

# 고지향성 스피커를 위한 새로운 전력 증폭기 설계

## Design of High-efficiency Power Amplifier System for High-directional Speaker

김진영\* · 김인동\* · 문원규\*\*  
 (Jin-Young Kim · In-Dong Kim · Wonkyu Moon)

**Abstract** - Parametric array transducers are used for highly directional speaker in an air environments. Piezoelectric micromachined ultrasonic transducers for parametric array transducers need DC-biased voltage driving signals in order to get high-directional quality-sound features. The existing power amplifier such as class A amplifiers has low efficiency and require large volume heatsinks. To overcome the above-mentioned disadvantages of the conventional amplifier, this paper proposes a new power amplifier system. The proposed power amplifier system ensures high linearity of output characteristic by utilizing the push-pull class B type amplifier. Furthermore, the proposed power amplifier system gets high efficiency because it contains the DC-DC converter-type power supply which can perform energy recovery and envelope tracking function. Also the paper suggests the detailed circuit topology. Its characteristics are verified by the detailed experimental results.

**Key Words** : pMUT, Power amplifier, Private audio communication system, Quasi envelope tracking

### 1. 서론

현대사회의 발달과 더불어 음파에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히, 고주파수의 초음파는 높은 방향성을 가지므로 물체 탐지, 거리측정 등 다양한 목적으로 사용이 가능하다. 하지만 가청주파수 영역의 음파는 전 방향으로 퍼져나가는 특성을 가지므로 특정 방향으로 전달하기에는 어려움이 따른다.

그림 1은 파라메트릭 어레이 현상의 원리를 나타낸다. 파라메트릭 어레이(Parametric Array, PA) 현상을 이용하면 높은 방향성을 가진 가청 주파수 음파를 발생시킬 수 있다[1-3]. 높은 지향성을 갖는 두 개의 1차 초음파 신호( $f_1, f_2$ )가 매질을 진행하게 되면 매질의 비선형성에 의해서 차주파수 성분( $f_1 - f_2$ )을 갖는 2차 음파가 발생한다. 이 때 발생하는 2차 음파는 매질을 진행한 1차 초음파에 의해 생성되었기 때문에 직접 방사하는 2차 음파에 비해 매우 높은 ( $10^\circ$  이하) 지향성을 가지게 된다. 따라서 파라메트릭 어레이 현상에 의해 발생하는 2차 음파를 가청 주파수 대역으로 제어한다면 고지향성의 가청 음파를 발생시킬 수 있다.

파라메트릭 어레이 현상을 구현할 수 있는 매질로는 여러 가지가 있으나, 그 중에 압전 박막형 트랜스듀서(pMUT, piezoelectric Micro-machined Ultrasonic Transducer)가 적합하다 [4-5]. 이와 같이 압전 박막형 트랜스듀서를 이용하여 가청주파수 대역의 2차 음파를 생성한다면 공기 환경에서도 고 지향성의

가청 음파를 전달하는 스피커 구현이 가능하다.

그림 2는 파라메트릭 어레이 사운드 생성 시스템의 개요이다. 시스템은 신호 변조기, 전력 증폭기, 트랜스듀서로 구성된다. 신호 변조기에서 생성되는 1차 음파는 수십~수백 [kHz]의 주파수를 갖는다. 따라서 1차 음파를 증폭하는 전력 증폭기는 낮은 THD(Total Harmonic Distortion)와 넓은 대역폭의 선형적 출력 특성을 가져야 하며 높은 전력 효율을 유지해야 한다. 하지만 기존의 전력 증폭기는 고주파수 대역에서는 선형성이 떨어지거나 전력 효율이 낮은 단점이 있다. 그리고 압전 박막형 트랜스듀서

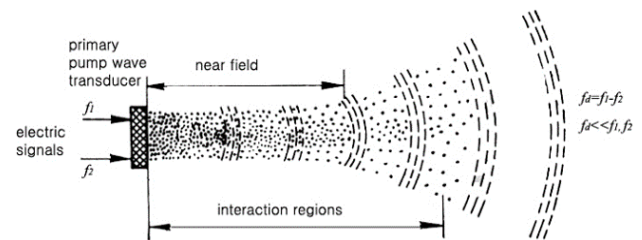


그림 1 파라메트릭 어레이 현상의 원리

Fig. 1 Concept of parametric array

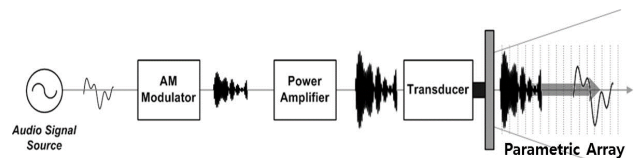


그림 2 고지향성 파라메트릭 어레이 사운드 생성 시스템의 개요도

Fig. 2 Basic block diagram of high directional parametric array sound generation system

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Pukyong Nat. University, Korea.

E-mail : idkim@pknu.ac.kr

\* Dept. Electrical Engineering, Pukyong Nat. University, Korea.

\*\* Dept. Mechanical Engineering, Pohang Univ. of Science and Technology, Korea.

Received : March 14, 2017; Accepted : June 20, 2017

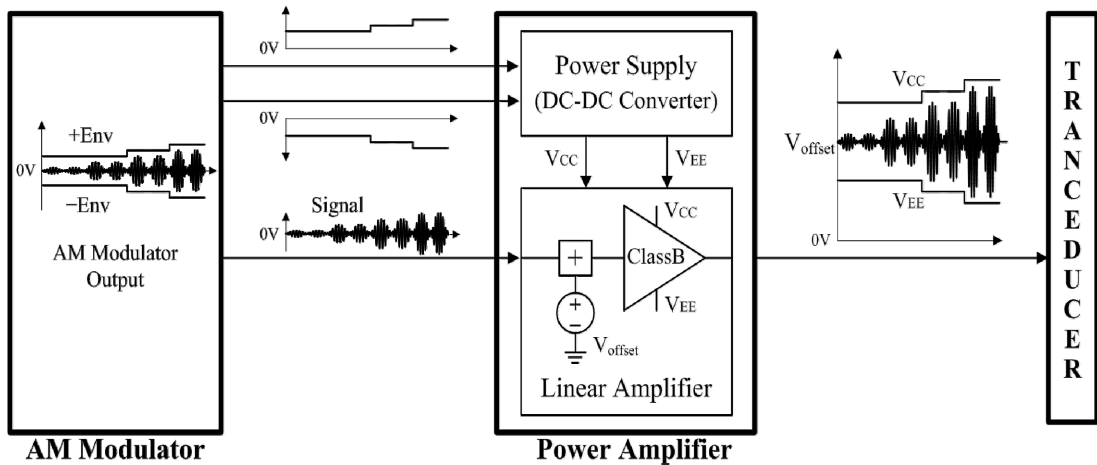


그림 3 제안하는 전력 증폭기의 개요도

Fig. 3 Conceptual block diagram of proposed power amplifier

는 일반적인 초음파 트랜스듀서와 달리 DC Bias 전압을 인가해야 구동되는 특성을 가진다. 하지만 기존에 연구된 전력 증폭기는 AC를 기반으로 동작하기 때문에 압전 박막형 트랜스듀서를 구동하기에는 적합하지 못하며 전력 효율이 매우 낮고 다량의 방열판이 요구 된다[6-12].

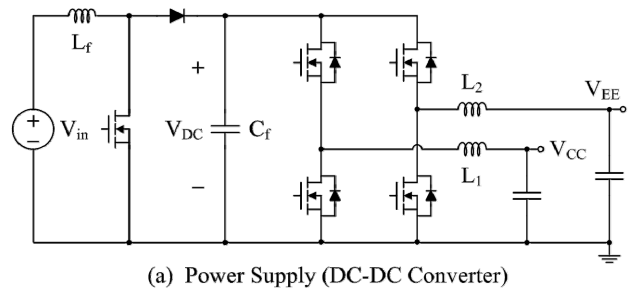
이와 같은 배경으로 본 연구에서는 기존 전력 증폭기의 단점을 보완하는 고효율의 새로운 전력 증폭기를 제안한다. 압전 박막형 트랜스듀서를 고효율로 구동하기 위한 전력 증폭기는 낮은 THD와 출력의 선형성이 보장되어야 한다. 따라서 제안하는 전력 증폭기는 전력 효율이 낮지만 선형성이 보장되는 class-B 타입의 Linear Amplifier를 사용한다. 또한 전력 효율을 높일 수 있는 기능을 갖는 전원 공급 장치를 제작하여 높은 선형성과 고효율의 특성을 갖는 전력 증폭기 시스템을 구현한다. 본 연구에서 제안하는 전력 증폭기는 프로토타입으로 제작하여 실험을 통해 동작 특성을 검증한다.

## 2. 제안하는 고효율 전력 증폭기

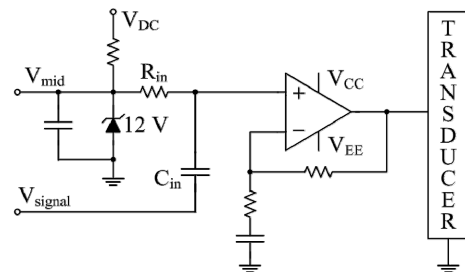
그림 3은 제안하는 전력 증폭기를 포함하는 사운드 생성 시스템의 개요도이다. 제안하는 전력 증폭기는 DC-DC 컨버터로 구성된 전원 공급 장치와 Class-B 타입의 Linear Amplifier로 구성된다. 전원 공급 장치는 AM 변조기로부터 받는  $\pm Env$  [V] 신호의 크기에 따라서 공급전압  $V_{CC}$ 와  $V_{EE}$ 를 제어하게 된다.

Class-B 타입의 Linear Amplifier는 입력 받은 수십~수백 [kHz]의 원신호를 선형적으로 증폭하여 트랜스듀서로 출력을 전달한다.

그림 4는 제안하는 전력 증폭기를 구성하는 (a) 전원 공급 장치와 (b) Class-B 타입의 Linear Amplifier의 회로도이다. DC bias 전압  $V_{mid}$ 가 인가된 Class B 타입의 Linear Amplifier는 넓은 대역폭 및 높은 선형성의 출력을 보장하므로 압전 박막형 트랜스듀서를 구동하기에 적합하다. 그리고 전력 공급 장치는



(a) Power Supply (DC-DC Converter)



(b) Linear amplifier with transducer

그림 4 제안하는 전력 증폭기의 전력 회로도

Fig. 4 Detailed power circuit of proposed power amplifier

Boost 컨버터와 Buck 컨버터로 이루어진 DC-DC 컨버터이며 높은 전력 효율을 얻기 위한 에너지 회수 기능 및 Q-ET(Quasi Envelope Tracking) 기능을 수행한다. 높은 전력 효율을 갖기 위한 기능의 설명은 다음과 같다.

### 2.1 전력 증폭기의 에너지 회수 기능

그림 5는 일반적인 전력 증폭기와 제안한 전력 증폭기의 동작 파형을 비교한 것이다. 압전 박막형 트랜스듀서는 DC bias를 인가해야 구동이 되는 특성을 가지므로 일반적인 전력 증폭기로 구

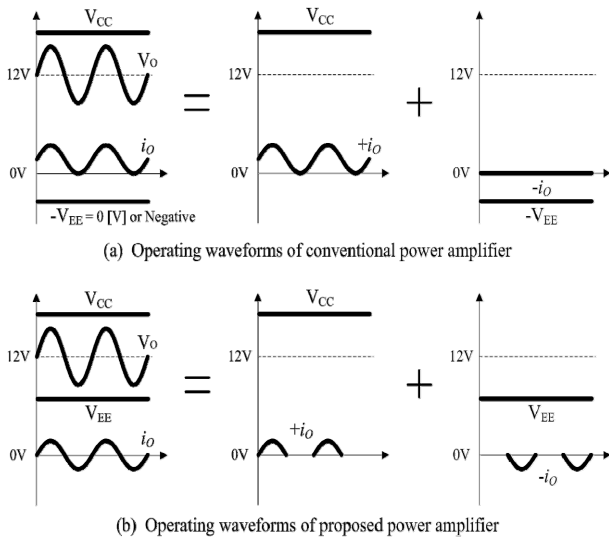


그림 5 일반적인 전력 증폭기와 제한한 전력 증폭기의 비교  
**Fig. 5** Comparison of conventional power amplifier (a), and proposed amplifiers (b)

동하면 그림 5-(a)와 같이 양(+) 방향의 공급전압  $V_{CC}$ 에 의해서만 구동되는 출력 특성을 갖는다. 이로 인해 요구되는 공급 전압  $V_{CC}$ 가 커질수록 소비전력은 매우 높아진다. 그림 5-(a)의 일반적인 전력 증폭기의 소비전력은 식 (1)과 같다.

$$P = V_{CC} \cdot i_o + V_{EE} \cdot 0 = V_{CC} \cdot i_o \quad (1)$$

그림 5-(b)는 제안하는 전력 증폭기의 출력 파형을 나타낸다. 공급전압  $V_{EE}$ 는 일반적으로 음(-)의 값을 가지나 전력 공급 장치의 Buck 컨버터에 의해 양(+) 값을 갖는다. 또한 0 [V]를 기준으로 갖는 일반적인 전력 증폭기와 달리 제안하는 전력 증폭기는  $V_{mid}=12$  [V]를 기준으로 가진다. 이로 인해 출력 전압이 12 [V]보다 작은 경우에는 공급전압  $V_{EE}$ 에 의해 동작하게 된다. 그림 5-(b)의 제안하는 전력 증폭기의 소비전력은 식 (2)와 같다.

$$P = V_{CC} \cdot i_o + V_{EE} \cdot (-i_o) = V_{CC} \cdot i_o - V_{EE} \cdot i_o \quad (2)$$

식 (2)에서 알 수 있듯이, 공급전압  $V_{EE}$ 에 의해 동작하는 소비전력은 음의 값  $-(V_{EE} \times i_o)$ 가 되므로 에너지를 회수하게 된다. 따라서 식 (1)에 비해 식 (2)의  $-(V_{EE} \times i_o)$ 가 커질수록 회수되는 에너지의 양이 커지므로 전력 증폭기의 소비전력은 작아진다. 또한 제안하는 전력 증폭기는 압전 박막형 트랜스듀서에 더 큰 DC bias 전압이 요구되어도 에너지 회수 기능으로 인해 전력 손실을 방지할 수 있다.

### 2.2 Quasi Envelope Tracking Technic

그림 6은 Q-ET(Quasi Envelope Tracking) 기능을 수행하는 전력 증폭기의 파형을 나타낸다.  $t_0 \sim t_4$  구간에서 공급전압  $V_{CC}$ 와

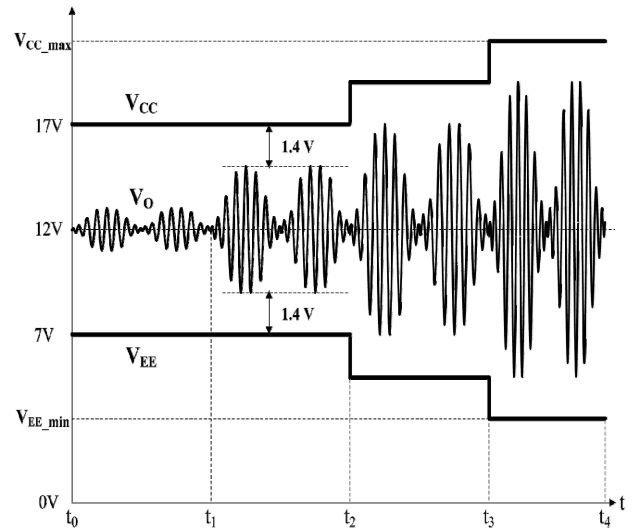


그림 6 Quasi Envelope Tracking 기능을 갖는 전력 증폭기의 공급 전압  $V_{CC}$ ,  $V_{EE}$ 파형과 출력 전압  $V_O$ 파형  
**Fig. 6** Input voltage  $V_{CC}$ ,  $V_{EE}$  of amplifier with quasi envelope tracking technic

$V_{EE}$ 는 출력전압  $V_O$ 에 따라서 크기가 가변이 된다. 만약 일반적인 전력 증폭기를 이용하여 그림 6처럼 출력을 구동한다면 공급전압  $V_{CC}$ 와  $V_{EE}$ 는 출력전압  $V_O$ 의 크기와 관계없이 고정 전압인  $V_{CC,max}$ ,  $V_{EE,min}$ 로 전압을 공급하게 된다. 따라서 일반적인 전력 증폭기는 그림 6의  $t_0 \sim t_3$  구간에서 에너지 효율이 매우 낮아진다. 하지만 제안하는 전력 증폭기는 Buck 컨버터를 이용하므로 공급전압  $V_{CC}$ 와  $V_{EE}$ 의 제어가 가능하다. 따라서 제안하는 전력 증폭기는 Q-ET 기능을 이용하여 전력 효율을 높일 수 있다. 다만 그림 6의  $t_0 \sim t_2$  구간에서 출력전압  $V_O$ 의 크기가 증가하였지만 공급전압  $V_{CC}$ 와  $V_{EE}$ 의 크기는 동일하다. 이는 본 연구에서 사용한 전력 증폭기의 공급전압  $V_{CC}$ 와  $V_{EE}$  사이에 요구되는 최소 전압이 존재하기 때문이다. 그리고 전력 증폭기의 drop-out voltage는 1.4 [V]이므로 공급전압  $V_{CC}$ 와  $V_{EE}$ 는 출력전압보다 최소 1.4 [V] 이상의 전압 마진을 두어야 한다. 따라서 이러한 점들을 고려한 공급전압이 인가되도록 전력 증폭기를 설계해야 한다.

### 3. 실험 결과

그림 7은 프로토타입으로 구현한 전력 증폭기의 개요도를 나타낸다. 프로토타입의 전력 증폭기는 한 개의 전원공급 장치와 2 채널의 Linear Amplifier로 구성된다. 표 1은 설계된 전력 증폭기의 시스템 파라미터이다. 그림 8-(a)는 프로토타입으로 구현한 전력 증폭기의 외형이며 그림 8-(b)는 2 채널의 압전 박막형 트랜스듀서로 구성된 스피커의 외형이다.

그림 9는 Boost 컨버터의 soft-starting 동작 특성을 검증하기 위해 전력 증폭기의 starting 구간을 확대한 파형이다. 전력 증폭기에 9 [V]의 입력 전압이 인가되면 Boost 컨버터에서 24 [V]의

표 1 시스템 파라미터

Table 1 System parameter

Parameters	Specification
Power rating	10 [W]
Input voltage	5~12 [V]
Input Signal frequency $f_1, f_2$	89, 97 [kHz]
Boost output voltage	24 [V]
Buck output voltage $V_{CC}$	12~24 [V]
Buck output voltage $V_{EE}$	0~12 [V]
Reference voltage of amp	12 [V]
Rated output peak voltage of amp	$\pm 3$ [V]
Max Output peak voltage of amp	$\pm 5$ [V]

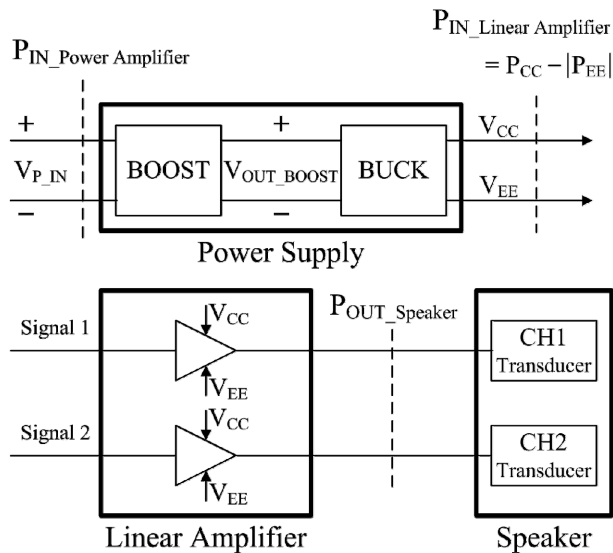


그림 7 프로토타입으로 제작된 전력 증폭기의 개요도  
 Fig. 7 Overall block diagram of experimental prototype of proposed power amplifier

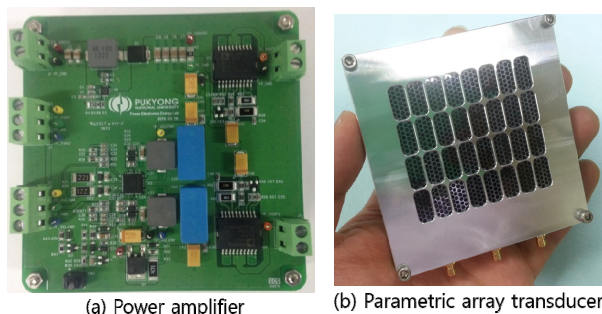


그림 8 (a) 프로토타입으로 제작된 전력증폭기와 (b) 2채널의 트랜스듀서로 구성된 스피커의 외형

Fig. 8 (a)Prototype of Power amplifier and power supply, (b) prototype of parametric array transducer

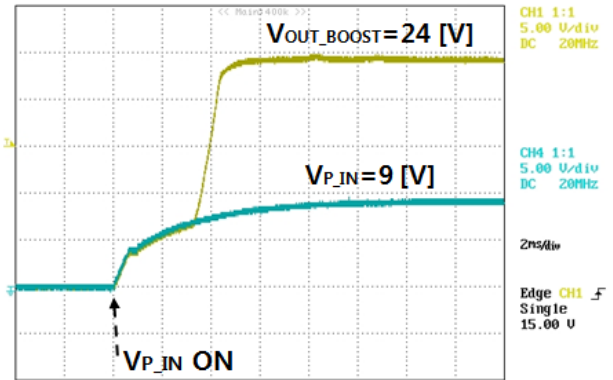


그림 9 Boost 컨버터의 soft-starting 동작을 측정된 파형  
 Fig. 9 Zoomed waveforms  $V_{P\_IN}$  and  $V_{out\_boost}$  related to soft-starting of the boost converter of power supply [5V/div, 2ms/div]

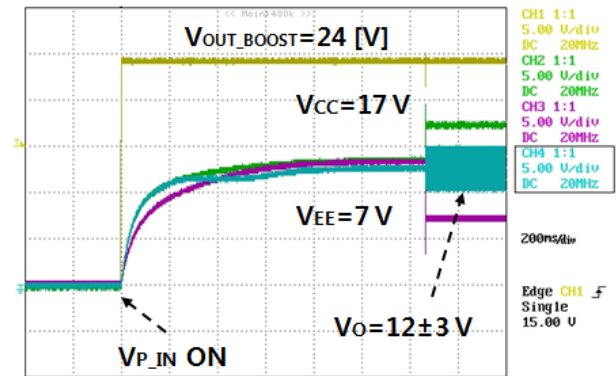


그림 10 제안한 전력 증폭기의 증폭기의 soft-starting 동작과 정상상태 동작을 측정된 파형  
 Fig. 10 Soft-starting and steady-state characteristics of the proposed power amplifier and power supply for parametric array transducer. [5V/div, 200ms/div]

출력이 안정되게 생성되는 것을 확인할 수 있다. Boost 컨버터의 출력전압 24 [V]를 이용하여 Buck 컨버터에서는 Linear Amplifier를 구동하기 위한 전압  $V_{CC}$ 와  $V_{EE}$ 를 생성하게 된다.

그림 10은 제안한 전력 증폭기의 soft-starting 동작과 정상상태 동작 특성을 나타낸다. 전력 증폭기에 9 [V]의 전원이 인가되면 전력 증폭기의 각 컨버터는 전압의 오버슈트가 발생하지 않고 soft-starting 동작을 하는 것을 확인할 수 있다. 또한 전력 증폭기의 DC bias 전압  $V_{mid}$ 가 12 [V]에 도달하는 정상상태가 되면 전력 증폭기는 트랜스듀서에 전력을 안정적으로 공급하는 것을 확인할 수 있다.

그림 11은 전력 증폭기의 공급전압  $V_{CC}$ ,  $V_{EE}$ 와 트랜스듀서 채널 1의 출력전압  $V_{ch1}$ , 출력전류  $i_{ch1}$ 을 나타낸다. 그림 12는 전력 증폭기의 공급전압  $V_{CC}$ ,  $V_{EE}$ 와 트랜스듀서 채널 2의 출력전압  $V_{ch2}$ , 출력전류  $i_{ch2}$ 을 나타낸다. 트랜스듀서의 최대 구동전압은 DC bias 12 [V]를 기준으로  $\pm 3$ [V] 진폭을 가지며 동작한다. 그

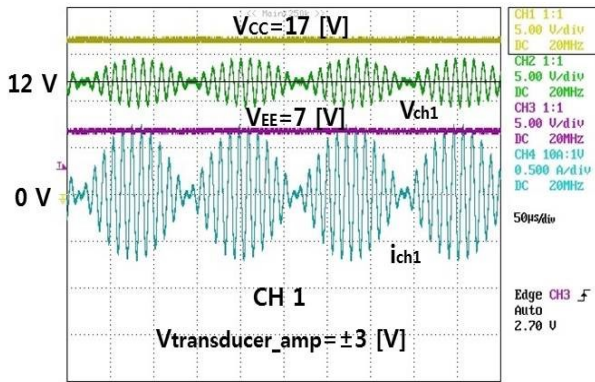


그림 11 전력 증폭기의 공급전압  $V_{CC}$ ,  $V_{EE}$ 와 트랜스듀서 채널 1의 출력 파형

Fig. 11 Measured supply voltage  $V_{CC}$ ,  $V_{EE}$  of the power amplifier, and the output waveforms of transducer channel 1

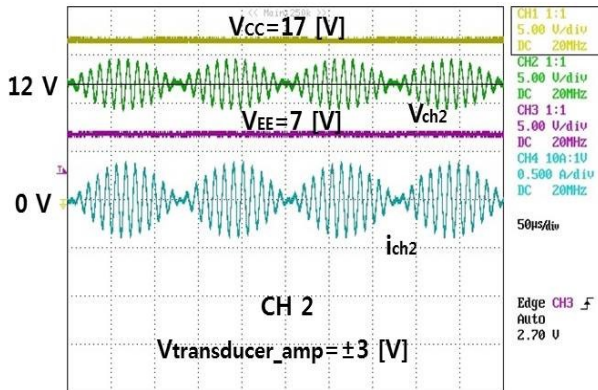


그림 12 전력 증폭기의 공급전압  $V_{CC}$ ,  $V_{EE}$ 와 트랜스듀서 채널 2의 출력 파형

Fig. 12 Measured supply voltage  $V_{CC}$ ,  $V_{EE}$  of the power amplifier, and the output waveforms of transducer channel 2

림 11과 12에서 나타나듯이 전력 증폭기는 트랜스듀서에 안정된 전력을 공급하는 것을 알 수 있다. 또한 전력 증폭기의 공급전압  $V_{EE}$ 에 의해 출력 전류  $i_{ch1}$ ,  $i_{ch2}$ 가 0 [A]를 기준으로 교번하므로 전력 증폭기는 에너지 회수 동작을 하는 것을 확인할 수 있다.

그림 13은 DC bias 12 [V]를 기준으로 트랜스듀서의 구동전압 진폭에 따른 전력 증폭기의 소비전력  $P_{IN\_LinearAmplifier}$ 을 나타낸다. 전력 증폭기의 소비전력  $P_{IN\_LinearAmplifier}$ 은 공급전력  $P_{CC}$ 와 회수전력  $|P_{EE}|$ 의 차이 값인  $P_{CC}-|P_{EE}|$ 가 되며, 트랜스듀서의 구동전압 진폭이  $\pm 3$ [V]일 때 전력 증폭기는 약 1.8 [W]의 에너지를 회수하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 제한한 전력 증폭기는 기존의 전력 증폭기에 비해 고효율로 동작하는 것을 확인할 수 있다.

그림 14는 트랜스듀서를 구동하기 위한 전력 증폭기의 입력전력  $P_{IN\_PowerAmplifier}$ 와 스피커(2채널 트랜스듀서)에서 소비되는 전력

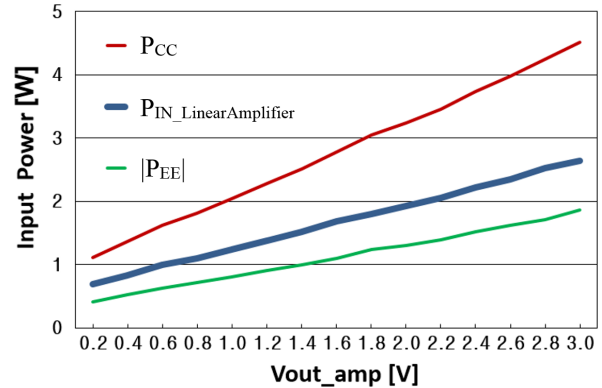


그림 13 트랜스듀서의 구동전압 진폭에 따른 전력 증폭기의 공급전력  $P_{CC}$ , 회수전력  $-P_{EE}$ 와 소비전력  $P_{IN\_LinearAmplifier}(=P_{CC}-|P_{EE}|)$

Fig. 13 Supply powers  $P_{CC}$ ,  $-P_{EE}$  and the net power  $P_{IN\_LinearAmplifier}(=P_{CC}-|P_{EE}|)$  supplied to the power amplifier

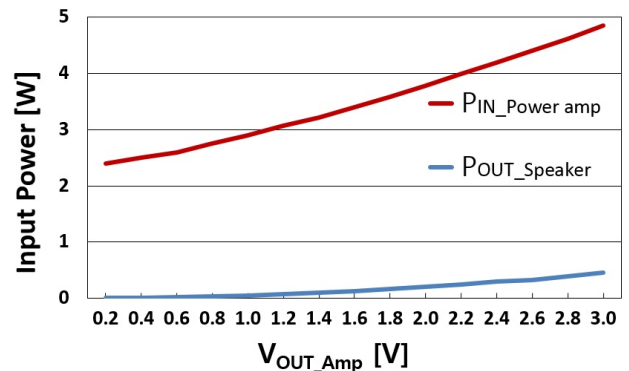


그림 14 트랜스듀서의 구동전압 진폭에 따른 전력 증폭기의 입력 전력과 스피커의 소비전력

Fig. 14 Overall power  $P_{IN\_Power amp}$  supplied to the input terminals of power supply, and the total input power  $P_{out\_speaker}$  to the input terminals of the parametric array transducers(two speakers)

$P_{OUT\_Speaker}$ 을 나타낸다. 트랜스듀서의 구동전압 진폭에 따라서 전력 증폭기는 안정적으로 전력을 공급하는 것을 확인할 수 있다.

그림 15는 트랜스듀서의 최대 구동전압 진폭인  $\pm 5$  [V]일 때 공급전압  $V_{CC}$ ,  $V_{EE}$ 와 트랜스듀서의 측정된 출력파형이다. 트랜스듀서가 정격 출력  $\pm 3$  [V] 이내로 구동될 때는 공급전압  $V_{CC}$ 와  $V_{EE}$ 의 전위차이는 10 [V] ( $V_{CC}=17$  [V],  $V_{EE}=7$  [V])이다. 하지만 그림 15의 구동전압의 진폭이  $\pm 5$  [V]이므로 공급전압  $V_{CC}$ 와  $V_{EE}$ 의 전위 차이는 12.8 [V]보다 커야 한다. 따라서 공급전압  $V_{CC}$ 는 19 [V],  $V_{EE}$ 는 5[V]로 공급하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 트랜스듀서의 출력전압 진폭에 따라서  $V_{CC}$ 와  $V_{EE}$ 를 가변하는 Quasi Envelope Tracking 기능을 이용하여 전력 효율을 높일 수 있다.

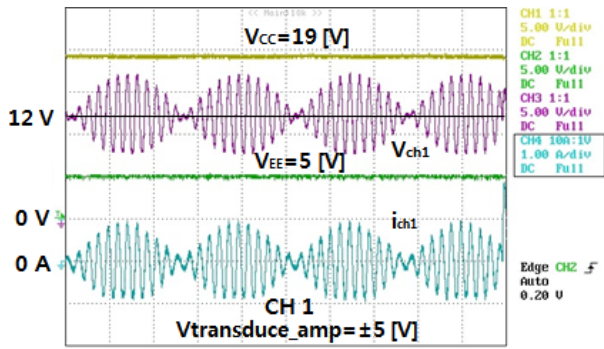


그림 15 트랜스듀서의 구동전압 진폭이 ±5 [V]일 때 트랜스듀서의 측정된 출력 파형

Fig. 15 Measured supply voltage  $V_{CC}$ ,  $V_{EE}$  and output waveform of the transducer, when the output voltage of the amplifier is ±5 [V]

#### 4. 결 론

고 지향성의 스피커 구현에 사용되는 압전 박막형 트랜스듀서는 DC bias 전압을 인가해야 구동되는 특성을 갖는다. 하지만 기존의 전력 증폭기는 AC를 기반으로 구현되었으므로 사용하기에 적합하지 못하다. 따라서 본 연구에서는 압전 박막형 트랜스듀서를 위한 새로운 고효율 전력 증폭기를 제안한다. 제안한 전력 증폭기는 Push-Pull Class B 타입의 증폭기를 이용하여 높은 선형성의 출력 특성을 보장한다. 또한, DC-DC 컨버터를 이용하여 에너지 회수 기능과 Quasi Envelope Tracking 기능을 수행하므로 높은 효율을 제공한다. 제안한 전력 증폭기는 프로토타입으로 제작하여 실험을 통해 동작 특성을 검증하였다. 본 연구에서 제안한 전력 증폭기는 향후 새로운 스피커 시스템의 설계 및 구현에 활용될 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

This work was supported by Samsung Research Funding Center of Samsung Electronics under Project Number SRFC-IT1401-11.

#### References

[1] J. Y. Guigne, N. Rukavina, P. H. Hunt, J. S. Ford, "An acoustic parametric array for measuring the thickness and stratigraphy of contaminated sediments", journal of great lakes research, 17(1), 120-131, 1991.

[2] S.-J. Park, S.-H. Park, S.-K. Kim, and C.-H. Kim, "Underwater Communication and Oceanic Sensor Network Technology," Communications of KIISE, pp. 79-88, July 2010.

[3] Yub Je, Haksue Lee, Wonkyu Moon, Wonho Kim, Cheeyoung Joh, "The optimal design method for parametric array sonar system," 23th Underwater Acoustics Symposium Proceedings, pp. 107-112, 2008.

[4] Selfridge, A., Lewin, P.A., "Wideband spherically focused PVDF acoustic sources for calibration of ultrasound hydrophone probes", Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on, Vol 47(6), pp1372-1376, 2000

[5] Lee, H., Kang, D., Moon, W., "A micro-machined source transducer for a parametric array in air", J. Acoust. Soc. Am., 125(4), pp1879-1893, 2009.

[6] Robert F. Coughlin, "Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuits," Prentice Hall, 6th Edition.

[7] Miguel Rodriguez, Pablo Fernandez-Miaja, Alberto Rodriguez, and Javier Sebastian, "A Multiple-Input Digitally Controlled Buck Converter for Envelope Tracking Applications in Radio frequency Power Amplifiers," IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 25, No. 2, pp. 369-381, Feb. 2010.

[8] D. Diaz, M. Vasic, O. Garcia, J.A. Oliver, P. Alou, R. Prieto, and J.A. Cobos, "Three-level Cell Topology for a Multilevel Power Supply to Achieve High Efficiency Envelope Amplifier," IEEE Trans. on Circuits and Systems, Vol. 59, No. 8, pp. 1-14, April 2012.

[9] M. Vasic, O. Garcia, J.A. Oliver, P. Alou, D. Diaz, and J.A. Cobos, "Multilevel Power Supply for High-Efficiency RF Amplifiers," IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 25, No. 4, pp. 1078-1089, April 2010.

[10] In-Dong Kim and Eui-Cheol Nho, "Module-Type Switching Rectifier for Cathodic Protection of Underground and Maritime Metallic Structures," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 52, No. 1, pp. 181-189, Feb. 2005.

[11] In-Dong Kim and Eui-Cheol Nho, Heung-Geun Kim, and Jong Sun Ko, "A Generalized Undeland Snubber for Flying Capacitor Multilevel Inverter and Converter," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 51, No. 6, pp. 1290-1296, Dec. 2004.

[12] Jinho Bae, and Won-Ho Kim, "Parametric Array Sonar System Based on Maximum Likelihood Detection," Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea, Vol. 48, TC-1, pp. 25-31, Jan. 2011.



**김진영 (Jin-Young Kim)**

2004년 부경대 공대 전기공학과 졸업. 2006년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2014년 부경대 대학원 졸업(공학박사). 2014년~부경대 박사 후 과정.



**김인동 (In-Dong Kim)**

1960년 8월 27일생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 졸업(공학박사). 1991년~1996년 대우중공업 철도차량연구소 책임연구원. 1997년~1998년 미국 Univ. of Tennessee Post Doc.. 2004년~2005년 미국 Virginia Tech 방문교수. 1996년~현재 부경대 전기공학과 교수.  
E-mail: idkim@pknu.ac.kr



**문원규 (Wonkyu Moon)**

1984년 서울대학교 기계공학과 학사, 1986년 한국과학기술원 석사, 1995년 오스틴 주재 텍사스주립대 박사, 1996~1998 삼성종합기술원, 1998년부터 포항공과대학교 기계공학과 교수로 재직중. 관심분야는 전기-기계 결합 현상을 이용한 트랜스듀서로 압전 응용 디바이스 개발 및 연구에 집중. 미세가공기술을 이용한 다양한 트랜스듀서 연구에 참여중임.  
Tel : 054-279-2184  
E-mail : wkmooon@postech.ac.kr