

HEV용 e-4WD 구동을 위한 매입형 영구자석 동기전동기의 특성해석 및 시험

Characteristic Analysis and Test of IPMSM for e-4WD of the Hybrid Electric Vehicle

정수진* · 이주*
(Soo-Jin Jung · Ju-Lee)

Abstract - In this paper, the performance design and analysis for an Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor (IPMSM) that will be used as a traction motor in the e-4WD system of hybrid SUV(Sports Utility Vehicle) and RV(Recreational Vehicle), are investigated using finite element method. In order to improve the accuracy of design, the tolerances of parts and assemblies as well as the material properties of permanent magnet, stator, rotor and winding etc. are considered under the conditions similar to real driving state of motor. Both no load performance test and maximum load performance test, in which real driving state and cooling condition have been considered, are also implemented via proto sample build to verify the validity of motor's performance design.

Key Words : HEV, IPMSM, FEA, MTPA, THD, Eddy current, Segment magnet

1. 서론

일반적으로 전기자동차는 내연기관이 없이 전기모터로만 구동되는 순수 전기차(EV)와 내연기관과 전기모터가 복합적으로 구동되는 하이브리드형 전기자동차(HEV)로 구분한다. 하이브리드 전기자동차에 사용되는 전기모터는 엔진룸에서 내연기관과 직렬 또는 병렬로 연결되어 차량의 전륜을 구동하는 2륜구동(2WD)방식과 엔진룸의 내연기관과 별도로 전기모터가 후륜에 장착되어 독립 구동하는 4륜구동(4WD)방식으로 구분되어 질 수 있다. 승용자동차의 경우 지면으로부터 차량하부까지의 높이가 낮으며 적재하중이 가해질 경우 차량의 높이가 더 낮아지게 되고 차량의 후륜쪽에는 연료탱크를 비롯한 구조물들로 인해 전기모터 및 인버터의 후륜 장착시 공간적인 제약에 따른 영향을 받게 되는 불리한 점도 있다. 그러나 일반 승용자동차보다 구조적인 높이가 유리하고 레저/캠핑 등을 위한 Off-Road 특성을 가지는 RV, SUV 차종의 후륜에 전기모터를 적용하여 4WD를 구현할 경우 기존 기계식 4WD의 클러치 시스템과 연료탱크 공간도 감소하게 되는 장점도 가지게 된다. 또한 차량구동 시스템의 구현방법에 따라 엔진 단독구동, 모터 단독구동, 엔진+모터 복합구동의 형태로 전/후륜에 대해 각각 2WD 및 4WD도 원활하게 구동할 수 있는 장

점도 가지게 된다. 특히 차량의 초기가속 및 등판시 전기모터가 엔진출력을 어시스트해 줌으로써 주행성능을 향상시킬 수 있으며, 연비향상 및 엔진 다운사이징도 가능하게 된다. 전기모터를 이용하는 하이브리드 자동차의 경우 부하에 따른 전기모터의 구동특성과 그에 따른 전기적 파라미터(Parameter) 산정이 중요하며 속도와 토크가 가변되는 범위가 넓은 견인용 전기모터에 있어서 모터의 제어정밀도 향상을 위해서는 구동환경에 따른 속도-토크(N-T) 특성 및 전류-토크(I-T) 특성의 예측이 매우 중요하다. 또한 예측된 전기모터의 설계 특성과 실제 제작된 제품의 시험특성 간의 편차가 최소화 되어야 하기 때문에 전기모터의 특성 해석시에는 실제 구동환경에 대한 부품들의 전기적, 기계적 물성치들과 기구적인 공차 및 제품 제작시 발생할 수 있는 조립 공차 등의 고려가 요구된다.

본 논문에서는 4WD용 SUV 차량에 장착하여 엔진+모터 복합 구동을 위한 30kW급 전기모터를 에너지밀도가 높은 영구자석을 이용한 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)로 설계하였으며, 전기모터의 설계 예측 정밀도를 높이기 위하여 영구자석 등급(Grade)에 따른 자연감자 및 온도상승에 따른 열감자 영향을 반영하고 와전류손실(Eddy current loss)을 줄이기 위하여 축방향으로 분할된 영구자석을 적용하였다. 권선의 End-winding 길이와 온도상승에 따른 열저항 상승분을 고려하고 속도에 따른 고정자 및 회전자 철손 특성을 고려하여 유한요소 해석(FEA)을 진행함으로써 전기모터의 무부하 및 부하 특성 예측의 정밀도를 높이고자 하였다. 또한, 전기모터 및 인버터 시작품을 제작하여 무부하 및 부하에 따른 출력특성 시험을 수행함으로써 설계에 대한 타당성을 검증하였다.

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

E-mail : julee@hanyang.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea

Received : November 16, 2015; Accepted : March 31, 2016

2. 매입형 동기전동기의 설계

2.1 매입형 영구자석 동기전동기의 전압 및 토크 방정식

차량을 견인하는 전동기는 저속영역에서 토크를 일정하게 유지하는 정토크(Constant Torque) 영역과 고속영역에서 일정한 출력을 가지는 정출력(Constant Power) 영역으로 운전특성을 구분할 수 있다. 일반적으로 전류의 크기와 위상을 제어하여 정토크 영역에서는 최대토크제어(Max Torque Per Ampere)를 통해 높은 기동토크를 얻고 정출력 영역에서는 약제자제어(Field Weakening)를 함으로써 유기전압을 전압 제한값에 유지할 수 있어 광범위한 속도-토크 특성을 얻을 수 있다. 영구자석형 동기전동기의 기본 전압방정식을 전기자속도 ω_r 로 회전하는 d, q축 좌표계로 변환시킨 PMSM의 전압방정식은 다음 식(1)과 같다. 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)의 발생토크는 영구자석의 전기자 쇄교자속 변화에 의한 마그네틱 토크와 전기자 자기인덕턴스 및 상호인덕턴스의 변화에 따른 릴럭턴스 토크의 합으로 토크방정식은 식(2)와 같으며, 표면부착형 영구자석 동기전동기(SPMMSM)의 경우 회전자의 위치에 따라 자기저항이 변화하지 않으므로 자기인덕턴스 및 상호인덕턴스는 일정하게 되어 릴럭턴스 토크가 존재하지 않게 된다. 매입형 영구자석 전동기(IPMSM)에서는 L_d 와 L_q 의 인덕턴스가 같지 않기 때문에 릴럭턴스 토크가 존재하게 되며, $L_d < L_q$ 이므로 i_d 의 전류가 음의 값을 가지는 경우($i_d < 0$) 식(2)에 의해 영구자석에 의한 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크가 합쳐져 출력토크를 증가시킬 수 있게 된다. 동일한 토크를 발생시키는 i_d 와 i_q 는 여러 조합으로 나타낼 수 있으며, 전기자전류 i_s 와 i_d , i_q 의 관계식은 식(3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -\omega_r L_q \\ \omega_r L_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \Psi_a \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T = \frac{3}{2} p [\Psi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (2)$$

$$I_s = \sqrt{(i_d)^2 + (i_q)^2} \quad (3)$$

여기서, v_d 와 v_q 는 전기자 전압의 d-q성분, i_d 와 i_q 는 전기자 전류의 d-q성분, R_a 는 전기자 권선저항, p 는 극쌍수, Ψ_a 는 영구자석에 의한 쇄교자속, L_d 와 L_q 는 전기자 d-q축 인덕턴스를 나타낸다.

2.2 매입형 영구자석 동기전동기의 설계조건

설계 되어야할 전동기는 수냉식으로 전동기 Cooling jacket의 Coolant 유량은 12[liter/min]이며, In-let의 물의 온도는 60[°C]이다. 주위온도 100[°C] 환경조건에서 전동기를 구동할 때 최대출력은 30[sec], 연속출력은 1[hr] 동안 전동기의 최대온도가 120[°C]를 넘지 않도록 냉각 설계가 이루어 져야 된다. 또한, 전동기의 역기전력은 최대속도 9,000[rpm]에서 무부하시 IGBT의 허용전압 800[V]이하, 부하시 전압제한 230[V]이하를 만족해야

된다. 이때 역기전력은 마그네트 자속밀도의 변화와 부품들의 물성치 산포 및 전동기 제작에서 발생할 수 있는 부품 기구공차에 의한 공극 변화 등을 고려하여 전압제한치를 넘지 않도록 적절한 마진으로 설계 되어야 한다. 설계 되어야 할 전동기의 기구적, 전기적 제한조건과 속도-토크 특성을 표 1 및 그림 1에 나타내었다.

표 1 전동기 설계 요구사항

Table 1 Requirement spec. of IPMSM

Parameter	Unit	Spec.	Note
전동기 사이즈	[mm]	Φ190 x 220	all package
최대출력	[kW]	30 ↑	(30[sec])
최대토크	[Nm]	200 ↑	@1500rpm
최대속도	[rpm]	9,000	
최대출력 효율	[%]	90 ↑	at 30[kW]
코깅토크	[Nm]	0.65	
전압제한	[Vpeak]	230	line to line
전류제한	[Arpm]	240	phase
전동기온도	[°C]	100	Operating
샤프트 내경	[mm]	30	Inner-dia.
냉각조건	[LPM]	12	Inlet 60[°C]

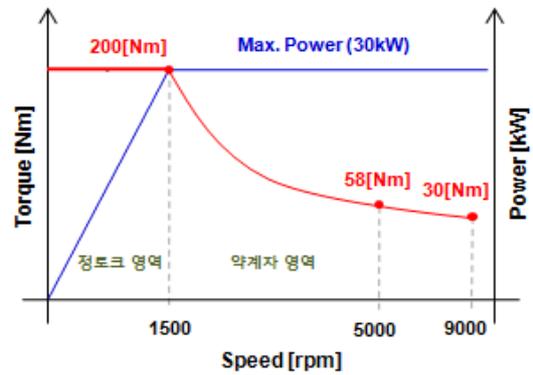


그림 1 IPMSM의 요구성능 곡선

Fig 1 Required performance curve of IPMSM

2.3 매입형 영구자석 동기전동기의 설계

차량구동용으로 사용되는 영구자석형 동기전동기는 일반적으로 공간 벡터 PWM을 이용한 전류 벡터 제어 인버터에 의해 구동되며, 정토크 영역에서는 최대토크 제어(MTPA : Max Torque Per Ampere)를 수행하고 정출력 영역에서는 약제자 제어(Field Weakening)를 수행한다. 또한 전동기가 타행운전 할 경우 전동기는 회생제동을 하기 때문에 최대속도에서 무부하 역기전력이 스위칭소자 IGBT의 허용전압을 넘지 않도록 설계하여야 한다. 본 논문에서 설계된 전동기의 역기전력은 최대속도 9,000[rpm]에서 무부하시 IGBT의 허용전압 800[V]이하, 부하시 전압제한 230[V] 이하가 되도록 설계되었으며, 역기전력은 마그네트 자속밀도

의 변화와 부품들의 물성치 산포 및 전동기 제작에서 발생할 수 있는 부품 기공공차에 의한 공극 변화 등을 고려하여 전압 제한치를 넘지 않도록 설계 하였다. 집중권에 비해 상대적으로 고속 영역에서 철손이 적고, 토크리플이 적어 제어성이 좋으며, 코깁특성 및 진동/소음에 유리한 분포권을 적용하여 8극 36슬롯으로 설계하였다.

영구자석 전동기는 회전자의 자석과 고정자의 슬롯 구조간의 자기저항 차이에 의해 발생하는 코깁토크를 가지며, 코깁 토크는 전동기의 진동이나 소음에 큰 영향을 미치게 되므로 최소화 설계가 요구되며, 일반적으로 코깁토크는 정격토크의 1~2[%] 이하가 되도록 설계를 한다. 본 논문에서는 정격토크의 1[%] 이하인 650[mNm]가 되도록 코깁토크 설계를 진행하였다. 또한, 마그네트의 와전류 손실(Eddy current loss)이 높은 경우 전동기를 고속으로 운전시킬 때 마그네트의 온도가 상승되어 출력특성 하락 및 효율이 저하되는 경우가 발생된다. 이에 따라 본 논문에서는 회전자의 축방향으로 1/8 분할 마그네트(Segment magnet)를 적용함으로써 마그네트의 와전류 path를 줄여 와전류손실 저감을 고려한 설계를 수행하였다. 전동기의 냉각을 위한 Cooling jacket의 Coolant는 12[liter/min], Inlet 온도 60[°C]의 수냉 조건으로 초기 환경온도 100[°C]에서 최대전류를 인가하여 30[sec]동안 구동될 때와 정격전류를 인가하여 1[hr]동안 전동기가 구동될 때 온도제한이 120[°C] 이하가 되도록 전기자 권선의 전류밀도를 설계하였다. 설계된 매입형 동기전동기의 파라미터는 표 2에 나타내었으며, 특성해석을 위한 회전자와 고정자의 3D형상 및 2D 단면을 그림 2에 나타내었다.

표 2 매입형 영구자석 전동기 설계 파라미터

Table 2 Design parameters of IPMSM

Parameters	Unit	Value	Note
슬롯수	[slot]	36	
극수	[pole]	8	
고정자 외경	[mm]	160	
회전자 외경	[mm]	99	
축방향 길이	[mm]	120	
공극	[mm]	0.7	
영구자석 폭	[mm]	25	
영구자석 두께	[mm]	6	
상당 직렬 턴수	[turn]	14	
병렬 회로수	[turn]	4	
영구자석 자속밀도	[T]	1.33	at 20°C
상저항	[mΩ]	52.09	at 20°C
전류밀도	[A/mm ²]	11.3	max current

* Star(Y) Connection, Distributed Winding

감속기로 동력 전달을 위한 중공 Shaft 부하축이 헬리컬인 경우 전동기가 시계방향 및 반시계 방향으로 회전할 때 헬리컬 각도에 의해 축방향으로 작용하는 하중이 발생되므로 회전자 축계는 축방향 하중에 대해 위치변동이 없도록 구조설계를 하였으며, 전동기가 고속 운전시 베어링 온도상승에 대한 내구성을 만족하

기 위하여 실리콘 볼 베어링을 적용하였다. 또한 방진/방수 IP67 Level을 만족하기 위한 설계구조와 부품들을 적용하였다. 그림 3은 설계된 전동기의 3차원 형상과 내부구조를 나타내며 그림 4는 설계된 전동기가 장착된 후륜시스템의 구조를 나타내고 있다.

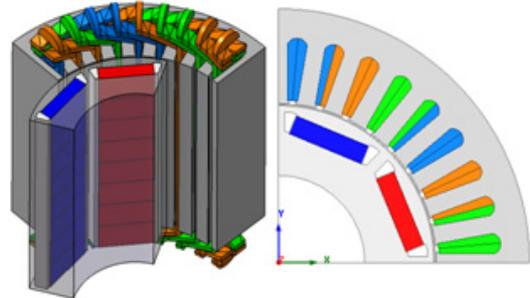


그림 2 IPMSM의 2차원 및 3차원 모델
Fig 2 2D & 3D modeling of IPMSM

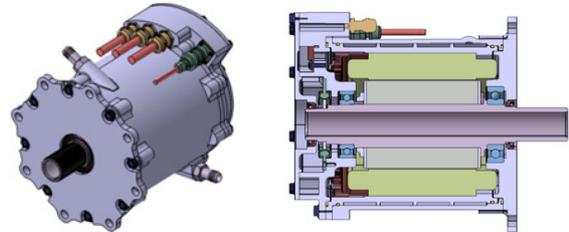


그림 3 전동기 3차원 패키징
Fig. 3 3D Packaging of IPMSM

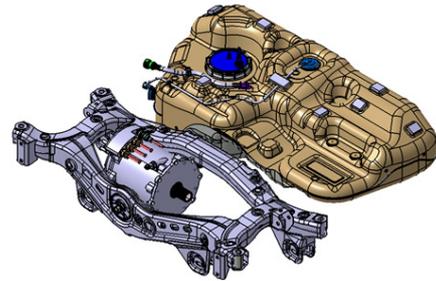


그림 4 후륜시스템의 구조
Fig. 4 Structure of rear wheel system

3. 매입형 동기전동기의 특성해석

일반적으로 전동기의 경우 축방향으로의 적층길이에 있어 End-winding의 전기적인 부분을 제외하면 자기적인 특성은 거의 선형적으로 동일하게 발생하므로 본 논문에서는 설계된 매입형 영구자석 동기전동기의 무부하 및 부하 특성을 알아보기 위하여 2차원 유한요소법을 이용하여 전자기해석을 수행하였다. 이때 고정자 및 회전자는 철손을 최소화하기 위하여 포스코의 35PN230(S08) 0.35t 재질의 규소강판을 적용하였으며 마그네트

는 N44SH(Neodymium)를 적용하여 그림 2의 1/4모델로 해석을 수행하였다. 해석에 적용된 전기감관 및 마그네트의 재질 사양은 하기의 그림 5와 표 3에 나타내었다.

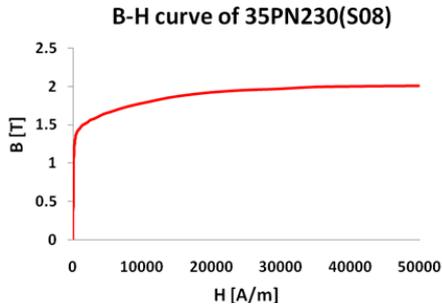
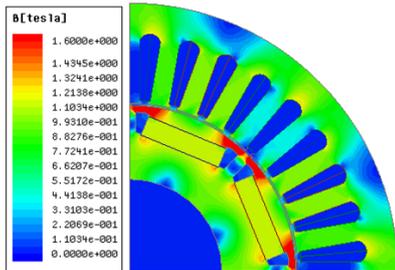


그림 5 35PN230(S08)의 B-H Curve
Fig. 5 B-H Curve of 35PN230(S08)

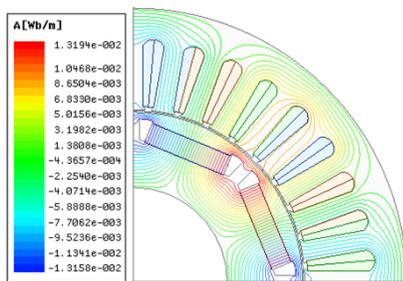
표 3 마그네트의 물성 정보

Table 3 Property information of Magnet

Parameters	Unit	Value
Remanent flux density (Br)	[T]	1.33-1.36
Coercivity (Bcb)	[kA/m]	>970
Temperature coefficient (RT-100℃)	α (Br)[%/℃]	-0.10
Temperature coefficient (RT-150℃)	α (Br)[%/℃]	-0.11
Maximum operating temp	[℃]	150
Relative recoil permeability	[μ rec]	1.05



(a) 자속밀도 분포도



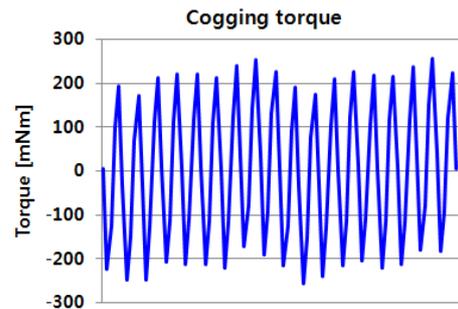
(b) 자속선도

그림 6 자속밀도 및 자속선도

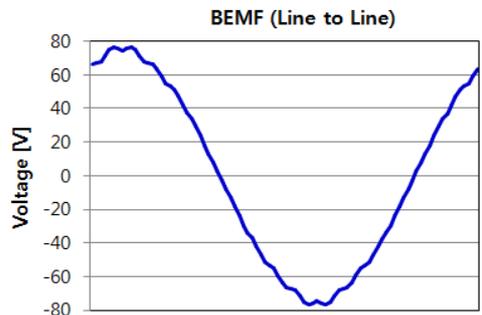
Fig. 6 Flux density & Flux line of IPMSM

3.2 매입형 영구자석 동기전동기의 무부하특성 해석

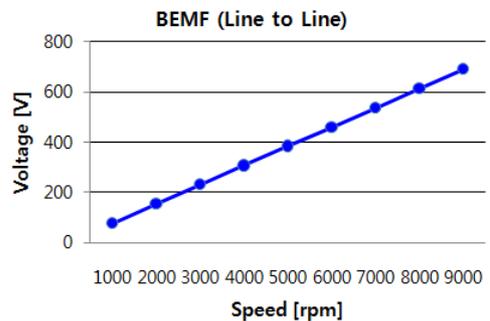
그림 6은 설계된 전동기의 무부하시 자속밀도 분포도와 자속선도를 나타내고 있으며, 그림 7의 (a)는 상온조건에서의 10 [rpm]일 때 코깅토크를 (b)는 1,000[rpm]에서의 무부하 역기전력 선간전압을 (c)는 속도에 따른 무부하 역기전력 선간전압 Peak값에 대한 특성해석 결과를 나타내었다. 역기전력은 토크에 영향을 미치는 주요 요인으로 왜곡이 적을수록 토크리플이 적으며 공간고조파로 인해 역기전력의 파형이 왜곡되는 경우 토크리플에도 영향을 미치게 된다. 또한 전원이 인가되었을 경우 전원에서 발생하는 시간고조파(Time Harmonics)와 합쳐져 더 큰 왜곡을 만들게 된다. 특성해석 결과에서 알 수 있듯이 코깅토크는 약 561[mNm] 정도로 요구사양인 650[mNm]를 만족하며 1,000 [rpm]에서의 고조파가 포함된 무부하 역기전력 최대값은



(a) 코깅토크 (@10[rpm])



(b) 역기전력 선간전압 (@1000[rpm])



(c) 속도에 따른 역기전력 선간전압

그림 7 무부하 특성해석 결과 (상온 조건)

Fig. 7 No-load analysis result (Room temperature)

76.7[V]이고 이때의 THD(Total Harmonic Distortion)함유량은 약 3.5[%] 정도이다. 최대구동 속도인 9,000[rpm]일 때 최대 역기전력은 690.3[V]로써 본 연구에서 사용한 IGBT 내전압 800 [V]에 대해 약 13[%]의 마진을 가지며, 또한 기계적인 구동속도 10,000[rpm]에 대해서도 약 4%의 마진으로 사양을 만족함을 알 수 있다.

3.3 매입형 영구자석 동기전동기의 부하특성 해석

모터의 구동온도 100℃ 조건에서 온도에 따른 영구자석의 열감자 영향과 권선의 열저항 상승에 따른 전압상승분을 고려하여 속도에 따른 최대 부하특성에 대한 해석을 수행하였으며 그 결과를 표 4와 그림 8에 나타내었다. 부하특성 해석시에는 각 속도별로 최대토크를 발생시키는 전류위상각을 찾아 가장 최적의 운전 포인트를 선정하였다. 인버터로 실제 모터를 구동할 경우 일반적으로 역기전력의 기본과 전압성분만을 고려하여 제어를 하지만 본 논문은 고속에서의 전압 마진(Margin)을 고려하여 모든 고조파가 포함된 전압을 기준으로 설계 및 해석을 진행하였다. 표 4의 부하 특성해석 결과에서 볼 수 있듯이 전동기 설계 요구 조건인 선간전압 230[Vpeak], 상전류 240[Arms]의 제한조건 내에서 최대토크와 최대출력이 208.5[Nm]과 32.8[kW]로써 요구사양인 200[Nm] 및 30[kW]를 만족한다. 또한, 전동기의 최대출력

영역에서 주로 운전되는 속도구간인 5,000[rpm]에서 90.2[%]로 최대효율을 발생시키며 요구사양인 30[kW] 출력곡선 상에서 90[%] 이상을 만족함을 알 수 있다. 하지만 특성해석 결과의 효율은 철손 및 동손만이 고려된 전자기해석 효율이며 기타 손실(표류부하손, 기계손)은 반영이 되지 않았다. 본 논문의 전동기 설계시에는 차량의 구동조건, 환경변화, 출력저하, 기타 손실 등을 고려하고 전동기 제작에 따른 재료비를 최소화하기 위하여 5[%] 이내의 최대토크 마진(Margin)으로 설계를 진행하였다.

4. 매입형 동기전동기의 특성시험

4.1 매입형 영구자석 동기전동기의 특성시험 조건

그림 9에는 제작된 매입형 영구자석 동기전동기와 다이ناموش험 설비를 나타내고 있으며, 무부하 운전에 따른 역기전력 및 코깅특성 시험과 부하운전에 따른 동력성능 시험을 수행하였다. 무부하 시험시에는 냉각조건이 고려되지 않은 상온 20[℃] 기준이며, 부하시험 시에는 Cooling jacket의 Coolant를 12[liter/min], Inlet 온도 60[℃]의 수냉 조건으로 시험을 진행하였다.

표 4 최대부하 특성해석 결과 (100℃ 조건)

Table 4 Max. operating analysis result (at 100℃)

Speed [rpm]	Current angle [deg]	Current [Arms]	Voltage [Vpeak]	Torque [Nm]	Power [kW]	Loss			Efficiency [%]
						copper	core	eddy	
500	42	239.4	68.1	208.5	10.9	11807	13.0	8.3	48.0
1000	42	239.4	135.8	208.5	21.8	11807	32.8	18.5	64.8
1500	42	239.4	177.3	208.5	32.8	11807	55.7	25.6	73.4
2000	42	155.6	225.5	149.0	31.2	4985	71.8	13.1	86.0
3000	63	134.4	226.2	101.0	31.7	3718	99.3	44.5	89.1
5000	74	124.4	218.7	60.9	31.9	3188	199.6	98.4	90.2
7000	79	127.3	228.3	42.9	31.5	3337	380.6	139.2	89.1
9000	82	127.3	229.6	31.5	29.7	3337	580.3	169.1	87.9

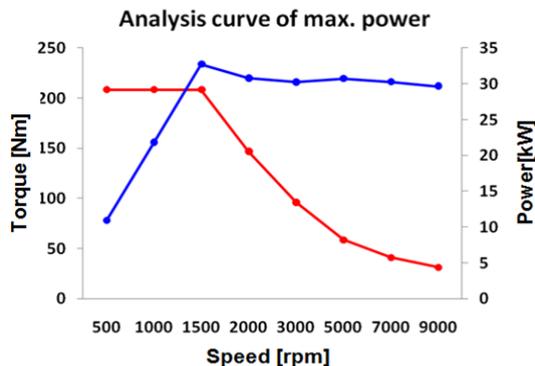
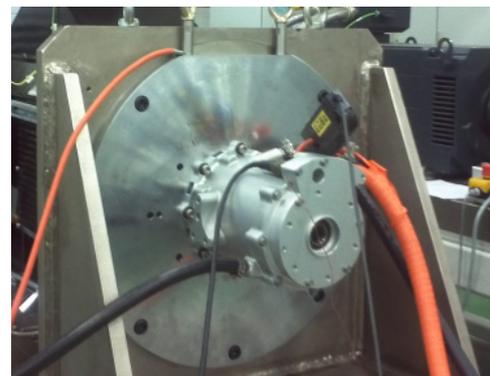


그림 8 최대출력 해석특성 (100℃ 조건)

Fig. 8 Max. power analysis curve (at 100℃)



(a) 전동기시험용 다이ناموش험 설비



(b) 매입형 영구자석 동기전동기

그림 9 매입형 영구자석 동기전동기 시험 장치

Fig. 9 Dynamo test system for IPMSM

4.2 매입형 영구자석 동기전동기의 무부하 시험

제작된 전동기를 다이나모에 장착하여 10[rpm]의 속도로 피구동하여 상온조건에서 측정한 코깅토크 시험값과 유한요소 해석값을 비교하여 그림 10에 나타내었다. 코깅토크 시험결과에서 알 수 있듯이 시험값이 513[mNm]로 해석값 561[mNm]에 비해 약 9[%] 정도 크게 나타나지만 본 논문에서 목표로 했던 정격토크의 1[%]이하인 650[mNm]의 값을 만족함을 알 수 있다.

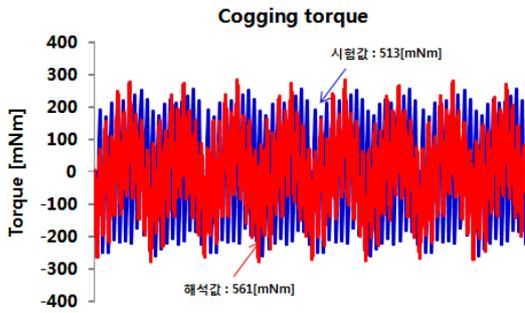


그림 10 코깅토크 시험결과 (20[°C])일 때
Fig. 10 Cogging torque test result (at 20[°C])

코깅토크의 경우 전동기 전자기의 구조적 영향 이외에 전동기 제작시 발생하는 부품들의 기구적인 공차와 조립편차에 의해 추가적으로 발생할 수 있으며, 특히 영구자석이 회전자 철심에 기울어져(Tilt) 부착되거나 회전자외경에 편심(Eccentricity)져 부착되는 경우, 고정자와 회전자 철심의 수직도(Perpendicular), 동심도(Concentricity) 및 비틀림(Twist), 회전자 축계의 흔들림(Run-out) 등에 의해 영향을 받을 수 있다. 따라서 전동기 제작시 부품의 정밀도 확보와 안정된 제작공법의 선정도 매우 중요하다. 그림 11은 상온조건에서 다이나모를 1,000[rpm]의 속도로 피구동하여 제작된 전동기의 무부하 선간 역기전력을 시험한 파형으로 시험파형과 최대치(76.5[V])가 유한요소 해석에서 예측한 역기전력의 파형 및 최대치(76.7[V])와 거의 동일하게 나타났다. 또한 역기전력 시험값으로 주파수 분석한 THD 함유율이 기본과의 약 3.5[%]로써 유한요소 해석의 예측값과 비슷하게 나타났다.

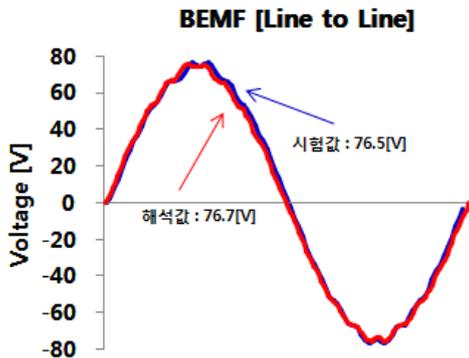


그림 11 무부하 역기전력 시험파형(1,000[rpm])일 때, 상온
Fig. 11 No-load B-emf waveform(at 1,000[rpm])

4.3 매입형 영구자석 동기전동기의 부하특성 시험

각 속도별로 입력전류에 대해 전류위상각을 변경시켜가면서 전류-토크 맵(Map)을 추출하고 추출된 맵을 기반으로 인버터 제어기에 맵핑(Mapping)하여 속도에 따른 최대출력에 대한 부하특성 시험을 수행하여 표 5에 나타내었다. 그림 12와 그림 13에는 시험한 전동기의 최대출력 특성곡선 및 효율특성 곡선을 나타내었다. 정토크 영역에서의 상전류와 전류위상각은 유한요소 해석값과 시험값 간의 차이는 거의 없이 동일하지만 약계자 영역에서의 입력전류는 시험값이 다소 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 해석시 고려된 역기전력은 모든 고조파가 포함된 값을 기준으로 하였으나 시험에서는 역기전력의 기본파 성분만 고려하여 구동하였기 때문에 그 차이만큼 시험에서 전압 마진이 생겨나게 되어 약계자 구간에서는 전류 시험값이 해석값에 비해 상대적으로 앞선 전류위상각으로 낮은 전류가 인가되는 것으로 보여진다. 또한 시험에서 인가되는 전류가 낮기 때문에 동손이 낮아져 약계자 영역에서의 최대효율 또한 해석값에 비해 약 2[%]정도 높게 나타나는 것으로 사료된다. 정토크 구간의 기저속도(Base speed) 1500[rpm]에서 최대토크는 해석값 208.5[Nm]대비 시험값이 203.5[Nm]으로 약 2.4[%]정도 낮게 나타난 것을 알 수 있다. 이는 동일 재질에 대해 설계 및 해석에서 고려된 물성치와 시작품에 적용된 물성치 간의 편차와 시작품 제작시 발생하는 자

표 5 최대부하 시험 결과(100°C 조건)

Table 5 Max load test result(at 100°C)

Speed [rpm]	Current [Arms]	Current angle [°]	Torque [Nm]	Voltage [Vpeak]	Power [kW]	Efficiency [%]
500	239.7	41	204.6	63.0	10.7	46.6
1000	239.5	41	204.0	106.1	21.3	62.6
1500	239.4	41	203.5	149.4	31.9	76.1
2000	156.9	41	149.1	168.3	31.2	86.4
3000	120.5	61	97.3	169.9	30.6	91.5
5000	121.9	72	58.4	217.5	30.6	92.3
7000	125.6	77	41.9	220.4	30.7	90.5
9000	134.3	80	32.3	226.2	30.4	86.4

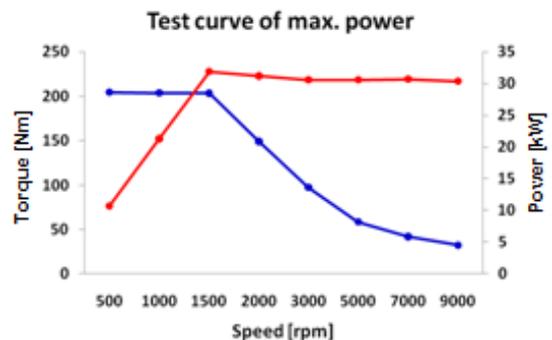


그림 12 최대 출력시험 특성 (100°C 조건)
Fig. 12 Max. power characteristic curve(at 100°C)



그림 13 효율시험 결과(100℃ 조건)

Fig. 13 Efficiency test result(at 100℃)

성재료들의 부품공차, 조립공차 및 설계/해석에서 고려하기 어려운 시험설비 셋팅에 따른 오차 등에 의한 요인과 설계/해석시 적용한 영구자석 온도 100[℃]에 대한 자속밀도 대비 실제 시험에서 영구자석 온도의 추가 상승에 따른 자속밀도(Br) 감소로 사료된다.

5. 결 론

본 논문에서는 HEV용 SUV차량의 후륜 구동을 위한 30[kW]급 매입형 영구자석 동기전동기를 유한요소법을 이용하여 설계 및 특성해석을 수행하였다. 설계시에는 영구자석의 자연감자 및 온도상승에 따른 열감자 영향을 적용하고 와전류 손실을 줄이기 위하여 축방향으로 분할된 영구자석을 적용하였다. 권선의 End-winding 길이와 온도상승에 따른 열저항 상승분을 고려하고 속도에 따른 고정자 및 회전자 철손 특성을 고려함으로써 설계 및 해석의 정밀도를 높이고자 하였다. 무부하 역기전력 시험값은 해석값의 크기 및 파형이 거의 동일하며 THD의 편차도 1[%] 이내로 나타났다. 또한 요구사양 대비 5[%] 이내의 최대 토크 마진(Margin)으로 설계된 전동기가 약 2[%] 정도의 마진으로 목표한 부하동력 특성 사양을 모두 만족하는 것을 시험을 통해 확인함으로써 설계에 대한 타당성을 검증하였다. 향후 전동기 구동조건(환경조건, 냉각조건 등)에 따른 고정자 및 회전자 열해석과 시작품에 대한 온도특성 시험을 통해 열적 안정성과 신뢰성을 확보를 위한 추가 연구를 진행하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 LG이노텍의 전장부품 사업부의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부서에 감사드립니다.

References

- [1] T. J. E. Miller and J. R. Hendershot Jr., "Design of Brushless Permanent-Magnet motors", New York : Oxford University Press Inc., 1994.
- [2] M. Tursini, F. Parasiliti, G. Fabri, E. Della Loggia., "A fault tolerant e-motor drive system for auxiliary services in hybrid electric light commercial vehicle", Electric Vehicle Conference(IEVC), 2014 IEEE International
- [3] Yong-Kak Choi, Chul-Su Kim, Jong-Jin Park., "A study of front & rear motor power distribution for E-4WD HEV", Proceeding of the KSAE Annual Autumn Conference, pp.1250~1256, 2004
- [4] Si-Young Yun, Ju Lee., "Implementation of In-wheel Motor Driving System for Electric Vehicle", KIEE Trans. Vol. 62, NO. 6, pp. 750~755, 2013
- [5] Jung Gyo Kim, Ju Lee., "Cogging Torque Reduction of Interior Permanent Magnet Motor Using Statistical Method", KIEE Trans. Vol. 55B, No. 6, JUN, 2006
- [6] Geo-chul Jeong, Chan-Bae Park, Tae-chul Jeong, Ju Lee., "A study on the Characteristics Analysis According to the Permanent Magnet Segmentation Change to IPMSM for Urban Railway Vehicle", KIEE Trans. Vol. 64, No. 10, pp. 1486~1492, 2015
- [7] Won-Ho Kim, Jae-Nam Bae, Ik-Sang Jang, Chang - Sung Jin, Ju Lee., "Design of the Traction Motor for HMMWV", Proceeding of the KIEE Annual Summer Conference, July, 2010
- [8] Jin-Hwan Lee, Dong-Hyuk Park, Gyeong-Jae Park, Yong-Jae Kim, Sang-Yong Jung., "Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor characteristics Using Fractional Slot", Proceeding of the KIEE Annual Summer Conference, July, 2013
- [9] S.H Ahn, K.W Kim, G.H Rim, J.S Kim, H.J Ryoo., "Provisions and Status of PHEV and EV", Proceeding of the KIEE Annual Summer Conference, July, 2009
- [10] Han Cheol, Seok-Myeong Jang, Ji-Hwan Choi, Hyeon-Joon Park., "Reduction method of core loss in permanent magnet motor with distributed winding", Proceeding of the KIEE Annual Autumn Conference, November, 2012
- [11] Kan Jae Lee, "A Study on the Design of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for HEV", Ph.D Thesis, University of Hanyang, Seoul Korea, 2004
- [12] Ki Chan Kim, "A Study on the Optimal Design and Control Performance of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for EV/HEV", Ph.D Thesis, University of Hanyang, Seoul Korea, 2008

저 자 소 개



정 수 진 (Soo-Jin Jung)

1974년 9월 25일생, 2003년 영남대 대학원 전기공학과 석사 졸업, 2012년~현재 한양대 대학원 전기공학과 박사과정, 2003년 한국전기연구원 연구원, 2004년~2016년 2월 LG 이노텍 차량부품연구소 수석연구원, 2016년 3월~현재 LG전자 CTO PE 연구센터 모터 팀 수석연구원

E-mail : sjjung.jung@lge.com



이 주 (Ju-Lee)

1963년 8월 30일생, 1986년 한양대 전기공학과 졸업, 1988년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업, 1988~1993년 국방과학연구소 연구원, 1997년 일본 큐슈대학교 System 정보과학연구과 박사졸업, 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원, 1997년~현재 한양대학교 전기공학부 교수

Tel : 02-2220-0342

E-mail : julee@hanyang.ac.kr