

# DSP를 이용한 전류구동 스피커의 저주파 공진 보상

박종필\* · 은창수

충남대학교

## Compensation of low Frequency Resonance in Current Driven Loudspeakers using DSP

Jong-phil Park\* · Changsoo Eun

Chung-nam National University

E-mail : babyuu@o.cnu.ac.kr / eun@cnu.ac.kr

### 요 약

음향시스템을 구성하는 스피커의 임피던스는 고정된 값으로 인식되고 있다. 그러나 스피커의 임피던스는 입력신호의 주파수 변화에 따라 계속 변화하고 그 변화량은 스피커의 공진 주파수 대역에서 매우 크다. 스피커의 음압 레벨은 스피커를 구성하는 코일에 흐르는 전류에 따라 결정되는데 스피커를 전압 구동 할 경우 변화하는 임피던스에 의해 음압 레벨의 왜곡이 발생한다. 스피커를 전류 구동 할 경우 이러한 문제는 해결되지만 저주파에서 공진의 영향으로 음압 레벨의 왜곡이 발생하는데 이는 음향시스템의 음질 저하를 가져올 수 있다.

본 논문에서는 전류구동 음향시스템의 음질 개선을 위해 DSP(Digital Signal Processing)를 이용하여 음압레벨의 왜곡을 보정하는 공진 보상회로를 제안한다. 본 논문은 스피커의 등가 모델을 이용한 음향시스템의 전류 구동 모의실험을 통해 주파수 변화에 따른 음압 레벨 왜곡을 확인하고 이를 보정하는 회로를 제안하는 것으로 구성하였다. 제안한 회로는 상태변수필터를 이용하여 구성하였고 주파수 및 출력이 조절 가능하여 다양한 음향 시스템에 적용 가능 할 것으로 보인다.

### ABSTRACT

The impedance of the speaker is likely to be recognized as a fixed value. However, speaker impedance continues to vary with frequency variation, especially larger in resonant frequency region. The sound pressure level of loudspeakers is determined by the current flowing throughout the coil that consists loudspeakers. If loudspeakers are driven by voltage, sound pressure level of the loudspeaker is distorted by the variation of loudspeaker impedance. Current-drive of loudspeakers can solve this problem, but distortion of sound pressure level occurs in low frequencies due to resonance. The distortion can degrade the sound quality of the sound system. So to solve this problem, In this paper, we propose a resonance compensation circuit using DSP. we simulates audio systems using an equivalent model of loudspeakers to verify distortion of sound pressure level due to impedance variation and propose a circuit to compensate it. The proposed circuit is configured using a state variable filter and it can adjust the center frequency and output, so it will be used various sound systems.

### 키워드

공진 보상, 전류구동, 스피커 임피던스, 상태변수필터, 디지털 신호처리

---

\* corresponding author

## I. 서 론

최근 코로나 19로 인한 사회적 변화가 늘어감에 따라 화상회의 등의 비대면 활동이 늘고 가상현실이나 증강현실을 이용한 비대면 콘서트 같은 음향 시스템의 품질이 중요한 활동이 생겨나며 음향시스템 중요성이 커지고 있다. 이런 상황에서 더 좋은 품질의 음향을 제공하기 위해 그동안 음향시스템에서 주류로 사용되어 왔던 전압구동 음향 시스템이 아닌 전류구동 음향시스템이 연구되어왔고 이를 통해 사용자에게 양질의 서비스를 제공할 수 있을 것으로 보인다.

본 논문에서는 전류구동 음향시스템에서 공진현상에 의해 발생하는 왜곡 현상을 SigmaDSP를 이용하여 구성된 디지털 필터를 통해 보정하여 음질 향상하는 방안에 대하여 논의 할 것이다. 2 장에는 스피커 등가모델을 이용한 모의실험을 통해 전류구동 시 스피커의 공진에 의해 발생하는 왜곡 현상을 관찰하고 시스템에 미치는 영향을 예측해본다. 3 장에서는 SigmaDSP와 SigmaStudio를 이용해 디지털 회로로 구현한 회로를 제안한다. 4 장에서는 실험을 통해 구성된 회로의 올바른 동작을 하는지 보이고. 5 장에서 결론을 정리한다.

### II. 전류구동 스피커의 저주파 음압왜곡

선행연구에서 스피커 임피던스의 변화를 고려한 스피커의 주파수 응답 변화를 관찰하여 입력 신호의 전압 파형과 동일한 전류를 스피커에 인가하는 전류구동 방식이 스피커의 구동원리에 부합하는 구동방식인 것을 확인하였다[1]. 스피커를 전류구동하면 스피커가 동작하는 주파수 대역에서 전압구동한 경우보다 우수한 특성을 보인다[1]. 다만 저주파 대역에서 공진으로 인해 음압레벨의 왜곡이 발생하는데 모의실험을 통해 이를 확인할 수 있다.

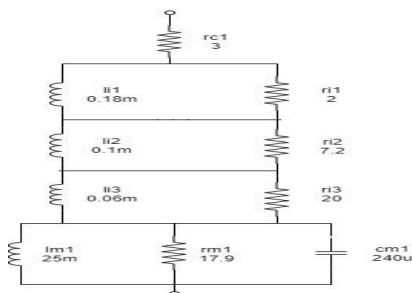


그림 1. Vifa PL11WH0904 스피커의 등가회로

그림 1은 메릴라이넨(E. Meriläinen)이 곡선 맞춤 기법(curve fitting method)을 적용하여 제안한 스피커 등가 모델이다[2].

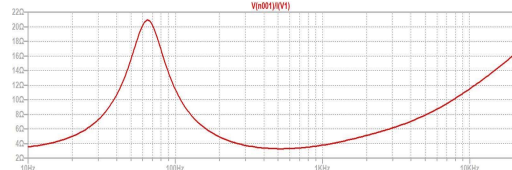


그림 2. 등가모델의 임피던스 곡선 (Vifa PL11WH0904)

그림 2는 그림 1의 스피커 등가모델의 임피던스 변화 곡선이다. 등가모델의 명목상 임피던스는 4Ω 이지만 주파수에 따라 계속 변화하며 공진 주파수 대역에서는 그 변동 매우 큰 것을 알 수 있다.

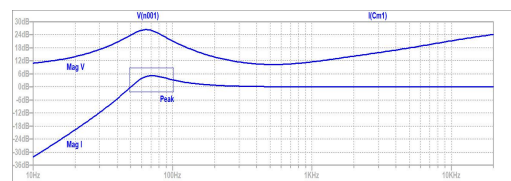


그림 3. 등가모델의 전류구동 모의실험

그림 3은 등가모델을 1A 전류원에 연결한 전류구동 모의실험이다. 일정한 전류를 충실히 공급하기 때문에 주파수, 임피던스가 변화에 관계없이 음성 코일의 전류 주파수 응답은 가청 주파수 대역에서 일정한 모습을 보인다. 이는 음압레벨이 가청주파수 전 대역에서 왜곡없이 평탄한(flat)한 특징을 보이므로 스피커가 왜곡없이 동작할 것으로 예측할 수 있다. 다만 공진 주파수 대역에서만 전류가 마치 산과 같은 모양으로 솟아오르는 현상을 관찰할 수 있고 이로 인해 음압레벨이 왜곡될 것을 예상해 볼 수 있다. 음압레벨은 최대 5~6 dB정도의 왜곡 될 것으로 보이고 SigmaDSP를 이용하여 이를 보상할 것이다.

### III. 공진 보상 방안 제안

모의실험을 통해 확인한 저주파 음압 왜곡현상을 보정하기 위하여 극점 이동 기법(Pole shifting)을 적용한다.

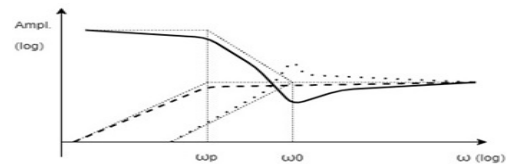


그림 4. 극점 이동 기법

그림 4는 극점 이동 기법의 원리를 설명하고 있다. 실선으로 표현된 주파수 응답 곡선은 점선으로

표현된 저주파 음압 왜곡 현상과 유사한 주파수 응답 곡선을 완전히 감쇄하여 굽은 점선으로 표현된 주파수 응답 곡선과 같이 완전히 평탄화된다.

$$H(s) = \frac{s^2 + \frac{\omega_z}{Q_z}s + \omega_z^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p}s + \omega_p^2} \cdot \frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q_0}s + \omega_0^2} \quad (1)$$

또한 극점 이동 기법은 (1)의 전달함수를 이용한 방법으로 설명할 수 있다. (1)의 전달함수는 스피커 회로와 이를 보상하는 회로를 나타낸 것이다. 보상회로가 없다면 4차 응답을 갖는 회로로 동작할 것을 전달함수를 통해 예측해 볼 수 있다. 하지만 보상회로의 영점의 특성주파수와 Q를 각각  $\omega_z = \omega_0$ ,  $Q_z = Q_0$  로 스피커 회로의 극점의 특성주파수와 Q와 똑같이 정하면 보상회로 전달함수의 분모가 스피커 전달함수의 분자를 소거하여 회로는 2차 응답 특성을 보이며 그림 4의  $\omega_p$ ,  $Q_p$ 를 극점의 새로운 인자로 갖는 주파수 응답을 보이는 스피커 회로가 된다. 극점 이동 기법을 이용한 보상회로 구현에는 다양한 방법이 있다. 이 연구에서는 메릴라이넨(Meriläinen)이 제안한 이중 적분기 구조를 이용하여 2차 주파수 응답을 갖는 회로를 구현하는 방법을 응용하여 구성하였다. 이는 어떠한 제한 없이 피드백(Feedback)을 이용한 방법으로 동시에 고역, 대역, 저역 통과 함수를 생성하는 구조로 이때 생성되는 기본적인 세 응답을 적절한 비율로 더해줌으로써 스피커의 저주파 공진을 보정할 수 있는 2차 주파수 응답을 갖는 전달 함수를 구현할 수 있다[2]. 이중 적분기 구조를 사용하여 보상회로를 구현할 경우 응답을 조절하는 비율을 조절하여 각기 다른 공진 주파수 대역을 가지는 스피커 유닛에 맞는 보정이 가능한 장점이 있다. 이 연구에서는 이러한 장점들을 똑같이 가질 수 있도록 이중적분기 구조와 비슷한 동작을 보이는 상태 변수 필터를 이용하여 회로를 구성하였다.

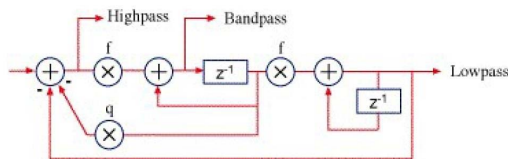


그림 5. 디지털 상태변수 필터

그림 5는 SigmaDSP에서 사용가능한 디지털 상태변수 필터로 z-변환과 State-model을 이용하여 그 동작을 표현하고 있다[3]. 중심주파수 f 와 q를 변화하여 각각 독립적으로 조절 가능한 고역, 대역, 저역 통과 출력을 가지는 필터임을 알 수 있다 [3].

그림 6이 이를 바탕으로 하여 제안하는 회로로, SigmaDSP를 이용하여 SigmaStudio에서 구성하였다. 제안한 회로에서는 이중적분기 구조와 같이 이 출력들을 이득으로 비율을 조절하여 신호 합을 하여 출력을 조절하는 방식으로 설계하였다. 범용 입출력을 통하여 Q와 중심주파수를 조절 가능하여 스피커 유닛의 물리적 공진 특성에 맞춘 보정이 가능하다. 스피커 유닛이 변화에도 입력을 변화시켜 저주파 공진 보상이 가능하다. 또 가중계수를 조절하여 필요 시 조절에 필요한 이득을 변화시킬 수 있는 장점도 가진다.

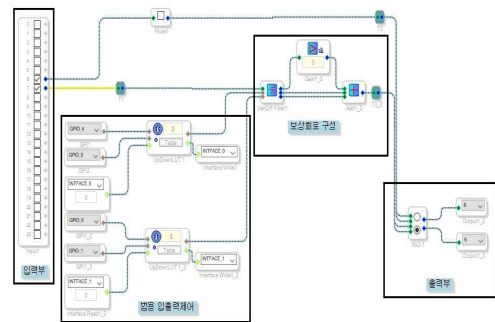


그림 6. 제안한 회로

회로의 동작을 확인하기 위하여 AM-700 Audio Analyzer를 이용하여 주파수 및 Q 변화에 의한 동작 변화를 확인하였다.

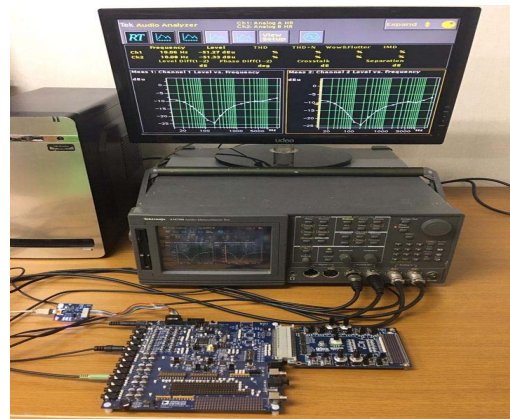


그림 7. 보상회로 동작 실험

그림 7는 동작 실험을 위해 DSP 회로를 이용하여 구성한 실험 환경이다. SigmaDSP의 확장보드를 이용하여 범용 입출력의 값을 조절해 Q를 1, 0.5 범위에서 중심주파수는 100, 150 Hz 범위에서 실험하였다.

#### IV. 결과분석 및 고찰

그림 8 - 그림 11은 제안한 회로를 이용한 동작 실험의 결과이다. AM-700이 주파수 응답을 계측 가능한 지점이 16개로 비교적 적어 회로의 주파수 응답 곡선이 비교적 투박하게 출력되지만 중심주파수와 Q에 변화에도 극점 이동 기법에 사용 가능한 주파수 응답 곡선을 보임을 확인할 수 있다. 또 범용 입출력을 통한 중심 주파수와 Q 변화도 올바르게 동작 하는 것을 확인할 수 있다.

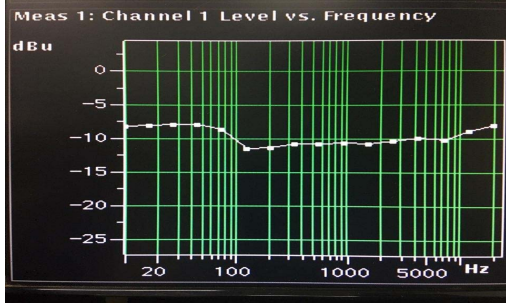


그림 8 회로동작 실험  
(중심주파수 : 100Hz Q=1)

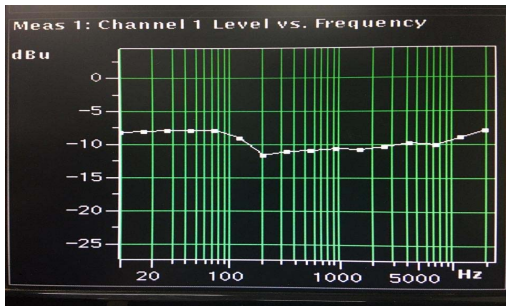


그림 9 회로동작 실험  
(중심주파수 : 150Hz Q=1)



그림 10 회로동작 실험  
(중심주파수 : 100Hz, Q=0.5)

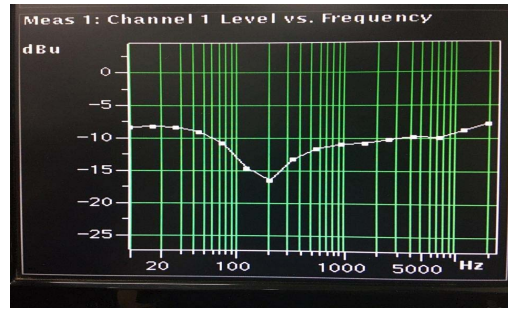


그림 11 회로동작 실험  
(중심주파수 : 100Hz, Q=0.5)

다만 중심 주파수가 Q변화에 따라 10Hz가량 변화 하는 것으로 보인다. 이는 저역의 이득을 변화 시킨 영향으로 예상된다. 하지만 Q를 유지한 채 주파수만을 변화시켰을 때 응답곡선이 그대로 평행이동 한 것으로 보아 실제 사용에 있어 큰 제약으로 작용하지 않을 것으로 보인다. Q가 변화함에 따라 주파수 응답은 약 10dB 까지 변화함을 보았다. 이는 음압레벨 왜곡을 충분히 보정할 수 있을 것으로 예상되며 보상회로가 저역의 출력을 강화하여 스피커 동작영역 확장에도 도움이 될 것으로 보인다.

#### V. 결 론

본 논문에서는 SigmaDSP와 SigmaStudio를 이용하여 전류구동 음향 시스템에서 발생할 수 있는 저주파 공진을 보정하여 음질을 개선할 수 있는 방안을 제안하였다.

모의실험을 통해 전류구동 음향시스템의 저역에서 공진으로 인해 주파수 대역이 크게 증폭되는 왜곡의 발생을 확인하고 보상회로를 통해 보정하였다. 극점 이동 기법을 이중 적분기 구조를 응용하여 상태 변수 필터를 이용하여 구현하였고 중심 주파수나 Q를 조절하여 스피커 유닛의 변화에도 쉽게 공진을 보정할 수 있을 것으로 보인다. 제안한 보상회로는 모의실험에서 예측된 왜곡을 충분히 보정하는 동작이 가능함을 확인하였고 또 저역에서 동작영역 확대에도 이용할 수 있을 것으로 보여 음향 시스템의 구성에 여러 가지 이점을 가져다 줄 것으로 예상된다 하지만 과도한 저역에서 동작영역 확대는 스피커가 감당하지 못할 주파수의 신호를 인가하여 스피커 유닛의 파손을 가져올 수 있으므로 이를 방지할 수 있는 기능을 추가하는 등의 연구가 더 필요할 것으로 생각된다.

## References

- [1] Changsoo Eun, Yu-chil Lee “Comparison of the Driving Modes of an Audio Power Amplifier Considering the Characteristics of th Loudspeaker: Voltage Drive vs. Current Drive”, Journal of Korea Multimedia Society vol. 20, No. 9, pp. 1551-1558, 2017. 9
- [2] E. Meriläinen, Current-Driving of Loudspeakers, CreateSpace Independent Publishing Platform, San bernadino, CA, 2010. 2
- [3] Hank Zumbahlen, State Variable Filters, Mini Tutorial MT-223, Analog Devices.