



KIEE Summer Conference 2013

# 대한전기학회 제44회 하계학술대회

2013년 7월 10일 (수) ~ 12일 (금) 제주국제컨벤션센터

## KIEE Summer Conference 2013

일시 : 2013년 7월 10일 (수) ~ 12일 (금)

장소 : 제주국제컨벤션센터



01. Home



02. 목차(Contents)



03. 저자색인



04. 검색(Search)



• 주최 :  대한전기학회

• 후원 : 산업통상자원부, 미래창조과학부,  
제주특별자치도, 한국전력공사,  
한국전기공사협회, 한국과학기술단체총연합회

• 협찬 : 2013 하계 협찬업체

전시회 참가업체

● EMP017	<b>SMC 재질을 이용한 IPMSM 특성 검토</b> 김도지* 채승희 정영훈 홍정표 (한양대)	[논문보기]
● EMP046	<b>수냉식의 ISG 전동기의 열등가화로 해석</b> 김규섭 (한양대), 정재우 (한양대), 박민로 (한양대), 홍정표 (한양대)	[논문보기]
● EMP068	<b>유한요소해석에서 적층에 따른 고정자 기계적 이방성 물성치 고려 방법</b> 김두영 (한양대), 박현진 (한양대), 홍정표 (한양대)	[논문보기]
● EMP077	<b>유한요소 해석법과 등가회로 해석법의 결합에 의한 유도전동기의 특성해석</b> 이수진 (한양대), 김지민 (한양대), 심재한 (한양대), 김동민 (한양대), 홍정표 (한양대)	[논문보기]
● EMP078	<b>이방성 Nd-Fe-B 본드자석을 이용한 브러쉬리스 영구자석 동기 전동기 개발</b> 김해중 (한양대), 김규섭 (한양대), 홍정표 (한양대)	[논문보기]
● REP033	<b>육상 해상 풍력타워 리프트 개발에 관한 연구</b> 김영수 (한국승강기대), 김창일 (한국승강기대), 이상훈 (한국승강기대), 홍정표 (동의과학대학), 이건복 (해성산전), 박종열 (해성산전), 권순재 (부경대)	[논문보기]

## SMC 재질을 이용한 IPMSM 특성 검토

김도진, 채승희, 정영훈, 홍정표  
한양대학교

## Characteristic analysis of IPMSM using SMC

Do-Jin Kim, Seung-Hee Chai, Young-Hoon Jung, Jung-Pyo Hong  
Hanyang University

**Abstract** - SMC(Soft Magnetic Composite) 재질은 분말소재로써 성형을 통한 가공이 용이하여 형상의 자유도를 가질 수 있다. 또한, 등방성의 자기적 특성과 열적인 특성으로 인하여 고속 운전 시, 와전류손을 줄일 수 있고 분말소재로 제작되기 때문에 전동기 재활용이 용이해 선진국에서 각광받는 소재로 대두되고 있다. 따라서 SMC 재질을 이용한 설계가 많이 이루어지고 있다.

SMC 재질은 전기강판에 비해 비투자율이 낮으나, 고속영역에서의 철손이 전기 강판에 비해서 낮으므로 많이 사용되고 있다. 따라서 이러한 SMC 재질 특성을 고려한 해석이 중요하다. SMC 재질은 분말소재로 제작을 하기 때문에 형상의 자유도를 가지며, 이러한 형상을 고려하기 위해서 3차원으로 토크 및 특성을 산정해야 하나 많은 시간과 노력이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 3차원 해석을 수행하여 이를 바탕으로 3D 형상을 2D 형상으로 등가화하는 방법을 검토하며 이를 이용하여 전동기 설계를 수행한다.

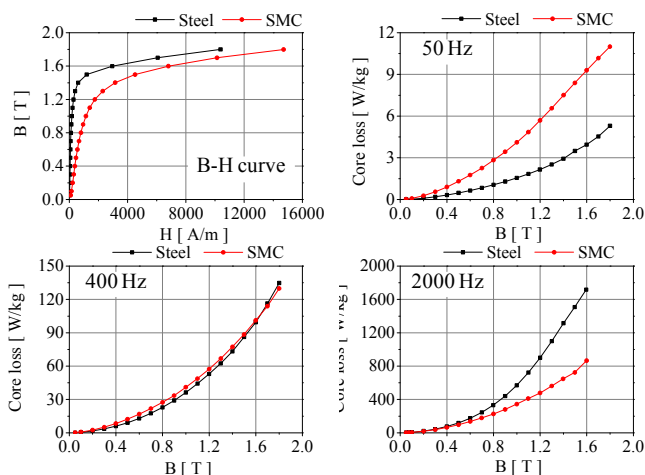
## 1. 서 론

기존의 전동기들은 운전상태 중 전동기 내부에서 발생하는 열적인 문제점과 손실을 최소화하기 위하여 전기강판의 적층을 통한 조립이 대부분이었다.

한편, SMC 재질은 분말소재로써 성형을 통한 가공으로 전동기 제작이 가능하며 복잡한 전동기 형상에 대한 제작이 용이하고 부드러운 표면 가공이 쉬운 장점이 있다. 또한, 등방성의 자기적 특성과 열적인 특성으로 인하여 고속 운전 시, 와전류손을 줄일 수 있고 분말소재로 제작되었기에 전동기 재활용이 용이하므로 선진국에서 각광받는 소재로 대두되고 있다. 하지만, SMC 재질은 전기강판에 비해 비투자율이 낮아 저주파수에서의 전체 철손은 일반적인 전기강판보다 매우 크므로 철손에 대한 평가는 전동기의 특성 분석에 중요한 요소로서 작용한다.[1]

기존 수식을 활용한 연구는 많이 있으나, 전동기의 각 부분의 형상을 등가화하기 때문에 전동기 각 부의 포화를 고려하지 못한다. 따라서 본 논문에서는 3-D FEA 해석을 통해 신뢰성 있는 특성을 산정하고자 한다.

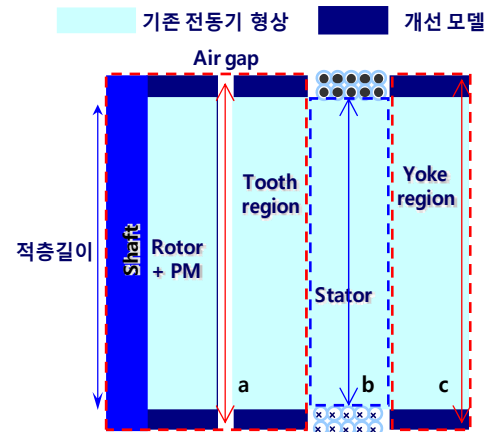
3-D 해석을 통해서 산정된 무부하 쇠교자속으로 overhang effect를 고려하고, 산정된 요크 자속밀도를 이용하여 요크 두께를 결정한다. 이를 이용하여 형상 및 영구자석 잔류자속밀도를 재 산정하게 되며, 모델링을 하여 FEA 해석을 수행한다. 최종적으로 산정된 모델을 특성 해석을 수행하여 전동기의 특성 및 효율을 산정하게 된다.



〈그림 1〉 material data

〈표 1〉 설계 사양

항목	내용	단위	비고
극 수 / 슬롯 수	8 / 48	-	코일피치 : 5
출력	39	kW	-
기저 속도	2600	rpm	-
최대 속도	11000	rpm	-
토크	143	Nm	-
철심 재질	SMC	-	고정자



〈그림 2〉 전동기 설계 변수

## 2. 본 론

## 2.1 설계 모델

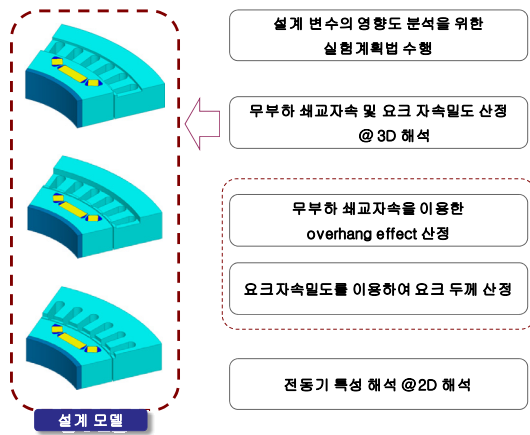
본 논문에서 설계한 전동기의 극 수 / 슬롯 수는 8극 48슬롯이며, 단절전(coil pitch : 5)이다. 목적함수가 되는 영역은 기저속도와, 최대 속도에서 효율 및 출력밀도를 산정한다.

회전자는 고속으로 회전함에 따라 강성을 고려해야 하기 때문에 SMC 재질을 적용하기는 힘들기 때문에 고정자에만 SMC 재질을 적용하여 해석을 수행한다.

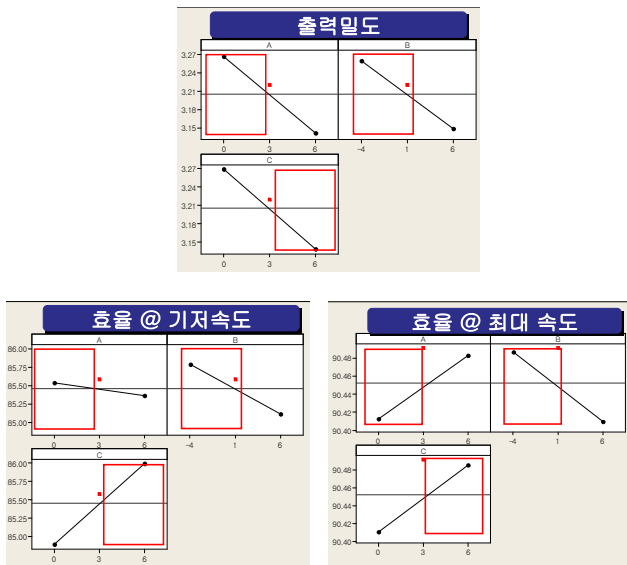
## 2.2 설계 프로세스

기존 SMC 재질을 사용한 전동기 설계는 형상을 등가화하여 설계를 진행하였으나, 전동기의 각 부분의 형상을 간략화하기 때문에 정밀성이 떨어진다. 따라서 본 논문에서는 3-D FEA를 이용하여 산정된 무부하 쇠교자속 및 요크의 자속밀도를 이용하여 형상을 결정한다.

설계 변수는 그림 2의 설계모델과 같이 고정자를 3부분으로 나누게 되며, 축방향 길이가 변하게 된다. 권선이 감기는 영역을 중심으로 치 끝단 영역, 요크부분의 영역으로 3개의 설계 변수이다. 이때, 치 끝단 영역과 회전자의 축방향 길이는 동일하다. 각 3개의 변수의 변화에 따라서 무부하 쇠교자속 및 요크의 자속밀도를 산정하게 된다. 산정된 무부하 쇠교자속을 이용하여 overhang effect를 고려하며 그리고 산정된 요크 자속밀도를 이용하여 요크의 두께를 재산정하게 된다. 이를 이용하여 2-D FEA 해석을 수행하기 위한 모델링을 하여 FEA 해석을 수행한다. 최종적으로 산정된 모델을 특성 해석을 수행하여 전동기의 특성 및 효율을 산정하게 된다. 제시한 설계 프로세스는 그림 3과 같다.



〈그림 3〉 설계 프로세스



〈그림 4〉 DOE 결과 설계 범위 설정

### 2.3 실험계획법

앞서 제시한 설계 프로세스를 이용하여 최적화를 수행한다. 우선 변수의 영향도 분석 및 설계 범위를 결정하기 위해서 DOE(Design of experiment)를 수행한다. 그림 2에서 나타난 3가지 변수의 변화에 따라 목적함수인 출력밀도 및 효율을 산정한다. DOE를 이용하여 각 변수에 따른 출력밀도 및 효율의 경향성을 분석하여 최적화의 설계 범위를 결정하였으며, 이를 이용하여 최적화를 진행하였다. DOE 결과는 그림 4와 같다.

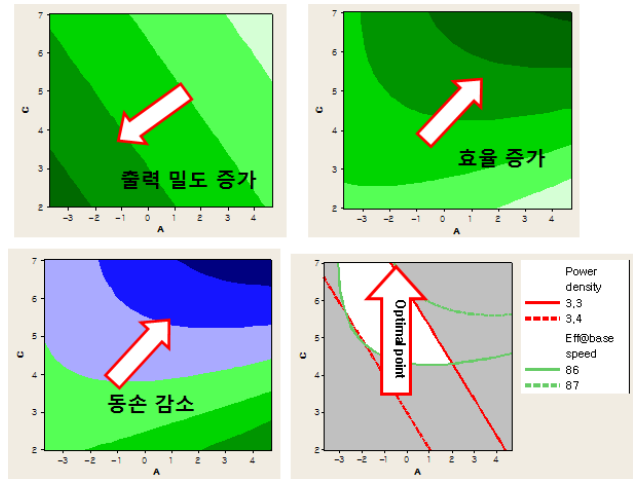
변수의 영향도 분석 시, 변수 a의 경우, 회전자의 영구자석 사용량이나 공극의 단면적을 증가시켜 자속의 양을 증가시킬 수 있으며, 변수 b는 실질적인 자속의 경로가 된다. 그러나 b의 변화에 따라서 저항 값도 변화해 된다. 변수 c의 경우 요크폭에 영향을 미치게 되는 변수가 되며 요크의 철손에 영향을 미치게 된다.

### 2.4 최적화

DOE를 통해서 산정된 설계 변수의 범위를 이용하여 최적화를 수행한다. 이때, 목적함수가 되는 출력밀도 및 효율에 가중치를 인가한다. 본 논문에서는 효율 증대에 대한 비중을 둔다. 따라서,  $w_1$ 의 값을 1로 두고  $w_2$ 의 값을 1.5로 두어 가중치를 크게 한다. 수식 1과 같이 각 변수 a,b,c에 대한 함수를 만들고 이에 가중치를 인가하고 수식 2와 같이 설계 변수를 설정한다.

$$f_{net} = w_1 \cdot f_{power\ density}(a,b,c) + w_2 \cdot f_{efficiency}(a,b,c) \quad (1)$$

$$\text{subject to : } -3.5 \leq x_1 \leq 3, -8 \leq x_2 \leq 2, 2 \leq x_3 \leq 7 \quad (2)$$



〈그림 5〉 최적화 결과

### 2.5 설계 결과

그림 5와 같이 최적화 결과를 보게 되면 효율이 증대되는 경향과 출력밀도의 경향은 서로 상이성을 가지게 된다. 따라서 본 논문에서 효율 증대 및 출력밀도 향상을 위해서 optimal point로 설계를 진행한다. 최종 설계결과를 기존 모델과 비교하면 표 2와 같다. 기존 철심을 사용할 경우 b-h curve 특성이 SMC 재질에 비해서 유리하기 때문에 무부하 역기전력이 크다. 따라서 저속에서 작은 전류로도 동일한 토크를 낼 수 있다. 하지만 고속영역에서는 계자의 자속을 약화시키기 위해서 약계자 운전을 하게된다. 철심의 경우 무부하 역기전력이 크므로 전류위상각이 SMC 재질에 비해서 크다. 따라서 많은 약계자 전류가 필요하게 되고 SMC 재질에 비해서 고속에서 철손이 크게 증가하게 된다.

효율은 기적속도인 2600 rpm까지는 철심 재질의 효율이 크지만, 4000 rpm 이후의 속도에서는 SMC 재질의 특성이 나타나게 된다. 고속에서 철손이 매우 작게 되므로, 효율이 크게 증가하게 된다.

〈표 2〉 해석 결과

재질	속도 [rpm]	토크 [Nm]	전류	효율 [%]
SMC	2600	143	180	87.7
steel			160	89.5
SMC	11000	30	72	88.5
steel			86.4	83.0

## 3. 결 론

본 논문에서 SMC 재질을 이용하여 전동기 설계 프로세스를 제시하였다. 기존 제시한 수식을 이용한 방법은 치의 형상을 간략화하였기 때문에 설계의 정밀성이 떨어졌으나, 3D 해석을 수행하여 산정한 쇄교자속 및 요크의 자속밀도를 이용하여 형상 및 영구자석 잔류자속밀도를 재 산정하였으며, 이를 이용하여 2D 해석을 수행하여 전동기 특성을 산정하였다.

목적함수인 출력밀도 및 효율 상상을 위해서 기존 전기강판을 이용하여 설계되어 있는 전동기의 고정자를 SMC 재질을 적용하였다. 본 논문을 이용하여 설계 시 기저속도에서 효율은 감소하였으나, 최대속도에서 효율은 5.5 % 증가하였다.

“본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원사업의 연구결과로 수행되었음” (NIPA-2013-H0401-13-1008)

### [참 고 문 헌]

- [1] YouGuang, Jian Guo Zhu, Jin Jiang Zhong and Wei Wu, "Core losses in Claw Pole Permanent Magnet Machines With Soft Magnetic Composite Stators", *IEEE, Trans. Magn.*, vol, 39, No. 5, Sept 2003
- [2] 이상호, 이지영, 김영균, 홍정표, 김홍석, 임태빈, "SMC 재질을 이용한 BLDC 전동기의 치 형상에 따른 인덕턴스 변화가 전동기 특성에 미치는 영향", *하계학술대회 논문집*, 1046-1048, 2004