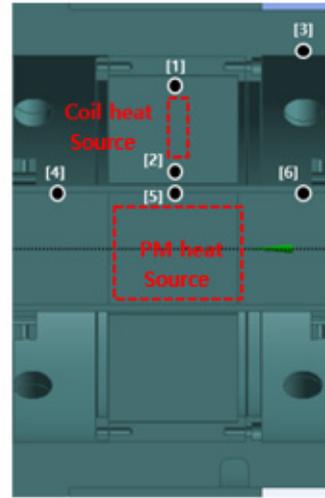
3.1 개별 냉각유로의 냉각성능

영구자석 모터 냉각 유로의 냉각성능을 확인하기 위한 기준으로 특정 지점에서의 온도를 설정하였다. 냉각 유로의 유동이 영구자석 모터의 전반적인 냉각에 미치는 영향을 분석하기 위하여 발열원인 영구자석과 코일부 표면온도 그리고 고정자와 회전자의 특정 지점에서의 온도를 기준으로 비교하였다.

온도비교를 위한 지점들은 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 영구자석과 코일부는 발열원이기 때문에 표면의 평균온도를 사용하였다.

터보 압축기에 존재하는 두 종류의 냉각유로가 영구자석 모터 냉각에 미치는 영향을 파악하기 위해서 개별 냉각유로의 냉각성능을 분석하였다.

개별 냉각유로의 냉각성능을 분석하기 위해 영구자석 모터의 수냉 유로와 공냉 유로를 독립적으로 사용하여 그 결



[1] : Stator upper / [2] : Stator lower
 [3] : Housing / [4] : Shaft upper
 [5] : Shaft center / [6] : Shaft lower

Fig. 5 Points for measuring temperature

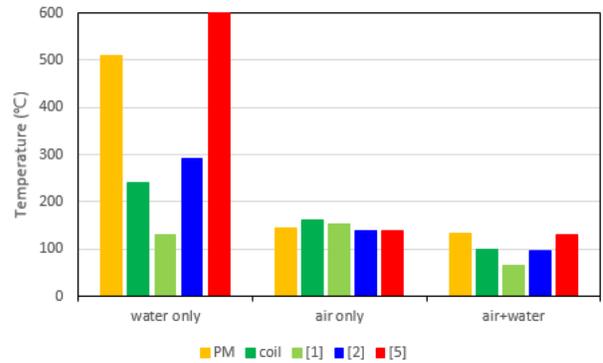
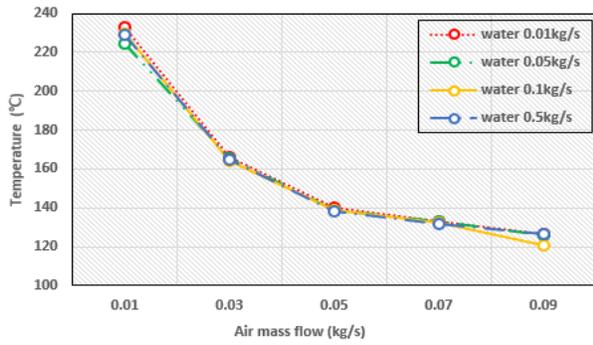


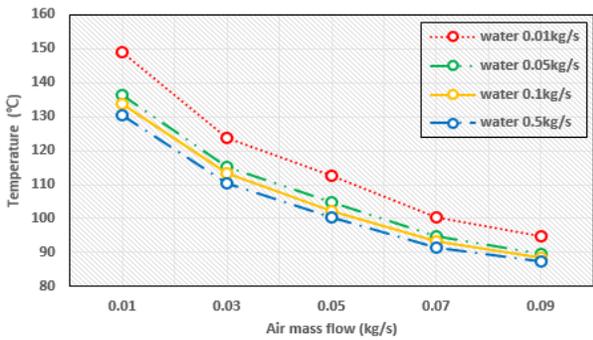
Fig. 6 Comparison of temperature on each points

과를 Fig. 6에 비교하였다. ‘Water only’는 수냉 유로만 사용했을 경우, ‘Air only’는 공냉 유로만 사용했을 경우이고, ‘Air+water’는 두 종류의 냉각유로를 함께 사용했을 경우이다. 이 때, 개별 냉각유로의 경계조건은 기존의 경계조건 (Table 3 참고)과 동일하다.

수냉 유로만을 사용하여 냉각을 했을 경우에는 수냉 유로와 근접한 고정자 상단을 제외한 대부분의 지점에서 높은 온도분포를 나타내었다. 반면에 공냉 유로만을 사용했을 경우에는 대부분의 지점에서 낮은 온도분포를 보였다. 각각의 냉각유로가 영구자석 모터 냉각에 영향을 미치는 범위를 보다 상세히 분석하기 위해 각 유로의 흐르는 유량 변화에 따른 온도를 살펴보았다. 수냉 유로에 흐르는 유량을 0.01, 0.05, 0.1, 0.5 kg/s로 변화를 주었고, 공냉 유로에 흐르는 유량을 0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.09 kg/s로 변화를 주었다. 두



(a) Temperature on permanent magnet surface



(b) Temperature on coil surface

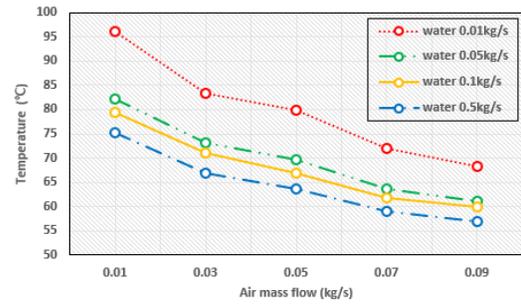
Fig. 7 Comparison of temperature on heat sources

냉각유로의 유량변화에 따른 온도분포의 변화는 Fig. 7, Fig. 8에 나타내었다.

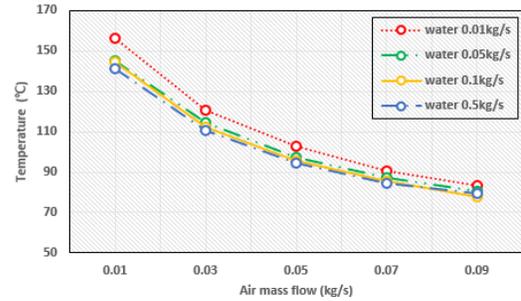
Fig. 7은 냉각유로의 유량 변화에 따른 두 발열원(영구자석과 코일)의 표면온도 변화를 나타낸다. 수냉 유로와 근접하지 않은 영구자석 모터의 회전자에 포함된 영구자석의 표면 온도는 냉각수 유량 변화로 인한 변화가 거의 없다. 반면에 수냉 유로와 근접한 영구자석 모터의 고정자에 포함된 코일의 표면 온도는 냉각수 유량변화에 따른 온도의 감소를 보였다. 또한 냉각공기 유량변화는 영구자석과 코일의 표면 온도 변화에 모두 영향을 주었으며, 공냉 유로가 영구자석 모터의 고정자, 회전자와 접하고 있기 때문이다.

Fig. 8은 냉각유로의 유량 변화에 따른 고정자와 회전자의 특정 지점의 온도 변화를 나타낸다.(Fig. 5 참고) 각각 고정자의 상, 하단에 위치한 [1], [2] 지점은 냉각수 유량변화에 따라 온도가 감소하는 경향을 보였다.

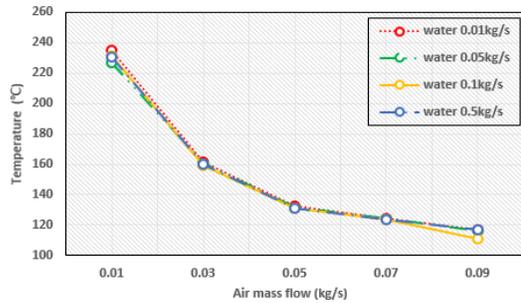
특히 수냉 유로와 근접한 고정자 상단부인 [1] 지점에서는 냉각공기보다 냉각수의 유량변화가 더 큰 영향을 미친다. 수냉 유로와 근접하지 않은 회전자에 위치한 [5] 지점은 냉각수의 유량변화보다 냉각공기의 유량변화가 온도 변화에 큰 영향을 미치고 있다. 위의 결과를 종합했을 때, 수냉 유로는 고정자 상단부의 냉각에 영향을 준다. 공냉 유로는 고정자와 회전자의 대부분의 냉각에 영향을 준다.



(a) Temperature on point [1]



(b) Temperature on point [2]



(c) Temperature on point [5]

Fig. 8 Comparison of temperature on each points with mass flow conditions

3.2 공냉 유로 형상변화에 따른 냉각성능

공냉 유로의 형상변화가 영구자석 모터의 냉각에 미치는 영향을 분석하였다. 공냉 유로의 형상변화로는 코일부 하단에 추가 공냉 유로가 차지하는 면적의 비율을 각각 0, 10, 20, 30%로 변화를 주어 냉각성능을 비교하였다. 추가된 공냉 유로의 형상은 Fig.9와 같으며, 20, 30%의 경우도 동일

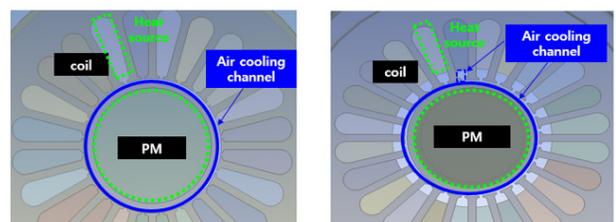


Fig. 9 Modeling view of coil air cooling channel : 0% (left), 10% (right)

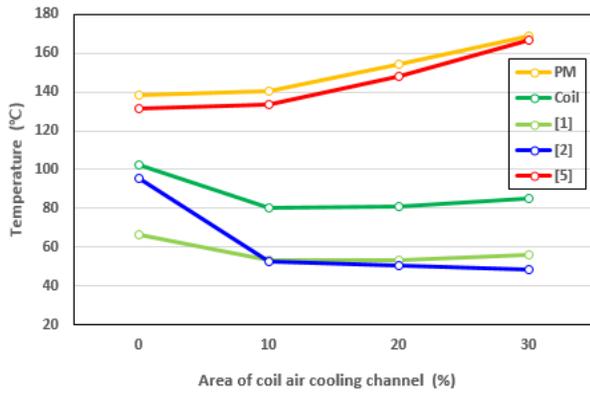


Fig. 10 Temperature changes with various area of coil air cooling channel

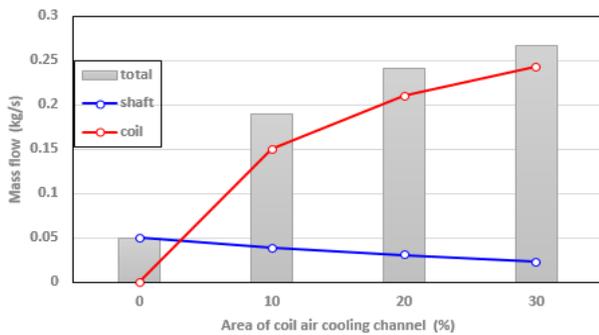


Fig. 11 Mass flow changes with various area of coil air cooling channel

한 위치에 면적변화를 주었다.

코일부에 공냉 유로를 추가함에 따라 고정자와 회전자의 각 지점에서 보이는 온도변화는 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 11에는 코일부에 추가한 공냉 유로가 차지하는 면적에 따라 축 틈새와 코일부의 냉각유로를 통과하는 유량을 비교하였다. 코일부에 추가로 설치한 공냉 유로의 면적이 증가할수록 고정자에 위치한 코일표면과 [1], [2] 지점의 온도는 감소한 것을 확인할 수 있다. 반면에 회전자에 위치한 영구자석 표면과 [5] 지점의 온도는 증가하는 경향을 보였다. 추가로 축 표면의 평균온도를 비교했을 때, 코일부에 추가된 공냉 유로가 없는 경우는 110.4°C, 10%의 추가 공냉 유로가 있는 경우는 107.1°C 그리고 20%의 추가 공냉 유로가 있는 경우 123.4°C의 값을 보였다.

이러한 온도 변화의 이유는 Fig. 11에 나타낸 냉각공기 유량 변화를 통해 찾을 수 있다. 코일부에 추가된 공냉 유로의 면적이 증가할수록 코일부를 통과하는 냉각공기 유량은 증가하지만 축 틈새를 통과하는 냉각공기 유량은 감소하는 경향을 보였다. 코일부를 통과하는 냉각공기 유량의 증가는 고정자의 냉각성능 향상에 영향을 주는 것으로 판단된다. 반면에 축 틈새를 통과하는 냉각공기 유량의 감소는 회전자의 온도 상승에 영향을 주는 것으로 판단된다.

코일부에 10%의 추가 공냉 유로가 있는 경우에 축 표면의 평균온도가 낮은 이유는 냉각공기 유량의 증가로 인해 틈새를 통과하는 냉각공기가 상대적으로 낮은 온도분포를 보이기 때문이다. 하지만 코일부의 공냉 유로 면적이 증가할수록 영구자석 모터의 주요한 발열부인 영구자석 표면과 회전자의 온도는 상승하게 된다. 따라서 영구자석 모터의 효과적인 냉각을 위해서는 코일부의 공냉 유로 면적이 최적화가 필요하다고 판단할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 터보 압축기용 영구자석 모터의 냉각유로의 냉각수/공기 유량변화 및 공냉 유로 형상변화에 따른 냉각성능에 대해 열·유동해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 영구자석 모터의 두 종류의 냉각유로에 대한 수치해석을 통해 개별유로의 냉각성능을 확인하였고, 수냉 유로보다는 공냉 유로가 영구자석 모터의 냉각에 큰 영향을 주는 것을 확인하였다.
- 2) 냉각 매체의 유량변화를 통해 수냉 유로가 영향을 미치는 범위는 고정자 상단과 하우징 부분이고 공냉 유로는 대부분의 영역에 영향을 미치는 것을 확인하였다.
- 3) 코일부의 추가된 공냉 유로의 면적의 증가로 인한 냉각공기의 유량변화는 고정자와 회전자에 각각 다른 영향을 주는 것을 확인하였으며, 효과적인 냉각을 위해서는 코일부의 공냉 유로 면적이 최적화가 필요하다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20172010105200)

References

- (1) Jianning Dong, Yunkai Huang, Long Jin, Heyun Lin, Hui Yang, "Thermal Optimization of a High-speed Permanent Magnet Motor", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 50, No. 2, February 2014.
- (2) Hwabhin Kwon, Won-Sik Lee, Gyu-Tak Kim, Heesung Park, "Thermal Characteristics of 600 W Brushless DC Motor under Axial Loading Condition", J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 33, No. 12, pp. 999-1005.
- (3) Kea-Ho Lee, Hyun-Rok Cha, Young-Bae Kim,

- “Development of an interior permanent magnet motor through rotor cooling for electric vehicles”, Applied Thermal Engineering, Vol. 95, pp. 348-356.
- (4) Duc Thuan Vu, Pyung Hwang, “New cooling Systems of BLDC motor for Electric vehicle using Computation Fluid Dynamics Modeling”, Journal of the Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Vol. 29, No. 5, October, 2013, pp. 318-323.
- (5) Seok-Myeong Jang, Han-Wook Cho, Sang-Kyu Choi, “Design and Analysis of a High-speed Brushless DC motor for Centrifugal Compressor”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 43, No. 6, June 2007, pp. 2573-2575.
- (6) Zlatko Kolondzovski, Antero Arkkio, Jaakko Larjola, Petri Sallinen, “Power Limits of High-speed permanent magnet electrical machines for compressor applications”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 26, No. 1, March 2011, pp. 73-82.
- (7) J. E. Bardina, P. g. Huang, T. J. Coakley, “Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development (1997), NASA Technical Memorandum 110446.
- (8) Chunting Mi, Gordon.R. Slemon, Richard Bonert, “Modeling of iron losses of permanent magnet synchronous motors”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 39, No. 3, May/June 2003, pp. 734-742.