

## Radiator Cooling Fan System by Switched Reluctance Motor for Automobiles

윤용호\* · 김재문\*\* · 박상훈\*\*\* · 원충연†  
 (Yong-Ho Yoon · Jae-Moon Kim · Sang-Hoon Park · Chung-Yuen Won)

**Abstract** - In automobile, the introduction of electronically commutated motors has been accompanied by a proliferation of electronic devices. With this proliferation of electronic devices, an emphasis has been placed on EMC issues. This paper is proposed to use SRM as a radiator cooling fan in automotive applications. To drive SRM, Energy efficient C-dump converter is applied. Energy efficient C-dump converter, derived from the conventional C-dump converter, is proposed as a switched reluctance motor (SRM) drive for automotive engine cooling application. It is verified more efficient than other converters through simulation and experiments. And also SRM is valid for automotive applications that have strict EMC standards. Simulation and experimental results obtained on a laboratory prototype are finally presented to evaluate the performance.

**Key Words** : SRM, Radiator Cooling Fan, Energy Efficient C-Dump Converter, EMI/EMC

### 1. 서론

스위치드 릴럭턴스 전동기 (Switched Reluctance Motor: 이하 SRM)는 다른 전동기 보다 간단한 구조를 가지고 있어 제작 단가가 저렴하고, 기계적으로 견고하며, 고온 등의 열악한 환경에서도 신뢰성이 높으며, 브러시 등이 없어 유지비가 거의 들지 않는 장점을 지니고 있다. 또한 광범위한 변속 범위를 가지고 있으며 초고속 운전이 용이하고, 단위체적당 토크 및 효율면에서 유도전동기 보다 우수하다[1-3]. 이러한 장점으로 인하여 국내에서도 진공청소기와 같은 가전용 응용분야가 계속해서 많아지고 있으며 특히 고온이나 진동이 심한 자동차 환경에서 적합한 전동기로 선진외국에서도 활발히 연구되고 있다.

그러나 차량내부에는 각종 음향 및 오디오, 비디오 기기, 무선 통신장비 그리고 각종 전동기 등 전장부품의 장착이 증가하는 추세로 정상운전을 위한 차량의 전자기기 설계에 있어 주요 항목인 EMC (Electro-Magnetic Compatibility: 이하 EMC)에 대한 대책이 필요하다. 이에 대해 John E. Makaran은 BLDC 전동기를 차량용 냉각 팬용 전동기로 적용시 EMI에 관한 문제를 제기하였다[4]. 국제적으로 자동차 환경에 적용하는 EMC는 운전자의 안전성을 고려하여 산업 환경에서의 EMC보다 더욱 엄격한 규제를 제시하고 있다.

본 논문에서는 일반 자동차용 라디에이터 냉각팬용 전동

기로 250W급 SRM을 적용하여 자동차 환경에서 SRM이 국제 규격에 적합한지에 대한 타당성 연구를 하였다. 또한 SRM을 구동하기 위한 컨버터로 각 상전류의 중첩을 가능하게 함으로써 토크 발생 영역을 충분히 활용할 수 있어 에너지 효율이 높은 Energy efficient C-dump 컨버터를 적용하여 시뮬레이션과 실험을 수행하였다.

### 2. Energy efficient C-dump 컨버터

그림 1은 Energy efficient C-dump 컨버터로서 초평 모드 동안에 복잡한 제어 없이 상전류의 환류가 가능하므로 제어가 단순하다. 그리고 기존의 C-dump 컨버터나 Modified C-dump 컨버터에서 주스위칭 소자에 인가되는 전압은 공급전압의 2배( $2V_{dc}$ )가 인가되는 반면 1배( $V_{dc}$ )의 전압이 인가되므로 컨버터 주 스위칭소자 선정에 따른 비용을 줄일 수 있는 장점을 지닌다. 또한 일반 C-dump 컨버터에서 가능하지 않았던 각 상전류의 중첩을 가능하게 함으로써 토크 발생 영역을 충분히 활용할 수 있다[5].

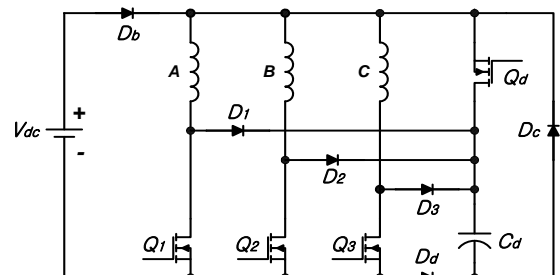


그림 1 Energy efficient C-dump 컨버터  
 Fig. 1 Energy efficient C-dump converter

\* 정 회 원 : 삼성탈레스 전문연구원 · 공박  
 \*\* 정 회 원 : 한국철도대학 철도차량전기과 조교수 · 공박  
 \*\*\* 정 회 원 : 성균관대학교 메카트로닉스공학과 박사과정  
 † 교신저자 시니어회원 : 성균관대학교 정보통신공학부 정교수 · 공박  
 E-mail : won@yurim.skku.ac.kr

접수일자 : 2009년 4월 2일  
 최종완료 : 2009년 6월 26일

한편 비대칭 브리지 컨버터와 비교해 볼 때 상당 스위칭 소자가 하나이므로 스위치의 손실을 줄일 수 있다. 그리고 상당 스위칭 소자인 경우 각 소자마다 절연된 전원을 갖는 드라이버 단을 구성하여야 하지만, Energy efficient C-dump 컨버터의 경우 상당 스위칭 소자가 없으므로 회로를 간단히 할 수 있어 이로 인한 가격을 줄일 수 있다. 하단의 스위칭 소자는 공통 Source 단자를 구성하므로 절연된 하나의 전원으로 3개의 드라이버 단을 구성할 수 있다. 반면 덤프 스위칭 소자(Qd)를 동작시키기 위한 부가 회로가 필요하다.

일반적인 C-dump 컨버터와 비교해 볼 때 덤프 인덕터의 생략으로 회로가 간단해지고 부피를 줄일 수 있으며, 상의 중첩제어가 가능하여 제어가 복잡해지는 면이 있지만 다양하게 제어를 구현할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 비대칭 브리지 컨버터의 각 상에 흐르는 전류는 하드 쇼핑 또는 소프트 쇼핑 방법을 통해 제어되는데, 하드 쇼핑은 각 상마다 상당과 하단 스위치 소자들이 전압 변조에 이용되고 소프트 쇼핑은 단지 한 개의 스위치 소자만이 전압변조에 관여되고 다른 하나는 여자구간 동안 도통(ON)상태를 유지한다. 일반적으로 소프트 쇼핑은 하드 쇼핑에 비해 효율, 토오크, 리플 정도가 우수한 것으로 알려져 본 논문에서는 상당 스위칭 소자를 쇼핑 스위치로 활용한 소프트 쇼핑방식을 채택하였다.

### 3. 자동차용 라디에이터 냉각팬 구동용 SRM

현재까지 자동차에 많이 사용되는 전동기는 직류(DC) 전동기나 영구자석형 전동기(BLDC)가 많이 사용되고 있으며, 자동차 내에서의 용도는 스타팅 전동기, 엔진의 냉각팬 용 전동기, 오일펌프 및 냉각 순환용으로 사용되고 있다. 일반적으로 자동차용 라디에이터 냉각팬으로 DC 전동기가 주로 사용되고 있으며, 자동차 차량의 크기에 따라 전동기의 출력용량이 달라지나 중형차량의 기준을 볼 때 대략 250 [W]급이 사용된다.

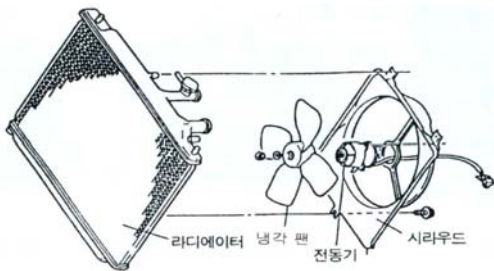


그림 2 라디에이터 냉각시스템  
Fig. 2 Radiator cooling system

그림 2는 자동차용 라디에이터 (Radiator) 냉각시스템으로 냉각장치는 자동차 내부의 구성품들이 과열되지 않도록 하기 위하여 과잉의 열을 흡수하여 냉각시켜 주는 장치이다. 구동원리는 수온 센서로 냉각수의 온도를 감지하여 일정 온도에 도달하면 냉각 팬이 회전하게 되고, 어떤 온도 이하로 떨어지면 냉각 팬의 회전이 정지된다[6-7].

### 4. 자동차 환경에서의 EMC

최근 차량내부에는 각종 음향 및 오디오, 비디오기기, 무

선 통신장비 그리고 수십 개의 전동기 등의 장착이 증가하는 추세로 정상 동작을 위한 차량용 전자기기 설계를 위해서는 EMC에 대한 대책이 필수적으로 요구된다. 과거에는 엔진계통에서 나오는 불요 전자파에 대해 규제만 실시하였으나 최근에는 자동차에 장착된 전기전자 부품에서 발생하는 불요 전자파에 대한 규제도 국내 및 유럽 등에서 실시하고 있다[8].

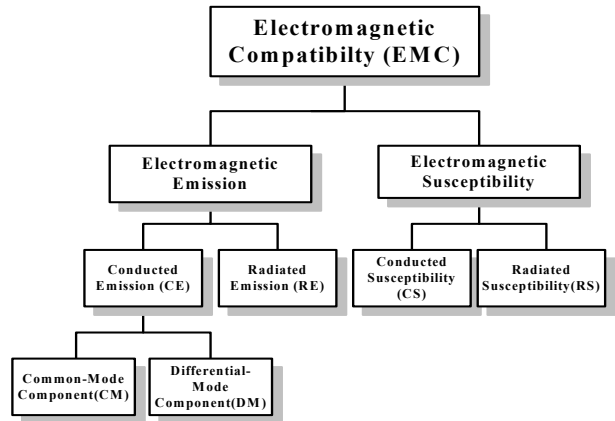


그림 3 EMI/EMC 시험 분류  
Fig. 3 Classification of EMI/EMC test

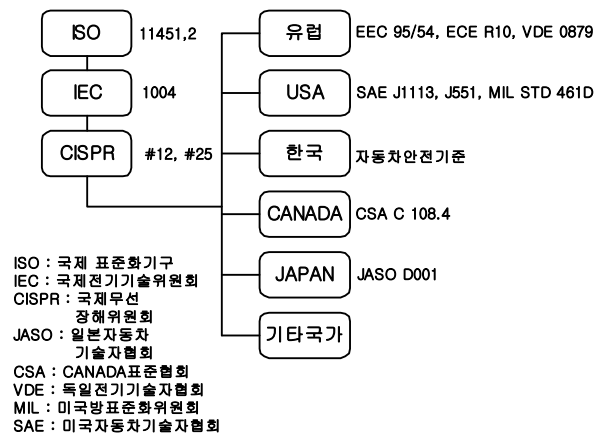


그림 4 자동차 EMC 국제 규격 구조  
Fig. 4 International standard structure for automobiles

그림 3은 EMI/EMC 시험 분류로서 복사성 잡음은 전자파장해를 일으킬 가능성이 있는 기기와 관계가 있으며 자동차 내부에 장착될 각 부품들에 개별적으로 방사를 억제하여 다른 기기에 대해 장해를 일으키는 문제를 해결할 수 있다. 그러므로 전자기적으로 적합한 전자파 환경을 만들어 방사를 조절하는 것이 바람직하다.

그림 4는 자동차에서의 EMC 국제규격 구조로서 세계 각국에서는 CISPR (International Special Committee on Radio Interference : 국제 무선장해특별위원회)에서 권고하는 내용을 중심으로 규격을 제정하고 있다. 한국에서도 CISPR 규격에 따른 국내 KS규격을 제정하여 전자파적합성 (EMC) 시험을 행하고 있다.

본 논문에서는 KS C CISPR 25 규격을 참조하여 SRM과 구동 컨버터인 Energy efficient C-dump 컨버터를 적용한

시스템에 대한 전자파 방사(EMI)시험을 수행하였으며 적용한 EMI 제한치는 표 1과 같다[9].

표 1 자동차 EMI 제한치

Table 1 EMI limited value for automobiles

SPEC	FREQUENCY	NB LIMIT	BB LIMIT
95/54 EEC	30~75 MHz	54~44 dBuV/m	64~54 dBuV/m
	75~400 MHz	44~55 dBuV/m	54~65 dBuV/m
	400~1000 MHz	55 dBuV/m	65 dBuV/m
SES E922 (CISPR #25 CLASS 3)	0.15~0.3 MHz	41 dBuV/m	63 dBuV/m
	0.53~54 MHz	34 dBuV/m	35 dBuV/m
	70~960 MHz	24 dBuV/m	24 dBuV/m
GM UTS	0.01~0.5 MHz	34.6~32.4 dBuV/m	47.6~45.4 dBuV/m
	0.5~20 MHz	28 dBuV/m	41 dBuV/m
	20~512 MHz	15 dBuV/m	28 dBuV/m
	512~1000 MHz	15~21.7 dBuV/m	28~34.7 dBuV/m

여기서, NB : Narrow band, BB: Broad band

### 5. 시뮬레이션 및 실험결과

본 논문은 전력변환회로를 설계하고 해석하는 시뮬레이션 소프트웨어인 PSIM을 사용하여 Energy efficient C-dump 컨버터에 의해 구동되는 스위치 릴럭턴스 전동기에 관하여 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 5는 실제 자동차용 라디에이터 냉각 팬의 부하를 고려하여 500-1000rpm 속도가변시 기준속도대비 속도응답특성과 이때의 상전류파형을 보여주고 있다.

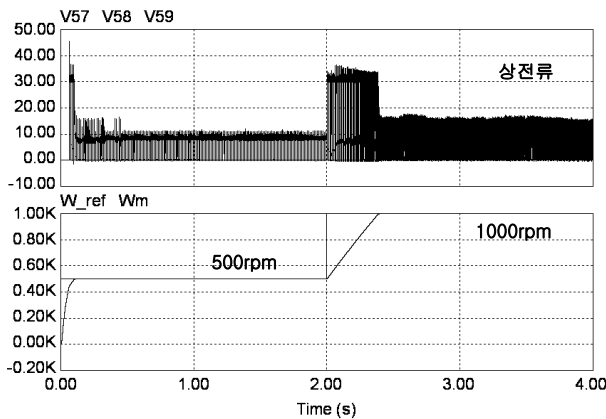


그림 5 속도응답과 상전류 파형 (500rpm → 1000rpm)  
Fig. 5 A speed response and phase current

그림 6은 500-1000rpm 속도가변시 덤프 커패시터의 전압파형을 보여주고 있으며 그림 7은 1000rpm 구동시 각상 전류파형과 덤프 커패시터 전압파형으로서 Energy efficient C-dump 컨버터의 가장 큰 장점인 각 상전류의 중첩이 되는 모습을 확인할 수 있다. 이는 상전류의 토크 발생 영역을 충분히 활용할 수 있어 에너지 효율이 높음을 알 수가 있고 따라서 본 논문에서는 자동차용 라디에이터 냉각팬 구동을 위한 SRM 구동용 컨버터로 소자의 용량 및 컨버터 효율측면을 고려하여 Energy efficient C-dump 컨버터를 선정하였다.

또한 입력전압  $V_{dc}$ 의 2배인  $2V_{dc}$  가되며 상전류의 중첩이 되지 않는 일반적인 C-dump 컨버터와 비교해 볼 때 덤프 커패시터의 전압은 커패시터 총방전시 입력전압 12V의 약 1~1.5배정도의 전압이 발생하고 있다.

따라서 입력전압이 높은 시스템을 사용할 경우 각 소자의 정격사양 선택시 훨씬 더 경제적이며 전체적으로 성능이 우수함을 보여주고 있다. 덤프 커패시터에 나타나는 전압은 커패시터 값에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 덤프 커패시터 전압은 상 스위치에도 나타나기 때문에 용량 선정이 중요하고 덤프 스위치의 스위칭신호를 어떤 방법으로 해주는냐에 따라 각부 전류 및 전압 파형이 다양하게 나타나기 때문에 제어 방법 또한 실험을 통해 최적의 방법을 찾는 것이 중요하다.

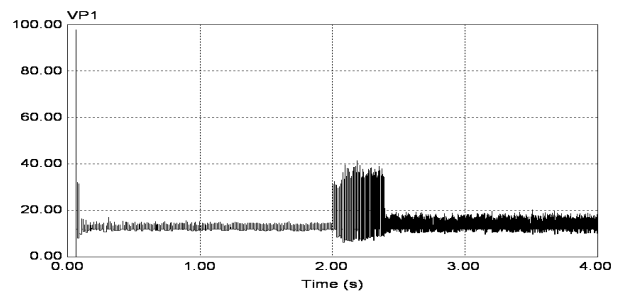


그림 6 500에서 1000rpm 구동시 덤프 커패시터 전압파형  
Fig. 6 Dump capacitor voltage according to speed variation

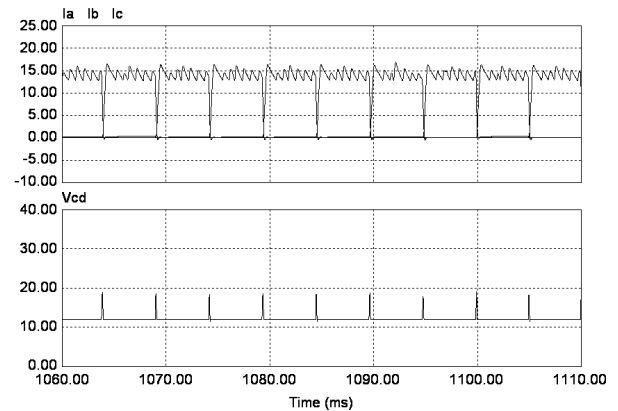


그림 7 3상전류 및 덤프 커패시터 전압 (1000rpm)  
Fig. 7 3-phase current waveform and dump capacitor voltage (1000rpm)

본 논문에서는 그림 8과 같이 배터리 (Battery)를 이용한 직류전원회로와 컨버터 그리고 팬 부하로 구성하여 SRM을 이용한 자동차용 라디에이터 냉각팬 구동시스템을 구성하였으며 실험에 사용된 전동기 상수는 표 2와 같다.

전도노이즈 측정을 위해 LISN (Line Impedance Stabilization Network)을 차량용 배터리 후단에 설치하고 DMRN (Differential Mode Rejection Network)을 이용하여 임피던스를 매칭 하였다.

그림 9는 LISN의 내부 회로써 인덕터 L은 전원주파수에서 저임피던스이고 EMI 측정주파수에서는 고임피던스를 갖

기 때문에 측정하려는 제품에 전원을 공급해 주면서 이 제품에서 발생하는 EMI는 입력전원 쪽으로 가지 못하도록 차단해주는 역할을 한다. 마찬가지로 LISN의 캐패시터 C는 전원주파수에서 고임피던스이고 EMI 측정주파수에서는 저임피던스를 갖기 때문에 측정하려는 제품에 전원을 원활히 공급해 주면서 L과 함께 전원측 임피던스를 50Ω이 되게 해준다[10]. 출력 단자를 스펙트럼 분석기에 연결하여 전동기의 외함과 접지 사이에서 발생하는 기생 커패시턴스 (Stray Capacitance) 성분과 전동기를 구동하는 컨버터에서 발생되는 노이즈 성분을 측정하였다.

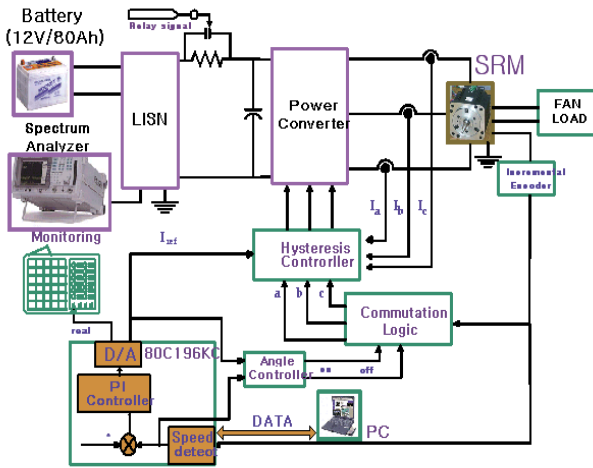


그림 8 전체 시스템 구성도  
Fig. 8 The overall block diagram

표 2 실험에 사용된 전동기 상수

Table 2 Motor parameters for experiments

전동기 출력	250 [W]
최대 속도	3000 [rpm]
고정자 극수	6 [극]
회전자 극수	4 [극]
권선 저항	0.02166 [Ω]
최대 인덕턴스	1.332 [mH]
최소 인덕턴스	0.241 [mH]
고정자 극호( $\beta_s$ )	30°
회전자 극호( $\beta_r$ )	32°

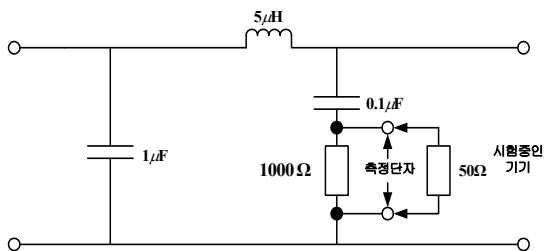


그림 9 LISN 내부회로  
Fig. 9 A Circuit of LISN

그림 10, 11, 12는 자동차용 라디에이터 냉각 팬에 해당되는 부하를 인가후 속도별 500, 1000, 1500rpm 구동시 상전류파형을 보여주고 있다. 본 논문에서 수행한 라디에이터 냉각팬 구동용 SRM과 구동 토폴로지 시스템에 대한 최적의 조건은 실험데이터에 의해 얻어진 어드밴스 각도 7.8°, off 각도 -4.8°의 각도로 구동을 하였다.

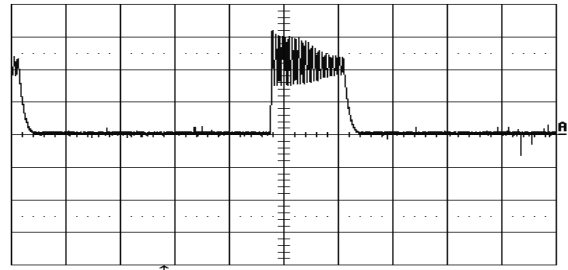


그림 10 500rpm에서 상전류파형  
(ad 각도 : 7.8°, Off 각도 : -4.8°, 5A/div)  
Fig. 10 A phase current wave at 500rpm

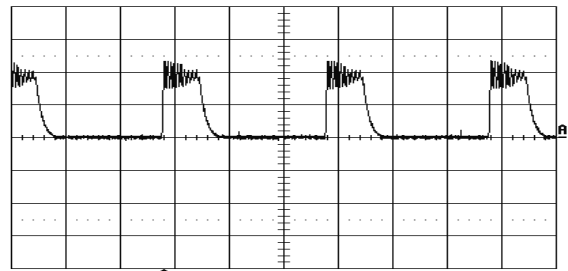


그림 11 1000rpm에서 상전류파형  
(ad 각도 : 7.8°, Off 각도 : -4.8°, 10A/div)  
Fig. 11 A phase current wave at 1000rpm

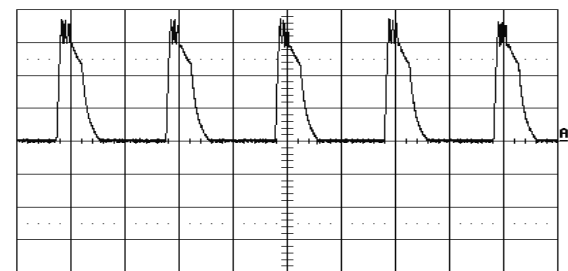


그림 12 1500rpm에서 상전류파형  
(ad 각도 : 7.8°, Off 각도 : -4.8°, 10A/div)  
Fig. 12 A phase current wave at 1500rpm

그림 13과 14는 시뮬레이션에서 수행한 그림 5에 대한 실험결과 파형으로 자동차용 라디에이터 냉각 팬 부하를 적용하여 500rpm에서 1000rpm 그리고 1500rpm으로 기준속도가 변할 때 속도응답특성과 이에 따른 A, B, C 3상의 전류파형을 보여주고 있다.

또한 그림 15는 1000rpm 구동시 그림 6과 마찬가지로 A, B, C 3상의 전류파형과 덤프 커패시터 전압에 대한 실험결과

파형으로서 시뮬레이션 결과와 동일하게 덤프 커패시터의 전압은 입력전압 12V의 약 1~1.5배정도의 전압이 발생하고 있다.

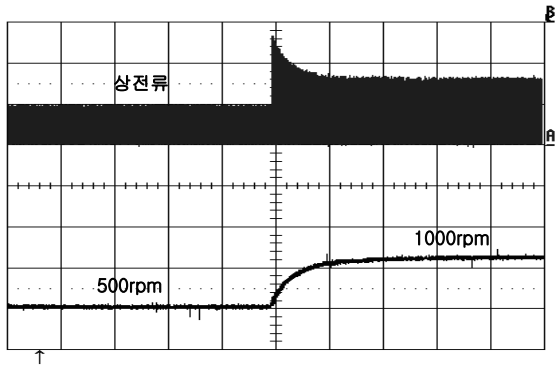


그림 13 속도응답과 상전류 파형 (10A, 0.5s/div.)  
Fig. 13 A speed response and phase current

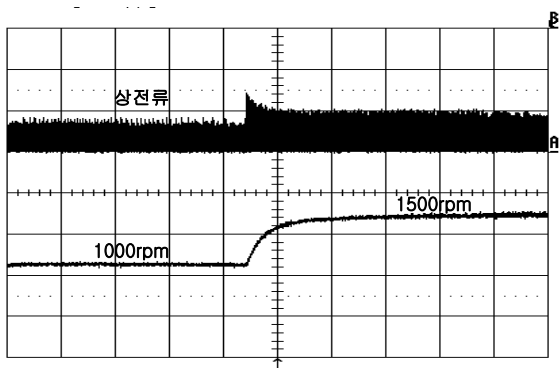


그림 14 속도응답과 상전류 파형 (25A, 0.5s/div.)  
Fig. 14 A speed response and phase current

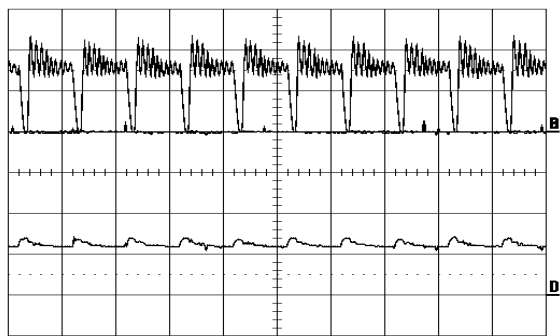


그림 15 3상 전류파형 및 덤프 커패시터전압 (1000rpm)  
(10A, 10V, 5ms/div.)  
Fig. 15 3-phase current waveform and dump capacitor voltage

그림 16-18은 Energy efficient C-dump 컨버터에 의해 구동되는 SRM의 구동속도 500, 1000, 1500rpm 구동시 CM (CM :Common Mode 공통모드) 노이즈 성분을 측정된 결과로서 CM 노이즈의 경로는 케이블과 공통접지 또는 전동기 권선과 공통접지 사이의 기생 커패시턴스에 의해 형성된다. 노이즈 전류의 원인은 스위칭 소자의  $dv/dt$ 와 기생 커패시턴스의 결합이며 노이즈 전류와 접지 임피던스에 의한 CM

노이즈 전압, 전동기 중성점과 접지 사이에 CM 전압 등이 발생된다. 결과적으로 CM 노이즈는 인버터 스위칭 순간에 크게 발생하며 스위칭 소자의  $dv/dt$ 와 기생 커패시턴스의 결합이 가장 큰 원인이 된다[11].

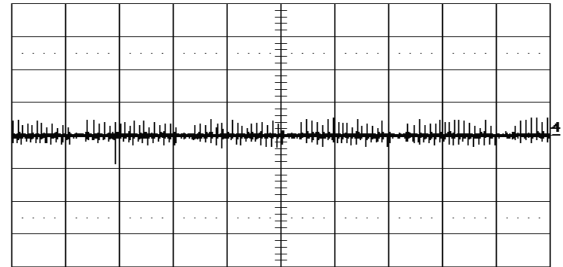


그림 16 500rpm에서의 CM 노이즈 (200mv, 5ms/div.)  
Fig. 16 CM noise at 500rpm

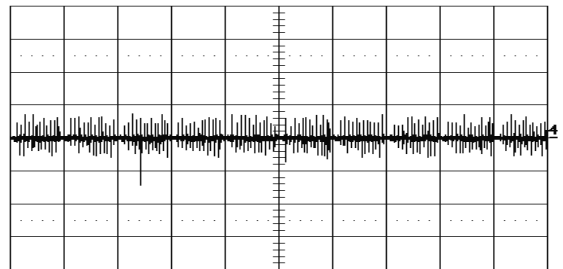


그림 17 1000rpm에서의 CM 노이즈 (200mv, 5ms/div.)  
Fig. 17 CM noise at 1000rpm

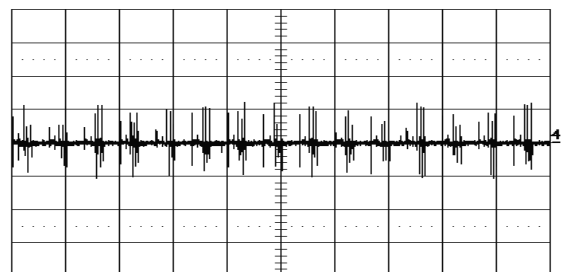


그림 18 1500rpm에서의 CM 노이즈 (200mv, 5ms/div.)  
Fig. 18 CM noise at 1500rpm

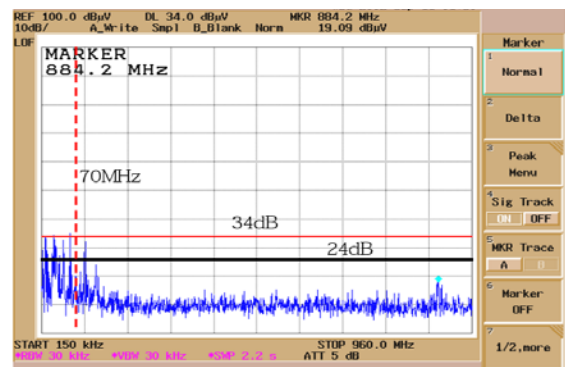


그림 19 SRM의 전도노이즈 스펙트럼  
Fig. 19 The conducted noise spectrum of SRM

그림 19는 표 1에서 명시한 KS CISPR 25 규격에서 Narrow Band를 기준으로 하여 960MHz까지의 노이즈를 스펙트럼 분석기로 관측한 결과 파형으로 속도는 1000rpm의 조건에서 실험하였다. 표 1에서 제시된 기준으로 그림 19에서 자동차 안전기준에 적용해 볼 때 150kHz~70MHz와 70MHz~960MHz의 각 주파수 영역에서 요구사항인 34dB와 24dB의 기준 제한치를 약간 넘는 특성을 보였다.

## 6. 결 론

본 논문은 자동차용 라디에이터 냉각팬 구동을 위한 시스템으로 SRM과 구동용 컨버터인 Energy efficient C-dump 컨버터를 적용하여 전동기 구동 및 전도성 노이즈에 대한 특성에 대해 살펴보았다. SRM과 Energy efficient C-dump 컨버터를 이용한 자동차용 라디에이터 냉각팬 구동 시스템은 각 상전류의 중첩을 가능하게 함으로써 토크 발생 영역을 충분히 활용하고 에너지 효율이 높은 장점을 가지고 있다. 또한 SRM의 전도노이즈 실험결과를 기준으로 100MHz 대역에서 기준치를 초과하는 특성을 보였으나 향후 노이즈에 대한 연구 및 대책을 충분히 세운다면 차세대 차량용 라디에이터 냉각팬용 전동기로 적용이 가능할 것으로 본다.

### 감사의 글

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

### 참 고 문 헌

- [1] T. J. E Miller, "Electronic Control of Switched Reluctance Machines", Newnes, 2001.
- [2] R. Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives" CRC press, 2001.
- [3] 안진우, 황영문, "스위치드 릴럭턴스 전동기 구동과 응용", 신지서원, 1998.
- [4] John E. Makaran, Joe Lovetri, "BLDC Motor and Drive Conducted RFI Simulation for Automotive Applications", IEEE Transactions on EMC, Vol 45, No. 2, pp.316~329, 2003.
- [5] Sayeed Mir, Iqbal Husain, Malik E. Elbuluk, "Energy-efficient C-dump Converters for Switched Reluctance Motors", IEEE Transaction on power electronics, Vol 12, No. 5, pp. 912~921, September 1997.
- [6] Eric Chowanietz, "Automobile Electronics", Newnes, 1995.
- [7] 정찬문, 배태열, 문훈영, 이철승, 하재기, "新 자동차 가솔린엔진", 골든벨 출판, pp. 179~192, 1999.
- [8] 김성범, 신재곤, 김성섭, 신재승, "자동차 냉각팬 작동에 따른 전자파 방사시험 측정에 관한 연구", 한국자동차 공학회 춘계학술대회, pp. 1447~1552, 2006.
- [9] 전자파 적합성(EMC)-차량용 수신기 보호를 위한 무선 방해 특성의 허용 기준과 측정방법, KS C CISPR 25, 2001.
- [10] 정용채, "노이즈 분리기법을 이용한 전도EMI 필터의 모델링 및 설계 알고리즘", 전력전자학회 논문지, Vol 9, No 3, pp.260~266, 2004.

- [11] 정세교, 신휘범, "가전기기용 교류 전동기 구동 시스템의 EMI 특성 및 필터 설계", 전력전자학회 논문지, vol 9 No 1, pp 81~87, 2004.

## 저 자 소 개



### 윤 용 호 (尹 溶 湖)

2002년 성균관대 메카트로닉스공학과 졸업(석사). 2002년~2003년 LG전자 연구원. 2007년 2월 동 대학원 졸업(공학). 2007년 2월~현재 삼성탈레스(주) 종합연구소 전문연구원.  
Tel : 031-8020-7569  
Fax : 031-8020-7889  
E-mail : yongho.yoon@samsung.com



### 김 재 문 (金 才 文)

1994년 성균관대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 졸업(석사). 2000년 2월 동 대학원 졸업(공학). 2000년~2004년 현대모비스(주) 기술연구소 선임연구원. 2004년 3월~현재 한국철도대학 철도차량전기와 조교수.  
Tel : 031-460-4612  
Fax : 031-461-2944  
E-mail : goldmoon@krc.ac.kr



### 박 상 훈 (朴 相 勳)

2007년 성균관대 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 2008년 현재 동 대학원 메카트로닉스공학과 박사과정.  
Tel : 031-290-7169  
Fax : 031-299-4623  
E-mail : marohachi@skku.edu



### 원 충 연 (元 忠 淵)

성균관대학교 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년 12월~1992년 12월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 방문교수. 1988~현재 한국 철도기술연구원 심사위원. 2006년~현재 한국전력공사 PQ심사위원. 2006년~현재 차세대 첨단도시철도시스템(한국건설교통기술평가원) 기술개발사업 운영위원. 현재 성균관대 정보통신공학부 교수.  
Tel : 031-290-7115  
Fax : 031-299-4623  
E-mail : won@yurim.skku.ac.kr