

파워테일게이트의 DC모터구동회로에 적용된 EMI 저감기법에 대한 연구

김 영 식^{*1)} · 윤 용 수²⁾ · 정 훈³⁾ · 공 준 호³⁾ · 이 상 호³⁾

연세대학교 전기전자공학과¹⁾ · 안산공과대학 전기과²⁾ · 대성전기 기술연구소³⁾

Study of EMI Suppression Method Applied on DC Motor Driver of Power Tail Gate

Yeongsik Kim^{*1)} · Yongsoo Yoon²⁾ · Hun Jung³⁾ · Junho Gohng³⁾ · Sangho Lee³⁾

¹⁾Department of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

²⁾Department of Electrical Engineering, Ansan College of Technology, Gyeonggi 425-792, Korea

³⁾R & D Center, Daesung Electric Co., 743-5 Wonsi-dong, Danwon-gu, Ansan-si, Gyeonggi 425-090, Korea

(Received 15 December 2006 / Accepted 27 August 2007)

Abstract : This paper presents electromagnetic interference(EMI) suppression method applied on the direct current(DC) motor driver for power tail gate control. EMI noise is generated by the fast switching of power devices connected to electric loads. It has become a matter of concern because of the vast increase in the number and sophistication of electronic system in automotive environment. The proposed EMI reduction method is based on the principle of reducing the transient speed of power devices by changing the parameters of the driver circuit related to the power MOSFET. In this paper, power losses were calculated by loss equations and thermal simulation was used to evaluate the effect on printed circuit board. Based on these results, the DC motor driver was fabricated and tested. The proposed method can help to design a DC motor driver which allows it to obtain an acceptable compromise between power losses and EMI.

Key words : EMI(전자파 방해), Power loss(전력손실), DC motor(직류모터), Power tail gate(파워테일게이트), Power-MOSFET(전력-MOSFET), FEM(유한요소법)

1. 서 론

기존의 기계식 구동 시스템은 전자화를 통하여 전기적인 신호에 의하여 제어되는 전기식 서보시스템으로 변화하고 있으며, 자동차의 성능 향상 및 보다 안전하고 쾌적한 운전 환경을 제공하기 위하여 다양한 형태의 전자장치들이 추가되고 있는 추세에 있다. 이와 같이 지속적으로 증가하는 전자장치들은 자동차 내에서 보다 많은 전자파를 발생시키고 주위의 장치들에게 장애요소로서 작용하고 있다.¹⁾

일반적으로 전자파 방해(EMI : Electromagnetic

Interference)와 관련된 문제들은 양산단계에서 발생할 수 있는 높은 비용을 줄이기 위하여 가능하면 설계단계의 초기에 가장 우선하여 평가되고 해결되어야 한다.²⁾ 이와 같은 이유로 인쇄회로기판의 전자회로 설계단계에서 사전에 관련 문제점들을 해결하기 위한 다양한 연구들이 수행되고 있다.

대부분의 전자파 방해는 높은 주파수로 전달되는 각종 신호들과 전기적인 부하의 개폐 및 고속 스위칭 방식을 이용한 부하의 구동에 의하여 발생된다. 디지털 전력제어시스템의 경우에 전자파 방해를 일으키는 과도한 노이즈는 고속의 하드-스위칭(hard-

*Corresponding author, E-mail: ysikkim@yonsei.ac.kr

switching) 방식에 의해 구동되는 전력소자의 작동과 밀접한 관련이 있다. 특히 전기적인 서보와 연결된 전력소자를 통해서 급격히 변화하는 전압(dV/dt)과 전류(dI/dt)가 전자파 방해를 일으키는 노이즈 발생의 주요 원인이다.

고속 스위칭을 목적으로 사용되고 있는 전력소자들 중에서 대표적인 전력-MOSFET는 게이트-소스 전압(gate-source voltage)을 제어함으로써 드레인(drain) 단 또는 소스(source) 단에 연결되어 있는 부하를 구동한다. 전력-MOSFET의 이와 같은 특성을 응용하여 게이트(gate) 단 전하의 충전과 방전 속도를 적절히 제한함으로써 부하 단의 전압과 전류의 급격한 변화율을 감소시킬 수 있고 결과적으로 전자파 방해와 과전압의 발생을 줄일 수 있다.

전자파 방해의 저감을 목적으로 이와 같은 원리를 적용하고 있는 하드-스위칭 방법들 중의 하나인 게이트 구동회로의 임피던스 조절기법은 비용 및 구현의 용이성 측면에 있어서 장점을 가지고 있으나 추가적으로 전력-MOSFET의 스위칭손실을 증가시키는 단점이 있다.

본 논문에서는 자동차용 파워테일게이트시스템(power tail gate system)을 구성하는 핵심장치 중의 하나인 직류모터구동회로에 대하여 전력-MOSFET의 임피던스 조절기법을 적용함으로써 전자파 방해 특성을 개선하고 전자파 시험을 통하여 그 결과를 확인하였다. 그리고 스위칭 방식의 변화에 따른 열적인 동작 안정성을 사전에 평가하기 위하여 변경 전과 후의 전력손실을 계산하고 유한요소법(FEM : finite element method)을 이용하여 인쇄회로기판 위에 놓인 전력소자의 온도 특성을 해석하였으며 그 결과를 실험 결과와 비교하였다.

2. 해석 및 실험

2.1 직류모터구동회로와 소자의 해석

2.1.1 직류모터구동회로

본 연구에서 대상으로 하는 파워테일게이트는 직류모터를 이용하여 작동된다. 테일게이트의 개폐를 위하여 전력-MOSFET로 구성된 풀-브리지(full-bridge) 형태의 직류모터구동회로를 사용하였고, 테일게이트의 개폐 속도를 제어하기 위하여 PWM

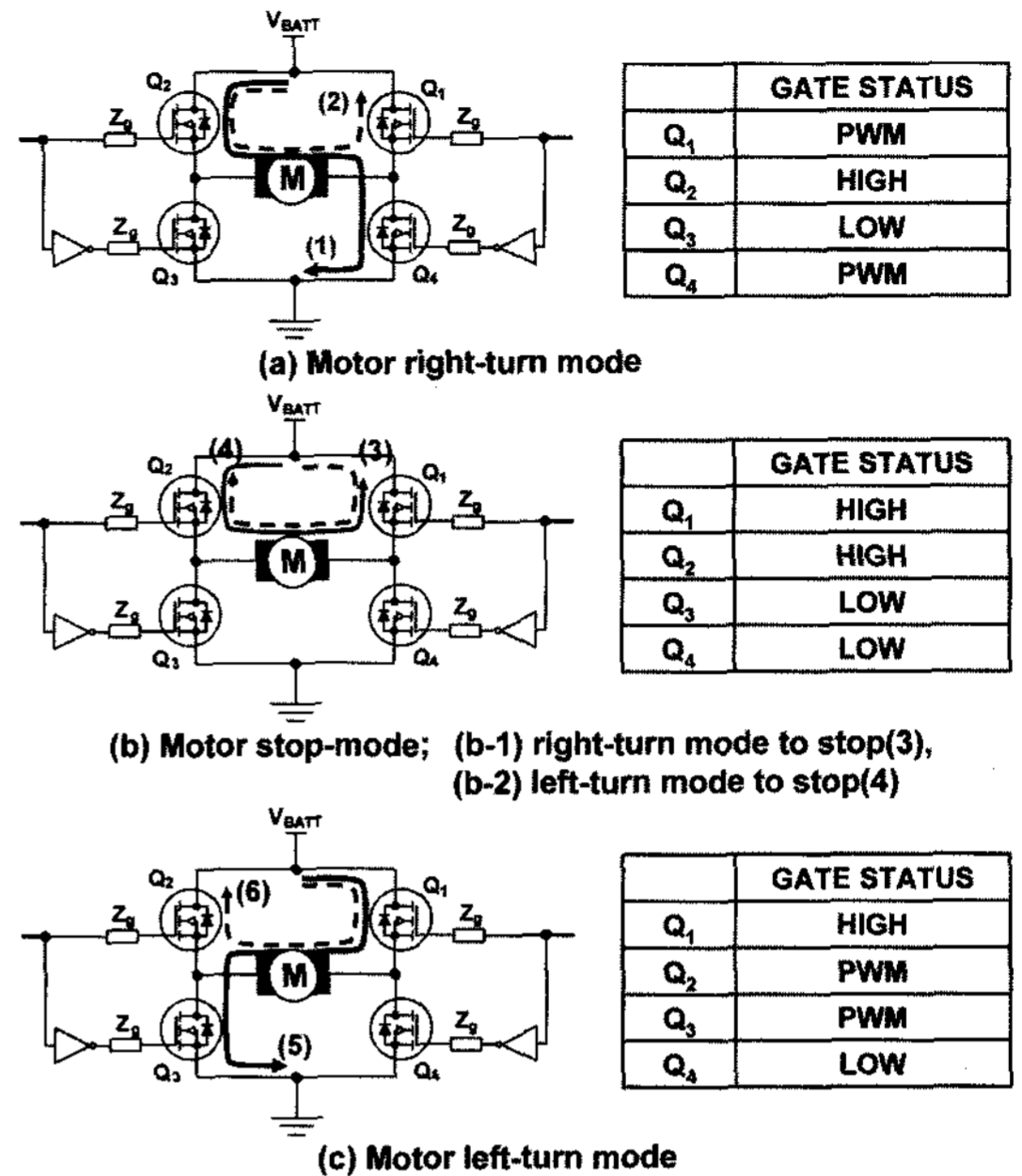


Fig. 1 Operation modes of the full-bridge motor driver

(pulse width modulation)구동방식을 적용하였다. 구동회로는 마이크로 컨트롤러(microcontroller)에 탑재된 알고리즘에 의하여 동작되었다.

Fig. 1은 직류모터구동회로와 동작모드들을 나타내고 있다. Fig. 1의 (a), (b), (c)는 각각 정방향 운전모드, 정지모드, 역방향 운전모드를 나타내며, 각 모드를 구현하기 위한 게이트 제어신호의 상태를 동작모드와 함께 나타내었다.

정방향과 역방향 운전모드를 구현하기 위하여 on의 상태인 Q₁ 또는 Q₂에 대하여 직류모터를 기준으로 좌측 또는 우측에 위치한 한 쌍의 전력-MOSFET에 서로 부호가 반대인 PWM 신호가 입력되도록 구성하였다. 이 경우 PWM 신호에 의하여 구동되는 두 전력-MOSFET는 도통 구간이 서로 중복되지 않도록 제어되었다. 이때 직류모터와 전력-MOSFET에 흐르는 전류는 점선과 실선의 화살표로 나타내었다. Fig. 1의 (a)와 (b)에서 점선의 화살표는 Q₄ 또는 Q₃에 입력되는 PWM 신호의 off 구간에서 모터의 회전에 의하여 형성된 전류이다.

2.1.2 EMI 저감기법

전력-MOSFET의 드레인 단자에서의 기준치를 초과하는 과도신호와 전자파 방해 노이즈는 스위칭

과도상태에서 드레인 단자와 소스 단자를 통과하는 dV/dt 와 dI/dt 에 의해서 발생되므로 이를 저감시키기 위해서는 전력-MOSFET의 스위칭 속도를 줄여야 한다.

일반적으로 전력-MOSFET의 스위칭 특성은 소자의 설계 구조로 인하여 존재하는 기생 정전용량과 게이트 입력 임피던스에 의하여 주로 결정된다. 이 정전용량이 충전되거나 방전됨으로써 전력-MOSFET가 개폐되는데, 이 때 스위칭 속도는 게이트 구동회로의 임피던스와 전류를 흡수하고 공급하는 회로의 능력에 의존한다.

따라서 스위칭 속도제어를 간단한 회로구성으로 구현할 수 있는 기법인 전력-MOSFET의 게이트 단자와 연결되어 있는 구동회로의 출력 임피던스를 증가시키는 방법을 이용하면 스위칭 과도상태의 속도를 감소시킬 수 있다.

2.1.3 스위칭 소자의 해석

게이트 단의 임피던스를 증가시키는 방법은 전자파 방해를 저감시킬 수 있는 반면에 전력-MOSFET에서 발생하는 스위칭 전력손실을 증가시킨다.

따라서 인쇄회로기판 위에 장착되어 구동되는 전력-MOSFET에 대한 과도상태에서의 온도 특성을 검토하기 위하여 유한요소법을 이용한 3차원 열전달 모델을 해석하였다. 해석방법은 측정된 파형을 기초로 하여 계산된 전력손실을 열 해석 모델에 적용하고, 해석된 반도체 접합온도(T_j)를 전력손실의 계산에 다시 적용하여 그 결과를 열 해석 모델에 반영하는 과정으로 진행되었다.³⁾ Fig. 2는 해석 과정을 나타낸다.

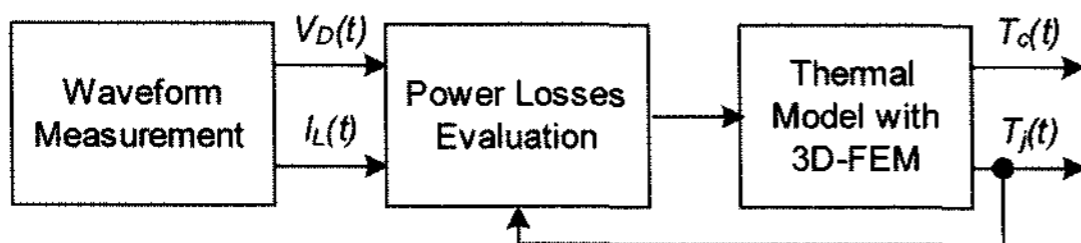


Fig. 2 Measurement-based simulation scheme used for estimating power losses of power-MOSFET

스위칭 전력손실을 계산하기 위하여 전도영역 손실(P_c)과 스위칭영역 손실(P_{sw})로 구분하여 아래와 같은 지배방정식을 적용하였다.⁴⁾

$$P_c = I_m^2 R_{ds(on)} \quad (1)$$

Table 2 Averaged power loss of units under test(UUT) at the initial state

Averaged power loss [W]	UUT-1		UUT-2	
	open	close	open	close
MOSFET Q1	6.4	0.4	3.7	0.4
MOSFET Q2	2.1	3.2	2.1	1.4
MOSFET Q3	0.0	3.2	0.0	1.4
MOSFET Q4	6.4	0.0	3.7	0.0

$$P_{sw} = \frac{1}{2} V_{ds} I_m t_{s(off)} f_s \quad (2)$$

여기서, I_m 은 모터의 전류, $R_{ds(on)}$ 은 전력-MOSFET의 드레인과 소스 간의 온-저항값이며, V_{ds} 은 드레인-소스 단의 전압, $t_{s(off)}$ 는 스위칭 구간의 오프 시간, f_s 는 PWM 스위칭 주파수이다. 계산된 결과는 Table 2에 나타내었다.

온도 특성을 해석하기 위하여 적용한 모델은 Fig. 3의 (a)에 나타낸 것과 같이 실리콘 소자에서 발생된 손실이 에폭시 재질, 소자와 방열판 간의 땀납층, 소자의 방열판, 소자의 방열판과 인쇄회로기판 간의 땀납층, 인쇄회로기판 등을 경유하여 전도되고 공기와 접촉하고 있는 각 경계면에서 대류가 일어나는 모델을 적용하였으며 각 부분의 온도 분포는 식 (3)과 같은 과도열전달방정식에 의하여 결정되었다.⁵⁾

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q - h(T - T_a) \quad (3)$$

여기서, ρ 는 밀도, C 는 비열, t 는 시간이고, T 는 해석대상의 온도, T_a 는 주변온도이며, Q 는 전력손실에 기인한 열원, h 는 대류계수, 그리고 k 는 열전도도이다.

Fig. 3은 COMSOL 사의 COMSOL 3.2 프로그램을 이용한 해석 결과이다. Fig. 3의 (a)는 해석에 사용된 3차원 모델에서 인쇄회로기판 위에 전력-MOSFET가 장착된 부분의 단면을 나타내고, (b)는 요소 분할된 해석 대상을 나타내며, (c)는 해석된 인쇄회로기판과 전력-MOSFET의 온도 분포를 나타낸다. 해석된 그림의 부분의 적색부분은 온도가 가장 높은 영역을 나타낸다. 해석에 사용된 재료의 물성값은 Table 3에 나타내었다.

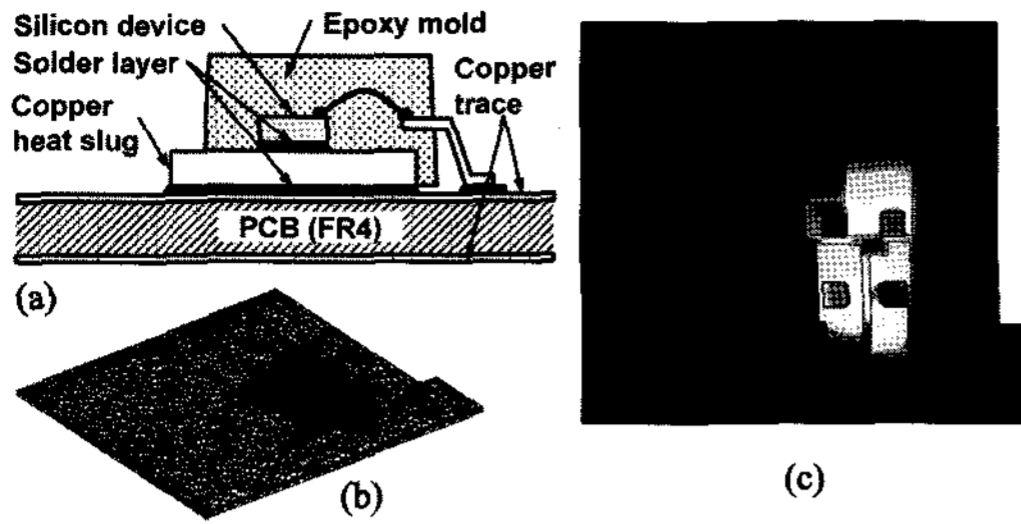


Fig. 3 Simulation model and result of PCB implemented with the power-MOSFET; (a) cross-sectional view of 3D-model, (b) meshed model, (c) temperature distribution (top view)

Table 3 Properties of materials used in element model

Material	Thermal conductivity [W/mK]	Density [Kg/m ³]	Specific heat [J/kgK]
Silicon	163	2330	703
Copper	400	8700	385
Epoxy	1	2	0.2066
Solder	50	9000	150
FR4	0.35	1900	1369

2.2 실험

실험에 사용된 직류모터구동회로는 파워테일게이트 시스템을 제어하기 위한 전자제어장치의 형태로 제작되었다. 인쇄회로기판은 모터구동회로의 온도 특성에 대한 해석 과정에서 얻어진 결과를 반영하여 4층으로 제작되었다. 제작된 시료(UUT-1, UUT-2)의 구동회로와 직류모터의 파라미터들은 Table 4와 같으며, 온도 특성 평가 실험과 전자파 특성 평가 실험에 동일한 시료를 사용하였다.

전력-MOSFET를 구동하기 위한 회로의 출력 임피던스 변화에 따른 온도 특성 변화를 확인하기 위하여 차량 상태에서의 파워테일게이트의 동작과 직류모터에 걸리는 부하와 유사하게 구현되도록 제작된 모의시험장치를 이용하였다. 사용된 실험장치의 전체 구성은 Fig. 4의 (a)에 나타내었다.

풀-브리지 회로를 구성하는 전력-MOSFET의 온도 변화를 측정하기 위하여 각각의 드레인 단자에 열전대를 설치하였으며, 이를 Fig. 4의 (b)에 나타내었다. 측정된 모든 신호들은 증폭과 노이즈 차단을 목적으로 절연증폭기를 통과하여 기록장치에 저장되었다. 모의시험장치의 운전모드는 Table 5와 같으며, 전체 운전시간은 약 800sec 이었다. 운전 부하의

Table 4 Parameters of motor driver and DC motor

Parameter		UUT-1	UUT-2
Power-MOSFET	Drain-source on-state resistance, $R_{ds(on)}$	6.6m Ω	
	Input capacitance, C_{iss}	1870pF	
	Output capacitance, C_{oss}	482pF	
	Rise time, t_r	104nsec	
	Fall time, t_f	51nsec	
Impedance of gate driver, Z_g		200 Ω	480 Ω
PWM switching frequency, f_s		20kHz	
DC Motor	Armature resistance, R_a	0.16 Ω	
	Armature inductance, L_a	0.18mH	

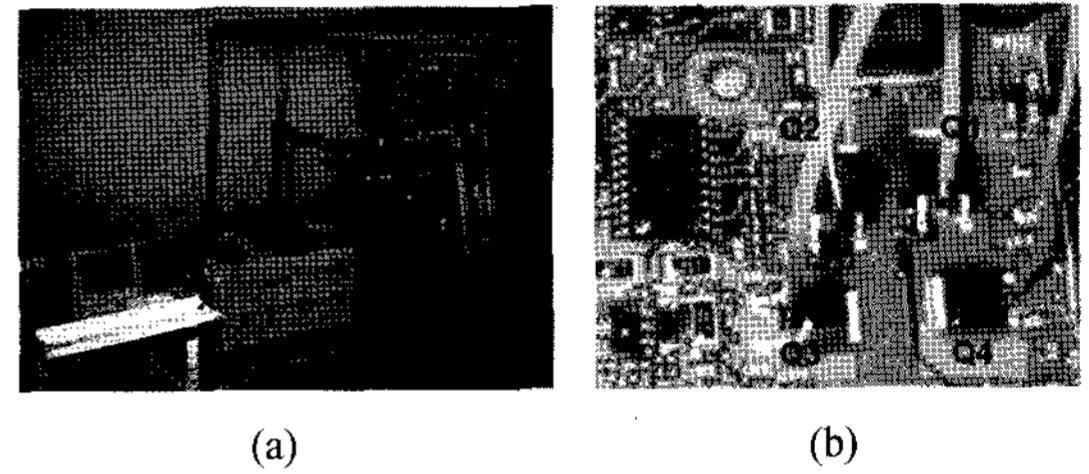


Fig. 4 Experimental setup for measuring the temperature of power-MOSFETs(Q1, Q2, Q3, Q4) on PCB

Table 5 Operation conditions of tailgate simulator

Gate travel	Open cycle time	7.0sec
	Close cycle time	10.5sec
	Latch cinch time	3.5sec
	Latch release time	2.5sec
	Stop time(at full open/close)	3.5sec
Opening angle		73°
Operating voltage		13.5V

기준은 파워테일게이트가 완전히 열리는 위치까지 들어 올리는데 필요한 최대토크를 80Nm로 하였을 경우를 기준으로 하여 조정되었다.

Fig. 5는 전자파 특성 평가를 위한 전자파 시험 항목 별 측정 장치와 시료의 설치 상태를 나타낸다. 실험은 복사방출 시험과 전원선 전이방출 시험을 대상으로 하여 실시되었다.

전자파 시험을 위하여 사용된 측정 장비는 EMI test receiver(20Hz~7GHz, Rohde & Schwarz ESIB7)와 Preamplifier(0.1MHz~1300MHz, Hewlett Packard 8447D)가 사용되었으며, 모든 시험은 Anechoic chamber에서 이루어졌다. 시험에 적용된 규격은 CISPR25에 준한 국내 자동차 제조사의 ES96200으로 하였다.

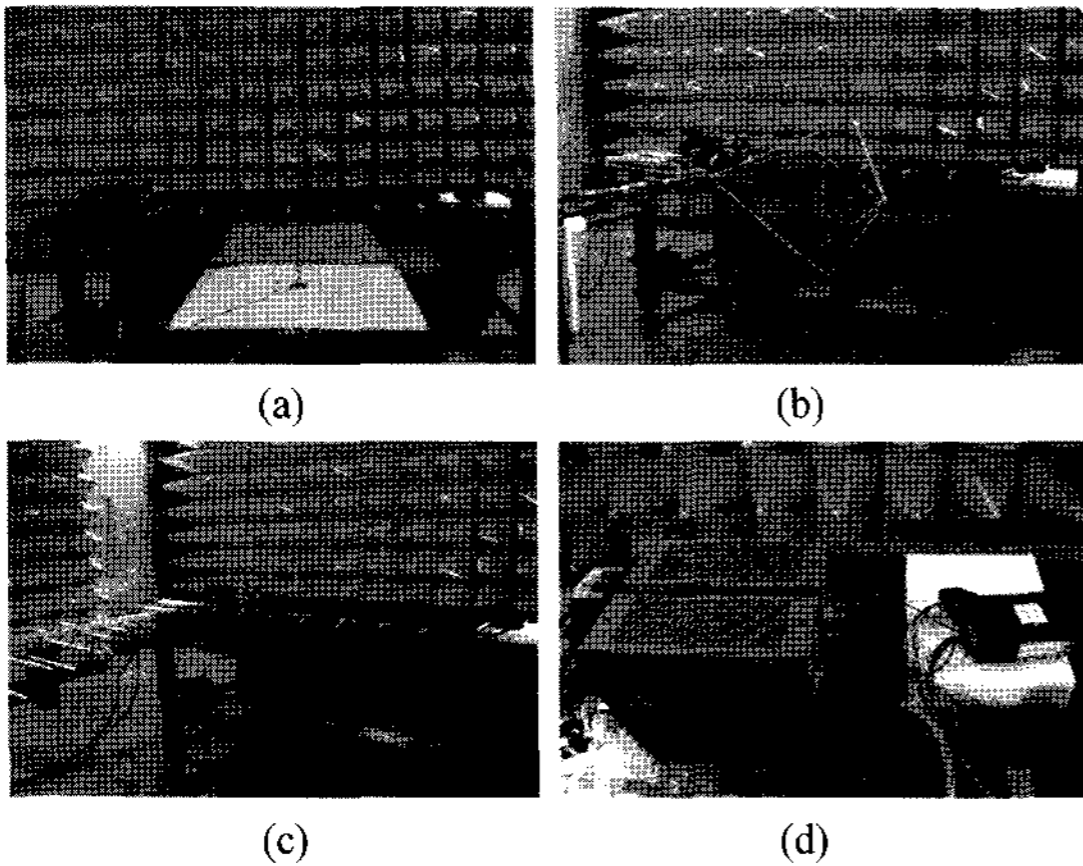


Fig. 5 Experimental setup of radiated emission test(a, b, c) and conducted emission test(d); (a) monopole antenna test (0.15MHz~30MHz), (b) biconical antenna test (30MHz~300MHz), (c) log-periodic antenna test (300MHz~1000MHz), (d) conducted emission on power line.

3. 결과 및 고찰

Fig. 6은 스위칭 시의 전력소자의 게이트-소스 전압과 드레인-소스 전압에 대한 실제 파형측정의 결과이다. 전력-MOSFET 구동회로의 임피던스 변화에 따른 스위칭 오프시간의 지연과 부하 구동단의 과도상태의 파형에 대한 변화를 확인 할 수 있다.

Fig. 7은 UUT-1과 UUT-2의 전력-MOSFET의 드레인 단자에서 측정한 평균온도와 동작구간 별 피크온도를 나타낸다. Fig. 7의 (a)와 (b)는 각각 온도 해석 결과와 실험 결과를 나타낸다. Fig. 7의 (a)에서 UUT-1과 UUT-2의 최대 평균온도는 각각 약 39.6°C와 약 47.0°C이고, 최대 피크온도는 각각 46.2°C와 58.9°C이다. Fig. 7의 (b)에서 UUT-1과 UUT-2의 최대 평균온도는 각각 약 42.6°C와 약 44.3°C이고, 최대 피크온도는 각각 47.2°C와 52.6°C이다. 전력-MOSFET 구동회로의 임피던스가 약 280Ω 증가할 때, 최대 평균온도는 약 1.7°C 상승하였고 최대 피크온도는 약 5.4°C 상승하였다. 이 결과로부터 전력-MOSFET의 게이트 구동회로의 임피던스 증가로 인하여 스위칭 과도상태의 지연이 발생하였고 소자의 전체 전력손실 중에 스위칭손실이 증가하였음을 알 수 있다. Fig. 7의 (a)와 (b)로부터 해석 결과가 실험 결과와 유사함을 알 수 있다.

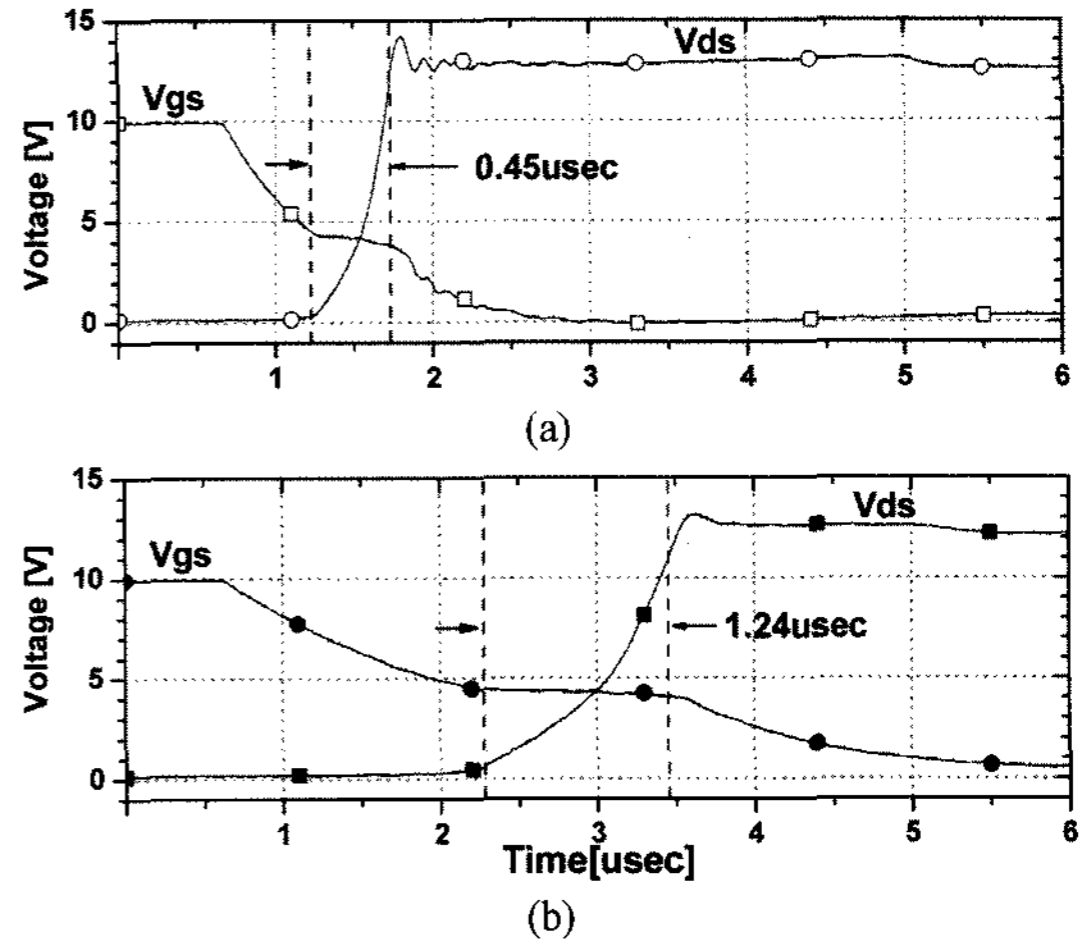


Fig. 6 Typical wave form of power MOSFET in switched off; Gate source voltage V_{gs} and drain source voltage V_{ds} of UUT-1(a) and UUT-2(b) at load current of 14A

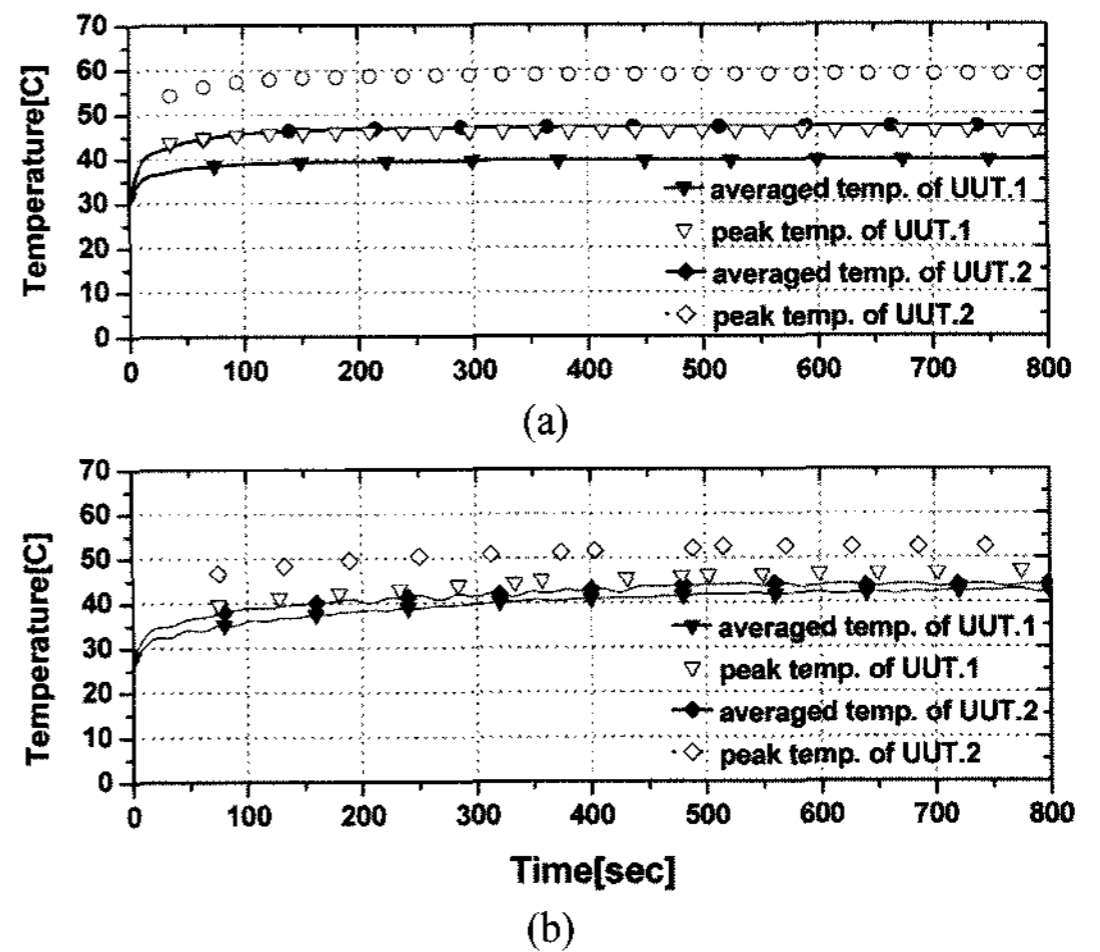
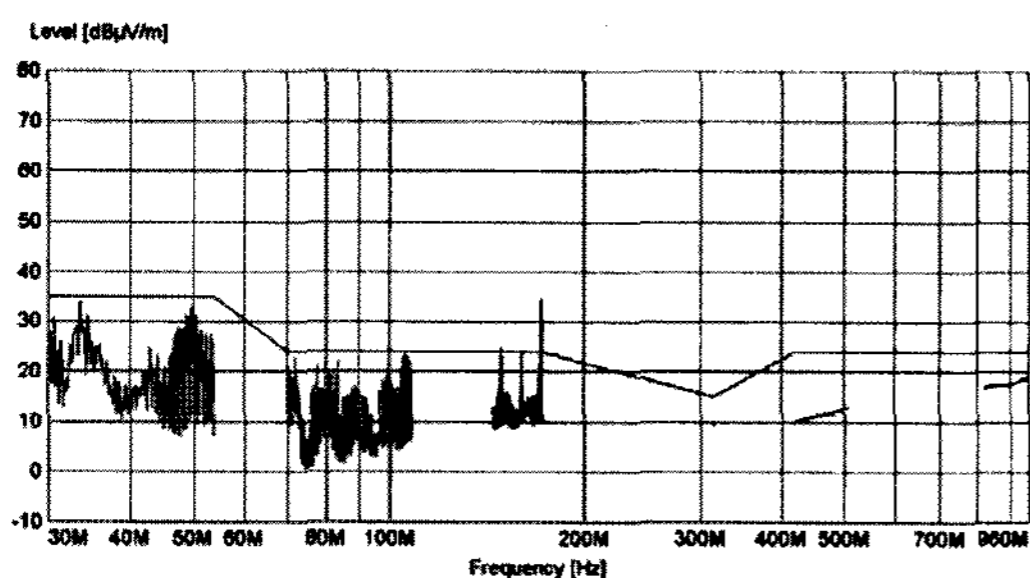


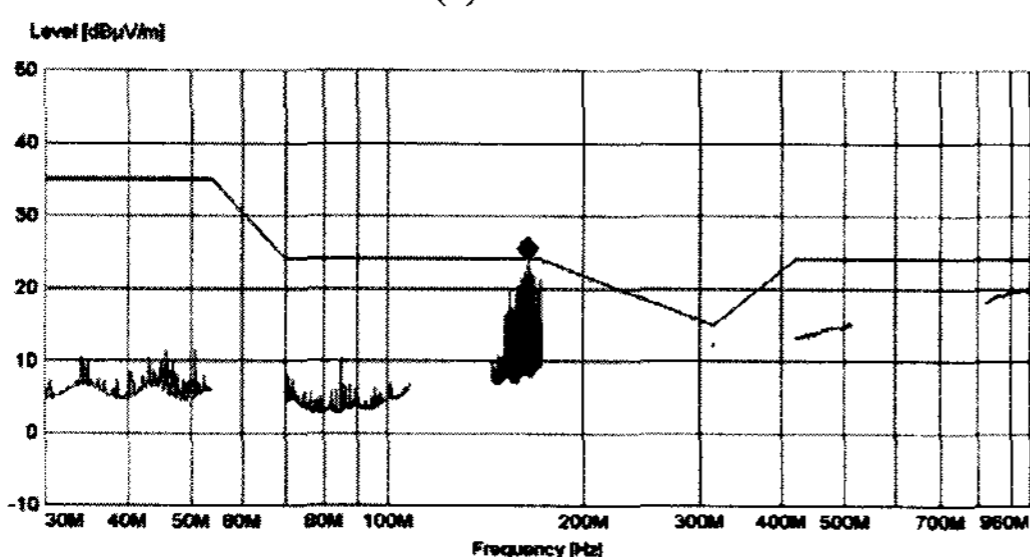
Fig. 7 Temperatures measured on copper heat slug of power MOSFET under simulation (a) and experiment (b)

Fig. 8과 Fig. 9, Fig. 10은 전자파 시험의 결과이다. 각각의 그림은 QUASI-PEAK에 대하여 적용된 기준과 측정 결과를 나타낸다.

Fig. 8은 30~960MHz의 주파수 대역에서 수평모드의 방사방출에 대한 측정 결과이다. UUT-1은 Fig. 8의 (a)에서 나타난 것과 같이 30~100MHz 대역에서 대부분의 전자파 성분들이 기준에 가깝게 나타나고 있으며, 144~172MHz 대역의 경우에는 기준으로 설정한 24.00dB μ V/m에 매우 근접하거나 초과하여 나타나고 있다. 특히 171.36MHz 부근에서는 전자파 성분의 최대치가 약 34.51dB μ V/m로 측정되어 기준

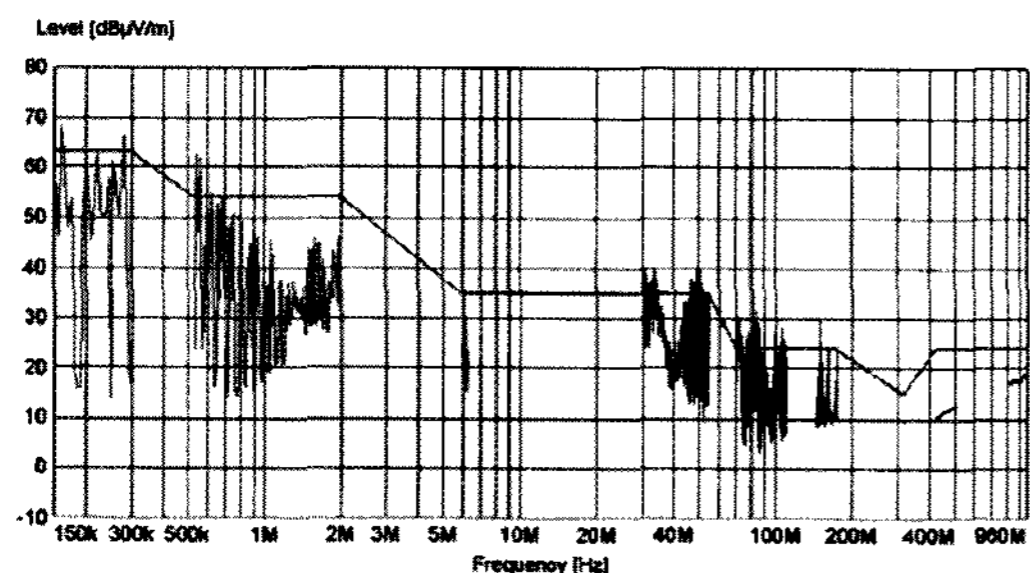


(a) UUT-1

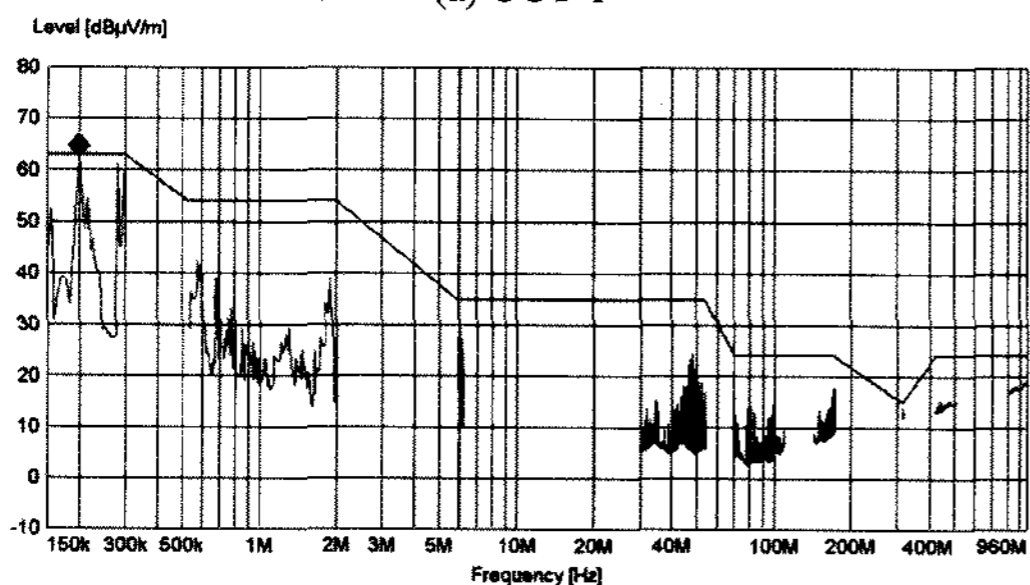


(b) UUT-2

Fig. 8 Results of radiated emission measured from 30MHz to 960MHz(horizontal)



(a) UUT-1



(b) UUT-2

Fig. 9 Results of radiated emission measured from 0.15MHz to 960MHz(vertical)

을 약 10.51dBμV/m 이상 초과하여 방출되고 있음을 보여주고 있다.

UUT-2는 Fig. 8의 (b)에 나타난 것과 같이 163.86

MHz 부근에서 최대치가 약 23.69dBμV/m로 측정되어 해당 대역의 기준에 약 0.31dBμV/m 근접 하여 나타나는 것을 제외하고는 나머지 대역에서 설정된 기준보다 매우 낮게 전자파 성분이 존재함을 알 수 있다.

Fig. 8에 나타난 것과 같이 본 논문에서 연구한 방법을 적용한 결과 30~54MHz와 70~108MHz 대역에서 최대치를 기준으로 각각 약 24dBμV/m와 약 14 dBμV/m 이상 개선되었다.

Fig. 9는 0.15~960MHz의 주파수 대역에서 수직모드의 방사방출에 대한 측정 결과이다.

UUT-1은 Fig. 9의 (a)에 보인 것과 같이 1MHz 이하의 대역에서 대부분의 전자파 성분이 설정된 기준에 가깝거나 기준보다 크게 나타나고 있으며, 30~200MHz 대역의 경우도 동일한 현상을 보이며 전자파 성분들이 방출되고 있다는 것을 나타내고 있다. UUT-1의 측정 대역 중에 33.48MHz대에서 전자파성분의 최대치가 약 40.22dBμV/m로 측정되어서 설정된 기준인 35.00dBμV/m을 약 5.22dBμV/m 초과하여 방출되고 있음을 나타낸다. 이 결과로부터 UUT-1이 AM과 FM 주파수의 특정 대역에서 전자파 방해를 일으킬 수 있음을 예상할 수 있다.

UUT-2는 Fig. 9의 (b)에 보인 것과 같이 측정된 대부분의 대역에서 설정된 기준보다 낮게 전자파 성분이 나타나고 있음을 보여준다.

Fig. 9에 나타난 것과 같이 본 논문에서 연구한 방법을 적용한 결과 150~300kHz, 0.53~2MHz, 30~54 MHz, 70~108MHz 대역에서 최대치를 기준으로 각각 약 7dBμV/m, 20dBμV/m, 15dBμV/m, 17dBμV/m 이상 개선되었다.

Fig. 8과 Fig. 9의 결과들로부터 직류모터의 구동 회로로부터 발생하는 전자파 성분은 전력-MOSFET의 게이트 구동회로를 구성하고 있는 회로의 임피던스 성분의 변화에 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있으며, 임피던스의 증가에 따라서 방출되는 전자파 성분이 크게 감소함을 알 수 있다.

Fig. 10은 0.15~108MHz의 주파수 대역에서 측정된 전원선 전이방출 시험의 결과이다.

UUT-1은 Fig. 10의 (a)에 보인 것과 같이 0.15~0.30MHz 대역에서 대부분의 전자파 성분이 설정된 기준인 80.00dBμV/m를 크게 초과하여 나타나고 있고 0.28MHz대에서 약 93.86dBμV/m를 나타내어 기

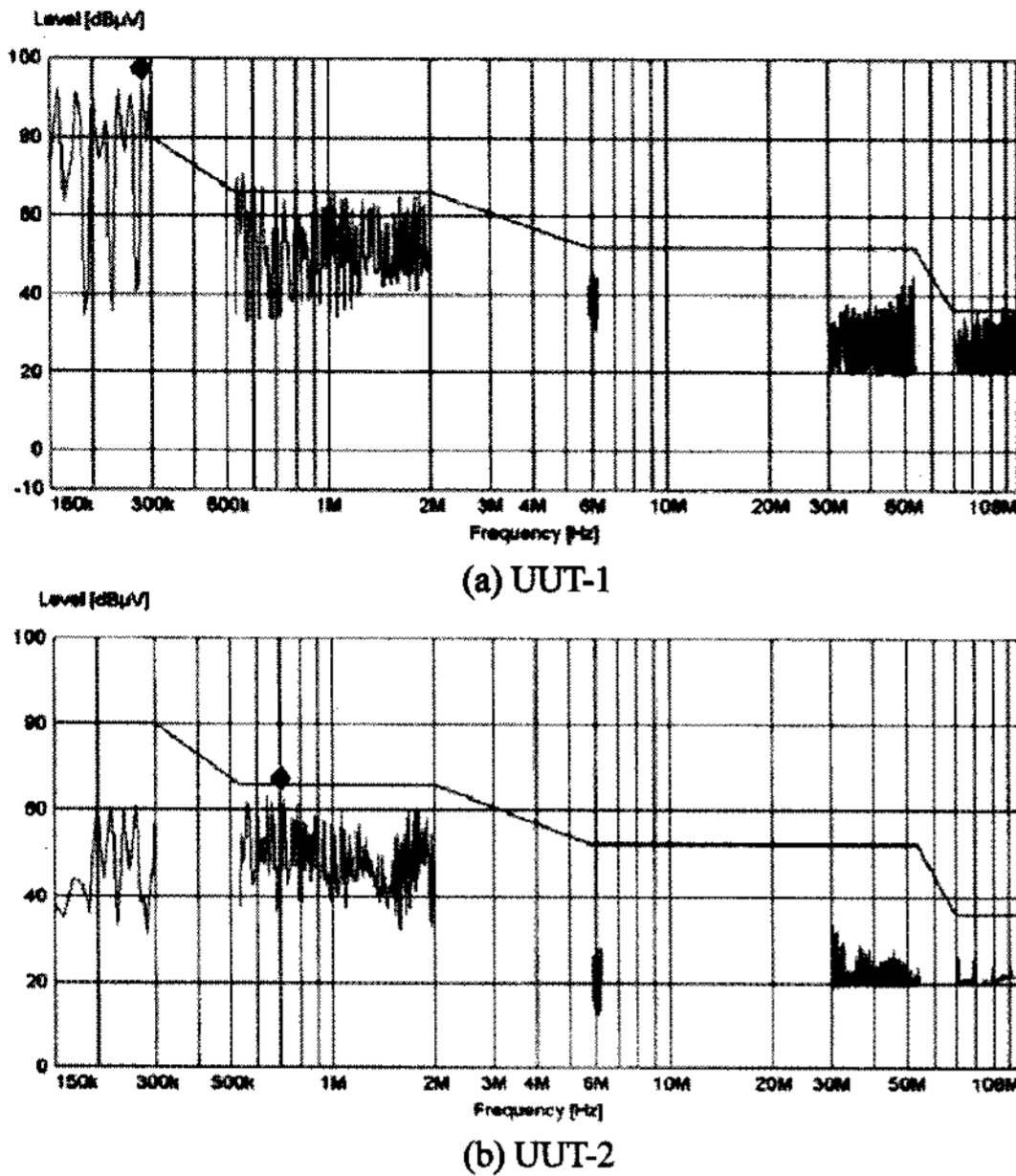


Fig. 10 Results of conducted emission measured from 0.15MHz to 108MHz

준보다 약 13.86dBμV/m 크게 방출되고 있음을 알 수 있다.

UUT-2는 Fig. 10의 (b)에 보인 것과 같이 0.70MHz 부근에서 최대치가 약 64.18dBμV/m로 측정되어 해당 대역의 기준인 66.00dBμV/m와 비교하여 약 1.82dBμV/m의 마진을 보이고 있으며, 그 외의 나머지 대역의 경우에는 설정된 기준보다 매우 낮게 전자파 성분이 존재함을 알 수 있다.

Fig. 10에 나타난 것과 같이 본 논문에서 연구한 방법을 적용한 결과 150~300kHz, 0.53~2MHz, 5.9~6.2MHz, 30~54MHz 대역에서 최대치를 기준으로 각각 약 34dBμV/m, 6dBμV/m, 16dBμV/m, 12 dBμV/m 이상 개선되었다. 결과적으로 전원선 전이방출 시험의 결과도 방사방출 시험과 유사하게 전력-MOSFET의 게이트 구동회로를 구성하고 있는 회로의 임피던스 변화에 영향을 받는다는 것을 알 수 있으며, 임피던스의 증가에 따라서 방출되는 전자파 성분이 대역별로 두드러지게 감소함을 알 수 있다.

각종 전자제어장치와 전기장치들이 단일전원의 전력망을 통하여 서로 연결되어 있는 자동차의 특성을 감안하여 보면 Fig. 10의 (a)에 나타낸 UUT-1이 자동차에 설치되어 동작되었을 경우, 기준을 초과

하는 전자파 성분들이 전원선을 통하여 다른 장치들로 쉽게 전이될 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 고속으로 스위칭 되는 자동차용 직류모터구동회로에 적용되는 회로의 전자파 방해 특성 개선에 관한 것으로서 전자파 발생을 제한할 수 있는 방법을 제시하였고, 이에 따른 회로의 부대 영향요소를 사전에 해석하였으며, 이를 반영하여 제작된 시료를 대상으로 시험을 수행하여 그 결과를 비교 평가하였다.

본 연구를 통하여 전력-MOSFET의 게이트를 구동하기 위한 회로의 임피던스를 조정하여 부하단의 스위칭 특성을 변경시킴으로써 EMI 성능개선이 가능하다는 것을 확인하였다. 소자의 전력손실 증가로 인한 열적인 안정성을 확보하기 위하여 수행되었던 온도 특성 해석기법은 향후 유사한 시스템의 고속으로 제어되는 부하를 구동하는 회로설계에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- 1) G. Choe, S. Jho, W. Jeong, S. Jang, S. Kang and S. Han, "Analysis of Electro-magnetic Waves for the 815~865MHz and 900~950MHz Bands in a Cabin of Automobile," Transactions of KSAE, Vol.14, No.1, pp.176-182, 2006.
- 2) J. Loeckx and G. Gielen, "Efficient Identification of Major Contributions to EMI-induced Rectification Effects in Analog Automotive Circuits," 17th International Zurich Symposium, pp.148-151, 2006.
- 3) A. Lakhsasi, Y. Hamri and A. Skorek, "Partially Coupled Electro-thermal Analysis for Accurate Prediction of Switching Device," IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Eng., Vol.1, pp.375-380, 2001.
- 4) L. Locher, Introduction to Power MOSFETs and Their Applications, Application Note AN-558, National Semiconductor Co., 1988.
- 5) S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Co., USA, pp.41-77, 1980.