

# 영구자석 고속전동기의 출력밀도 및 효율 향상을 위한 설계 기법

## Design Technique of a Permanent Magnet High-speed Motor for Improving Power Density and Efficiency

이 기 덕\* · 이 주\* · 이 형 우†  
(Ki-Doek Lee · Ju Lee · Hyung-Woo Lee)

**Abstract** - This paper presents a design technique to improve the power density and efficiency of a permanent magnet high-speed motor by using the mono-PM rotor. The suggested model minimized rotor diameter and stack length which have a bad influence on shafting in the high-speed operation. Conventional and suggested motors are analyzed and compared by using FEM(Finite Element Method) to verify the effectiveness. The overall performance such as torque, losses, efficiency and power density and so on are investigated in detail. The results of the analysis deduced that the suggested mono-PM rotor design is superior to the conventional one.

**Key Words** : High-speed motor, Mono-PM, Power density

### 1. 서 론

최근 영구자석 제작 및 응용 기술의 발전으로 다양한 분야에서 영구자석 전동기의 활용이 크게 늘어나는 추세이다. 특히, 영구자석의 사용은 전동기의 효율 및 출력밀도를 향상 시키는데 커다란 기여를 하고 있다. 이러한 영구자석의 사용과 더불어 전동기를 고속으로 회전시키면 추가적인 효율 및 출력밀도 향상을 얻을 수 있다. 고속회전기는 일정 출력에서 토크가 차지하는 비중이 상대적으로 작으므로, 토크 발생에 필요한 전류의 양을 줄일 수 있어 권선 직경 및 슬롯의 면적이 줄어드는 효과가 있다[1-6]. 본 논문에서는 영구자석 사용과 고속회전으로 인한 출력밀도 향상과 더불어, 회전자 축을 생략하고 통자석을 삽입하는 설계를 통하여 전동기 출력밀도를 추가로 향상시키는 설계 기법을 제안하였다.

영구자석 전동기는 크게 매입형 영구자석동기전동기(IPMSM, Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)와 표면부착형 영구자석동기전동기(SPMSM, Surface Permanent Magnet Synchronous Motor)로 나눌 수 있다. 고속회전기의 경우, 매입형 영구자석전동기는 영구자석이 회전자 내부에 매입되어 비산방지용 보호막이 필요 없으나, 제작 및 제어가 어려운 단점이 있고, 표면부착형 영구자석전동기는 제작 및 제어가 용이한 반면, 고속회전 시 원심력으로 인한 영구자석의 비산 방지용 보호막이 필요하며, 매입형 영구자석전동기에 비해 상대적으로 큰 공극을 가지고 있다.

본 논문에서는 영구자석 비산방지용 보호막을 외부 축으로 사용하고, 회전자 내부를 영구자석으로 채워 회전자의 직경을 크게 줄이면서 고속회전이 용이한 설계기법을 제시하였다. 전동기의 토크는 회전자 직경에 비례하므로 고 토크를 위해서는 회전자 직경이 커지게 되어 고속 회전 시 상당히 큰 기계적 스트레스가 회전자에 전달된다. 때문에 회전자 코어의 고강도 구조를 고려한 설계를 수행하였으며 기존 모델과 비교하여 우수성을 검증하였다. 이러한 설계기법은 산업용 및 전기철도 견인전동기와 같이 출력밀도가 매우 중요한 응용분야에 필수적이므로, 향후 적용 가능성이 매우 높을 것으로 판단한다.

### 2. 영구자석 고속전동기의 기초 설계

#### 2.1 출력밀도 향상을 위한 정격속도 선정

전동기 설계를 위해서는 전동기의 정격, 요구되는 부하 및 구동장치의 전압, 전류 제한치를 우선적으로 고려해야 한다. 일반적으로 전동기의 팬 부하 및 공기저항을 고려한 견인전동기의 부하곡선은 그림 1과 같이 속도의 제곱에 비례하는 함수로 나타낼 수 있다. 100kW 고속전동기의 경우, 20,000rpm에서 요구되는 토크는 47.75Nm이며, 25,000rpm에서는 부하 토크인 74.6Nm를 내기위해 195kW의 모터정격이 필요하다. 또한, 공급 가능한 전압 및 전류의 제한은 최악 조건과 입력전압의 강하율, 전력용 반도체의 정격 등을 고려해야 한다. 본 논문에서는 100kW, 20,000rpm 고속 전동기를 대상으로 선정하고, 공급전압은 3상 380V<sub>u,rms</sub>에서 SVPWM 전압 변조 방식 및 입력전압 강하율 마진 등의 여러 조건을 고려하여 식 (1)과 같이, 구동회로의 최대 출력 상전압을 177.7V<sub>rms</sub>로, 최대 전류를 217A<sub>rms</sub>로 정하였다.

100kW@20,000rpm 전동기의 정격속도는 그림 2와 같이 세 가지로 나눌 수 있는데, 각 모델별로 전류 제어각, 역기

\* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea  
† Corresponding Author : Dept. of Railway Vehicle System Engineering, Korea National University of Transportation, Korea

E-mail : krhwlee@ut.ac.kr

Received : December 11, 2013; Accepted : February 17, 2014

$$380V_{L,rms} \times \underset{\substack{\uparrow \\ \text{입력전압 강하율} \\ \text{마진}}}{90\%} \times \underset{\substack{\uparrow \\ \text{DC 링크 전압}}}{1.35} \times \underset{\substack{\uparrow \\ \text{SVPWM}}}{\frac{1}{\sqrt{2}}} \times \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Dead time 보상}}}{0.945} \times \underset{\substack{\uparrow \\ \text{상전압 변환}}}{\frac{1}{\sqrt{3}}} = 177.7V_{rms} \quad (1)$$

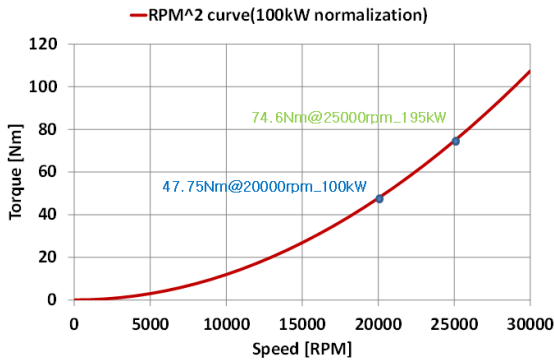


그림 1 고속전동기의 부하곡선  
Fig. 1 Load curve of a high-speed motor

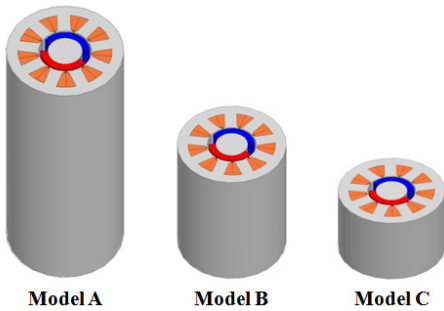
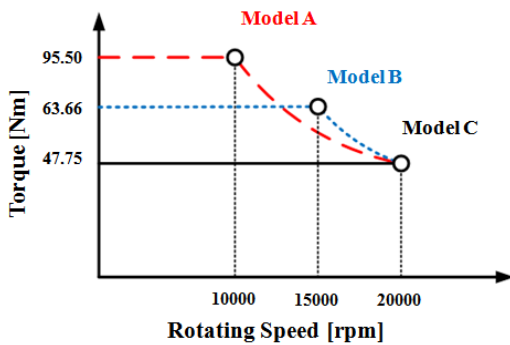


그림 2 정격속도에 따른 고속전동기의 세 가지 모델  
Fig. 2 Three models of a high-speed motor according to the base speeds

전력, 토크, 손실, 효율, 크기 등이 상이하므로 이에 대한 분석이 필요하다. 각각의 모델은 고정자 외경을 250mm로 제한하여 설계된 기본 모델이다. 각 모델의 경우 고정자 외경을 고정한 상황에서, 각각의 상이한 정격속도에서 요구하는 최대 토크가 달라지므로 이에 따라 적층길이의 차이가 발생한다. 모델 A, B, C의 특성 비교를 위하여 그 외의 설계 사양은 모두 같게 설계 되었으며 표 1에 기본 설계 파라미터

를 제시하였다. 표 2는 위의 세 가지 전동기 모델에 대한 특성 비교이다. 일반적으로 고속 전동기는 고속영역 운전 시 약 자속 제어를 이용하기 위해 A모델의 출력 특성을 나타내게 되나, 추가적인 고 토크가 필요하지 않은 경우 C 모델과 같은 출력 특성을 이용하면 전동기의 사이즈를 쓸데없이 키울 필요가 없어 절손 및 동손 저감 측면에서 유리한 점을 갖게 된다.

따라서 C 모델과 감속기를 이용하는 것이 출력밀도 향상에 도움을 줄 수 있으므로, 본 논문에서는 C 모델을 선정하였다.

표 1 각 모델 설계 데이터

Table 1 Design parameters of the three models

Model	Power [kW]	Stack length [mm]	Stator diameter [mm]	Rotor diameter [mm]	Ia(rms) [A]	Beta_angle @operating speed [°]
A	100	445	242.5	100.9	232.3	62
B	100	297	242.5	100.9	232.3	45
C	100	223	242.5	100.9	232.3	0

표 2 정격속도에 따른 세 가지 모델별 성능 특성

Table 2 Performance characteristics of the three models according to the base speeds

Model	V <sub>a,peak</sub> [V]	Torque at 20,000 rpm [Nm]	Copper loss [W]	Core loss [W]	Magnet loss [W]	Efficiency [%]
A	357.7	48.32	2752	3722	941	87.87
B	248.5	48.18	1942	2560	731	89.91
C	204.6	48.91	1457	2099	694	90.91

2.2 효율 및 출력밀도를 고려한 슬롯 수 선정

고속회전기는 구동 주파수의 한계로 인하여 일반적으로 4극기 이상을 사용하지 않는다. 따라서, 본 논문에서는 2극기 100kW@20,000rpm 전동기를 설계하였으며, 위결의 결과를 토대로 정격속도가 20,000rpm인 약계자 제어를 하지 않는 전동기를 선정하였다. 슬롯 수에 따른 전동기의 특성분석을 위하여 다양한 슬롯조합의 전동기를 설계하고 특성을 분석하였다. 2극기에 대하여 권선시행이 가능한 슬롯조합은 3의 배수이며, 본 논문에서는 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27 슬롯 각각에 대하여 유한요소해석법을 시행하였다. 그림 3은 각 슬롯 수 별 전동기의 토크 특성을 나타내며, 그림 4는 각 전동기의 단위부피당 출력을 나타낸다. 기초설계 모델의 유한요소 해석 결과, 12 슬롯 모델에서 가장 큰 단위부피당 출력 특성을 나타내었으나 반대급부로 토크리플이 크게 일어남을 확인할 수 있었으며, 이는 전절권에 의한 영향이다. 18, 24 슬롯 모델 역시 전절권 방식은 같으나, 슬롯 수가 많아지면서 토크리플이 어느 정도 완화되었다. 토크리플 면에서는 21 슬롯이상이 가장 우수하나, 출력밀도 및 권선 시행 등의 제작성을 고려하여 18 슬롯을 가장 적절한 슬롯조합으로 선정하였다.

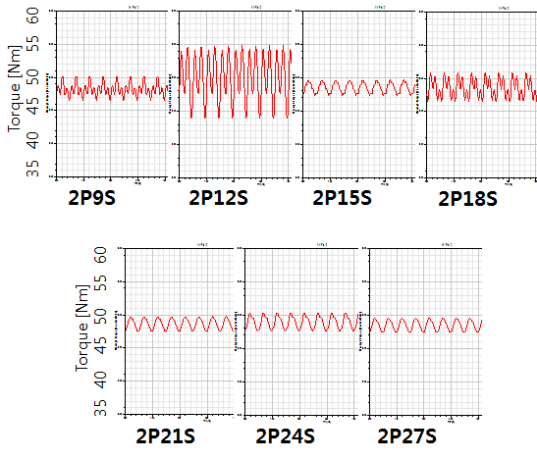


그림 3 각 슬롯수 별 토크 특성  
Fig. 3 Torque characteristics according to the slot numbers

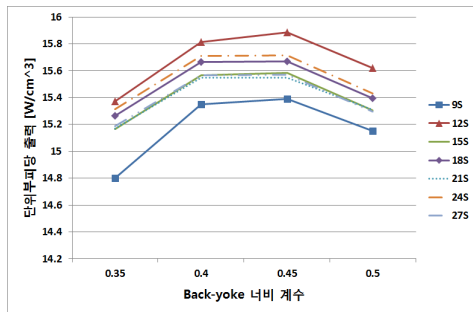


그림 4 각 슬롯수 별 단위부피당 출력  
Fig. 4 Power per volume according to the slot numbers

### 3. 출력밀도 향상을 위한 영구자석 회전자 설계

출력밀도 향상을 위하여 영구자석을 사용하는 고속회전기는 축계의 안전성 확보를 위하여, 적층길이를 최소화하는 것이 바람직하다. 그러나 주어진 정격출력에서 적층길이의 최소화는 회전자 직경의 증가를 의미한다. 따라서 회전자의 직경 증가를 최소화하기 위하여 본 연구에서는 일반적인 회전자 형상이 아닌, 통 자석형의 회전자를 제안하였다. 기존의 회전자는 그림 5(a)와 같이 중앙에 축이 있고, 자로 형성을 위한 회전자 코어가 축과 결합하며, 2극의 영구자석을 비산방지용 보호막(Can)이 감싸는 구조이다. 하지만 통 자석형 회전자는 그림 5(b)와 같이, 약 10mm의 fitting bolt 주위로 통 형태의 2극 영구자석을 Can이 감싸는 구조로서, Can 자체가 비산방지 뿐만 아니라, 권선 끝단 이후의 양 축의 축과 결합하여 회전자 전체를 지지하는 역할을 하며, 이러한 설계를 통해 회전자의 축을 생략할 수 있다. 다만 회전자를 Can이 지지하게 되는 구조이므로, Can의 두께는 기존의 3mm에서 4.5mm로 소폭 증가하였다. 동일 출력 아래에서 출력밀도 향상이란 사이즈의 감소를 나타낸다. 고정자 직경을 일정하게 고정시킨 상태에서 출력밀도 증대란 곧 적층길이의 축소를 나타낸다. 기존의 회전자 모델은 회전자 코어의 자속밀도 포화를 감안했을 때, 사용할 수 있는 영구자석 총량에 한계가 있다. 그러나 통 자석형 회전자 모델은 자속의 포화를 고려할 필요 없이 최대 양의 자석을 사용할 수

있으므로 동일한 전기적 입력에서 비교했을 때, 자기장하가 커졌다고 볼 수 있으므로 같은 출력을 내기위한 적층길이가 줄어들 수 있다. 본 설계에서 적층길이는 기존의 회전자 모델 155mm와 비교했을 때, 통자석형 회전자 모델은 120mm로 35mm 감소되었다.

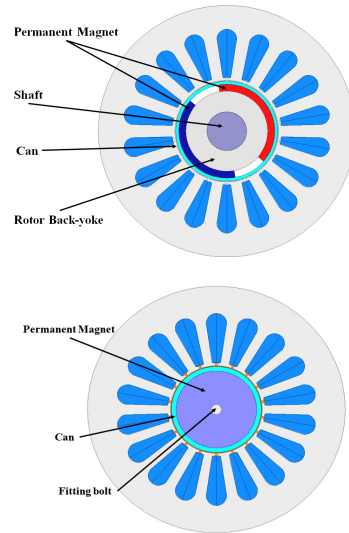


그림 5 기존의 회전자(a)와 통 자석형 회전자(b)  
Fig. 5 Conventional rotor design (a) and mono-PM rotor design (b)

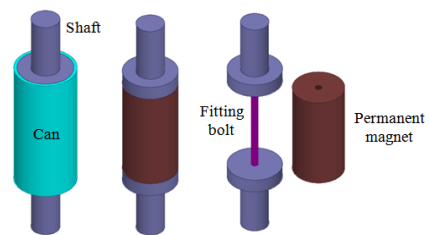
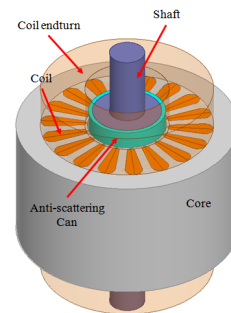


그림 6 통자석형 고속회전기(a)와 회전자 구조(b)  
Fig. 6 Mono-PM high-speed motor (a) and rotor configuration (b)

### 4. 해석결과

설계된 영구자석 고속회전기의 성능 분석을 위하여, 다음과 같이 유한요소법을 수행하였다. 그림 7은 기존 회전자형 고속회전기의 자속밀도 분포도이다. 중심의 비자성체 축으

로 인해 전기자 자속의 경로가 축을 감싸서 흐르는 방향으로 왜곡되며, 이것이 영구자석에서 발생하는 자속의 진행 방향과 중첩되어 그림 7에서 보이듯이 부분적으로 회전자에서의 자속밀도가 1.8T 이상으로 나타나게 된다. 축의 영향을 최소화 할 수 있을 만큼 회전자 사이즈를 키워 자속밀도를 완화하는 방향으로의 설계가 바람직하나, 고속기임을 고려할 때, 회전자 직경을 충분히 늘려 자속포화도를 낮추는데 어려움이 있다. 그림 8은 기존 회전자형 고속회전기의 토크, 역기전력, 고정자 철손 및 회전자 철손을 나타낸다.

그림 9는 2극 18슬롯 통자석형 고속회전기의 자속밀도 분포도이다. 통자석형 회전자 구조는 축이 전기자로부터의 자

속을 왜곡하지 않아 영구자석으로부터의 자속과 전기자 권선으로부터의 자속이 서로 수직방향으로 통과한다. 따라서 그림 7에서와 같은 자속의 중첩으로 인한 부분적 포화현상이 없다. 그림에서와 같이, 고정자 치의 최대 자속밀도는 1.65T 이하로 자속포화도를 만족한다.

그림 10은 통자석형 고속회전기의 특성을 나타낸다. 그림 8과 비교하면, 토크는 다소 증가하였으며, 리플이 크게 감소하였음을 알 수 있다. 역기전력 기본과 성분의 경우, 기존 회전자형 모델은 170.04V<sub>rms</sub>@23.75deg 이고, 통자석형 모델의 경우 176.78V<sub>rms</sub>@10.83deg이었다. 두 모델 모두 출력은 110kW로 동등하지만 기존 회전자형 모델의 경우, 회전자에

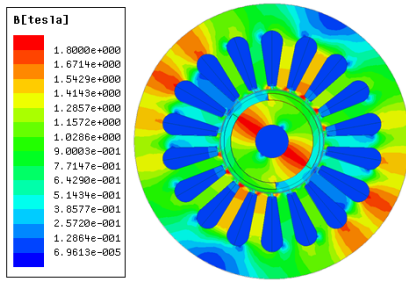


그림 7 기존 회전자형 고속회전기의 자속밀도분포도  
Fig. 7 magnetic flux density of the conventional rotor type high-speed motor

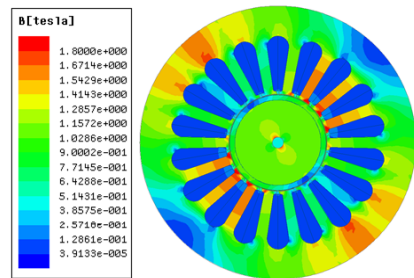


그림 9 통자석형 고속회전기의 자속밀도분포도  
Fig. 9 magnetic flux density of the mono-PM rotor type high-speed motor

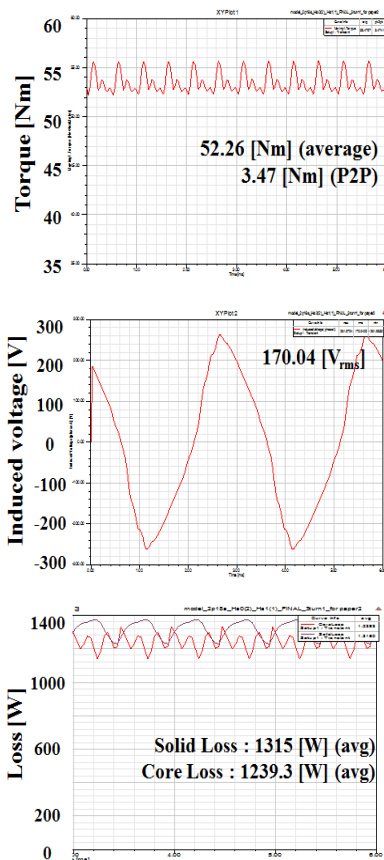


그림 8 기존 회전자형 고속회전기의 FEM 해석 결과  
Fig. 8 FEM analysis results of the conventional rotor type high-speed motor

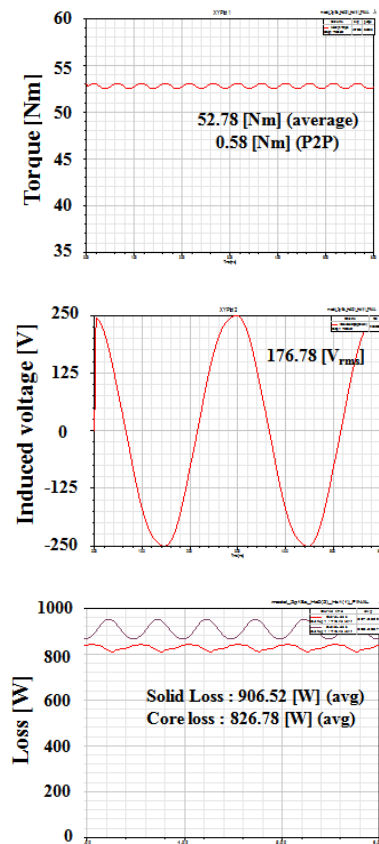


그림 10 통자석형 고속회전기의 FEM 해석 결과  
Fig. 10 FEM analysis results of the mono-PM rotor type high-speed motor

**표 3** 통 자석형 고속회전기의 성능 분석  
**Table 3** Performance analysis of the mono-PM rotor type high-speed motor

Model	Conventional	Mono-PM	Rate
고정자 직경 [mm]	250	250	-
회전자 직경 [mm]	99	87	12.12 % ↓
적층길이 [mm]	155	120	22.58 % ↓
PM 총 사용량 [cm <sup>3</sup> ]	234.4	563.9	140.57 % ↑
공극길이 [mm]	1	1	-
Can 두께 [mm]	3	4.5	50 % ↑
슬롯 오프닝 [mm]	2	2	-
상 당 턴 수	3	4	
I <sub>a,rms</sub> [A]	247.49	212.13	14.29 % ↓
V <sub>a,rms</sub> [V]	170.04	176.78	3.96 % ↑
전압 기본과 위상각 [deg]	23.75	10.83	
Torque [Nm]	52.26	52.78	1.00 % ↑
Copper loss [W]	826.88	540	34.69 % ↓
Stator core loss [W]	1239.30	826.78	33.29 % ↓
Rotor magnet loss [W]	92	28.84	68.65 % ↓
Rotor can loss [W]	1223	877.68	28.24 % ↓
Efficiency [%]	92.00	92.95	1.03 % ↑
Power density [kW/m <sup>3</sup> ]	22945	29819	29.96 % ↑

서의 자속의 포화현상으로 인해 기본과 전압성분의 위상각이 틀어지며 통 자석형 모델에 비해 효율 면에서 불리한 것으로 나타났다. 본 설계의 전압 제한값인 177.7V<sub>a,rms</sub>를 만족하는 결과를 위해 기존 회전자형 모델의 경우 치 당 턴 수를 3턴으로 낮추었으며 그에 상응하도록 전류를 증가하였다. 이것은 동등한 비교를 위해 전기적 입력을 동일하게 함으로써 두 모델간의 동등한 비교를 위함이다.

표 3은 기존 회전자형 모델과 제안한 통 자석형 모델의 성능 분석을 나타낸다. 두 모델 모두 동일한 고정자 외경을 사용하며, 이 때 회전자 직경 및 적층길이 감소하여 고속 회전에 매우 유리함을 알 수 있다. 영구자석의 총 사용량은 증가하였지만, 가전제품과 달리 대량생산용이 아니므로 크게 문제되지는 않는다. 또한, 통 자석형 모델의 경우, 기존 회전자형 모델에 비해 비록 상 당 턴 수가 1턴 많기는 하나, 기존 회전자형 모델에 비해 전류가 적게 인가되어 최종적으로 동손이 줄어들었다. 또한 적층길이 줄어든 점도 코일의 길이에 영향을 미쳐 동손 감소에 영향을 주었다. 통 자석형 모델은 자속포화의 완화로 고정자 철손 및 can과 영구자석에서의 와전류손 역시 줄어들었다. 따라서 제안한 모터의 손실 감소로 모터 효율은 기존 회전자형 모델에 비해 1.03% 증가하였으며, 출력밀도는 약 29.96%로 크게 증가하였다.

기존 회전자형 모델의 경우 회전자 코어 내의 자속포화 문제로 인해 설계 시 사용가능한 영구자석의 두께 및 너비

에 제약이 있었다. 이는 같은 전기적 입력이 주어진 두 모델을 비교했을 때, 상대적으로 자기장하가 낮아진 결과를 불러왔으며 이 때문에 기존 회전자형 모델은 같은 출력을 내기 위해 적층길이 더 필요하였다. 이것은 일차적으로 출력 밀도의 감소라는 문제를 가져왔으며, 각 상에 유기되는 전압의 크기를 줄이기 위해 상 당 턴 수를 줄이는 과정에서 전류를 키워 이에 따른 동손도 증가되는 영향을 가져왔다. 높은 자속포화도로 인한 철손의 증가도 불러오게 되어 전체적으로 효율을 악화시키게 된다. 또한 자속의 포화현상으로 기본과 전압성분의 위상각이 틀어지게 되어 이로 인한 역률의 악화 문제도 가져오게 된다. 이러한 문제들은 고속회전으로 갈수록 더욱 뚜렷이 나타나게 된다. 이에 반해 통 자석형 회전자 모델의 경우 자속의 포화에 따른 위의 문제들을 해소할 수 있기 때문에 고속 회전기의 설계 시 매우 유용한 선택이 될 수 있다.

### 5. 결 론

출력밀도 향상은 철도 및 자동차용 견인전동기뿐만 아니라, 산업용으로도 매우 중요한 이슈이다. 본 논문은 출력밀도 향상을 위해 일반적으로 적용하는 형상의 영구자석 대신 통 자석형 형태의 회전자 모델을 제안함으로써, 축계에 부담을 주는 적층길이 및 회전자 직경을 최소화하고, 철손 및 동손을 저감하여 효율을 향상시켰다. 제작비용 측면에서도, 통 자석 형태의 회전자 모델은 영구자석의 사용량이 많아져 재료비 측면에서 매우 불리한 것으로 생각될 수 있으나, 실제 제작 시, 비용 측면의 증가는 크게 나타나지 않으며, 제작성에서도 큰 어려움이 없으므로 중소형의 고속기 제작에 있어 본 방식은 유효할 것으로 사료된다. 제안한 모델의 성능 검증 위하여 유한요소해석을 수행하였으며, 기존 회전자형 모델과의 비교분석을 통해 효율 및 출력밀도 향상을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.20132010101870)

### References

- [1] Luise, F, Tessarolo, A, Pieri, S, Raffin, P, Di Chiara, M, Agnolet, F, Scalabrin, M, "Design and Technology Solutions for High-efficiency High-speed Motors", Electrical Machines(ICEM), 2012 International Conference on, 2012.
- [2] Nagorny, A.S, Dravid, N.V, Jansen, R.H, Kenny, B.H, "Design Aspects of a High-speed Permanent Magnet Synchronous Motor / Generator for flywheel Applications", Electric Machines and Drives, IEEE International Conference on, 2005.
- [3] Lin, S, Wu, T.X, Zhou, L, Moslehy, F, Kapat, J,

Chow. L, "Modeling and Design of Super High-speed Permanent Magnet Synchronous Motor(PMSM)", Aerospace and Electronics Conference, NAECON 2008, IEEE National, 2008.

- [4] Schneider. T, Binder. A, "Design and Evaluation of a 60,000rpm Permanent Magnet Bearingless High Speed Motor", Power Electronics and Drive Systems, PEDS 7<sup>th</sup> International Conference, 2007.
- [5] Seok-Myeong Jang, Han-Wook Cho, Sang-Kyu Choi, "Design and Analysis of a High-speed Brushless DC Motor for Centrifugal Compressor", Magnetics, IEEE Transactions on, Vol. 43, Issue. 6, pp. 2573-2575, 2007.
- [6] Boubaker. N, Matt. D, Enrici. P, Martire. T, Nierlich. F, "Estimation of Rotor Eddy-current Losses for High-speed SPMSM", Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15<sup>th</sup> European Conference, 2013.

---

## 저 자 소 개



**Ki-Doek Lee**

He received B.S degree in electrical engineering from Incheon University. He received M.S degree in electrical engineering from Hanyang University. Since 2011, He has been pursuing the Ph.D. degree in the Department of electrical engineering, Hanyang University. His research interests are design, analysis and control of motor/generators; power conversion systems.



**Ju Lee**

He obtained his B.S. and M.S. degrees from Hanyang University, Seoul, Korea in 1986 and 1988, respectively. He obtained his Ph.D. from Kyusyu University, Fukuoka, Japan, in 1997. He worked as an Assistant Researcher at the Agency for Defense Development from 1989 to 1993 and with the Korea Railroad Research Institute in 1997 as Chief of the Division on Light Subway Systems. He joined Hanyang University as Professor of the Department of Electrical Engineering in September 1997. His main research interests include electrical machinery and drives; electromagnetic field analysis; new transformation systems, such as hybrid

electric vehicles and high-speed electric trains; and standardization. Dr. Lee was recognized by the Japan Electric Society as the writer of the Best Paper in 1995. He is a member of the IEEE Industry Applications Society, Magnetics Society, and Power Electronics Society. He has been a member of the editorial staff of the Korean Institute of Electrical Engineers since 1998 and a member of the editorial board of the International Journal of Electrical Engineering since 2000. In addition, he has been the Korea National Committee Secretary of the IEC/TC2 since 1999. He is also the General Manager of the Human Resource Development Center for Electric Machine and Devices, Seoul, Korea.



**Hyung-Woo Lee**

He received the B.S. and M.S. degrees from Hanyang University, Seoul, Korea, in 1998 and 2000, respectively, and the Ph.D. degree from Texas A&M University, College Station, TX, in 2003, all in electrical engineering. In 2004, he was a Post-doctoral Research Assistant in the Department of Theoretical and Applied Mechanics, Cornell University, Ithaca, NY. In 2005, he was a contract Professor at the BK division of Hanyang University, Seoul, Korea. From 2006 to 2012, he was a Senior Researcher at the Korea Railroad Research Institute, Uiwang, Korea. He is currently an assistant professor of the Department of Railway vehicle system engineering at Korea National University of Transportation since 2013. His research interests include design, analysis and control of motor/generator, power conversion systems, and applications of motor drives such as Maglev trains, conventional railway propulsion systems, and modern renewable energy systems.