

ER 유체를 이용한 반능동 현가장치용 고전압 전원장치의 개발

鄭世教*, 愼輝範

Development of High Voltage Power Supply for Semi-Active Suspension System
Using ER Fluids

Se-Kyo Chung and Hwi-Beom Shin

요 약

ER 유체(Electrorheological fluid)는 인가 전계에 따라 유체의 점도(Viscosity)와 댐핑력(Damping force)이 변화하는 혼합물질이며 반능동 현가장치, 고속 클러치, 진동 흡수장치 등에 적용되고 있다. ER 유체의 응용을 위해서는 강한 전계를 인가해 줄 수 있는 고전압 가변 전원장치가 필요하다. 본 논문에서는 반능동 현가장치에 적용하기 위한 전원장치의 개발에 대하여 기술하였다. ER 유체의 전기적 특성, 고전압 전원장치의 요구조건, 전원장치의 설계 및 제작에 대하여 설명하였으며 최종적으로 실험을 통하여 개발된 고전압 전원장치가 ER 유체 응용에 적합함을 검증하였다.

ABSTRACT

The electrorheological(ER) fluid is a new material and is used for the mechanical motion devices such as semi-active suspensions, high speed clutches, and vibration isolators. The ER fluid applications need high voltage power supplies having special requirements to control the viscosity of the ER fluid. This paper deals with the development of the high voltage power supply for the semi-active suspension system using the ER fluid. The characteristics of the ER fluid are analyzed, and the design and implementation of the high voltage power supply are presented. It is well demonstrated through the experiment that the developed high voltage power supply shows a good performance suitable for the ER fluid application.

Key Words : ER fluid, semi-active suspension, high voltage power supply

1. 서 론

ER 유체(Electrorheological fluid)는 인가된 전계(Electric field)에 의해 물질의 점도(Viscosity)가 변화

하는 혼합물질이며 최근 들어 충격과 진동 흡수를 위한 여러 가지 기계장치와 동력전달장치 등에 적용이 활발히 진행되고 있다^{[1]-[6]}. ER 유체의 응용 분야는 반능동 현가장치(Semi-active suspension), 고속 클러치, 로봇 응용, 자동차 엔진의 진동 흡수장치 등으로 다양하며 기존의 유압이나 기계적인 장치로만 구성된 시스템에 비해 구조가 간단하고 응답특성이 빠르다는 큰 장점을 가지고 있다^{[2]-[6]}.

자동차의 반능동 현가장치는 노면 상황에 따라 댐핑력(Damping force)을 적절히 제어하여 승차감을 향상

*경상대학교 전기전자공학부 조교수

E-mail : skchung@nongae.gsnu.ac.kr

접수일자 : 2001.12.10

1차심사 요청일 : 2001.12.12 2차심사 요청일 : 2002. 7.23

심사완료일 : 2002. 8.30

시키는 장치로 ER 유체의 응용이 가장 활발히 연구되고 있는 분야이다. 기존의 기계식 또는 전기유압식(Electro-hydraulic) 반능동 현가장치는 실린더 내에 존재하는 오리피스(Orifice)의 크기를 조절하여 댐핑력을 조절하므로 구조가 매우 복잡하나 ER 유체를 이용할 경우 매우 간단한 구조로 제작할 수 있다^{[2][3][6]}.

ER 유체를 이용한 반능동 현가장치는 ER 댐퍼와 같은 기계장치와 고전압 전원장치, 제어기와 같은 전기장치로 구성되며 고전압 전원장치는 ER 댐퍼의 댐핑력 제어를 위한 가장 핵심적인 부분이다. ER 댐퍼의 댐핑력 제어를 위해서는 ER 유체에 수 kV/mm 이상의 강한 전계를 인가해 주어야 하며 이를 위해 수 kV 이상의 고전압을 인가할 수 있는 고전압 전원장치가 필요하다^{[7][8]}. 고전압 전원장치는 X-ray, CRT 등의 분야에 많이 적용되고 있으며 대부분 정전압 또는 정전류 출력을 가지고 있다. 그러나, ER 유체에 적용하기 위해서는 빠른 동특성이 필요하며 기존의 고전압 전원장치를 사용할 경우 ER 유체의 빠른 응답특성을 효과적으로 활용하기 어렵다. 또한, 인가 전압에 따라 ER 유체의 전기적인 특성이 크게 변화한다는 큰 문제점이 있다^{[7][8]}. 따라서, 본 논문에서는 ER 유체를 이용한 반능동 현가장치에 적용하기 위한 고전압 전원장치의 개발에 대해서 기술한다.

본 논문에서는 ER 유체의 전기적인 특성을 해석하여 ER 유체 응용을 위한 고전압 전원장치의 요구조건을 도출하였으며 이를 바탕으로 고전압 전원장치를 설계 및 제작하였다. 그리고, 실험 통하여 개발된 고전압 전원장치가 ER 유체 응용에 적합한 성능을 가지고 있음을 입증하였다.

2. ER 댐퍼의 구조와 전기적 특성

2.1 시스템의 구성 및 댐퍼의 구조

그림 1은 ER 유체를 이용한 반능동 현가장치의 제어시스템 구조를 나타내고 있다. 제어시스템은 차량의 휠(Wheel)에 부착된 ER 댐퍼, 고전압 전원장치, 제어기와 센서로 구성되어 있다. 제어기에서는 ER 댐퍼와 휠에 부착된 센서로부터 차량의 움직임을 검출하여 적절한 제어신호를 발생하며 고전압 전원장치는 이러한 제어신호를 입력받아 ER 유체의 댐핑력을 제어할 수 있는 0-5kV의 고전압을 발생한다.

그림 2는 ER 유체를 이용한 댐퍼의 구조를 나타내고 있으며 일반적인 댐퍼와 다르게 내부 실린더(Cylinder)와 외부 실린더로 구성되어 있다. 두 실린더

는 각각 (+)전극과 (-)전극이 되며 전극 사이에 ER 유체가 들어가게 된다. 따라서, 전극에 고전압을 인가하여 전압을 제어하면 전극 사이에 있는 ER 유체의 점도가 바뀌게 되어 댐퍼의 댐핑력을 제어할 수 있다. 표 1은 본 논문에 사용된 ER 댐퍼의 기계적인 사양이다.

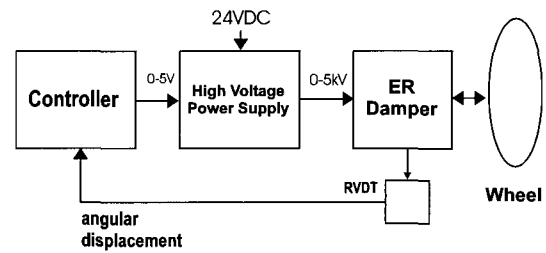


그림 1 ER 유체를 이용한 반능동 현가장치의 제어시스템
Fig. 1 Control system of semi-active suspension using ER fluids

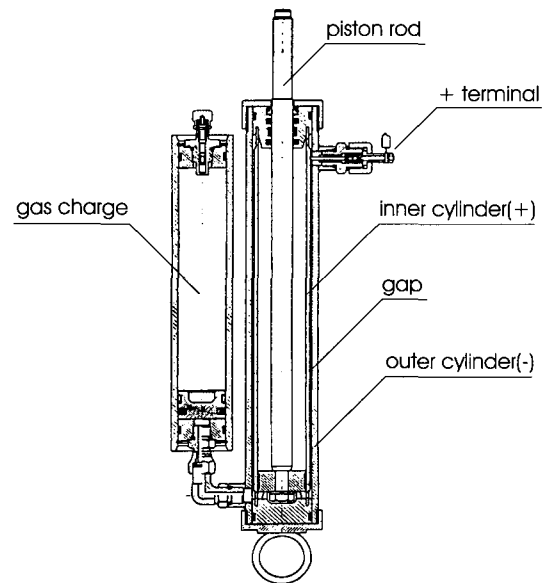


그림 2 ER 댐퍼의 구조
Fig. 2 Structure of ER damper

표 1 ER 댐퍼의 기계적인 사양
Table 1 Mechanical specifications of ER damper

항목	사양	항목	사양
rod 직경	0.013 m	외부실린더 내경	0.037 m
내부실린더 내경	0.030 m	실린더 길이	0.023 m
내부실린더 외경	0.035 m	실린더 간극	0.001 m

2.2 ER 댐퍼의 전기적 모델링 및 특성

그림 2에 나타낸 ER 댐퍼의 전극부는 그림 3과 같이 단순화하여 나타낼 수 있으며 그림 4와 같이 전기적으로 등가적인 저항과 커패시턴스로 모델링 될 수 있다. 여기서 등가저항과 커패시턴스 값은 ER 유체의 전류밀도(Current density), 유전상수(Dielectric constant), 그리고 ER 댐퍼의 기계적인 구조에 의해서 결정된다.

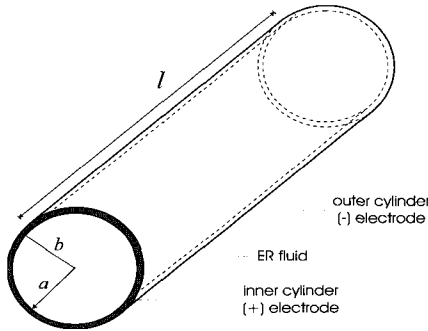


그림 3 ER 댐퍼의 단순화된 모델
Fig. 3 Simplified model of ER damper

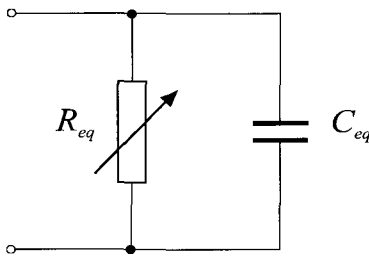


그림 4 ER 댐퍼의 전기적 등가모델
Fig. 4 Electrical equivalent model of ER damper

2.2.1 등가 저항의 계산

ER 유체의 가장 중요한 파라미터 중의 하나는 인가 전압과 전류밀도의 관계이며 이를 이용하여 ER 댐퍼의 등가적인 저항 값을 도출할 수 있다. 그림 4를 이용하여 전류밀도, 전계, 전압, 전류의 관계를 구하면 다음과 같다.

$$I = J \cdot 2\pi r_{mean} l \tag{1}$$

$$E = \frac{V}{b-a} \tag{2}$$

여기서, I 는 전류, J 는 전류밀도이며

$$r_{mean} = \frac{a+b}{2} \tag{3}$$

이다. 전류밀도는 인가된 전계의 함수이며 다음 식으로 나타내 진다.

$$J = \alpha E^\beta \tag{4}$$

여기서, α , β 는 ER 유체 고유의 특성을 나타내는 양의 상수이며 온도에 따라 변화한다. 식 (1)과 (2)로부터 ER 유체의 전류밀도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \alpha' V^\beta \tag{5}$$

여기서,

$$\alpha' = \alpha \cdot \left(\frac{1}{b-a}\right)^\beta \tag{6}$$

또한, 인가 전압에 대한 전류의 관계를 구하면 다음과 같다.

$$I = \alpha' V^\beta \tag{7}$$

또는,

$$V = \beta \sqrt[\beta]{\frac{I}{\alpha'}} \tag{8}$$

여기서,

$$\alpha'' = 2\pi r_{mean} l \cdot \alpha \cdot \left(\frac{1}{b-a}\right)^\beta = \gamma \alpha' \tag{9}$$

이며 γ 는 ER 댐퍼의 기계적인 구조에 의해서 결정되는 상수이며 표 1로부터 $\gamma = 2.601 \times 10^{-3} m^2$ 로 주어진다. 식 (7)으로부터 ER 댐퍼의 등가 직류저항은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_{eq} = \frac{V}{I} = \frac{V}{\alpha' V^\beta} = \frac{1}{\alpha' V^{\beta-1}} \tag{10}$$

위 식에서 일반적으로 β 는 1보다 크므로 인가 전압이 증가함에 따라 등가 직류저항은 작아지게 된다.

인가 전압 변화에 대한 전류의 변화율은 등가 교류 저항으로 나타낼 수 있다. 식 (7)으로부터 ER 댐퍼의 등가 컨덕턴스(Conductance)를 구하면 다음과 같다.

$$g_{eq} = \left. \frac{\partial I}{\partial V} \right|_{V_Q} = \alpha'' \beta V_Q^{\beta-1} \quad (11)$$

여기서, V_Q 는 동작점의 직류전압을 나타낸다. 이 식으로부터 등가 교류저항을 구하면 다음과 같다.

$$r_{eq} = \frac{1}{\alpha'' \beta V_Q^{\beta-1}} \quad (12)$$

식 (12)로부터 ER 댐퍼의 등가 교류저항 역시 인가된 직류전압이 커짐에 따라 작아짐을 알 수 있다.

그림 5는 본 논문에서 사용한 독일 Bayer사의 ER유체 TP-3566의 전류밀도 특성을 나타낸 그래프이다. 이 그림에서 ER 유체는 인가 전계와 온도가 증가함에 따라 전류밀도가 크게 증가함을 볼 수 있다. 주어진 그래프의 회귀곡선(Regression curve)과 식 (6), (9)를 이용하면 표 2와 같은 파라미터를 구할 수 있다.

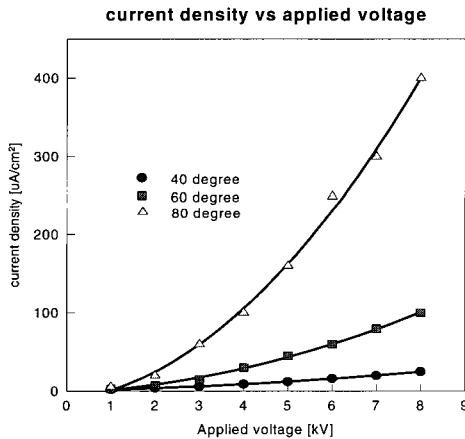


그림 5 ER 유체 TP-3566(Bayer 사)의 전압-전류밀도 특성곡선

Fig. 5 Voltage-current density characteristics of ER fluid TP-3566(Bayer Co.)

표 2 TP-3566에 대한 ER 댐퍼의 전기적 파라미터¹⁾
Table 2 Electrical parameters of ER damper for TP-3566

동작온도	β	α	α'	α''
40 °C	1.2168	1.7854	1.7854	1.2696
60 °C	1.7742	2.5905	2.5905	1.8193
80 °C	2.1504	4.8307	4.8307	3.8084

1) 인가전압은 kV, 전계는 kV/mm, 전류밀도는 uA/cm², 전류는 mA 단위로 계산된 값을 사용.

2.2.2 등가 커패시턴스의 계산

그림 3으로부터 ER 댐퍼의 등가 커패시턴스는 원통형 커패시터와 같이 계산할 수 있으며 다음과 같다.

$$C_{eq} = \frac{\epsilon \cdot l}{2k \cdot \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (13)$$

여기서, ϵ 는 유전상수이며 k 는 Coulomb 상수이다. ER 유체의 유전상수는 인가 전계에 의해 변화가 거의 없으며 온도와 주파수의 함수이다.

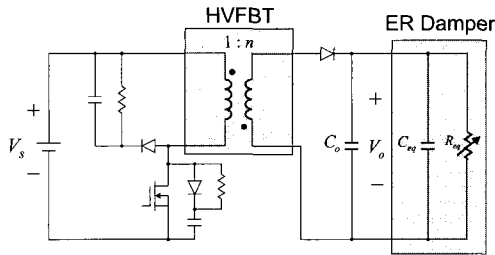
2.2.3 ER 댐퍼의 전기적 특성고찰 및 고전압 전원장치의 요구조건

앞 절에서 살펴본 바와 같이 ER 유체는 전기적으로 등가저항과 커패시턴스로 모델링 할 수 있다. 등가저항은 인가 전압과 온도에 따라 크게 변화하며 인가전계와 온도가 증가함에 따라 지수적으로 감소한다. 이는 그림 5와 같이 인가전계와 온도의 증가에 따라 ER 유체에 흐르는 전류량이 지수적으로 증가함을 나타낸다. 현재 개발된 ER 유체는 인가전압과 온도변화에 따른 전류밀도의 변화량이 매우 커서 수십에서 수백W급의 고전압 전원장치로는 제어할 수 있는 영역이 매우 좁다. 따라서, 고전압 전원장치의 보호를 위한 과전류 제한기능이 필수적으로 요구된다.

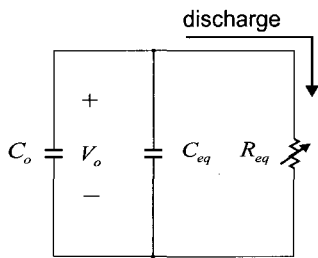
현재까지 ER 유체 응용을 위한 고전압 전원장치로 그림 6(a)와 같은 플라이백 컨버터(Flyback converter)가 주로 사용되었다^{[7][8]}. 플라이백 컨버터는 구조적으로 간단하여 소형화가 용이하고 응답특성이 빠르다는 장점을 가지고 있다. 그러나, 플라이백 컨버터를 포함한 일반적인 DC/DC converter 토폴로지에서는 전원에서 부하로만 에너지 전달이 이루어지므로 출력전압을 빠르게 가변 시키기 어렵다. 즉, 출력전압을 낮추고자 할 경우 2차측의 다이오드에 의해서 부하에서 전원 쪽으로 에너지 전달이 불가능하며 출력 측 커패시터의 전하를 제거할 수 있는 경로가 없다. 그림 6(b)과 같이 출력 측의 다이오드가 off 될 경우 출력 측의 커패시턴스는 ER 댐퍼의 저항과 독립적인 RC 회로를 구성하며 시정수는 다음과 같다.

$$\tau = R_{eq} \cdot (C_o + C_{eq}) \quad (14)$$

이 때 등가저항은 식 (12)에서 보는 바와 같이 인가전압의 함수이며 출력전압이 감소함에 따라 지수적으로 증가한다. 따라서, ER 댐퍼에 저장된 전하의 방전시간은 전압이 감소함에 따라 지수적으로 증가하게 되며



(a)



(b)

그림 6 플라이백 컨버터를 이용한 고전압 전원장치의 구성 및 동작

- (a) 플라이백 컨버터를 이용한 고전압 전원장치
- (b) 출력 측 다이오드 off 시 등가회로

Fig. 6 Configuration and operation of high voltage power supply using flyback converter

- (a) High voltage power supply using flyback converter
- (b) Equivalent circuit when output diode is off

빠른 동특성을 얻기가 어렵다. 또한, 2차측에 능동형 회로를 추가하여 양방향성(Converter)를 구성하는 것은 2차측이 고전압이므로 적절한 스위칭소자 선택과 인덕터, 스너버 회로 등의 구성이 매우 어렵다.

ER 유체 응용을 위한 고전압 전원장치의 요구조건은 다음과 같이 정리할 수 있으며 일반적인 플라이백 컨버터로는 ER 유체의 응용에 적합한 빠른 동특성을 얻기가 어려움을 알 수 있다^{[7][8]}.

- (1) ER 유체에 강한 전계를 인가해 줄 수 있는 높은 출력전압(최고 5-10kV 정도의 고전압)
- (2) ER 유체의 댐핑력 제어를 위해 연속적으로 가변 가능한 출력전압(0V-최고전압)
- (3) 전압 강하 시 빠른 동특성
- (4) 과전류 제한 능력
- (5) 차량 탑재를 위한 작은 크기

위의 조건에 대해 본 연구에서 설정된 기준은 (1)

출력전압: 0-5kV 가변전압, (2)0-5kV에 대한 상승/강하시간(10%-90%): 1ms, (3)전류용량 20mA, (4)과전류 제한기능 이며 전원장치의 크기에 대해서는 별도의 제한을 두지 않았다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 요구조건을 갖는 고전압 전원장치의 설계 및 제작, 실험 결과 등을 제시한다.

3. 고전압 전원장치의 설계 및 제작

3.1 고전압 전원장치의 구조

본 연구에서 개발한 ER 유체 응용을 위한 고전압 전원장치의 구조는 그림 7과 같다. 기본적으로 플라이백 컨버터의 구조를 가지고 있으며 2차측에 고전압 방전회로를 추가하였다. 전압 상승 시에는 일반적인 플라이백 컨버터와 동일하게 동작하며 출력전압 강하 시에는 방전 스위치를 동작시켜 출력 커패시턴스와 ER 댐퍼의 등가 커패시턴스에 저장된 전하를 방전 저항을 통해 소모한다. 이 방법 이외에도 고전압 DC/DC 컨버터를 이용하여 고전압을 발생시킨 다음 하프브리지(Half bridge) 인버터를 직결하여 사용하는 방법을 고려할 수 있으나 출력단에 고가의 고전압 스위치 2개가 사용되며 고전압 인덕터(Inductor), 고전압 스너버 및 클램프, 절연문제 등이 있어 전원장치의 크기, 가격 면에서 차량 탑재용으로는 적용이 어렵다.

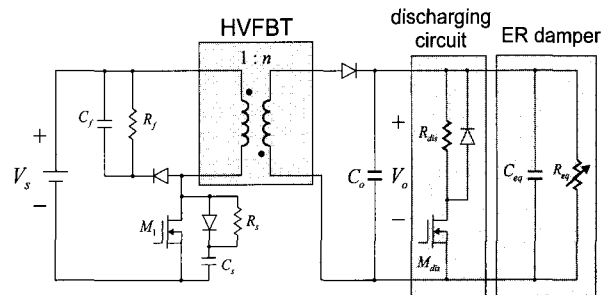


그림 7 개발된 ER 유체 응용을 위한 고전압 전원장치의 구성

Fig. 7 Configuration of developed high voltage power supply for ER fluid application

3.2 고전압 전원장치의 설계 및 제작

3.2.1 회로구성

개발된 고전압 전원장치는 차량의 24V 직류전원을 입력으로 사용하며 출력전압은 0-5kV까지 가변 할 수 있도록 설계하였다. 고전압 전원장치의 구성은 그림 7

에서 설명한 바와 같이 플라이백 컨버터 구조를 가지고 있으며 사양은 표 3과 같다. PWM 칩은 Unitrode사의 UC1824를 사용하였으며 스위칭 주파수는 25kHz로 설정하였다. 1차측의 주 스위치는 IXYS사의 MOSFET IXTN97N20을 사용하였고 수동형 RCD 클램프 및 스너버를 사용하였다. 고전압 출력단의 다이오드는 15kV/25mA의 용량을 가진 VMI사의 X150FF5를 사용하였으며 제작된 출력 커패시터는 BEHLKE사에서 제작된 4700pF/10kV 용량의 것을 사용하였다. 전압 클램프와 스너버의 RC 값은 다음과 같다. $R_s=470$, $C_s=22nF$, $R_f=560$, $C_f=47nF$, 그리고 다이오드는 GI사의 고속 Fast recovery diode FES16DT를 사용하였다. 플라이백 변압기는 직접 제작하였으며 다음절에서 설명한다.

표 3 고전압 전원장치의 사양
Table 3 Specification of high voltage power supply

항목	사양	항목	사양
정격용량	100W	입력전압 V_s	24V
출력전압 V_o	최대 5kV	출력전류	20mA
스위칭 주파수	25kHz	PWM IC	UC1824

3.2.2 고전압 플라이백 변압기

고전압 플라이백 변압기의 설계는 Core의 선정, 권선 설계, 공극 설정으로 이루어진다. 설계 및 제작에 사용된 Core는 TDK의 UR46DB이다^[13]. Core 데이터를 이용하여 변압기 1차측 권선의 최소 turn 수는 다음 식으로부터 구할 수 있다^{[9][10]}.

$$N_{min} = \frac{V \cdot t_{on}}{k_f \cdot B_{ac} \cdot A_c} \quad (15)$$

여기서, V 는 입력전압, t_{on} 은 최대 ON 시간, B_{ac} 는 AC 자속밀도의 최대 스윙, A_c 는 코어의 최소 단면적, k_f 는 파형률에 대한 상수로 구형파의 경우 4이다. 코어의 공극은 다음 식으로부터 구할 수 있다^{[9][10]}.

$$a = \frac{\mu_r \cdot N_p^2 \cdot A_c}{L_p} \quad (16)$$

여기서, μ_r 는 공기의 비투자율, N_p 1차측 turn수, L_p 는 1차측 인덕턴스이다.

고전압 플라이백 변압기의 설계 및 제작에서 가장 중요한 부분은 변압기의 2차측 권선 커패시턴스와 1-2차 권선 사이의 기생 커패시턴스를 최소화하는 것이

다. 고전압 변압기의 경우 권선비와 2차측의 turn 수가 매우 크므로 2차측의 권선 커패시턴스가 커지게 된다. 또한, 1, 2차측 권선 사이에 전위차가 매우 크므로 권선 사이에 발생하는 누설 커패시턴스의 영향도 크게 나타난다. 2차측의 권선 커패시턴스는 권선비의 자승에 비례하여 1차측에 매우 큰 값으로 나타나며 이로 인해 변압기의 공진 주파수가 매우 낮아지게 된다^{[9][14]}. 따라서, 플라이백 컨버터의 스위칭 주파수에 제한을 주게되며 누설 인덕턴스와 공진에 의해 스위치의 Turn-on 시 전류 스트레스가 매우 커지게 된다.

본 논문에서는 그림 8과 같은 방법으로 변압기를 제작하였다. 즉, 2차측 권선 커패시턴스를 낮추기 위해 2차측 권선을 7단으로 분할하여 제작하였으며 1, 2차 권선 사이에 충분한 두께의 절연재를 사용하였다. 이와 같은 식으로부터 설계 및 제작된 변압기의 사양은 표 3과 같다. 그림 9는 제작된 고전압 플라이백 변압기의 사진을 나타내고 있다. 고전압 절연재로는 에폭시를 사용하였다.

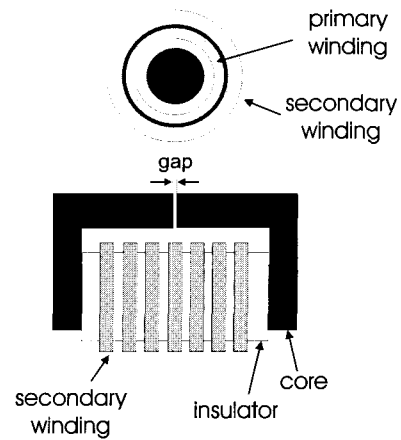


그림 8 고전압 플라이백 변압기의 권선 구조
Fig. 8 Configuration of high voltage flyback transformer

표 4 고전압 플라이백 변압기의 설계 및 제작사양
Table 4 Design and implementation specifications of high voltage flyback transformer

항목	사양	항목	사양
Core	TDK UR46DB	공극	0.2mm
권선비	1:250	1차측 turn 수	6
2차측 turn수	1500	자화 인덕턴스	21.5 uH
1차측 누설인덕턴스	0.956 uH	권선커패시턴스 (1차측 환산값)	0.963 uF

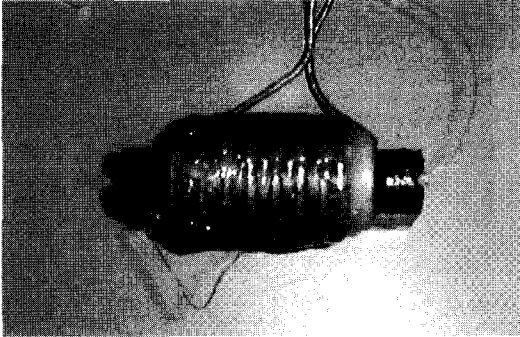


그림 9 제작된 고전압 플라이백 변압기 사진
Fig. 9 Photograph of implemented high voltage flyback transformer

3.2.3 보상기(Compensator)의 설계

본 논문에서는 출력전압의 제어를 위해 전압모드 제어를 사용하였으며 주파수 영역에서 소신호 모델을 사용하여 루프이득(Loop gain)을 설정하였다. 연속전류 모드(Continuous conduction mode; CCM)에서 플라이백 컨버터의 개루프 이득(Open loop gain)은 다음과 나타낼 수 있다^[12].

$$G(s) = \frac{-\frac{Dn^2}{(1-D)^2 R_L} u_{10} \left[s - \frac{(1-D)^2 R_L}{L_p D} \right]}{s^2 + \frac{1}{R_L C} s + \frac{(1-D)^2}{L_p C n^2}} \quad (17)$$

여기서, D 는 Duty ratio, R_L 는 부하저항, u_{10} 는 입력 전압, L_p 는 1차측 인덕턴스, n 은 변압기의 권선비이며 $C = C_o + C_{eq}$ 로 플라이백 컨버터 출력 커패시턴스와 ER 탭퍼 등가 커패시턴스의 합을 나타낸다. 각 파라미터의 값은 다음과 같다.

$$D = 0.4545, \quad R_L = 250k\Omega, \quad u_{10} = V_s = 24V$$

$$L_p = 21.5\mu H, \quad n = 250, \quad C = 9700pF$$

부하저항은 출력전압이 5kV일 때 20mA의 부하를 가정하여 $R_L = (R_{eq}) = 250k\Omega$ 으로 설정하였으며 $C_o = 4700pF$, $C_{eq} = 5000pF$ 이다. 그림 10은 개루프 주파수 응답특성을 나타내고 있다.

식 17과 그림 10에서 보는 바와 같이 개루프 시스템은 2개의 극점과 1개의 영점을 가진다. 특히, s평면의 우반면(Right-half plane; RHP)에 영점이 나타나며 이로 인해 과도상태에 언더슈트(Undershoot) 등 시스템

내부 동특성(internal dynamics)에 영향을 준다. 그러나, 그림 10에서 보는 바와 같이 본 시스템의 경우 우반면 영점이 7.6×10^9 rad/sec의 매우 높은 주파수에 존재하므로 보상기의 설계에서 영점의 영향을 무시하였다. 플라이백 컨버터의 출력전압 제어를 위해서 그림 11과 같은 3개의 극점과 2개의 영점을 가지는 보상기를 사용하였다. 보상기의 전달함수는 다음과 같다^[12].

$$H(s) = \frac{R_1 + R_3}{R_1 R_3 C_2} \frac{\left(s + \frac{1}{R_2 C_1} \right) \left[s + \frac{1}{(R_1 + R_3) C_3} \right]}{s \left(s + \frac{1}{R_3 C_3} \right) \left[s + \frac{R_2 C_1 C_2}{(C_1 + C_3)} \right]} \quad (18)$$

위와 같은 보상회로의 영점과 극점을 독립적으로 설계하기는 매우 어려우며 본 논문에서는 극점과 영점이 각각 중근을 가지도록 설계하였다. 보상기의 설계에서 루프이득 crossover frequency는 통상 스위칭 주파수의 1/4에서 1/5 정도로 설정하며 본 논문에서는 40,000 rad/sec(6.4kHz)로 설정하였으며 이 때 위상여유가 45°가 되도록 설계하였다^[12]. 이를 위한 보상기의 소자값은 다음과 같다.

$$R_1 = 100k\Omega, \quad R_2 = 390\Omega, \quad R_3 = 3.7k\Omega$$

$$C_1 = 0.33\mu F, \quad C_2 = 13nF, \quad C_3 = 1.4nF$$

그리고, 출력전압의 케환을 위해서 1000:1(100MΩ:100kΩ)의 전압 Divider를 사용하여 출력전압을 측정하였다. 그림 12, 13은 보상기 H(s)의 주파수 응답특성과 루프이득 G(s)H(s)의 주파수 응답특성을 나타내고 있다.

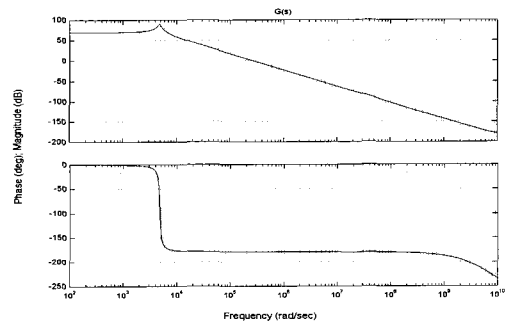


그림 10 개루프 주파수 응답특성
Fig. 10 Frequency response of open loop system

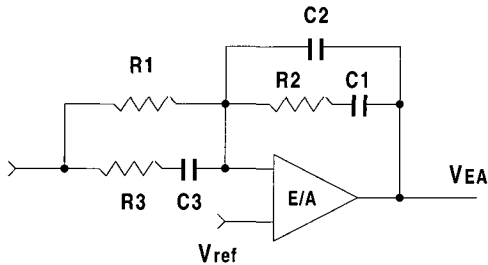


그림 11 3극점 2영점을 가지는 보상회로
 Fig. 11 Compensation circuit with three poles and two zeros

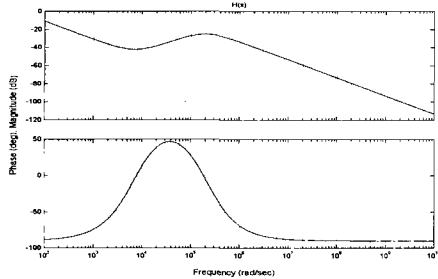


그림 12 보상회로의 주파수 응답특성
 Fig. 12 Frequency response of compensation circuit

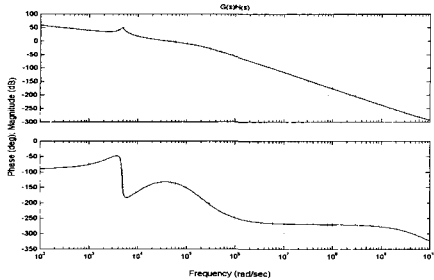


그림 13 보상 후 루프이득 G(s)H(s)의 주파수 응답특성
 Fig. 13 Frequency response of loop gain G(s)H(s) after compensation

3.2.4 방전회로

방전회로는 고전압 트랜지스터, 방전저항, 제어회로로 구성되며 출력 커패시터와 ER 댐퍼의 등가 커패시터에 저장된 전하를 빠르게 방전 시켜주는 역할을 한다. 고전압 트랜지스터는 BEHLKE사의 HTS81을 사용하였으며 8kV의 전압 정격을 가지고 있다. 그림 14는 방전회로를 동작시키기 위한 제어회로를 나타내고 있다. 그림 10에 나타난 보상기의 출력이 영보다 작을

경우 이를 검출하여 1차측 MOSEF의 게이트 신호를 차단하고 방전 스위치를 켜주게 된다. 이 때, 영 전압 주위에서 과도한 스위칭을 방지하기 위해서 적절한 히스테리시스 밴드를 주었다.

출력전압의 방전 속도는 방전저항과 출력 및 ER 댐퍼의 등가 커패시턴스의 크기에 따라 달라지게 되며 다음과 같은 시정수를 갖는다.

$$\tau_{dis} = R_{dis} \cdot (C_o + C_{eq}) \tag{19}$$

여기서, R_{dis} 는 방전회로의 저항이다. 본 연구에서 개발된 ER 댐퍼의 등가 커패시턴스 C_{eq} 는 5000pF 이며 출력 측의 전체 커패시턴스는 $C_o + C_{eq}$ 로 9700pF이다. 방전저항 값은 $R_{dis} = 50k\Omega$ 을 사용하였으며 이 때 시정수는 0.49ms 이다. 방전저항 값이 작을 수록 응답특성은 빠르지만 최대 전류가 커지므로 고전압 트랜지스터의 허용 전류 내에서 설계되어야 한다.

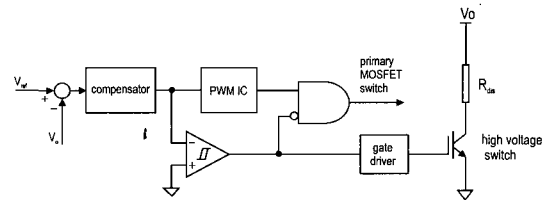


그림 14 보상기와 방전회로 제어기의 구성
 Fig. 14 Configuration of compensator and discharging circuit controller

3.2.5 과전류 제한회로

ER 유체의 전기적 특성은 온도와 인가전압에 따라 크게 변화한다. 특히, 동작 온도에 매우 민감한데 그림 5에서 보는 바와 같이 80°C에서 동작할 경우 40°C에서 동작 할 때 보다 수십배 이상의 전류가 흐르게 된다. 따라서, 이러한 문제점을 개선하기 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 이러한 문제점으로 인해 현재 상용화 되어있는 ER 유체는 광범위한 온도 조건에서 적용이 불가능하며, 본 연구에서는 전원장치의 보호를 위한 과전류 제한회로를 두어 제한된 영역에서 제어가 가능하도록 하였다.

그림 15는 개발된 고전압 전원장치의 과전류 제한회로를 나타내고 있다. Shunt 저항과 Isolation 증폭기를 사용하여 출력전류를 측정된 다음 이 전류가 전류제한치를 초과할 경우 1차측 MOSFET의 게이트 신호를 차단하도록 구성되어 있다. 개발된 전원장치의 차단 전류를 정격의 150%인 30mA로 설정하였다.

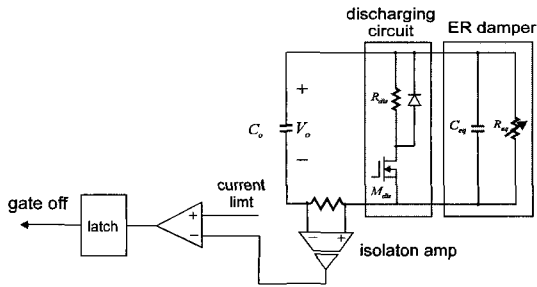


그림 15 과전류 제한회로의 구성
Fig. 15 Configuration of over current limit circuit

3.2.6 시작품 제작 및 EMI 시험

그림 16은 본 연구에서 개발된 고전압 전원장치의 사진을 나타내고 있다. 고전압 전원장치의 구성은 설명한 바와 같이 고전압 플라이백 컨버터, 방전회로, 그리고 EMI 필터로 구성되어 있다. 개발된 고전압 전원장치의 크기는 표 5에 나타낸 바와 같으며 미국 Trek사에서 판매하는 동일 용량의 고전압 전원장치와 크기를 비교하였다. 현재 시험실 수준에서의 제작으로 크기가 상당히 크다고 생각되나, 향후 고전압 절연재료 및 절연기법 등이 개선된다면 크기를 충분히 줄일 수 있으리라 생각된다.

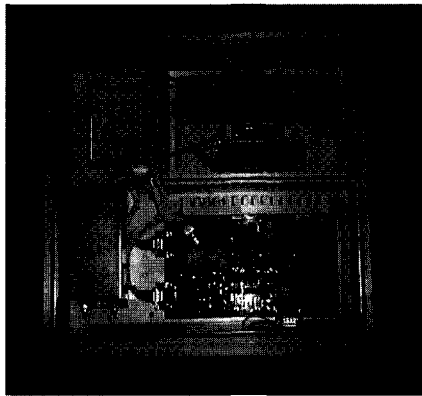


그림 16 제작된 고전압 전원장치 사진
Fig. 16 Photograph of assembled high voltage power supply

표 5 고전압 전원장치의 크기 (단위: mm)
Table 5 Mechanical size of high voltage power supplies

	가로	세로	높이
개발된 고전압 전원장치	300	300	110
미국 Trek 사 제품	433	460	171

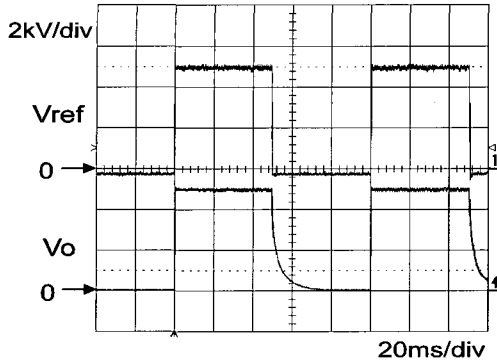
개발된 고전압 전원장치는 차량 탑재가 목적이므로 차량에 장착된 전기·전자 장치에 전자기적인 영향을 주지 않아야 한다. 따라서, 전도성 EMI의 영향을 최소화하기 위해 EMI 필터를 장착하였으며 복사성 EMI의 영향을 줄이기 위해 Shield Case를 사용하였다. 그리고, MIL-STD-462 Class D 규정에 의해 EMI 시험을 수행하였으며 MIL-STD-461 Class D의 요구조건을 만족하도록 하였다. 자세한 EMI 시험 결과는 논문에서는 생략하였다.

4. 실험 결과 및 검토

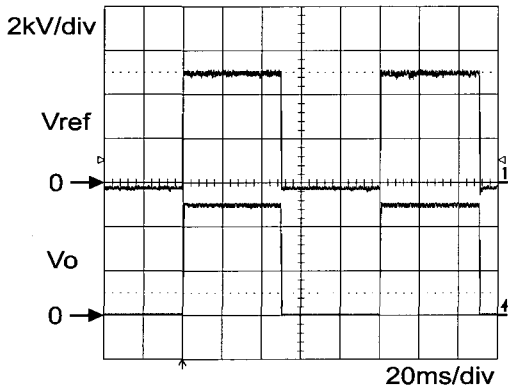
4.1 실험결과

제작된 고전압 전원장치의 성능 검증을 위해 그림 2에 나타낸 ER 댐퍼에 적용하여 실험을 수행하였다. ER 댐퍼의 응답특성을 검증하기 위해서는 인가전압에 대한 댐퍼의 댐핑력을 측정하여야 한다. 그러나, 이 경우 방대한 규모의 실험장치가 필요하여 실험실 단계에서 적용이 어렵다. 또한, ER 댐퍼의 동특성은 출력전압특성 뿐만 아니라 ER 유체의 입자특성에도 큰 영향을 받는다. 따라서, 본 연구에서는 그림 2의 소형 ER 댐퍼를 고전압 전원장치의 부하로 두고 기존의 고전압 전원장치와 제안된 전원장치에 대한 전압 응답특성을 측정하였다. 본 연구의 목적이 인가전압에 따라 비선형 특성을 가지는 RC 부하에 대한 고전압 전원장치의 개발이므로 이러한 실험으로도 고전압 전원장치의 성능을 충분히 검증할 수 있으리라 생각된다.

그림 17은 개발된 고전압 전원장치에서 방전회로의 효과를 나타내는 실험결과이다. 그림 17(a)는 개발된 고전압 전원장치와 동일한 회로에서 방전회로를 부착하지 않은 경우에 대한 실험 결과이다. 5kV/10Hz의 구형파 전압명령을 인가했을 경우 전압 상승 시에는 빠른 응답특성을 보이지만 전압 하강 시에는 매우 느린 응답특성을 나타내고 있다. 이는 ER 댐퍼 등가저항의 비선형성에 기인한다고 볼 수 있다. 그림 17(b)는 같은 조건에서 방전회로를 첨가한 고전압 전원장치에 대한 실험 결과이다. 위 파형은 전압명령이며 아래 파형은 출력전압을 나타내고 있다. 전압 상승 및 하강 시 모두 빠른 응답특성을 보이고 있다. 그림 18은 전압 상승 및 하강 시 응답 특성을 확대한 그림이다. 그림 18(a)는 영에서 5kV로 상승 시의 파형이며 그림 18(b)는 하강 시의 파형을 나타내고 있다. 전압 하강 시 방전저항을 통해 약 2ms 정도에 전압이 완전히 영이 됨을 볼 수 있다.



(a)



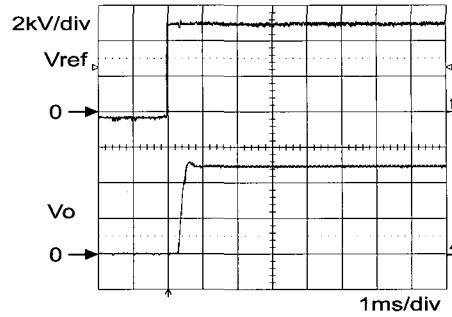
(b)

그림 17 고전압 전원장치의 전압 응답특성 비교
(전압명령: 5kV/10Hz 구형파)
(a) 방전회로가 없는 경우
(b) 방전회로가 있는 경우

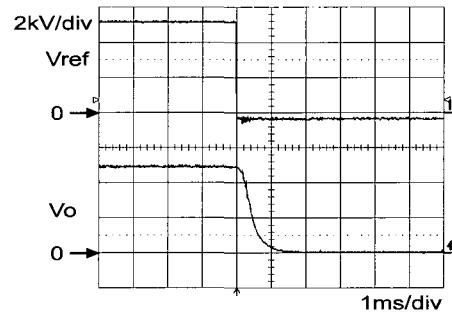
Fig. 17 Comparison of voltage response of high voltage power supplies (Voltage reference: 5kV/10Hz rectangular pulse)
(a) Without discharging circuit
(b) With discharging circuit

그림 19는 개발된 고전압 전원장치의 전류응답 특성을 나타내고 있다. ER 댐퍼에서 요구되는 전류는 댐퍼의 온도에 따라 달라지므로 댐퍼를 가열하여 전류가 정격에 가깝게 흐르도록 조건을 만들어 실험을 수행하였다. 실험결과 요구되는 사양에 맞는 전류 공급 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

그림 20은 개발된 전원장치의 전압 추종 성능을 시험한 결과이다. 3kV/10Hz의 삼각파 명령을 주었을 경우의 실험 결과이며 우수한 추종 성능을 나타낼 수 있다.



(a)



(b)

그림 18 개발된 고전압 전원장치의 전압 상승 및 하강 특성
(전압명령: 5kV)

Fig. 18 Voltage rising and falling characteristics of developed high voltage power supply (Voltage reference: 5kV)

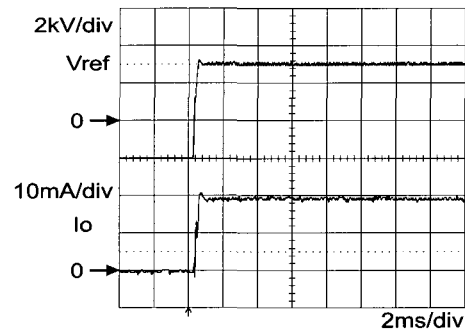


그림 19 개발된 고전압 전원장치의 전류응답 특성

Fig. 19 Current response of developed high voltage power supply

위와 같은 실험결과 개발된 고전압 전원장치는 ER 유체를 이용한 반응동 현가장치에 적합한 우수한 특성을 가지고 있음을 볼 수 있다.

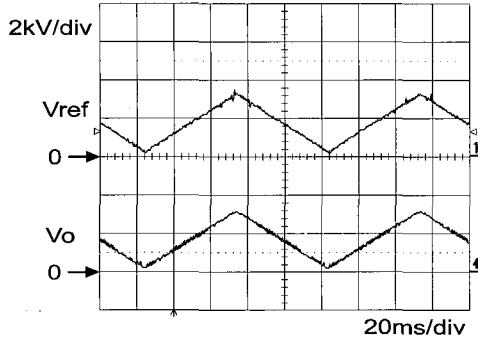


그림 20 개발된 고전압 전원장치의 전압 추종 성능
(전압명령: 3kV/10Hz 삼각파)
Fig. 20 Voltage tracking performance of developed
high voltage power supply
(Voltage reference: 3kV/10Hz triangular)

4.2 효율에 대한 검토

본 논문에서 제안된 고전압 전원장치는 출력단에 저항을 사용하여 방전회로를 구성하므로 방전회로가 없는 경우에 비해 효율이 떨어진다. 저하되는 효율은 방전회로의 저항에서 소모되는 전력에 의해 결정되는데 방전회로의 동작은 ER 댐퍼 제어기의 제어입력(전압명령)에 따라 결정된다. 즉, 고전압 전원장치에서 일정 전압을 출력할 경우 방전회로는 동작하지 않으므로 방전회로에서의 손실은 없으며 빠른 주파수의 제어입력이 인가 될 경우 손실은 커지게 된다. 따라서, 여러 가지 주파수의 구형파 제어입력을 인가 한 후 입력과 출력의 평균전력을 이용하여 효율을 측정하였으며 그 결과를 표 6에 나타내었다. 예측된대로 제어입력의 주파수가 높아질수록 효율이 저하됨을 볼 수 있으며 향후 효율 향상을 위해서는 출력 커패시턴스에 저장된 에너지를 저항으로 소모하지 않고 입력 측으로 되돌릴 수 있는 양방향성 컨버터 토폴로지에 대한 연구가 필요하리라 생각된다.

표 6 개발된 고전압 전원장치의 효율
Table 6 Efficiency of developed high voltage power supply

제어입력 주파수 (Hz)	0	1	5	10	50	100
효율 (%)	79.5	79.4	78.9	77.8	74.6	68.9

5. 결론 및 추후과제

본 논문에서는 ER 유체를 이용한 반능동 현가장치에 적용하기 위한 고전압 전원장치의 개발에 관하여 기술하였다. 먼저, ER 유체를 이용한 댐퍼의 전기적인 모델과 특성을 분석하고 고전압 전원장치의 요구조건을 도출하였다. 그리고, 방전회로를 갖는 고전압 플라이백 컨버터를 설계하고 제작하였다. 제작된 고전압 전원장치는 EMI 시험 결과 MIL-STD-461 Class D의 규격을 만족하였으며, 실제 ER 댐퍼에 대한 실험 결과 ER 댐퍼에 적용을 위한 적합한 성능을 가지고 있음을 확인 할 수 있었다.

본 연구에서 개발된 고전압 전원장치는 ER 유체 응용에 적합한 성능을 가지고 있지만 향후 상용화를 위해서는 많은 개선이 필요하리라 생각된다. 먼저, 방전회로에 의한 효율 저하를 개선할 수 있는 새로운 양방향성 컨버터 토폴로지의 개발과 고전압 플라이백 변압기의 공진을 활용할 수 있는 소프트 스위칭 기법에 대한 연구가 필요하리라 생각된다. 또한, 출력전압 보상기의 설계에 있어서 동작점에 따라 부하 변동이 심하며 기준 전압이 크게 바뀌므로 기존의 소신호 모델을 이용한 보상기법의 한계를 극복할 수 있는 대신호(Large signal) 모델링 및 보상기의 설계기법이 연구되어야 할 것이다.

본 논문은 국방과학연구소와 동명중공업(주)의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.

참 고 문 헌

[1] T.C. Jordan and M.T. Shaw, "Electrorheology", IEEE Trans. on Electr. Insul., vol. 24, no. 5, pp. 849~878, 1989.
 [2] X.M. Wu, R. Stanway, and J.L. Sprosten, "Electrorheological fluids and their applications in power transmission and active suspension", Proc. of Int. Sym. Automotive Tech. and Automation, pp. 823~830, 1990.
 [3] D.J. Romstadt, M.B. Lizel, and T.R. Weyenberg, "Demonstration of automotive semi-active suspension using electrorheological fluid", SAE paper no. 950586, pp. 987~992, 1995.
 [4] N.K. Petek, R.J. Goudie, and F.P. Boyle, "Actively controlled damping in electrorheological fluid-filled

- engine mount", Proc. of Int. Sym. ER fluids, pp. 409~418, 1990.
- [5] J.E. Stangroom, "Low loss transmission system based on ER fluids", Proc. of Int. Conf. ER fluids, pp. 442~452, 1991.
- [6] X.M. Wu, J.Y. Wong, M. Struck, and D.L. Russell, "Simulation and experimental study of a semi-active suspension with an electrorheological damper", Int. J. of Modern Physics B, vol. 8, no. 20 & 21, pp. 2987~3003, 1994.
- [7] M. Sturk, X.M. Wu, and J.Y. Wong, "Development and evaluation of a high voltage supply unit for electrorheological fluid damper", Vehicle System dynamics, vol. 24, pp. 101~121, 1995.
- [8] C. Stiebel and H. Janocha, "6kV power amplifier designed for actuators with electrorheological(ER) fluids", Int. Conf. on New Actuators 2000, pp. 135~138, Bremen, Germany, 2000.
- [9] S.Y.R. Hui, "Measurement and modeling of stray capacitances in high frequency transformer", IEEE PESC '99, pp. 736~768, 1999.
- [10] C.T. McLyman, Transformer and Inductor Handbook, Marcel Dekker, 1988.
- [11] K. Billings, Switch Mode Power Supply Handbook, McGraw-Hill, 1999.
- [12] Simon S. Ang, "Power Switching Converter", Marcel Dekker, 1995.
- [13] Ferrite Cores Data Book, TDK Corporation, 1998.
- [14] Staff of MIT, Magnetic Circuits and Transformer, MIT Press. 1956.

저 자 소 개



정세교(鄭世敎)

1966년 11월 26일생. 1989년 경북대 전자공학과 졸업. 1992년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(박사). 1999년~2000년 일본 큐슈공대 객원 교수. 1997년~현재 경상대학교 전기전자공학부 조교수. 경상대학교 공학연구원 연구원. 2002년 2월~현재 미국 Texas A&M 대학 Visiting Scholar.



신휘범(愼輝範)

1982년 서울대 전기공학과 졸업. 1985년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(박사). 1990년~1993년 현대전자(주) 선임연구원. 2000년~2002년 미국 University of Wisconsin-Madison 방문교수. 1993년~현재 경상대학교 전기전자공학부 부교수. 경상대학교 공학연구원 연구원. 당 학회 편집위원.