DBpia

ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 64, No. 10, pp. 1486~1492, 2015
http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2015.64.10.1486

# 도시철도차량용 IPMSM의 Magnet Segment 변화에 따른 특성 분석에 관한 연구

## A Study on the Characteristics Analysis According to the Permanent Magnet Segmentation Change to IPMSM for Urban Railway Vehicle

정 거 철* · 박 찬 배** · 정 태 철* · 이 주†
(Geochul Jeong · Chan-Bae Park · Taechul Jeong · Ju Lee)

**Abstract** - The following study carried out the characteristic analysis based on the magnet segment of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor(IPMSM) for the urban railway vehicles. IPMSM affects the electromagnetic characteristics through the change in magnetic flux based on the rotor structure, and significantly influences the structural features through the change of pressure. Therefore, satisfied by the demanded traction force of the IPMSM, magnet segment derived three different model types. The 1-segment PM model consisted an undivided permanent magnet. The 2-Bridge model consisted a divided permanent magnet with the application of Bridge. The 3-Bridge model consisted additional dividing with one more Bridge applied. The electromagnetic characteristics of the three models were compared and analyzed along with the structural features regarding the scattering of permanent magnet based on strong centrifugal force from the rotation of the rotor at high speed. In conclusion, the final model with electromagnetic characteristics and structural features most suitable of IPMSM for the urban railway vehicles was derived, and the effectiveness was verified through the characteristic experiments after the production of the derived model.

**Key Words** : Traction motor, IPMSM, Synchronous motor, Urban railway vehicle, Magnet segment

## 1. 서 론

도시철도차량 견인용 전동기는 전력용 반도체 및 제어 기술의 발달에 따라 직류전동기에서 유도전동기로 획기적인 발전을 이루어 기술적 완성단계에 진입하였다. 그러나 친환경성 및 에너지 효율성 극대화를 위하여 견인전동기의 고 효율화 및 경량화가 필수적으로 요구되고 있지만 대부분의 도시철도차량 견인용 전동기로 유도전동기를 적용하고 있는 현실이기에 효율을 높이고 경량화 하는데 어려움이 있다. 표 1은 현재 도시철도차량에 적용되고 있는 견인전동기의 현황을 보여준다. 표 1에서 보여주고 있는 1세대와 2세대의 유도전동기를 비교해 보면 2세대 유도전동기의 사이즈를 줄여 출력밀도를 증가시킬 수 있었지만 큰 효과를 보지 못했다[1].

최근 높은 에너지 밀도를 가지는 희토류계 영구자석이 동기전동기에 적용되면서 유도전동기보다 효율과 출력밀도가 향상된 매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, 이하 IPMSM)가 상당수 개발되었다. 이러한 IPMSM은 높은 효율과 약자속 제어를 통한 넓은 속도 가변 영역 특성을 갖으며[2], 최근 IPMSM은 자동차용 전동기에서 철도차량 견인용 전동기로 그 영역을 넓혀가고 있다[3].

**표 1** 도시철도차량용 견인전동기 현황[1]
**Table 1** Status of traction motors for urban railway vehicle

| Contents | 1st Generation Motor | 2nd Generation Motor |
|---|---|---|
| Model | | |
| Motor Type | Induction motor | Induction motor |
| Power[kW] | 205 | 210 |
| Size[mm] | D520 x H270 | D515 x H220 |
| Weight[kg] | 452 | 357 |
| Power Density[kW/kg] | 0.454 | 0.544 |
| Efficiency[%] | 93 | 93 |
| Cooling Method | Self ventilated | Self ventilated |

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea
E-mail : julee@hanyang.ac.kr
* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea
** Dept. of Railroad Operation System Engineering, Korea National University of Transportation, Korea
Received : May 21, 2015; Accepted : September 4, 2015


Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

www.dbpia.co.kr

IPMSM은 회전자 내부에 영구자석이 매입되어 있는 형태이기 때문에 회전자 형상에 따라 자속 경로가 변경되어 IPMSM의 전자기적 특성은 크게 달라진다. 또한 최근 고효율화의 요구에 따라 고속화에 유리한 IPMSM을 설계할 경우 고속 운전 시 발생되는 원심력에 의한 Bridge의 강도를 설계 단계에서 검토하는 것이 중요해지고 있다[4]. 따라서 본 논문에서의 IPMSM은 Magnet의 Segment 수에 따라 Bridge의 수가 달라지게 되므로 이에 따른 기계적 강도를 필수적으로 고려해주어야 한다.

그러므로 본 논문에서는 도시철도차량 견인용 IPMSM의 요구 견인력을 만족하는 3가지 형상의 회전자 모델을 도출한 후 각 모델의 전자기적 특성과 구조적 특성을 비교 분석하였다. 또한 전자기적 특성과 구조적 특성이 우수한 최종 모델을 제작하여 시제품 특성시험을 통해 설계 모델의 유효성을 검증하였다.

## 2. 해석 이론

### 2.1 도시철도차량 견인용 IPMSM의 요구 견인력 및 주요사양

그림 1은 도시철도차량 1편성의 전동기 1대당 주행저항 및 요구 견인력 곡선을 보여준다. 전동기의 속도가 0인 지점부터 정격속도인 2400rpm까지의 영역을 정토크 영역, 요구 견인력은 836Nm이다. 또한 정격속도 2400rpm에서 최대속도 6000rpm까지의 영역을 정출력 영역 또는 약자속 영역이라 하며 요구 견인력은 334Nm이다. 표 2는 도시철도차량용 IPMSM의 설계 모델의 주요사양을 나타내며, 일반적으로 도시철도차량용 견인전동기는 철도차량의 하부에 위치하여 외부에 노출되게 된다. 그러므로 철도차량 운행 시에 먼지, 이물질 등 유입을 막을 수 있는 전폐형 구조가 주로 적용되고 있다. 그러나 이러한 전폐형 구조의 전동기는 구조상 외부와 차단되어 열에 대한 문제점이 나타나게 되므로 추가적인 열 교환 장치가 필요하다[1]. 따라서 본 연구에서는 수랭식 냉각방식을 적용하였으며, 이를 통해 전동기의 전류밀도를 높이고 슬롯면적을 줄여서 사이즈를 작게 설계할 수 있었다. 그러나 전동기 사이즈가 줄어들게 되면 방열 면적도 함께 줄어들기 때문에 열적으로 큰 문제가 발생하게 된다. 예를 들면, 영구자석의 열 감자와 권선의 절연 파괴 등의 문제가 발생될 수 있다[5]. 이러한 문제를 해결할 수 있도록 적절한 사이즈 설계가 요구된다. 권선방식은 정현적인 공극자속밀도를 고려하여 분포권으로 선택하였다. 또한 고조파의 영향을 고려해서 매극, 매상당 슬롯수는 3으로 선택하여 최종 6극 54슬롯의 조합을 선택하였다. 또한 구동용 인버터의 입력전압이 1500Vdc이며, SVPWM 변조방식의 적용으로 IPMSM의 전압 제한치는 866Vdc로 설정하였다.

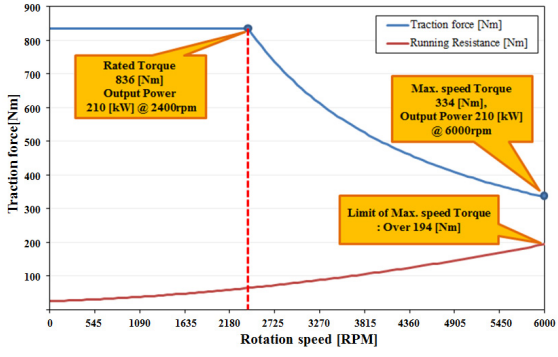



**그림 1** 도시철도차량용 IPMSM의 요구 견인력 곡선

**Fig. 1** Required traction force curve of IPMSM for urban railway vehicles per motor

**표 2** 도시철도차량용 IPMSM의 기본 설계 모델의 주요사양

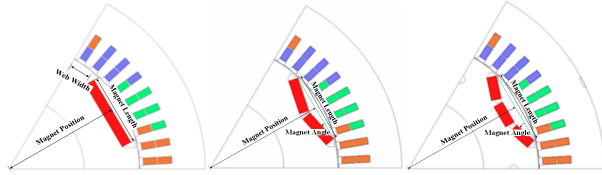
**Table 2** Main specifications of basic design model of IPMSM for urban railway vehicle

| Contents | Value | Contents | Value |
|---|---|---|---|
| Stator size | Dia. 392mm | Power | 210kW |
| Rotor size | Dia. 260mm | Rated speed | 2400rpm |
| Stack | 220mm | Max speed | 6000rpm |
| Airgap | 1mm | Rated current | 155.6Arms |
| Pole/Slots | 6/54 | Current density | 7.5A/mm2 |
| Core material | 35PN230 | Voltage limited | 866Vdc |
| Magnet material | N38UH | Cooling system | Water cooling |

## 3. IPMSM의 회전자 형상에 따른 모델 도출

### 3.1 Magnet segment 수에 따른 회전자 모델 도출

IPMSM은 회전자의 형상에 따라 전자기적 특성과 구조적 특성에 큰 영향이 미치게 되는데 전자기적 특성의 변화는 영구자석의 형상에 따라 자속 경로가 변경되어 평균 공극자속밀도가 변하기 때문에 전자기적 특성이 변하게 됩니다. 또한, 구조적 특성은 회전자가 고속으로 회전하면서 강한 원심력에 의해 밖으로 튀어나가려고 하는 비산 문제가 발생하므로 Bridge를 적용시켜 응력을 분산시킬 필요성이 있다. 그러므로 Bridge를 적용시킨 적절한 형상 설계가 필요하게 되어 본 논문에서는 회전자 내부에 삽입되는 극 당 영구자석의 분할 수가 다른 3가지 모델을 설계하였다. 각각의 모델은 영구자석을 분할하지 않은 1-Segment PM model, 영구자석을 분할하여 Bridge 1개를 적용시킨 2-Segment PM model, 영구자석을 추가로 분할하여 Bridge를 1개 더 적용




(a) 1-Seg. PM (b) 2-Seg. PM (c) 3-Seg. PM

**그림 2** Magnet segmentation에 따른 IPMSM 모델

**Fig. 2** IPMSM models according to permanent magnet segmentation



www.dbpia.co.kr

시킨 3-Segment PM model를 비교 분석하였다. 각 모델에 대한 정확한 비교 분석을 위해 토크리플의 최소화를 기준으로 두고 설계 하였다. 따라서 설계를 위해서 모델별로 형상 변수 3가지를 설정하였으며, 이를 그림 2에서 보여준다.

### 3.2 전자기적 특성 비교

#### 3.2.1 토크 및 효율 특성

전자기적 특성을 비교 분석하기 위해서 1-Segment PM model과 2-Segment PM model, 그리고 3-Segment PM model에 대해 전자장 유한-요소법을 통하여 전자기적 특성 해석을 수행하였다. 3개 모델에 대한 정격속도 2400rpm과 최대속도 6000rpm에서의 토크파형은 그림 3에서 보여주고 있으며, 각 모델의 전자기적 특성을 나타낸 비교표는 표 3에서 보여준다. 각 모델은 반응 표면법을 통해 그림 2에서 설정한 변수로 형상 변경하여 토크리플을 최소화 하였고, 표 3에서 볼 수 있듯이 평균토크는 3개 모델이 그림 1의 요구 견인력에 만족하는 것을 볼 수가 있다. 또한 평균토크가 1-Segment PM model에서 3-Segment PM model로 설계가 진행될수록 평균토크가 작아지는 것을 볼 수가 있다. 이유는 영구자석을 분할하여 분할된 부분에 Bridge를 적용하면서 Bridge 사이로 자속이 누설되어 평균토크에 영향을 미치기 때문이다. 토크리플 율은 정격속도, 최대속도에서 3-Segment PM model이 10.1%, 44.5%로 가장 작으므로 다른 모델에 비해 일정한 토크가 발생되며, 소음, 진동이 작게 발생될 것으로 판단된다.

1-Segment PM model과 비교하여 3-Segment PM model의 정격속도, 최대속도에서 회전자 철손은 각각 약 3.8%, 10.3% 작은 결과를 보여주며, 영구자석 와전류손 또한 약 2.9%, 22.3% 작은 결과를 보여준다. 회전자 철손과 영구자석 와전류손에 의한 손실은 영구자석에 직접적으로 영향을 미치는 열 적 문제이며, 분석한 결과 3-Segment PM model이 영구자석 열 감자 방지에 도움이 되는 구조이다. 한편 고정자에 의한 철손은 3_Segment PM model이 정격속도에서 약 11.1% 높지만 최대속도에서는 약

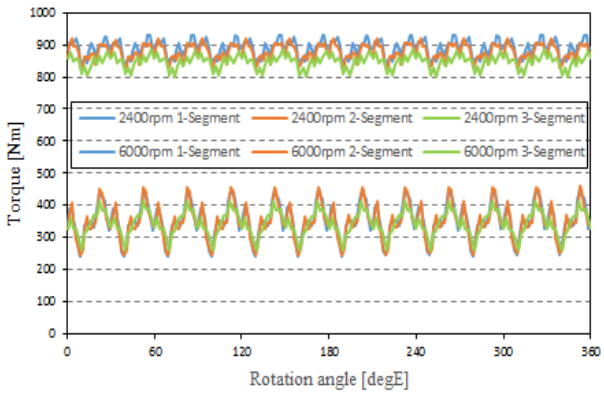



**그림 3** 각 모델의 정격, 최대 토크파형

**Fig. 3** Rated and max torque waveform of each model

**표 3** 각 모델의 전자기적 특성

**Table 3** Electromagnetic characteristics of each model

| | 1-Seg. PM model | | 2-Seg. PM model | | 3-Seg. PM model | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Contents[rpm] | 2400 | 6000 | 2400 | 6000 | 2400 | 6000 |
| Average torque[Nm] | 890 | 354 | 878 | 349 | 848 | 343 |
| Torque ripple rate[%] | 10.8 | 59.9 | 10.7 | 61.3 | 10.1 | 44.5 |
| Rotor core loss[W] | 241 | 742 | 233 | 623 | 227 | 666 |
| Stator core loss[W] | 1223 | 5261 | 1402 | 4964 | 1375 | 4874 |
| P.M eddy current loss[W] | 76 | 112 | 65 | 140 | 73 | 87 |
| Copper loss[W] | 2715 | 2715 | 2715 | 2715 | 2715 | 2715 |
| Total loss[W] | 4255 | 8830 | 4415 | 8442 | 4390 | 8342 |
| Efficiency[%] | 98.13 | 96.18 | 98.04 | 96.29 | 97.98 | 96.28 |

7.4% 작다. 그러나 상대적으로 최대속도에서의 손실 값의 차이가 크므로 최대속도에서의 열 적 문제에서 유리하다.

#### 3.2.2 역기전력 및 인덕턴스

그림 4에서는 정격속도 2400rpm에서 각 모델의 A상 선간 무부하 역기전력 파형을 보여주고 있다. 3개 모델 모두 정현적인 파형이며, 역기전력 peak 값은 1-Segment PM model이 805.53V로 가장 높다. 그림 5는 정격속도 2400rpm에서 각 모델의 A상 무부하 역기전력 고조파를 보여주며, 즉 기본파를 비교하면 3-Segment PM model과1-Segment PM model은 역기전력이 동등 수준이다. 표 4에서는 역기전력 및 인덕턴스를 보여주고 있다. 표 2에서 전압 제한치는 866Vdc이며, 전동기는 역기전력의 기본파가 전압 제한치를 넘지 않도록 설계되어야 한다. 그 이유는 역기전력 기본파가 전압 제한치를 넘어서게 되면 인버터 측으로 전압이 역전되어 제어의 불응, 인버터 소자의 절연 파괴 등 고장의 원인이 될 수가 있다. 그러므로 표 6에서 각 모델에 대한 역기전력 기본파가 전압 제한치 866Vdc를 만족한다. 또한, 표 4에서 각 모델에 대한 d축 인덕턴스, q축 인덕턴스를 볼 수 있으며 q축 인덕턴스와 d축 인덕턴스의 비인 돌극비를 나타내고 있다. 1-Segment PM model이 돌극비가 가장 작으므로 상대적으로 마그네틱 토크를 많이 쓰며, 3-Segment PM model이 1-Segment PM model 보다 q축 자로가 더 확보되어 상대적으로 릴럭턴스 토크를 많이 쓰는 것을 확인할 수가 있다. 결론적으로 전자기적 특성 분석 결과 3개 모델 모두 정격, 최대속도에서 도시철도차량 요구 견인력에 만족하지만, 최대속도에서의 특성은 다음과 같은 요소에서 3-Segment PM model이 우수하다. 토크리플 율이 낮아서 소음, 진동에 유리하고, 총 손실에 작아서 효율 및 열 적 문제에서도 유리하다. 따라서 실제 도시철도차량 적용 시에는 3-Segment PM model이 적합하다고 판단된다.



www.dbpia.co.kr

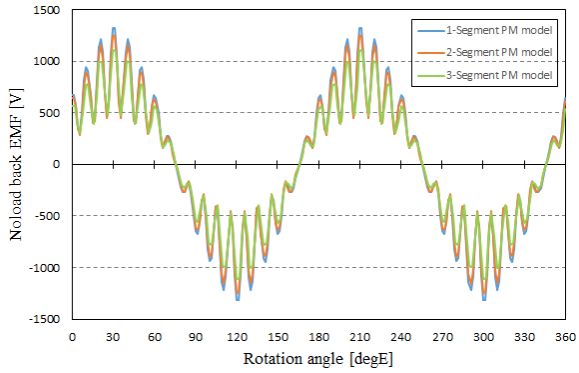



**그림 4** 정격속도 2400rpm에서 각 모델의 선간 무부하 역기전력 파형

**Fig. 4** Noload line to line BEMF waveform of each model (@2400rpm)

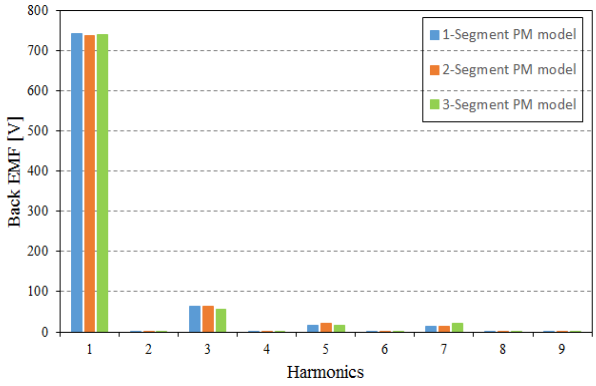



**그림 5** 정격속도 2400rpm에서 각 모델의 상 무부하 역기전력 고조파

**Fig. 5** Noload phase BEMF harmonics of each model (@2400rpm)

**표 4** 각 모델의 역기전력 및 인덕턴스

**Table 4** BEMF and inductance of each model

| | 1-Seg. PM model | 2-Seg. PM model | 3-Seg. PM model |
|---|---|---|---|
| BEMF fundamental wave[V] | 742.1 | 737.7 | 740.4 |
| d-axial inductance[H] | 2.33 | 2.20 | 2.32 |
| q-axial inductance[H] | 6.45 | 6.48 | 6.66 |
| Saliency ratio[%] | 2.77 | 2.78 | 2.88 |

### 3.3 구조적 특성 비교

표 5는 각 모델에 대한 회전자 중량 및 출력밀도를 보여준다. 1-Segment PM model에서 Bridge를 적용할수록 회전자 코어 중량과 영구자석 중량이 가벼워지며, 즉 회전자 전체 중량이 가벼워진다. 그러나 영구자석 중량이 가벼워지면 토크와 출력이 작아지게 되어 출력밀도는 낮아지지만 표 1의 유도전동기 2세대보다 출력밀도가 약 40.6% 높은 결과를 볼 수 있다.

구조적 특성을 분석하는 이유는 IPMSM은 회전자 내부에 매입되어 있는 영구자석이 고속으로 회전하면서 강한 원심력이 작용하게 되고, 이 경우 Rib이나 Bridge 부분의 강도가 확보되지 않으면 결국 회전자가 파손된다. 특히 철도차량은 고 신뢰성을 크게 요구하기 때문에 기계적 강도의 안전성이 필수적으로 고려된다[6]. 해석 조건으로는 회전자만 고려하였으며 속도는 전동기의 최대속도, 안전하다고 판단되는 기준으로는 식 (1)에서 볼 수 있듯이 인장강도를 최대응력으로 나눈 값이 1.5이상이다[7]. 인장은 늘어뜨리거나 잡아당기는 힘이며, 인장강도는 재료가 절단되도록 끌어당겼을 때 견뎌내는 최대 하중(외력)을 재료의 단면적으로 나눈 값이다. 응력은 재료에 인장의 하중(외력)을 가했을 때 그 크기에 대응하여 재료 내에 생기는 저항력이다. 따라서 회전자가 회전하면서 영구자석이 원심력에 의해 밖으로 튀어나가려고 하는 것을 인장이며, 영구자석이 튀어나 갈 때 버티는 힘을 응력이다. 그러므로 물질마다 고유의 인장강도를 가지고 있는데 본 논문에서의 회전자 코어 재질은 35PN230이며, 이 재질에 대한 인장강도는 440MPa이다. 또한, 구조해석에 필요한 각 재질의 물성치는 표 6에서 보여주며, 구조적 특성을 알아보기 위해 기계적 강도해석은 상용 Tool를 활용한 유한요소법을 이용하였다[8]. 3개 모델에 대한 고정인자는 영구자석이 회전자하면서 응력을 가장 많이 받는 Rib과 Bridge이다. 각 모델에 대한 Rib과 Bridge의 두께는 1.5mm, 1mm로 동일하게 설계하였다. 그림 6은 각 모델에 대한 구조 해석 결과를 보여주고 있다. 그림 6(a)는 1-Segment PM model의 해석 결과이며, 최대 응력은 824.9MPa로 영구자석 끝의 Rib 부분에서 발생한다. 이 해석 결

**표 5** 각 모델의 회전자 중량 및 출력밀도

**Table 5** Rotor weight and power density of each model

| Contents | 1-Seg. PM model | 2-Seg. PM model | 3-Seg. PM model |
|---|---|---|---|
| Core weight[kg] | 50.68 | 50.67 | 50.65 |
| Magnet weight [kg] | 7.28 | 7.13 | 6.98 |
| Power density [kW/kg] | 0.956 | 0.944 | 0.915 |

**표 6** 구조해석에 대한 물성치

**Table 6** Material property for structural analysis

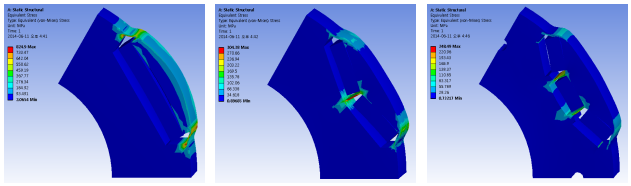
| | 35PN230 | N38UH |
|---|---|---|
| Density [g/cm$^3$] | 7.6 | 7.5 |
| Young's modulus [MPa] | 1.624 | 1.4 |
| Poisson's ratio | 0.33 | 0.24 |
| Tensile yield strength [MPa] | 440 | 100 |
| Tensile ultimate strength[MPa] | 550 | 120 |



www.dbpia.co.kr

과를 식 (1)에 적용하게 되면 안전율이 약 0.53으로 기준치 1.5에 미치지 못하며, 표 7에서 보여준다. 따라서 1-Segment PM model의 회전자 형상은 영구자석 비산으로 인한 전동기 파손의 위험이 매우 크다. 그림 6(b)는 2-Segment PM model의 구조 해석 결과를 보여준다. Rib 부분의 응력이 Bridge에 분산되어 최대응력이 Bridge 부분에서 304.38MPa이 발생하고, 결과 1.45로 기준치 1.5를 만족시키지 못했다. 따라서 2-Segment PM model도 기계적 강도에 문제가 있다고 판단된다. 그림 6(c)는 3-Segment PM model의 구조 해석 결과를 보여준다. 2개의 Rib과 2개의 Bridge에 응력이 분산되어 최대응력이 Bridge에서 248.49MPa로 발생하였으며 안전율이 1.77로 기준치 1.5이상을 만족한다. 따라서 구조적 특성 비교 결과 3-segment PM model이 기계적 강도가 안전하다고 판단할 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 전자기적 특성이 요구 견인력에 만족하고, 기계적 강도에도 강한 3-Segment PM model이 도시철도차량 견인용 IPMSM에 적합하다고 판단된다.

$$\frac{Tensile\ yield\ strength[MPa]}{Peak\ stress[MPa]} = More\ than\ 1.5 \tag{1}$$



(a) 1-Seg. PM (b) 2-Seg. PM (c) 3-Seg. PM

**그림 6** 구조 해석 결과
**Fig. 6** Structural analysis result

**표 7** 구조해석을 통한 안전율 계산 결과
**Table 7** Calculation results of safety factor through the structural analysis

| Contents | 1-Seg. PM model | 2-Seg. PM model | 3-Seg. PM model |
|---|---|---|---|
| Peak stress [MPa] | 824.9 | 304.38 | 248.49 |
| Safety factor [MPa] | 0.53 | 1.45 | 1.77 |

## 4. 3-Segment PM model의 유효성 검증을 위한 시제품 제작

본 논문에서 도시철도차량 견인용 IPMSM 모델로 선택된 3-Segment PM model의 시제품 제작과 제작한 시제품의 특성시험을 하기 위해 다이나모 시스템과의 커플링 상태를 그림 7에서 보여준다. 앞에서 설계된 3-Segment PM model의 유효성 검증을 위해 다이나모 시스템을 이용하여 특성시험을 수행하였다. 특성시험 진행은 저속부터 정격속도 2400rpm까지 Full 부하로 측정하였고, 정격속도부터 3200rpm까지는 Half 부하로 진행하였다. 그림 8은 오실로스코프로 측정한 무부하 선간 역기전력 파형이다. 그림 4에서 3-Segment PM model의 A상 선간 무부하 역기전력 피크값은 1108.2V이고, 특성시험 결과는 1100V이므로 약 0.8%의 오차를 보인다. 그림 9는 IPMSM의 해석과 특성시험 결과를 통해 도출된 속도-토크 곡선 비교를 나타내고 있으며, 그림 1에서 볼 수 있는 견인력 곡선과 유사한 형태를 보이고 있다. 해석결과 및 시험결과의 속도-토크 곡선을 보면 오차는 Min

**그림 7** 210kW급 IPMSM 시제품
**Fig. 7** 210kW-class IPMSM prototype

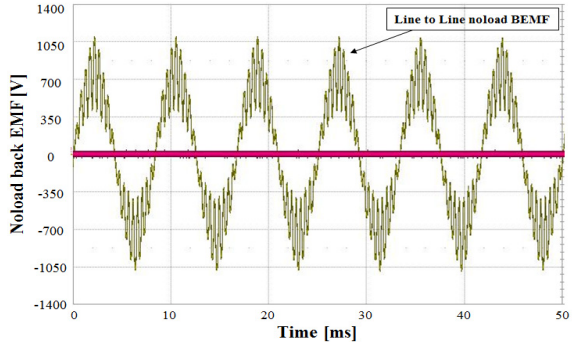



**그림 8** 실험에 의한 무부하 선간 역기전력 파형 (@2400rpm)
**Fig. 8** Noload line to line BEMF waveform, by test (@2400rpm)

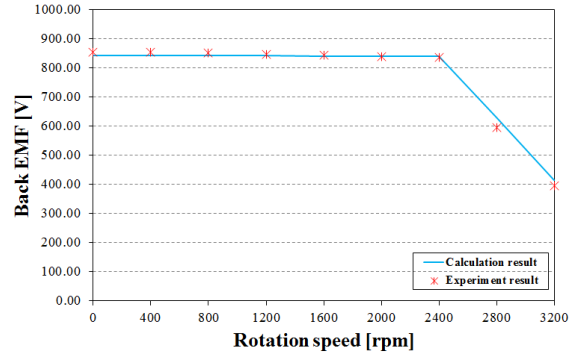



**그림 9** 부하시험과 해석 결과 사이의 토크 특성 비교
**Fig. 9** Torque characteristic comparison between load test result and calculation result



www.dbpia.co.kr

0.22%, Max 5.75%의 오차율을 보였다. 역기전력은 전자장 유한요소법과 특성시험을 비교하면 거의 유사하다고 판단할 수 있고, 정격속도 이상 특성 시험 결과, 토크는 속도가 높아짐에 따라 오차율이 크게 보이지만 정격속도 이상의 특성시험을 통해 설계한 최종모델의 신뢰성이 확보되었다. 결론적으로 본 연구에서 도출된 도시철도차량용 210kW급 IPMSM의 특성시험을 통한 해석결과의 비교를 통하여 설계 유효성이 검증되었다고 판단할 수 있겠다. 또한, 최종 모델로 도출된 3-segment PM model과 현재 도시철도차량에 적용되어 있는 유도전동기를 비교하여 표 8에서 보여주고 있다. 3-segment PM model이 사이즈는 약 34% 저감, 출력밀도는 약 41% 증가, 효율은 약 5% 높이는 결과를 얻었으며, 전력 비용으로 연간 약 25억의 절감이 예측된다.

**표 8** 유도전동기와 3-Segment PM model의 비교
**Table 8** Comparison of induction motor and 3-segment PM model

| | Induction motor | 3-Seg. PM model |
|---|---|---|
| Size [mm] | D515 x H220 | D392 x H220 |
| Power density [kW/kg] | 0.544 | 0.915 |
| Efficiency [%] | 93 | 97.98 |

## 5. 결 론

본 논문에서는 도시철도차량 견인용 IPMSM의 Magnet segment 수에 따른 특성 분석을 수행하였다. 영구자석 분할 수에 따라 도출된 모델은 1-Segment PM model, 2-Segment PM model, 3-Segment PM model이다. 따라서 영구자석 분할 수가 다른 3개의 모델을 전자기적 특성과 구조적 특성에 대해 비교 분석하였다. 전자기적 특성은 도시철도차량 견인용 IPMSM의 요구 견인력에 만족하지에 대한 부분과 손실을 비교 분석하였고, 구조적 특성은 회전자가 회전하면서 원심력이 작용하여 영구자석의 비산에 대한 안전율과 중량, 출력밀도를 비교 분석하였다. 최종적으로 전자기적 특성과 구조적 특성을 모두 고려하여 도출된 3-Segment PM model을 제작한 후 시제품의 특성시험을 통해 전자장 유한-요소법을 이용한 해석 결과와 특성시험을 통한 결과를 비교 분석하였다. 그 결과 3-Segment PM model을 갖는 도시철도차량 견인용 210kW급 IPMSM의 설계유효성이 검증되었다. 향후 철도차량은 고 신뢰성이 가장 중요하므로 안전율 기준을 2 이상으로 높여서 신뢰성을 향상시키는 연구를 진행할 것이다.


## 감사의 글

본 연구는 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2013R1A2A1A01015171)


## References


[1] C.B. Park, J.H. Kim, J.H. Lee, "Thermal Characteristic Analysis of IPMSM for Traction Considering a Driving Pattern of Urban Railway Vehicles", The transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers 63(3), pp. 431-436, 2014.

[2] C.B. Park, H.W. Lee, B.S. Lee "study on the Reduction of the Stator iron loss on Perm anent Magnet Synchronous Motor for Light Railway Transit Propulsion System", Journal of the Korean Society for Railway 15(4), pp. 376-380, 2012.

[3] Geochul Jeong, Chanbae Park, Byungsong Lee, Sugil Lee, Junho Lee, Jaegee Kim, Shinmyung Jung, Hyungwoo Lee, "A design study on the torque ripple reduction of 210kW-class Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for railway vehicles", The Korean Institute of Electrical Engineers Electricity Facilities Sector Fall Conference, pp. 283-285, 2013.

[4] A. Binder, T. Schneider, and M. Klohr, "Fixation of Buried and Surface-Mounted Magnets in High-Speed Permanent-Magnet Synchronous Machines", IEEE Trans. On Industry Applications, vol. 42, no. 4, pp. 1031-1037, 2006.

[5] J.H. Seo, "Thermal analysis and optimal design of Interior Permanent magnet motor for Vehicle Application", PhD Thesis, Seoul University, 2010.

[6] Kyong-Ho Kang, Suk-Jin Yu, Hyo-Chul Ahn, Ji-Hyun Kim, Sang-Yong Jung, "A method to analyze the strength of bridge in IPM type permanent magnet motor considering the effect of mechanical fatigue characteristic", The Korean Institute of Electrical Engineers Summer Conference pp. 999-1000, 2011.

[7] Seung Tae Oh, Jin Woo Choi, Byeng Hi Kang, "The structural analysis of a magnetic inserting bridge thickness in the rotor core of SIPM considering No-bonding conditions", The Korean Society of Mechanical Engineers CAE and Applied Mechanics Spring Conference pp. 77-78, 2012.

[8] Jung Kun-hwa, Kwak Ju-ho, Kim Byung-joo and Lee jong-moon, "Structural Safty Evaluation Of Compressor Driving Motor Shaft System", The Korean Institute of Electrical Engineers Summer Conference pp. 2211-2216, 2007.




www.dbpia.co.kr

# 저 자 소 개

**정 거 철 (Geochul Jeong)**

2012년 한밭대 전기공학과 졸업(학사). 2015년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2015년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 2012년 10월~2013년 9월 한국철도기술연구원 위촉연구원.

**박 찬 배 (Chan-Bae Park)**

2003년 서울대 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2013년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2003년~2006년 삼성전자 DA연구소 선임연구원. 2007년~2015년 8월 한국철도기술연구원 선임연구원. 2015년 9월~현재 한국교통대학교 철도운전시스템공학과 조교수.

**정 태 철 (Taechul Jeong)**

1985년 3월 15일생. 2010년 한밭대학교 전기공학과 졸업(학사). 2012년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2012년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

**이 주 (Ju Lee)**

1963년 8월 30일생. 1986 한양대 전기공학과 졸업(학사). 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 System정보과학연구과 졸업(박사). 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대학교 전기생체공학부 교수. 2013년~현재 동 대학교 공학대학원 부원장.



www.dbpia.co.kr