

Radiator cooling fan용 스위치드 릴럭턴스 전동기 및 토폴로지에 관한 연구

정동호*, 윤용호, 한대희, 이태원, 원충연
시립인천전문대학*, 성균관대학교

A Study on Switched Reluctance Motor and Converter topology for Radiator Cooling Fan

D.H. Jung*, Y.H. Yoon, T.W. Lee, and C.Y. Won
Incheon City College*, Sung Kyun Kwan University

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. It is verified more efficient than other converters through simulation and experiments. And also SRM is valid automotive applications that have strict EMC standards. It is compared SRM with BLDC and DC motor by experiments.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor)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][2][3]}

이러한 장점으로 인하여 국내에서도 진공청소기와 같은 가전용 응용분야가 계속해서 많아지고 있으며 특히 고온이나 진동이 심한 자동차 환경에서 적합한 전동기로 선진외국에서도 활발히 연구되고 있다.

하지만 최근 차량내부에는 각종 음향 및 오디오, 비디오 기기, 무선 통신장비 그리고 각종 전동기 등 전장부품의 장착이 늘어가고 있어 정상동작을

위한 차량의 전자기기 설계는 특히 EMC(Electro-magnetic Compatibility: 이하 EMC)에 대한 대책이 필요하다. 이에 대해 John E. Makaran은 BLDC 전동기를 차량용 냉각 팬용 전동기로 적용 시 EMI에 관한 문제를 제시하였다.^[10]

국제적으로 자동차 환경에 적용하는 EMC는 산업환경에서의 EMC보다 더욱 엄격한 규제를 제시하고 있다.

본 논문에서는 일반 승용차량용의 라디에이터 냉각 팬용 전동기로 250W급 SRM을 적용하였고 이를 구동하기 위한 구동용 컨버터로 Energy efficient C-dump 컨버터를 적용하였고 Modified C-dump 컨버터에 비해 성능면에서 상대적으로 우수함을 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인하였다.

또한 자동차 환경에서 SRM이 국제 규격에 적합한지를 검증하기 위하여 비교대상으로 BLDC와 DC 전동기의 전도노이즈를 측정하여 SRM이 차량용 라디에이터 냉각 팬용 전동기로 적합함을 실험 결과로 제시한다.

2. 본 론

2.1 컨버터 Topology의 성능비교

2.1.1 Modified C-dump 컨버터

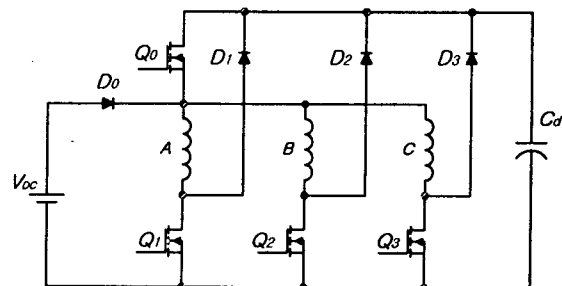


그림 2-1. Modified C-dump 컨버터
Fig 2-1. Modified C-dump converter

그림 2-1은 Modified C-dump 컨버터에 관한 토폴로지이다. 상수보다 하나 더 많은 스위치 및 다이오드를 가지고 부가적으로 커패시터가 추가되는 구조로 에너지를 커패시터에 저장하였다가 바로 다음상의 여자 시에 전달하는 방식의 컨버터로서 제어의 복잡성을 개선시켰다.^[5]

전류 확립시 인가전압의 2배의 덤프 커패시터 전압을 이용하므로 빠른 전류의 확립을 가져올 수 있는 장점을 가진 반면 한 상의 전류가 완전히 소호된 후 다음 스위치를 여자 시켜야 한다.

그러므로 상전류의 중첩을 시킬 수 없어 토오크 발생영역을 충분히 활용하지 못하고 공통스위치의 높은 정격과 발열문제를 안고 있다.^[6]

2.1.2 Energy efficient C-dump 컨버터

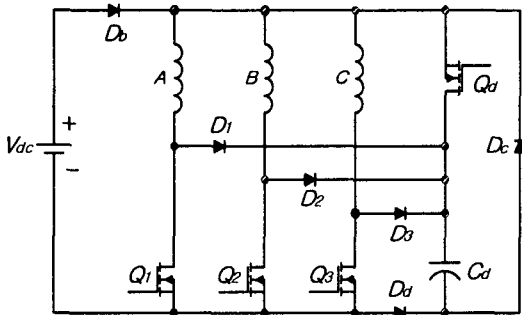


그림 2-2. Energy efficient C-dump 컨버터
Fig 2-2. Energy efficient C-dump converter

그림 2-2는 Energy efficient C-dump 컨버터를 나타내고 있다. 상수보다 하나 더 많은 스위치와 다이오드, 덤프커패시터 그리고 전원 측에 직렬로 블러킹 다이오드가 추가되는 구조이다.

모터의 초핑모드 동안에 어떤 복잡한 제어 없이 상전류의 환류가 가능하므로 제어의 단순함을 가져오고 스위칭 디바이스의 전압정격은 기존의 C-dump 컨버터나 modified C-dump 컨버터에서 공급전압의 2배($2V_{dc}$)가 걸리는 것에 비해 1배(V_{dc})가 걸리므로 컨버터 파워소자에 드는 비용을 줄일 수 있는 장점을 지닌다.

또한 modified C-dump 컨버터에서 가능하지 않았던 각 상전류의 중첩을 가능하게 함으로써 토오크 발생 영역을 충분히 활용할 수 있다.^{[4][5]}

비대칭 브리지 컨버터와 비교해 볼 때 상당 스위치가 하나이므로 스위치의 손실을 줄일 수 있다. 또한 상단 스위치 각각은 절연된 전원을 갖는 드라이버 단을 구성하여야 하지만, Energy efficient C-dump 컨버터의 경우 상당 스위치가

없으므로 회로를 간단히 할 수 있고, 가격을 줄일 수 있다. 하단의 스위치는 공통 source 단자를 구성하므로 절연된 하나의 전원으로 3개의 드라이버 단을 구성할 수 있다. 단점으로는 덤프 스위치를 동작시키기 위한 부가 회로를 구성해야 한다.

일반 C-dump 컨버터와 비교해 볼 때 덤프 인덕터의 생략으로 회로가 간단해지고 부피를 줄일 수 있다. 일반 C-dump 컨버터의 경우 상을 중첩하여 제어를 할 수 없지만 Energy efficient C-dump 컨버터의 경우 중첩제어까지 가능하여 제어를 다양하게 구현할 수 있으며 제어는 약간 더 복잡하게 구현된다.

2.2 자동차의 라디에이터 냉각 팬용 SRM

현재까지 차량에 사용되는 전동기는 직류 전동기나 영구자석형 전동기가 많이 사용되며, 자동차에서의 용도는 스타팅 모터, 엔진의 냉각 팬 용 모터, 오일 펌프 및 냉각 순환용으로 사용되고 있다.^[7] 일반적으로 차량용의 라디에이터 냉각 팬으로 DC 전동기가 주로 사용되고 있으며, 차량의 크기에 따라 전동기의 출력용량이 달라지나, 중형차량의 기준을 볼 때 대략 250W급이 사용된다.

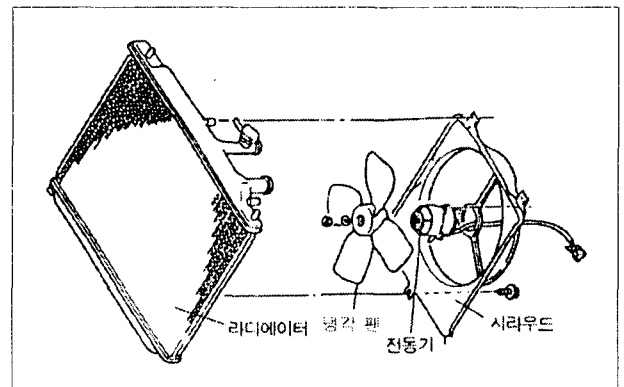


그림 2-3. 라디에이터 냉각 팬
Fig 2-3. Radiator cooling fan

그림 2-3은 자동차의 라디에이터 냉각 팬을 보여준다. 냉각 장치는 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.^[8]

SRM은 6/4극의 전동기를 사용하였고 구동을 위한 제어기로 80C196KC Micro-controller를 이용하여 속도제어를 하였다. 그림 2-4는 6/4 스위치드 릴럭턴스 전동기의 단면도를 보여준다.

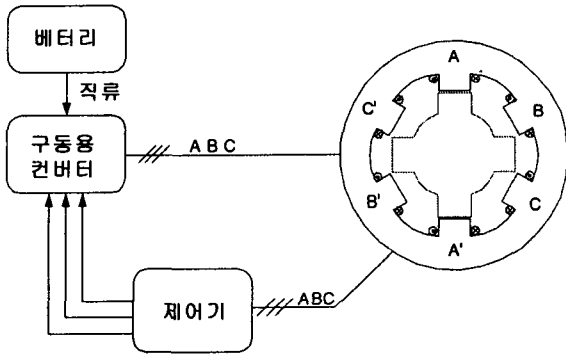


그림 2-4. 6/4극 스위치드 릴럭턴스 전동기의 단면도
Fig 2-4. A cross section of 6/4 pole Switched reluctance motor

2.3 자동차 환경에서의 EMC

최근 차량내부에는 각종 음향 및 오디오, 비디오 기기, 무선 통신장비 그리고 수십 개의 전동기 등의 장치가 늘어가고 있어 정상 동작을 위한 차량용 전자기기 설계를 함에 있어서 EMC에 대한 대책이 필수적이다.

그림 2-5는 EMI/EMC 시험 분류를 보여준다. 여기서 복사성 잡음은 전자파장해를 일으킬 가능성이 있는 기기와 관계가 있다.

차량의 장착될 각 부품들에 개별적으로 방사를 억제하여, 다른 기기에 대해 장해를 일으키는 문제를 해결할 수 있다.

그러므로 전자기적으로 적합한 전자파환경을 만들어 방사를 조절하는 것이 바람직하다.

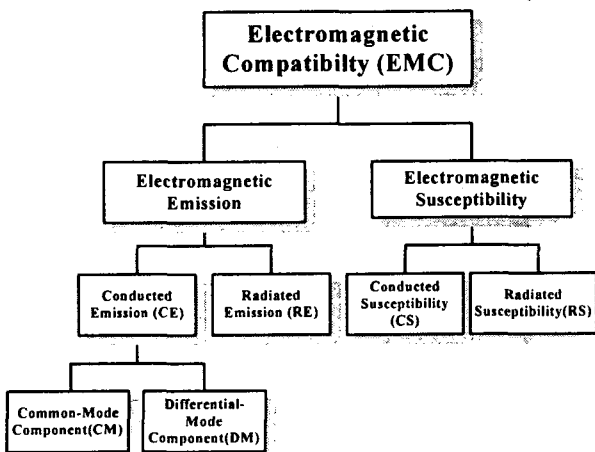


그림 2-5. EMI/EMC 시험 분류
Fig 2-5. Classification of EMI/EMC test

그림 2-6은 자동차에서의 EMC 국제규격 구조를 보여준다.

세계 각국에서는 CISPR(International Special

Committee on Radio Interference : 국제 무선장해 특별위원회)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 SRM, BLDC 그리고 DC전동기에 대한 EMI시험을 하였다.

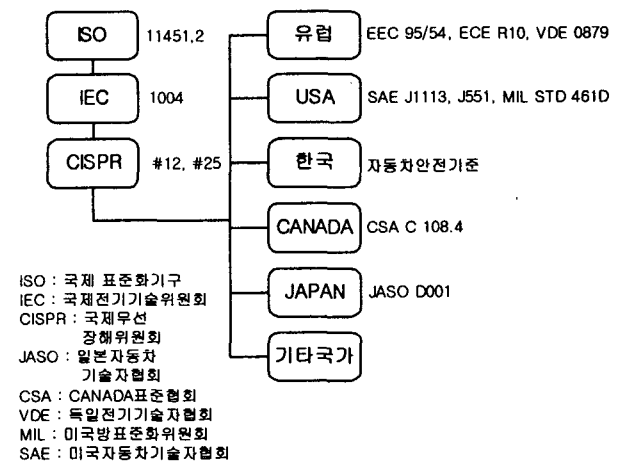


그림 2-6. 자동차 EMC 국제 규격 구조
Fig 2-6. International standard structure for vehicle

KS C CISPR 25 규격에서 시험에 적용한 EMI 제한치는 표 1과 같다.

표 1. 자동차 EMI 제한치

Table 1. EMI limited value for Vehicle

SPEC	Frequency	NB Limit	BB Limit
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

NB : Narrow band, BB: Broad band

2.4 시뮬레이션

본 논문은 SRM에 사용되는 전력변환회로를 해석하기 위해서 시뮬레이션 소프트웨어 프로그램인 PSIM을 사용하였다. Modified C-dump 컨버터와 Energy efficient C-dump 컨버터의 구조적 특징에 의한 파형을 시뮬레이션 하였다.

그림 2-7, 2-8은 SRM의 3상 전류파형과 dump capacitor의 충·방전 파형을 나타낸다.

2.1절에서 Energy efficient C-dump 컨버터가 Dump capacitor에 1배의 V_{dc} 가 인가되는 것을 확인할 수 있다.

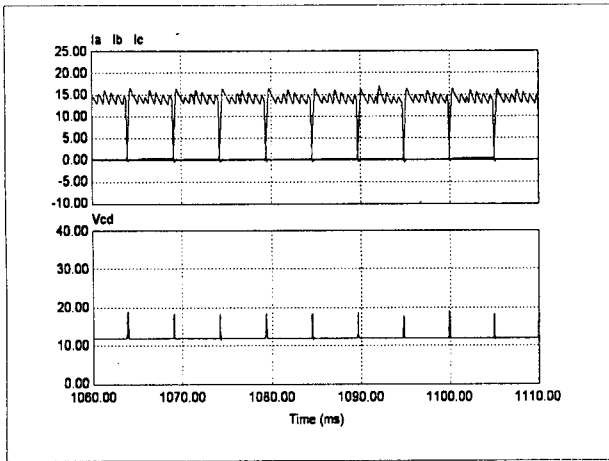


그림 2-7. Energy efficient C-dump 컨버터를 이용한 SRM의 3상전류 중첩파형 및 dump C 전압(1000rpm)
 Fig 2-7. 3phase-overlap waveforms and dump C voltage(1000rpm) by Energy efficient C-dump converter
 (Y축 : A, V, X축 : 시간(sec))

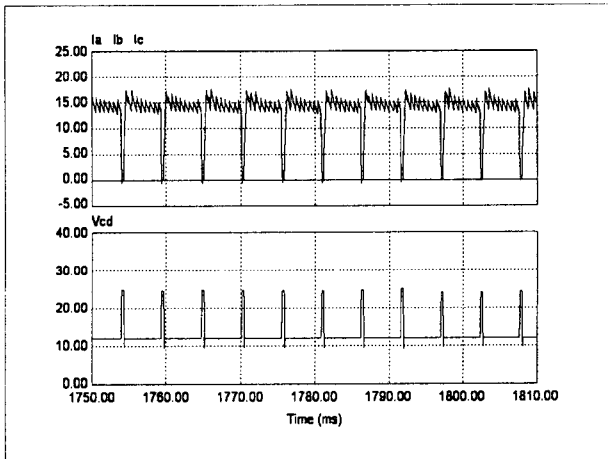


그림 2-8. Modified C-dump 컨버터를 이용한 SRM의 3상전류 중첩파형 및 dump C 전압(1000rpm)
 Fig 2-8. 3phase-overlap waveforms and dump C voltage(1000rpm) by Modified C-dump converter
 (Y축 : A, V, X축 : 시간(sec))

2.5 실험 결과 및 고찰

본 연구에서 그림 2-9와 같이 배터리를 이용한 직류전원회로와 컨버터 그리고 팬부하로 구성하여, SRM 성능측정을 하였다. 전도노이즈 측정을 위해 LISN을 차량용 배터리 후단에 설치하고 DMRN을 이용하여 임피던스를 매칭 하였다. 출력 단자를 스펙트럼 분석기에 연결하여 전동기의 외함과 접지 사이에서 발생하는 부유 커패시턴스(Stray Capacitance) 성분과 전동기를 구동하는 컨버터에서 발생하는 노이즈 성분을 측정 하였다.

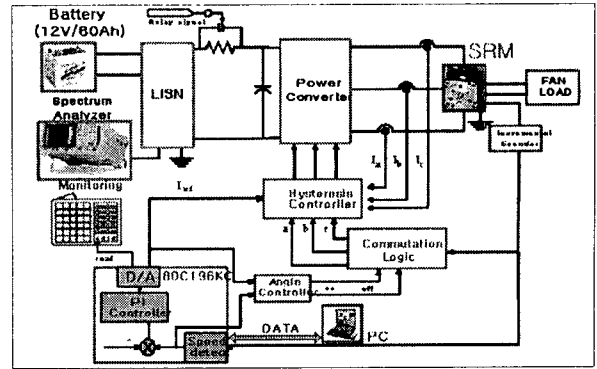


그림 2-9. 전체 시스템 구성도
 Fig 2-9. The overall block diagram

실험에 사용된 전동기 상수는 표 2와 같다.

표 2. 실험에 사용된 전동기 상수

Table 2. Motor parameters for experiments

상 수	3 [상]
출 력	250 [W]
최 대 속 도	3000 [rpm]
고정자 극수	6 [극]
회전자 극수	4 [극]
권 선 저 항	0.02166 [Ω]
최대 인덕턴스	1.332 [mH]
최소 인덕턴스	0.241 [mH]
고정자 극호(β_s)	30°
회전자 극호(β_r)	32°

그림 2-10과 그림 2-11은 시뮬레이션과 동일하게 3상전류 파형과 덤프 커패시터의 양단전압 파형이다.

Modified C-dump 컨버터에서는 덤프 커패시터의 전압이 입력전압의 2배인 24V까지 충전되고 Energy efficient C-dump 컨버터에서는 입력전압의 1배인 12V보다 약간 큰 전압으로 충전되는 파형을 볼 수 있다.

그림 2-12는 컨버터의 토폴로지의 변화에 따른 속도 대비 효율의 비교를 보여준다. 실험은 팬부하를 설치한 상태에서 속도를 변화 시키면서 전력 분석기를 이용하여 전력을 측정하여 효율을 측정하였다. Energy efficient C-dump 컨버터는 Modified C-dump 컨버터 보다 저속(500 rpm)운전시 약 4%의 효율향상이 높다. 중속(1000 rpm)운전시 약 11%의 효율향상이 있고 고속(1500 rpm)운전시 약 6%의 효율이 높다.

결과적으로 Energy efficient C-dump 컨버터는 평균 6%의 효율이 증가되었다. 효율상승의 원인은 덤프 커패시터의 전압정격을 1/2로 낮추어 커패시터에 충전된 에너지의 활용을 높임으로써 Modified

C-dump 컨버터보다 높은 효율을 얻은 것으로 사료된다.

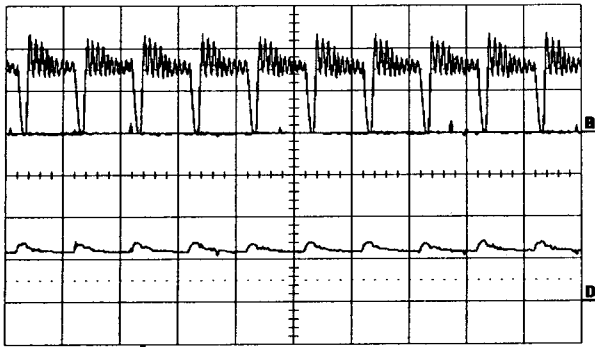


그림 2-10. Energy efficient C-dump 컨버터를 이용한 SRM의 3상전류 중첩파형 및 dump C 전압(1000rpm)

Fig 2-10. 3phase-overlap waveforms and dump C voltage(1000rpm) by Energy efficient C-dump converter (Y축 : A(10A/div), V(10V/div), X축 : 시간(5ms/div))

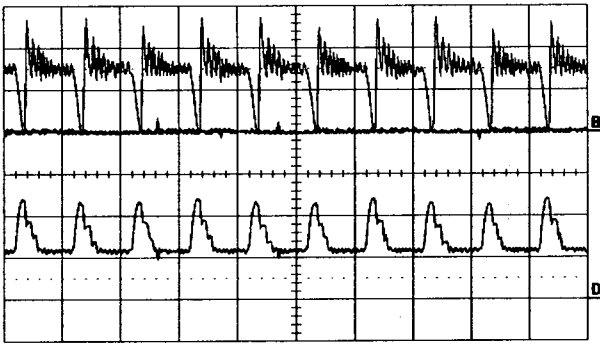


그림 2-11. Modified C-dump 컨버터를 이용한 SRM의 3상전류 중첩파형 및 dump C 전압(1000rpm)

Fig 2-11. 3phase-overlap waveforms and dump C voltage(1000rpm) by Modified C-dump converter (Y축 : A(10A/div), V(10V/div), X축 : 시간(5ms/div))

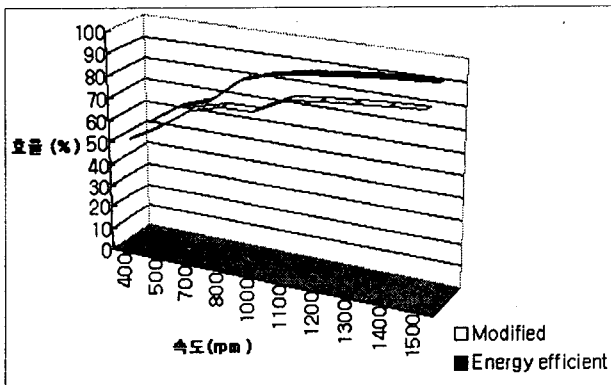


그림 2-12. 속도에 따른 Modified C-dump와 Energy efficient C-dmp 컨버터의 속도 대비 효율 비교

Fig 2-12. Efficiency versus speed between modified C-dump converter and Energy efficient C-dump converter with speed

2.3절에서 제시한 기준에 따라 차량의 라디에이터 냉각 팬용 모터로 사용되고 있는 DC 전동기와 최근 사용되고 있는 BLDC 전동기 및 제안된 스위치드 릴럭턴스 전동기의 전도노이즈를 측정하여 SRM이 차세대 냉각 팬용 전동기로 적용하기에 적합한지를 시험하였다.

비교실험에 사용된 전동기로는 250W급 브러쉬리스 전동기와 현재 차량에 라디에이터 냉각 팬용으로 사용되고 있는 DC 전동기 그리고 본 논문에서 적용한 250W급 스위치드 릴럭턴스 전동기이다.

KS C CISPR 25 규격에서 Narrow Band를 기준으로 하여 960MHz까지의 노이즈를 스펙트럼 분석기로 관측하였다. 속도는 1000rpm 으로 동일한 조건에서 실험하였다.

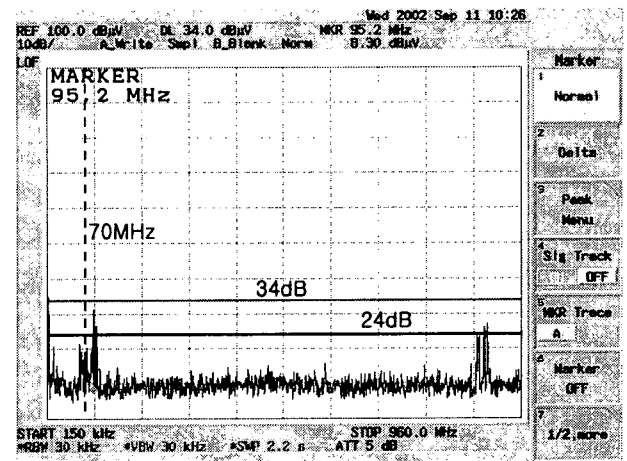


그림 2-13. Brushless DC 전동기의 노이즈 파형
Fig 2-13. Noise spectrum of BLDC motor

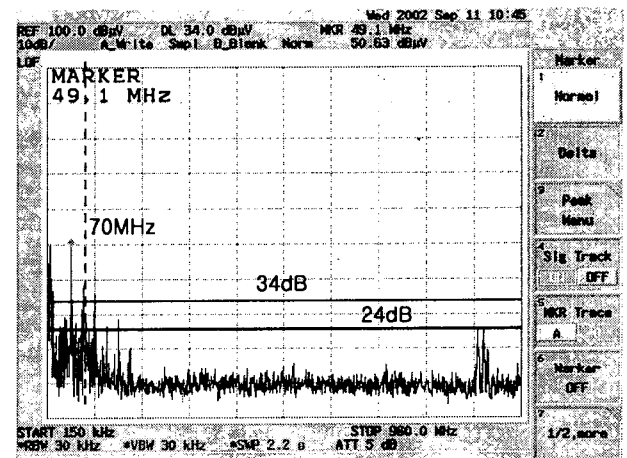


그림 2-14. DC 전동기의 노이즈 파형
Fig 2-14. Noise spectrum of DC motor

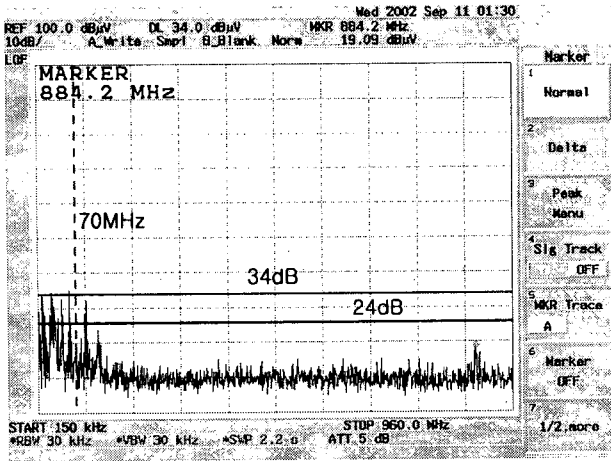


그림 2-15. 스위치드 릴럭턴스 전동기의 노이즈 파형
Fig 2-15. Noise spectrum of SRM

그림 2-13, 14, 15에서 자동차 안전기준에 적용해 볼 때에 본 논문에 적용된 SRM은 타 전동기에 비해 보다 안정적인 특성을 보였다.

100 MHz대에서 기준치를 초과하였으나 노이즈 대책을 충분히 세운다면 차세대 차량용 라디에이터 냉각 팬용 모터로 가격 및 성능면에서 충분한 연구가치가 있다.

3. 결 론

Energy efficient C-dump의 전력반도체 소자의 전압정격은 기존의 C-dump 컨버터나 Modified C-dump 컨버터에서 공급전압의 2배($2V_{dc}$)가 걸리는 것에 비하여 1배(V_{dc})가 걸리므로 발열 면에서 우수하고 토오크 맥동이 작다.

또한 Modified C-dump 컨버터 보다 500[rpm] 회전시 약 4%, 1000[rpm] 회전시 약 11%, 1500[rpm] 회전시 약 6%의 효율이 향상되었다.

또한 EMI시험에서 스위치드 릴럭턴스 전동기가 현재 라디에이터용 전동기로 사용되는 DC전동기와 BLDC전동기 보다 낮은 레벨을 얻어 SRM이 라디에이터 냉각 팬으로의 사용이 적합함을 실험결과로 증명하였다.

이 논문은 과학재단(R01-2001-000-00306-0)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

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] A/ Hava, V. Blasko, and T. A. Lipo, "A modified C-dump converter for variable reluctance machines", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol 28, pp. 86~89, Sept./Oct. 1992.
[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] 김기운, "스위치드 릴럭턴스 전동기의 경제적인 구동 시스템에 관한 연구", 성균관대 석사학위 논문, 1995.
[7] Eric Chowanietz, "Automobile Electronics", Newnes, 1995.
[8] 정찬문, 배태열, 문훈영, 이철승, 하재기, "新 자동차 가솔린엔진", 골든벨 출판, pp. 179~192, 1999.
[9] 전자파 적합성(EMC)- 차량용 수신기 보호를 위한 무선 방해 특성의 허용 기준과 측정방법, KS C CISPR 25, 2001.
[10] 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, MAY 2003.