

세탁기용 영구자석 동기전동기의 특성 향상에 관한 연구

(The Study on the improvement of Characteristics of Permanent Magnet Synchronous Motor for Washing Machine)

정대성*

(Dae-Sung Jung)

Abstract

IPMSM(Insert Permanent Magnet Synchronous Motor) is a very high degree of freedom in the design according to the permanent magnet insertion position. And the performance of IPMSM is affected a lot on barrier shape which determines the magnetic flux path from magnet. Thus the position of permanent magnet and the barrier shape has to be designed by considering both specification and operation condition.

In the paper, the permanent magnet and barrier shape which is suitable for direct drive motor of washing machine has been studied. In addition, in order to verify the validity of the study, the test was evaluated by making a prototype motor.

Key Words : IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor), DD(Direct-drive), FEM(Finite Element Method)

1. 서 론

최근 공동주택에서의 이웃집 소음문제나 생활 패턴 변화에 따른 새벽 또는 야간 세탁 등으로 인해 세탁기의 저소음화가 강하게 요구되고 있다. 지금까지 세탁기는 저소음화를 위해 다양한 시도가 실행되었으나 작은 개선으로는 한계가 있어 DD(Direct Drive)방식이 필요하게 되었다.

국내에서 사용되고 있는 대부분의 세탁기는 그림 1에서 보여 주는 것과 같이 전동기, 벨트, 풀리, 기어를 이용하여 부하에 토크를 전달하는 기구가 채용되어 왔다. 이 구성은 비교적 전달효과도 좋고 모터의 토크를 효과적으로 이용할 수 있는 반면, 동력 전달 과정 중 토크 손실이 발생되고 이로 인해 세탁력 저하, 에너지 낭비 등이 발생한다. 또한 전달기구에서 발생하는 마찰 기계음의 저감에는 한계가 있고 벨트 마모 등이 발생한다. 게다가 이러한 전달기구를 이용하게 될 경우 부하의 회전축과 전동기의 회전축이 동일 회전축에 위치하지 않아서 이로 인한 세탁기의 진동, 소음 증대에 대해서는 효과적인 대책을 세우기가 매우 어렵다[1-2].

* Main author : Professor, Department of Smart Convergence, Yonam Institute of Digital Technology

Tel : 055-751-2198, Fax : 055-751-2197

E-mail : campus0191@yc.ac.kr

Received : 2015. 7. 10

Accepted : 2015. 9. 21

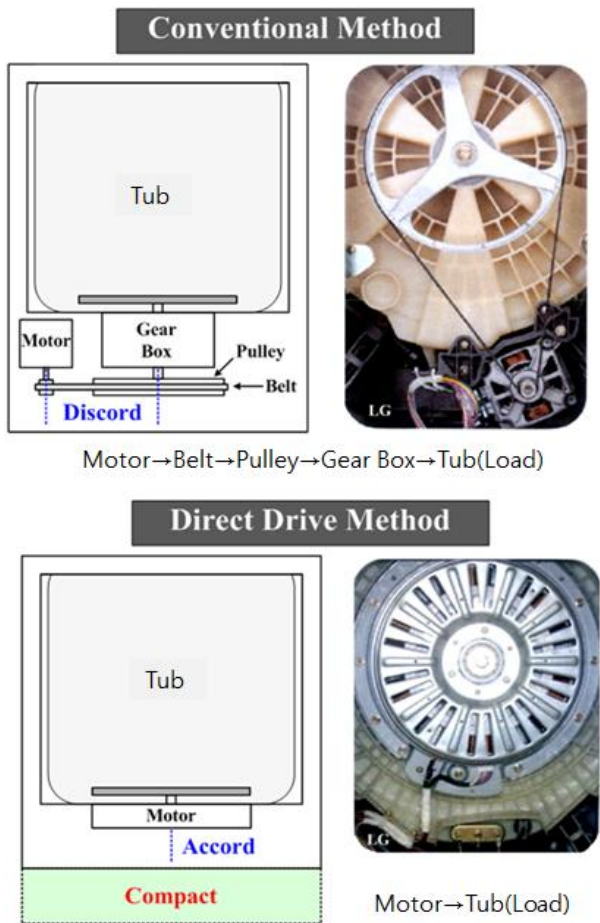


Fig. 1. Washing machine mechanism

DD방식은 동력전달 구조가 간단하여 동력 전달 과정 중 발생하는 토크 손실이 없어 에너지효율 극대화 및 세탁력을 강화시킬 수 있다. 또한 전달 장치가 제거됨으로서 저소음, 저진동, 소형화, 고속회전이 가능하고 전동기 회전축과 부하축이 일치하기 때문에 이에 따른 진동을 저감시킬 수 있다. 그리고 세탁기 사용자 안전을 확보하기 위해 긴급 시 전동기를 반드시 정지할 필요가 있다. 기존 기어, 벨트를 이용한 세탁기에서는 전동기에서 브레이크를 발생시키면 벨트에서의 슬립이라는 불확정 요소가 있는 시스템에서는 전자 브레이크 채용은 어렵기 때문에 기계식 브레이크가 적용되어 세탁기 구조가 복잡하게 된다. 하지만 DD 세탁기에서는 이러한 개념 없이 전동기에 브레이크 기능을 채용할 수 있다. 이 브레이크 모드에서는 인버터 회로의 파워소자의 전류용량 등을 고려하여

과대한 전류가 흐르지 않는 범위에서 소정의 정지시간이 되도록 한다. 하지만 이러한 브레이크 기능 및 속도 제어를 할 수 있는 인버터가 필요하고 세탁 시 큰 토크가 필요하기 때문에 이에 따른 모터 자체의 소음이 커지는 경향이 있다[3].

본 논문에서는 전기세탁기 직접 구동용 전동기의 목표 사양을 정하고 특성 향상을 위한 영구자석 매입형 동기전동기를 설계하였다. 특히 소음, 진동에 영향을 주는 코깅토크, 토크리플, 정현적인 역기전력 특성을 향상시키기 위해서 극호비 설계, 배리어 설계를 진행하였으며 d-q축 인덕턴스를 이용하여 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크 비율에 따른 특성을 분석하였다. 또한 본 논문의 타당성을 검증하기 위해 설계된 모델을 제작하여 평가하였다.

2. 본 론

2.1 전기세탁기의 부하특성

본 절에서는 전기세탁기 영구자석 전동기 설계에 앞서 세탁기의 부하 특성 및 구동 드라이브의 사양을 고찰함으로써 시스템 특성에 잘 어울리는 최적의 전동기를 설계하고자 한다. 세탁기는 크게 세탁모드와 탈수모드 부하조건을 갖는다. 세탁모드에서는 45rpm의 속도로 10초간(20Nm) 정회전하고 8초간 정지한다. 그리고 다시 10초간 20Nm의 힘으로 역회전을 한다. 세탁 모드에서는 이런 운전 특성을 반복 수행한다. 그리고 정지해 있는 상태에서는 세탁물의 정지 마찰력과 각속도의 시간 변화에 의한 부하 토크가 크기 때문에 정상상태보다 큰 부하 토크가 발생한다. 탈수모드는 세탁모드와 행굼모드와 달리 1300rpm, 3Nm 정도의 고속 운전을 한다. 이러한 고속 운전에 의해 세탁물은 세탁조에 붙어서 회전하며 이때 발생하는 원심력에 의해 세탁물 내부의 수분을 제거하게 된다. 세탁물 내에 있는 때나 세제를 제거해야 하는 세탁모드에서는 비교적 저속/고토크가 필요하지만 탈수모드에서는 세탁물 내에 있는 수분을 제거해야 함으로 고속/저토크가 필요하다. 그림 2는 전기세탁기의 일반적인 부하특성을 보여주고 있다.

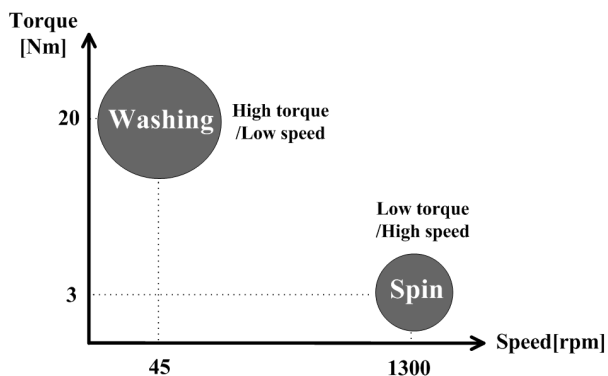


Fig. 2. Load characteristics of washing machine

2.2 영구자석 길이에 따른 특성 분석

영구자석 극호비는 극 간격에 대한 영구자석 폭의 비율을 극호비라 한다. 극호비는 영구자석 폭과 관련되며 극호비에 따라 영구자석 매입형 전동기의 여러 가지 특성들이 바뀌게 되므로 설계측면에서 매우 중요한 설계 파라미터이다. 본 절에서는 영구자석 폭을 38mm, 42mm, 46mm로 하여 극호비에 따른 역기전력, 코깅토크, 토크와 토크 리플에 대해 살펴보았다. 그림 3은 극호비에 따른 역기전력 파형을 보여주고 있다. 이때의 속도는 45rpm이다. 영구자석의 폭이 점점 작아지면 사다리꼴 파형에서 정현적인 역기전력 파형과 비슷한 파형을 갖게 된다. 하지만 영구자석의 폭이 어느 이상 작아지게 되면 삼각형 형태의 파형으로 바뀌면서 정현적인 파형을 벗어나게 된다. 따라서 고조파 성분 분석에 의한 극호비 선택이 필요하다.

영구자석 전동기는 전동기가 정지하고 있는 상태에서 회전자를 움직이려고 할 때 정지 상태를 유지하려는 힘을 갖고 있다. 이를 코깅토크(Cogging torque)라 한다. 코깅토크의 발생원인은 무부하시 영구자석 회전자에 고정자에 정렬하려는 힘 때문이다. 코깅토크는 영구자석을 사용하는 전동기의 진동과 소음의 원인중 하나로 작용하고 모터의 제어성을 약화시키는 기능을 하기 때문에 저감 시켜야 한다[4]. 하지만 실질적으로 어느 범위까지 낮추어야 전동기 특성에 영향이 없는지를 제시한 연구는 보고된 적이 없다. 다만 코깅토크가 지나치게 높으면 전동기의 기동을 어렵게

하고 토크리플을 발생시키는 원인이 될 수도 있으므로 최대 토크의 1%정도로 제한하고 있다. 코깅토크가 최대 토크에 1% 정도일 때에는 구동과 토크 리플에서의 영향은 거의 미비하다. 본 논문에서의 코깅토크 목표치는 0.25Nm로 설정하였다. 그림 4는 38mm, 42mm, 46mm일 때의 코깅토크를 나타내고 있으며 38mm에서 가장 작은 값을 나타내었다.

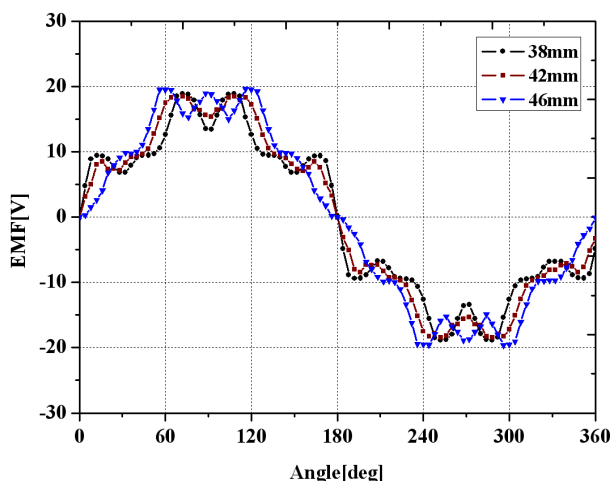


Fig. 3. EMF according to permanent magnet width

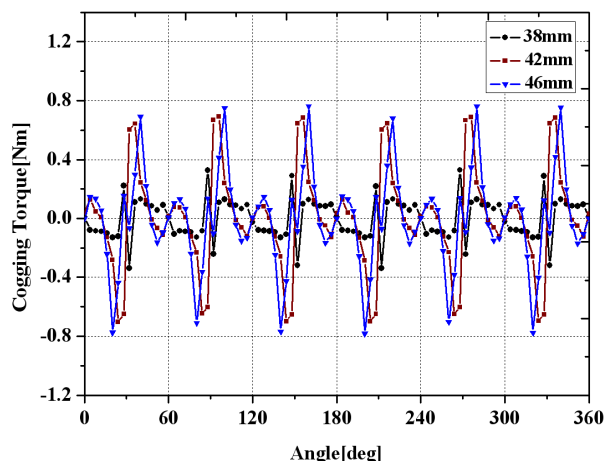


Fig. 4. Cogging torque according to PM width

그림 5는 정격전류(전류위상각 $\beta=20\text{deg}$)가 인가되었을 때 영구자석 폭에 따른 토크 특성을 나타내고 있다. 그림 5에서 보는 것과 같이 토크에 리플 성분이 많이 포함되어 있는 것을 볼 수 있다. 토크 리플의 원인으로서는 정현적인 역기전력 파형을 갖지 못할 때, 공급

전압에 시간 고조파가 포함되어 있을 때, 그리고 자기적인 돌극 구조로 인한 릴럭턴스 토크 등에 의해 발생된다. 토크 리플은 전동기의 소음과 진동을 유발한다. 토크 리플을 저감시키는 방법은 고정자 치와 회전자 영구자석의 형상 설계를 통해 정현적인 역기전력 파형 설계와 폐 슬롯 설계, 적절한 릴럭턴스 토크 이용 등을 통해 감소시킬 수 있다. 표 1에서 영구자석 폭에 따른 토크 리플율, THD(Total Harmonics Distortion), 코깅 토크를 보여주고 있다.

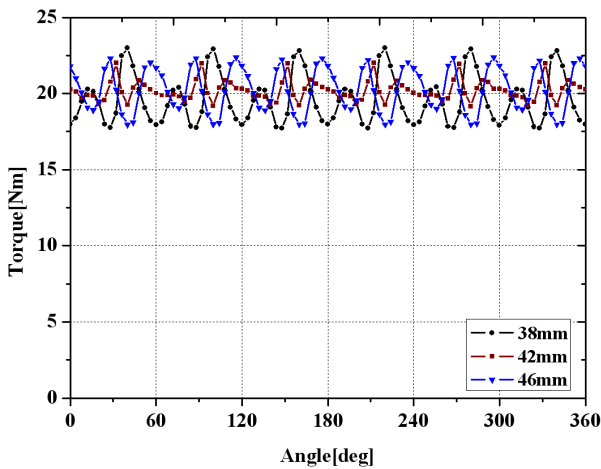


Fig. 5. Torque according to PM width

Table 1. Characteristics results according to PM width

	Cog(Nm)	THD(%)	Ripple ratio(%)
38mm	0.67	25.85	26.9
42mm	1.4	15.63	14.1
46mm	1.54	12.55	21.7

2.3 배리어 길이에 따른 특성 분석

영구자석 매입형 전동기는 인가전압이 허용하는 범위까지 최대토크를 이용하여 정토크 운전을 한다. 인가전압의 제한치에 도달하면 약자속제어를 하여 정출력 운전을 하게 된다. 따라서 최대토크를 구하기 위한 특성해석 뿐만 아니라 최대발생토크를 결정하는 전류 위상각, 전압 제한치에 도달하는 속도, 약자속 또는 정출력 운전이 가능한 최대속도 등 영구자석 매입형 전

동기의 전반적인 제반 특성을 해석하고 분석하는 것이 필요하다. 이러한 제반 특성은 영구자석에 의한 쇄교 자속 ψ_a 와 L_d, L_q 에 따라 현저히 달라진다. 아래 식은 영구자석 매입형 동기전동기의 토크식을 나타내고 있다[5-6].

$$\begin{aligned}
 T &= P_n \{ \psi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \} \\
 &= P_n \left\{ \psi_a i_a \cos\beta + \frac{1}{2} (L_q - L_d) i_a^2 \sin 2\beta \right\} \\
 &= T_m + T_r
 \end{aligned}$$

일반적으로 마그네틱 토크를 향상시키기 위해서 영구자석 사용량을 증가시키는 방법이 대부분이다. 즉 식 1항에 나타낸 ψ_a 를 키우는 것이다. 이 방법은 영구자석 사용량 증가로 인해 가격상승을 불러 온다. 그리고 2항에 나타낸 릴럭턴스 토크를 높이기 위해 Double layer를 사용하여 릴럭턴스 토크를 키우기도 한다. 하지만 이 방법은 마그네틱 토크가 줄기 때문에 원했던 출력을 얻지 못할 수도 있고 동일한 출력을 내기 위해 전동기 사이즈가 커질 수도 있다. 따라서 적절한 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크의 배분이 필요하다.

본 절에서는 배리어 길이에 따라 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크가 어떤 양상을 보이는지 검토하고 세탁기 사양에 맞는 배리어 길이를 설계하였다.

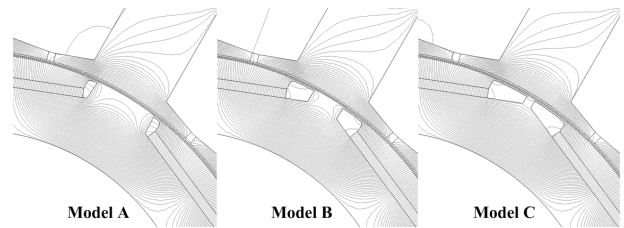


Fig. 6. Leakage flux according to barrier length

영구자석 매입형 전동기에서 배리어의 역할은 영구자석에서 나오는 자속의 누설을 막아 코일과의 쇄교 자속량을 늘려주는 기능을 한다. 그리고 배리어 길이에 따라 ψ_a 와 L_d, L_q 가 변하게 된다. 따라서 영구자석 사용량 증가 없이 마그네틱 토크를 향상 시키

고 릴럭턴스 토크도 높일 수 있는 설계가 배리어 설계이다.

본 절에서는 배리어 길이에 따라 ψ_a 와 L_d, L_q 를 해석하고 이에 따른 역기전력, 최대토크 결정하는 전류 위상각 등 각 파라미터가 특성에 미치는 영향을 분석하였다. ψ_a 와 L_d, L_q 는 유한요소법으로 계산하였다. 그림 6은 동일한 정격 전류 인가 후 배리어 길이에 따른 각 모델의 누설 자속을 보여 주고 있다. 배리어 길이가 길어지게 되면 리브를 통해서 누설되는 자속양이 줄게 되어 전기자 코일과 쇄교하는 ψ_a 값이 증가하게 된다. 그래서 그림 7에서 보여 지듯이 ψ_a 에 의한 마그네틱 토크는 배리어 길이가 증가할수록 증가한다. 하지만 배리어 길이가 증가하여 q축 인덕턴스 자료가 좁아지고 포화되면서 돌극차가 작아져 릴럭턴스 토크는 감소하고 전체 토크도 감소한다. 이와 반대로 배리어 길이가 작게 되면 누설이 많아져서 ψ_a 에 의한 마그네틱 토크는 감소하지만 q축 인덕턴스 증가로 인해 릴럭턴스 토크가 증가하고 최대토크를 발생시키는 전류 위상각도 10°, 15°, 20°로 증가한다. 이와 같이 최대토크에서 릴럭턴스 토크 성분의 증가는 같은 토크 발생 시 입력 전류가 작아지게 되어 동손을 줄일 수 있다. 그리고 속도에 따른 역기전력 상승이 전압제한 이내로 되는 범위를 넓힐 수 있어 가변속 범위도 확대시킬 수 있다. 하지만 무작정 릴럭턴스 토크를 증가 시키게 되면 같은 전동기 체적에서 출력을 만족하지 못할 수도 있으므로 전동기 사이즈와 적용분야에 따라 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크를 적절히 배분하는 설계가 필요할 것으로 사료된다. 표 2는 배리어 길이에 따른 결과를 나타내고 있다. 모델 A는 모델 C에 비해 ψ_a 값이 약간 감소했으며 돌극차는 최대 2.6배 증가하였다. 역기전력 및 역기전력 THD를 고려하여 모델 B로 선정하여 상세 설계하였다.

그림 8은 i_d, i_q 전류에 따른 인덕턴스를 보여주고 있다. 전류가 증가하게 되면 q축 자로는 포화되어 L_q 는 점점 낮아지는 반면 d축 자로는 영구자석 및 배리어 구조로 인해 자기저항이 커서 강판이 포화되어도 L_d 는 크게 변하지 않는다. 그리고 L_q 가 점점 낮아짐에

따라 돌극차도 감소하게 된다.

그림 9는 동일한 전류를 인가한 후 전류 위상각 β 를 변화 시켰을 때 인덕턴스를 보여주고 있다. 같은 전류가 인가되더라도 전류 위상각에 따라 포화 정도가 달라지기 때문에 L_d, L_q 역시 변화한다.

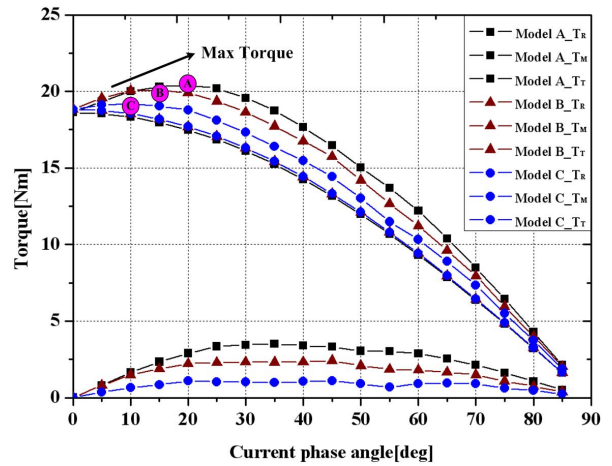


Fig. 7. Torque characteristics about the current phase angle

Table 2. Results according to barrier length

	Barrier leng(mm)	ψ_a (Wb)	EMF (Vrms)	THD (%)
Model A	2.5	0.9696	12.62	0.54
Model B	6.7	0.981	12.82	0.69
Model C	10	0.9809	12.83	0.69

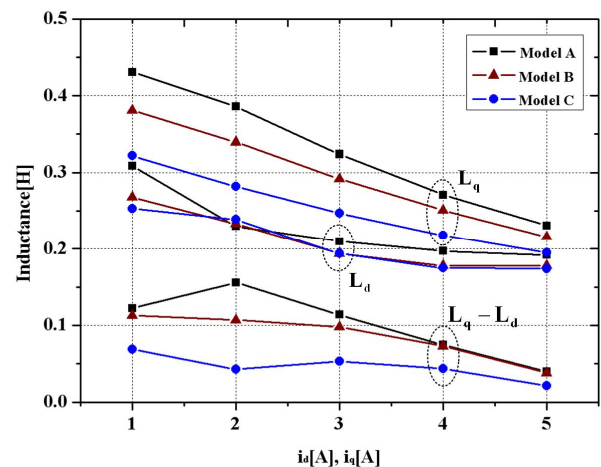


Fig. 8. Inductance about the id-iq

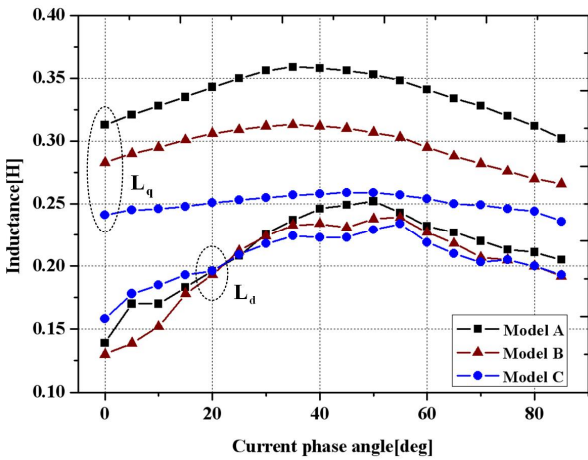


Fig. 9. Inductance about the current phase angle

Table 3. Operation profile of washing load

	Washing	Spin
Speed(rpm)	45	1300
Torque(Nm)	20	3.1
Rate current(Arms)	4.34	4.34
Current angle(deg)	20	76
Copper loss(W)	106	

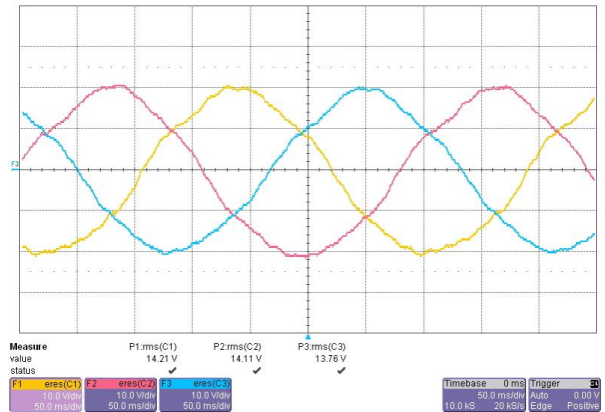
표 3은 세탁 및 탈수 모드에서의 운전 특성 및 사양을 보여주고 있다. 전기세탁기용 IPMSM 설계 시 가장 먼저 결정해야 할 것이 기저 속도이다. 기저 속도 선정은 부하 특성과 전압제한 전류제한에 따라 달라지고 정출력 속도 영역 CPSR(Constant Power Speed Range)에 기준이 되기 때문이다.

세탁기 부하는 그림 2와 같이 세탁 부하와 탈수 부하가 동시에 존재하므로 정격을 선정하기가 애매한 부하 조건을 가지고 있다. 만약 일반적인 전동기 설계 처럼 기저 속도를 45rpm에서 선정하게 탈수모드의 운전특성을 만족하지 못한다. 따라서 세탁 모드와 탈수 모드를 동시에 만족하는 기저 속도 선정이 필요하다. 본 설계에서는 400rpm를 기저 속도로 선정하여 설계하였다.

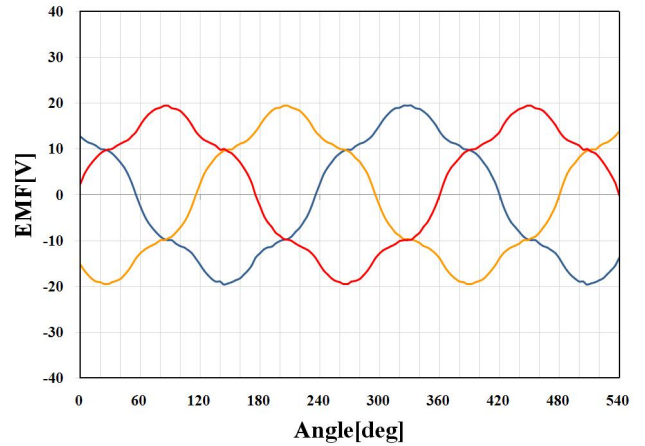
2.4 실험결과 고찰

영구자석 및 배리어 형상에 따른 특성을 분석하고

설계된 모델을 시제작하여 평가하였다. 무부하 역기 전력 측정방법은 전동기의 단자를 오픈시킨 상태에서 전동기의 회전자를 일정한 속도로 회전시키면 전동기 단자 사이에 전압이 발생하게 되고 이를 오실로스코프를 이용하여 측정하면 된다. 역기전력 측정은 주 운 전 속도인 45rpm의 속도에서 측정하였으며 그림 10에 실험결과와 해석결과를 나타내었다. 측정된 역기 전력의 실효치는 14.11V이며, 해석 결과의 역기전력 실효치는 14.37V로 약 1.8% 차이로 잘 맞는 것을 확인하였다.



(a) Measurement result



(b) Analysis result

Fig. 10. EMF waveform of IPMSM

세탁 시 특성을 만족하는지를 시험하기 위해 다이아 모미터를 45rpm으로 회전시킨 후 정격전류를 인가하고 전류 위상각을 변화 시키면서 토크를 측정하였다.

해석결과와 측정결과는 잘 맞는 것을 확인하였다. 하지만 최대토크를 발생시키기 위한 전류위상각은 다소 차이를 보였다. 그림 11은 설계된 모델을 제작하여 다이나모미터에 장착한 그림을 보여주고 있다.

Table 4. Torque measurement of IPMSM

45rpm	
Analysis	Measurement
20.31Nm	20.3Nm

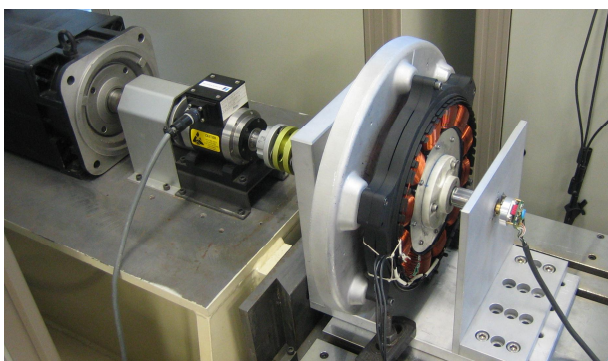


Fig. 11. Manufactured IPMSM for washing machine

3. 결 론

본 연구에서는 전기세탁기용 영구자석 매입형 동기 전동기를 설계하였다. 영구자석은 회전자 코어에 삽입되는 위치 및 형상에 따라 전동기의 특성이 달라지며 배리어 형상은 전동기의 특성 뿐만 아니라 고속회전시 회전자 안전율에도 기인하는 것이기 때문에 영구자석 및 배리어 형상설계는 매우 중요하다. 본 논문에서는 영구자석 및 배리어 형상에 따른 특성을 분석하였으며 세탁모드 및 탈수모드를 동시에 만족하는 영구자석 및 배리어 형상 설계를 하였다. 이상의 연구 결과를 통해 적용 분야에 적합한 영구자석 및 배리어 형상 설계하는데 있어 매우 유용할 것이라 사료된다.

References

- [1] Kim Young Kwan, "A study on the characteristics design of direct drive permanent magnet synchronous motor for domestic electric washing machine," Hanyang University doctoral thesis, 2008.
- [2] Maxime R. Dubois, Henk Polinder, Jan A. Ferreira, "Contribution of Permanent-Magnet Volume Elements to No-Load Voltage in Machines", IEEE Transactions. On Magnetics, vol. 39, no. 3, May 2003.
- [3] Human Resource Development Center for Electric machine and Devices, "DD (Direct Drive) Motor design and control", 2007.
- [4] Masayuki Sanada, Kenji Hiramoto, Shigeo Morimoto, Yoji Takeda, "Torque ripple improvement for synchronous reluctance motor using an asymmetric flux barrier arrangement," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 40, No. 4, July/August 2004.
- [5] Hanyang University Energy Conversion Laboratory, "Desing and Control of IPMSM", Inter Vision, 2007.
- [6] A. Kioumars, M. Moallem, B. Fahimi, "Mitigation of Torque Ripple in Interior Permanent Magnet Motors by Optimal Shape Design," IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 42, NO. 11, NOVEMBER 2006.

◇ 저자소개 ◇



정대성 (鄭大成)

1977년 4월 10일생. 2009년 한양대 전기 공학과 졸업(박사). 2009~2014년 현대 모비스 연구개발 본부 선임연구원. 2014년 ~현재 연암공업대학 스마트융합학부 조교수.

Tel : (055)751-2198

E-mail : campus0191@yc.ac.kr