

세탁기용 외전형 BLDC 전동기의 코깅 토크 저감에 관한 연구

論 文
54B-5-2

A Study on the Reduction of Cogging Torque of Outer-Rotor Type BLDC Motor for Washing Machines

金在民* · 張哲赫** · 鄭泰庚†
(Jae-Min Kim · Cheul-Hyeok Chang · Tae-Kyung Chung)

Abstract - This paper deals with the reduction of cogging torque of a outer-rotor type BLDC motor mainly used for washing machines. The motor comprises permanent magnet outer-rotor and stator with coils and core. This structure inherently produces vibration and cogging torque because of uneven reluctance according to rotation of the rotor. Up to now, adopted a type of 24 magnet pole and 36 slot-stator. This generates high main torque but accompanies comparatively large cogging torque. This paper proposes a 32-pole 36-slot type motor which reduces cogging torque remarkably. The influence of cogging torque is varied according to pole-slot combinations. The characteristic of the motor was obtained by a two-dimensional finite element method coupled with a drive circuit. The performance of the proposed model is superior to that of the existing model because of the reduction of torque ripple and the improvement of back emf wave form.

Key Words : BLDC Motor, Back Emf, FEM, Cogging Torque

1. 서 론

BLDC 전동기(Brushless Direct Current Motor)는 토크 제어와 속도 제어가 용이하며 신뢰성이 높고, 브러시로 인한 소음 및 스파크가 없어 수명이 길기 때문에 보수와 유지에 드는 비용을 절감할 수 있다. 또한 영구자석 회전자의 계자 자속과 집중 권선을 가진 고정자 전류에 의해 토크가 발생하므로, 계자 전류를 필요로 하지 않아 효율이 높고, 자속을 집중하므로 출력 토크가 크고, 구조가 간단하여 제작이 쉽다는 등의 여러 가지 장점으로 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 영구자석 전동기에 대한 제어 기술, 재료 기술 및 제작 기술이 발달하더라도 영구자석과 슬롯 개구폭(slot opening)의 존재로 인하여 코깅 토크(cogging torque)가 존재하게 된다. 코깅 토크는 전동기의 유효 토크에는 큰 영향을 미치지 못하지만 토크가 맥동하여 속도 리플과 진동이 발생하게 되므로, 전동기의 성능을 저하시키는 결과를 가져오게 된다. 특히 전동기의 출력 밀도를 높이기 위하여 고에너지 자석을 이용하거나, 자기 회로(magnet circuit)를 개선하여 공극 자속 밀도(air-gap flux density)를 극대화

하는 경우에는 코깅 토크의 영향이 더 증가하므로 코깅 토크를 저감시키지 않고서는 전동기의 성능 향상을 기대할 수 없다.[1][2][3]

본 논문에 사용된 해석 모델의 BLDC 전동기는 세탁기용이며, 구조적으로 외경이 크고, 길이가 짧은 박형 전동기 형태를 갖고 있다. 이러한 형태의 전동기는 슬롯이나 자석에 스크류를 사용할 수 없으므로, 다른 방법을 통하여 코깅 토크를 저감시켜야 한다.

따라서 본 논문에서는 24극 36슬롯 외전형 BLDC 전동기에 비하여 코깅 토크와 역기전력 파형이 개선된 32극 36슬롯 외전형 BLDC 전동기를 제안한다. 전동기 성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여 기존 모델과 제안 모델의 코깅 토크, 역기전력 파형 및 토크 특성을 구동회로를 고려한 유한 요소법을 통하여 비교하였다.

2. 24극 36슬롯 외전형 BLDC 전동기의 사양

본 논문에서 다루어지는 세탁기용 외전형 BLDC 전동기의 기본구조와 외형 치수를 그림 1과 그림 2, 표 1에 나타내었다. 해석의 편의상 권선부의 회전자가 CW 방향으로 회전하는 것으로 하였다.

† 교신저자, 正 會 員 : 中央大學 電子電氣工學部 教授 · 工博
E-mail : tkchung@cau.ac.kr

* 準 會 員 : 中央大學 電子電氣工學部 碩士

** 準 會 員 : 中央大學 電子電氣工學部 碩士課程

接受日字 : 2005年 1月 19日

最終完了 : 2005年 4月 26日

3. 24극 36슬롯 BLDC 전동기의 F.E.M 해석 결과

유한 요소법에 의한 24극 36슬롯 외전형 BLDC 전동기의 해석 결과는 다음과 같다. 그림 3은 해석 모델의 분할된 요소를 나타내고 있으며, 전체 요소 수는 7,285개이다.

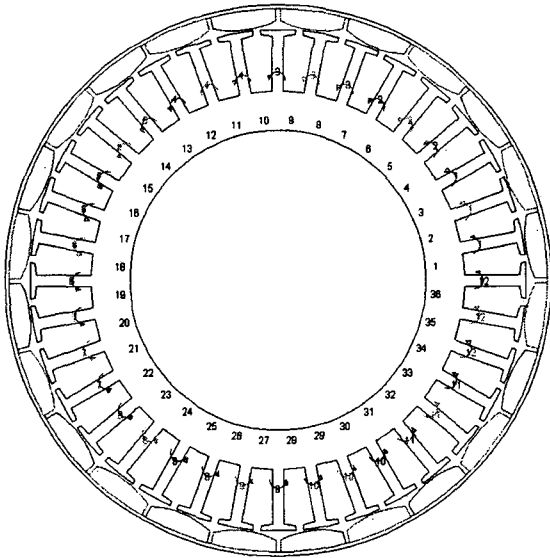


그림 1 24극 36슬롯 BLDC 전동기의 단면도
Fig. 1 Cross-section of 24-pole 36-slot BLDC motor.

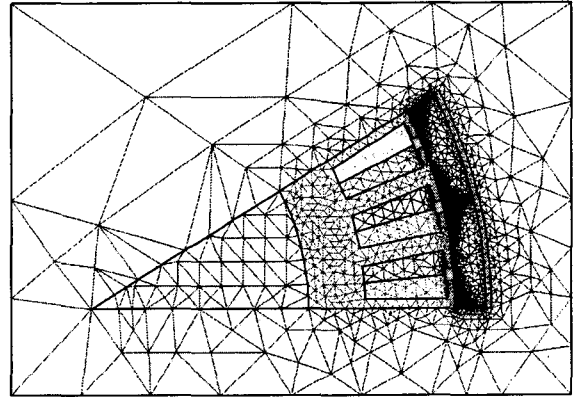


그림 3 요소 분할도
Fig. 3 Mesh of the model.

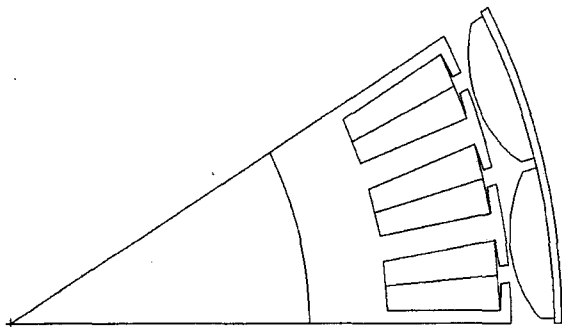


그림 2 Simulation을 위한 1주기(30°) 단면도
Fig. 2 Cross-section of one period for simulation.

표 1 24극 36슬롯 외전형 BLDC 전동기의 사양
Table 1 Specification of 24-pole 36-slot BLDC motor.

공급 전압[V]	311	치고[mm]	32
상수	3	슬롯 개구폭[mm]	4
극수	24	치폭[mm]	6
슬롯수	36	회전자 내경[mm]	260
고정자 내경[mm]	154	회전자 외경[mm]	284
고정자 외경[mm]	258	축방향 길이[mm]	30
스큐	0	공극[mm]	1
회전수[rpm]	400	자석 두께[mm]	10
상당 턴수	1200	잔류자속밀도[T]	0.4

그림 4는 무부하 때의 시간에 따른 토오크와 스피드 곡선으로 최대 속도는 593[rpm] 정도이며, 이때 토오크는 0으로 잘 수렴하지만 리플이 상당히 많음을 알 수 있다.

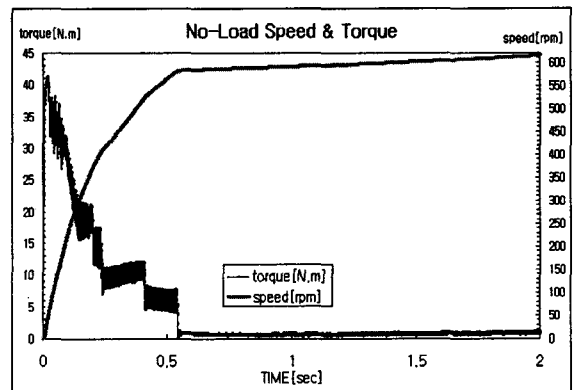


그림 4 무부하 특성 곡선
Fig. 4 No-load characteristic curve.

그림 5는 24극 36슬롯 BLDC 전동기의 T-N-I (토오크-속도-전류) 커브로, 24극 36슬롯 외전형 BLDC 전동기의 실험값과 시뮬레이션 결과 값을 비교한 것이다. 두 값이 0.8%의 오차 범위 내에서 상당히 일치함을 확인 할 수 있다. 최대 속도는 593[rpm] 정도이며, 500[rpm]일 때의 토오크 값은 5.2[N.m]임을 알 수 있다.

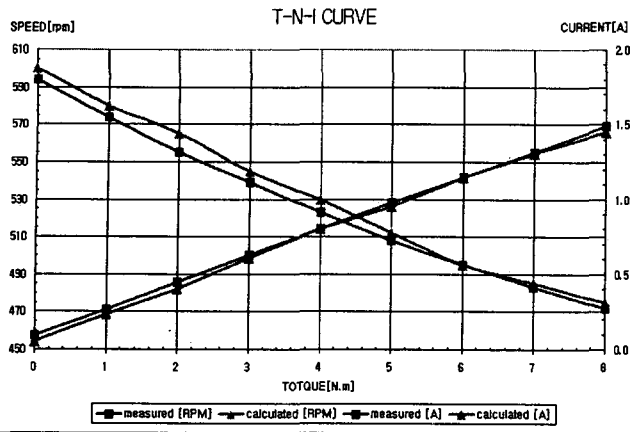


그림 5 24극 36슬롯 BLDC 전동기의 T-N-I CURVE
Fig. 5 T-N-I CURVE of 24-pole 36-slot BLDC motor.

그림 6은 코깅 토오르크를 나타낸 것으로 크기는 0.09[N.m] 정도이며, 이것으로부터 500[rpm]일 때의 토크 리플은 1.73 % 정도임을 알 수 있다.

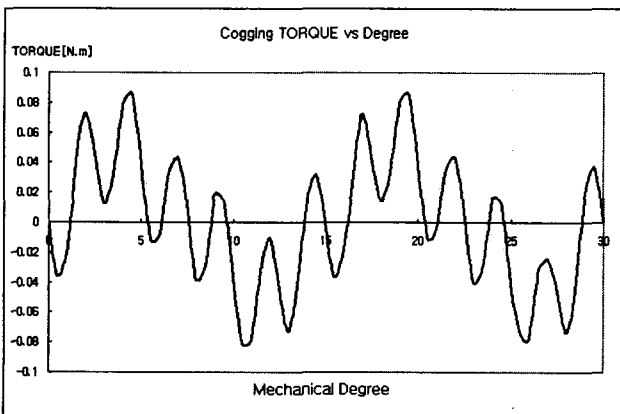


그림 6 코깅 토오르크
Fig. 6 Cogging Torque.

토크 리플이 1%이내 일때 정속 운전이 가능하므로, 보다 나은 정속 운전을 위해서는 토크 리플을 감소시켜야 할 필요성이 있다. 그리고 그림 4의 무부하시의 토오르크 특성 곡선에서 리플 성분이 상당히 많이 존재함을 알 수 있는데 이는 코깅 토오르크 때문임을 알 수 있다.

4. 코깅 토오르크(Cogging torque)

앞 절에서 해석하였던 24극 36슬롯 BLDC 전동기의 극당 슬롯수의 비는 2 : 3이다. 그러나 근래에 들어서는 전동기

의 소음 및 진동을 최소화시키기 위한 노력과 더불어 소음 및 진동의 주된 원인이 되는 코깅 토오르크를 줄이기 위해 고정자와 회전자의 극수를 기존의 틀에서 벗어나는 조합으로 설계하고 있다.

전자기적인 토오르크는 회전자에 의해 생성된 자속과 고정자에 흐르는 전류의 상호 작용에 의해 발생하지만, 코깅 토오르크는 영구자석에 의한 기자력의 고조파와 슬롯의 존재로 인하여 발생하는 공극 퍼미언스 고조파의 상호작용에 의해 발생한다. 코깅 토오르크는 전체 전동기 유효 토오르크에는 큰 영향을 미치지 못하지만, 토오르크가 맥동하여 속도 리플과 진동의 주원인이 되므로 전동기의 성능을 저하시키는 결과를 가져오게 된다. [4][5]

코깅 토오르크를 저감시키는 방법으로는 스큐, 보조슬롯 사용, 공극 길이 증가, 분수 슬롯 사용, 슬롯수의 증가, 슬롯 개구폭의 최소화 등이 있으나, 가장 일반적으로 사용하는 방법으로는 권선부의 고정자 슬롯이나 회전자의 자석에 스큐를 사용하는 것이며, 이상적으로 1슬롯 피치의 스큐는 코깅 토오르크를 완전히 제거시켜준다. 그러나 스큐는 코깅 토오르크를 최소화시킬 수는 있으나 구형과 역기전력의 파형을 왜곡시켜 구형과 역기전력을 필요로 하는 BLDC 전동기에 있어서 또다른 문제점을 발생시키게 된다. 그 중 하나로 구형과 전류와의 상호작용으로 나타나는 전자기 토오르크의 리플 성분이 증가하게 된다. 또한 본 논문에서 대상모델로 사용되는 BLDC 전동기는 세탁기용으로, 구조적인 제약조건으로 인하여 외경이 크고, 길이가 짧은 박형 전동기 형태를 취하고 있다. 이러한 전동기는 스큐 슬롯이나 자석의 스큐를 사용할 수 없는 조건이 되므로 코깅 토오르크를 줄이기 위하여 다른 방법이 사용되어야 한다.

코깅 토오르크 $\tau_c(\theta)$ 와 자기 에너지 $E_m(\theta)$ 사이에는 식(1)의 관계가 성립한다.

$$\tau_c(\theta) = -\frac{\partial E_m(\theta)}{\partial \theta} \quad (1)$$

자기 에너지는 자속 내부와 철심 내부, 공극에 축적되는데, 자속의 내부 에너지가 일정하고, 철심의 내부 에너지는 철심의 투자율이 무한하다고 가정하면 거의 무시할 수 있으므로, 코깅 토오르크는 공극에 축적되는 자기 에너지의 변화량과 같다. 따라서 공극의 자기 에너지를 $E_g(\theta)$ 라고 하면 식(2)가 성립한다.

$$\tau_c(\theta) = -\frac{\partial E_g(\theta)}{\partial \theta} \quad (2)$$

식(2)에서 자기에너지를 구하여, 코깅 토크를 구해 보면 식(3)과 같다. [6]

$$\tau_c = \frac{\pi}{4} DL_{stk} \sum_n \frac{\sin(n\sigma L_{stk})}{n\sigma L_{stk}} \Lambda_n f_n \sin(n\xi) \quad (3)$$

$$n = K_{cog} L_{CM} : K_{cog} = 1, 2, \dots$$

L_{CM} : the lowest common multiple of the number of slots and poles

$\frac{\sin(n\sigma L_{stk})}{n\sigma L_{stk}}$: the effect of skew

σ : skew angle

Λ_n : n 'th space-harmonic of the permeance of the magnetic circuit

f_n : the n 'th space-harmonic of the magnetic flux-distribution

ξ : angle of rotation of the rotor

D : the outer-diameter of rotor

L_{stk} : the axial length of the stator

식(3)으로부터 코깅 토크를 줄이기 위하여 다음의 세가지 방법을 생각할 수 있다. 첫째는, f_n 을 최소화시키는 것으로 영구자석의 착자 조건을 최적화시키는 방법이다.

둘째는 $\frac{\sin(n\sigma L_{stk})}{n\sigma L_{stk}}$ 을 최소화하는 것으로 스큐를 사용하는 방법이다. 하지만 스큐는 앞서서도 설명하였듯이 역기전력을 왜곡시킨다는 단점을 가지고 있다. 셋째는 고정자와 회전자 극수의 조합의 변경을 통하여 K_{cog} 값을 최소화시키는 방법이다. 본 논문에서는 세 번째 방법인 고정자 슬롯수와 회전자 극수의 조합의 변경을 통하여 코깅 토크를 최소화시키고자 한다.

코깅 토크는 자석의 자극 축과 고정자 축과의 정렬 관계를 고려할 때 슬롯수와 극수의 최소 공배수에 반비례하며, 동일 배열의 반복이 많아질수록 증가한다. 즉, 슬롯수와 극수의 최소 공배수가 클수록 코깅 토크의 맥동수는 증가하며 토크 맥동수는 감소하게 되어 코깅 토크 값은 작아지게 된다. 이러한 관계를 수식으로 나타내면 식(4)와 같다.[6]

$$K_{cog} = \frac{\text{극수} \cdot \text{슬롯수}}{L_{CM}} \quad (4)$$

위 식(4)는 최소 코깅 토크 결정식은 아니지만 코깅 토크를 최소화하기 위한 극수와 슬롯수의 조합을 결정함에 있어 미약하게나마 기준이 된다. 그리고 여기에서 과정을 마무리하는 것이 아니라, 결정된 극수와 슬롯수의 조합에 따른 토크 리플을 최소화 시켜줄 수 있는 권선 방법 또한 고려해야만 한다.

5. 코깅 토크 저감을 위한 제안

코깅 토크를 저감시키기 위하여 4절에 설명하였던 방법 이외에 전기자 권선의 상수(the number of phase)를 증가시키는 방법도 있지만, 이는 BLDC 전동기에 있어 전기자 권선의 전류 제어를 위해 사용되어지는 회전자 자극 위치 검출 소자(예 : 홀 소자) 수와 이를 ON-OFF 시키는 스위칭 소자수가 증가하게 되고 구조가 복잡하게 되어 단가가 비싸지게 된다는 단점을 가지고 있다.

3상 BLDC 전동기의 가장 일반적인 것 중 하나는 코일 피치가 3인 중권(Lap Winding)을 가진 극당 슬롯 비율이 1:3 인 정수 슬롯 모델이다. 그런데 이 모델은 높은 코깅 토크를 가지고 있으며, 구조상 고정자에 큰 동손을 유발하는 엔드 코일을 갖고 있다는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 분수 슬롯을 가진 BLDC 전동기가 많이 사용되고 있으며, 일반적으로 극당 슬롯 비율이 2:3인 경우가 많다. 2:3인 경우는 극당 슬롯 비율이 1:3 인 경우에 비해 엔드 코일이 짧고 출력 밀도를 높일 수 있다는 장점은 있으나, 코깅 토크의 감소나 역기전력 파형의 개선에 의한 전동기 성능의 향상을 기대하기는 어렵다. [7]

극수(P)와 슬롯수(M)에 따른 코깅 토크와 토크 리플의 관계는 다음과 같다. 극수가 슬롯수 보다 큰 경우($P > M$)에는 코깅 토크는 감소하지만 토크 리플이 증가하게 되며, 극수가 슬롯수 보다 적은 경우($P < M$)에는 토크 리플은 감소하게 되지만, 코깅 토크가 증가하게 된다. 따라서 토크 리플과 코깅 토크를 동시에 개선함으로써 전동기의 진동과 소음을 최소화 할 수 있는 극수와 슬롯수의 최적의 비를 찾아내야만 한다. 그러나 BLDC 전동기에서는 앞에서 설명한 위치검출 소자(예, 홀소자)로부터 전기적으로 오차가 발생 (3상의 경우 전기적으로 120°마다)하게 되는데, 극수를 슬롯수 보다 작게 하는 편($P < M$)이 극수가 슬롯수 보다 큰 경우($P > M$)에 비해 전기자에서 발생하는 오차를 줄이는데 유리하므로, 이러한 오차에 의해 발생하는 토크 리플을 감소시킬 수 있게 되어 극수가 슬롯수 보다 작은

경우($P < M$)를 이용한다.

극수 $P=2\sim 32$ 일 때, $P \neq M$ (3상 결과를 출력하기 위함)이고 $P < M$ (토크 리플을 감소하기 위함)인 조건 아래에서 극수에 따른 슬롯수의 조합을 슬롯수 $M=3\sim 36$ 범위 안에서 살펴보면 다음 표2와 같은 결과를 얻을 수 있다.

표 2 극수에 따른 슬롯수의 조합

Table 2 Slot combinations according to the number of poles.

P	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
M	3	6	9	9	12	15	15	18	21	21	24	27	27	30	33	33
				12	15	18	21	24	27	30	33	36	36			
					18	21	24	27	30	33	36					
						21	24	27	30	33	36					
							24	27	30	33	36					
								27	30	33	36					
									30	33	36					
										33	36					
											36					

표2로부터 코깅 토크와 토크 리플을 저감시키기 위한 극수와 슬롯수의 상관 관계를 알아낼 수 있는데, 이를 식으로 나타내면 다음 식(5)와 같다.

$$\frac{2}{3}M < P < \frac{4}{3}M \quad (5)$$

극수 P 와 슬롯수 M 의 조합을 $\frac{2}{3}M < P < \frac{4}{3}M$ 으로 했을 때, 코깅 토크와 토크 리플을 모두 개선함으로써 전동기의 진동과 소음을 감소시킬 수 있다. 그리고 극수 $P=2\sim 32$, 슬롯수 $M=3\sim 36$ 에서의 3상 출력이 가능한 극수와 슬롯수의 조합을 고려하여 극수와 슬롯수의 관계에 따른 코깅 토크 맥동수(극수와 슬롯수의 최소 공배수)와 극당 슬롯비, 권선 계수를 계산하였으며, 이를 표3에 나타내었다. 상수(the number of phase)는 3상으로 한정시켰으며, 권선 작업성 향상을 위하여 Tooth Concentric Winding 방법으로 권선을 처리했을 때의 값이다. [8]

표의 P 와 M 의 최소공배수를, μ 는 극당 슬롯비를, ν 는 권선 계수를 나타낸다. 36슬롯일 때, 주어진 극수의 범위 내에서 32극일 때 코깅 토크 맥동수는 288, 권선 계수는 0.946으로 제일 큰 값을 알 수 있다. 기존 모델인 24극 36슬롯의 외형을 그대로 유지한 채 코깅 토크를 저감시키기 위해서는 주어진 36슬롯에서 24극 대신에 토크 맥동수와 권선 계수가 제일 큰 32극으로 변경할 때 코깅 토크가 최소가 될 것이라 예상할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 24극 36슬롯 외전형 BLDC 전동기에 비하여 코깅 토크와 역기전력 파형이 개선될 것으로 기대되어지는 32극 36슬롯 외전형 BLDC 전동기 모델을 제안한다. 전동기 성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여

기존 모델과 제안 모델의 코깅 토크, 역기전력 파형 및 토크 특성, 구동 회로를 고려한 유한 요소법을 통하여 비교하고자 한다.

표 3 코깅 토크 맥동수와 권선 계수

Table 3 Cogging torque pulsation number and winding factor.

M \ P	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36
2	6 2*3 0.866	6 2*6 0.5	18 2*9 0.328	12 2*12 0.250	30 2*15 0.199	18 2*18 0.167	42 2*21 0.142	24 2*24 0.125	54 2*27 0.11	30 2*30 0.1	66 2*33 0.09	36 2*36 0.09
4	12 4*3 0.866	12 2*2*3 0.866	36 4*9 0.617	12 3*2*6 0.5	60 4*15 0.399	36 2*2*9 0.328	84 4*21 0.281	24 2*2*12 0.25	108 4*27 0.22	60 2*15 0.22	132 4*33 0.18	36 2*2*18 0.18
6	6 6*3 0	X	18 6*9 0.866	12 3*2*4 0.707	30 6*15 0.542	18 3*2*6 0.5	42 6*21 0.399	24 6*24 0.361	54 3*2*9 0.328	30 6*30 0.294	66 6*33 0.267	36 3*2*12 0.267
8	24 8*3 0.866	24 2*4*3 0.866	72 8*9 0.946	24 4*2*3 0.866	120 8*15 0.711	72 2*4*9 0.616	168 8*21 0.538	24 4*2*6 0.5	216 8*27 0.428	120 14*15 0.389	264 8*33 0.355	72 4*2*9 0.328
10	30 10*3 0.866	30 10*6 0.5	90 10*9 0.946	90 10*12 0.933	30 5*2*3 0.866	90 10*18 0.735	210 10*21 0.65	120 10*24 0.582	270 10*27 0.525	30 10*30 0.5	330 10*33 0.437	180 10*36 0.404
12	12 12*3 0	12 2*6*3 0	36 3*4*3 0.866	X	60 12*15 0.878	36 6*2*3 0.866	84 12*21 0.719	24 2*6*12 0.707	108 3*4*9 0.617	60 6*15 0.542	132 12*33 0.513	36 6*2*6 0.5
14	42 14*3 0.866	42 14*6 0.5	126 14*9 0.617	84 14*12 0.933	120 14*15 0.951	126 14*18 0.902	42 7*2*3 0.866	168 14*24 0.759	378 14*27 0.694	210 14*30 0.64	462 14*33 0.59	252 14*18 0.548
16	48 16*3 0.866	48 2*8*3 0.866	144 16*9 0.328	48 4*4*3 0.866	240 16*15 0.952	144 2*8*9 0.946	336 16*21 0.899	48 8*2*3 0.866	432 16*27 0.766	240 8*15 0.71	528 16*33 0.659	144 4*4*9 0.617
18	18 18*3 0	18 18*6 0	81 3*6*3 0	36 18*12 0.707	90 18*15 0.910	X	126 3*6*7 0.897	72 18*24 0.871	54 9*2*3 0.866	90 9*15 0.747	198 18*33 0.669	36 2*6*12 0.707
20	60 20*3 0.866	60 2*10*3 0.866	180 20*9 0.328	60 2*10*6 0.433	60 5*4*3 0.866	180 2*10*9 0.946	420 20*21 0.953	120 2*10*12 0.933	540 20*27 0.877	60 2*3 0.866	660 20*33 0.778	180 2*10*18 0.735
22	66 22*3 0.866	66 2*2*3 0.5	198 22*9 0.9024	132 22*12 0.711	330 22*15 0.617	198 22*18 0.902	462 22*21 0.953	264 22*24 0.949	594 22*27 0.915	330 22*30 0.873	66 11*2*3 0.866	66 22*36 0.783
24	24 24*3 0	24 2*12*3 0	72 3*8*3 0.866	24 4*6*3 0	120 24*15 0.381	72 6*4*3 0.866	168 3*8*7 0.897	X	216 3*8*9 0.946	120 12*15 0.878	264 24*33 0.863	72 12*2*3 0.866
26	78 26*3 0.866	78 26*6 0.5	234 26*9 0.328	312 26*12 0.433	390 26*15 0.399	234 26*18 0.735	546 26*21 0.899	312 26*24 0.949	702 26*27 0.953	390 26*30 0.935	858 26*33 0.902	468 26*36 0.866
28	84 28*3 0.866	84 2*14*3 0.866	252 28*9 0.328	84 2*14*6 0.433	420 28*15 0.198	252 2*14*9 0.166	84 7*4*3 0.866	168 2*14*12 0.933	756 28*27 0.953	420 14*15 0.951	924 28*33 0.928	252 2*14*18 0.901
30	30 30*3 0	30 30*6 0	90 3*10*3 0.866	60 30*12 0.433	30 5*6*3 0.5	90 3*10*6 0.719	210 30*21 0.871	120 30*24 0.945	270 3*10*9 0.945	X	330 30*33 0.877	180 3*10*12 0.933
32	96 32*3 0.866	96 2*16*3 0.866	288 32*9 0.328	96 4*8*3 0.866	480 32*15 0.328	288 2*16*9 0.65	672 32*21 0.65	96 8*4*3 0.866	864 32*27 0.915	480 16*15 0.951	1056 32*33 0.954	288 4*8*9 0.946

6. 32극 36슬롯 BLDC 전동기의 구조적인 특징과 회전 원리

32극 36슬롯 BLDC 전동기의 대칭성을 이용하여 1주기에 해당하는 기계각 90°에서의 구조를 직선상으로 전개하여 그림 7에 나타내었다.[9]

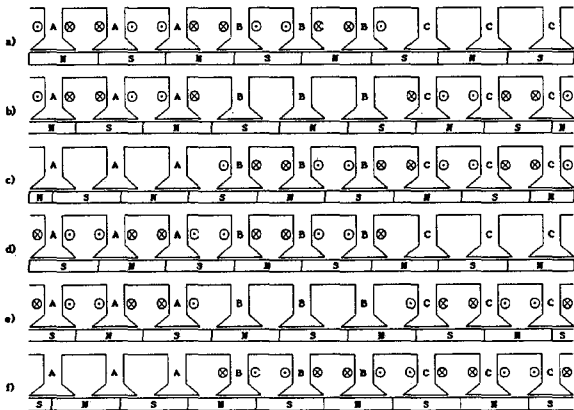


그림 7 32극 36슬롯 외전형 BLDC 전동기의 회전 원리
Fig. 7 Rotation principle of 32-pole 36-slot BLDC motor.

32극 36슬롯 BLDC 전동기도 기존의 전동기와 마찬가지로 홀소자가 영구 자석의 회전에 따른 자극의 변화를 검출하여 각 상에 전류를 흐르게 한다. 따라서 각 상의 전류는 전기적으로 120° 동안 도통하게 된다. 3상 32극 36슬롯 구성의 경우 1회전당 정류(commutation)는 6회 (32극 36슬롯인 경우 1회전당 $6 \times 4 = 24$ 회 정류)이므로 코일의 이용 효율이 높고 전동기의 효율도 높다. 그러나, 고정자가 36슬롯으로 되어 있으므로, 대칭적으로 권선을 감을 수 없어 힘의 분포가 비대칭적으로 된다는 단점이 있다.

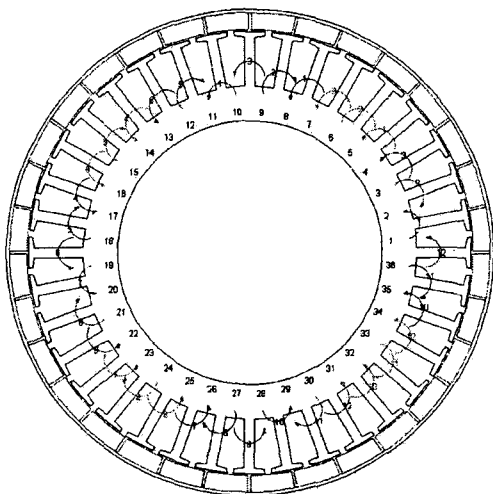


그림 8 32극 36슬롯 BLDC 전동기의 단면도
Fig. 8 Cross-section of 32-pole 36-slot BLDC motor.

32극 36슬롯 전동기의 단면도와 주기해석을 위한 $\frac{1}{4}$ 형상의 전동기 단면도가 그림 8과 그림 9에 나타나 있다.

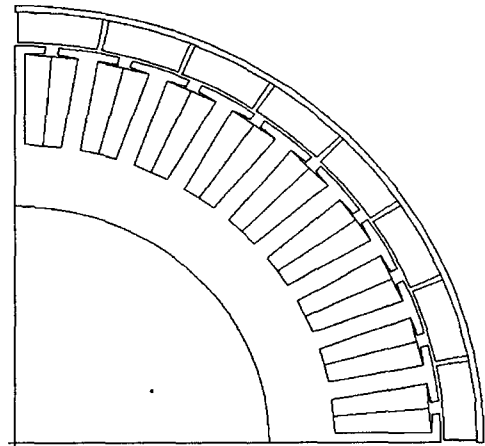


그림 9 시뮬레이션을 위한 1주기(90.) 단면도
Fig. 9 Cross-section of one operiod for simulation.

7. 32극 36슬롯 BLDC 전동기의 F.E.M 해석 결과

유한 요소법에 의한 32극 36슬롯 외전형 BLDC 전동기의 해석 결과는 다음과 같다. 그림 10은 해석 모델의 분할된 요소를 나타내고 있으며, 전체 요소 수는 10,768 개이다

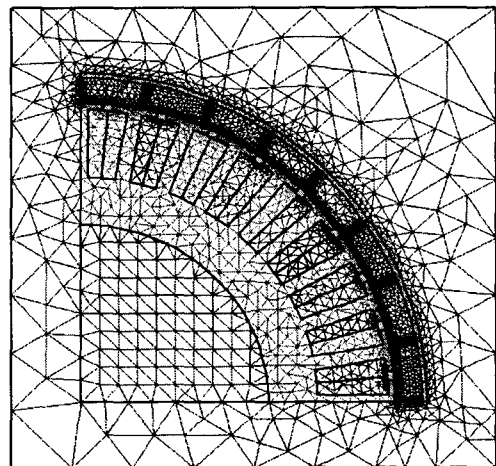


그림 10 제안된 모델의 요소 분할도
Fig. 10 Mesh of the proposed model.

그림 11은 무부하 때의 시간에 따른 토오크와 스피드 곡선으로 최대 속도는 580[rpm]이며, 토오크는 0으로 잘

수렴하고 있다. 24극 36슬롯 BLDC 전동기에 비해 리플이 상당히 작음을 알 수 있다.

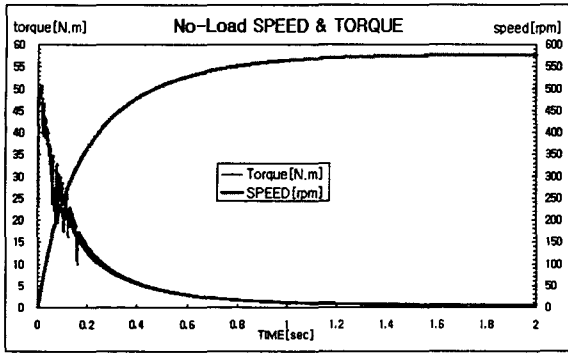


그림 11 무부하 특성 곡선
Fig. 11 No-load characteristic curve.

그림 12는 전동기의 T-N-I (토크-속도-전류) 커브로, 32극 36슬롯 외전형 BLDC 전동기의 시뮬레이션 결과 값을 나타낸 것이다. 최대 속도는 580[rpm] 정도이며, 500[rpm]일 때의 토크값은 4[N.m] 정도임을 알 수 있다.

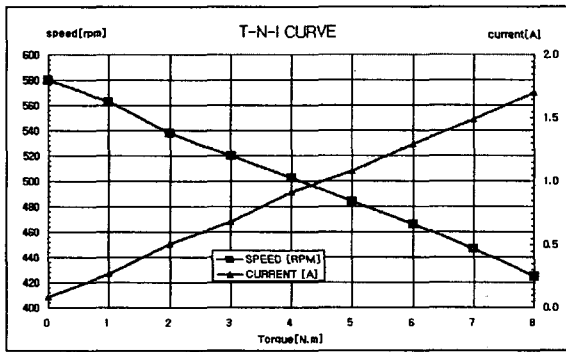


그림 12 32극 36슬롯 BLDC 전동기의 T-N-I CURVE
Fig. 12 T-N-I CURVE of 32-pole 36-slot BLDC motor.

그림 13은 90° 회전한 경우의 자속 밀도를 나타낸 그림으로 포화영역이 없음을 알 수 있다.

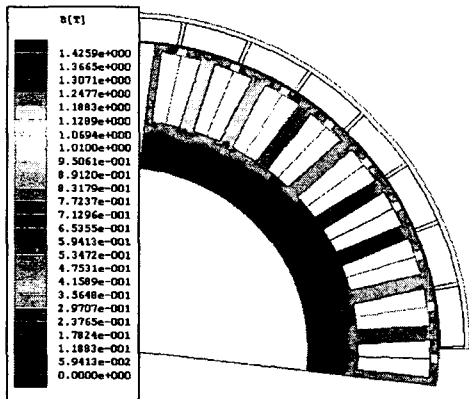


그림 13 자속 밀도
Fig. 13 Flux density.

그림 14는 코깅 토크를 나타낸 것으로 크기는 0.02[N.m] 정도이며, 이것으로부터 32극 36슬롯 BLDC 전동기의 500[rpm]일 때의 토크 리플은 0.5% 정도임을 알 수 있다. 이 값은 24극 36슬롯 BLDC 전동기의 토크 리플에 비해 상당히 작은 값이다.

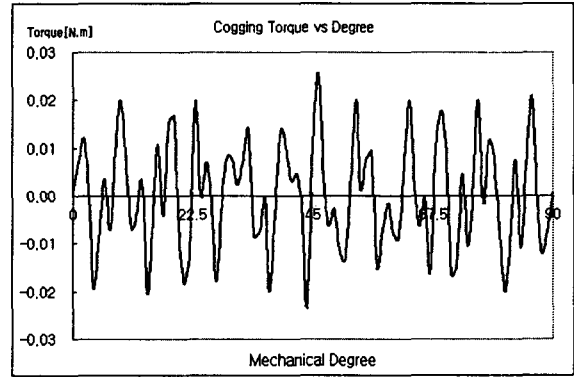


그림 14 코깅 토크
Fig. 14 Cogging Torque.

8. 결 론

그림 15 ~ 그림 18은 24극 36슬롯 BLDC 전동기와 32극 36슬롯 BLDC 전동기의 특성 곡선을 비교해 놓은 것으로, model 1은 24극 36슬롯 전동기를, model 2는 32극 36슬롯 전동기를 나타낸다.

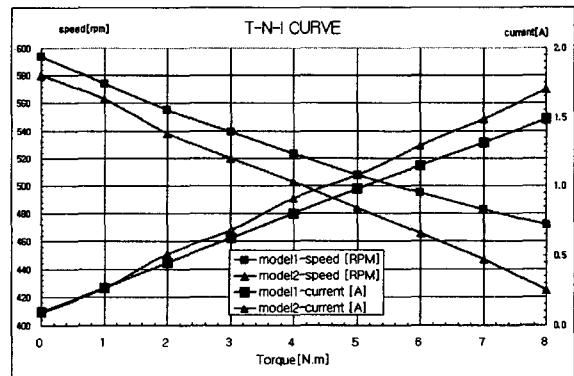


그림 15 T-N-I CURVE 비교
Fig. 15 Comparison of T-N-I CURVE.

그림 15는 두 전동기의 T-N-I CURVE 를 나타낸 것으로, 두 전동기의 특성이 토크 5[N.m]일 때 507[rpm]과 485[rpm]으로 오차범위 4% 정도로 매우 비슷함을 알 수 있다. model 1·2의 최대 속도는 각각 593[rpm]과 580[rpm]이며, 속도 500[rpm] 일 때의 토크는 5.2[N.m]과 4[N.m]이다. 그리

고 그림 16에서 알 수 있듯이 최대 토오크는 40[N.m]와 50[N.m]로 model 2가 model 1에 비해 10[N.m] 정도 크다. 그림 17은 두 전동기의 코깅 토오크를 비교해 놓은 것으로 각각 0.09[N.m]와 0.02[N.m]이다. model 2의 코깅 토오크는 model 1에 비해 78% 정도 감소하였으며, 토오크 리플은 500[rpm]에서 0.5% 로서 77% 정도 감소하였다. 이들을 종합하여 표4에 나타내었다.

그림18은 model 1과 model 2의 전기각 360°에서의 한 상당 한 턴수(권선수 1)에 해당하는 역기전력 파형을 비교해 놓은 것으로서, model 2가 model 1에 비해 상당히 구형파에 가깝게 개선되었음을 알 수 있다. 또한 기존 전동기는 코깅 토오크를 줄이기 위하여 그림 2와 같이 영구자석의 모서리를 둥글게 처리하였으나, 제안된 모델의 경우에는 영구자석의 모서리를 둥글게 처리하지 않아도 기존 전동기에 비해 코깅 토오크가 현저히 저감되었음을 알 수 있다.

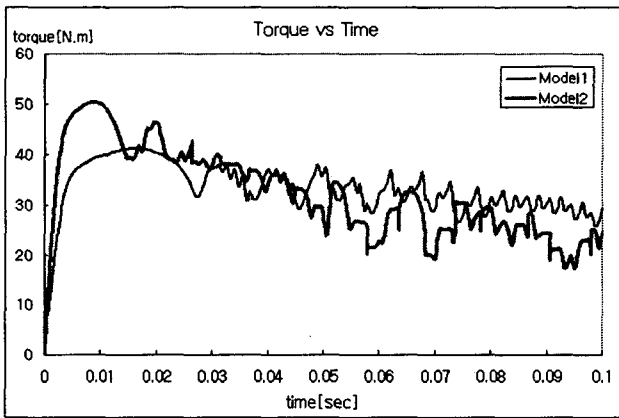


그림 16 최대 토오크 비교
Fig. 16 Comparison of the profile of maximum torque.

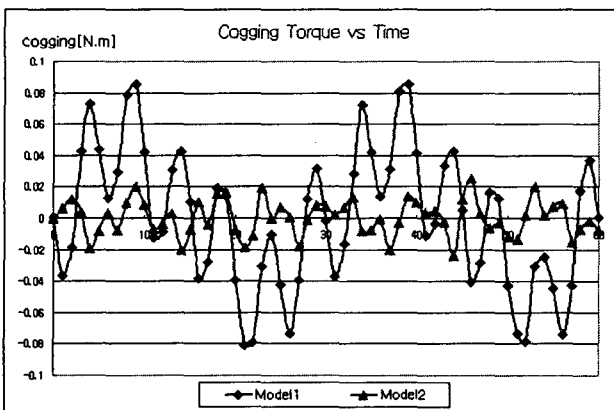


그림 17 코깅 토오크 비교
Fig. 17 Comparison of the profile of cogging torques.

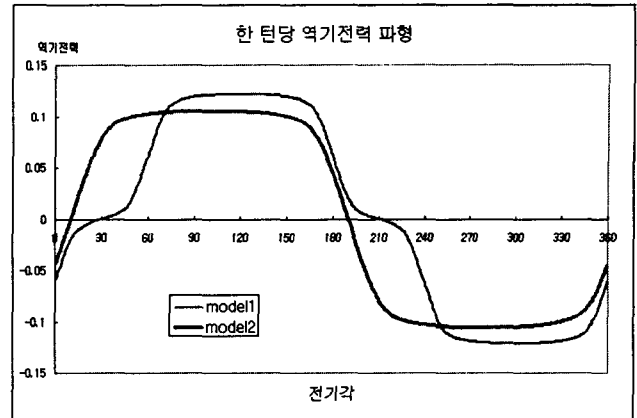


그림 18 상당 턴당 역기전력 파형
Fig. 18 Back emf wave form per phase per turn.

표 4 두 전동기의 특성 비교

Table 4 Comparison of the characteristics of the motors.

특성 model	T_{max} [N.m]	N_{max} [rpm]	T_{500rpm} [N.m]	$T_{cogging}$ [N.m]	T_{ripple} [%]
24극 36슬롯	40	593	5.2	0.09	1.73
32극 36슬롯	50	580	4	0.02	0.5

T_{max} : 최대 토오크 T_{500rpm} : 500rpm 일 때의 토오크

$T_{cogging}$: 코깅 토오크 T_{ripple} : 토오크 리플

N_{max} : 최대 속도

이상을 종합해 볼 때, 코깅 토오크의 감소와 역기전력 파형의 개선으로 인한 토오크 리플의 감소로 24극 36슬롯 BLDC 전동기에 비해 32극 36슬롯 BLDC 전동기의 성능이 발생된 토오크는 줄어들었지만 정속운전이 요구되는 현재의 목적에는 좀더 부합된다고 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

참 고 문 헌

[1] 임달호, “電氣界의 有限要素法”, 東明社, 1987.
 [2] S. J. Salon, Finite Element Analysis of Electrical Machines, Kluwer Academic Publishers. 1995.
 [3] Jianming Jin, The Finite Element Method In Electromagnetics, John Wiley & Song, Inc. 2002.
 [4] Takeo Ishikawa, Gorden R. Slemon. "A Method of

Reducing Ripple Torque in Permanent Magnet Motors Without Skewing", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.29, No.2, pp.2028~2031, March 1993.

- [5] K.Goto and K. Kobayashi, "An Analysis of Cogging Torque of a DC Motor and a New Reducing Technique, "Trans IEE Japan, vol. 103-B, no.11, pp.711-718, 1983.
- [6] Z. Q. Zhu and David Howe, "Influence of design parameters on cogging torque in permanent machines", IEEE Trans on Energy Conversion, vol.2, pp.1237-1242, 1999.
- [7] J. Cros, P.Viarouge, "Synthesis of high performance PM motors with concentrated winding", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 17, No.2, pp 248-253, June 1999.
- [8] J. R. Henderson Jr. and T. J. E Miller, Design of brushless permanent magnet motor, Oxford, 1994.
- [9] T.J.E. Miller, "Brushless Permagnent-Magnet and Reluctance Motor Drives ", Clarendon Press, 1989.

저 자 소 개



김 제 민 (金 在 民)

1977년 8월 12일생. 2003년 중앙대학교 전자전기공학부 졸업. 2005년 2월 동대학원 석사. 현재 LG전자 DA연구소 연구원.

Tel. : (02)818-2922

Fax : (02)867-9629

E-mail : wingull@lge.com



장 철 혁 (張 哲 赫)

1975년 6월 4일생. 2003년 중앙대학교 전자전기공학부 졸업. 2003년~현재 동대학원 석사과정.

Tel. : (02)820-5291

Fax : (02)822-2571

E-mail : reserv@hanmail.net



정 태 경 (鄭 泰 庚)

1957년생. 1981년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1983년 동대학원 석사. 1987년 2월 동대학원 박사. 1986년~1988년 대우중공업 중앙연구소 선임연구원. 1991년~1992년 7월, 미국 Harvey Mudd College Visiting Scholar. 1988년~현재 중앙대 전자전기공학부 교수.

Tel. : (02)820-5291

Fax : (02)822-2571

E-mail : tkchung@cau.ac.kr