(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2014년05월14일
(11) 등록번호 10-1394548
(24) 등록일자 2014년05월07일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01R 31/34 (2006.01)
(21) 출원번호 10-2013-0021422
(22) 출원일자 2013년02월27일
심사청구일자 2013년02월27일
(56) 선행기술조사문헌
JP2009291040 A
JP2010011600 A
US20110050141 A1
기술이전 희망 : **기술양도**

(73) 특허권자
창원대학교 산학협력단
경상남도 창원시 의창구 창원대학교 20 (퇴촌동)
(72) 발명자
김규탁
경상남도 창원시 성산구 삼정자로 79, 105동 302호 (성주동, 유니온빌리지아파트)
조규원
경상남도 창원시 의창구 외동반림로254번길 28 (용호동)
계승현
경상남도 창원시 성산구 성산패총로178번길 51, 1202동 904호 (가음정동, 소라아파트)
(74) 대리인
이형석, 김종선

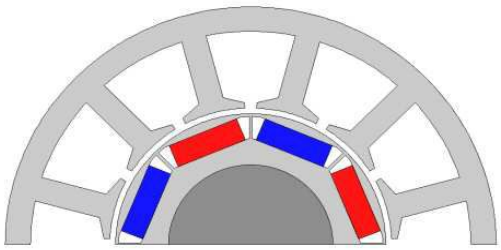
전체 청구항 수 : 총 7 항 심사관 : 박근용

(54) 발명의 명칭 **전자기기의 열 해석방법**

(57) 요 약

본 발명은 전자기기의 열 해석 방법에 관한 것으로, 전자기기의 형상에 따라 적어도 둘 이상의 절점 영역에 대한 열 등가 회로를 각각 작성하는 단계; 각 절점 영역에서 전도에 의한 열 전달과 대류에 의한 열 전달에 따른 열 저항 및 열 용량을 계산하는 단계; 및 각 절점에서 열평형에 대한 열 저항-열 용량의 수학식을 반복하여 결과값이 수렴할 때까지 계산을 수행하여 온도 변화를 측정하는 단계를 포함하고 있다. 따라서 비교적 짧은 시간 내에 전자기기의 열 해석을 수행할 수 있는 효과가 있음은 물론 전자기기에 대한 온도 특성을 빠르고 정확하게 확인할 수 있어 전자기기의 설계 효율이 향상되는 이점이 있다.

대 표 도 - 도1



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	2012-0262-0000
부처명	교육과학기술부
연구사업명	산업단지캠퍼스조성사업
연구과제명	신재생 에너지원 전장시스템 최적설계 프로세서 개발
기 여 율	1/1
주관기관	창원대학교 산학협력단
연구기간	2012.07.01 ~ 2013.04.30

특허청구의 범위

청구항 1

전자기기의 형상에 따라 적어도 둘 이상의 절점 영역에 대한 열 등가 회로를 각각 작성하는 단계;

각 절점 영역에서 전도에 의한 열 전달과 대류에 의한 열 전달에 따른 열 저항 및 열 용량을 계산하는 단계; 및

각 절점에서 아래의 열평형에 대한 열 저항-열 용량의 수학식을 반복하여 결과값이 수렴할 때까지 계산을 수행하여 온도 변화를 측정하는 단계를 포함하는 전자기기의 열 해석 방법.

$$T^{p+1}=\frac{\Delta t}{C_i}\left(\sum_j \frac{1}{R_{ij}}(T_j^p-T_i^p)+u_i\right)+T^i$$

여기서, C_i는 절점에서의 열용량, R_{ij}는 절점 i와 j사이의 열 저항, U_i는 i절점에서 발생하는 열 발생량, T^p는 현재 시간 증분에서의 온도, T^{P+1}은 다음 시간 증분에서의 온도, Δt는 시간 증분량임

청구항 2

제 1항에 있어서,

상기 전자기기는 매입형 영구자석 동기 전동기임을 특징으로 하는 전자기기의 열 해석 방법.

청구항 3

제 2항에 있어서,

상기 매입형 영구자석 동기 전동기에서 대류가 발생하는 프레임(Frame) 외부와 앤드 캡(End Cap) 내부에서의 대류 열전달 계수는 15.5 W/m^2 ℃임을 특징으로 하는 전자기기의 열 해석 방법.

청구항 4

제 2항에 있어서,

상기 매입형 영구자석 동기 전동기의 공극(Air Gap)에서 대류 열전달 계수는 테일러 수(Taylor Number)와 프란틀 수(Prandtl Number)를 통해 누셀트 수(Nusselt Number)를 계산하여 하기 식으로 표현하는 것을 특징으로 하는 전자기기의 열 해석 방법.

$$h_{airgap}=\frac{N_{Nu}\cdot k_{air}}{l_g}$$

여기서, N_{Nu}는 누셀트 수(Nusselt Number), l_g는 공극의 길이, K_{air}는 공기의 열전도도임

청구항 5

제 4항에 있어서,

상기 누셀트 수는 테일러 수(Taylor Number) N_{Ta}와 프란틀 수 (Prandtl Number) N_{Pr}에 의해 하기 식으로 정리되고,

$$N_{Nu}\begin{cases}=2.2 & (N_{Ta}\le 41.1)\\ =0.23N_{Ta}^{0.63}N_{Pr}^{0.23} & (N_{Ta}\ge 41.1)\end{cases}$$

상기 테일러 수와 프란틀 수는 $N_{Ta}=\frac{l_g V_{rotor}}{v_a}$ 와, $N_{Pr}=\frac{c_p v_a}{k_{air}}$ 로 각각 표현되는 것을 특징으로 하는 전자기기의 열 해석 방법.

여기서, l_g는 공극의 길이, V_{rotor}는 회전자의 속도, V_a는 공기의 동점성 계수, C_p는 공기의 비열, K_{air}은 공기의 전도 열전달 계수임

청구항 6

매입형 영구자석 동기 전동기의 프레임, 고정자 요크(stator yoke), 고정자 치(stator teeth), 고정자 슈(stator shoe), 고정자 치 끝단(stator teeth end), 고정자 권선(stator winding), 엔드 권선(end winding), 공극(air gap), 회전자 외측(outer rotor), 영구자석(magnet), 회전자 내측(inner rotor), 샤프트(shaft), 엔드캡 내부 공기(end cap air)의 영역에 대하여 등가 회로를 각각 작성하는 단계;

상기 등가 회로를 기초로 하여 전도 및 대류의 열 저항과 열 용량을 계산하는 단계;

상기 각 영역의 등가회로를 하나의 등가 회로망으로 작성하는 단계; 및

상기 등가 회로망에서 상기 열 저항과 열 용량을 이용하여 각 영역에서 열평형에 대한 아래의 열 저항-열 용량의 수학식을 반복하여 결과값이 수렴할 때까지 계산을 수행하여 시간에 따른 온도 변화를 측정하는 단계를 포함하는 전자기기의 열 해석 방법.

여기서, 상기 열 저항- 열 용량 수학식은

$$T^{p+1}_i = \frac{\Delta t}{C_i}\left(\sum_j \frac{1}{R_{ij}}(T^p_j - T^p_i) + u_i\right) + T^p_i$$ 이고,

C_i는 절점에서의 열용량, R_{ij}는 절점 i와 j사이의 열 저항, U_i는 i절점에서 발생하는 열 발생량, T^p는 현재 시간 증분에서의 온도, T^{P+1}은 다음 시간 증분에서의 온도, Δt는 시간 증분량을 나타냄.

청구항 7

제 6항에 있어서,

상기 각 영역은 하나의 절점으로 구성되는 전자기기의 열 해석 방법.

청구항 8

삭제

명 세 서

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 전자기기의 열 해석방법에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 전자기기의 형상에 따른 열 등가 회로망을 작성한 후 전도 및 대류에 대한 열 저항을 측정한 다음 시간에 따른 온도 변화를 계산하여 열 해석을 수행하는 전자기기의 열 해석방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 본 명세서에서는 전자기기 중 매입형 영구자석 동기 전동기(IPMSM : Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)를 예를 들어 설명하기로 하고, 이를 전동기로 칭하여 설명하기도 할 것이다.

[0003] IPMSM은 영구자석과 전기자 전류에 의한 마그네틱 토크 성분과 d-q축 인덕턴스 차이에 의한 릴럭턴스 토크 성분을 함께 가지므로 단위 체적당 높은 토크를 얻을 수 있다.

[0004] 하지만, IPMSM의 운전 특성상 고속 영역에서의 과도한 철손이 발생하며, 고출력 제어를 위해 큰 입력 전류가 필요하여 동손이 발생하게 된다. 이와 같은 열원의 발생은 전동기의 온도를 상승시키는 단점을 초래하고, 이는 결국 전동기의 수명뿐만 아니라 고온에서 감자 특성이 있는 희토류 계열의 영구자석의 특성에도 악영향을 미치게 된다.

[0005] 이에 따라 전동기를 설계할 경우, 그 전동기의 온도 특성에 대한 고려가 우선되어야 함은 당연하다.

[0006] 이를 위해 집중 정수법(Lumped Parameter Mehtod)을 활용한 열 등가회로망법, 유한요소법(Finite Element

Method) 및 유한차분법(Finite Difference Method) 등을 이용한 분포 정수법(Distributed Parameter Method) 등과 같이 다양한 전동기의 열 해석 기술이 제안되고 있다.

[0007] 그 중 전동기의 열적 성능을 계산하기 위해서는 일반적으로 유한 요소법과 유한 차분법이 사용되고 있다.

[0008] 하지만 상기 유한 요소법 및 유한 차분법을 이용한 열 해석은 복잡한 영역을 해석하기 위하여 요소를 나누고 행렬을 계산하기 위한 시간이 많이 소요되기 때문에 고정자와 회전자의 일부 영역에만 한정되어 사용되고 있다. 즉 전동기 형상의 전체 영역에는 적용하는 것이 어려운 문제점이 있다.

[0009] 그렇기 때문에, 분포 정수법에 비해 상대적으로 열 해석에 대한 계산이 간단하고 전동기의 다양한 부분에서의 전체적인 온도 분포를 용이하게 확인할 수 있는 방안이 필요하다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0010] 따라서 본 발명의 목적은, 종래의 열 해석 방법에 비해 열 해석 시간을 단축하고 또한 다양한 해석 조건에 적용할 수 있도록 하는 전자기기의 열 해석방법을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0011] 상기한 목적을 달성하기 위한 본 발명의 특징에 따르면, 전자기기의 형상에 따라 적어도 둘 이상의 절점 영역에 대한 열 등가 회로를 각각 작성하는 단계; 각 절점 영역에서 전도에 의한 열 전달과 대류에 의한 열 전달에 따른 열 저항 및 열 용량을 계산하는 단계; 및 각 절점에서 아래의 열평형에 대한 열 저항-열 용량의 수학식을 반복하여 결과값이 수렴할 때까지 계산을 수행하여 온도 변화를 측정하는 단계를 포함하는 전자기기의 열 해석방법이 제공된다.

[0012] $$T^{p+1}=\frac{\Delta t}{C_i}\left(\sum_j \frac{1}{R_{ij}}(T_j^p-T_i^p)+u_i\right)+T^i$$. 여기서, C_i는 절점에서의 열용량, R_{ij}는 절점 i와 j사이의 열 저항, U_i는 i절점에서 발생하는 열 발생량, T^p는 현재 시간 증분에서의 온도, T^{P+1}은 다음 시간 증분에서의 온도, Δt는 시간 증분량을 나타낸다.

[0013] 그리고 상기 전자기기는 매입형 영구자석 동기 전동기임을 특징으로 한다.

[0014] 또한 상기 매입형 영구자석 동기 전동기에서 대류가 발생하는 프레임(Frame) 외부와 앤드 캡(End Cap) 내부에서의 대류 열전달 계수는 15.5 W/m^2 ℃임을 특징으로 한다.

[0015] 상기 매입형 영구자석 동기 전동기의 공극(Air Gap)에서 대류 열전달 계수는 테일러 수(Taylor Number)와 프란틀 수(Prandtl Number)를 통해 누셀트 수(Nusselt Number)를 계산하여 하기 식으로 표현하는 것을 특징으로 한다.

[0016] $$h_{airgap}=\frac{N_{Nu}\cdot k_{air}}{l_g}$$. 여기서, N_{Nu}는 누셀트 수(Nusselt Number), l_g는 공극의 길이, K_{air}는 공기의 열전도도이다.

[0017] 그리고 상기 누셀트 수는 테일러 수(Taylor Number) N_{Ta}와 프란틀 수 (Prandtl Number) N_{Pr}에 의해 하기 식으로 정리되고,

[0018] $$N_{Nu}\begin{cases}=2.2 & (N_{Ta}\le 41.1)\\ =0.23N_{Ta}^{0.63}N_{Pr}^{0.23} & (N_{Ta}\ge 41.1)\end{cases}$$

[0019] 또한 테일러 수와 프란틀 수는 $N_{Ta}=\frac{l_g V_{rotor}}{v_a}$ 와, $N_{Pr}=\frac{c_p v_a}{k_{air}}$ 로 표현된다.

[0020] 여기서, l_g는 공극의 길이, V_{rotor}는 회전자의 속도, V_a는 공기의 동점성 계수, C_p는 공기의 비열, K_{air}은 공기의 전도 열전달 계수이다.

[0021] 본 발명의 다른 특징에 따르면, 매입형 영구자석 동기 전동기의 프레임, 고정자 요크(stator yoke), 고정자 치(stator teeth), 고정자 슈(stator shoe), 고정자 치 끝단(stator teeth end), 고정자 권선(stator winding), 엔드 권선(end winding), 공극(air gap), 회전자 외측(outer rotor), 영구자석(magnet), 회전자 내측(inner rotor), 샤프트(shaft), 엔드캡 내부 공기(end cap air)의 영역에 대하여 등가 회로를 각각 작성하는 단계; 상기 등가 회로를 기초로 하여 전도 및 대류의 열 저항과 열 용량을 계산하는 단계; 상기 각 영역의 등가회로를 하나의 등가 회로망으로 작성하는 단계; 및 등가 회로망에서 상기 열 저항과 열 용량을 이용하여 각 영역에서 열평형에 대한 열 저항-열 용량의 수학식을 반복하여 결과값이 수렴할 때까지 계산을 수행하여 시간에 따른 온도 변화를 측정하는 단계를 포함하는 전자기기의 열 해석 방법이 제공된다.

[0022] 상기 각 영역은 하나의 절점으로 구성되고, 상기 열 저항- 열 용량 수학식은 $T^{p+1}=\frac{\Delta t}{C_i}\left(\sum_j \frac{1}{R_{ij}}(T_j^p-T_i^p)+u_i\right)+T^i$ 임을 특징으로 한다. 여기서, C_i는 절점에서의 열용량, R_{ij}는 절점 i와 j 사이의 열 저항, U_i는 i절점에서 발생하는 열 발생량, T^p는 현재 시간 증분에서의 온도, T^{P+1}은 다음 시간 증분에서의 온도, Δt는 시간 증분량을 나타낸다.

[0023] 상기 각 영역은 원통 형상으로 등가화하여 열 저항 및 열 용량을 계산하는 것을 특징으로 한다.

발명의 효과

[0024] 이와 같은 본 발명에 따르면, 전동기와 같은 전자기기의 열 해석을 수행할 경우, 전동기의 형상에 따라 열 등가 회로망을 작성한 후 전도와 대류의 열 저항을 산정하고, 이후 시간에 따른 온도 변화를 계산하여 전동기의 열 해석방법을 제공함으로써, 비교적 짧은 시간 내에 전자기기의 열 해석을 수행할 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0025] 도 1은 본 발명의 실시 예에 적용된 전동기의 고정자 및 회전자 코어 형상을 보인 도면

도 2 내지 도 14는 본 발명의 실시 예에 따른 전동기의 각 영역에 대한 형상 및 그의 등가 회로를 보인 도면으로서,

도 2는 프레임의 형상과 열 등가 회로

도 3은 고정자 요크의 형상과 열 등가 회로

도 4는 고정자 치 부분의 형상과 열 등가 회로

도 5는 고정자 권선의 형상 및 열 등가 회로

도 6은 공극의 형상 및 열 등가 회로

도 7은 회전자 외측의 형상 및 열 등가 회로

도 8은 영구자석의 형상 및 등가 회로

도 9는 회전자 내측의 형상 및 등가 회로

도 10은 샤프트 및 베어링 부분의 형상 및 등가 회로

도 11은 엔드 권선의 형상 및 등가 회로

도 12는 고정자 슈 부분의 형상 및 열 등가 회로

도 13은 고정자 치 끝단의 형상 및 열 등가 회로

도 14는 엔드캡 내부의 형상 및 열 등가 회로

도 15는 본 발명의 실시 예에 따른 전동기의 각 영역의 등가 회로를 조합한 등가 회로망

도 16은 본 발명에 따른 계산값과 실험값을 비교한 그래프

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0026] 이하 본 발명에 의한 전자기기의 열 해석 방법의 실시 예를 첨부된 도면을 참조하여 상세하게 설명한다.

[0027] 본 발명을 위한 실시 예에서는 600[W]급 매입형 영구자석 동기 전동기를 이용하였다. 이의 사양은 다음 표 1과 같고, 고정자 및 회전자의 코어 형상은 도 1에 도시하였다. 고정자 및 회전자의 재질은 '50PN1300'을 사용하였으며 1.3[T]의 NdFeB 재질의 영구자석을 사용하였다.

표 1

[0028]

Item	Value	Unit
Rated Torque	2.0	N·m
Rated Speed	3000	RPM
Rated Current	24	A
Pole/Slot	8/12	Pole/Slot
Air-Gap Length	1	mm
Winding Type	Concentrated Winding	
Br	1.3	T
Stack Length	45	mm
Stator Diameter	83.6	mm

[0029] 한편, 전동기는 일반적으로 축 방향에 대하여 서로 대칭이며 원통형 모델에 가까운 형상을 가지기 때문에, 전동기에서의 열 저항은 원통형 모델을 이용하여 계산하기로 한다. 또한 전동기가 3차원 모델임을 고려하여 열이 축 방향과 반경 방향으로 전달되는 2차원 모델로 원통형 모델의 열 저항을 등가화하기로 한다.

[0030] 그리고 본 실시 예에서는 전동기의 각 영역에 대한 열 등가 회로를 구성하고 열 저항을 계산하였다. 이때 전동기의 각 영역은 전동기 프레임(Frame), 고정자 요크(stator yoke), 고정자 치(stator teeth), 고정자 슈(stator shoe), 고정자 치 끝단(stator teeth end), 고정자 권선(stator winding), 엔드 권선(end winding), 공극(air gap), 회전자 외측(outer rotor), 영구 자석(magnet), 회전자 내측(inner rotor), 샤프트(shaft), 엔드 캡 내부 공기(end cap air)로 구분하였다.

[0031]

[0032] 먼저 전동기 프레임에 대한 열 등가 회로 및 열 저항이다.

[0033] 전동기 프레임은 냉각용 핀이 없는 원통형 형상으로 설계하였다. 그리고 그 형상 및 열 등가 회로는 도 2에 도시하고 있다.

[0034] 통상 전동기 내부에서 생성되는 열은 프레임을 통해 외부로 방출되고, 프레임 내부에서 전도에 의한 열 전달이 발생하고, 프레임 외부에서는 대류에 의한 열 전달이 발생한다. 따라서 전도 및 대류에 의한 열 저항이 발생한다.

[0035] 이때, 전동기 프레임의 열 저항은 전동기 프레임에서 외부 공기로 전달되는 대류 열 저항(R_1), 전동기 프레임의 중심에서 외부로서의 전도 열 저항(R_2), 전동기 프레임의 중심에서 내부로의 전도 열 저항(R_3), 그리고 프레임 내부에서 전동기 내부 공기로 전달되는 대류 열 저항(R_4)이 계산될 수 있다. 이는 다음의 수학식 1 내지 수학식 4에 나타낸다. 이때 전동기 프레임과 고정자의 접촉 부위는 완벽히 밀착되어 있는 것으로 가정한다.

수학식 1

[0036]
$$R_1 = \frac{1}{h_{frame}(\pi r_0 L)}$$

[0037] 여기서, r_0은 축 중심에서 프레임 외부까지의 길이이고, h_{frame}은 프레임 외부에서의 대류 열 전달계수, L은 축 방향 길이이다.

수학식 2

[0038]
$$R_2 = \frac{\ln\left(\frac{r_0}{\sqrt{r_0 \times r_1}}\right)}{\pi k_{frame} L}$$

수학식 3

[0039]
$$R_3 = \frac{\ln\left(\frac{\sqrt{r_0 \times r_1}}{r_1}\right)}{\pi k_{frame} L}$$

[0040] 상기 수학식 2 및 3에서 r_1은 축 중심에서 프레임 내부까지의 길이이다. 또한 k_{frame}는 프레임의 열 전달 계수이며, 재질의 물성치를 사용한다.

수학식 4

[0041]
$$R_4 = \frac{1}{h_2 (2\pi r_1 l)}$$

[0042] 여기서, h_2는 프레임에서 전동기 내부로의 대류 열전달 계수를 나타내고, l은 프레임의 전체 축 방향 길이에서 고정자와 접촉되지 않은 부분의 축 방향 길이를 나타낸다.

[0043] 한편 전동기 프레임의 열용량은 다음 수학식 5와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 5

[0044]
$$C_1 = c_a \rho_a A_f (L+l)$$

[0045] 여기서, C_a는 비열, ρ_a는 밀도, A_f는 프레임의 단면적을 나타낸다. 그리고 각 부분에서의 비열 및 밀도는 구성 재질의 물성치를 사용한다.

[0046] 다음에는 고정자 요크(Stator Yoke)에 대한 열 등가 회로 및 열 저항이다. 고정자 요크의 형상과 열 등가 회로는 도 3에 도시하고 있다.

[0047] 도 3에 도시된 고정자는 50PN1300 재질의 규소강판을 사용하여 축 방향 길이를 45㎜로 성층하여 제작하였고, 계산의 정확성을 위하여 고정자 부분의 형상에 따라 절점을 세분화하여 계산하였다.

[0048] 고정자 요크에서는 반경 방향 및 축 방향의 전도에 의한 열 전달과, 축 방향의 끝 부분에서 전동기 내부 공기와의 대류에 의한 열 전달이 발생한다. 그리고 전동기 제작시 철심 내부에서의 와전류손을 줄이기 위하여 적층을 하게 되는데, 상기 적층은 전동기의 전도 열 전달에 영향을 미치는바, 적층률(Stacking Factor)를 고려하여 계산을 수행하였다.

[0049] 이에 따라 고정자 요크는, 고정자 요크 중심축에서 외부로의 전도 열 저항(R_5), 고정자 요크 중심축에서 내부로의 전도 열저항(R_6), 고정자 요크의 축 방향으로 전달되는 전도 열 저항(R_7)이 계산된다. 이들 각각의 전도 열 저항은 다음 수학식 6 내지 8과 나타낼 수 있다.

수학식 6

[0050]
$$R_5 = \frac{\ln\left(\frac{r_1}{\sqrt{r_1 \times r_2}}\right)}{\pi k_r L \times stf}$$

수학식 7

[0051]
$$R_6 = \frac{\ln\left(\frac{\sqrt{r_1 \times r_2}}{r_2}\right)}{\pi k_r L \times stf}$$

수학식 8

[0052]
$$R_7 = \frac{L \times stf}{6 k_a \pi \left(r_1^2 - r_2^2\right)}$$

[0053] 상기 수학식 6 내지 8에 기재된 r_1은 축 중심에서 요크 외부까지의 길이, r_2는 축 중심에서 요크 내부까지의 길이, stf는 적층률을 나타낸다.

[0054] 그리고 적층률은 적층되어 있는 철심이기 때문에 축 방향의 열 전도계수와 반경 방향의 열 전도 계수는 다른 값을 사용하게 된다. 이에 수학식 8에 기재된 k_a는 재질의 축 방향으로의 열 전도 계수를 말한다.

[0055] 한편 수학식 9은 고정자 요크의 열 용량(C_2)을 나타낸다.

수학식 9

[0056]
$$C_2 = c_c \rho_c A_y L \times stf$$

[0057] 다음에는 고정자 치(Stator Teeth)에 대한 열 등가 회로 및 열 저항이다. 고정자 치 부분의 형상과 열 등가 회로는 도 4에 도시하고 있다. 도 4를 보면 슬롯을 제외한 치 부분만을 열 저항만을 구하기 위하여 슬롯 간의 길이와 치의 길이를 고려하여 열 저항을 산정하였다.

[0058] 고정자 치에서는 고정자 요크, 슈, 권선 및 축 방향으로의 전도에 의한 열 전달이 발생한다.

[0059] 그렇기 때문에 고정자 치에서 반경 방향으로 전달되는 열 전도에 대한 열 저항(R_8), 고정자 요크와 슈 부분으로 전달되는 열 저항(R_9), 그리고 치 중 심에서 권선으로 전달되는 전도 열 저항(R_{10})을 구할 수 있다. 이들 열 저항은 수학식 10 내지 수학식 12와 같다.

수학식 10

[0060]
$$R_8 = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{\sqrt{r_2 \times r_3}}\right) \times \phi_p}{\pi k_r \mathrm{Ln}\phi_e \times stf}$$

수학식 11

[0061]
$$R_9 = \frac{\ln\left(\frac{\sqrt{r_2 \times r_3}}{r_3}\right) \times \phi_p}{\pi k_r \mathrm{Ln}\phi_e \times stf}$$

수학식 12

[0062]
$$R_{10} = \frac{\pi\phi_e\left(r_2^2 - r_3^2\right)}{k_r L\phi_p\left(r_2 - r_3\right)^2 n^2 \times stf}$$

[0063] 상기 수학식 10 내지 수학식 12에서 ϕ_e는 고정자 치의 길이, ϕ_p는 슬롯 간의 간격, n은 해석 모델의 총 슬롯(치)의 개수를 나타낸다.

[0064] 한편 다음의 수학식 13은 고정자 치의 열 용량(C_3)을 나타낸다.

수학식 13

[0065]
$$C_3 = c_c \rho_c A_t L \times stf$$

[0066] 다음에는 고정자 권선(Stator Winding)에 대한 열 등가 회로 및 열 저항이다. 도 5에는 고정자 권선의 형상 및 열 등가 회로가 도시되어 있다.

[0067] 도 5를 보면 권선의 형상 중에서 한 슬롯의 권선을 원형으로 등가화한 상태를 함께 표시하고 있다. 여기서, A_c는 한 슬롯 내의 권선의 단면적을 나타낸다.

[0068] 한편 고정자 권선에서는 동손에 의한 열원이 발생하기 때문에 온도 상승이 크게 발생하는 부분이다. 그렇기 때문에 권선 부분의 온도 예측이 매우 중요한바, 정확한 열 저항 및 열원 산정이 필수적이다.

[0069] 그리고 고정자 권선에서는 고정자 요크, 고정자 치, 및 엔드 권선에의 전도에 의한 열 전달과 공극으로의 대류에 의한 열 전달이 함께 발생한다.

[0070] 이에 고정자 권선에서는 고정자 권선에서 고정자 요크로의 열 전달에 대한 열 저항(R_{12}), 권선에서 고정자 치로의 전도 열전달에 대한 열 저항(R_{13}), 권선 내부에서 공극과 맞닿는 부분까지의 열전달에 대한 열 저항(R_{14}), 권선 중심에서 엔드 권선까지의 축 방향으로의 전도 열전달에 대한 열 저항(R_{15})을 구할 수 있다. 이들 열 저항은 다음의 수학식 14 내지 수학식 17과 같다.

수학식 14

[0071] $$R_{12}=\frac{4d_i}{\pi k_i L r_4 n}+\frac{1}{\pi k_v L F n}$$

[0072] 여기서, 수식의 좌 항은 절연지 내부에서 전달되는 열전달에 대한 수식이고, 우 항은 권선 내부에서 절연지까지의 열전달에 대한 항을 나타낸다. 그리고 K_i는 절연지의 전도 열 전달 계수, K_v는 권선 바니쉬의 전도 열 전달 계수를 나타낸다. 또한 슬롯 내에 권선이 꽉 차 있는 것이 아니므로 이를 고려하여 점적율에 따라 산정되는 계수 F를 사용한다.

수학식 15

[0073] $$R_{13}=\frac{3d_i}{2\pi k_i L r_4 n}+\frac{3}{8\pi k_v L F n}$$

[0074] 여기서, 수식의 좌항은 절연지 내부에서 전달되는 열전달에 대한 수식이고, 우항은 권선 내부에서 절연지까지의 열전달에 대한 항을 나타낸다.

수학식 16

[0075] $$R_{14}=\frac{3}{\pi k_v L F n}$$

[0076] 수학식 16은 권선 내부에서 공극과 맞닿는 부분까지의 열 전달에 대한 열 저항으로, 권선 내부에서 공극과 맞닿는 부분까지는 전도에 의한 열 전달이 발생하고, 공극과 맞닿는 부분에서는 대류가 발생하게 된다.

수학식 17

[0077] $$R_{15}=\frac{L}{6k_c A_c n}$$

[0078] 수학식 17에서는 권선 중 코일의 면적만을 고려하였고, 권선 내부에서 발생하는 대류에 의한 열 전달은 매우 적은 양이기 때문에 무시하였다. 여기서, K_c는 권선의 재질인 구리의 전도 열 전달 계수를 나타낸다.

[0079] 한편, 수학식 18은 고정자 권선의 열 용량(C_4)을 나타낸다. 권선의 재질인 구리의 물성치를 사용하였다.

수학식 18

[0080] $$C_4=c_c\rho_c A_c L$$

[0081] 다음에는 공극(Air Gap)에 대한 열 등가회로 및 열 저항이다. 공극의 형상 및 그에 대한 열 등가 회로는 도 6에 도시하였다.

[0082] 공극에서는 회전자의 회전 운동에 의해 대류 열 전달이 발생한다. 그리고 용량이 작고 외기유입이 없는 전동기

에서는 고정자에서 전달되는 열이 공극을 통해 회전자에 직접 전달된다. 따라서 고정자의 열이 공극을 통해 외부로 빠져나가지 않고 모두 회전자로 전달되는 것으로 가정하여 열 저항을 나타내기로 한다.

[0083] 공극에서는 고정자 치 끝단에서 공극으로의 대류 열 전달에 대한 열 저항(R_{16})과 고정자 권선에서 공극으로의 대류 열 전달에 대한 열 저항(R_{17}) 및 공극에서 회전자 외측으로의 대류에 의한 열 저항(R_{18})을 나타낼 수 있다. 이는 아래의 수학식 19 내지 수학식 21과 같다.

수학식 19

[0084]
$$R_{16} = \frac{\phi_t}{\phi_a \pi r_3 L h_{airgap}}$$

수학식 20

[0085]
$$R_{17} = \frac{\phi_t}{\pi r_3 L h_{airgap} (\phi_t - \phi_a)}$$

수학식 21

[0086]
$$R_{18} = \frac{1}{\pi r_4 L h_{airgap}}$$

[0087] 상기 수학식 19 내지 수학식 21에서, ϕ_t는 치와 치 사이의 간격, ϕ_a는 치의 길이, h_{airgap}는 공극의 대류 열전달 계수를 나타낸다.

[0088] 한편, 수학식 22는 공극에서의 열 용량(C_{12})을 나타낸다. 공극 내부는 공기로 이루어져 있기 때문에 공기의 비열과 밀도는 공기의 물성치를 이용한다.

수학식 22

[0089]
$$C_{12} = c_a \rho_a A_a L$$

[0090] 다음에는 회전자 외측(Outer Rotor)에 대한 열 등가회로 및 열 저항이다. 회전자 외측의 형상 및 열 등가회로는 도 7에 도시하였다.

[0091] 도 7은 회전자의 실제 형상과 다른 형상의 회전자가 도시되어 있다. 이는 계산의 편의를 위하여 동일한 면적을 가지는 원통형으로 등가화하여 표시한 것이고, 이를 이용하여 계산하기로 한다.

[0092] 도면에서 (A)는 회전자 외측, (B)는 영구자석 부분, (C)는 회전자 내측을 가리킨다.

[0093] 이와 같은 구조의 회전자 외측에서는 회전자 외측 중심까지의 전도 열 전달에 대한 열 저항(R_{19}), 회전자 외측 중심부터 영구자석 영역까지의 전도 열 전달에 대한 열 저항(R_{20}), 회전자 외측 내부에서 축 방향으로 발생하는 전도 열 전달에 대한 열 저항(R_{21})을 나타낼 수 있고, 이는 다음의 수학식 23 내지 25와 같다.

수학식 23

$$R_{19}=\frac{\ln\left(\frac{r_4}{\sqrt{r_4\times r_5}}\right)}{\pi k_r L\times stf}$$

[0094]

[0095] 여기서, r_4 및 r_5는 각각 회전자의 외경과 회전자 외측의 내경을 나타낸다.

수학식 24

$$R_{20}=\frac{\ln\left(\frac{\sqrt{r_4\times r_5}}{r_5}\right)}{\pi k_r L\times stf}$$

[0096]

수학식 25

$$R_{21}=\frac{L\times stf}{6\pi k_a(r_4^2-r_5^2)}$$

[0097]

[0098] 한편 회전자 외측의 열 용량(C_6)은 수학식 26과 같다.

수학식 26

$$C_6=c_c\rho_c A_{or}L$$

[0099]

[0100] 여기서, A_{or}은 회전자 외측의 단면적을 나타낸다.

[0101] 다음에는 영구자석(Magnet)에 대한 열 등가 회로 및 열 저항이다. 영구자석의 형상 및 등가회로는 도 8에 도시하고 있다.

[0102] 영구 자석에서는 회전자 외측에서 영구자석의 중심으로 전달되는 전도에 의한 열 전달과 영구자석 중심에서 회전자 내측으로 전달되는 전도에 의한 열 전달, 그리고 영구자석 내부에서 축 방향으로 전달되는 전도에 의한 열 전달 및 영구자석 표면에서 내부 공기로의 대류에 의한 열 전달이 각각 발생한다.

[0103] 따라서, 회전자 외측에서 영구자석 중심으로의 전도 열 전달에 대한 열 저항(R_{22}), 영구자석 중심으로부터 회전자 내측까지의 전도에 의한 열 전달에 대한 열 저항(R_{23}), 그리고 영구 자석 내부에서 축 방향으로의 전도에 의한 열 전달에 대한 열 저항(R_{24})을 구할 수 있고, 이는 수학식 27 내지 수학식 29와 같다.

수학식 27

[0104] $$R_{22}=\frac{\ln\left(\frac{r_5}{\sqrt{r_5\times r_6}}\right)}{\pi k_r L}$$

[0105] 여기서, r_5은 영구자석 영역의 외경이고, r_6은 영구자석 영역의 내경을 나타낸다.

수학식 28

[0106] $$R_{23}=\frac{\ln\left(\frac{\sqrt{r_5\times r_6}}{r_6}\right)}{\pi k_r L}$$

수학식 29

[0107] $$R_{24}=\frac{L}{6\pi k_a\left(r_5^2-r_6^2\right)}$$

[0108] 한편, 수학식 30은 영구자석의 열 용량(C_7)이다.

수학식 30

[0109] $$C_7=c_m\rho_m A_m L$$

[0110] 여기서, C_m은 영구자석 비열, ρ_m은 영구자석의 밀도로서, 이는 영구자석의 물성치를 사용한다.

[0111] 다음에는 회전자 내측(Inner Rotor)에 대한 열 등가 회로 및 열 저항이다. 이를 설명하기 위한 회전자 내측의 형상 및 등가회로는 도 9에 도시하고 있다.

[0112] 회전자 내측에서는 영구자석으로부터 전도에 의한 열 전달과, 샤프트로의 전도에 따른 열 전달, 및 회전자 내측의 내부에서 축 방향으로의 전도에 따른 열 전달이 발생한다. 또한 표면에서 내부 공기로의 대류 열 전달도 발생하고 있다.

[0113] 이에 회전자 내측의 열 저항은, 영구자석으로부터의 전도 열 전달에 대한 열 저항(R_{25}), 샤프트로의 전도 열 전달에 대한 열 저항(R_{26}), 회전자 내측 내부에서 축 방향으로 발생하는 전도 열 전달에 대한 열 저항(R_{27})을 구할 수 있다. 이들 열 저항은 다음의 수학식 31 내지 33과 같다.

수학식 31

[0114] $$R_{25}=\frac{\ln\left(\frac{r_6}{\sqrt{r_6\times r_7}}\right)}{\pi k_r L\times stf}$$

[0115] 여기서, r_6은 회전자 내측의 외경, r_7은 회전자 내측의 내경을 나타낸다.

수학식 32

[0116] $$R_{26}=\frac{\ln\left(\frac{\sqrt{r_6\times r_7}}{r_7}\right)}{\pi k_r L\times stf}$$

수학식 33

[0117] $$R_{27}=\frac{L\times stf}{6\pi k_a(r_6^2-r_7^2)}$$

[0118] 한편, 수학식 34는 회전자 내측의 열 용량(C_8)이다.

수학식 34

[0119] $$C_8=c_e\rho_e A_i L\times stf$$

[0120] 다음에는 샤프트 및 베어링 부분에 대한 열 등가 회로 및 열 저항이다. 샤프트의 형상 및 열 등가 회로는 도 10에 도시하고 있다.

[0121] 샤프트의 열 전달은 회전자 내측에 맞닿은 부분, 베어링과 맞닿은 부분, 회전자와 베어링을 이어주는 부분의 세 부분으로 나눌 수 있다.

[0122] 이에 샤프트 영역에서는 회전자 내측에서 샤프트 중심까지의 전도에 의한 열 저항(R_{28})과 샤프트 내부에서 축 방향으로의 전도에 대한 열 저항(R_{29})을 구할 수 있다. 이는 수학식 35 및 수학식 3과 같다.

수학식 35

[0123] $$R_{28}=\frac{1}{2\pi k_s L}+\frac{l_m}{2\pi k_s r_7^2}$$

[0124] 여기서, l_m은 회전자와 연결된 부분과 베어링과 연결된 부분의 중간 거리를 나타낸다.

수학식 36

[0125] $$R_{29}=\frac{1}{4\pi k_s l_b}+\frac{l_m}{2\pi k_s r_7^2}$$

[0126] 여기서, l_b는 베어링의 축 방향으로의 길이를 나타낸다.

[0127] 한편 다음 수학식 37은 샤프트의 열 용량(C_9)을 나타낸다.

수학식 37

[0128] $$C_9 = c_s \rho_s A_s L_s$$

[0129] 여기서, C_s는 샤프트의 비열, ρ_s는 샤프트의 밀도, A_s는 샤프트의 단면적, L_s는 샤프트의 총 길이를 나타낸다.

[0130] 다음에는 엔드 권선(End Winding)에 대한 열 등가 회로 및 열 저항이다. 이는 도 11에 도시하고 있다. 도시된 바와 같이 엔드 권선은 권선 뭉치의 환상 형태와 슬롯 윗 부분의 권선으로 표현된다.

[0131] 이와 같은 엔드 권선에서는 축 방향, 반경 방향 및 환상 형태로의 전도에 의한 열전달이 발생하고, 각 표면에서 대류에 의한 열 전달이 발생하게 된다. 뿐만 아니라 엔드 권선 부분 또한 동손이 발생하므로 열원이 되며, 대류에 의한 열 전달의 양이 전도에 의한 열 전달보다 작기 때문에 전동기 전체에서 가장 온도가 높을 것으로 예측되는 영역이다.

[0132] 따라서, 엔드 권선 영역에서는 고정자 권선 부분에서 엔드 권선 부분까지의 전도에 대한 열 저항(R_{30}), 권선 뭉치인 환상 형태의 엔드 권선 반경 방향으로의 전도 열 전달에 대한 열 저항(R_{31}) 및 엔드 권선의 반경 방향으로의 전도 열 전달에 대한 열 저항(R_{32})을 구할 수 있고 이는 수학식 38 내지 수학식 40과 같다.

수학식 38

[0133] $$R_{30} = \frac{l_e}{n A_c k_c}$$

[0134] 여기서, l_e은 엔드 권선의 높이를 나타낸다.

수학식 39

[0135] $$R_{31} = \frac{1}{16\pi^2 R F k_u}$$

[0136] 여기서, R은 환상 형태의 축 중심으로부터의 반지름을 나타낸다.

수학식 40

[0137] $$R_{32} = \frac{r_6^2}{8\pi r_4^2 l F k_u n}$$

[0138] 한편, 엔드 권선의 열 용량(C_5)은 수학식 41과 같다. 이때 엔드 권선의 열 용량은 엔드 권선에서 권선의 면적만을 고려하여 계산하였다.

수학식 41

[0139] $$C_5 = c_e \rho_e A_e l$$

[0140] 다음에는 고정자 슈(Stator Shoe)에 대한 열 등가 회로 및 열 저항이다. 도 12에는 고정자 슈 부분의 형상 및

열 등가 회로가 도시되어 있다.

[0141] 고정자 슈 부분에서는 고정자 치 부분과 치 끝단으로의 전도 열 전달이 발생하고, 내부 공기와의 대류 열 전달이 발생한다.

[0142] 이에 고정자 슈 영역에서는 고정자 슈 중심 부분에서 고정자 치 부분으로 연결되는 반경 방향의 열 저항(R_{40})과, 고정자 슈 중심 부분에서 치 끝단으로의 반경 방향의 열 저항(R_{41}) 및 고정자 슈 부분에서 축 방향으로 전달되는 전도에 대한 열 저항(R_{42})를 구할 수 있다. 이는 수학식 42 내지 수학식 44와 같다.

수학식 42

[0143] $$R_{40}=\frac{\ln\left(\frac{r_{12}}{\sqrt{r_{12}\times r_{13}}}\right)\times 360}{\pi k_r Lnd\times stf}$$

[0144] 여기서, d는 치 부분의 중심축으로의 각도, n은 총 슬롯(치)의 개수이다.

수학식 43

[0145] $$R_{41}=\frac{\ln\left(\frac{\sqrt{r_{12}\times r_{13}}}{r_{13}}\right)\times 360}{\pi k_r Lnd\times stf}$$

수학식 44

[0146] $$R_{42}=\frac{L\times stf}{nA_s k_a}$$

[0147] 여기서, A_s는 고정자 슈 부분의 단면적이다.

[0148] 한편, 고정자 슈 부분의 열 용량(C_{10})은 수학식 45와 같다.

수학식 45

[0149] $$C_{10}=c_c\rho_c A_s L\times stf$$

[0150] 다음에는 고정자 치 끝단(Stator Teeth End)에 대한 열 등가 회로 및 열 저항이다.

[0151] 도 13은 고정자 치 끝단의 형상 및 열 등가 회로를 도시하고 있다. 이때 열전대를 이용하여 온도를 측정할 위치인 고정자 치 끝단에 실험 결과와의 정확한 비교를 위하여 0.1mm 길이의 영역을 설정하였다.

[0152] 고정자 치 끝단에서는 고정자 슈 절점 및 끝 부분으로의 전도에 의한 열 전달, 내부 공기 및 공극으로의 대류에 의한 열 전달이 발생한다.

[0153] 이에 따라 고정자 치 끝단에서는 고정자 치 끝단에서 고정자 슈 부분으로의 전도에 의한 열 전달에 대한 열 저항(R_{43}), 고정자 치 끝단에서 공극 부분으로 전달되는 전도에 의한 열 전달에 대한 열 저항(R_{44}), 고정자 치 끝단에서 축 방향으로 전도에 의해 전달되는 열 저항(R_{45})을 구할 수 있고, 이는 수학식 46 내지 수학식 48과 같다.

수학식 46

[0154] $$R_{43}=\frac{\ln\left(\frac{r_{13}}{\sqrt{r_{13}\times r_{14}}}\right)\times 360}{\pi k_r \mathrm{Lnd}\times stf}$$

수학식 47

[0155] $$R_{44}=\frac{\ln\left(\frac{\sqrt{r_{13}\times r_{14}}}{r_{14}}\right)\times 360}{\pi k_r \mathrm{Lnd}\times stf}$$

수학식 48

[0156] $$R_{45}=\frac{L}{nA_c k_a}$$

[0157] 여기서, A_e는 고정자 치 끝단의 단면적을 나타낸다.

[0158] 한편, 수학식 49은 고정자 치 끝단의 열 용량(C_{11})을 나타낸다.

수학식 49

[0159] $$C_{11}=c_c\rho_c A_c L\times stf$$

[0160] 마지막으로, 엔드캡 내부에 대한 열 등가 회로 및 열 저항이다. 엔드캡의 형상 및 열 등가회로는 도 14에 도시하고 있다.

[0161] 엔드 캡의 열 저항을 계산하기 위해서는 대류에 의한 열 전달을 고려해야 한다. 즉 고정자, 고정자 권선, 회전자 및 샤프트에서 발생한 열은 엔드 캡 내부에서 대류에 의해 하우징을 통하여 외부로 방출되기 때문이다. 또한 열 저항은 엔드 캡 내부의 공기는 상온과 같다고 가정하였고 프레임 외부에서 내부로의 공기 유입은 없는 것으로 가정하여 계산하였다.

[0162] 이에 수학식 50은 엔드 캡 내부 공기와 맞닿는 부분의 대류 열 전달에 대한 열 저항을 나타내고 있다.

수학식 50

[0163] $$R_{endcap}=\frac{1}{h_{endcap}A}$$

[0164] 수학식 50은 열 저항은 엔드 캡 내부 공기의 대류 열전달 계수인 h_{endcap}을 산정한 후 각각의 영역의 대류가 발생하는 부분의 단면적을 사용하여 산정하고 있다.

[0165] 도 15은 전동기의 각 영역에 대한 등가 회로를 하나의 작성한 등가 회로망이다.

[0166] 이를 보면 총 13개의 절점으로 이루어져 있고, 철손이 발생하는 영역은 고정자 요크, 고정자 치, 고정자 슈 및

고정자 치 끝단의 총 4개 영역이고, 동손이 발생하는 영역은 고정자 권선 및 엔드 권선의 2개 영역이 있다.

[0167] 또한 고정자 권선 및 철심에서 동손 및 철손의 열원이 발생하여 프레임, 회전자 및 샤프트로의 열 전달이 발생하며 프레임 표면에서 대류를 통하여 외부로 방출된다.

[0168] 한편, 등가 회로망의 계산시에는 각 절점 사이의 열 저항 및 열용량의 산정이 올바르게 이루어져야 한다. 이를 위해 전동기의 정확한 치수 및 재질 정수가 파악되어야 하고, 회전자 외측이나 영구자석과 같은 특이 형상에 대해서는 계산의 편의성을 위해서 원통형으로 등가화하여 계산이 수행되어야 한다.

[0169] 이어서는 도 15의 등가 회로망을 이용하여 열평형 방정식의 계산을 통한 열 해석 방법을 설명하기로 한다.

[0170] 먼저, 대류 열 전달 계수를 산정한다.

[0171] 전동기에서 대류가 발생하는 지점은 프레임 외부, 공극, 엔드캡 내부 공기이다. 그 중 프레임 외부와 엔드 캡 내부에서는 자연 대류가 발생하며, 공극에서는 회전자가 회전하면서 강제 대류가 발생한다.

[0172] 이에 프레임 외부와 엔드 캡 내부에서의 대류 열 전달 계수는 수학식 51과 같다.

수학식 51

[0173] $$h = 15.5(0.29V_{air} + 1)$$

[0174] 여기서, V_{air}는 유동 공기의 속도를 나타낸다. 참고로 본 실시 예에서 전동기는 내부에 팬이 없고, 실험시 밀폐된 장소에서 실험을 수행하였기 때문에, 프레임 외부에서 공기의 유동은 없는 상태로 가정하였다. 이에 따라 프레임 외부와 엔드 캡 내부에서의 대류 열전달 계수인 h_{fram}과 h_{endcap}은 각각 15.5 W/m^2 ℃로 산정하였다.

[0175] 한편 공극에서는 고정자와 회전자의 상대적인 회전 운동에 의해 대류 열 전달이 발생한다. 공극에서의 열 전달 계수 h_{airgap}는 다음 수학식 52와 같다.

수학식 52

[0176] $$h_{airgap} = \frac{N_{Nu} \cdot k_{air}}{l_g}$$

[0177] 여기서, N_{Nu}는 누셀트 수(Nusselt Number), l_g는 공극의 길이, K_{air}는 공기의 열전도도이다.

[0178] 한편, 상기 누셀트 수는 테일러 수(Taylor Number) N_{Ta}와 프란틀수 (Prandtl Number) N_{Pr}에 의해 다음 수학식 53과 같이 정리된다.

수학식 53

[0179] $$N_{Nu} \begin{cases} = 2.2 & (N_{Ta} \le 41.1) \\ = 0.23 N_{Ta}^{0.63} N_{Pr}^{0.23} & (N_{Ta} \ge 41.1) \end{cases}$$

[0180] 또한 테일러 수와 프란틀 수는 공극의 길이 l_g, 회전자의 속도 V_{rotor}, 공기의 동점성 계수 V_a, 공기의 비열 C_p, 공기의 전도 열전달 계수 K_{air}등을 이용하여 수학식 54 및 수학식 55와 같이 표현된다.

수학식 54

[0181] $$N_{Ta} = \frac{l_a V_{rotor}}{v_a}$$

수학식 55

[0182] $$N_{Pr} = \frac{c_p v_a}{k_{air}}$$

[0183] 이와 같이 테일러 수와 프란트 수를 통해 누셀트 수를 계산하고, 이를 이용하여 공극에서의 대류 열 전달 계수를 산정한다.

[0184] 다음으로는 열전달 방정식을 이용하여 온도 예측과정을 설명한다.

[0185] 등가 회로망의 각각의 체적 요소는 인접 요소와 열 저항에 의해 연결된 절점으로 볼 수 있다.

[0186] 이에 정상 상태 조건에서 i절점으로 들어가는 열 전달량의 합은 0이므로 총 에너지량은 다음 수학식 56과 같다.

수학식 56

[0187] $$q_i + \sum_j \frac{T_j - T_i}{R_{ij}} = 0$$

[0188] 반면, 비정상 상태 조건에서는 절점으로 들어가는 열 전달량은 체적 요소 안에서 증가하는 내부 에너지의 양과 같아야 한다. 따라서 절점 i에서의 내부 에너지를 비열과 온도의 항으로 나타낼 수 있으며, 내부 에너지의 시간 변화율은 다음 수학식 57과 같이 표현될 수 있다.

수학식 57

[0189] $$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \rho c \Delta V \frac{T_i^{p+1} - T_i^p}{\Delta t}$$

[0190] 여기서, ρcΔV는 열용량을 나타낸다.

[0191] 따라서 비정상 상태 조건의 i절점에서 열평형에 대한 열 저항 - 열 용량은 수학식 58와 같다.

수학식 58

[0192] $$C_i \frac{T^{p+1} - T^p}{\Delta t} = \sum_j \frac{1}{R_{ij}} (T_j^p - T_i^p) + u_i \quad i,j = 1,2,\cdots,13$$

[0193] 그리고 수학식 58을 정리하면 다음의 수학식 59과 같이 표현할 수 있다.

수학식 59

[0194] $$T^{p+1}=\frac{\Delta t}{C_i}\left(\sum_j \frac{1}{R_{ij}}(T_j^p-T_i^p)+u_i\right)+T^t$$

[0195] 상기 수학식 58 및 59에서, C_i는 절점에서의 열용량, R_{ij}는 절점 i와 j사이의 열 저항, U_i는 i절점에서 발생하는 열 발생량, T^p는 현재 시간 증분에서의 온도, T^{P+1}은 다음 시간 증분에서의 온도, Δt는 시간 증분량을 나타낸다.

[0196] 한편, 시간 증분 Δt는 다음의 수학식 60을 이용하여 구할 수 있다.

수학식 60

[0197] $$1-\frac{\Delta t}{C_i}\sum_j \frac{1}{R_{ij}}\geq 0 \qquad \therefore \Delta t \leq \left[\frac{C_i}{\sum_j (1/R_{ij})}\right]_{최소}$$

[0198] 다음으로는 손실 계산 과정을 설명한다.

[0199] 주지된 바와 같이 전동기 내부에서 발생하는 열원은 동손, 철손 및 마찰손으로 구분할 수 있다. 그리고 이들 열원 중 큰 온도 상승을 발생하는 열원은 동손과 철손이다.

[0200] 동손은 권선 저항에 의해서 발생하는 손실이다. 이는 권선의 저항과 전류의 항으로 다음 수학식 61과 같이 표현된다.

수학식 61

[0201] $$P_{cu}=3I^2R$$

[0202] 그러나, 전동기가 구동할 때 온도가 상승함에 따라 전동기 권선의 저항도 선형적으로 상승하게 된다. 따라서 저항 온도 계수의 항과 어느 온도에서의 저항 등의 항으로 수학식 62과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 62

[0203] $$R_{ph}=R_0(1+\alpha(T-T_0))$$

[0204] 한편, 철손은 전기 강판의 재질에 따라 계수 값이 달라진다.

[0205] 본 실시 예에서는 영구 자석 및 철심 재질의 향상 및 전동기의 컴팩트화에 의한 철손식의 변화에 대해 수학식 63과 같이 스타인메츠 상수(Steinmetz constant)를 '2'로 고정하고 나머지 계수를 산정하여 철손을 계산하였다.

수학식 63

[0206] $$W_T=k_h f B_m^2+k_e f^2 B_m^2+k_a f^{1.5} B_m^{1.5}$$

[0207] 본 실시 예에서는 전동기의 온도 분포를 확인하기 위하여 실험을 수행하였다. 전동기는 전술한 바와 같이 600W급 IPM 전동기이며, 온도 측정을 위한 K타입의 열전대 및 계측기(Autonics T4WI)를 사용하였다. 그리고 열전대는 엔드 권선과 고정자 치 끝부분에 설치하였다. 아울러 부하 인가를 위한 다이나모 미터와 오실로스코프 등의 계측기, 전동기 구동을 위한 드라이버 등으로 실험 조건을 구성하였다.

[0208] 실험은 KS 규정인 열전대를 사용하여 온도를 직접 측정하고 온도 변화가 1시간에 2[K] 미만일 경우까지 측정하

였다. 또한 전동기의 수명과 안전을 고려하여 허용 온도인 130℃ 보다 낮은 120℃까지 측정하였으며, 전동기 구동 후 다이나모 미터를 사용하여 정격 전류인 24[A]의 전류가 인가되도록 부하를 걸어 준 후 온도를 측정하였다.

[0209] 도 16은 본 발명에 따른 계산값과 실험값을 비교한 그래프이다.

[0210] 이는 표 2를 통해 쉽게 확인할 수 있다.

표 2

[0211]

엔드 권선		고정차 치 끝 부분	
실험치	계산치	실험치	계산치
115℃	113.9℃	97℃	98.8℃

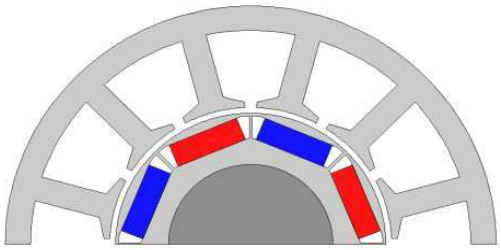
[0212] 이를 보면 실험치와 계산치 모두 2% 미만의 오차를 나타내고 있어, 측정 오차 내의 범위임을 확인할 수 있다.

[0213] 이상에서 설명한 바와 같이 전동기의 형상에 따라 각 영역이 포함된 하나의 등가 회로망을 작성하고 각 영역 사이의 열 저항 및 열 용량을 산정한 후, 시간에 따른 온도 변화를 계산하고 있어, 종래보다 전동기의 열 해석기간을 단축하면서 용이하게 수행할 수 있게 됨을 알 수 있다.

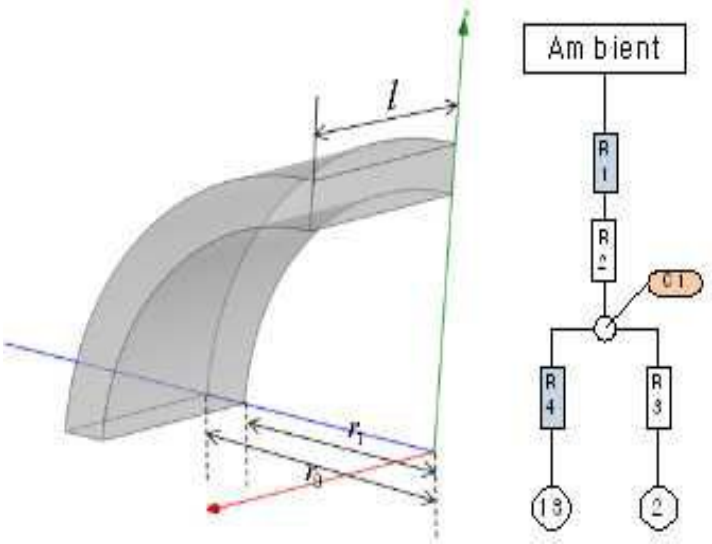
[0214] 이상과 같이 본 발명의 도시된 실시 예를 참고하여 설명하고 있으나, 이는 예시적인 것들에 불과하며, 본 발명이 속하는 기술 분야의 통상의 지식을 가진자라면 본 발명의 요지 및 범위에 벗어나지 않으면서도 다양한 변형, 변경 및 균등한 타 실시 예들이 가능하다는 것을 명백하게 알 수 있을 것이다. 따라서 본 발명의 진정한 기술적 보호 범위는 첨부된 청구범위의 기술적인 사상에 의해 정해져야 할 것이다.

도면

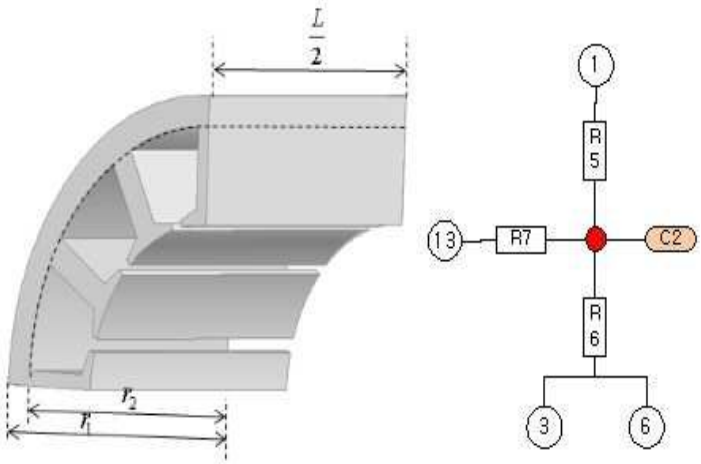
도면1



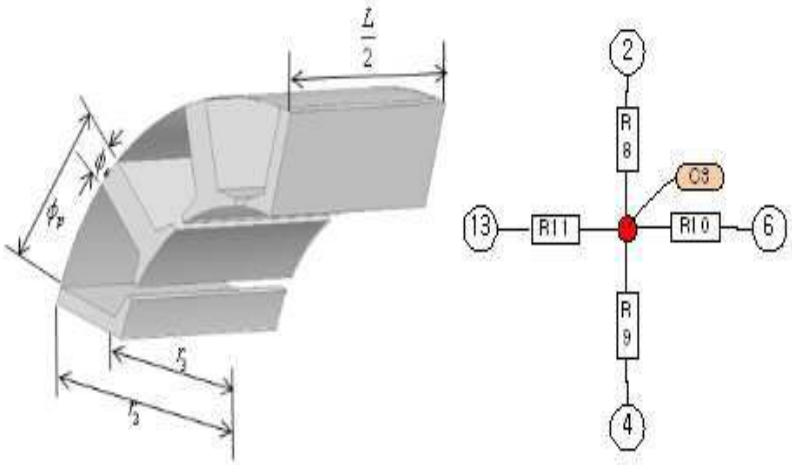
도면2


l
Ambient
R1
R2
C1
R4
R3
18
2

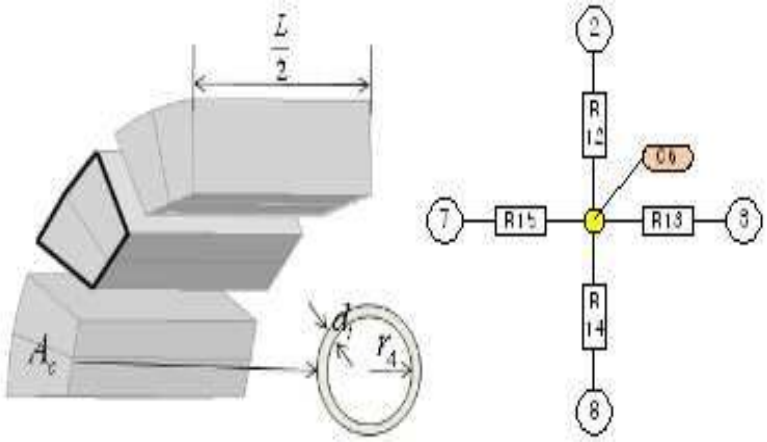
도면3


L/2
1
R5
13
R7
C2
R6
3
6

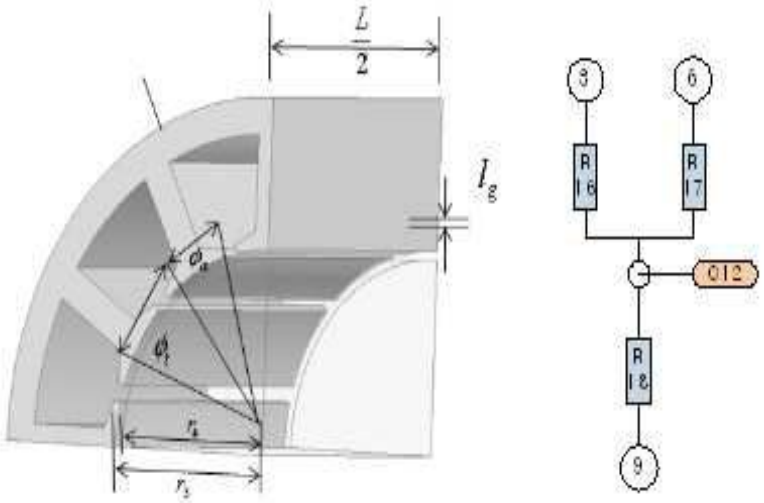
도면4


L/2
2
R8
C3
13
R11
R10
6
R9
4

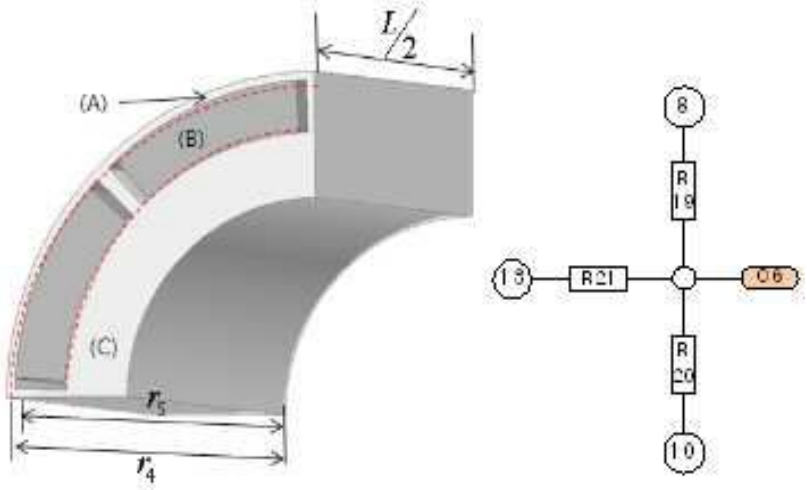
도면5


L/2
A_c
d_i
r_4
2
R12
Q6
7
R15
R13
3
R14
8

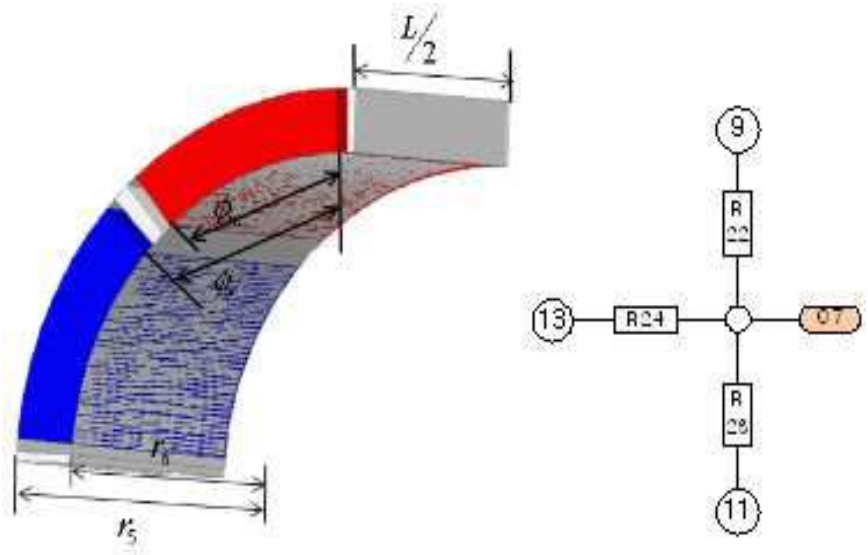
도면6


L/2
l_g
ϕ_o
ϕ_i
r_4
r_3
3
6
R16
R17
Q12
R18
9

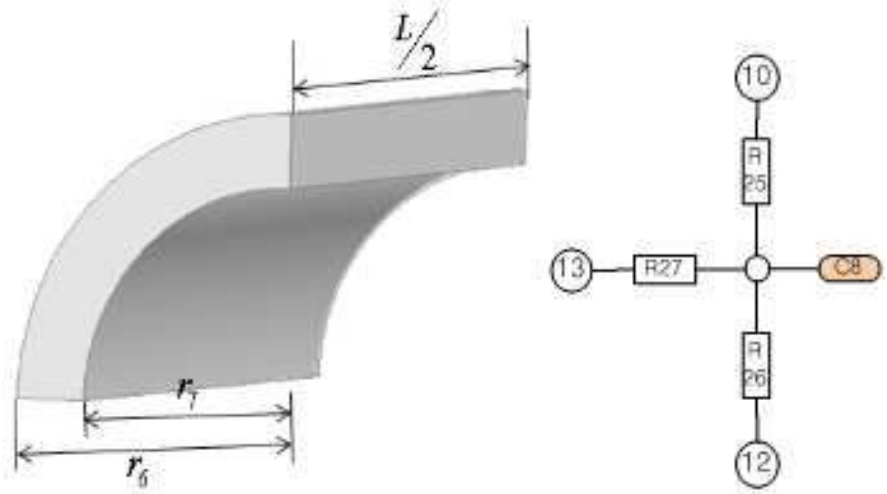
도면7


L/2
(A)
(B)
(C)
r_5
r_4
8
R19
13
R21
Q6
R20
10

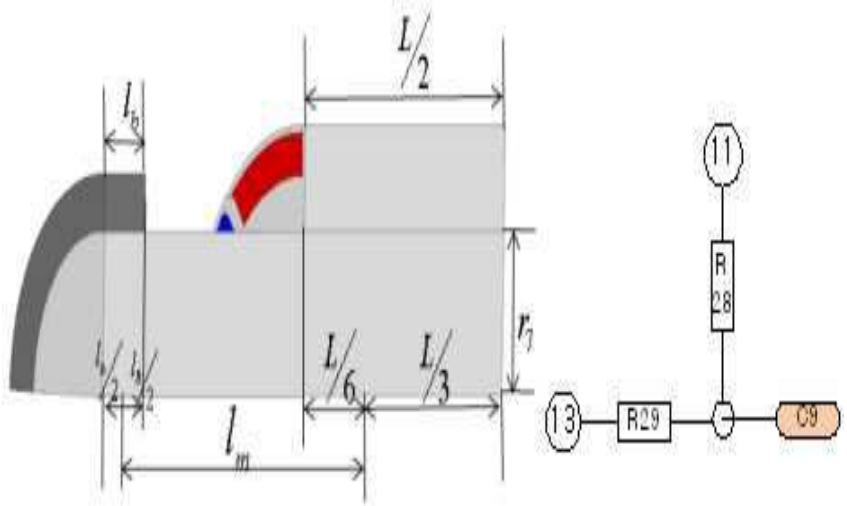
도면8


L/2
r5
9
R23
13
R24
C7
R28
11

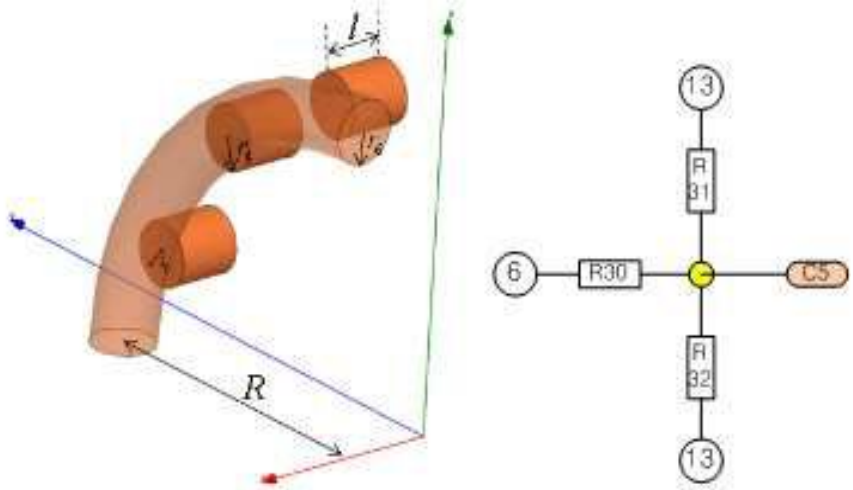
도면9


L/2
r6
10
R25
13
R27
C8
R26
12

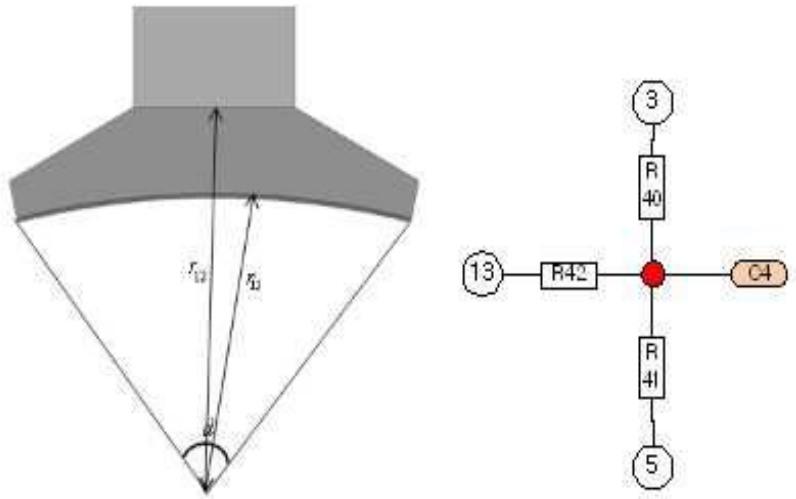
도면10


L/2
L/6
L/3
r7
11
R28
13
R29
C9

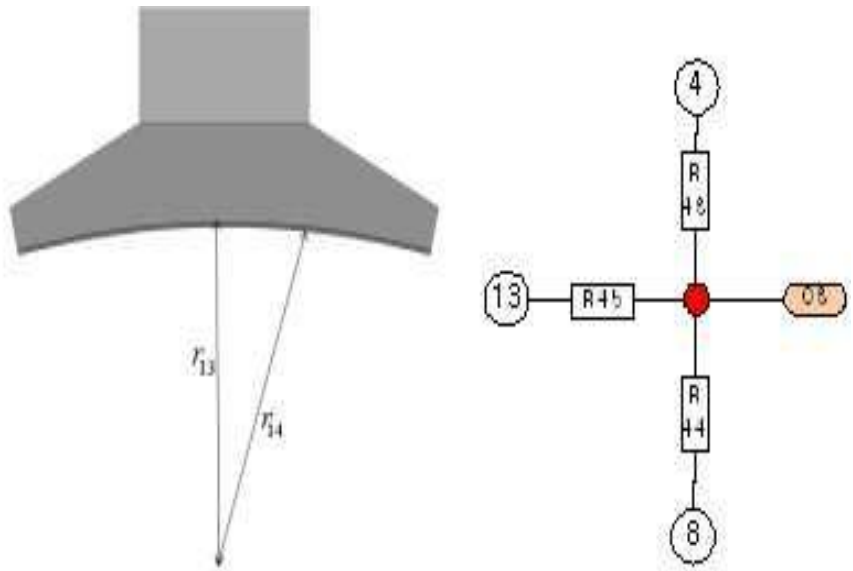
도면11



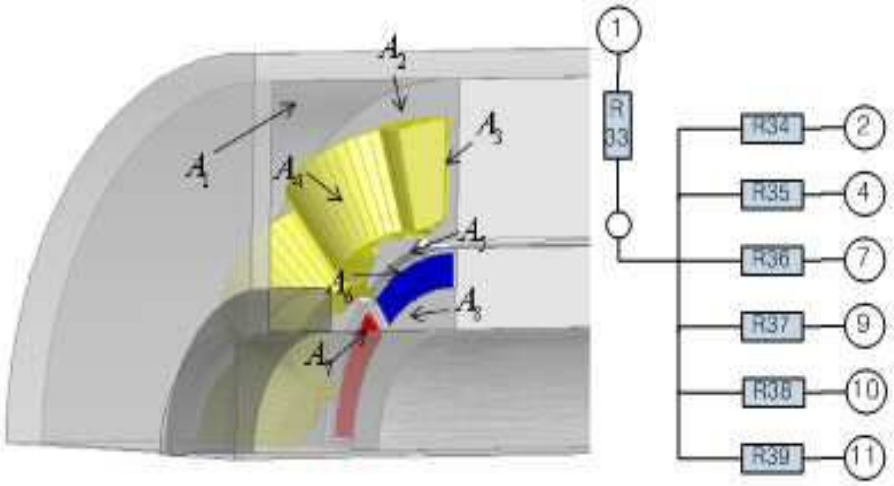
도면12



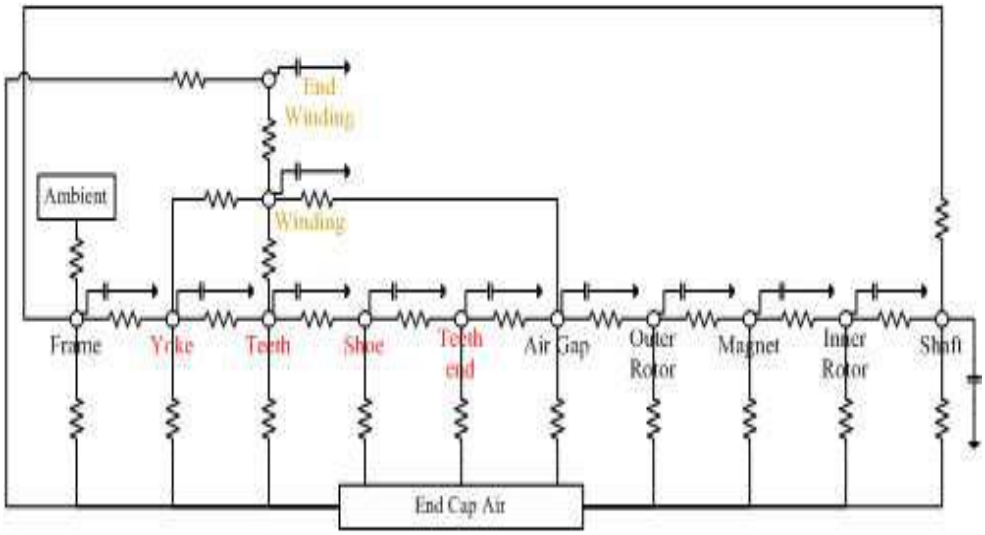
도면13



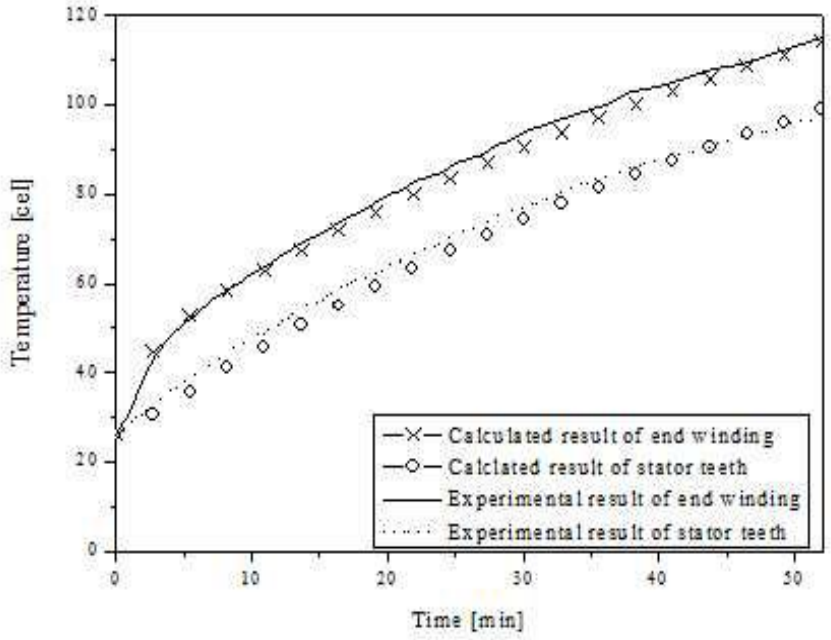
도면14


A1
A2
A3
A4
A5
A6
A7
1
R 33
R34
R35
R36
R37
R38
R39
2
4
7
9
10
11

도면15


End Winding
Ambient
Winding
Frame
Yoke
Teeth
Shoe
Teeth end
Air Gap
Outer Rotor
Magnet
Inner Rotor
Shaft
End Cap Air

도면16


Temperature [cel]
Time [min]
0
20
40
60
80
100
120
0
10
20
30
40
50
Calculated result of end winding
Calclated result of stator teeth
Experimental result of end winding
Experimental result of stator teeth