

차량용 Built-in 청소기용 SRM 드라이브 시스템 개발

이영수¹, 노정민¹, 이대진¹, 김재혁[†], 선한걸², 한만승²

Development of SRM Drive System for Built-in Car Vacuum Cleaners

Young-Soo Lee¹, Jeongmin Noh¹, Daejin Lee¹, Jaehyuck Kim[†],
Han-Geol Seon², and Man-Seung Han²

Abstract

This paper discusses the design and control of a switched reluctance motor (SRM) drive system for a built-in car vacuum cleaner. The growing popularity of outdoor activities and recreation has led the automobile industry to expand technologies that increase the convenience of vehicles, and thus, a built-in car vacuum cleaner was introduced. However, the existing DC motor of a vacuum cleaning system has several disadvantages, such as maintenance cost and lifespan issues of its commutator-brush structure. An SRM can be a good alternative to the existing DC motor because of its high-speed capability, long lifespan, low maintenance cost, and high efficiency, among other advantages. A prototype SRM drive is designed and manufactured to verify its feasibility for use in a built-in car vacuum cleaning system. Dynamic simulation is conducted to determine the optimal switching angle for maximum efficiency and minimum torque ripple. Load test, noise measurement, and suction-power tests are also carried out.

Key words: Switched reluctance motor, Motor drive, Built-in car vacuum cleaner

1. 서 론

최근 다양한 레저 활동 및 가족단위 야외활동 증가로 인하여 차량의 편리성 및 편의장치에 대한 관심이 증가하고 있고, 그 중 차량 내장형(Built-in) 청소기의 필요성이 점차 대두되고 있다. 최근 혼다(HONDA)사의 북미 출시 미니밴에 내장형 청소기(Built-in vacuum cleaner)가 장착되어 출시되고 있으나 청소기 구동용 DC모터의 흡입력 저하, 내구성 및 스파크 문제 등으로 인해 기존의 DC모터를 대체할 모터에 대한 연구개발이 필요성이 제기되고 있다. 최근 프리미엄 가정용 청소기에 적용되고 있는 BLDC 모터를 적용할 수도 있으나 저가용 차량용 청소기에 적용하기에는 가격 상승의 요인

이 있다.

스위치드 릴럭턴스 모터(Switched Reluctance Motor, SRM)는 회전자에 영구자석 및 권선이 없어 가격이 저렴하면서도 내환경성이 우수하며 구조가 단순하여 높은 흡입력을 위한 고속운전이 요구되는 진공청소기 모터에 적합하다^[1-2]. 이와 관련하여 국내·외에서도 진공청소기용 단상 SRM 및 2상 SRM에 대한 다양한 연구를 진행한 바가 있으며^[3-4], 진공청소기분야 뿐만 아니라 치의료용 드릴과 같은 초고속, 초소형 기기분야에서도 연구가 진행되고 있다^[5-6]. 또한 차량용 팬 등의 전장분야에도 적용이 검토되었으며^[7-8], 주요 가격상승 요인 중에 하나인 위치센서를 사용하지 않는 초고속 SRM에 대한 연구 또한 진행된 사례가 있다^[9].

본 논문에서는 차량에 내장된(built-in) 청소기에 적용하기 위한 SRM 및 드라이브 시스템 시제품을 개발하고 청소기 임펠러 기구에 장착을 하여 실제 흡입시험을 통하여 기존의 DC모터 대체 가능성을 파악하고자 한다.

차량용 부품 관련 사업은 생산성 향상, 품질 개선, 신시장 개척, 신제품 출시, 사업구조 개편 등으로 자동차 시장이 성장 추세에 있으며 앞으로도 전망이 밝아 성장세가 지속적으로 이루어 질 것으로 보인다.

Paper number: TKPE-2017-22-3-2

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: jaehkim@wku.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Wonkwang University
Tel: +82-63-850-6733 Fax: +82-63-850-6745

¹ Dept. of Electrical Engineering, Wonkwang University

² KOH-A JUNG GONG Co., Ltd.

Manuscript received Sep. 29, 2016; revised Oct. 18, 2016; accepted Feb. 1, 2017

— 본 논문은 2016년 전력전자학술대회 우수추천논문임

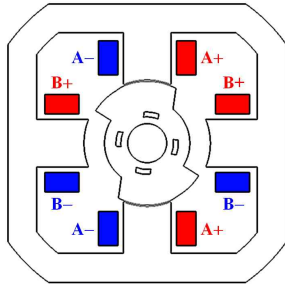


Fig. 1. Structure of a two-phase 4/2 SRM.

TABLE I
SPECIFICATIONS OF THE DESIGN TARGET

Parameter	Value	Unit
Rated torque	0.045	N·m
Phase current	8.85	A(rms)
Maximum utput Power	150	W
Rated Speed	32,000	rpm
Motor Efficiency	65	%

2. 차량용 built-in 청소기용 2상 4/2 SRM

SRM은 고정자와 회전자 이중 돌극형의 구조를 가지며, 회전자에는 권선이나 자석이 없고, 고정자에만 권선이 감겨있다. 일반적으로 회전자의 정격 회전수 및 부하토크에 따라 고정자 상수 (number of phases) 및 고정자와 회전자의 극수(number of poles) 조합이 결정되며, 토크가 발생하지 않는 구간을 피하기 위하여 고정자와 회전자의 극수는 서로 다르게 설계된다. 청소기와 같은 고속 운전을 요구하는 경우 통상적으로 단상 또는 2상의 형상이 고려될 수 있는데, 고정자와 회전자의 극수가 같은 단상 SRM의 경우 구동회로의 가격절감의 장점이 있으나 자기동을 위한 형상의 변형 또는 별도의 장치(자석 또는 보조권선 등)을 필요로 하는 단점이 있다.

차량용 내장형 청소기 구동용 시제품 SRM의 형상은 그림 1과 같이 가정용 청소기를 포함한 고속 회전기에 주로 쓰이는 2상 4/2 구조이며, 차량용 청소기의 요구 출력, 속도, 부하조건, 제작단가 및 제작효율을 고려하여 설계된 시제품 설계제원은 표 2에 표시된 바와 같다.

3. 2상 SRM의 공극 설계

2상 4/2 SRM의 경우 고속회전에 유리하나 자기동(self-starting)을 위한 토크 저감을 고려하여 공극 및 회전자 극호각 설계가 중요한 설계 파라미터가 된다.

2상 SRM의 경우, 회전자의 공극이 일정하다면 그림 2와 같이 인덕턴스 그래프의 기울기가 0이 되어($dL/d\theta = 0$) 토크가 발생되지 않는 구간(dead zone)이 생기게 되고, 이 구간에 회전자 위치해 있다면 초기 기동 시 문제가

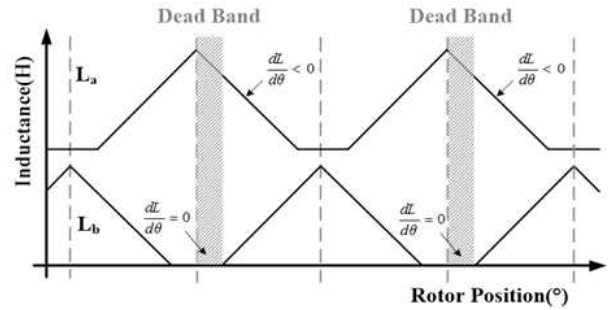


Fig. 2. Inductance profiles of a two-phase 4/2 SRM with uniform air gap.

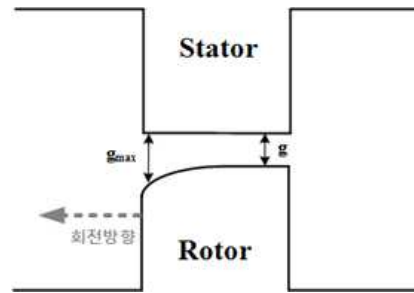


Fig. 3. Non-uniform air gap of a two-phase 4/2 SRM.

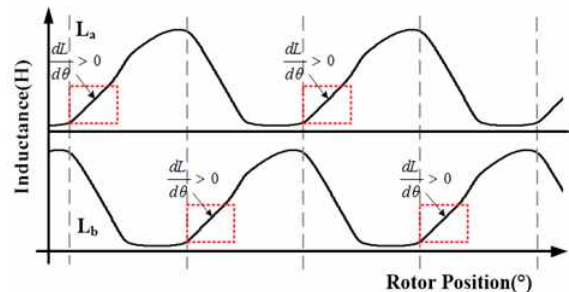


Fig. 4. Inductance profiles of a two-phase 4/2 SRM with non-uniform air gap.

될 수 있다. 이와 같은 토크가 발생되지 않는 구간이 생기는 문제를 해결하기 위하여, 그림 3과 같이 공극을 다르게 설계하고, 고정자와 회전자 정렬 했을 때의 공극에 차이를 둔다.

공극을 다르게 설계하면 그림 4와 같이 인덕턴스 그래프가 비대칭적으로 생성되어 ($dL/d\theta > 0$ 인 구간이 증가), 인덕턴스 그래프의 기울기가 0이 되는 부분이 사라지게 되므로, 회전자 위치가 어떤 초기 위치에 있더라도 기동 토크를 발생시킬 수 있게 된다. 자기동을 위한 공극을 고려하여 설계된 시제품 SRM의 설계 파라미터의 값은 표 2에 표시된 바와 같다.

4. 유한요소해석을 통한 시제품 모터의 자기특성 및 토크특성 추출

시제품 SRM 설계를 검증하고, 고속 운전 제어에 있어

TABLE II
MECHANICAL PARAMETERS OF THE DESIGN TARGET

Parameter	Value	Unit
Number of Stator Pole	N_s	4
Number of Rotor Pole	N_r	2
Stator Out Dimension	D_s	57.1 mm
Rotor Out Dimension	D_r	23.949 mm
Stator Pole Arc	β_s	43.94 deg
Rotor Pole Arc	β_r	86.64 deg
Stator Pole Thickness	C_{th}	9.7 mm
Stator Pole Length	L_s	10.596 mm
Rotor Pole Length	L_r	4 mm
Min. air gap Length	g	0.263 mm
Max. air gap Length	g_{max}	0.476 mm

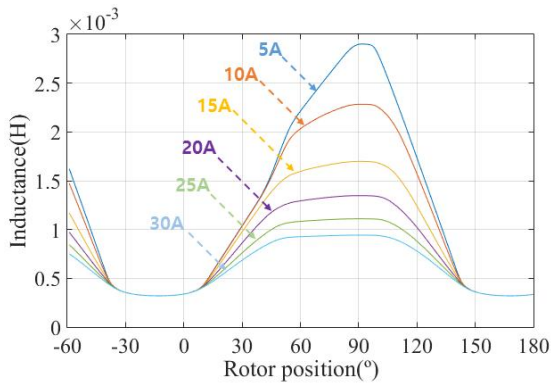


Fig. 5. Inductance profiles of a prototype two-phase 4/2 SRM

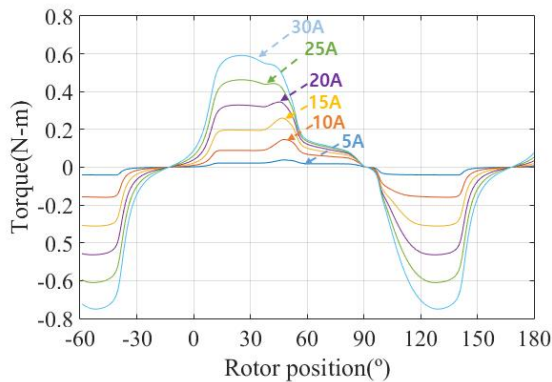


Fig. 6. Torque profiles of a prototype two-phase 4/2 SRM

중요한 스위칭 각을 결정하고 위해서는 다양한 여자전류에 대한 정확한 자기특성(인덕턴스)과 토크특성을 도출하는 것이 중요하다. 유한요소해석(Finite Element Analysis) 프로그램을 통하여 다양한 여자전류에 대하여 회전자 위치에 따른 인덕턴스(Inductance)와 토크(Torque) 데이터를 얻었으며 그림 5는 2상 4/2 SRM에 대한 인덕턴스 프로파일이며 그림 6은 2상 4/2 SRM에 대한 토크 프로파일을 각각 나타낸다. 유한요소해석을 통하여 얻은 회전자-전류-인덕턴스의 자기특성(그림 5)과 회전자-전류-토크의 토크특성(그림 6)은 시뮬레이션 및 고속 정격 속도 운전 시 제어각 튜닝을 위해 사용된다.

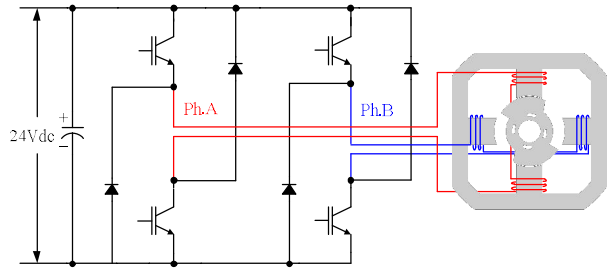


Fig. 7. Asymmetric half bridge converter for a two-phase SRM

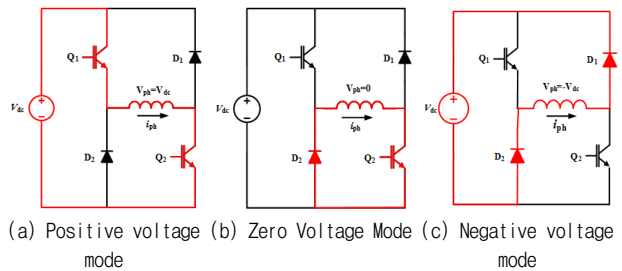


Fig. 8. Operation modes of asymmetric bridge converter.

5. 2상 SRM 구동 컨버터

SRM의 릴럭턴스 토크 발생은 전류의 방향과는 무관하므로 다양한 형태의 컨버터 구성이 가능하나, 제어 성능과 시스템 안정성을 고려하여 그림 7과 같은 비대칭 하프브릿지 컨버터(asymmetric half bridge converter)를 적용하였다. 한 상에 1개의 스위칭 소자만을 필요로 하는 저가형 컨버터의 경우 비용이 절감되어 경제적이지 만^[4], 입력전압이 낮은 차량용 전원에는 적합하지 않다. 2상 SRM 용 비대칭 하프브릿지 컨버터는 4개의 스위칭 소자와 4개의 다이오드로 구성되며 각 상은 독립적인 제어가 가능하고, 한 상이 고장이 날 경우 다른 상에 영향을 끼치지 않는다. 그림 8은 비대칭 하프 브리지 컨버터 동작모드으로써, 각 상의 스위칭 소자와 다이오드의 도통 상태에 따라 한 상에 전달되는 입력 전압 상태에 따라 3가지 (positive, zero, negative) 모드가 있으며 각각 각 상의 자화, 환류, 비 자화 모드에 대응된다.

6. 시뮬레이션 결과

2상 4/2 SRM 드라이브의 동적 특성 및 성능을 검증하고 제어기 알고리즘 튜닝을 위해 실험에 앞서 시뮬레이션을 수행한 결과는 다음과 같다. Matlab/Simulink를 이용하여 2상 SRM 구동 시스템을 모델링 하였고, 시뮬레이션 모델링을 위한 2상 SRM의 수학적 모델을 다음과 같다. SRM의 한 상 권선에 인가된 전압은 저항에 의한 전압강하와 시간에 따른 자속의 변화량을 합과 같다.

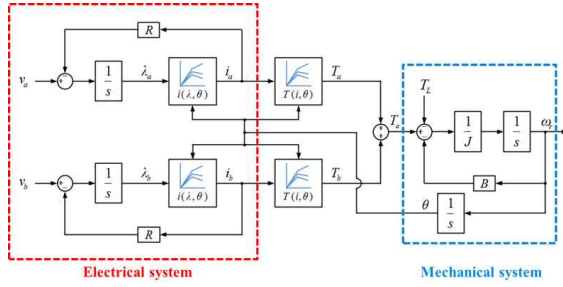


Fig. 9. Block diagram of a two-phase SRM

$$\begin{aligned}
 v &= R_s i + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} = R_s i + \frac{dL(\theta, i)}{dt} i \\
 &= R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{d\theta}{dt} \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \\
 &= R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_m i \quad (1)
 \end{aligned}$$

식(1)에서 v 는 상 권선의 단자 전압, i 는 상 권선에 흐르는 전류, λ 는 쇠교자속이고, R_s 는 상 저항, L 는 상 인덕턴스, θ 는 회전자 위치이며, ω_m 는 회전자의 각속도를 나타낸다. 또한, $R_s i$ 는 저항에 의한 전압 강하이고, $L(\theta, i) \cdot di/dt$ 는 인덕턴스에 의한 전압강하, $i \cdot dL(\theta, i)/d\theta \cdot \omega_m$ 는 역기전력을 나타낸다.

일반적으로 SRM 한 상의 토크 T_e 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (2)$$

또한 토크와 회전자 속도 간의 회전운동방정식은 식(3)과 같으며

$$T_e = B\omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} + T_L \quad (3)$$

B 는 마찰계수, J 는 관성모멘트, T_L 는 부하토크를 각각 나타낸다. 식(1)~식(3)까지의 수학적 모델을 이용한 2상 SRM의 전기적 시스템과 기계적 시스템의 수학적 모델에 대한 블록도는 그림 9와 같다.

고속에서 주로 구동되는 청소기용 SRM의 경우 단일펄스 모드에서 주로 구동되므로, 스위칭각 튜닝이 매우 중요하다. 그림 10 및 그림 11는 최적 턴-온 및 턴-오프 각 튜닝을 위해 상전류의 파형이 변화하는 것을 나타내며 본 논문에서는 2상 4/2 SRM의 최적의 성능을 내기 위한 스위칭 각($\theta_{adv} : 40^\circ$, $\theta_{com} : 40^\circ$)을 정격속도 32,000rpm, 정격토크 0.045N-m, PWM 스위칭 주파수 20kHz 조건에서의 시뮬레이션을 통하여 표 3과 같이 선정하였고 그에 따른 시뮬레이션 파형은 그림 12과 같다.

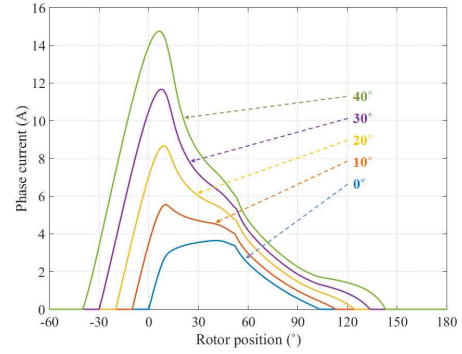


Fig. 10. Effect of phase current according to turn-on angle changes.

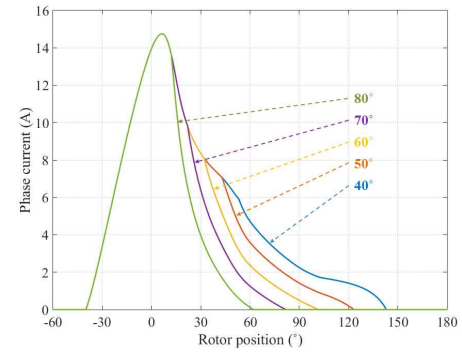


Fig. 11. Effect of phase current according to turn-off angle changes.

TABLE III
OPTIMAL SWITCHING ANGLES OF A PROTOTYPE
TWO-PHASE 4/2 SRM

θ_{adv}	θ_{com}	Torque [N·m]	Torque Ripple [%]	I_{phrms} [A]	Torque $\frac{T_{avg}}{I_{phrms}}$
35	25	0.1464	376.5514	22.3581	0.006548
	35	0.0401	165.2056	6.1809	0.006488
	45	0.0395	163.8733	6.0885	0.006488
40	30	0.1786	313.0504	23.5190	0.007594
	40	0.0484	168.9369	7.0331	0.006882
	50	0.0452	175.2234	6.7611	0.006685
45	35	0.1935	302.7402	24.8807	0.007777
	45	0.0551	171.0061	7.8449	0.007024
	55	0.0499	186.7809	7.5978	0.006568

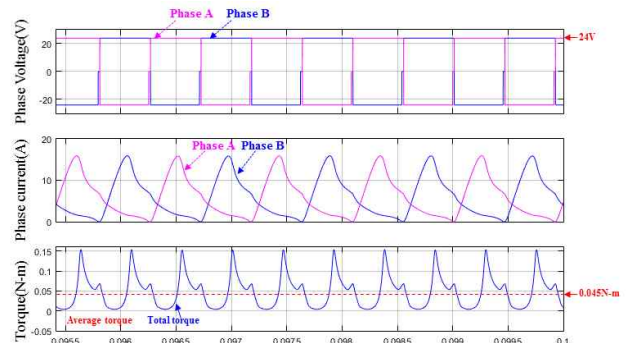


Fig. 12. Simulated waveforms of a prototype SRM operating at rated speed (phase voltages, phase currents, torque).

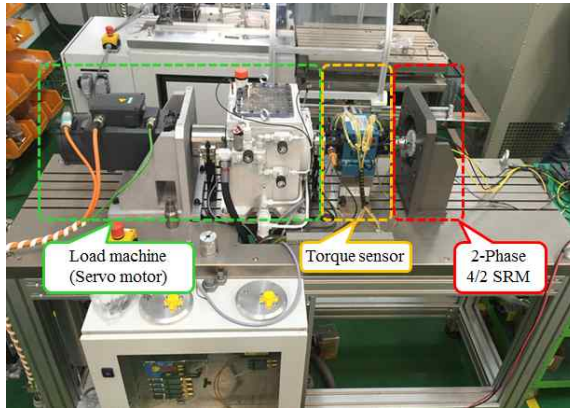


Fig. 13. Setup for motor drive load test.

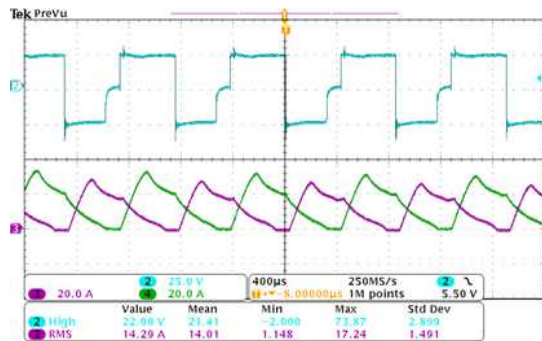


Fig. 14. The phase voltage (phase A) and phase current (phase A, phase B) waveforms measured through rated load test (25V/div, 20A/div, 400µs).

TABLE IV
LOAD TEST RESULTS OF A PROTOTYPE TWO-PHASE SRM

Test item	unit	Value
Revolutions	r/min	32,216
DC input voltage	V _{dc}	24
DC input current	A _{dc}	10.8
Motor efficiency	%	69.8

7. 실험결과

7.1 모터 부하 및 청소기 흡입력 시험

2상 4/2 SRM을 그림 13과 같이 다이내모미터에 back-to-back으로 연결한 후 서보모터를 이용한 부하 변화를 통하여 정격속도와 정격토크에서의 동적 성능 검증을 수행하였다. 최대의 성능을 발휘하기 위하여 단일펄스 구동조건에서 수행하였으며, 성능시험에 사용된 스위칭 각은 시뮬레이션을 통하여 구한 최적 스위칭 각인 $\theta_{adv} : 40^\circ$, $\theta_{com} : 40^\circ$ 를 적용하였고 32,000 rpm 구동 시 측정된 상전압과 상전류 파형은 그림 14와 같다. 표 4에 나타낸 바와 같다. 부하시험은 24V 입력전원에서 약

TABLE V
TEST RESULTS ACCORDING TO CHANGE IN SWITCHING ANGLES

Switching angle	DC input current, $I_{DC,in}$ (A)	Suction power, $P_{suction}$ (W)	$\frac{P_{suction}}{I_{DC,in}}$
$\theta_{adv} (^\circ)$ $\theta_{com} (^\circ)$			
25 40	10.08	87.85	8.715
30 40	10.22	92.50	9.051
35 40	11.83	113.68	9.609
40 40	13.08	129.82	9.923

TABLE VI
NOISE MEASUREMENT RESULTS

Measurement Point	x		y		z
	1	2	3	4	5
Noise (dB)	77.8	71.6	68.8	72.9	73.2

32,000rpm 구동 시 시제품 SRM의 효율은 최대 69.8%를 나타내었다.

7.2 모터 흡입력 시험

제작된 2상 4/2 SRM의 청소기 모터로서의 능력을 검증하기 위하여 모터 흡입력 시험 장치를 통하여 흡입력 시험을 수행하였다. 최대의 흡입력을 내기 위하여 단일펄스 구동을 하였으며, 표 5에서 표시된 것과 같이 최적 스위칭 각 $\theta_{adv} : 40^\circ$, $\theta_{com} : 40^\circ$ 에서 최대의 흡입력 및 효율이 나오는 것을 확인하였다. 이때 청소기의 흡입 효율은 45%로 기존의 DC 모터가 장착되었을 때 측정된 흡입효율 40%에 비해 5%가 향상된 것을 확인하였다.

7.3 소음 측정시험

2상 4/2 SRM을 바닥으로부터 50cm 떨어진 무향실 중앙에 위치시킨 후 X축, Y축, Z축으로 총 5대의 측정 장비와 1m의 이격 거리에서 총 5개의 위치에서 소음을 측정하였다. 정격속도와 부하에서의 소음을 측정하기 위하여 단일펄스 구동을 하였고, 100s 동안 측정하였다. 최대 소음은 78.2dB이 측정되었으며, 측정 장비의 위치별 소음의 평균값은 표 6에 표시된 값과 같다.

8. 결론

기존의 차량용 Built-in 청소기용 모터를 대체할 SRM 드라이브의 개발을 위하여 Matlab/Simulink 시뮬레이션 및 실제 성능시험을 수행하였다. 개발된 SRM 드라이브의 동적 특성이 설계 사양에 맞게 도달하고 모터 다이내모 성능 시험, 소음 측정시험 및 스위칭 각에 따른 흡입력 시험을 통하여 최적 스위칭 각에서 최적의 성능이 발휘되는 것을 확인하였고 차량용 Built-in 청소기 분야에서 충분히 경쟁력이 있는 것을 확인하였다.

본 연구는 교육부 재원으로 한국연구재단의 기본연구 지원(2015R1D1A1A01059836)과 한국연구재단의 지역혁신 창의인력양성사업 지원(2015H1C1A1035928)으로 수행되었음.

References

- [1] R. Krishnan, "Switched reluctance motor drives," CRC, 2001.
- [2] J. H. Kim and R. Krishnan, "High efficiency single-pulse controlled switched reluctance motor drive for high speed (48k RPM) application: analysis, design, and experimental verification," Industry Applications Society Annual Meeting, pp. 1-8, 2008.
- [3] J. Y. Lim, "Household appliances use cases of SRM," *KIPE Magazine*, Vol. 7, No. 4, pp. 27-37, Aug. 2002.
- [4] J. Y. Lim, Y. C. Jung, S. Y. Kim, and J. C. Kim, "Single phase switched reluctance motor for vacuum cleaner," *ISIE*, pp. 1393-1400, June 2001.
- [5] M. N. F. Nashed, K. Ohyama, K. Aso, H. Fujii, and H. Uehara, "Automatic trun-off angle control for high speed SRM drives," *Journal of Power Electronics*, pp. 81-88, Jan. 2007.
- [6] J. Kunz, S. Cheng, Y. Duan, J. R. Mayor, R. Harley, and T. Habetler, "Design of a 750,000 rpm switched reluctance motor for micro machining," *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 3986-3992, Sep. 2010.
- [7] D. K. Kim, Y. H. Kim, T. W. Lee, C. Y. Won, and Y. R. Kim, "High performance control of SRM drive system for automobiles by C-dump converter," *Transactions of the KIPE*, Vol. 8, No. 6, pp. 534-542, Dec. 2003.
- [8] Y. H. Yoon, Y. C. Kim, S. H. Song, and C. Y. Won, "Control of C-dump converters fed from switched reluctance motors on an automotive," *Journal of Power Electronics*, Vol. 5, No. 2, pp. 120-128, Apr. 2005.
- [9] C. J. Bateman, B. C. Mecrow, A. C. Clothier, P. P. Acarnley, and N. D. Tuftnell, "Sensorless operation of an ultra high-speed switched reluctance machine," *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 2329-2337, Sep. 2009.



이영수(李永秀)

1988년 4월 11일생. 2014년 원광대 전기공학과 졸업. 2016년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2016년~현재 (주)고아정공 모터연구소 연구원.



노정민(盧政旻)

1985년 4월 30일생. 2012년 원광대 전기공학과 졸업. 2016년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2013년~현재 Hexpower System 연구원.



이대진(李大珍)

1989년 6월 19일생. 2015년 원광대 전기공학과 졸업. 2015년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



김재혁(金宰赫)

1973년 4월 25일생. 1992년 한양대 전기공학과 졸업. 1998년~2000년 UL Korea, Ltd. 엔지니어. 2001년~2004년 Univ. of Wisconsin-Madison 전기공학과 졸업(석사). 2005년~2010년 Virginia Tech 졸업(박사). 2010년 Ramu Inc. 시니어 엔지니어. 2010년~현재 원광대 전기공학과 교수. 당 학회 학술위원



선한길(宣漢杰)

1980년 12월 27일생. 2006년 호남대 전기공학과 졸업. 2008년 전남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008년~2010년 (주)지능형빌딩시스템기술연구소 연구원. 2010~현재 (주)고아정공 모터기술연구소 책임연구원.



한만승(韓萬勝)

1969년 10월 5일생. 1992년 원광대 전기공학과 졸업. 2009년 전남대 전기공학과 졸업(석사). 1996~2009년 대우일렉트로닉스 연구소 책임연구원. 2013년 전남대 대학원 전기공학과 졸업(박사) 2009년~현재 (주)고아정공 모터기술연구소 소장.