

논문 2017-54-3-16

청력 보정을 위한 고주파 증폭 회로 설계

(Design of High Frequency Boosting Circuits Compensating for Hearing Loss)

이 광*, 정 영 진**

(Kwang Lee[Ⓢ] and Young-Jin Jung)

요 약

본 논문에서는 노인성 난청으로 인한 청력도 감쇄를 보상하는 고주파 증폭 회로를 제안한다. 노인성 난청은 고음역(고주파 대역)의 청력도가 저음역(저주파대역)에 비해 더 떨어지는 저주파 통과 필터의 특성을 보이므로, 보상회로는 임계주파수 이상의 대역에서는 주파수에 비례하여 신호를 증폭하고 임계주파수 이하에서는 증폭도를 일정하게 유지하는 구조이다. 제안된 고주파 회로는 미분기, 단위 이득 증폭기로 구성된다. 임계주파수는 볼륨 조절 레버 형태로 간단하게 제어 가능한 구조로 노인들이 자신의 난청정도에 따라 쉽게 증폭도를 조절할 수 있다. 고주파 증폭회로의 임계주파수는 가청주파수 전 대역에서 연속적으로 조절 가능하고, 10 kHz 음역의 신호는 80dB 이상 증폭도를 가진다.

Abstract

In this paper, we propose a high frequency boosting circuits compensating for age-related hearing loss. The frequency response of this hearing loss is quite similar to that of a low-pass filter of which the critical frequency get lower with age. Therefore the voltage gain of this compensation circuits increase proportionally to the frequency of signals when the frequency is higher than the critical frequency and the voltage is constant irrespective of the frequency of signals when the frequency is lower than the critical frequency. The proposed circuits consist of a differential circuit and a unity gain amplifier. Because the critical frequency of the proposed circuits is controlled simply in the shape of a volume control lever, the aged people can adjust the high frequency boosting level easily according to one's hearing loss level. The critical frequency is continuously controllable in the whole audible frequency band and the gain of this high frequency boosting circuits is above 80dB at 10kHz.

Keywords : hearing aid, high frequency boost, differential circuits

I. 서 론

출산율이 저하되고 평균 수명이 늘어남에 따라 한국 사회는 고령화가 가속화되고 있다. 가족 기능, 노인 부양 의식의 변화 그리고 배우자 사별 등으로 인해 독거 노인세대가 빠르게 증가하고 있다. 시력, 청력, 치아, 활동 능력 등의 신체 기능의 저하로 인해 일상 생활에 많은 제한을 받게 된다. 청각장애는 위험 상황 대처 능력

을 떨어뜨리며, 의사소통 및 정보 전달의 어려움으로 정서적으로 불안정 해질 수 있다^[1].

노인성 난청은 달팽이관(cochlea) 유모세포의 손상으로 인해 유발되는 감각신경성 난청으로 저주파 대역에 비해 고주파 대역의 청력이 더 떨어진다. 저주파 대역은 주로 음성의 크기를 반영하므로 소리는 들을 수 있으나 고주파 대역의 정보를 받아들이지 못해 음성의 의미를 이해하기 어렵게 된다. 청력도는 일반적으로 저대역 통과 필터의 특성을 보이며 노화가 진행됨에 따라 필터의 임계주파수가 낮아지는 것과 유사한 특성을 보인다. 사람에 따라 차이는 있지만 80세 이상이 되면 임계주파수가 1kHz 이하가 되며, 임계주파수 이상에서는 청력 감쇄 기울기가 40dB/dec 이상이 된다^[2]. 따라서 모든 주파수 대역에서 동일하게 음성 신호를 증폭하는 것

* 정희원, 울산과학기술대학교 전기전자공학부
(School of Electricity and Electronics, Ulsan College)

** 정희원, 울산과학기술대학교 전기전자공학부
(School of Electricity and Electronics, Ulsan College)

Ⓢ Corresponding Author(E-mail : klee@uc.ac.kr)

Received ; January 5, 2017 Revised ; February 6, 2017

Accepted ; February 13, 2017

은 노인성 난청 보정 방법으로 적합하지 않고, 특정 주파수 이상에서는 주파수에 비례하는 고주파 증폭이 필요하다.

디지털신호처리 기술의 발달로 현재는 대부분 디지털 방식의 귀속형 보청기가 보편화 되어있으며, 이는 청력도 검사 후 개인 맞춤형으로 주파수 대역을 분할하여 대역별로 난청자의 주파수 특성을 보정하는 것이다^{3)~5)}.

이러한 디지털 보청기는 난청자 개인에게 최적화된 보정 기능을 제공하지만 소형 보청기의 경우 배터리 교체 등 노인이 유지 관리하기가 쉽지 않으며, 난청이 진행 될 경우 재 청력 검사와 그에 맞는 보정을 위해서는 전문 장비와 전문가의 손길이 반드시 필요하므로 유지보수가 까다롭다. 그리고 높은 가격으로 인해 가난한 노인 세대는 이용하기가 쉽지 않다. 아날로그 방식으로도 디지털 방식과 같이 대역을 분할하여 대역별로 주파수를 보정할 수 있으나, 분할된 대역의 수와 복잡도는 상호 대립관계가 있으므로 대역의 수를 많이 할 수 없다. 복잡도를 고려하여 저대역과 고대역의 두 개 대역으로만 분리한 고주파 증폭 보청기 등은 주파수 별로 음성 신호의 감쇄가 뚜렷하게 차이가 나는 노인성 난청 해소에 큰 도움이 되지 못한다.

본 논문에서는 다이얼 방식의 볼륨 조절과 같이 간단한 조작으로 본인의 청력도에 맞게 난청을 보정할 수 있는 아날로그 방식의 고주파 증폭 회로를 제안하였다. 이러한 증폭 회로는 소형 모듈로 제작하여 전화기, 텔레비전 등 여러 오디오 관련 기기에 탑재하여 노인성 난청에 해소를 위해 사용할 수 있다. 특히 전문가의 도움 없이 간단히 조절할 수 있는 보청 모듈이 탑재된 전화기는 가난한 독거 노인에게 다른 지역에 떨어져 생활하는 자녀 또는 지역내 복지 시설과의 원활한 의사소통의 기회를 제공할 수 있다. 그리고 보청기 구매 능력이 있는 노인의 경우도 댁에 혼자 있을 때나 취침 시에는 보청기를 착용하지 않는 경우가 많다. 이런 상태에서 전화가 왔을 때 보청전화기는 유용하게 사용될 수 있다.

현재까지 상품화된 보청전화기는 다음과 같이 크게 두 종류로 분류된다. 첫째는 주파수 별로 증폭하는 기능을 지원하지 않고 단순히 볼륨만 증폭하는 것이다. 노화로 인해 자연적으로 발생하는 난청의 경우 주파수 별 청음 능력이 떨어지므로 단순 볼륨 증폭으로는 소리를 듣고 이해하는데 많은 도움을 줄 수는 없다. 둘째는 골도전화기로 기존의 수화기 스피커 대신 소리를 기계

적 진동으로 변환하여 주는 골도 진동자를 이용하여 기계적 진동으로 변환된 소리가 뼈를 통해 청각신경을 자극함으로써 소리를 듣게 하는 것이다. 따라서 고막이나 이소골에 이상이 있는 전음성 난청자의 경우 감음계 계통(달팽이관, 청각신경)만 정상이면 소리를 들을 수 있다. 골도 청각을 이용할 경우 주변의 잡음을 차단하는 효과가 있어 난청자를 위한 전화통화는 물론 시장, 공사장 등 소음환경에서의 정상인들의 전화 통화에도 유용하다. 하지만, 저대역에 비해 고대역의 청력소실이 뚜렷한 노인성 난청에는 큰 도움을 줄 수 없다. 따라서, 본 논문에서 낮은 비용으로 노인들이 쉽게 조작할 수 있는 고주파 증폭 보정 회로를 제안하였다.

II. 고주파 증폭 회로 설계

1. 고주파 증폭 회로 구조

저주파 대역에 비해 고주파 대역의 청력 감쇄가 심한 노인성 난청은 고주파 대역에서 감쇄량 만큼 증폭시켜 줌으로 보정할 수 있다. 앞 소절에서 언급한 바와 같이 노인성 난청은 노화가 진행될수록 임계주파수가 낮아지는 저역통과필터와 같은 특성을 보인다. 따라서 보상 회로는 임계주파수까지는 평탄한 이득을 가지고 그 이상의 주파수에서는 주파수에 비례하여 증폭도가 증가하는 고주파 증폭 특성을 가져야 한다.

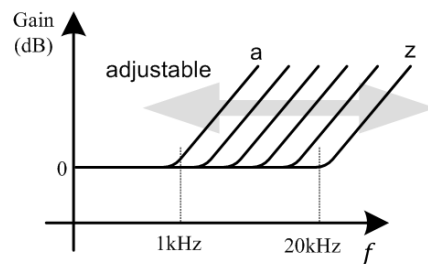


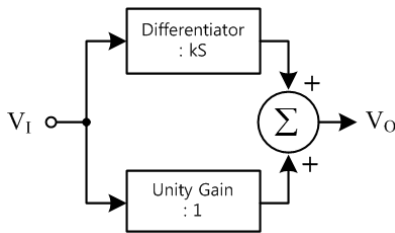
그림 1. 설계하고자 하는 고주파 증폭회로의 주파수 응답
Fig. 1. The frequency response of high frequency boosting circuits.

그림 1은 설계하고자 하는 고주파 증폭기의 주파수 응답 특성을 도식화한 것으로 난청자의 청력도에 따라 임계주파수를 1kHz 이하에서 20kHz 이상의 구간에서 조절할 수 있도록 한다. 난청이 심한 경우는 그림 1의 특성곡선 a와 같이 임계주파수를 낮게 하여 고주파 증폭도를 높이고, 난청이 거의 없을 경우는 특성곡선 z와 같이 임계주파수를 높게 하여 고주파 증폭도를 낮추는 것이다.

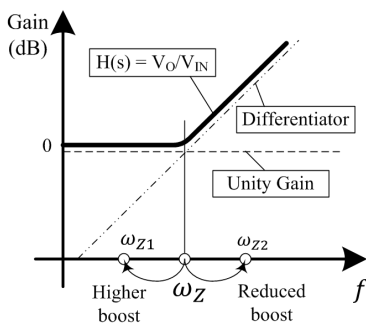
그림 2(a)는 제안된 고주파 증폭회로의 개념을 보여주는 것으로 주파수에 비례하여 증폭도가 증가하는 미분기(differentiator), 모든 가청 주파수 대역에서 증폭도가 동일한 단위이득 증폭기(unity gain amp.)와 가산기로 구성된다. 주파수 영역에서의 입출력 전달함수 $H(s)$ 는 다음과 같다.

$$H(S) = 1 + kS, \quad \omega_z = \frac{1}{k} [\text{rad/s}] \quad (1)$$

식 (1)에서 ω_z 는 고주파 증폭이 시작되는 임계주파수이며, 미분기의 증폭도 k 를 가변하여 조절할 수 있다. 즉, 그림 2(b)와 같이 노인성 난청 정도가 심각할수록 k 값을 증가시켜 ω_z 를 낮게 하여 고주파 증폭도를 높이고, 난청 정도가 미비할수록 k 값을 감소시켜 ω_z 를 높게 하므로 고주파 증폭도를 줄이면 된다.



(a) 제안된 고주파 증폭회로 구조도
(a) The block diagram of proposed high frequency boosting circuits



(b) 고주파 증폭회로의 임계주파수
(b) The critical frequency of high frequency boosting circuits

그림 2. 고주파 증폭 회로의 원리
Fig. 2. The principle of high frequency boosting circuits.

제안된 그림 2(a)의 구조는 그림 2(b)에서 보는 바와 같이 단위 이득증폭기와 미분기의 주파수 특성 곡선이 만나는 점의 주파수가 임계주파수(ω_z)가 된다.

임계주파수 이하에서는 단위 이득 증폭기의 증폭도가 우세하므로 주파수에 무관하게 전압이득이 일정하며, 임계주파수 이상에서는 미분기의 증폭도가 우세하므로 증폭도가 주파수에 따라 증가하게 된다.

제안된 방식의 고주파 증폭 구조도는 반도체 공정을 사용한 집적화 회로(integrated circuits) 또는 개별 소자(discrete components)를 사용하여 구현할 수 있다.

집적회로로 설계할 경우 금속산화막 전계 효과 트랜지스터-캐패시터(MOSFET-C), 트랜스컨덕턴스-캐패시터(Gm-C) 등 다양한 집적화 필터의 주파수 조절 방법들을 이용하여 임계주파수 ω_z 를 가변할 수 있다⁶⁻⁷. 본 논문에서는 다음 소절에서 설명하는 바와 같이 개별 소자를 사용하여 설계하였고 임계주파수는 가변저항으로 조절가능하다.

2. 회로 설계

주파수에 비례하여 증폭도가 증가하는 미분기, 모든 주파수 대역에서 증폭도가 일정한 증폭기와 가산기로 구성된 고주파 증폭기의 주요 회로도는 그림 3과 같이 저항, 캐패시터 그리고 연산증폭기로 간단하게 설계할 수 있다.

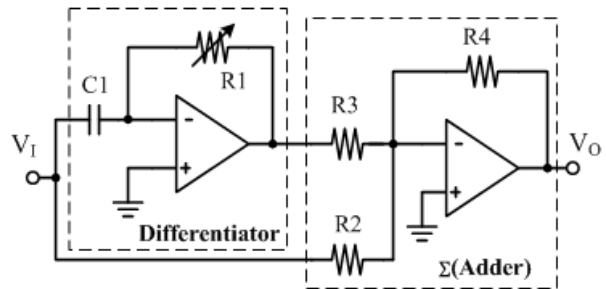


그림 3. 고주파 증폭 주요 회로
Fig. 3. The core circuits of the high frequency boosting.

그림 3의 고주파 증폭 회로의 주파수 영역 입출력 전달함수 $H(s)$ 는 다음과 같다.

$$H(S) = - \left[\frac{R4}{R3} \cdot (-SCR1) + \frac{R4}{R2} \right] \quad (2)$$

$R2, R3$ 그리고 $R4$ 를 동일한 값의 저항으로 하고, $\omega_z = 1/(R1 \cdot C)$ 이라 하면 식 (2)는 다음이 간단하게 된다.

$$H(S) = - \left[1 - \frac{S}{\omega_z} \right] \quad (3)$$

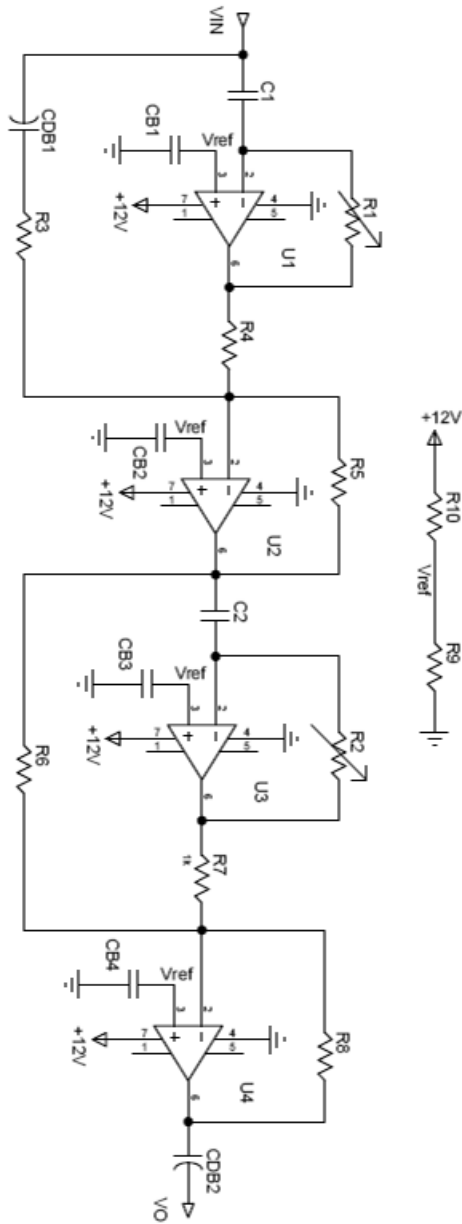


그림 4. 2단 고주파 증폭 회로도
Fig. 4. The 2-stage high frequency boosting circuits.

그림 3의 전달함수인 식 (3)과 식 (1)의 차이점은 일정 이득 증폭기(unity gain)와 미분기 이득의 부호가 다름을 알 수 있다. 하지만 식 (1)과 식 (3)의 주파수 영역에서 크기(magnitude)와 위상 변화 특성은 각각 식 (4), 식 (5)와 같이 동일함을 알 수 있다.

$$\text{Magnitude} : |H(\omega)| = \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_Z}\right)^2} \quad (4)$$

$$\text{Phase} : \angle H(\omega) = \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_Z}\right) \quad (5)$$

최대 40dB/dec의 기울기로 주파수에 따른 고주파 증폭도를 얻기 위해 그림 3의 고주파 증폭회로를 2단으로 직렬 연결하여 전체 회로를 그림 4와 같이 구성하였다.

직류 전원 전압은 +12V를 사용하였고, 모든 연산증폭기는 반전 입력단으로 신호가 인가되는 반전증폭기로 구성하였다. 동일한 저항값을 가지는 저항 R9와 R10으로 전원 전압을 분배하여 각 연산증폭기의 비반전 입력단의 직류 바이어스 전압으로 인가하였다. 따라서 증폭기 내부의 직류 전압은 전원 전압의 중앙인 +6V가 되게 하였으며, CB1~CB4는 잡음을 줄이기 위한 바이패스(bypass) 캐패시터이다. CDB1과 CDB2는 입력 신호원과 출력 부하의 직류 전압이 증폭기 내부에 영향을 주는 것을 방지하기 위한 직류 차단(dc blocking) 캐패시터이다.

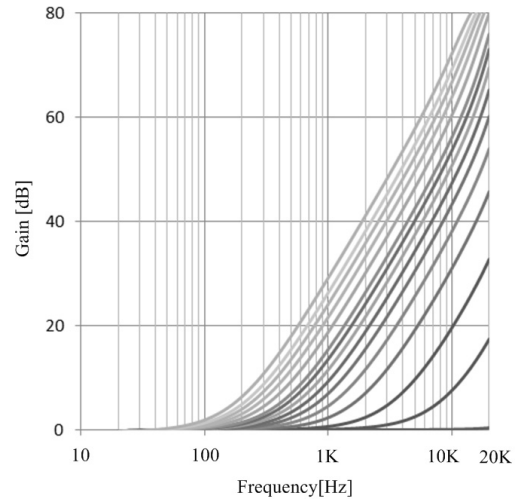


그림 5. 설계된 고주파 증폭회로의 주파수 응답 모의실험 결과

Fig. 5. Simulation results of frequency responses of the designed high frequency boosting circuits.

저주파 응용으로 널리 보급되어 가격이 저렴한 741 계열의 연산증폭기를 사용하여 고주파 증폭 회로를 설계하였다. 741 계열 연산증폭기는 이득-대역폭(GBW : gain-bandwidth product)이 2MHz 이상이므로 20kHz 이하인 가청주파수 대역에서 최대 40dB의 이득을 얻을 수 있다. 따라서 2단으로 설계된 고주파 증폭회로는 10kHz 주파수에서 80dB 까지 이득을 보장됨을 알 수 있다.

설계된 2단 고주파 증폭회로는 프로테우스(Proteus 8.0) 프로그램을 이용하여 모의실험(simulation)을 하였으며, 그림 5는 주파수 응답 특성을 보여주고 있다. 그림 4의 회로는 그림 3의 회로가 2단으로 직렬 연결된

구조 이므로 고주파 증폭이 시작되는 임계주파수가 두 개이며 다음과 같다.

$$\omega_{z1} = \frac{1}{R1 \cdot C1}, \omega_{z2} = \frac{1}{R2 \cdot C2} \quad (6)$$

그림 5는 C1과 C2의 용량을 같은 값으로 고정하고, R1과 R2 값 또한 동일한 값으로 동시에 가변하여 두 개의 임계주파수가 동일한 값으로 조절되는 모의실험 결과로 임계주파수 이상인 대역에서는 주파수가 증가함에 따라 증폭도가 40dB/dec 정도의 기울기로 증가함을 볼 수 있다.

III. 실험

그림 4의 회로를 바탕으로 전원 스위치, 전원 커짐 알람 발광다이오드(LED) 그리고 전원 잡음을 최소화하기 위한 바이패스 캐패시터 등을 추가하여 그림 6과 같이 고주파 증폭 모듈을 제작하였다.

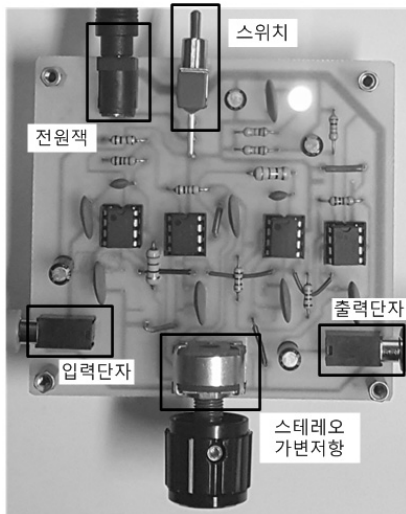
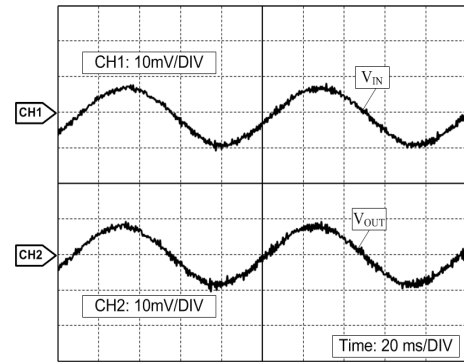


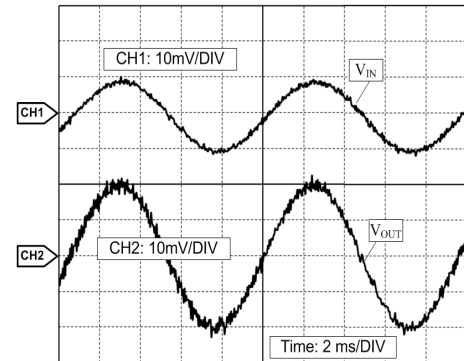
그림 6. 제작된 고주파 증폭회로 모듈
Fig. 6. The fabricated high frequency boosting circuit module.

고주파 증폭 모듈의 전원전압은 전원잭을 통해 어댑터로 공급하고, 입출력 단자는 오디오잭을 사용하였으며, 식 (6)의 두 개의 임계주파수를 동일한 값으로 조절하기 위해 두 개의 저항(R1, R2)을 동시에 가변할 수 있는 스테레오 가변저항을 사용하여 제작하고 실험하였다.

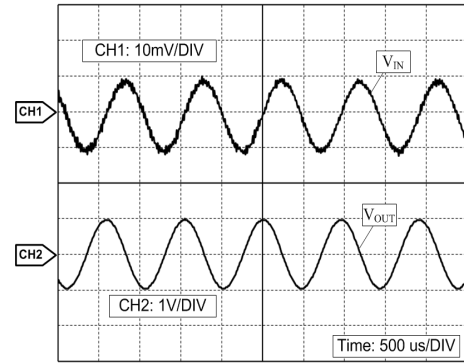
그림 7은 제작된 고주파 증폭회로 모듈의 증폭도가 높은 조건에서 정현파 입력 신호와 출력 신호의 전압 파형을 도식화 한 것이다. 입력 신호 주파수가 10Hz, 100Hz, 1kHz일 때 전압 이득은 각각 0dB, 6dB, 40dB 정



(a) 주파수 : 10Hz
(a) frequency : 10Hz



(b) 주파수 : 100Hz
(b) frequency : 100Hz



(c) 주파수 : 1kHz
(c) frequency : 1kHz

그림 7. 증폭도가 높을 때 입출력 전압 파형
Fig. 7. Input and output voltage waveforms at a high boost condition.

도이며 주파수에 따라 이득이 증가함을 알 수 있다.

고주파 증폭도는 가변저항으로 제어되므로 연속적으로 조절된다. 본 논문에서는 고주파 증폭도가 아주 낮은 경우(Low-Boost), 중간일 경우(Mid-Boost) 그리고 아주 높은 경우(High-Boost) 등 3개의 대표적인 경우에 대해 전압이득의 주파수 특성을 측정하였으며, 그

실험 결과는 그림 7과 같다. 본 실험에서는 고가의 저주파 네트워크 분석기 사용이 용이하지 않아 파형발생기와 오실로스코프를 사용하여 주파수를 가변하면서 측정하였다. 따라서 증폭도가 아주 높은 경우 잡음 및 오실로스코프의 미세 전압 측정 한계로 인해 40dB 이상의 전압이득 측정이 어려우므로 주파수 범위를 1kHz 이하의 범위에서 측정하였으며, 1kHz 이하의 주파수 영역에서는 모의실험결과와 거의 유사함을 알 수 있다.

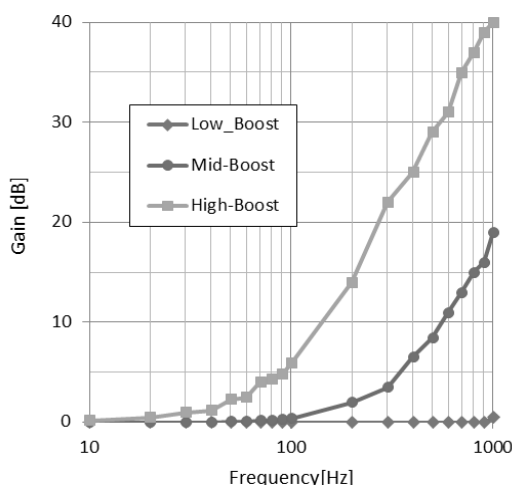


그림 8. 3개의 대표적인 증폭도별 전압이득의 주파수 특성 실험 결과
Fig. 8. Experimental results of frequency responses of voltage gains at three representative gain modes.

IV. 결 론

본 논문에서는 노인성 난청 해소에 도움이 되는 고주파 증폭 회로를 제안하였다. 노화가 진행됨에 따라 임계주파수가 낮아지는 저주파통과필터의 특성과 같이 청력도가 떨어지므로 임계주파수 이상에서는 주파수에 비례하여 증폭도가 증가하며 임계주파수를 조절할 수 회로를 설계하였다. 제안된 고주파 증폭의 구조는 주파수에 비례하는 증폭도를 가지는 미분기와 주파수에 무관하게 일정한 증폭도를 가지는 일정이득(unity gain)-증폭기를 병렬로 연결한 것이다.

제안된 회로는 볼륨 조절 레버 형태로 간단히 자신의 청력도에 맞게 고주파 증폭도를 조절가능 하므로 노인들이 사용하기에 편리하고 낮은 비용으로 노인성 난청 해소를 위한 보청 모듈을 제작할 수 있다. 그리고 표면 실장부품(surface mounted device)을 사용하여 고주파 증폭 보청 모듈을 소형으로 제작 가능하다. 따라서 노인성 난청 해소를 위해 가정용 전화기, 각종 오디오 기

기, 휴대용 보청기 등에 활용이 가능하므로 고령화 사회에서 노인들의 삶의 질을 향상하는데 기여하는 바가 클 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 논문은 2016년 울산과학기술대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행됨.

REFERENCES

- [1] Won-Chul Choi, Je-Hoon Lee, Young-Ju Kim, Kyoung-Rok Cho. "Design of a new digital hearing aid based on a multi-band compensation technique." The Institute of Electronics Engineers of Korea - Computer and Information, pp. 41-54, Jan., 2004.
- [2] Kim, SungHee, et al. "Sex differences in a cross sectional study of age-related hearing loss in Korean." Clinical and experimental otorhinolaryngology, pp. 27-31, 2010.
- [3] KIM, Jin Kyung, "A auditory receiving apparatus with a amplifyingsequence of high frequency band",
- [4] T. B. Deng, "Three-channel variable filter-bank for digital hearing aids," in IET Signal Processing, vol. 4, no. 2, pp. 181-196, April 2010.
- [5] Lee S.-J., KIM S., YOO H.-J.: "A low power digital signal processor with adaptive band activation for digital hearing aid chip". Proc. IEEE ISCAS'07, New Orleans, USA, pp. 2730 - 2733, May 2007.
- [6] Jeon, Yu-Yong, et al. "A Study of Acoustic Masking Effect from Formant Enhancement in Digital Hearing Aid." Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea, SC 45.5, pp. 13-20, 2008.
- [7] Y. P. Tsvividis, "Integrated continuous-time filter design - an overview," in IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 29, no. 3, pp. 166-176, Mar 1994.
- [8] M. S. Oliveira, P. C. de Aguirre, L. C. Severo, A. G. Girardi and A. A. Susin, "A digitally tunable 4th-order Gm-C low-pass filter for multi-standards receivers," Symposium on Integrated Circuits and Systems Design (SBCCI), Belo Horizonte, pp. 1-6, 2016.

— 저 자 소 개 —



이 광(정회원)
 1995년 경북대학교 전자공학과 학사.
 2003년 KAIST 전기 및 전자공학부
 박사.
 2012년 ~ 현재 울산과학기술대학교 전기
 전자공학부 교수
 <주관심분야: 회로설계, 통신, 반도체>



정 영 진(정회원)
 2003년 연세대학교 기계전자공학부
 학사
 2009년 서울대학교 전기컴퓨터공학
 부 박사
 <주관심분야: 광통신, 광신호처리,
 광전소자>