멀티웨이 스피커 시스템의 효과적인 크로스오버 필터 선택

An Effective Crossover Filter Choice of Multi-Way Loudspeaker System

강성훈[†], 정한교*

(Seong-Hoon Kang[†] and Han-Kyo Jung*)

대전보건대학교 방송콘텐츠과, 음향기술연구소*

(접수일자: 2014년 2월 24일; 수정일자: 2014년 3월 31일; 채택일자: 2014년 4월 7일)

초 록: 스피커 시스템은 가청 주파수 대역 20 ~ 20,000 Hz를 하나의 유닛으로 재생하는 것이 이상적이지만, 물리적으로 구현하기 어렵다. 따라서 두 개 또는 그 이상의 유닛을 사용하고, 멀티웨이 시스템으로 구성하여 오디오 대역을 커버한다. 멀티웨이 스피커 시스템에서는 고음과 저음의 유닛이 정상적으로 동작되도록 크로스오버 네트워크 필터를 필수적으로 사용해야 한다. 네트워크 필터의 크로스오버 주파수는 대부분 1 ~ 4 kHz 대역에 존재하며, 이 대역은 명료도의 기여율이 높고 음질에 미치는 영향이 아주 크다. 그러나 여러 가지 원인 때문에 크로스오버 주파수 대역에서 위상과 진폭 특성이 정확하게 결합되지 않은 경우가 많다. 즉, 유닛 간의 거리 차와 전기적인 특성 차이 때문에 크로스오버 주파수에서 유닛 간의 진폭과 위상 특성이 정확하게 결합되지 않아서 주파수 특성이 불규칙해지고, 그 결과 음질이 좋지 않고 명료성도 나빠진다. 크로스오버 주파수에서 유닛들을 정확하게 결합시키기 위해서는 각 유닛의 진폭 특성뿐만 아니라 위상 특성까지도 고려하여 결합시켜야 한다. 본 논문에서는 유닛 간의 지연 시간을 조정하여 크로스오버 주파수에서 평탄한 주파수 특성이 되도록 하는 방법과 유닛들의 주파수 롤 오프 특성도 고려한 필터 선택 방법을 제안하였다. 그 결과 크로스오버 주파수 대역에서 ± 1 dB의 평탄한 주파수 특성이 얻어지고 명료성도 향상되었다.

핵심용어: 멀티웨이 스피커, 크로스오버 필터, 주파수 특성, 위상 특성, 명료성

ABSTRACT: Although it is ideal that the sound with the range of 20 ~ 20,000 Hz is produced by the loudspeaker system composing of only one loudspeaker unit, it is almost impossible now. Therefore, the audible frequency range is now produced by the loudspeaker system, which is consisted of more than two loudspeaker units. The multi-way loudspeaker system certainly requires a crossover filter, which is divided the audible frequency into low and high frequency ranges. The crossover frequency of filter usually is in the range of 1 ~ 4 kHz, the frequency range can largely affect to the sound articulation and quality. It is an example that the phase and amplitude at the crossover frequency can be different from each other, due to the variously reasons. Conversely, they can not produce the smooth frequency response due to the different distance between the two loudspeaker units and electrical properties. As a result, the sound articulation and quality can be degraded. Therefore, the phase and amplitude response at the crossover frequency has to be deeply considered, in order to exactly match the woofer and tweeter. In this study, it is proposed the methods which are the flat frequency and phase response to be obtained by adjusting of the delay time between loudspeaker units, and the choice of filter to be considered the roll-off properties of each unit. It is achieved the frequency response with ± 1 dB, and the sound articulation is also improved.

Keywords: Multi-way loudspeaker, Crossover filter, Frequency response, Phase response, Clarity

PACS numbers: 43.38.-p

[†]Corresponding author: Seong-Hoon Kang (ksound@hit.ac.kr)
Department of Broadcasting Production, Daejeon Health Sciences
College, 21 Chungjeong-Ro, Dong-Gu, Daejeon 300-711, Republic
of Korea
(Tel: 82-42-670-9422, Fax: 82-42-670-9578)

I. 서론

20~20,000 Hz 오디오 대역을 하나의 스피커 유닛으로 재생하는 것이 가장 이상적이다. 그러나 저음부터 고음까지 하나의 유닛으로 재생하기에는 물리적으로 어려움이 있다. 따라서 저음을 재생하는 저음 스피커, 중음을 재생하는 중음 스피커, 고음을 재생하는 고음 스피커를 조합하여 스피커 시스템을 구성한다. 이렇게 여러 개의 유닛을 조합하여 인클로저에 장착하고, 각 유닛(unit)이 최상의 상태에서 동작하도록 적절한 네트워킹 필터를 사용한다. 그러나 각 스피커 유닛마다 최적의 필터 설계 방법은 없으며, 음질을 직접 청취하고 평가하면서 최적의 크로스오버 필터를 많은 시행착오를 거쳐서 찾아내야 하는 어렵고 번거로운 작업이다.^[1-4]

지금까지 네트워킹 필터 설계는 필터 자체 특성뿐만 아니라 고려하여 설계하였지만, 실제로는 스피커 유닛도 일종의 크로스오버 필터이고, 이 두 필터의 합성 특성으로 시스템의 음색이 결정되므로 유닛의 특성까지도 고려해야 한다.

스피커의 음질을 결정하는 요인은 여러 가지가 있지만, 주파수 특성은 명료성, 자연성 등에 많은 영향을 주므로 평탄한 특성이 바람직하다. 특히, 크로스오버 대역에서의 주파수 특성은 스피커의 음질과 명료성에 가장 많은 영향을 주는 대역이므로 아주 중요하다.^[5]

본 연구에서는 각 유닛의 지연 시간을 조정하여 크로스오버 주파수에서 평탄한 주파수 특성이 되도록 조정하는 방법^[6]과 스피커 유닛 롤 오프의 기울기 특성까지 고려한 방법에 대해서 실험하여 멀티웨이 스피커 시스템의 효과적인 크로스오버 필터 선택에 대해 연구한다.

II. 크로스오버 네트워킹 필터

2.1 크로스오버 필터의 특성

멀티웨이 스피커 시스템은 오디오 주파수 범위를 커버하기 위해서 최소 두 개 이상의 유닛이 필요하다. 가장 간단한 형태로 이러한 필터링은 고주파수 유닛을 위한 고역 통과 필터와 저주파수 유닛을 위

Fig. 1. Crossover frequency band of 2-way speaker system.

한 저역 통과 필터를 구성하고, 이것을 크로스오버 네트워킹이라고 한다.

필터는 일반적으로 3가지의 파라미터로 특성을 나타낸다. 즉, 차단 주파수, 토폴로지 그리고 기울기이다. 차단 주파수는 필터의 응답이 통과 대역 레벨보다 0.707(-3 dB) 또는 0.5배(-6 dB)가 되는 주파수를 나타낸다. 토폴로지는 버터워스 필터(Butterworth filter), L-R 필터(Linkwitz-Reilly filter), 그리고 베셀 필터(Bessel filter)가 있다. 필터의 기울기는 dB/oct로 나타내고, 6, 12, 18, 24 dB/oct의 기울기로 정의한다.^[6]

크로스오버에서 주파수와 위상의 응답 특성은 아주 중요하다. 이웃하는 필터를 크로스오버 주파수에서 정확하게 결합시켜서 전체 특성을 만들므로 크로스오버에서 저음과 고음의 결합 특성은 음질에 미치는 영향이 아주 크다. 크로스오버 주파수 대역에서는 Fig. 1과 같이 2개의 유닛에서 같은 주파수 음이 방사되게 된다. 예를 들면, 저음 유닛에서 1 kHz 음이 방사되지만, 고음 유닛에서도 1 kHz가 방사되게 된다. 이 1 kHz 주파수는 청취 점에서 정확하게 같이 도달하여 마치 하나의 유닛에서 음이 방사되는 것과 같은 상태가 되도록 해야 한다. 이것을 시간 정렬(time alignment)과 위상 정렬(phase alignment)이라고 한다.

그런데 필터의 종류와 차수에 따라서 크로스오버 주파수 대역에서 저음 특성과 고음 특성의 진폭과 위상 특성이 잘 결합되지 않는다. 따라서 크로스오버 대역에서의 진폭과 위상 특성을 정확하게 결합시켜 평탄한 특성을 만드는 것이 중요하다.

Fig. 2(a)에는 크로스오버 주파수 대역에서 중고음

Fig. 2. (a) In phase response between low and high units, (b) Out of phase response between low and high units.

의 주파수 특성과 위상 특성이 잘 결합된 특성을 나타내고, Fig. 2(b)에는 두 유닛의 위상이 180° 차이가 나고, 크로스오버 대역이 상쇄된 특성을 나타낸다.

2.2 크로스오버 주파수 대역이 음질에 미치는 영향

대부분 크로스오버 주파수 대역은 1~4 kHz에 존재한다. 1~4 kHz 주파수 대역은 음악의 명료성을 크게 좌우하고, 귀에 가장 민감한 대역이다. 4 kHz 이상의 고역은 현장감에 기여한다. 그리고 저역은 음의 자연성과 음량감에 중요한 역할을 한다(Table 1).

Fig. 3에는 각 대역별 명료도 기여율을 나타낸다. 125~500 Hz는 전체 에너지의 60%를 차지하고 있지만, 명료성에 대한 기여율은 20%로 아주 낮다. 1~4 kHz는 저역보다 에너지는 적지만 명료성의 기여율은 75%이고, 8 kHz의 에너지는 아주 적고 명료도 기여율은 5%이다.^[7]

이와 같이 네트워크 필터의 크로스오버 주파수 대역의 매칭은 명료도(articulation)의 기여율이 높고, 음질에 미치는 영향이 아주 크다. 따라서 크로스오버 주파수 대역에서 두 필터의 주파수 특성의 합이 평탄하고, 위상이 잘 연결되도록 하는 것이 중요하다.

Table 1. Tonal characteristics for each band.

band	frequency	timbre	notes
low	20 ~ 100 Hz	naturalness	resonance band
mid	100 ~ 1000 Hz	thickness	fundamentals
high	1 ~ 10 kHz	clarity	sensitive band
upper high	10 ~ 20 kHz	resolution	low energy band

Fig. 3. Sound clarity contribution ratio by frequency band.

III. 멀티웨이 스피커의 유닛 특성을 고려한 필터 선택 방법

멀티웨이 스피커에 장착된 각각의 유닛도 하나의 필터로서 각 유닛마다 재생되는 대역이 다르고, 롤 오프의 기울기가 각각 다르다. 이것은 멀티웨이 스피커 유닛에 사용되는 재료 및 이들의 조합에 따라서 특성이 변한다. 스피커의 구동에 필요한 요소는 크게 코일, 콘, 그리고 자석으로 구성할 수 있다. 스피커 유닛에 신호를 보내면 코일과 자석 사이에서 서로 밀어내는 작용으로 콘을 움직이게 한다. 이러한 작용은 재료에 따라서 탄성 및 제동 그리고 음색에도 차이를 나타낸다. 그러므로 멀티웨이 스피커 유닛의 물리적인 특성이 필터 선택에 영향을 미치게 되고, 이를 개선할 수 있는 방법을 제안한다.

Fig. 4는 실험에 사용한 스피커 유닛의 위상과 주파수 특성을 측정한 결과이다. 저음과 고음 유닛의 재생에서 400 Hz~2 kHz 대역이 중첩되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 고음 유닛에서 발생하는 신호가 저음 유닛에서 발생하는 신호보다 상대적으로 지연되어 도달한다.

고음은 상대적으로 저음에 비해 롤 오프 기울기가 급격하게 나타내고 있으며, 저음은 완만한 롤 오프

기울기를 나타내고 있다. 이러한 스피커 유닛의 특성에 가장 효과적인 기울기를 네트워크 필터를 선택하기 위해 다양한 네트워크 필터의 기울기를 적용하여 실험하였다. 실험한 결과, Fig.4의 스피커 유닛과 비슷한 기울기를 갖는 필터는 저음 유닛은 12 dB/oct와 고음 유닛은 24 dB/oct이었다.

크로스오버 주파수 대역에서 평탄한 주파수 특성이 되도록 스피커 유닛에 네트워크 필터의 기울기를 변경하면서 실험하였다. Fig. 4에서 측정한 스피커 유닛의 특성을 이용하여 저음과 고음의 스피커 유닛의 롤 오프와 비슷한 기울기를 선택하여 진폭 및 위상 특성의 변화를 측정하였다.

저음은 L-R 필터 12 dB/oct의 기울기를 적용하였고, 고음은 24 dB/oct의 기울기를 적용하였다. Fig. 5

와 같이 크로스오버 주파수 대역에서 평탄한 주파수 특성을 나타냈다. 다음에 저음은 L-R 필터 24 dB/oct의 기울기를 적용하였고, 고음은 12 dB/oct의 기울기를 적용하여 측정하였다. Fig. 6과 같이 저음 부분에서 일정하게 시작되었지만, 고음 부분에서는 뒀이 발생되었다. 두 방법으로 측정한 결과를 Fig. 7과 비교한 결과 저음 유닛에 12 dB/oct와 고음 유닛에 24 dB/oct를 적용하는 것이 분석하였다.

다음은 다른 네트워크 필터를 이용하여 스피커의 유닛에 효과적인 필터 선택에 따른 실험 결과를 Figs. 8~10에 나타내었다.

Fig. 8은 버터워스 필터를 사용한 결과로서 평탄한 진폭 특성을 나타내지 않고 있으며, 이는 필터의 특성으로 크로스오버 대역에서 약 3 dB의 피크 특성이

Fig. 4. Phase and frequency responses of the low and high units.

Fig. 5. Response of 2nd order low pass and 4th order high pass L-R filters.

Fig. 6. Response of 4th order low pass and 2nd order high pass L-R filters.

Fig. 7. Response comparison according to slope of L-R filter.

발생되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9는 피크 특성과 함께 고음 유닛과 연결되는 지점에서 땀 현상이 나타난다. Figs. 8과 9를 비교한 데이터를 Fig. 10에 나타냈다. 버터워스 필터는 전체적으로 평탄한 진폭 특성이 나타나고 있지 않다. 스피커 유닛의 특성과 비슷한 기울기를 선택하지 않은 경우에는 크로스오버 주파수 대역에서 상대적인 레벨 차로 인해 주파수 특성이 평탄하지 않은 것을 알 수 있다.

Figs. 11과 12는 베셀 필터를 적용하여 실험한 진폭 및 위상 특성의 결과를 나타내고 있다. Fig. 11의 베셀 필터에 스피커 유닛의 롤 오프의 기울기와 비슷한 필터의 차수를 선택하였을 경우, 평탄한 주파수 특성을 확인할 수 있다. Fig. 12는 스피커 유닛 롤 오프 기울기와 비슷한 필터 기울기를 선택했을 경우와 선택하지 않은 경우에 대한 비교 결과이다. 스피커 유

닛의 롤 오프 특성에 적합한 네트워크 필터의 기울기를 선택할 경우 주파수 특성이 평탄하게 나타나며, 효과적으로 네트워크 필터의 기울기를 선택하지 않은 경우에는 크로스오버 주파수 대역에서 일부 땀

Fig. 10. Response comparison according to slope of Butterworth filter.

Fig. 8. Response of 2nd order low pass and 4th order high pass Butterworth filters.

Fig. 11. Response of 2nd order low pass and 4th order high pass Bessel filters.

Fig. 9. Response of 4th order low pass and 2nd order high pass Butterworth filters.

Fig. 12. Response comparison according to slope of Bessel filter.

Table 2. Level deviations at crossover frequency band for 24 dB/oct and 12 dB/oct filtering.

filter	order	frequency range (500 ~ 2000 Hz)		
		maximum	minimum	deviation
L-R	low 24 dB/oct high 12 dB/oct	57 dB	61 dB	±2 dB
Bessel		57 dB	61 dB	±2 dB
Butterworth		60 dB	63 dB	±2 dB

Table 3. Level deviations at crossover frequency band for low 12 dB/oct and high 24 dB/oct filtering.

filter	order	frequency range (500 ~ 2000 Hz)		
		maximum	minimum	deviation
L-R	low 12 dB/oct high 24 dB/oct	63 dB	61 dB	±1 dB
Bessel		58 dB	60 dB	±1 dB
Butterworth		58 dB	60 dB	±1 dB

현상이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

실험 결과, 스피커 유닛의 롤 오프의 기울기와 비슷한 필터의 기울기를 선택하여 적용하지 않은 경우에는 크로스오버 주파수 대역에서 ±2 dB의 편차가 나타났지만(Table 2), 적용한 경우에는 ±1 dB의 편차를 나타내고 있다(Table 3).

IV. 토의 및 결론

스피커 시스템의 주파수 특성과 위상 특성은 음질에 미치는 영향이 큰 요인이므로, 특히 크로스오버 대역에서의 주파수 특성은 음질과 명료성에 미치는 영향이 아주 크므로 평탄한 특성을 얻는 것이 중요하다.

멀티웨이 스피커 시스템의 크로스오버 필터를 선택할 때, 네트워크 필터의 전기적 특성만을 고려하여 나타난 문제점을 보완하기 위해 스피커 유닛의 롤 오프 특성까지 고려하여 효과적인 필터 선택 방법에 대해서 실험하였다.

제안된 방법의 음향적인 특성을 파악하기 위하여 스피커 유닛의 특성을 측정된 후 측정된 특성을 기준으로 스피커 유닛의 롤 오프 기울기와 비슷한 기울기의 네트워크 필터를 적용하였다. 그리고 각 유닛에 적용된 필터를 서로 교차 적용한 후, 주파수 특성의 변화를 측정하였다. 네트워크 필터에서 기울기

를 선택하고, 각 스피커 유닛의 위상을 조정하여 유닛 간의 위상이 크로스오버 주파수에서 정확히 일치될 수 있도록 하였다.

스피커 시스템의 네트워크 필터에 일반적으로 사용하는 대칭형 크로스오버 필터를 적용하면, 높은 차수의 필터일수록 평탄한 주파수 특성을 나타낸다. 그러나 필터의 차수가 높아질수록 잔음(ringing)이 생기고, 그룹 딜레이가 길어지며, 경제성도 떨어지는 단점이 있다. 스피커 유닛의 롤 오프의 기울기와 비슷한 기울기의 네트워크 필터를 선택할 경우 네트워크 필터의 토폴로지와 관계없이 크로스오버 주파수 대역에서 전체적으로 평탄한 주파수 특성을 나타냈다. 그리고 스피커 유닛의 롤 오프의 기울기를 고려하지 않고 필터의 기울기를 선택한 경우에는 크로스오버 주파수 대역에서 주파수 특성이 상대적으로 나빠진다. 실험 결과, 스피커 유닛의 롤 오프의 기울기와 비슷한 네트워크 필터의 기울기를 선택할 경우 크로스오버 주파수 대역에서 주파수 특성의 편차가 ±1 dB 이내로 얻어졌다.

References

1. W. Marshall Leach, JR., "Electroacoustic system realizations for the linkwitz-riley crossover networks," J. Audio Eng. Soc. **35**, 792-800 (1987).
2. S. H. Linkwitz, "Active crossover networks for noncoincident drivers," J. Audio Eng. Soc. **24**, 2-8 (1976).
3. R. M. Bullock, III, "Loudspeaker-crossover system: an optimal crossover choice," J. Audio Eng. Soc. **30**, 486-495 (1982).
4. C. M. Ballou, *Handbook for Sound Engineers* (Focal Press, Indiana, 2008) pp. 460-466.
5. S. H. Kang, *Loudspeaker System* (in Korean, SoundMedia, Goyang, 2012), pp. 144-150.
6. H. K. Jung and S. H. Kang, "A phase matching method for multi-way loudspeaker" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. Suppl.1(s) **32**, 187-190 (2013).
7. S. H. Kang, *Fundamental of Sound Engineering* (in Korean, SoundMedia, Goyang, 2012), pp. 83-84.

저자 약력

▶ 강 성 훈(Seong-Hoon Kang)

1981년: 광운대학교 전자공학과 학사
 1983년: 연세대학교 대학원 전자공학과
 공학석사
 1987년: 고베대학교 대학원 전자공학과
 공학박사
 1988년 ~ 1996년: 한국전자통신연구원
 음향연구실장
 1996년 ~ 현재: 대전보건대학교 방송콘텐츠
 초과 교수, 음향기술연구소장
 <주요 연구 분야> 전기음향시스템 설계
 및 튜닝, 음향 측정 및 평가, 건축음향

▶ 정 한 교(Han-Kyo Jung)

2012년: 한밭대학교 전자공학과 학사
 2014년: 충남대학교 대학원 전자전파정
 보통신공학과 공학석사
 2012년 ~ 현재: 음향기술연구소 연구원