Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 13, No. 11 pp. 5409-5415, 2012

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.11.5409

압전 세라믹 액추에이터를 위한 소형 고전압 구동 증폭기 개발

김순철[1], 한정호[1], 이수영[1*]
[1]서울과학기술대학교 전기정보공학과

Development of Compact High Voltage Driving Amplifier for Piezo Ceramic Actuator

Soon-Cheol Kim[1], Jung-Ho Han[1] and Soo-Yeong Yi[1*]
[1]**Department of Electrical and Information Engineering,**
Seoul National University of Science and Technology

요 약 압전 세라믹 액추에이터는 스프레이, 디스펜서, 밸브제어와 같은 다양한 산업제품들에 응용된다. 압전 세라믹 소자의 기계적인 변위의 크기는 인가 전압의 크기에 의해 정해지므로, 압전 세라믹 액추에이터 구동을 위해서는 고전압 전원장치와 함께 전력증폭기가 필요하다. 본 논문에서는 간단하고 크기가 작은 H-브리지 형태의 전력증폭기와 플라이백 고전압 스위칭 모드 전원장치를 개발하였다. H-브리지 형태의 전력증폭기는 펄스폭 변조를 이용하여 압전 세라믹 액추에이터에 대한 에너지 입력의 크기를 쉽게 조절할 수 있다는 장점이 있다.

Abstract Piezo ceramic actuator is used for various industrial products such as spray, dispenser, and valve control etc. Since the deflection of the piezo ceramic element depends on the applied voltage, it is required a power amplifier with high voltage supply for driving the piezo ceramic actuators. In this paper, we develop a simple H-bridge type power amplifier and a compact flyback type high voltage switching mode power supply for piezo ceramic actuators. It is easy to adjust the amount of energy input to piezo ceramic actuator by pulse-width-modulation with H-bridge type power amplifier.

Key Words : Piezo ceramic element, Impedance analysis, Flyback type converter, H-bridge power amplifier, PWM

1. 서론

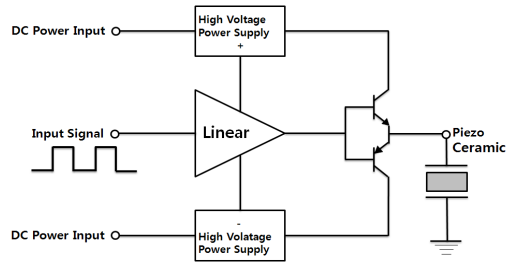
최근 압전 세라믹 소자를 이용한 진동제어 시스템에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 압전 세라믹 액추에이터는 결정판 모양의 소자에 전위차를 인가하였을 때 나타나는 기계적인 변위차를 이용하는 것으로서 연료분사를 위한 밸브 제어, 초정밀 변위제어, 진동제어 등 많은 분야에 응용되고 있다. 압전 세라믹 액추에이터는 특히 스프레이, 디스펜서와 같은 산업용 기구에 응용되어 최종 제품의 품질을 높이는데 크게 기여할 수 있다.

이러한 압전 세라믹 액추에이터로 부터 기계적인 진동을 얻기 위해서는 정해진 주파수의 고전압 교류 신호를 인가할 수 있는 구동 앰프가 필요하다[1]. 압전 세라믹 액추에이터 구동 앰프는 기본적으로 고전압 전원장치와 신호전력 증폭기로 구성된다. 전력증폭기는 그림 1에 보이는 바와 같이 선형 앰프 방식과 H-브리지 방식이 있다. 아날로그 방식의 선형 앰프는 다양한 형태의 신호를 증폭할 수 있다는 장점이 있으나 가격이 비싸고, 쌍극형 전원장치를 필요로 하므로 크기가 커지게 된다[2][3]. 반면에 H-브리지 방식은 구형파 신호 증폭에 국한되지만, 단극형 전원만 사용하고 구조가 간단하며 경제적이다. 또한 구형파 입력펄스의 폭을 조절함으로써 압전 세라믹 액추에이터에 공급되는 에너지를 쉽게 조절할 수 있다는 장점이 있다[4][5]. 고전압 전력 증폭기는 압전 세라믹 액추에이터의 종류와 적용 예에 따라 필요한 전압 및 구동 주파수 사양을 갖게 되는데, 보통 수백 볼트 이상의 전압과 수십 Hz에서 수십 kHz에 이르는 구동 주파수를 갖게 된다.

본 논문에서는 압전 세라믹 액추에이터를 이용한 액체

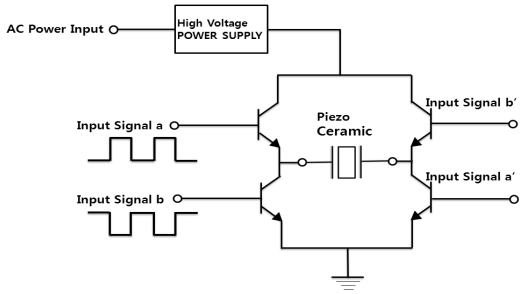
본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.
*Corresponding Author : Soo-Yeong Yi(suylee@seoultech.ac.kr)
Tel: +82-11-760-2491 email: suylee@snut.ac.kr
접수일 12년 08월 20일 수정일 12년 10월 22일 게재확정일 21년 11월 08일

분사용 스프레이 소자 구동용 고전압 앰프 개발에 관해 기술한다. 개발 대상의 산업용 압전 세라믹 스프레이 소자는 $\pm 300\,V$ 정도의 구동전압과 40 kHz 부근의 구동 주파수를 필요로 하며, 또한 스프레이 제품과 일체형으로 이루기 위해 소형화 및 저가격화를 필요로 한다. 따라서 본 논문에서는 $300\,V$급의 플라이백 타입[6] 스위칭 전원장치와 간단한 회로 구조를 갖는 H-브리지 전력 증폭기, 그리고 마이크로프로세서를 이용하여 주파수와 듀티를 쉽게 조절할 수 있는 신호 생성기를 일체형으로 개발하였다.



(a) 선형앰프 방식

(a) Linear amplifier



(b) H-브리지 앰프 방식

(b) H-bridge amplifier

[그림 1] 압전 세라믹 액추에이터 구동 전력증폭기

[Fig. 1] Power amplifier for driving a piezo ceramic actuator

2. 압전 세라믹 액추에이터 임피던스분석

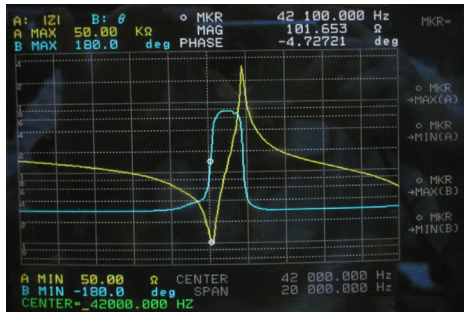
압전 세라믹 소자는 회로적으로 R, L, C 소자의 조합에 의한 등가 선형모델로 나타낼 수 있는데[2], 소성과정에서 소재의 구성 및 구조에 따라 등가회로모델의 소자값이 달라질 수 있다. 또한 R, L, C 회로 모델의 공진주파수 부근에서 구동할 때 가장 효율이 높으므로, 구동 앰프를 설계하기 위해서는 반드시 압전 세라믹 액추에이터의 임피던스 분석이 선행되어야 한다. 본 논문에서는 ㈜비에네스소프트에서 개발한 산업용 스프레이 압전소자를 대상으로 하였다. 대상 압전 소자의 사양은 표 1과 같다.

[표 1] 압전 스프레이 소자의 사양

[Table 1] Specification of Piezo Spray

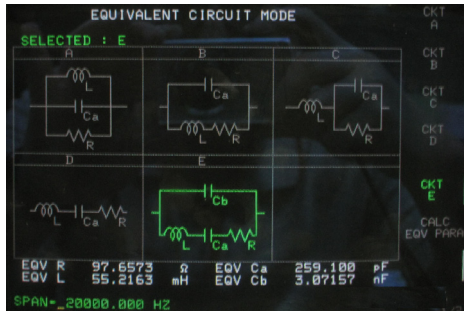
제 품 명	주요 사양
압전 스프레이	○ 액적 크기 : 60㎛ ○ 분사량 : < 5 ㎖/min
	○ 구동전압 : ±300V ○ 구동주파수 : 45 kHz

다음 그림 2는 대상 압전 스프레이 소자에 대해서 Agilent사의 4194A 임피던스 분석기를 이용하여 얻은 주파수 응답 및 선형 등가회로 결과를 보여준다.



(a) 주파수에 따른 임피던스 응답

(a) Impedance frequency response



(b) 등가 회로 모델

(b) Equivalent circuit model

[그림 2] 압전 세라믹 액추에이터에 대한 임피던스 분석

[Fig. 2] Result of impedance analysis for piezo ceramic actuator

그림 2 (b)의 등가모델에서 각 회로소자의 크기는 다음과 같다:

$$R = 97.6573\,\Omega,$$
$$L = 55.2163\,mH,$$
$$C_a = 259.100\,pF,$$
$$C_b = 3.07157\,nF$$

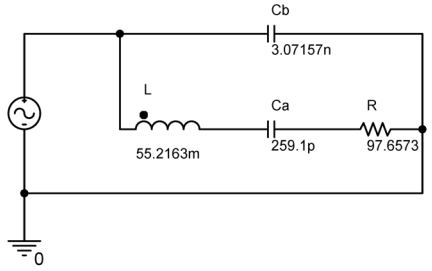
간단한 회로해석에 의해 다음과 같이 등가회로 모델의 어드미턴스 $Y_{eq}(j\omega)$를 얻을 수 있다:

$$Y_{eq} = \frac{RC_a^2w^2}{(1-LC_a^2w^2)^2+R^2C_a^2w^2} + j\left(\frac{C_aw(1-LC_aw^2)}{(1-LC_a^2w^2)^2+R^2C_a^2w^2} + C_bw\right) \quad (1)$$

그러므로 등가회로 모델의 공진주파수는 다음과 같게 된다:

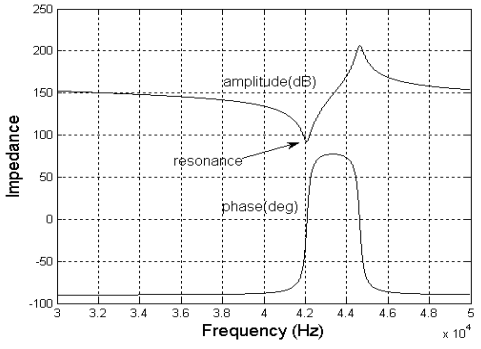
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\,C_a}} \approx 42.078\,kHz \quad (2)$$

임피던스 분석기로 얻은 결과를 확인하기 위해 PSPICE 프로그램을 이용하여 등가회로를 시뮬레이션하였으며, 다음 그림 3에 보이는 결과를 얻을 수 있었다. 그림 3 (b)에 보이는 임피던스의 주파수 응답은 임피던스 분석기로 얻은 그림 2 (a)의 응답과 일치한다. 그림 2 (b)에서 임피던스의 크기가 가장 작게 되는 점이 공진주파수가 된다.



(a) 등가회로 모델

(a) Equivalent circuit model



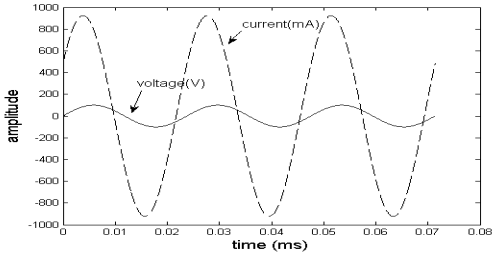
(b) 주파수에 따른 임피던스 응답

(b) Impedance frequency response

[그림 3] 임피던스 분석기로 얻은 등가회로에 대한 PSPICE 시뮬레이션 결과

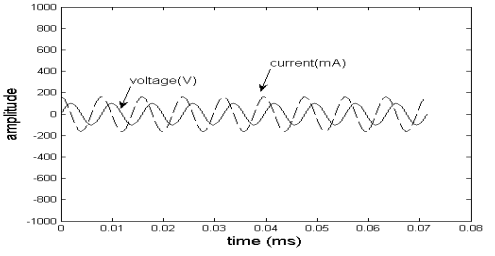
[Fig. 3] Result of PSPICE simulation for equivalent circuit from impedance analyser

그림 4는 대상 압전 세라믹 스프레이 부하 소자 모델에 각각 공진주파수의 1, 3, 5배 주파수 신호, 즉 $f_0 = 42\,kHz$, $3f_0 = 126\,kHz$, $5f_0 = 210\,kHz$ 주파수를 갖는 동일 진폭 100 V의 교류전압 신호를 인가하였을 때 얻어지는 전류의 크기를 시뮬레이션을 통해 얻은 결과이다. 그림 4 (a)에서 보듯이 공진 주파수, f_0로 구동할 때 전류의 크기가 가장 크고, 따라서 가장 효율적임을 알 수 있다. 압전 세라믹 소자의 기계적 변위의 크기는 전하량의 크기에 비례하므로, 전류의 크기가 클수록 큰 변위를 얻을 수 있다.



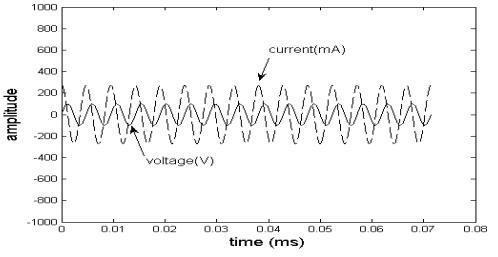
(a) 구동 주파수: $f_0 = 42\,kHz$

(a) Frequency of driving signal: $f_0 = 42\,kHz$



(b) 구동 주파수: $3f_0 = 126\,kHz$

(b) Frequency of driving signal: $3f_0 = 126\,kHz$



(c) 구동 주파수: $5f_0 = 210\,kHz$

(c) Frequency of driving signal: $5f_0 = 210\,kHz$

[그림 4] 구동전압 신호의 주파수에 따른 전류의 크기

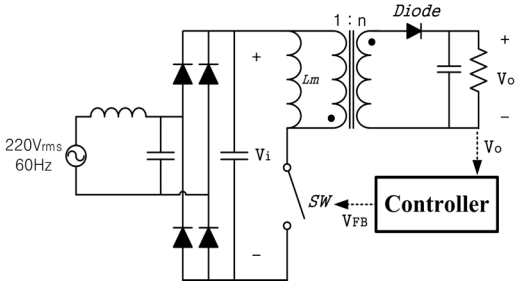
[Fig. 4] Amplitude of current in accordance with frequency of voltage driving signal

3. 압전 세라믹 액추에이터 구동 앰프

산업용 압전 세라믹 스프레이는 압전 세라믹 액추에이터에 높은 주파수의 교류전압을 인가함으로써 소자를 기계적으로 진동시키고, 이를 이용하여 액체상태의 물질을 분리방출 하거나 분무하는 것이다. 원활한 액적 분무를 위해 약 300 V_{PP} 정도의 높은 교류 전압이 필요하며, 따라서 압전 세라믹 액추에이터 구동 앰프는 기본적으로 300 V 이상의 고전압 전원공급장치와 신호전력 증폭기로 구성된다. 본 절에서는 압전 세라믹 스프레이 제품의 경량화 및 저가격화를 이루기 위해 (1) 출력전압이 안정화되고, 비교적 전기적 소자 사용이 적은 소형 고전압 스위칭 전원장치와 (2) PWM 전력제어가 가능한 간단한 구조의 H-브리지 타입 신호전력 증폭기에 관하여 기술한다.

3.1 고전압 스위칭 전원장치

300 V 이상의 고전압 직류전원 공급을 위해 비절연형 컨버터에 비해 비교적 안전성이 좋은 절연형 벅-부스트 타입 스위칭 전원장치인 플라이백 컨버터를 개발하였다. 플라이백 컨버터는 구조가 간단하여 소형 전원장치 개발에 적합한 장점을 가지고 있다. 플라이백 컨버터 형태의 스위칭 전원장치 구조는 그림 5와 같다.



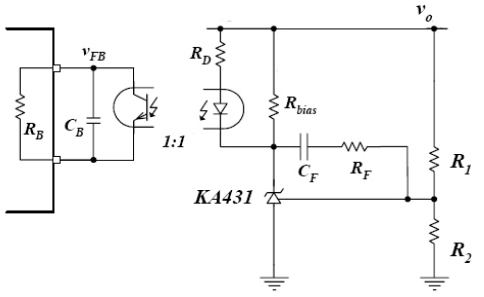
[그림 5] 플라이백 컨버터
[Fig. 5] Flyback converter

플라이백 컨버터는 단상 교류 전원을 다이오드 브리지 회로를 통해 공급받고, 스위치가 On 상태일 때 변압기 1차측의 자화 인덕턴스(*Lm*)에 의하여 변압기에 에너지가 축적된다. 스위치가 Off 되면 1차측에 축적되어 있던 에너지가 2차측으로 방출되고, 2차측 다이오드를 통하여 출력에 에너지를 공급하게 된다. 궤환 제어기는 출력전압(v_o)을 감지하여 스위치 On/Off 시간을 제어하는 전압기준치(v_{FB})를 생성한다. 정상상태에서 플라이백 컨버터의 입출력 전압 관계는 식 (3)과 같다.

$$V_o = \frac{nD}{1-D} V_i \tag{3}$$

여기서 $D = T_{on}/T_S$, T_S는 스위칭주기, T_{on}은 스위치 턴온 시간을 의미한다.

다음 그림 6은 스위칭 전원장치의 출력전압 안정화를 위한 궤환 보상기를 나타낸다. 보상기는 포토커플러를 이용하여 제어부와 전원부를 절연하였다. 또한, 출력조절이 가능한 레귤레이터(KA431)를 이용한 Type 2 제어기를 사용하여 영점과 극점을 각각 한 개씩 배치함으로써 출력전압 안정화 보상기를 설계한다[7][8].



[그림 6] 스위칭 전원장치 출력전압 안정화 보상기
[Fig. 6] Feedback compensator for output voltage stabilization of switching power supply

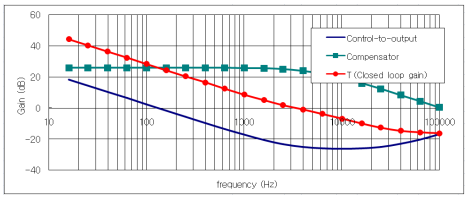
그림 6의 보상기 설계를 위한 궤환부의 전달함수는 식 (4)와 같다[7].

$$\frac{v_{FB}}{v_o} = -\frac{w_i}{s} \cdot \frac{1+s/w_{zc}}{1+1/w_{pc}} \tag{4}$$

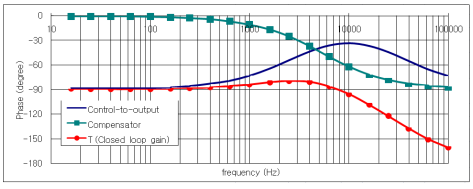
여기서 v_o와 v_{FB}는 각각 출력전압과 궤환전압의 크기를 나타내며 w_i, w_{zc}, w_{pc}는 각 소자 값에 의해 다음과 같이 정해진다:

$$w_i = \frac{R_B}{R_1 R_D C_F}, \tag{5}$$
$$w_{zc} = \frac{1}{(R_F + R_1) C_F},$$
$$w_{pc} = \frac{1}{R_B C_B}$$

그림 6의 R_{bias}와 R_2의 값은 시행착오 방법으로, $R_{bias} < 1k\Omega$, $R_2 \simeq R_1/100$으로 설정한다. 그림 7은 궤환 보상기 적용전과 적용후의 각 부분, 즉 궤환-출력부, 궤환보상기, 폐루프 이득의 전달함수의 크기, 위상 Bode Plot을 나타낸다. 보상기의 영점을 약 1 Hz, 극점을 약 5 kHz에 배치함으로써 적절한 출력전압 궤환 안정화 특성을 갖는 보상기를 설계하였다.



(a) 안정화 보상전
(a) Without compensator



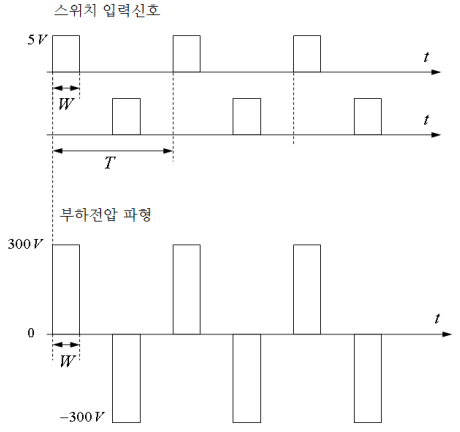
(b) 안정화 보상후
(b) With compensator

[그림 7] 출력전압 보상기 적용 전, 후 보드 선도
[Fig. 7] Bode plot for output voltage of switching power supply

3.2 H-브리지형 신호전력 증폭기

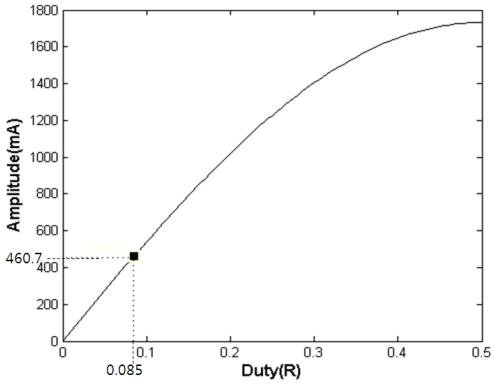
그림 1 (b)에 보인 H-브리지 신호전력 증폭기는 공급된 직류전압을 트랜지스터 스위치의 조합에 따라 변조하여 부하에 인가하는 것이다. 구조가 간단할 뿐만 아니라 트랜지스터 스위치 신호조합에 따라 단극형 전원으로 쌍극형 전원의 효과를 얻을 수 있으며, 또한 스위치 On/Off 신호에 따른 PWM(Pulse Width Modulation)의 듀티비를 통해 부하에 공급할 수 있는 전력의 크기를 쉽게 조절할 수 있다는 장점이 있다.

다음 그림 8은 H-브리지 회로의 스위치 입력신호에 따른 부하전압의 파형을 보여준다.

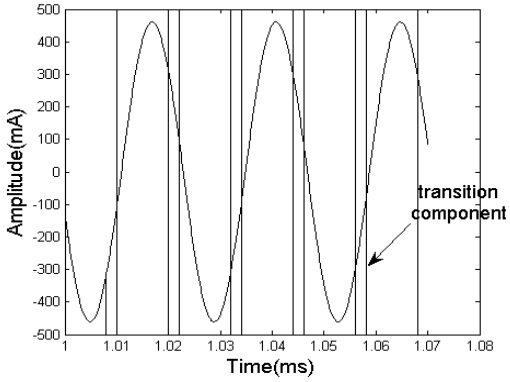


[그림 8] H-브리지 증폭기의 스위치 입력신호에 따른 부하전압 파형
[Fig. 8] Load voltage signal waveform of H-bridge amplifier according to switch input signal

2절에서 분석한 바와 같이 대상 압전 세라믹 스프레이 소자의 공진주파수는 $f_0 \approx 42\,kHz$이므로 그림 8의 스위치 입력신호 주기는 $T = \frac{1}{f_0} \approx 0.024\,mSec$로 하였다. 다음 그림 9는 예로서 듀티비 $R = 0.085$의 조건하에서 시행한 PSPICE 시뮬레이션 결과 부하전류의 파형을 보여준다. 여기서 듀티비는 $R = \frac{W}{T}$로 정의된다. 그림 9 (b)의 그래프에서 수직선들은 구형파 입력에 대한 과도응답 성분들이다.



(a) 튜티비에 따른 부하전류의 진폭
(a) Amplitude of load current according to duty ratio



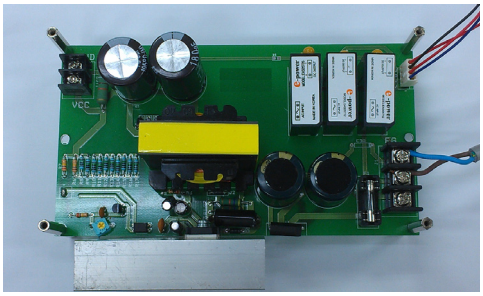
(b) $R = 0.085$ 일 때 부하전류파형
(b) Waveform of load current in case of $R = 0.085$

[그림 9] PSPICE 시뮬레이션 결과
[Fig. 9] Simulation result by PSPICE

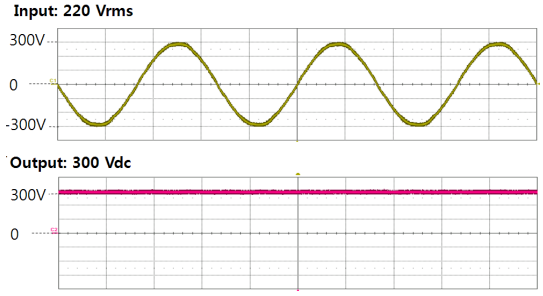
4. 실험

전술한 바와 같이 압전 세라믹 스프레이 구동기는 전

원공급장치와 H-브리지식 전력 증폭기로 구성된다. 그림 10은 본 논문에서 제작한 플라이백 타입의 스위칭모드 전원장치이다. 본 전원장치는 220 V_{rms} 교류입력에 대해서 직류 300 V의 출력을 갖는다. 그림 11은 본 전원장치의 입출력 파형을 보여준다.

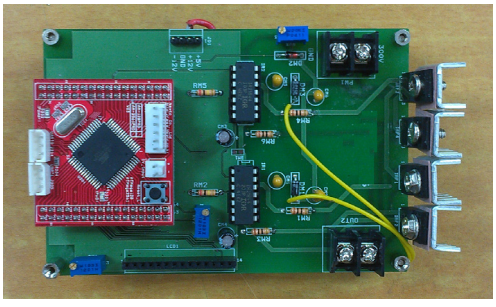


[그림 10] 플라이백 타입 스위칭 전원장치
[Fig. 10] Flyback switching power supply



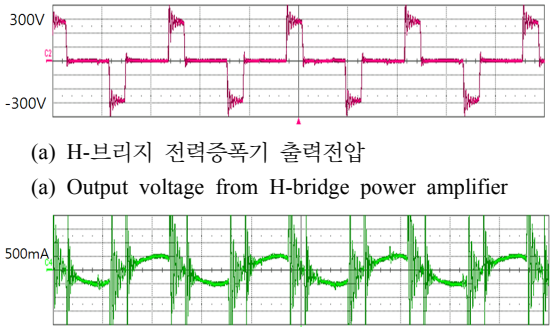
[그림 11] 전원장치 입출력 전압 파형
[Fig. 11] Input-output voltage waveform of power supply

그림 12는 제작한 H-브리지 신호전력 증폭기이다. 최대 인가전압 900 V, 최대전류 7 A, 그리고 대역폭 100 kHz의 사양을 갖는다.



[그림 12] H-브리지 전력 증폭기
[Fig. 12] H-bridge power amplifier

3절에서 얻은 PSPICE 시뮬레이션 결과를 확인하기 위해 듀티비 $R=0.085$ 를 갖는 입력신호에 대해서 압전 세라믹 스프레이 부하전류의 크기를 측정하였다. 그림 13은 오실로스코프로 측정한 부하 전압과 전류의 크기이다.



(a) H-브리지 전력증폭기 출력전압
(a) Output voltage from H-bridge power amplifier

(b) 압전 세라믹 스프레이 부하전류
(b) Piezo ceramic spray load current

[그림 13] 실험결과
[Fig. 13] Experimental result

그림 9 (b)와 그림 13 (b)를 비교해 보면 PSPICE 시뮬레이션 결과와 실제 실험 결과가 정상 상태에서 근사적으로 잘 맞음을 볼 수 있다. 따라서 전원공급장치의 최대 공급전류의 크기와 듀티에 따른 전류의 크기 그래프 그림 9 (a)를 이용하여 대상 압전 세라믹 액추에이터 구동을 위한 PWM 듀티비를 결정할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 압전 세라믹 액추에이터를 이용한 산업용 스프레이 구동을 위한 소형 고전압 구동 증폭기를 개발하였다. 구동 증폭기는 고전압 전원장치와 신호전력 증폭기로 구성된다. 고전압 전원장치로서 전기적 소자 사용이 적고, 크기가 작은 플라이백 스위칭 컨버터를 전용 개발하였으며, 또한 신호전력 증폭기로 간단한 H-브리지 앰프를 개발하였다. H-브리지 앰프는 단극성 전원으로 양극성 전원의 효과를 낼 수 있으며, PWM 신호의 듀티비에 의해 공급 전력을 쉽게 조절할 수 있다는 장점이 있다. 본 논문에서는 PSPICE 회로 시뮬레이션을 통해 듀티비를 설정하였고, 실험을 통해 시뮬레이션 결과와 실제 결과가 잘 일치함을 확인하였다.

본 논문에서 개발한 구동 증폭기는 경제적이고, 소형이므로 압전 세라믹 액추에이터를 이용한 산업용 제품에 일체형으로 활용할 수 있다.

References

[1] W. Lee, M. Kwak, D. Yang, and D. Song, “Development of Power Amplifier and Controller Design for Piezoelectric Actuator and Sensor,” *Proc. of Korean Society for Noise and Vibration Engineering Autumn Conference*, pp. 78-79, 2011.

[2] W. Lee, M. Kwak, and D. Yang, “A Control Experiment of Used Low-cost Power Amplifier for Piezoelectric Actuator," *Proc. of Korean Society for Noise and Vibration Engineering Spring Conference*, pp. 281-282, 2011.

[3] W. Lee and M. Kwak, "Development of Power Amplifier for Piezoelectric Actuator and Control Algorithm Realization System for Active Vibration Control of Structures," *Trans. of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, vol. 22, no. 2, pp. 170-178, 2012.

[4] J. Park, J Baek, B. Cho, and S. Choi, "Performance Evaluation of Switching Amplifier in Micro-positioning Systems with Piezoelectric Actuator," *Trans. of the Korean Institute of Power Electronics*, vol. 14, no. 1, pp. 62-71, 2009.

[5] M. Kwak, K. Kim, and S. Bang, "Active Vibration Control of Smart Structure Using Pulse Width Modulation," *Trans. of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, vol. 15, no. 1, pp. 105-111, 2005.

[6] H. Sung, J. Han, S. Yi, S. Kim, and J. Song, "Development of Compact High Voltage Seitching Power Supply for Piezoelectric Element," *Proc. of ICROS*, COEX, Seoul, pp. 143-144, 2012

[7] *Design Guidelines for Off-line Flyback Converters Using Fairchild Power Switch(FPS)*, Fairchild

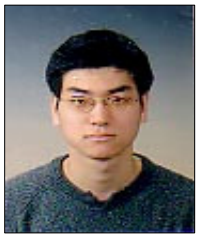
[8] *FPS Design Assistant* ver.1.20, Fairchild

김 순 철(Soon-Cheol Kim) **[준회원]**

- 2007년 3월 ~현재 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과 (공학사)

<관심분야>
보행로봇, 로봇비전

한 정 호(Jung-Ho Han) **[준회원]**



- 2008년 8월 : 서울과학기술대학교 전기공학과 (공학사).
- 2011년 2월 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과 (공학석사).
- 2011년 3월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과 박사과정.

<관심분야>
전력변환장치, 전력품질

이 수 영(Soo-Yeong Yi) **[정회원]**

- 1988년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1990년 2월 : KAIST 전기및전자공학과 (공학석사)
- 1994년 8월 : KAIST 전기및전자공학과 (공학박사)
- 1995년 3 ~ 1999년 8월 : 한국과학기술연구원 선임연구원
- 1999년 9월 ~ 2007년 2월 : 전북대학교 전자정보공학부 부교수
- 2007년 3월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수

<관심분야>
보행로봇, 로봇비전