ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 62, No. 5, pp. 620~625, 2013
http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2013.62.5.620

# 하이브리드 자동차(HEV) 용 전동식 컴프레서 구동을 위한 SRM 설계

## Design of a Switched Reluctance Motor Driving an Electric Compressor for HEVs

정 용 회* · 전 용 희** · 강 준 호*** · 김 재 혁†
(Yong-Hoe Jeong · Yong-Hee Jeon · Jun-Ho Kang · Jaehyuck Kim)

**Abstract** - This paper presents the design of a switched reluctance motor (SRM) for electric air conditioning compressors which are applied to hybrid electric vehicles (EVs). The motor for driving air conditioning compressor which is recently used on EV(electric vehicle) / HEV (hybrid electric vehicle) is PMSM(permanent magnet synchronous motor) or BLDCM(brushless DC motor). However disadvantage of motors that uses permanent magnets are vulnerable to high temperatures because of the demagnetization by the high temperature and the permanent magnet is expensive because of the high price of rare earth materials from China's monopoly. Therefore, in the automotive insustry is interested in the non-rare-earth motors. SRM has many advantages. it's resistant to high temperatures, price is cheaper, because there are no permanent magnets and winding in the rotor. Also it's high relability and efficiency, suitable for high-speed operation because of structure is simple. In this paper, the SRM, non-rare-earth motor, are designed, analyzed and experimented drive to replace an existing electric compressor drive motor

**Key Words** : Electric compressor, Hybrid electric vehicle (HEV), Switched reluctance motor (SRM), Motor drive

### 1. 서 론

최근 자동차 산업에서는 계속되는 화석연료 고갈과 유가 상승은 물론 자동차의 배기가스로 환경오염이 심각해지고 있어 기존 내연기관 자동차를 대체할 친환경 전기자동차에 연구개발이 활발이 진행 중이다. 특히 전기자동차(EV)와 하이브리드 전기자동차(HEV: Hybrid electric vehicle)와 같은 친환경 자동차의 보급이 증가하면서 모터의 중요성이 더욱 커지고 있다. 이러한 친환경 자동차는 내연기관에 의존하던 구동방식에서 모터구동방식으로 전동화가 급속한 발전을 보이고 있어 추후 HEV, EV 세계시장의 보급이 증가할 것으로 예상된다[1][2]. 자동차 산업이 점차 가솔린,디젤 자동차에서 전기자동차로 변하면서 전기를 이용한 전장부품 개발의 필요성이 강력히 요구되고 있으며, 세계적으로 전기자동차에 대한 부품개발의 관심과 연구가 일본을 중심으로 활발히 진행되고 있으며, 특히 차량용 에어컨의 핵심 부품인 컴프레서의 경우 엔진의 회전력을 이용하는 벨트구동 방식에서 자체 동력원을 갖는 전동 구동 방식으로의 변화가 요구된다. 전동식 컴프레서는 압축부에 동력을 전달하기 위해 모터를 사용함으로써 엔진의 회전수와 무관하게 냉방 능력을 제어 할 수 있으며, 실제로 가장 큰 냉방 능력을 필요로 하는 아이들링 상태에서도 에어컨을 적정용량으로 구동할 수 있어 운전에게 쾌적한 환경을 제공할 수 있다. 이러한 전동식 컴프레서의 모터는 차량 탑재성과 컴프레서의 부하를 고려하여 소형 이면서도 높은 토크를 낼 수 있는 고효율 모터개발이 중요한 기술로 부각되고 있다[3].

현재 EV/HEV에 적용하여 사용 중인 전동식 컴프레서는 대부분 영구자석을 형 모터 (PMSM 또는 BLDC 타입)을 사용하고 있다. 그러나 최근 영구자석의 주 원료인 희토류 광물의 가격상승과 최대생산국인 중국의 자원 무기화로 인하여 영구자석을 사용하지 않거나 적게 사용하는 대체모터의 개발을 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 영구자석을 사용하지 않는 대표적인 비 희토류 모터인 SRM (Switched Reluctance Motor)은 최근 큰 관심을 받고 있지만 현재까지 전동식 컴프레서 구동용 모터를 SRM으로 적용하여 개발된 사례는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 현재 양산 중인 HEV의 전동식 컴프레서에 비 희토류 모터인 SRM을 적용하여 개발하기 위해 시제품 SRM을 설계, 제작 한 후 구동시험을 통하여 가능성을 검증하였다.

### 2. HEV용 전동식 컴프레서

자동차의 공조 시스템이란, 난방(Heating), 환기(Ventilation), 냉방(Air Conditioning system : 에어컨)등을 통해 차량의 실내를 쾌적하게 유지해 주는 공기조절 시스템을 통틀어 부르는 말이다. 최근에 와서는 그 기능이 다양해져 실내 공기온도 조절뿐만 아니라 차량전체의 온도조절에 대해 폭넓게 관여하고 있다. 공조시스템은 쿨링팬, 라디에이터, 컨덴서, 히터코어, 컴프레서 등 다양한 부품으로 이루어져 있다. 그중에서 컴프레서는 에어컨을 구동할 때 사용하는 부품이다. 자동차 에어컨을 구동하게 위해서는 냉매(적은

* Ceturn,, Engineer
** Dongbu Robot Co, Engineer
*** Dept. of Electrical Engineering, Wonkwang University
† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering Wonkwang University, Assistant Professor
E-mail : jaehkim@wku.ac.kr
Received : February 22, 2013; Accepted : April 28, 2013

힘으로도 쉽게 액화할 수 있고 상온에서 쉽게 기화되는 물질)라는 물질이 필요하다. 이 물질이 응축과 압축을 반복되면서 찬바람을 뿜어낸다. 컴프레서는 기체(냉매)를 압축하는 부품으로 외부동력(엔진이나 모터)을 통해서 얻은 회전력을 상하로 움직이는 왕복운동으로 변환하여 기체를 강제로 압축시키는 구조이다. 기존 내연기관 자동차 용 기계식 컴프레서의 경우에는 컴프레서가 엔진벨트와 맞물려 있기 때문에 엔진회전수에 따라 컴프레서의 회전수가 결정되므로 공회전영역와 저속영역에서 냉방 성능이 저하되고 에어컨 가동시 연비가 증가되는 단점이 있다. 그러나 하이브리드 자동차 용 전동식 컴프레서(그림 1)의 경우 전동기로 컴프레서를 구동하기 때문에 주행속도와 상관없이 공회전영역과 저속영역에서 냉방 성능이 기존의 내연기관보다 우수하며 연비증가의 장점이 있다[7].

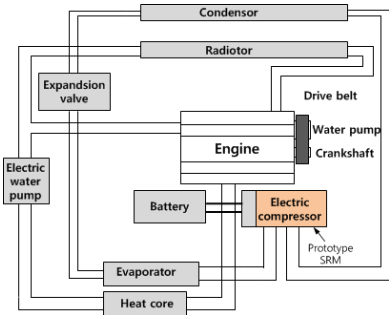


**그림 1** HEV 용 전동식 공조 시스템 구성
**Fig. 1** Electric motor driven air conditioning system for HEVs

**표 1** SRM 설계제원
**Table 1** Specifications of the prototype SRM

| Spec. | 값 | 단위 |
|---|---|---|
| 정격출력 | 3.5 | kW |
| 정격전류 | 25 | $A_{rms}$ |
| 정격속도 | 7500 | rpm |
| 정격토크 | 4.45 | N.m |
| 효율 | 80 | % |
| 고정자 외경 | 86 | mm |
| 회전자 축 지름 | 18 | mm |
| 적층두께 | 100 | mm |
| 소음 | 70 | dB |

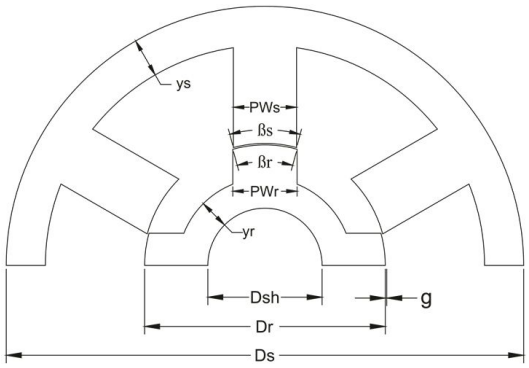


**그림 2** SRM의 주요 설계 파라미터
**Fig. 2** Key design parameters of an SRM

## 3. 전동식 컴프레서 구동용 SRM의 설계

현재 적용되어 상용 중인 영구자석을 사용한 전동식 컴프레서 구동용 모터와 동일한 성능평가를 위해 본 논문에서 설계한 SRM의 용량, 구동속도, 효율 등을 고려한 설계 기준을 표 1과 같이 선정하였으며 주요 설계 파라미터는 그림 2와 같다. SRM은 설계 파라미터간의 상호조합에 따라 성능의 변화가 심하게 나타나는 전동기 중의 하나이다. 따라서 아래식에 의해서 기초설계를 수행하고, 이를 근거로 적정 설계치를 재선정 하여서 성능을 분석해야 한다.

### 3.1 회전자 외경설정

회전자 외경(Dr)크기의 결정은 설계의 중요한 요소이며 극수에 따른 설계기준에 의해서 결정한다[4]. 모터는 완성품의 부품이므로 일반적으로 고정자의 크기는 정해진다. 한정된 고정자 크기에서 더 큰 토크를 얻기 위해서는 회전자 크기가 커져야 한다. 그러나 회전자 크기가 커진 만큼 가능한 권선의 유효슬롯 면적이 줄어들어 전동기가 발생 가능한 기자력(MMF)이 감소한다. 따라서 설계식에 의한 기초설계 후 적정 설계치를 재선정 하여야 한다.

$$D_r = 0.5 \times D_s [mm] \tag{1}$$

### 3.2 극호각과 공극의 크기설정

극수, 회전자 / 고정자비 및 극호각 비율에 의해서 기초설계 극호각을 설정한다[4]. 공극은 작으면 작을수록 누설자속이 적어 성능면에서는 우수하다. 그러나 제작 시 작은 공극을 일정하게 유지하기 어렵다. 따라서 제작 및 가공기술을 고려하여 0.2~0.3[mm]의 값을 선정하는 것이 바람직하다[4].

### 3.3 고정자 파라미터 설정

고정자 요크는 여자 시 기전력에 의한 고정자의 진동,소음을 최소화 하기 위하여 회전자에 비해 크게 설계 하는 것이 바람직하다. 또한, 고정자 요크를 두껍게 만드는 데는 타원력에 의한 타원화를 줄이고 고정자의 견고성을 최대화 하는 것이다. 비록 이것이 중량을 증가시키고 슬롯 면적을 감소 시키지만 견고성을 높이므로 기초 설계 후 적정 설계치를 재선정 하여야 한다. 보통 설계 범위는 $t_s > y_s \geq 0.5 t_s$으로 정해진다[5].

$$PW_s = 2 \times (\frac{D_s}{2} + g) \times \sin\left(\frac{\beta_s}{2}\right) \tag{2}$$

$$y_s = PW_s \times \frac{2}{3} \tag{3}$$

### 3.4 회전자 파라미터 설정

회전자 요크 두께는 포화 없이 최대 회전자 자속을 흘리기 위해 충분해야 하며 주 자속이 두 부분으로 나뉘므로 요크는 최소 회전자 극 폭의 반절이상이어야 한다. 보통 설계 범위는$0.75t_r > y_r \geq 0.5t_r$으로 정해진다[5].

$$PW_r = D_r \times \sin\left(\frac{\beta_r}{2}\right) \times \left(\frac{2}{3}\right) \tag{4}$$

$$y_r = PW_r \times \frac{2}{3} \tag{5}$$

### 3.5 권선설정

요구성능에 만족하면서 기계적으로 슬롯에 안정적으로 최대한 감겨야 하며 슬롯면적과 유효점적율을 고려해서 선경과 최대턴수를 설정하여 기초값으로 정한다. 이론식에 의한 턴수를 정하고 선경을 결정하기 위해서 실제 디자인한 전동기의 유효 슬롯면적에 최대한 감길 수 있는 턴수와 선경을 정한다. 만약 이론값이 실제 디자인 값보다 작다면 선경을 키워서 이론값과 실제 디자인 값이 같거나 차이가 가장 적을때의 값을 기초선경으로 정한다.

$$N_p = \frac{46500 \times V_S}{rpm \times m \times N_r \times B_{sat} \times L_{stk} \times t_s} \tag{6}$$

$$N_p = \frac{A_w}{A_c} \tag{7}$$

(m=상수, Nr=회전자 극수, Bsat[tesla]=재질의 최대 자속밀도, $L_{stk}$[in]=전동기 길이, $PW_s$[in]=고정자 극폭 $A_w$[$mm^2$]=권선을 감을 수 있는 범위, $A_c$[$mm^2$]=유효 슬롯면적)

위 계산식에 의해 고정자, 회전자, 권선값을 기초설계 값으로 설정하였다. 기초설계 값을 기준으로 자기등가회로법 해석을 이용하여서 세부설계를 하였다. 표 2는 세부설계를 완료하여 제안된 SRM의 치수를 보여준다.

### 3.6 설계한 SRM의 검증

설계한 SRM의 성능검증을 위해 자기등가회로법과 유한요소해석법(FEA: Finite Element Analysis) 시뮬레이션 프로그램을 이용하여서 해석하였다. 해석 결과 값은 각각 표 3과 표 4에 나타내었다. RMxprt를 사용하여 데이터베이스화된 파라미터를 간단하게 선택, 설정함으로써, 성능 분석을 할 수 있으므로 설계하여 모터의 요구사항에 만족한 뒤 좀 더 자세한 해석을 위하여 설계된 동일한 치수로 Maxwell 2D FEA 시뮬레이션을 통하여 재해석 하였다. 해석결과, 요구사항에 모두 만족하였으나 철손과 동손에 다소 차이가 있었다. RMxprt와 Maxwell의 결과값이 다른 이유는 RMxprt와 Maxwell의 해석방법의 차이와 RMxprt에서는 국부적인 포화나 감자 등의 영향을 고려할 수 없기 때문이다.

**표 2** 제안한 SRM의 설계 치수

**Table 2** Parameters of the prototype SRM

| 파라미터 | | 값 | 단위 |
|---|---|---|---|
| 고정자 외경 | Ds | 86 | mm |
| 회전자 외경 | Dr | 40 | mm |
| 고정자 극 호 | βs | 29 | deg |
| 회전자 극 호 | βr | 30 | deg |
| 고정자 요크 두께 | ys | 5.4 | mm |
| 회전자 요크 두께 | yr | 6 | mm |
| 고정자 극 폭 | PWs | 10.4 | mm |
| 회전자 극 폭 | PWr | 10.4 | mm |
| 회전자 축 외경 | Dsh | 18 | mm |
| 공극 | g | 0.25 | mm |
| 적층 두께 | Lstk | 100 | mm |
| 상 당 권선 수 | Np | 110 | - |

**표 3** 자기등가회로법에 의한 해석결과

**Table 3** Results from magnetic equivalent circuit (MEC) method

| Spec. | 값 | 단위 |
|---|---|---|
| 정격토크 | 4.53 | N.m |
| 정격출력 | 3.55 | kW |
| 정격속도 | 7500 | rpm |
| 철손 | 131 | W |
| 동손 | 350 | W |
| 효율 | 85.5 | % |

**표 4** 유한요소해석법의한 해석결과

**Table 4** Results from finite element analysis (FEA) method

| Spec. | 값 | 단위 |
|---|---|---|
| 정격토크 | 4.84 | N.m |
| 정격출력 | 3.8 | kW |
| 정격속도 | 7500 | rpm |
| 철손 | 72 | W |
| 동손 | 165 | W |
| 효율 | 81 | % |

## 4. 설계한 SRM의 최적 턴온/턴오프 각 설정

SRM 구동에서 중요한 턴온, 턴오프 각을 찾기 위해서 유한요소해석을 통해서 입력전류와 회전자 위치에 따른 인덕턴스(그림 3)와 토크(그림 4)프로파일을 얻을 수 있다.

앞에서 그림 3와 그림 4에서 얻은 인덕턴스와 토크 프로파일값 적용하여 Matlab을 이용하여 요구토크에 만족하는 제어각 범위를 찾아내었다. 그림 5은 여자각에 따른 요구토크 만족범위를 나타내는 3D Plot이다. 요구 토크에 만족하는 다양한 여자각 범위에서 SRM의 소음/진동 유발의 원인인 토크리플이 가장 작은 제어각을 찾아서 Matlab을 이용하여서 시뮬레이션 하였다. 표 5와 그림 6은 시뮬레이션 결과로서다양한 여자각에 대한 전류파형, 토크리플 및 효율을 간

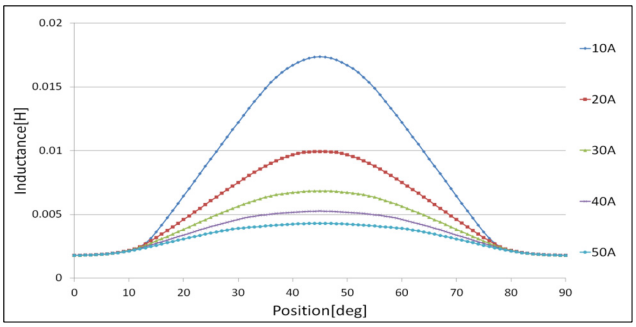


**그림 3** 제안된 SRM의 인덕턴스 프로파일
**Fig. 3** Inductance profiles of the prototype SRM

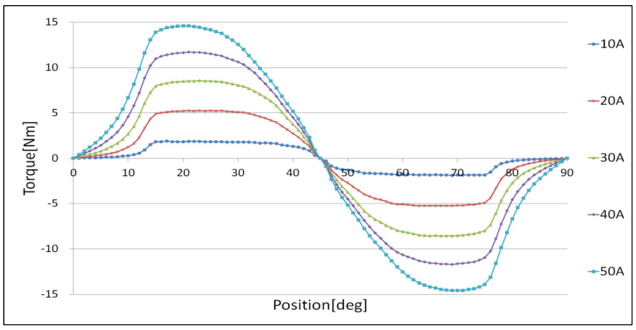


**그림 4** 제안된 SRM의 토크 프로파일
**Fig. 4** Torque profiles of the prototype SRM

접적으로 알 수 있는 토크/전류 비율 보여준다

표 5의 토크/전류 비율 (T/A rate: Torque per Ampere rate)은 효율을 판단하는 기준으로 낮은 전류로 높은 토크를 발생하는 것을 의미하는 값으로 높을수록 효율이 좋다. 해석결과 토크리플이 낮으면 효율이 좋지 못하고 효율이 좋으면 토크리플이 높은 상반된 경향성을 보인다. 그 이유는 토

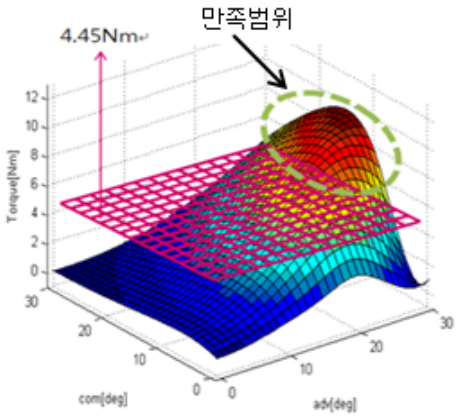


**그림 5** 제안된 SRM의 정격토크에서의 여자각 범위
**Fig. 5** Excitation angles at rated torque

**표 5** 여자각에 따른 SRM 시뮬레이션 결과
**Table 5** Simulation results on excitation angles at rated torque

| | | 토크 [N·m] | 토크리플 [%] | 상전류 [A_rms] | T/A 비율 [N·m/A] |
|---|---|---|---|---|---|
| ① | Adv = 30° Com = 20 ° | 4.54 | 20.5 | 21.10 | 0.21 |
| ② | Adv = 30° Com = 26 ° | 4.54 | 24.5 | 16.38 | 0.27 |
| ③ | Adv = 31 ° Com = 29 ° | 4.68 | 80.3 | 14.30 | 0.32 |
| ④ | Adv = 33 ° Com = 33 ° | 4.63 | 82.5 | 14.78 | 0.32 |

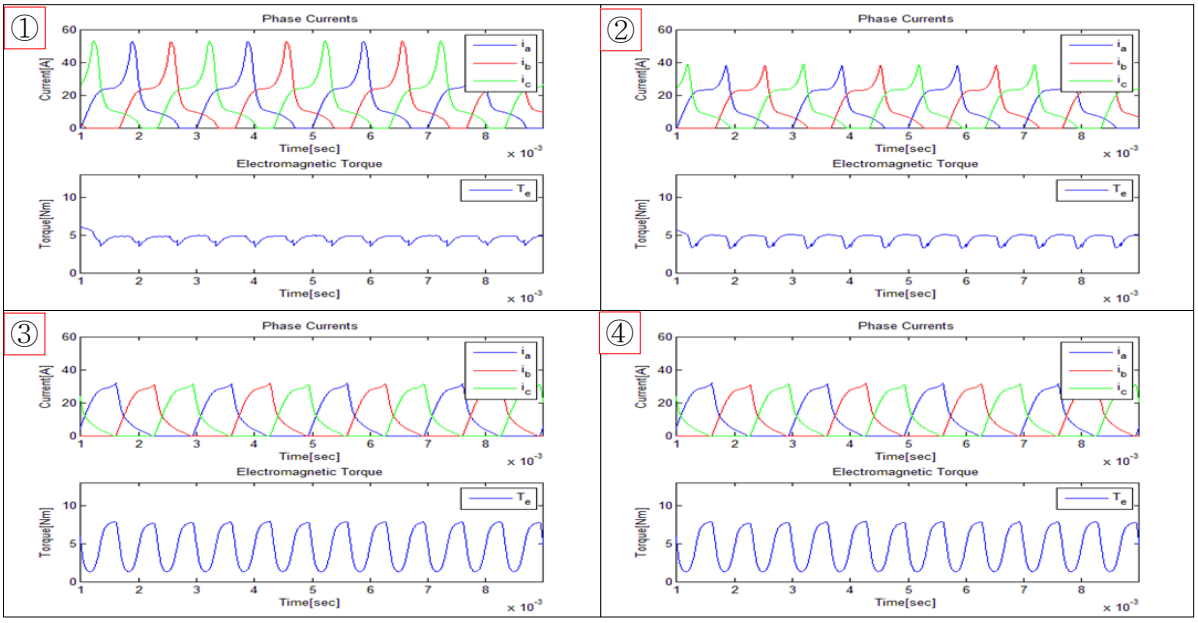


**그림 6** 시뮬레이션 결과 - 턴온/턴오프 각에 따른 SRM의 파형(상전류, 토크)
**Fig. 6** Simulated waveforms (phase current, torque) of SRM for different turn-on/turn-off angles

크리플을 줄이기 위해서는 각상의 전류를 최대한 겹쳐야 한다. 그러나 전류를 겹치다 보면 다음상의 전류가 상승하기 전에 이전상의 전류가 소호되어야 하지만 완전히 소호되지 못하고 인덕턴스가 하강하는 지점을 지나서 소호되기 때문에 부토크가 발생하여서 효율이 좋지 않은 결과를 나타낸다. ①번 여자각은 최대전류 허용치를 넘어서는 값이므로 ②번 값을 토크리플이 가장 작은 여자각으로 선정하였다.

## 5. 실험 결과

제안된 전동식 컴프레서 구동용 3상 6/4극 SRM에 대한 적합성을 검증하기 위해 시작품을 제작하였고 그 특성을 고찰하였다. 또한 소음측정을 위해서 무음실에서 소음측정을 하였다. 그림 7은 제작된 시작품에 대한 구동시험을 위한 실험환경을 보여준다. 실험 결과 측정한 상전류의 파형 (그림 8)은 시뮬레이션 파형(그림 9)와 유사함을 확인할 수 있었고 측정값에 대한 비교를 표 6에 요약되어 있으며 요구사항에 만족함을 알 수 있었다. 그러나 시제품 제작시 공극의 크기가 설계치수보다 크게 제작되어서 효율은 다소 적게 나왔다. 제작된 6/4 SRM의 소음을 측정하기 위해서 무음실에서 전,후,좌,우,위 5지점에서 약 1M 간격을 두고 소음을 측정하였다. 그림 10와 그림 11은 소음측정 환경과 측정결과 값 및 파형을 보여준다.(지면 제한 상 가장 소음이 크게 나온 좌,우 측정결과 파형만 제시한다.) 측정 결과 목표값인 70[dB]이하의 값을 모두 만족함을 확인할 수 있었다.

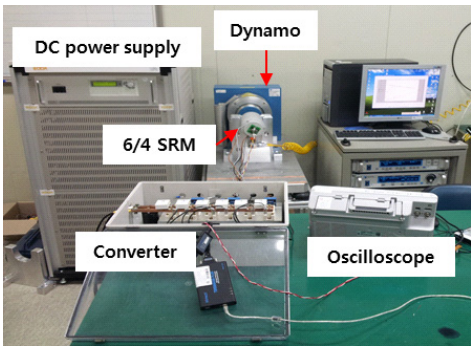


**그림 7** 제작된 SRM의 실험 환경
**Fig. 7** Experimental setup for the prototype SRM

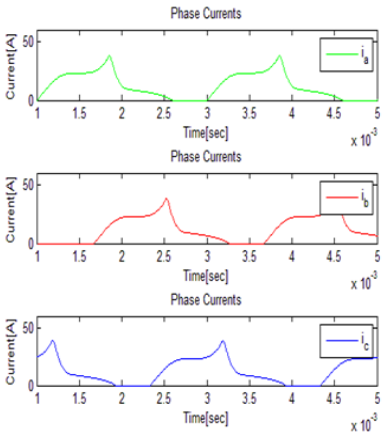


**그림 8** 시뮬레이션 결과 - 상전류 파형
**Fig. 8** Simulation results - simulated phase currents

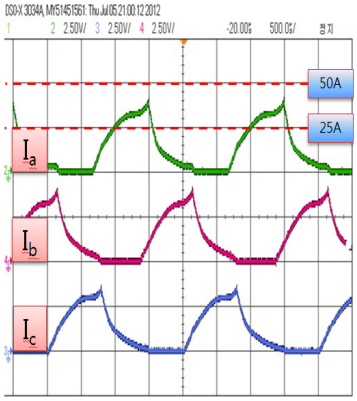


**그림 9** 실험결과 - 측정한 상전류 파형
**Fig. 9** Excremental results - measured phase currents

**표 6** 제작된 6/4 SRM의 실험결과 값 비교
**Table 6** Comparison of the experimental results of the prototype SRM with the simulation results

| | 목표치 | 시뮬레이션 | 실험결과 | 단위 |
|---|---|---|---|---|
| 정격속도 | 7500 | 7500 | 7500 | rpm |
| 정격토크 | 4.45 | 4.54 | 4.525 | Nm |
| 정격출력 | 3495 | 3566 | 3554 | W |
| 효율 | 80 | 84 | 75 | % |

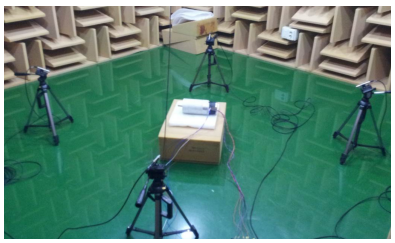

**그림 10** 제작된 SRM의 소음 측정
**Fig. 10** Measurement of acoustic noises

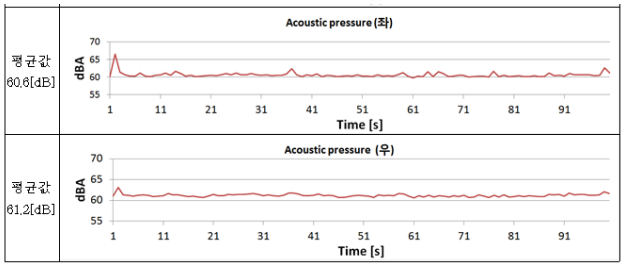


**그림 11** 실험결과 - 소음측정 결과
**Fig. 11** Experimental results - acoustic noises

## 6. 결 론

본 논문에서는 현재 EV/HEV에 사용 중인 전동식 컴프레서를 구동하는 영구자석을 사용한 모터를 영구자석을 사용하지 않는 모터로 대체하기 위해서 대표적인 비 영구자석형 모터인 SRM으로 동일한 성능평가를 위해 설계하였고 FEA 해석과 실험적으로 그 가능성을 보여주었다. 실험결과 유한요소해석(Finite Element Analysis) 결과값과 실제 제작한 SRM의 결과 값이 유사함을 확인할 수 있었다. 다만 제작시 공극의 크기가 설계 값과의 차이로 인하여 다소 낮게 나왔다. 소음 측정은 무음실에서 SRM의 전,후,좌,우,위 5지점에서 약 1M 간격에 마이크를 설치하고 100초 동안 소음 스펙트럼을 측정하였다. 측정결과 목표값인 70[dB]이하의 값을 만족할 수 있었다.


### 감사의 글

본 논문은 2012년도 원광대학교의 교비지원에 의해서 수행 됨.


### References


[1] Trend in Electric Vehicle Market, KETI (2010).

[2] Trend in Hybrid Vehicle Industry, KETI (2011).

[3] K. Jung, S. Cho, K. Cho, C. Park "The Motor Development if High Voltage Electric Compressor for hybrid Car", KSAE Conference Proc. page(s): 2160-2164, 2011.5.

[4] T.J.E Miller, "Switched Reluctance Motors and Their Control", Magna physics publishing and clarendon press, 1993.

[5] R. Krishnan, "SWITCHED RELUCTANCE MOTOR DRIVE", Modeling, Simulaion, Analysis, Design, and Applications, 2001.

[6] V. Radun, "Design Considerations for the Switched Reluctance Motor", IEEE TRANDSATION ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 31, NO. 5, SEPTEMBER/OCTOBER 1995.

[7] Hiroyuki Hotta, "Air Conditioning System for Hybrid Vehicle", Refrigeration, Vol. 83, No. 964 FEBRUARY 2008.


## 저 자 소 개

**정 용 희 (鄭 用 會)**

1984년 2월 10일 생. 2011년 원광대 전기전자 및 정보공학부 졸업. 2013년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2013년~ 현재 (주)세턴 엔지니어

Tel : 02-2025-8595

E-mail : yhjeong@myunghwa.com

**전 용 희 (田 龍 熙)**

1985년 9월 25일 생. 2011년 원광대 전기전자 및 정보공학부 졸업. 2013년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2013년~ 현재 (주)동부로봇 엔지니어

Tel : 032-329-5551

E-mail : yhjeon@dongbu.com

**강 준 호 (姜 俊 鎬)**

1988년 6월 23일 생. 2012년 원광대 전기전자 및 정보공학부 졸업. 2012년~ 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 063-850-6731

E-mail : praesepe33@gmail.com

**김 재 혁 (金 宰 焃)**

1973년 4월 25일 생. 19992년 한양대 전기공학과 졸업. 1998~2000 UL Korea, Engineer, 2004년 Univ. of Wisconsin at Madison 졸업(석사), 2010년 Virginia Tech 졸업(박사), 2010년 Ramu Inc. Senior Engineer, 현재 원광대학교 전기공학과 교수

Tel : 063-850-6733

E-mail : jaehkim@wku.ac.kr