

# 반도체 스위칭소자의 내성특성 개선에 관한 연구

민 경 찬\* · 김 동 일\*\*

A Study on the Immunity Improvement of Semiconductor Switching Components

*Gyung-Chan Min\* · Dong Il Kim\*\**

<목 차>	
Abstract	4. 결 론
1. 서 론	참고문헌
2. Surge의 시험과형과 에너지 총량식	요 약
3. 실험과 고찰	

## Abstract

The switching components to control the speed of dc motor, which perform vital fuction in a modern motor vehicle or a ship, are susceptible to suffer damage or upset by switching transient. An equivalent circuit was derived, in this paper, to select an ideal component having immunity against the switching transient among varistor, zenner diode, etc. Furthermore, we have carried out the optimal improved transient protection circuit design in the view of cost effectiveness, proper wave form of transient defined by the international regulations. The process and cause of the damages in the switching components were examined. Then, the immunity improvement of semiconductor switching components to control a dc motor has been achieved considering impedance condition according to the variation of the diverting transient current.

### 1. 서 론

자동차의 블로어 모터 속도제어 스위칭 소자인 트랜지스터가 제조자에 의해 주어진 제특성에 따라 설계되었음에 불구하고 자동차의 종류에 따라 트랜지스터가 손상되는 현상이 발생되었다. 특히

여름철의 에어컨 제어, 장마시 전면유리의 안개 제거를 위해 매우 중요한 소자의 손상은 현장에서 엄청난 불만을 야기시킬 수 있으며, 때로는 인체의 안전과도 직결될 수 있는 중요한 문제가 될 수 있다. 더욱이 스위칭용 트랜지스터(이하 Tr)가 손상되는 경우 도통되어 풍속을 제어할 수 없을 뿐만

\* 한국기술연구소(Korea Technology Institute)

\*\* 한국해양대학교 전파공학과(Korea Maritime Univ.)

아니라 고급차종에 부착된 전자동 기기인 경우, 전원 차단스위치가 없도록 제어기를 설계할 때 등에는 제어에 많은 어려움이 수반 될 수 있다. 스위칭 Tr의 손상상태는 제조업체의 통계를 보면 다음과 같다.

똑같은 스위칭 소자라도 자동차의 종류에 따라 전혀 손상되지 않는 자동차가 있고, 손상의 빈도가 높은 자동차가 있다. 손상된 Tr의 상태는 다음과 같다.

- (1) 클랙이 생기면서 Diffused Junction이 도통되는 경우(85%)
- (2) 전혀 외상이 없으면서 Tr E-C 접합점이 파괴되어 도통되는 경우(15%)

따라서, Tr의 손상원인을 정확히 규명하고 Tr의 손상상태의 재현되지 않으며, 원가를 높이지 않으면서 대책을 세울 수 있는 방법제시, 직류 Motor에서 발생하는 Transient와의 상관관계 등에 대해 해석이 요구된다.

이상의 주어진 조건에서 정격의 스위칭 소자가 손상되는 원인은 전기적 충격인 과전압, 과전류에 의한 손상이 전부이다. 통상적으로 스위칭 소자가 손상을 입는 경우는 MOS류는 과전압에, Tr과 같은 Junction devices류는 과전류에 의해 주로 손상을 입는다<sup>1),2)</sup>.

이에 대한 원인을 밝히기 위해, 정상적인 구성품에 인가할 의사파형을 많은 국제 규격의 서지 파형 중에서 현장에서 손상된 Tr과 유사한 상태로 손상되는 파형을 찾아 시험하고 이의 손상과정을 유추해 손상 원인을 찾아낸다. 제조자측 주요 요구사항인

〈표 1〉 일반적인 서지의 전기적조건

	Voltage	Current	Rise time	Duration
1.Lightning	a)25kV/m	20kA	<1.5 $\mu$ s	20 $\mu$ s
	b)6kV	3kA	<8 $\mu$ s	
2.Switching	a)<2500V	200A	<10 $\mu$ s	>40 $\mu$ s
	b)<600V	<500A	<50 $\mu$ s	>10ms
3.EMP	a)100kV/m	10kA	10ns	150ns
	b)1kV	>10A	20ns	1 $\mu$ s
4.ESD	a)40kV	80A	1-5ns	<100ns
	b)1-5kV	>10A	10ns	>100ns

〈표 2〉 국제적으로 정해진 주요 의사서지 파형

국제조직	전 압	파 형	전류/파형
CCITT	9-5KV	100x800 $\mu$ s	333A(3x160 $\mu$ s)
	0-6KV	1.2x800 $\mu$ s	400A(1x160 $\mu$ s)
	0-800V	4x2000 $\mu$ s	1500A(6x150 $\mu$ s)
FCC,Part 6a	0-800V	10x560 $\mu$ s	100A(Metallic)
	0-1500V	10x160 $\mu$ s	200A(NM)
	0-2500V	2x10 $\mu$ s	1000A
REA,PE60,522a	0-1000V	10x1000 $\mu$ s	100A
	0-1000V	10x1000 $\mu$ s	500A
IEC1000-4-5	500V-4kV	8/20 $\mu$ s	1.2/50 $\mu$ s
IEC1000-4-4	500V-4KV	5/50ns	

원가를 높이지 않으면서 기구적으로 적합한 보호 회로를 구성 하기 위해 Varistor[MOV], Zenner Diode 각각의 등가회로에서 최적조건을 실험을 통해 이들간의 상관관계를 밝히고 대책을 제시한다.

## 2. Surge의 시험파형과 에너지 총량식

원래 서지(Surge)와 트랜지언트(Transient)가 갖는 각각의 용어 정의는 파형의 크기, 주기성, 에너지의 양에 따라 구분되지만 실제로는 혼용하여 사용한다.

오랫동안 통계적으로 구해진 서지의 종류별 에너지량과 파형은 〈표 1〉과 같고, 국제적으로 정한 의사 서지파형의 종류는 매우 다양한데, 주요 국제 규격의 인가파형은 〈표 2〉로 요약된다<sup>1),3)</sup>.

실질적으로 모터코일에서 발생하는 스위칭 서지를 정확하게 예측하는 것은 불가능에 가깝다. 왜냐하면, 우선 발생하는 서지 파형은 브러시의 압력, 모터의 회전속도 그리고 모터 제조업체에 따라 달리 설계된 필터회로 등에 따라 불규칙하게 달라지기 때문이다.

따라서, 요구되는 스위칭 소자의 손상원인을 규명하기 위해 다음과 같이 4종류의 파형의 서지를 전압을 가변하면서 인가하고, 주입위치에 따른 스위칭소자의 파괴여부와 손상된 소자의 상태를 평가하였다.

- (1) IEC 1000-4-4(EFT)/4kV

- (2) IEC 1000-4-5(Surge)/3kV
- (3) JASO 130V/400ms/D1
- (4) JASO 70V/200ms/A1

모터코일과 모터 속도 조절용 반도체 스위치간에 발생하는 스위칭 서지의 발생 구조는 다음과 같다.

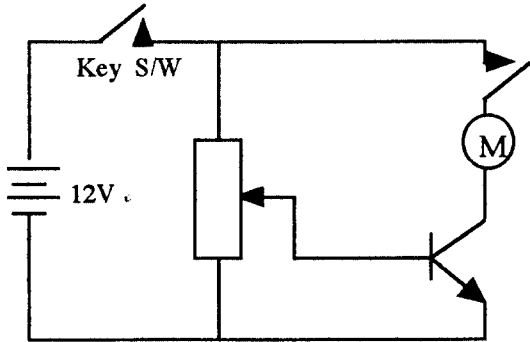


그림 1 모터코일의 서지발생 기본구조

그림 1과 같은 회로에서 발생할수 있는 서지는 3가지가 있다.

- (1) Tr이 on되면서 발생하는 Inductive 서지
- (2) Tr이 on 된 상태에서 모터의 브러쉬 개폐에 의한 반복성 서지
- (3) Tr이 on된 상태에서 시동 스위치의 개폐에 의한 서지

그림 2와 같은 모터 코일의 등가회로에서 코일의 인덕턴스  $L_o$ , 코일자체의 분포용량  $C_o$ , 코일내부저항에 의한 손실  $R_o$ 로 병렬공진회로를 구성하고 있다<sup>4)</sup>. 전원이 공급되고 Tr이 on후 off될 때 I의 전류가 흐르면  $L_o$ 에  $I^2L_o/2$ 의 에너지가 축적된다. 일반적으로 모터의 전원개폐에 의해 발생하는 서지 전압은 모터의 회전속도와 단위시간( $dt$ )에 흐르는 전류의 변화( $di$ )와 모터코일의 인덕턴스( $L_o$ )에 따라 전압이 유기되어  $C_o$ 에 충전되고 동작 중인 Tr의 E-C간에 인가된다.

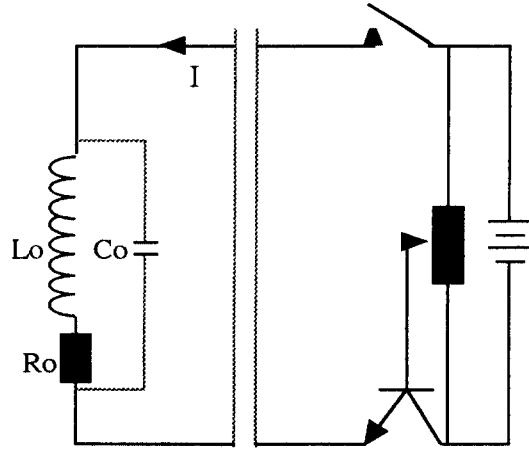


그림 2 모터코일의 등가회로

모터코일의 인덕턴스  $L_o$ 는 제품마다 다르나 H사 제품의 경우  $400\mu H$ 정도이며,  $C_o$  역시 코일의 권수, 굵기, 고유저항, 피막재료 등에 따라 다르지만 대략  $300 pF$ 정도이다.

모터내부에 인위적으로 삽입된 용량 ( $1\mu F$ ) 등에 따라 달라지겠지만 계산의의를 위해 여기서는 분포용량만을 고려하여 에너지  $J_o$ 의 총량 관계식<sup>4),13)</sup>에서 유기전압을 계산하면 다음과 같다.

$$J_o = L_o I_o^2 / 2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $I_o$ 는 코일에 흐르는 전류이며,  $L_o = 4 \times 10^{-4}$ ,  $I_o = 10A$ 이면

$$J_o = 40mJ$$

시동 스위치를 off(on)시켜  $I_o$ 가 Open되었을 때  $L_o$ 의 유기전압V는

$$V = -L_o \frac{di}{dt} \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서  $di/dt$  무한대에 가까운 값이 되나 그림 2의 증가회로에서 보듯이 모터코일의 분포용량이 나, 별도 삽입된 컨덴서에 충전되어 에너지가 소비된다.  $L_o$ 의 에너지가  $C_o$ 에 손실없이 이동하였다고 할때의 전압  $V_o$ 는 다음식에서 구해진다.

$$L_o I_o^2 / 2 = C_o V_o^2 / 2 \dots\dots\dots (3)$$

식(3)으로 부터  $V_o$  대해 풀면

$$V_o = \sqrt{\frac{L_o}{C_o}} I_o \dots\dots\dots (4)$$

$I_o=10A$ ,  $L_o=400\mu H$ ,  $C_o=300pF$ 이면 모터코일 양단에 발생하는 서지전압의 이론치는 17 kV 이상이 발생하나 스위치가 떨어지면서 방전이 일어나 많은 에너지가 손실되고 용량에 충전되어 실제로 이보다 낮은 수십V - 수백 V가 발생된다. 만약 코일 양단에  $1\mu F$ 의 컨덴서를 삽입한 경우 이론적으로 72.1 V 정도의 서지가 발생된다. 중요한 것은 식(4)에서 알수 있듯이 모터 코일 양단에 발생하는 서지 전압은  $I_o$  와  $L_o$ 는 모터 특성에 의해 정해지므로 상수로 보면, 모터 코일 양단간의 용량( $C_o$ )의 제공근에 반비례하여 발생하는 사실이다.

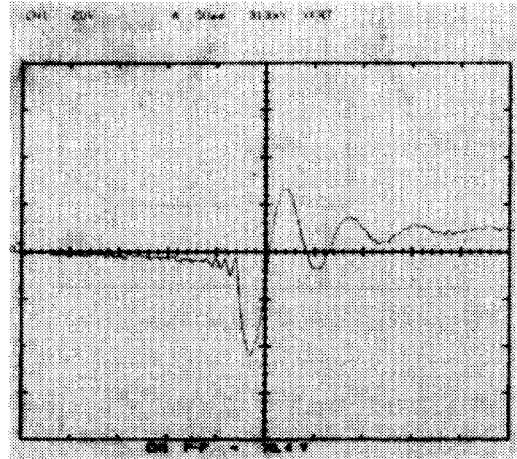
### 3. 실험과 고찰

위에서 기술한 바와 같이 모터에서 발생하는 서지의 에너지량은 <표 1>에서 보듯이 수십mJ 정도이며 지속 시간은 수십ms단위이다.

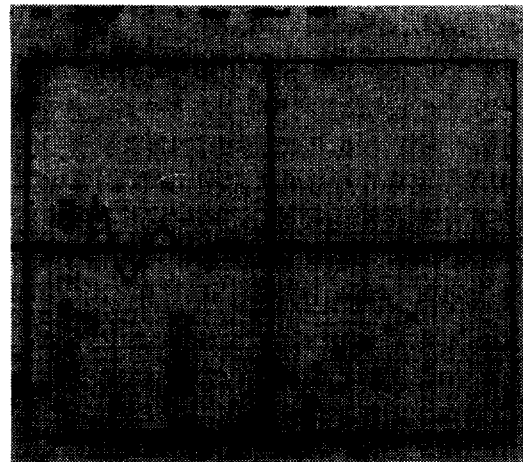
실험에 있어서, Tr이 Turn on 된 상태에서 Tek.2430을 이용하여 C-E간에 서지를 반복측정하여 보았으나 6-7 Vp-p정도 검출되어 Tr. 2SD1525의  $V_{ceo}$ 가 100 V이므로 손상을 입힐 만큼 크지 못하였다.

이와 다른 경우 즉, 운전자가 에어컨을 켜 상태에서 자동차의 시동을 On/Off의 경우에 해당되도록 모터의 전원을 토크 스위치를 사용하여 개폐시켜 본 결과(이 경우 모터의 브러쉬는 전극에 연결

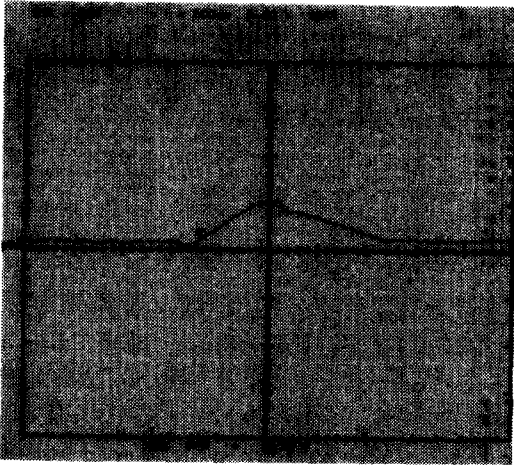
된 상태로 단지 코일로 가정) 다음 그림 3(a)와 같이 Off시 최대 70.4V/ 수십  $\mu S$ -ms의 서지가 모터의 양단에 Osillating wave로 검출되어, On시에 그림 3(b)와 같이 36.8V가 검출되어 Tr의  $V_{ceo}$ 에 근접한 접압이 검출되었다. 그림 3(c)는 Tr의 C-E간에 측정된 서지파형이다.



(a) 모터 코일양단에서 Switch on시 발생서지



(b) 모터 코일양단에서 Switch off시 발생서지



(c) Tr C-E간 Switch on시 발생서지

그림 3 Time domain에서 측정된 스위칭 서지

그림 3의 결과는 앞서 식 (4)에 의해 얻어진 결과와 근사한 전압이 관측되었다. 더욱이 사용된 Tr이 Darlington 접속으로 되어있어 만일 Veb간에 서지 유입시 증폭되어 2차 Tr의 Veb가 증가하여 Vebo가 5V인 해당 Tr에 Ic 전류가 급격히 증가될 수 있어 1개의 Tr을 사용했을 경우 보다 위험이 크다.

다음 그림 4는 커브 트레이서로 측정된 Vceo = 390V, Ic=8A인 Tr의 Ic가 직선적으로 증가함을 보여주고 있다.

이에 대해 스위칭 소자에 국제적으로 정해진 4가지의 서지를 1차로 인가하여 실험하였다. dc모터에서 발생하는 서지의 종류는 전기적인 특성으로 보아 IEC1000-4-4, EFT신호가 현장의 Tr손상 원인을 제공하는 서지<sup>5)6)17)</sup>와 가장 유사할 것으로 생각되어, 실제로 동작중인 Tr의 E-C간에 Level 4/4kV를 직접인가 하였으나, 스위칭 Tr은 손상되지 않았다. 2번째로 에너지량이 EFT보다 큰 IEC 1000-4-5, 단발성 서지<sup>7)</sup>를 Tr의 E-C간에 인가할 때 3 kV에서 100% 손상되어, Varistor를 Tr의 E-C간에 삽입한 결과 Tr이 손상되지 않았다.

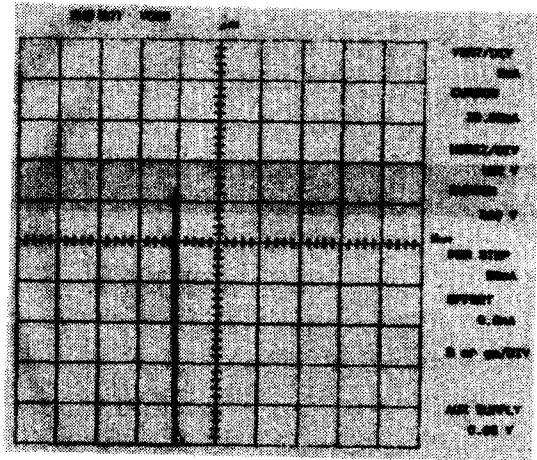


그림 4 Tr의 Vceo가 규정값을 넘을 때 Ic의 변화

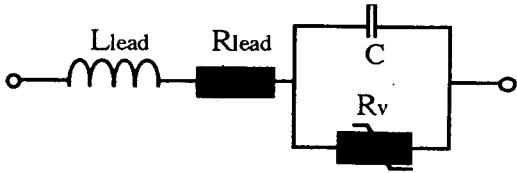
다음에 에너지량이 매우 큰 JASO 24V/D001에 따라 130V/400ms를 동작중인 Tr의 양단에 인가하니 100% 손상되었으며, 이하의 전압에는 손상되지 않았다. JASO 12V계열 시험에서 70V/200ms, A1 시험에서 동작중인 Tr의 양단에 인가한 시험에서는 이상이 없었다. 이후 컨트롤라를 제거하고(컨트롤라측과 전압 보호소자의 제거)Tr을 동작시킨후 모터의 1측(+12V)과 Emitter측에 70V/200ms 인가 시험을 실시한 결과 비록 Tr의 양단에 바리스터(390)를 병렬로 삽입한 Tr역시 Turn on된 Tr의 임피던스가 낮아 Tr측으로 서지전류가 흘러 바리스터가 동작하지 않아 100% 손상되었다.

이상의 결과로부터 Tr이 손상되는 의사 서지를 JASO D001/130V/400ms파형을 Tr의 E-C간에 인가하고 Varistor와 Zenner의 과전압 보호기능을 고찰해 보기로 한다.

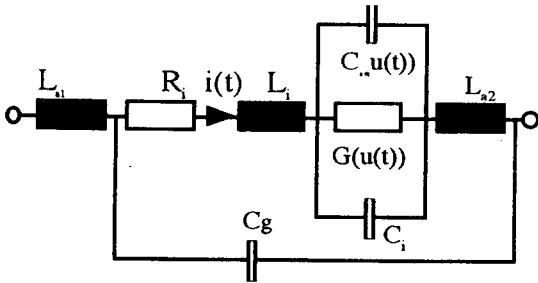
과전압 보호기능을 개선하기 위해 저전압 보호 특성이 입증된<sup>8),9)</sup> 바리스터와 Zenner 2종을 대상으로 적합 소자를 평가한다.

그림 5에서 바리스터와 제너의 등가회로<sup>10)-13)</sup>에서 보호소자의 비동작영역에서 바리스터는 직렬로 저항이 삽입된 형태이고, 제너는 병렬용량으로 표시되므로 동작중인 Tr에 대해 병렬로 삽입되는 보호소자의 경우 비동작 영역에서 용량성(Cs, Cg)

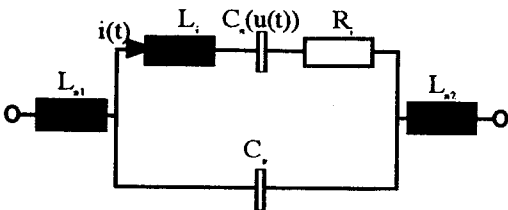
이 되어 모터에서 발생하는 서지의 고조파 성분의 바이패스 경로가 되므로, 저항성분보다 월등히 유리하고 전류내량을 제외한 응답속도 등 제정수<sup>14)</sup>가 뛰어나다.



(a) Varistor의 등가회로



(b-1) Zenner diode의 동작영역 등가회로



(b-2) Zenner diode의 비동작영역 등가회로

그림 5 과전압 소자의 등가회로

또한 앞서 적합한 서지 파형을 선정하기 위한 각종 시험에서 바리스터는 1차 평가되었으므로, 제너 다이오드를 Tr과 병렬로 삽입하고 Tr측의 임피던스를 증가시키기 위해 50 $\mu$ H의 인덕터를 직렬로 삽입하고 시험을 실시 하였다. 시험결과 동작중인 Tr E-C간에 바리스터를 삽입한 경우 IEC 1000-4-5/3kV에는 효과적이었으나, JASO/130v/400ms 시험에는 1-2회에 손상되었다. 단, Zenner와 인덕터를 삽입한 회로만 JASO D001/130V/ 400ms의 인가시험에서 내성을 개선시킬 수 있었다.

그러나 Zenner의 경우 보호소자로 자신의 Junction이 파괴 될 우려가 있으므로 바람직하지는 않은 회로구조이다. 이외에 C-E간에 컨덴서 0.1 $\mu$ F를 삽입하는 방법과, B-C간에 Zenner다이오드를 삽입하는 방법이 시험되었다.

#### 4. 결 론

이상의 시험 결과로부터 자동차용 블로어 모터 스위칭Tr의 소손 원인은 반도체 소자의 내부회로에서 일어나는 미크론적 변화, 모터의 전기적인 정격, 모터내부 필터 구성방법, 자동차의 사용방법, 모터 브러시의 경년변화등 많은 변수에 의해 정확한 원인 파악과 재현에 한계가 있으나, 주어진 조건에서 시험결과 모터 제어용 Tr2SD1525의 손상 원인은 에어컨을 켜 상태에서 자동차의 엔진을 끄거나, 에어컨을 켜 상태에서 엔진을 끈후 잠시후 재시동시 발생하는 개폐서지 전압이 Tr의 최대정격인 Vcbo, Vceo 100V를 넘거나, 다링톤 Tr의 사용으로 외부 서지에 의해 변위된 베이스 전압이 초단Tr에서 증폭되어 Vcbo 5V를 넘어 발생한 수십 ms서지에 의해 Tr이 Beak down되면서 Ic가 순간적으로 최대로(이론상 무한대의 전류) 흘러 사용중인 Tr이 가열된 상태에서 증가된 전류의 자승에 의해 열이 배증되고, 배증된 열은 더욱 Ic의 흐름을 증가시켜 순간적으로 손상되는 것으로 판단된다. 발생하는모터의 인덕턴스, 전류의 제곱근에 비례하고 코일 양단의 커패시턴스 즉, 잠음제거를 위해 삽입된 컨덴서 용량과 분포용량 합의 제곱근에 반비례하여 발생되므로 바꾸어 생각하면 모터의 원인이 크다. 이에 대한 대책으로 앞서 언급하였듯이 과전압 보호소자의 삽입이나 컨덴서 삽입 등 2-3가지의 방법이 시험되어 인가 서지의 종류에 따라 효과적으로 동작하는 결과를 얻었으나, 과전압 보호소자의 특성상 서지의 유입시 보호소자 자신이 1-수회에 걸쳐 인가되면 자신은 회로를 보호하고 파괴되는 현상을 유발 할 수 있고, 기구적인 제약과 차량이라는 특수성을 고려 할 때 Vceo가 150V 이상의 Tr을 사용하고 다링톤 Tr대신 단일 Tr을 사용해야 하는 것이 요구된다. 현재의 Tr을

이용하면서 개선하는 방법으로 C-E간에 390바리스터를 삽입하고 E-B간에 제너다이오드를 삽입하는 것이 요구된다.

이외에 모터 코일 양단에  $1\mu\text{F}$  정도의 컨덴서를 삽입하거나 자동차 Key 점접양단에 R-C회로를 삽입하여 서지 발생전압을 최대한 낮출 필요가 있으며, 더불어 모터에서 발생하는 EMI를 양산전에 정량적<sup>15)</sup>으로 평가하여 스위칭 소자를 설계해야 할 것이다.

앞으로 연구되어야 할 것은 에어컨 모터코일 뿐만 아니라 스타팅 모터, 와이퍼 모터 등 차량에서 사용되는 모든 모터코일이 병렬로 인가된 상태, 즉  $L_o$ , I 값이 증가된 상태에서 발생하는 서지전압의 측정과 이의 영향에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] O. Melville Clark, "Guide for transient suppression using the TRANSZORBTVS" GSI, Inc 1986.
- [2] E. Van Keuren, "Effects of EMP induced transients on integrated circuits," IEEE EMC symposium record, 75CHI002-5, pp.3A11e5, 1975.
- [3] Fancis C. Martzloff, "Surge suppressors and clamps," EMC Symposium 86, E01. 1, 1986.
- [4] 島山鶴徳, "버스트 노이즈 발생기구와 방지기술", EMCJ 94-1, pp.1-11, 1994.
- [5] 민경찬, 김동일, "EFT신호분석과 대책부품개발에 관한 연구", 전자과 기술학회지, pp.83-87, 1994.
- [6] 민경찬, "용접기 제어회로의 EFT 대책보고서 /조흥전기", 1994. 1.
- [7] 민경찬, "전자과 내성향상 기술에 관한 연구", 학위논문, 한국해양대학교, 1996. 2.
- [8] 민경찬, 유승현, "전자교환기의 낙뢰보호에 대한 고찰", 전자공학회 Vol. 10, pp.104-108, 1987.
- [9] Bernhard I. Wolff, "Techniques for suppressing vehicle voltage voltage transients," '86 EMC Simposium, T16.17-T16.21, 1986.
- [10] R. Bricke, T. Geohlsch, F.Noack, "Numerical simulation of low voltage protective Devices," Zurich EMC Sympoium 93,71k6, pp.389-394, 1993.
- [11] F. Wolf, J. Haseborg, "Influence of the nonlinear behaviour of protctive suppressor diod on rf-signals," Zurich EMC Simposium, pp.399-402, 1993.
- [12] K. Borgeest, J. Haseborg "Gas arrester spice model considering the voltage/time characteristics," EMC '94 Roma, Q2-10, pp. 776-781, 1994.
- [13] Ronald B, Standler, "Use of a metal oxide varistor with a series spark Gap across the mains," IEEE EMC Simpoium, pp.153-158, 1986.
- [14] 민경찬, "노이즈종합대책", 성안당, pp.115-168, 1994.
- [15] 민경찬, "자동차용 Blower motor의 GM9100P EMI대책 보고서", H. S Electric Co. Ltd., 1997. 4.

## 요 약

현재 자동차나 선박 등에 사용하는 직류모터 속도 제어용 스위칭 소자는 스위칭 과전압으로 인하여 때때로 손상되거나 오동작을 일으키기 쉽다. 본 논문은 dc 모터 제어용 반도체 스위칭소자의 내성특성을 개선한 것이다. 이를 위하여, 먼저 저전압 보호소자인 바리스터나 제너 다이오드 등 가운데에서 스위칭 과전압에 대해 내성을 갖는 이상적인 소자를 선택하기 위해 과전압 보호소자의 등가회로를 분석하였다. 나아가서 국제규정에서 정의된 의사 과전압 파형의 적절한 선택, 스위칭 소자의 손상과정과 손상원인을 규명하고, 순시과전압 전류의 변화에 따른 각각의 임피던스 조건을 고려하여 직류모터 제어용 반도체 스위칭 소자의 내성특성 개선하였다.