

# IPMSM의 약 자속 영역에서 고 토크를 위한 형상 설계 방법

## Shape design method for high torque in the flux-weakening range of the IPMSM

이 기 덕\* · 이 주†  
(Ki-Doek Lee · Ju Lee)

**Abstract** - 영구자석 동기전동기가 전압과 전류 제한을 갖는 상태에서 고속으로 운전하기 위해서는 약 자속 제어를 수행해야 한다. 영구자석 동기전동기는 설계 방법에 따라서 정 토크 및 약 자속 영역에서의 출력 특성이 상이하게 된다. 본 논문에서는 약 자속 영역에서의 고 토크를 위한 IPMSM의 회전자 형상 설계를 수행하였다. 우선 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크의 관계에 따라서 약 자속 영역의 토크 향상을 위한 방법을 제안한다. 제안한 방법을 IPMSM의 회전자의 형상 설계를 통해 적용하였고, 유한요소 해석을 통해 기존 모델과 개선 모델의 특성을 비교 분석하여 제안한 방법의 타당성을 검증하였다.

**Key Words** : PMSM, Blower, Barrier, Shape design, Flux weakening

### 1. 서 론

최근 건물과 철도분야의 공조 시스템은 에너지 절감을 위해서 많은 연구가 진행되고 있으며, 고효율화를 위해 기존 유도전동기인 블로워 모터를 속도 가변이 가능한 영구자석 전동기로 대체되고 있는 추세이다[1-2]. 영구자석 동기전동기의 장점을 간단히 살펴보면 유도전동기와 같이 브러시리스(brushless) 구조이며, 에너지밀도가 높은 영구자석을 사용하기 때문에 소형 제작이 가능하다. 영구자석에 의한 높은 공극자속밀도로 저속 고 토크의 출력특성을 가지며, 유도전동기와 달리 회전자에서 큰 손실이 발생하지 않아 유도 전동기보다 정격에서 약 2%정도 효율이 높다[3-4].

영구자석 동기전동기의 성능 향상을 위한 형상 설계에 관한 많은 연구가 수행되어 왔다. 특히 고 효율을 위한 손실 저감[3], 정 토크 영역의 토크 밀도 향상[4], 토크 리플 및 코깅 토크 저감[5] 등이 수행되었다. 하지만 증가 토크의 경우 약 자속 영역에서 고 토크가 필요하나 이에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 논문에서는 약 자속 영역에서의 고 토크를 위해서 영구자석 동기전동기의 회전자 형상 설계를 전자장 유한요소 해석 기반으로 수행하였다. 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크의 조합에 따른 약 자속 영역에서의 특성을 분석하고 비대칭 배리어 형상 설계를 통해 약 자속 영역에서의 고 토크를 위한 설계를 수행하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 공조 시스템의 부하와 전동기 설계 포인트

공조 시스템용 전동기는 가장 대표적인 증가 토크 부하로서 속도의 증가에 따라 요구되는 토크가 거의 속도의 자승에 비례한다. 그림 1은 100kW급 증가 토크 부하의 한 예를 보여주고 있다. 그림 1과 같은 부하에 정격속도 20000rpm이라 가정하면 정격토크로 약 50Nm가 요구된다. 20000rpm에서 50Nm를 만족시키는 전동기를 설계하기 위해서는 그림 1의 선들과 같은 운전 특성의 전동기가 요구된다.

전동기를 설계하는데 있어 제약 조건에 따라 검은색 실선 및 회색 점선의 운전 영역을 만족하는 전동기를 설계하게 된다. 일

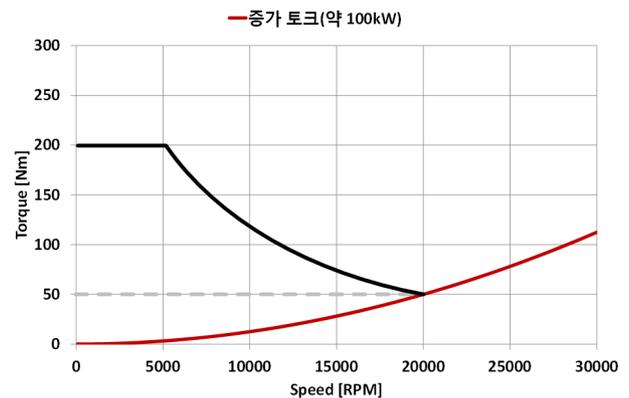


그림 1 증가 토크 부하의 한 예와 전동기 설계 포인트

Fig. 1 One example of the increasing torque load and motor design point

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea.

E-mail:julee@hanyang.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea.

Received : February 12, 2015; Accepted : March 29, 2015

반적으로 입력 전압과 전류가 여유로운 반면 사이즈 제한이 존재하는 경우 회색 점선과 같은 특성을 갖도록 설계하고, 사이즈가 여유로운 반면 전압과 전류 제한이 존재하는 경우 검은색 실선과 같은 특성을 갖도록 설계하게 된다. 본 논문은 건물 및 철도의 공조 시스템을 목적으로 하였기에 사이즈에 대한 제약보다는 전압과 전류 제한이 중요하여 검은색 실선의 특성을 갖는 전동기를 목표로 하였다.

### 2.2 IPMSM의 기초 모델

매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM : interior permanent magnet synchronous motor)의 경우 자기등가회로와 출력식을 이용해 기초 사이즈를 설계할 수 있다[6]. 기초 사이즈 설계를 위해 사용한 자기등가회로와 출력식이 그림 3과 식 (1)에 나타나 있다. 이를 통해 주어진 전압과 전류 제한에서 설계된 초기 모델이 그림 2에 나타나 있고, 표 1은 제원을 나타내고 있다. 유한요소 해석을 통해 구해진 출력 특성이 표 2에 나타나 있다. 정격 속도까지는 전류 당 최대토크 제어(MTPA : maximum torque per current)를 통해 전류 위상각 10도로 운전하였고, 이 이후의 속도에서는 유기전압이 전압 제한치를 넘지 않도록 약 자속제어를 수행하였다. 결과적으로 목표 속도인 20,000rpm에서 약 자속제어를 위한 전류 위상각 80.8도에서 운전을 수행한 결과 34.71Nm이라는 토크 특성을 확인할 수 있었지만 앞에서 언급한 요구 토크 50Nm에 미치지 못함을 보여준다.

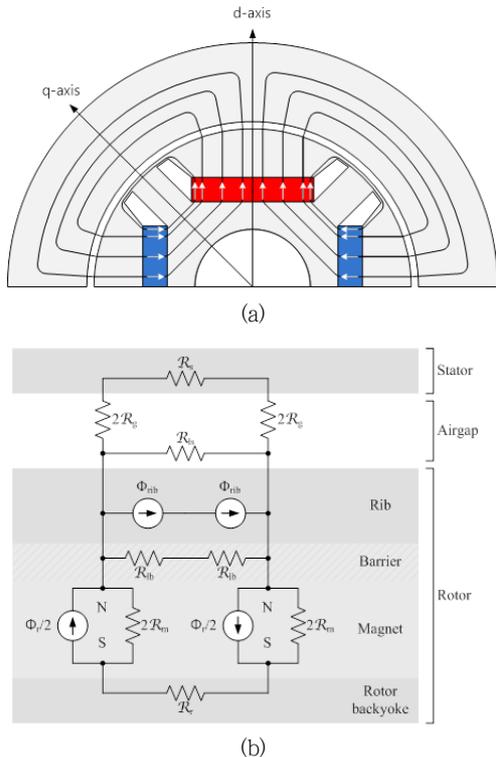


그림 2 IPMSM의 자기등가회로  
Fig. 2 Magnetic equivalent circuit of IPMSM

$$\frac{P}{\omega} = T = \left( \frac{\pi}{4} k_w \hat{B}_{g1} a c \cos \beta \right) D_g^2 L_{stk} + \left( \frac{\pi}{16} \frac{1}{p} k_w^2 a c^2 G_{a1} \sin 2\beta \right) D_g^3 L_{stk} \quad (1)$$

여기서  $P$ 는 출력,  $\omega$ 는 각속도,  $T$ 는 토크이다.  $k_w$ 는 권선계수,  $\hat{B}_{g1}$ 은 공극자속밀도 기본파의 피크값,  $ac$ 는 비전기장하,  $\beta$ 는 전류위상각,  $G_{a1}$ 는 회전자 비퍼미언스의 기본파이다.  $D_g$ 는 공극 직경,  $L_{stk}$ 은 적층길이이다.

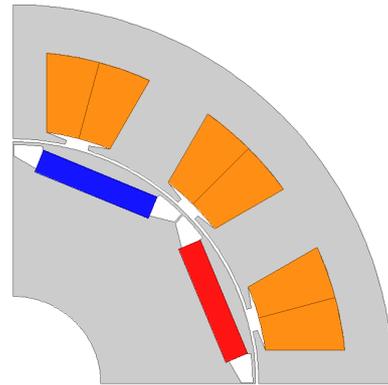


그림 3 해석을 위한 기초 모델  
Fig. 3 Initial model for analysis

표 1 IPMSM의 설계사양

Table 1 Specifications of the IPMSM model

Item	Specification	Unit
Torque @ 4,345 rpm	240	Nm
Torque @ 20,000 rpm	38	Nm
Vphase	270	V <sub>peak</sub>
Rated phase current	330	A <sub>peak</sub>
Turn per phase	24	-
Stator diameter	260	mm
Rotor diameter	166	mm
Stack length	170	mm
Air gap length	1	mm
Pole-arc to pole-pitch ratio	70	%
Magnet width	42	mm
Magnet thickness	8	mm
Permanent magnet type	38UH	-
Core type	S08	-

\*38UH : 38MGOe의 에너지 적을 갖는 UH등급의 NdFeB 영구자석  
\*S08 : 전기강판의 종류로 포스코 강판 기준 35PN230과 동일

표 2 IPMSM의 출력 특성

Table 2 Output Characteristics of the IPMSM model

Item	Value	Unit
4,345rpm	Current Phase Angle	10 degE
	Torque	240 Nm
20,000rpm	Current Phase Angle	80.8 degE
	Torque	38 Nm

### 2.3 약 자속 영역의 고 토크를 위한 형상 설계 방법

일반적으로 영구자석 동기전동기의 토크를 향상시키기 위해서는 사이즈를 상승시키거나 영구자석 및 기자력의 에너지 밀도를 상승시킨다. 하지만 본 논문에서는 MTPA 영역이 아닌 약 자속 영역에서의 토크 향상이 목적이므로 회전자와 형상 설계를 Maxwell V.16을 이용해 수행하였다. 회전자와 형상 설계를 통해 전류 위상각이 높은 영역에서 큰 토크를 발생하도록 하여 최대속도 20,000rpm에서 요구 토크인 50Nm 이상의 토크 발생을 목적으로 하였다.

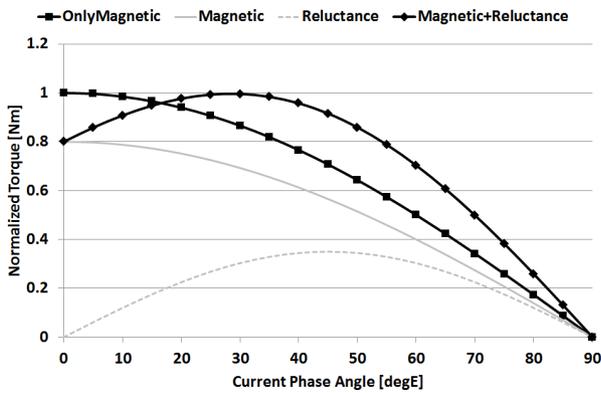
그림 3는 약 자속 영역의 고 토크를 위한 토크 특성을 IPMSM의 토크 방정식인 식 (1)을 통해 각각 분석한 결과이다.

$$T = T_m + T_l = P_n \psi_a I_a \cos\beta + \frac{P_n}{2} (L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\beta \quad (2)$$

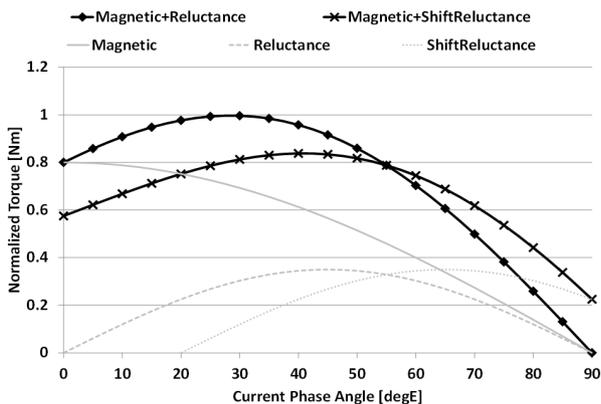
여기서  $T_m$ 은 마그네틱 토크,  $T_l$ 은 릴럭턴스 토크이다.  $P_n$ 은 극쌍수,  $\psi_a$ 는 영구자석에 의한 전기자 쇄교자속,  $I_a$ 는 입력전류,

$\beta$ 는 전류위상각이다.  $L_d$ 는 d축 인덕턴스,  $L_q$ 는 q축 인덕턴스이다.

그림 3(a)는 동일한 최대 토크를 발생하는 경우 순수 마그네틱 토크만 발생할 경우와 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크가 같이 발생할 때의 전류 위상각별 토크 특성을 보여주고 있다. 두 경우를 나타내는 ■ 표식 선과 ◆ 표식 선의 경우 동일한 표준화된 1Nm의 최대토크를 발생하지만 약 20도의 전류 위상각 보다 높은 영역에서는 ◆ 표식 선이 ■ 표식 선보다 높은 토크임을 확인할 수 있다. 이를 통해 순수 마그네틱 토크를 발생하는 경우보다 릴럭턴스 토크가 일정 수준 발생하는 영구자석 동기전동기가 높은 전류 위상각에서 더 큰 토크를 발생함을 확인하였다. 그림 3(b)는 (a)에 비해 회전방향으로 배리어(barrier)가 12도 회전한 모델로 각도별로 분석한 결과 릴럭턴스 토크 축이 가장 많이 쉬프트(shift) 된 모델이다. 동일한 마그네틱 토크와 동일한 릴럭턴스 토크가 발생하더라도 릴럭턴스 토크 축이 쉬프트 됨에 따라서 약 60도 이상의 전류 위상각에서 ◆ 표식 선보다 X 표식 선의 토크가 크게 발생함을 확인할 수 있다. 발생된 최대토크는 ◆ 표식 선의 경우가 더 크지만 본 논문에서의 목표인 약 자속 영역에서의 고 토크 발생을 위해서는 X 표식 선의 특성을 갖는 전동기가 유리하다. 결과적으로 약 자속 영역에서의 큰 토크 발생을 위한 설계 방법으로 기존 모델에서 릴럭턴스 토크 증가와 릴럭턴스 토크 축을 쉬프트하면 된다. 릴럭턴스 토크 증가를 위해 그림 4(a)와 같이 형상 설계를 수행하였고, 릴럭턴스 토크 축의 쉬프트를 위해 그림 4(b)와 같이 형상 설계를 수행하였다. 그림 4(a)의 경우 q축 자로의 확보를 통해 릴럭턴스 토크를 증가시키는 방법이고, 그림 4(b)의 경우 비대칭 배리어 형상을 통해 릴럭턴스 토크 축을 쉬프트 하는 방법이다.

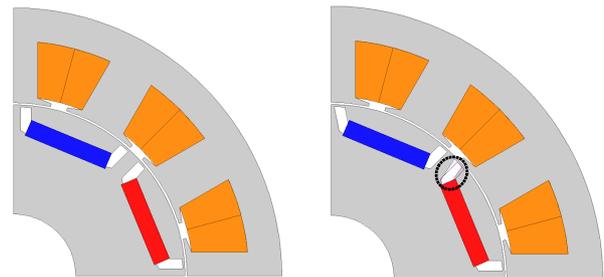


(a) 릴럭턴스 토크



(b) 축이 쉬프트 된 릴럭턴스 토크

그림 4 약 자속 영역의 고 토크를 위한 토크 특성 분석  
Fig. 4 Torque characteristic analysis for high torque in flux-weakening range



(a) 릴럭턴스 토크 증가 구조

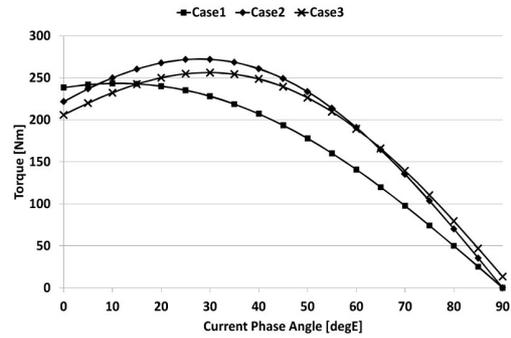
(b) 배리어 비대칭 구조

그림 5 형상 설계 방법  
Fig. 5 Shape Design Method

### 2.3 초기 모델과 개선 모델의 성능 비교

초기 모델과 회전자 형상 설계를 통한 개선 모델의 전류 위상각별 토크 특성이 그림 5에 나타나 있다. 여기서 Case 1은 초기 모델, Case 2는 릴럭턴스 토크 증가 구조 모델, Case 3는 배리어 비대칭 구조 모델을 나타낸다. 각 모델의 토크특성을 마그네틱 토크, 릴럭턴스 토크, 총 토크로 구분하여 분석함으로써 제안한 방법의 타당성을 검증하였다. Case 1의 경우 총 토크 중 대부분이 마그네틱 토크임을 확인할 수 있고, Case 2의 경우 마그네틱

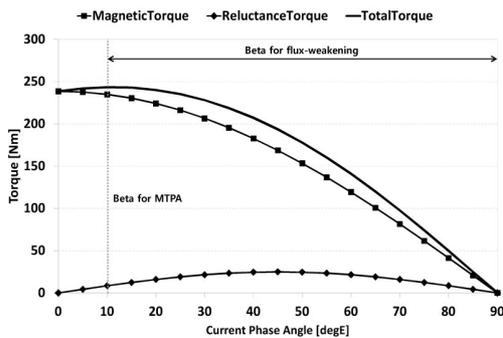
토크는 감소하였지만 릴럭턴스 토크가 크게 증가함을 확인하였다. Case 3의 경우 Case 2의 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크의 크기는 거의 비슷하나 릴럭턴스 토크의 축이 약 4.5degE 만큼 쉬프트 됨을 확인하였다. 그림 5(d)는 각 경우의 총 토크를 비교한 결과로 Case 3의 경우가 전류 위상각 70degE 이상에서 큰 토크를 발생함을 확인하였다. 각 모델의 속도별 토크 특성이 그림 6에 나타나 있다. Case 2의 경우 Case 1에 비해 릴럭턴스 토크 증가에 따른 MTPA 영역의 토크 증가뿐만 아니라 약 자속 영역의 토크 역시 증가하였다. Case 3의 경우는 Case 2에 비해 MTPA 영역에서의 토크는 감소하였지만 약 자속 영역에서의 토크가 증가함을 확인하였다. 각 경우의 정격속도와 최대속도에서의 특성이 표 3에 나타나 있다. 결과적으로 Case 2는 Case 1에 비해 20,000rpm에서 37%의 토크가 상승하였고, Case 3는 Case



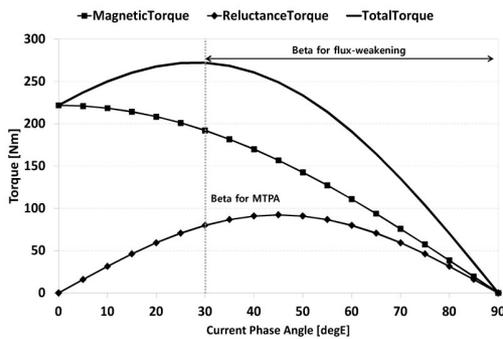
(d) Characteristic Comparison

그림 6 각 모델의 토크 특성 분석

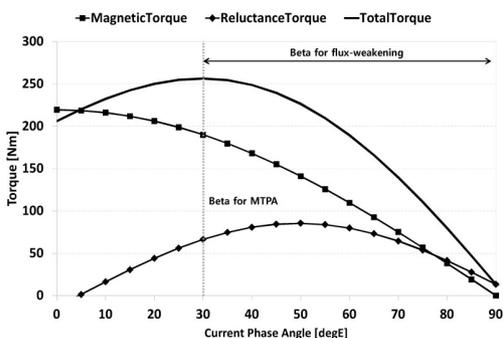
Fig. 6 Torque characteristic analysis of each model



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

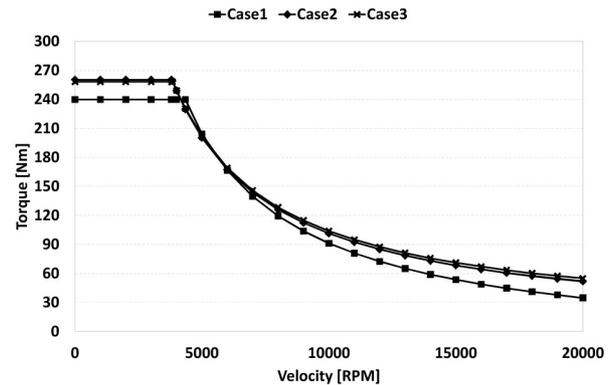


그림 7 각 모델의 속도별 토크 특성

Fig. 7 Torque characteristic of each model according to the speed

표 3 초기 모델과 개선 모델의 특성 비교

Table 3 Characteristics comparison between the initial model and improved model

Item	Case 1	Case 2	Case 3	Unit
Baserm	4,345	3800	3835	rpm
Current Phase Angle at BaseRPM	10	30	30	degE
Torque at torque	240	262	257	Nm
Current Phase Angle at 20,000rpm	80.8	81.5	83	degE
Torque at 20,000rpm	38	51.9	54.7	Nm

2에 비해 약 5%가 상승하였다. 최종적으로 Case3는 Case 1에 비해 약 44%의 토크가 증가하여 약 자속 영역에서의 고 토크를 위한 형상 설계 방법의 타당성을 검증하였다.

### 3. 결 론

본 논문은 건물 및 철도의 공조용 전동기를 위한 영구자석 동기전동기의 약 자속 영역에서의 토크 증가에 목적을 두었다. 영구자석 전동기의 토크를 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크로 분리하여 분석함으로써 두 토크 성분의 조합을 통해 약 자속 영역에서의 토크 증가를 위한 방법을 제안하였다. 첫 번째 방법은 릴럭턴스 토크를 증가시키는 것이고 두 번째 방법은 릴럭턴스 토크의 축을 쉬프트 하는 것이다. 두 방법을 위한 형상 설계로 영구자석과 배리어의 위치와 형상 그리고 비대칭 배리어를 통해 기존 모델대비 개선모델의 토크가 44%로 증가함을 유한요소해석을 통해 확인하였다. 본 논문에서의 결과는 단일 방향으로 회전하는 팬부하의 구동 전동기로 매입형 영구자석 동기전동기인 경우에 고속에서의 토크 특성 향상에 유용하리라 사료된다.

#### 감사의 글

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

#### References

- [1] Do-Kwan Hong; Byung-Chul Woo; Ji-Young Lee; Dae-Hyun Koo, "Ultra High Speed Motor Supported by Air Foil Bearings for Air Blower Cooling Fuel Cells," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol.48, no.2, pp.871, 874, Feb. 2012.
- [2] Lim, Seung-Bin, Kim, Young-Kyoun, Seo, Jung-Moo, Rhy, Se Hyun and Jung, In-Soung, "Design of High efficiency 2phase Brushless DC Motor for Ventilation Fan," the proceeding of 2009 fall KIEE conference on Electrical Machinery and Energy Conversion Systems, pp.17-19, Oct. 2009.
- [3] D. Dorrell and M. Popescu, "Comparison of permanent magnet drive motor with a cage induction motor design for a hybrid electric vehicle," *Int. Power Electron. Conf.*, pp. 1807 - 1813, 2010.
- [4] J. Puranen, "Induction motor versus permanent magnet synchronous motor in motion control applications: a comparative study," *Lappeenranta University of Technology*, 2006.
- [3] Hyung-Woo Lee, Chan-Bae Park and Byung-Song Lee, "Core-loss Reduction on Permanent Magnet for IPMSM with Concentrated Winding," *JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR RAILWAY*, vol.15, no.2, pp.135-140, April 2012.
- [4] J. Choi, Y. Chun, and P. Han, "Design of high power permanent magnet motor with segment rectangular copper wire and closed slot opening on electric vehicles," *Magn. IEEE Trans.*, vol. 46, no. 6, pp. 2070-2073, 2010.
- [5] Seung-Bin Lim, Hyun-Jong Park, Dong-Woo Kang, Sang-Hwan Ham and Ju Lee, "Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor Design for Torque Ripple Reduction in EPS," *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, vol. 24, no. 8 pp. 27~31, 2010.
- [6] Dong-Kuk Lim, Dong-Kyun Woo, Han-Kyeol Yeo, Jong-Suk Ro and Hyun-Kyo Jung, "Predicting the Air-Gap Flux Density using Magnetic Equivalent Circuit in Interior Permanent Magnet Motor,"

## 저 자 소 개



#### 이 기 덕(Ki-Doek Lee)

He received B.S degree in electrical engineering from Incheon University. He received M.S degree and Ph.D. degree in electrical engineering from Hanyang University. He is currently a post doctor of the BK21 Plus Eco-friendly electrical energy conversion and management technical business team at Hanyang University since 2015. His research interests are design, analysis and control of motor/generators; power conversion systems.



#### 이 주(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.