

# 2010 KSAE 부문종합 학술대회

하이브리드 및 연료전지 자동차 부문



기간 \_ 2010. 5. 6(목) ~ 5. 8(토)

장소 \_ BEXCO (부산)

후원 | BEXCO



사단법인 한국자동차공학회  
The Korean Society of Automotive Engineers

KSAE10-B0321	고효율 자동차 전자장비 냉각 시스템 성능 향상을 위한 해석적 연구 * 이호성(자동차부품연구원), 원종필(자동차부품연구원), 조중원(자동차부품연구원), 임택규(자동차부품연구원), 이대웅(한라공조), 권대복(한라공조)	181
KSAE10-B0322	직접 메탄올 연료 전지의 역확산양에 따른 전해질 저항의 변화에 관한 연구 * 장익환(서울대학교), 차석원(서울대학교)	188
KSAE10-B0323	자동차용 공기청정기의 구조변화에 따른 내부유동의 변화에 대한 전산해석을 통한 연구 * 임택규(자동차부품연구원), 조중원(자동차부품연구원), 원종필(자동차부품연구원)	191
KSAE10-B0324	자기력을 고려한 토크 리플 저감 레벨셋 기반 매입형 영구자석 모터의 구조최적설계 * 박승균(한양대학교), 민승재(한양대학교), 홍정표(한양대학교)	196
KSAE10-B0325	Phase Field 모델을 이용한 매입형 영구자석 모터의 레벨셋기반 구조최적설계 * 임성훈(한양대학교), 민승재(한양대학교), 홍정표(한양대학교)	199
KSAE10-B0326	전기자동차용 인휠 모터의 열유동 해석에 관한 연구 * 김성철(자동차부품연구원), 정정훈(자동차부품연구원), 김현철(자동차부품연구원), 홍정표(한양대학교)	202
KSAE10-B0327	전기자동차용 난방시스템의 성능 및 효율 향상에 관한 연구 * 김성철(자동차부품연구원), 김기영(현대모비스), 김민수(서울대학교)	205
KSAE10-B0328	차량 구동용 In-Wheel Type 전동기의 고속 운전 영역 전류 저감 설계 및 해석 * 이정종(한양대학교), 채승희(한양대학교), 김지민(한양대학교), 이병화(한양대학교), 홍정표(한양대학교)	211
KSAE10-B0329	In-Wheel Motor 차량의 주행안정성 향상에 관한 연구 * 박성만(고려대학교), 이희재(삼성중공업), 나상건(고려대학교), 허 훈(고려대학교)	216
KSAE10-B0330	개질가스 조성 변화가 고체산화물 연료전지의 장기성능에 미치는 영향 * 배규중(한국과학기술원), 배중면(한국과학기술원)	220
KSAE10-B0331	고분자전해질형 연료전지스택의 적응에 관한 연구 * 이현진(금오공과대학교), 정영관(금오공과대학교), 김병수(금오공과대학교), 김경훈(금오공과대학교), 김세웅(금오공과대학교)	226
KSAE10-B0332	구동용 전동기의 출력특성에 대한 안전기준 부합성시험에 대한 연구 * 최동석(자동차성능연구소), 이광범(자동차성능연구소), 박용성(자동차성능연구소), 권해봉(자동차성능연구소), 용기중(자동차성능연구소)	230

## 차량 구동용 In-Wheel Type 전동기의 고속 운전 영역 전류 저감 설계 및 해석

채 승 회 · 김 지 민 · 이 병 화 · 이 정 종 · 홍 정 표

한양대학교 자동차공학과

## Current Reduction Design and Analysis of In-Wheel Type Vehicle Traction Motor for High-Speed Operation Region

Seung-Hee Chai · Ji-Min Kim · Byeong-Hwa Lee · Jeong-Jong Lee · Jung-Pyo Hong

Department of Automotive Engineering, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul, 133-791, Korea

**Abstract** : This paper presents a improved method for designing and Analyzing a high power In-Wheel type motor that is applicable to electric vehicles traction. A In-Wheel type motor was made before this paper written. But, it has a problem that input current for field weakening in high-speed range is too much. So, this paper proposed the current reduction design and analysis of In-Wheel type vehicle traction motor for high-speed operation region. To apply for the electric vehicles, a form, a tire, and a wheel of vehicles are considered when calculating a motor performance. After calculating a motor performance, the novel model is compared with the conventional model. characteristics analysis and FEA(Finite Element Analysis) are used for Improved designing In-Wheel motor.

**Key words** : In-Wheel motor(인휠 전동기), Flux Weakening(약제자), Flux barrier(자속장벽), Permanent magnet(영구자석)

### 1. 서 론

In-Wheel 구동 시스템은 하이브리드 자동차, 연료전기 자동차 및 전기자동차와 같이 전기 동력으로 주행하는 차량에서 새로운 구동방식으로 고려되고 있다. 기존에는 대형의 단일 전동기를 사용하여 각 차륜에 파워트레인 요소로 동력을 전달하는 방식을 사용하였으나 이 시스템에서는 각 차륜마다 독립적인 구동전동기를 내장하여 분산 구동한다. 이 시스템은 고성능의 전동기를 휠에 직접 장착하

여 파워트레인 요소를 모두 제거함으로써 차량 시스템의 효율을 높이고, 추후 친환경 자동차에 적용하여 신개념 플랫폼을 제공할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 휠에 전동기를 장착함으로써 충분한 구동력을 확보할 수 있고 제동 시에는 회생제동으로 인한 에너지 회수를 극대화시킴으로써 연비를 개선할 수 있다.<sup>1)</sup>

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 기존에 이러한 장점을 가진 고회전 In-Wheel 전동기를 설계, 제작하였다.<sup>2)</sup> 전동기의 사양은 Table. 1에서 보여주고 있다. 그러나 설계된 전동기의 특성해석 결과, Fig. 2와 같이 고속 영역(5000rpm)에서 입력전류가 많이 들어가는 현상을 확인할 수 있었다. 이는 고속영역 운전 시에 전동기의 손실을 증가시키고, 효율을 떨어뜨린다.

\* 채승회, E-mail: stickdancer@nate.com  
홍정표, E-mail: hongjp@hanyang.ac.kr

따라서 본 논문에서는 전동기의 고속영역에서 약제자 전류를 저감하는 설계 방법을 제시하고자 한다. 앞선 전동기 설계에서는 공차중량, 공기저항, 지면 저항 등을 고려하여 전동기 출력 25(kW)이상, 토크 200(Nm)이상, 최대 회전수 5000(rpm)을 만족시키는 설계 과정을 수행하였다. 여기서 전동기 최대 회전수를 만족시키기 위해서 Constant Power Speed Range(CPSR)를 4, 기어비를 4로 결정하였다. 본 논문은 전동기의 설계 프로세스를 따라 설계를 진행하고, <sup>3)</sup> d축 인덕턴스는 유지하거나 증가시키면서 영구자석에 의한 쇄교자속을 줄임으로써 약제자 전류를 저감하는 방안을 강구하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 설계 목적 및 방안

본 개선설계의 목적은 기존에 설계된 25kW급 In-Wheel 전동기의 연속, 최대정격, 고속 영역에서의 입력전류를 줄이기 위함이다. Fig. 3에서 연속 정격, 최대 정격 시 고속 영역에서 입력 전류를 저감하

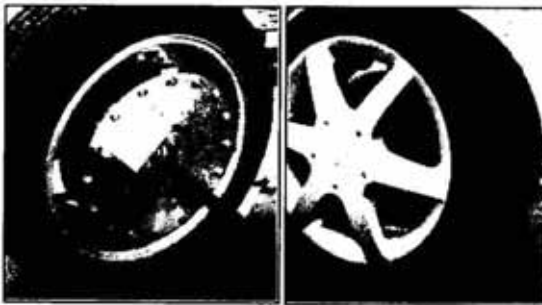


Fig. 1 In-Wheel motor system

Table 1 모터 사양

List	Value
Pole / Slot	12 / 18
DC link voltage [V]	320
최대입력전류[A <sub>rms</sub> ]	200
Max Power / Continuous Power [kW]	25 / 10
Max Torque / Continuous Torque [Nm]	200 / 76.5
Base speed / Max. speed [rpm]	1250 / 5000
Stator out dia. / Rotor out dia. [mm]	300 / 221
Stack length [mm]	50
점적율[%]	55
냉각방식	공기 냉각

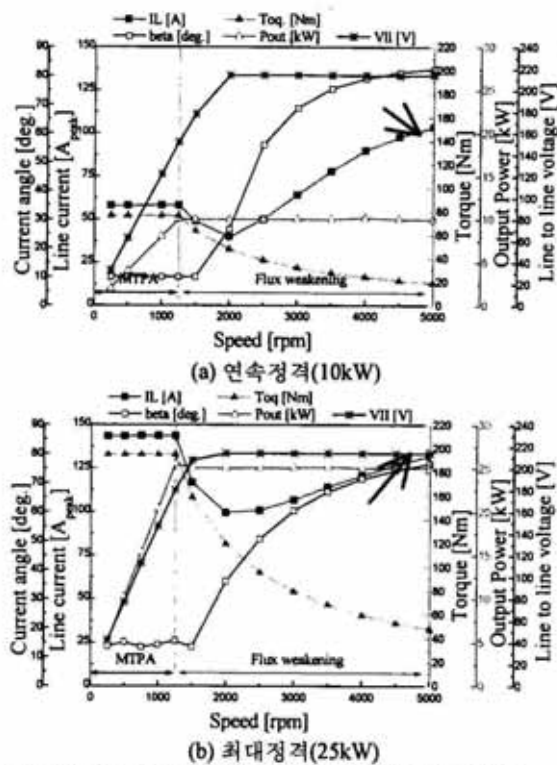


Fig. 2 기존 전동기의 연속, 최대정격 특성해석 그래프

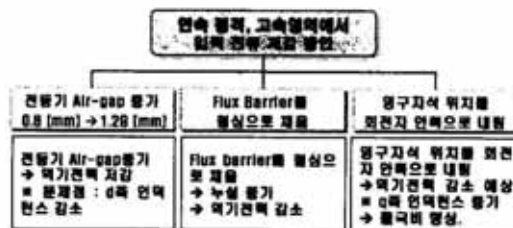


Fig. 3 연속정격, 고속영역에서의 입력전류 저감방안

는 방안을 제안하였다. 제안된 방법은 전체적으로 d축 인덕턴스는 유지하거나 증가시키고 영구자석에 의한 쇄교자속을 줄임으로써 약제자 전류를 저감하는 방향으로 진행하였다. 전동기의 Air-gap의 크기를 증가시켜서 역기전력을 감소시켜 입력전류를 저감하는 방법도 고려하였지만 이는 d축 인덕턴스도 함께 감소시킬 것으로 판단되는 문제점을 가지고 있다. 또한 전동기의 Flux Barrier를 철심으로 채움으로써 자속의 누설을 증가시켜 역기전력을 감소시킬 수 있다. 마찬가지로 영구자석의 위치를 회전자 중심으로 내리면 역기전력을 감소시킬 수 있다. 이러한 방법을 통하여 고속 영역에서 쇄교자속을 줄



여 약제자 전류를 저감하는 방향으로 설계를 진행하였다. 이 외에 영구자석의 종류를 바꿔서 영구자석 자체의 Br값을 감소, d축 인덕턴스를 유지하거나 증가시키면 무부하시의 채교자속량을 작게 하고 특성 유지할 수 있다.

## 2.2 대상모델 및 해석조건

Fig. 4와 Fig. 5에서 전동기의 설계 대상의 3D 모델과 2D 해석 모델의 도면을 보여준다. 전동기의 파

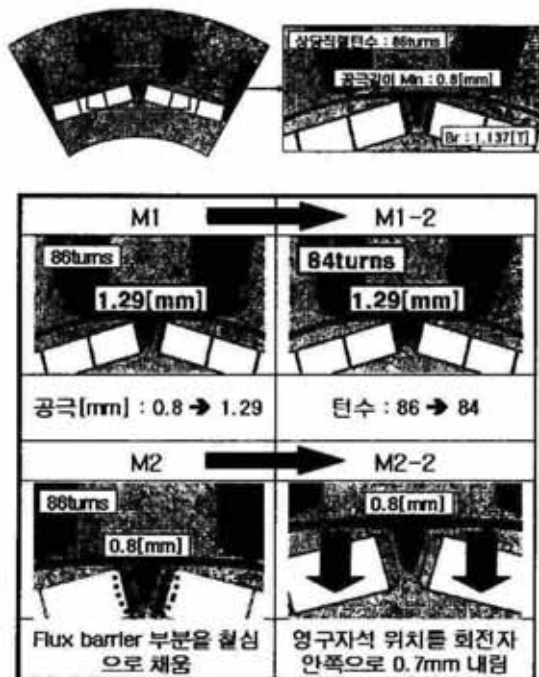


Fig. 4 Motor 대상모델 및 조건별 검토모델(M1-M2-2)

Table 2 대상모델의 파라미터 비교

	역기전력 [V <sub>ph-m</sub> ]	L <sub>d</sub> [mH]	L <sub>q</sub> [mH]
기존모델 (Air-gap 0.8mm 86turns_barrier)	64.67 (0%)	0.849 (0%)	1.095 (0%)
M1 (Air-gap 1.29mm)	53.85 (-9%)	0.726 (-14.4%)	0.946 (-13.6%)
M1-2 (Air-gap 1.29mm 84Turns)	57.56 (-11.4%)	0.692 (-18.5%)	0.882 (-19.5%)
M2 (Barrier change to steel)	61.40 (-5.1%)	0.893 (5.2%)	1.165 (6.4%)
M2-2 (Barrier change to steel PM Position change)	57.40 (-11.24%)	0.902 (6.2%)	1.205 (10%)

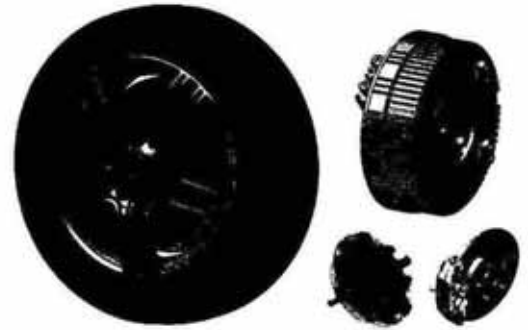


Fig. 5 In-Wheel motor 3D 모델

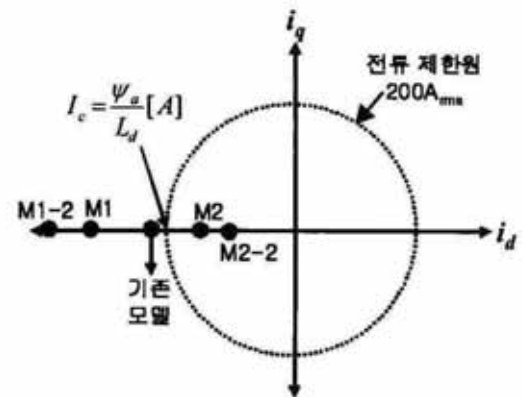


Fig. 6 전류 제한 원과 특성전류 포인트

라미터는 운전 온도 100℃를 기준으로 산정하였고 상 저항은 턴 수를 고려하여 적용하였다. 등가철손 저항은 기존 모델과 개선 모델에 모두 동일하게 적용하였다. 이와 같은 해석조건에서 연속정격 고속 영역에서의 전류를 저감시키기 위해 역기전력을 낮추면서 d축 인덕턴스를 유지 혹은 증가시킬 수 있는 모델을 검토하였다. 기존의 In-Wheel 전동기의 모델을 바탕으로 조건별 검토모델을 선정한 뒤 2D 도면을 설계하고 FEM을 이용해 해석하였다. Fig. 4에서 볼 수 있듯, 검토모델은 Air-gap의 크기를 기존의 0.8mm에서 1.29mm로 증가시킨 모델 M1과, 모델 M1의 상태를 그대로 유지하면서 턴 수를 86turns에서 84turns로 감소시킨 모델 M1-2, 기존의 모델에서 Flux Barrier를 철심으로 채운 모델 M2, 모델 M2의 상태를 유지하면서 영구자석의 위치를 회전자 안쪽으로 0.7mm 내린 모델 M2-2로 4가지를 고려하였다.

### 2.3 FEM해석 및 파라미터 비교

대상 모델들의 파라미터를 비교하기 위하여 FEM 해석을 통해 역기전력과 d-q축 인덕턴스를 살펴 보았다. Table 2에서 보이는 바와 같이 기존에 설계된 전동기의 역기전력에 비해 설계 대상 모델들의 역기전력이 작다는 것을 알 수 있다. 하지만 모델 M1과 M1-2의 d축 인덕턴스는 기존에 설계된 모델에 비해 작게 산정되었다. 이는 고속 운전영역에서 약제자 전류가 증가하는 원인이다.

Fig. 6에서, 전류 제한 원과 특성전류 포인트를 찾아보면 기존의 전동기 모델과 모델 M1, M2는 특성전류 포인트가 전류 제한 원 바깥에 존재하며, 모델 M2와 M2-2는 전류 제한 원 안쪽에 존재한다. 검토 모델 M1과 M1-1, 기존 전동기 모델의 경우 특성전류 포인트가 전류 제한 원 바깥에 있으므로 고속운전 영역에서 약제자 전류가 많이 필요한 이유가 된다. 모델 M1, M1-1의 경우 Air-gap의 크기를 크게 하여 역기전력을 저감시키는데, 그 경우 d축 인덕턴스도 함께 줄어들기 때문에 전류 제한 원 안으로 특성전류 포인트가 들어가지 못하게 되는 것이므로 Air-gap을 증가시킨 모델은 적절한 방향의 설계가 수행되지 못했다는 판단을 내릴 수 있다. 이에 반해 모델 M2와 M2-2의 경우에는 전류 제한 원 안쪽에 특성전류 포인트가 존재하기 때문에 고속 영역에서 약제자 전류의 사용을 줄일 수 있게 된다. 이로 인해 동손, 철손 등 전동기의 손실을 줄여 효율을 향상시킬 수 있다.

### 2.4 대상모델의 특성해석 및 결과분석

4가지 대상 모델 중 전류 제한 원 내에 특성전류 포인트가 존재하는 M2와 M2-2모델에 대해서 특성 해석을 수행하였다. d-q축 전압방정식과 등가회로를 이용해 전동기 대상 모델의 특성해석을 수행하였다. 운전 온도 100℃를 기준으로 산정하였고 전동기의 입력에 따른 토크, 출력, 효율 등을 산정할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_a \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \left(1 + \frac{R_a}{R_c}\right) \begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_q \\ \omega L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \psi_a \end{bmatrix} \quad (2)$$

특성해석 결과는 Table 3과 Table 4에 제시되었다. 연속 정격(10kW)과 최대정격(25kW)에서 모두 고속 영역(5000rpm)시에 입력(약제자)전류를 감소시켰음을 볼 수 있다. 기저속도에서의 전류는 기존 모델에 비해 증가한 수치를 나타내지만 전압제한에 여유가 있기 때문에 전동기의 성능에는 영향을 미치지 않는다. 연속정격에서 M2와 M2-2모델을 비교했을 때, 두 모델 모두 기존모델과 같은 토크를 내면서 고속 영역에서 제자속을 줄이기 위한 입력 전류를 감소시키고 효율을 향상시켰다. M2-2 모델은 제시된 대상 모델 가운데 가장 입력전류를 줄이고 효율을 향상시켰다. 따라서 본 논문의 목적이었던 고속 영역에서의 입력 전류 저감 설계의 모델을 M2-2로 정하고 연속정격과 최대정격, 전 속도 영역에서 특성 해석을 하였다. Fig. 7에서는 M2-2모델의 전동기 입력에 따른 선간전류, beta angle, 출력, 토크, 선간전압을 그래프로 나타내었다.

Table 3 특성 해석 결과(연속정격 10kW)

		토크 [Nm]	선간전류 [A <sub>peak</sub> ]	선간전압 [V <sub>ms</sub> ]	효율 [%]
기존 모델	Base	76.4	58.2	151.9	96.5
	Max.	19.1	103.5	213.9	87.2
M2	Base	76.4	60.2	150.7	96.4
	Max.	19.2	91.4	213.4	88.7
M2-2	Base	76.5	64.2	145.9	96.2
	Max.	19.3	81.1	213.7	89.7

Table 4 특성 해석 결과(최대정격 25kW)

		토크 [Nm]	선간전류 [A <sub>peak</sub> ]	선간전압 [V <sub>ms</sub> ]	효율 [%]
기존 모델	Base	195.0	148.2	179.9	93.7
	Max.	48.1	127.8	213.6	93.1
M2	Base	195.0	151.9	181.6	93.5
	Max.	48.0	117.1	213.9	93.8
M2-2	Base	195.0	161.2	179.4	92.9
	Max.	47.7	109.1	213.4	94.2

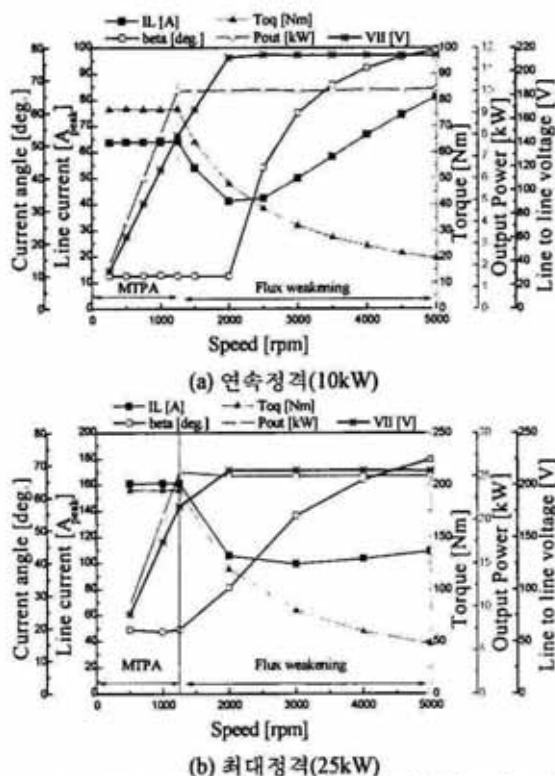


Fig. 7 모델 M2-2의 연속, 최대정격 시 특성해석 그래프

M2-2 모델은 기존에 설계된 전동기의 형상에서 회전자 Air-barrier를 철심으로 채우고, 영구자석의 위치를 조절함으로써 영구자석의 쇄교자속을 줄여 고속에서의 약제자 전류를 저감하고, 동손, 철손 저감으로 인한 효율을 향상시켰다. 결과를 분석하면 고속영역에서 동일한 토크를 내면서 입력 전류를 기존 전동기 대비 20.64% 저감하였고 효율은 2.9% 향상시켰다.

### 3. 결론 및 토의

본 논문에서는 기존에 설계되었던 In-Wheel 전동기에서 발생되었던 고속영역 운전 시에 약제자 전류가 많이 들어가는 현상을 저감하는 설계방안을 제시하였다.

- 1) 고속영역에서의 입력전류를 감소시키기 위하여 Flux barrier를 철심으로 대체하여 누설증가를 유도하고 영구자석의 위치를 아래로 이동시킴으로써 영구자석에 의한 쇄교 자속을 줄여 역기전력의

크기를 줄일 수 있었다.

- 2) 전동기의 파라미터를 FEM으로 산정한 결과에서 제시된 모델의 특성 전류 포인트는 전류 제한 원인에 위치하므로 고속 운전 시 약제자 전류를 줄일 수 있을 것으로 판단되었다.
- 3) 특성해석 결과에서 기존 설계된 In-Wheel 전동기에 비해 고속 영역(5000rpm)에서의 약제자 전류가 줄어들었다. 이는 고속에서의 입력전류가 저감되었다. 또한 입력전류를 저감함으로써 전동기의 동손, 철손 등 손실을 줄이고 효율을 향상시키는 효과도 얻었다.

### References

- 1) J. M. Nagashima, "Wheel hub motors for automotive applications", EVS21, Monaco, 2005
- 2) Byeong-Hwa Lee, "Design considerations of IPMSM for In-Wheel type electric vehicle", KIEE, 2009
- 3) Soon-O Kwon, "Design of BLDC motor using Parametric design", KIEE, pp. 1013-1014., 2007