단상 LSPM의 열해석 모델링 및 특성 해석

Thermal modeling and analysis of single phase LSPM

함 상 환*
 (Sang-Hwan Ham)

Abstract - This paper presents the thermal modeling and analysis of Line power Start Permanent magnet Motor (LSPM). Thermal analysis of electrical machines is important because temperatures that are consistently too high will reduce the life time of machines and may lead to serious failure. Coefficients of convection are calculated according to the types of operating conditions. And computational fluid dynamics (CFD) technique is performed in order to predict thermal characteristic. The results are compared to the test results.

Key Words : LSPM, Compressor, Thermal modeling, CFD

1. 서 론

전동기의 열해석은 과거에는 전자계 해석에 비하여 연구가 활발히 이루어지지 않았으며 과거 전동기의 열해석을 주제로 한 관련 기술 보고서 등의 수가 이를 증명하고 있다. 일반적으로 중소형 사이즈의 전동기의 설계에 있어 전동기 설계자는 전류 밀도의 제한치를 선정하는 방식 등을 통하여 전동기의 열적 특성을 고려하였기 때문에 중소형 사이즈의 전동기의 열적 특성에 대한 연구 결과가 많지 않다. 하지만 최근 들어, 소형화, 에너지 효율, 그리고 비용 절감 등에 대한 요구가 증대함에 따라 전동기 설계 단계에 있어 열적 특성을 고려해야 할 필요성이 증대되었다[1].

이와 같은 요구는 토크/출력 밀도, 내고장성, 신뢰성 등을 중요시하는 항공기 또는 자동차 산업과 같은 분야에서 더욱 두드러진다[2, 3].

전기기기의 설계에 있어 열적인 특성의 연구는 전자계 해석 분야에 비하여 발전할 수 있는 여지가 많이 남아 있다[4]. 전기기기에 있어 내부의 열이 설계한 온도보다 높은 상태로 지속될 경우 심각한 문제가 발생할 수 있으므로 허용한 온도 이내에서 동작 가능한지에 대한 열적 특성의 예측이 필요하다. 만약 전기기기의 온도가 절연 등급에서 허용한 최대 온도 이상으로 올라갈 경우 절연의 수명이 심각하게 줄어들게 된다[5]. 영구자석 기기에서는 영구자석의 감자가 발생할 수 있는 문제가 생길 수 있다. 최근 많이 사용되고 있는 영구자석 재료인 네오디뮴(neodimium-iron-bron, NdFeB) 자석의 경우 감자 곡선이 온도에 따라 매우 유동적으로 변하게 된다[6].

집중 회로 정수를 이용한 전기기기의 열해석 연구들이 몇몇 발표되었으나 집중 회로 정수를 이용한 해석의 경우 해석 시간이 짧다는 장점이 있으나 정확도에 한계가 있다. 따라서 이 논문에서는 냉각고 컴프레서용 단상 LSPM(Line power Start Permanent Magnet Motor)에 대한 대류 계수와 전산 유체 역학(Computational fluid dynamics, CFD)을 활용한 열해석 모델의 열적 특성을 알아보고 실험결과와 비교를 통하여 타당성을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 LSPM 사양

영구자석을 사용한 LSPM(Line-Start Permanent Magnet Motor)의 경우 기존 유도전동기와 기동 특성이 유사하고, 영구자석을 사용함으로써 유도전동기에서 발생하는 2차측 동손을 줄일

그림 1 커패시터 기동-구동형 단상 LSPM의 전기회로

Fig. 1 Electrical circuit of capacitor start-run single phase LSPM

* School of Electrical and Railway Engineering, Kyungil University, Korea.

E-mail: shham@kiu.kr

Received : August 18, 2014 ; Accepted : February 23, 2015

수 있으므로 BLDC와 같은 고효율 운전이 가능하다는 장점을 갖고 있다[7]. LSPM에 인버터가 없이 교류 전원을 인가하여 기동할 경우 유도기와 같이 회전하여 기동하게 되고, 정상상태에 도달하면 동기기와 같은 특성으로 동작하고 이 때 농형바는 템퍼의 역할을 수행한다. 본 논문에서 해석한 냉장고 컴프레서용 단상 LSPM의 고정자는 구조적으로 주권선과 보조권선을 구성하고 기동 및 구동 특성을 향상시키기 위하여 기동 및 구동 커패시터를 장치하였다. 그림 1에서 커패시터 기동-구동형 단상 LSPM의 전기 회로를 나타내었다. 단상 LSPM은 기동 시에는 기동 커패시터와 구동 커패시터가 모두 연결된 상태로 기동 토크를 만들어내고 일정 속도 이상에 도달하면 원심력 스위치에 의하여 기동 커패시터가 회로에서 분리된다.

정격 부하시 냉장고 컴프레서용 단상 LSPM의 사양은 다음의 표 1과 같다.

표 1 정격 부하시 단상 LSPM의 사양
Table 1 Specifications of LSPM for rated load

	Value	Unit
Voltage	220	V
Torque	0.3	Nm
Speed	3000	rpm
Efficiency	89.4	%
Magnet	NdFeB	-
Output Power	100	W
Current(Main Winding)	0.44	A
Current(Auxiliary Windings)	0.41	A

2.2 LSPM 전자계 해석

LSPM의 열해석을 위한 열원을 산출하기 위하여 전자계 해석에서 발생한 손실을 구할 필요가 있다. 전자기력에 의한 손실은 동손과 철손을 포함하며 기계손에 의한 손실은 포함을 시키지 않는다.

그림 2에서 각 손실의 분포를 나타내고 표 2를 통하여 각 요소별 손실량을 나타내었다.

(a) main windings (b) auxiliary windings (c) core, cage, magnet

그림 2 LSPM의 동손(a, b) 및 철손(c)의 분포

Fig. 2 Distribution of copper loss (a), (b) and iron loss (c) of LSPM

2.3 열해석 모델링

2.3.1 열해석 모델링의 개념

전동기의 열 특성을 검토하기 위한 방안으로 가장 널리 사용된 것은 전자계 해석에 있어서 자기의 흐름을 가정하여 만드는 자기 등가회로와 유사하게 열의 흐름을 가정하여 만든 열 등가회로가 있다. 열 등가회로의 경우 전동기의 각각의 부분을 등가의 열저항으로 가정하여 열의 경로를 가정하여 특성을 해석하는 방식으로 매우 빠른시간 안에 해석이 될 수 있는 장점을 가지고 있지만 정확한 등가회로를 구성하기 위한 열의 전달 방향을 가정하는 것이 쉽지 않다. 일반적으로 전동기의 옆면과 축으로의 열의 방산을 가정하여 열의 이동 경로를 구성하게 되며 평면적으로는 방사 방향으로의 열의 흐름만을 가정하게 되어 3차원 적으로 고려할 경우 축을 통한 열의 방산만을 고려하는 것이 일반적이므로 정확한 특성의 검증이 어렵다. 따라서 정확한 특성 파악을 위해서는 전동기의 환경 조건을 고려한 CFD를 이용하여 검증하는 것이 효과적이다. LSPM의 설계에서 사용한 NdFeB의 경우 온도에 따라 특성에 영향을 많이 받게 되며 온도가 상승할수록 영구 자석의 감자가 발생할 수 있다. 따라서 LSPM의 경우 내부 영구 자석의 국부의 감자의 영향까지 고려해야 할 필요성이 있으므로 CFD를 사용한 열 특성의 검증이 필요하다.

유한요소법(FEM)을 이용한 전자계 해석은 2차원 형상 모델을 통하여 수행된다. 전자계 특성이 z 축으로 동일할 것이라는 가정하에 2차원 형상에서 구한 손실을 3차원 형상으로 매핑을 할 수 있다. 2차원 형상을 공유하여 이를 z 축으로 확장시켜 3차원 형상으로의 매핑이 가능하게 된다. 열전달에 있어서 3차원 해석이 필요한 이유로는 열이 빠져나가는 경로를 가정하게 되었을 때 첫 번째로 가정할 수 있는 방향이 고정자의 최외각 면적으로의 열의 방사를 들 수 있다. 이는 고정자 최외각에 대류 또는 전도를 가정하게 되어 내부의 열이 고정자의 옆면을 통하여 빠져나가는 하나의 경로로 가정할 수 있다. 또한 두번째로 회전자 내부의 열이 축을 통해 빠져나가는 것을 가정하여야 한다. 회전자에서 발생하는 열은 공극을 통하여 고정자에 전달되어 빠져나갈 수도 있으나 열이 잘 전도되는 금속 재료의 회전자의 축을 통하여서도 빠져나가는 루트가 발생하게 된다. 그리고 세번째로 전동기의 상·하부의 단면을 통하여 빠져나가는 방향을 고려해야 한다. 고정자에서 방사방향으로 빠져나가는 경로와 다르게 회전자 축과 상·하부의

표 2 LSPM의 요소별 동손 및 철손량

Table 2 Values of iron loss and copper loss of LSPM

		value	Unit
Iron loss	Stator	6.18	W
	Rotor	0.13	W
	Cage	0.38	W
	Magnet	0.0004	W
Copper loss	Main windings	3.02	W
	Auxiliary windings	2.33	W

단면을 을 통하여 나가는 열의 경로는 3차원 해석을 통하여 고려할 수 있다. 따라서 2차원의 동일한 도면을 공유하면서 이를 z 축 방향으로 확장하여 3차원으로 고려할 수 있도록 열전달 해석에서는 도면을 변경시키도록 하며 열전달 해석 역시 유한요소 해석을 위하여 영역을 요소로 나누게 된다. 그 때의 요소가 갖게 되는 좌표를 추출하여 이를 다시 전자계 해석에 보내어 각각의 좌표에서의 손실 값을 매핑하여 열전달 해석을 하는 과정으로 열전달이 수행된다. 이를 그림 3과 그림 4에 나타내었다.

그림 3 열원 매핑을 이용한 열해석 수순

Fig. 3 Thermal analysis process using heat source mapping

그림 4 열원 매핑의 개념도

Fig. 4 Conceptual diagram of heat source mapping

2.3.2 열해석 모델링

전자계의 해석에서는 물질의 자기적인 성질이 중요하다. 자속이 지나가는 재료의 투자율의 값에 따라 특성이 달라지게 되는데, 고정자의 권선으로 사용되는 구리와 권선 피복, 그리고 절연지 등은 자기적인 성질이 공기와 유사하여 고정자 권선의 형상에 따른 일부 누설 성분의 차이를 제하고서는 특성에 큰 차이를 미치지 않기 때문에 슬롯 내부의 형상에 있어서 절연지와 피복 등의 형상은 무시하게 된다. 권선 피복, 구리, 절연지의 자기적인 성질은 차이가 없을 뿐 아니라 매우 얇기 때문에 실제 유한 요소법에 있어서 이를 디자인하고 격자를 나누어 해석을 할 경우 해석 시간에 많은 영향을 끼치게 되지만 권선 피복과 절연지를 고려하지 않은 경우와 해석 결과의 차이가 거의 발생하지 않는다. 하지만 열적인 특성을 고려하게 될 때는 전혀 다르게 된다. 권선과 고정자 사이에서의 형상에 따라서 매우 다른 특성을 보이

게 되기 때문이다. 앞서의 표 3에서와 같이 피복과 절연지의 열전도도는 각각 0.281[W/m·K], 0.242[W/m·K]이다. 그리고 전기강판과 구리의 열전도도는 14.2[W/m·K]와 401[W/m·K]로 큰 차이가 발생한다. 다시 말하면 구리와 전기강판이 바로 접해있는 것과 그 사이에 공기가 있는 경우, 또는 절연지와 피복이 가로막고 있는 경우에 따라 권선에서 발생하는 열이 고정자로 전도되는 특성이 완전히 달라짐을 의미한다. 따라서 그림 5에서와 같이 절연지와 피복의 형상을 고려하여 권선의 형상을 재설계하였다.

표 3 재질에 따른 열적 특성

Table 3 Thermal properties of materials

	ρ [Kg/m ³]	C_p [J/Kg·K]	k [W/m·K]
Air	1.225	1,006.4	0.0242
Electric Steel (S18)	7978	480	14.2
Copper	8933	385	401
Neodymium	7010	190	16.5
Aluminum	2702	903	237
Polyamide(insulating paper)	1130	2500	0.242
Polyesterimide(sheath)	1522	1484.9	0.281
Polyamide + Polyesterimide	1157.1	2353.7	0.285

그림 5 절연지와 피복을 고려한 권선 형상의 재설계

Fig. 5 Winding shape redesign considering insulating paper and sheath

그림 5와 같이 재설계를 한 후 열전달 해석을 위하여 격자를 나누게 될 경우 열 전달 현상을 제대로 알아내기 위해서는 피복과 절연지에 매우 많은 격자가 나뉘어야 한다. 하지만 이와 같은 격자의 수의 증가는 해석 시간이 증대되고 해석을 위하여 더욱 고성능의 컴퓨터를 요구하게 된다. 따라서 본 연구에서는 해석의 용이성을 위하여 피복과 절연지의 특성을 결합하여 하나의 재료로 나타나도록 수정하였으며 이를 그림 6에 나타내었다.

$$R_{poly} = \frac{L}{k_{poly} A} \quad (1)$$

$$R_{poly} = R_{sheath} + R_{insulator} \quad (2)$$

$$R_{sheath} = \frac{L_{sheath}}{k_{sheath}A}, R_{insulator} = \frac{L_{insulator}}{k_{insulator}A} \approx \frac{10L_{sheath}}{k_{insulator}A} \quad (3)$$

$$k_{poly} = \frac{11k_{sheath}k_{insulator}}{10k_{sheath} + k_{insulator}} \quad (4)$$

그림 6 권선 형상의 물성 보정

Fig. 6 Property compensation of winding shape

여기서, L 은 열전달이 일어나는 방향으로의 길이, A 는 열전달이 일어나는 방향으로의 면적을 나타낸다.

식 (1) ~ (4)를 이용하여, 피복과 절연지를 하나의 혼합물로 보정하였으며 혼합물의 열적 특성은 표 3에서 나타내었다.

2.4 동작 조건하에서의 열해석

2.4.1 대류 계수

100W급 냉장고 컴프레서용 단상 LSPM의 동작 조건은 컴프레서의 R-134a의 냉매가 기포 상태로 움직이며 주변 온도는 10 [°C], 그리고 냉매의 이동속도를 0.0508 [m/s]로 가정하게 되었을 때의 열전달계수는 6.786 [W/m²·K]이다.

표 4 강제 대류 조건 하에서의 열전달 계수들(R-134a, 기포, 10°C)

Table 4 Parameters for thermal analysis under a forced convection condition (R-134a, Vapor, 10°C)

Pr	Re	Nu	U	h
[-]	[-]	[-]	[m/s]	[W/m ² ·K]
0.655	13234.18	60.696	0.0508	6.786

여기서, Pr는 Prantl 수, Re는 Reynold 수, Nu는 Nusselt 수, U는 냉매의 이동 속도, 그리고 h는 대류에서의 열전달 계수를 나타낸다.

2.4.2 2차원 열해석

앞서의 손실, 모델링, 그리고 열전달 계수 등에 기초한 2차원 열해석 결과를 그림 7에 나타내었다. 가장 높은 온도와 낮은 온도 사이의 차이는 4.4[°C]가 발생하며 가장 높은 온도가 발생하는 부분은 회전자이다. 이유는 공극에 의하여 열이 빠져나가지 못하고 열섬 현상이 발생하게 되는 것인데 이러한 현상이 발생하는 이유는 회전자의 열이 방출될 수 있는 방향이 공극을 통하여

고정자로 나가는 방향밖에 존재하지 않기 때문이다. 하지만 실제의 현상에서는 회전자 축과 전동기의 상부와 하부 단면을 이용한 방열이 일어나기 때문에 이를 적절히 고려할 수 있어야 한다. 따라서 2차원 해석으로는 정확하게 현상을 예측하기에 어려움이 따르다고 할 수 있다.

그림 7 2차원 열해석 결과

Fig. 7 Result of 2D thermal analysis

2.4.3 3차원 열해석

2차원 해석으로는 회전자의 열이 회전자 축을 통하여 밖으로 배출되지 못하는 현상이 발생하기 때문에 보다 정확하게 해석을 하기 위해서는 3차원 해석을 필요로 한다. 3차원 형상에 있어 엔드턴의 경우 온도의 상승은 매우 중요한 영향을 미치는 곳으로 분명히 검토되어야 할 부분이나 3차원 권선 형상 설계 및 피복 형상 설계 등과 같이 설계의 복잡성에 의한 난점으로 고려가 되지 못하였다. 추후의 연구를 통하여 진행시켜나갈 방향이다.

그림 8에서 나타난 바와 같이, 최대 온도는 약 70.9 [°C] 까지 올라가며 초기 온도에 비하여 약 40.9 [°C]가 상승함을 나타내고 있다. 또한 2차원에서 발생했던 열섬 현상이 나타나지 않고 최대 온도는 고정자에서 발생하고 있음을 알 수 있다. 상부와 하부에 비하여 축방향으로 중간 부분에 열이 더 높은 현상을 보이고 있음을 그림 8(b)를 통하여 보이고 있다.

(a) Top view

(b) Side view

그림 8 3차원 열해석 결과

Fig. 8 Results of 3D thermal analysis

2.5 단상 LSPM의 온도 포화 실험 및 열해석

그림 9에 LSPM의 온도 포화 실험을 위한 구성을 나타내었다.

그림 9에 나타난 것과 같이 주권선과 보조권선, 그리고 고정자 코어의 안쪽과 바깥쪽에 열전대를 부착하여 온도 포화 실험을 측정하였으며 온도 포화 시험은 3시간에 걸쳐 진행되었으며 그 결과는 그림 10과 같다. 3시간 뒤의 주권선의 온도는 주변온도에 비하여 약 10.7 [°C] 상승하게 되며 보조권선에 비하여 약 2 [°C] 이상 높음을 보이고 있다. 이는 슬롯 내에서는 주권선과 보조권선 사이에서의 열교환이 일어나지 않고 있음을 나타내며, 이와 같이 발생하는 이유는 주권선과 보조권선을 절연지로 분리시켜 놓음에 따라 열 전달이 원활히 일어나지 않게 되기 때문이다. 그리고 고정자 철심의 경우 적층방향에 대하여 상·하단에 비하여 중단의 온도가 1 [°C]가량 높은 경향을 보이게 되는데 이는 상단과 하단에서는 방열이 용이하게 일어나는 반면에 중단 부분에

그림 9 온도 포화 실험 장비 구성

Fig. 9 Configuration for thermal saturation test

(a) Temperature of windings, stator teeth

(b) Temperature of stator stack

그림 10 온도 포화 실험 결과

Fig. 10 Result of thermal saturation test

서는 방열이 상단과 하단에 비하여 일어나는 면적이 작고 열섬현상이 발생하기 때문이다.

제안한 3차원 열해석을 실험 환경에 적용하여 수행하였다. 실험 환경 하에서의 열전달계수를 재산정하여 표 5에 나타내었다. 실험 환경하에서는 전동기 주변의 냉각팬에 의하여 강제 대류가 발생하는 것으로 가정하였다. 그림 11에서 실험실 내의 강제 대류 하에서의 열해석 결과를 나타내었다. 전동기의 온도는 29.8 [°C]에서 36.9[°C] 사이에서 분포하였으며 고정자 권선의 중심에서 가장 높게 발생하였으며 자속의 경로를 제한하기 위해 존재하는 회전자 배리어(barrier)는 공기로 채워져 있어 열 전도도가 매우 낮으므로 가장 낮은 온도를 보이고 있다. 냉장고 컴프레서 내에서의 동작 환경에서의 열해석 결과와 비교하여 볼 때, 열전도계수가 더 높기 때문에 열 포화 온도가 더 낮게 형성되었음을 알 수 있다. 그림 10의 온도 포화 시험 결과와 비교하여 볼 때 약 3[°C] 정도의 온도 차이가 발생하지만 적층에 따른 온도 분포 및 주권선과 보조권선의 온도 차이 등이 실험 결과와 유사하게 나타났음을 확인할 수 있다.

표 5 실험실 내의 대류 조건 하에서의 열전달 계수들(공기, 20°C)

Table 5 Parameters for thermal analysis under a forced convection condition in laboratory (air, 20°C)

Pr [-]	Re [-]	Nu [-]	U [m/s]	h [W/m ² ·K]
0.7309	23,154.4	86.61	3	18.61

(a) Top view

(b) Side view

그림 11 3차원 열해석 결과(실험 환경)

Fig. 11 Results of 3D thermal analysis(Experimental Condition)

3. 결 론

본 논문에서는 냉장고 컴프레서용 LSPM의 열해석 방법에 대하여 연구를 수행하였으며 열해석의 정확도를 검증하기 위하여 시험 결과와 열해석 결과를 비교하였다. 전자계 유한요소 해석을 통하여 손실을 도출하고 이를 열원으로 하여 손실 매핑을 통한 열해석 방법에 대하여 나타내었다. 피복과 절연지를 대체할 수 있는 등가의 혼합물을 제안하여 해석 시의 어려움을 줄일 수 있도록 방법을 제안하였고 전동기의 외부 환경을 고려한 열전달 계수를 산정하여 이를 2차원 및 3차원 열해석 결과를 보임으로써 3차원 열해석의 필요성에 대하여 설명하였다. 제안한 열해석 방

법은 다양한 전동기의 열 해석에 도움이 될 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2014R1A1A1003334)

References

- [1] A. Boglietti, A. Cavagnino, D. Staton, M. Shanel, M. Mueller, and C. Mejuto, "Evolution and modern approaches for thermal analysis of electrical machines," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 3, pp. 871 - 882, Mar. 2009.
- [2] C. Gerada, K. Bradley, C. Whitley, and G. Towers, "High torque density PM machines for high performance operation," in Proc. 33rd IEEE IECON, Taipei, Taiwan, 2007, pp. 210 - 215.
- [3] T. Raminosoa, C. Gerada, and M. Galea, "Design considerations for a fault tolerant flux switching permanent magnet machine," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 7, pp. 2818 - 2825, Jul. 2011.
- [4] A. Boglietti, "Guest editorial", IEEE Trans. Ind. Electronics, vol. 55, no. 10, pp. 3498-3499, Oct. 2008
- [5] David A. Howey, "Air-Gap Convection in Rotating Electrical Machines", IEEE Trans. Ind. Electronics, vol. 59, no. 3, pp. 1367-1375, March. 2012
- [6] J. Gieras, R.Wang, and M. Kamper, "Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines", 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 2008.
- [7] Jeong-Jong Lee, Young-Kyoun Kim, Se-Hyun Rhyu, In-Soung Jung, "Characteristic analysis of three-phase 7.5kW LSPM(Line-Start Permanent Magnet Motor)", Proceeding of the KIEE Annual Summer Conference, pp. 853-854

저 자 소 개

함 상 환(Sang-Hwan Ham)

1980년 4월 7일생. 2006년 한양대학교 전기공학과 졸업. 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2011년 ~ 2013년 순천제일대학교 전기자동화와 조교수. 2013년 ~ 현재 경일대학교 전기철도공학부 조교수.

Tel : (053) 600-5526

Email : shham@kiu.kr