한국음향학회지 제31권 제8호 pp. 507~513 (2012)
The Journal of the Acoustical Society of Korea Vol.31, No.8 (2012)
http://dx.doi.org/10.7776/ASK.2012.31.8.507

pISSN : 1225-4428
eISSN : 2287-3775

룸 튜닝에 의한 실내 공진의 최소화

On the Minimization of Room Resonance by Room Tuning

강성훈†

(Seong-Hoon Kang†)

대전보건대학교 방송제작과

(접수일자: 2012년 8월 6일; 수정일자: 2012년 9월 19일; 채택일자: 2012년 9월 22일)

초 록: 스피커를 실내에서 재생하면 공진에 의해서 저역에 피크와 딥이 생겨서 좋은 저음을 재생하기 어렵다. 이러한 공진을 줄이기 위해서 어느 특정 지점에서 전기적으로 이퀄라이징을 하지만, 이는 그 지점에서만 유효하다. 그리고 이퀄라이징으로 주파수 특성을 평탄하게 조정할 수 있지만, 특정 주파수에서 울림(ringing)은 제거되지 않는다. 다른 방법은 실내 공진이 여기되지 않은 지점에 스피커를 설치하는 것이다. 그러나 현실적으로 실내에서는 여러 가지 제약 때문에 원하는 지점에 스피커를 실제로 설치하기가 어렵다. 따라서 실내 공진에 의한 저주파수의 문제를 해결하기 위한 이상적인 방법은 베이스 트랩을 사용하는 것이다. 본 논문에서는 이퀄라이징에 의한 룸 튜닝과 스피커를 설치하는 위치의 최적화를 논의하고, 공진 모드에 의한 저주파수의 문제는 베이스 트랩을 실내에 설치하여 해결하는 것이 최상의 방법이라는 것을 제시하였다.

핵심용어: 실내 공진, 음향 시스템의 이퀄라이제이션, 룸 튜닝, 베이스 트랩
투고분야: 전기음향 분야(3)

ABSTRACT: The room modes were showed as the peaks and dips on the low frequency response of the loudspeaker, and were one of the biggest obstacles to reproduce the sound. In order to reduce the occurrence of resonance, equalizing is performed at one position, and the frequency response to be equalized is valid only at that position. Performing the equalization would improve the flatness of the frequency response a little, but it cannot eliminate the ringing. Another method is that it is located the speaker at the specific position where the room resonances were not frequently happened. However, there may be the practical limitation that you may not be able to install the speaker at the position to be wanted. One of the practical solutions to decrease the production of resonance in room is the use of bass trap. In this paper, the practical limit for the room tuning using an equalizer and the room optimization will be discussed. The use of bass traps to solve the resonance problem that is always happened in the room is also proposed.

Key words: Room resonance, Equalization of sound system, Room tuning, Bass trap
ASK subject classification: Electro-Acoustics (3)

I. 서 론

실내에서 스피커를 사용하여 소리를 재생하면, 공진 현상으로 저역의 전송 주파수 특성에 피크와 딥이 생긴다. 이러한 음향 왜곡이 재생 음색에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 이퀄라이저로 전송 주파수 특성에 나타난 피크를 커트하거나 딥을 부스트하여 평탄한 특성으로 보정하는 룸 튜닝(room tuning)을 한다. 그러나 실내의 위치에 따라서 공진 모드가 다르게 나타나므로 모든 위치에서는 룸 튜닝의 효과가 나타나는 것은 아니다.[1,2]

또한 전송 주파수 특성의 피크를 커트하여도, 이 주파수에서의 울림(ringing) 현상은 없어지지 않는다. ringing은 특정한 주파수를 갖는 소리가 오랫동안 지속되는 현상으로서 저음이 힘이 없고 둔탁하게 들리는 결과를 초래한다. 그리고 정재파의 노드(node) 부분에 스피커를 설치하면 그 모드의 공진 주파수는

†**Corresponding author:** Seong-Hoon Kang (ksound@hit.ac.kr)
Department of Broadcasting Production, Daejeon Health Sciences College, 21 Chungjeongro Donggu, Daejon, 300-711, Republic of Korea
(Tel: 82-42-670-9422, Fax: 82-42-670-9578)

활성화되지 않지만, 실제 환경에서는 스피커를 설치하는데 한계점이 있다. 따라서 전반적으로 정재파를 최소화시킬 수 있는 음향적인 룸 튜닝이 필요하다.[2]

본 논문에서는 정재파가 스피커 재생음의 음질에 미치는 영향과 정재파의 발생을 최소화할 수 있는 룸 튜닝 방법에 대해 고찰하고자 한다.

II. 정재파

2.1 정재파 이론

실내에서 음파가 벽 사이에서 반사되면서 입사파와 반사파 사이의 간섭에 의해 음압이 증가되기도 하고 상쇄되기도 한다. 이 증가 감쇠 간섭(constructive/destructive interference)은 벽면 간의 거리에 의해 결정되는 주파수에서 공진이 발생되기 때문이다. 즉, 평행한 두 벽면 사이에서 소리의 반사가 반복될 때에 벽면의 거리에 따라 어떤 주파수에서 입사파와 반사파의 피크(peak)와 딥(dip)이 동위상이면 음압이 증가되고, 피크와 딥이 역 위상이면 그 주파수의 음압은 상쇄된다. 이와 같은 파는 소리가 발생되는 동안에 파의 위치가 바뀌지 않고 마치 한군데에 파가 머물러 있는 것처럼 보이므로 정재파(standing wave)라고 한다. 직방체 형태의 실내 공진 주파수를 구하는 공식은 식(1)과 같다.[3]

$$f = \frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{p}{L}\right)^2 + \left(\frac{q}{W}\right)^2 + \left(\frac{r}{H}\right)^2} \ \text{[Hz]} \qquad (1)$$

여기에서 c는 음속(m/s), L은 실내의 길이(m), W는 폭(m), H는 높이(m)이다. p, q, r은 L, W, H 방향의 모드를 지정하는 0 또는 양의 정수이다. 고유 진동은 축파(axial wave), 접선파(tangential wave), 경사파(oblique wave) 3종류로 분류할 수 있다

식(1)의 공진 주파수는 실내가 완전 직방체이고, 완전 반사인 조건을 가정한 것이다. 실제로 이러한 조건을 가진 실내는 존재하지 않으며, 실내에 여러 가지 가구 등이 배치되므로 식(1)로 계산된 공진 주파수와 실제 공간에서 측정된 공진 주파수가 반드시 일치하는 것은 아니다. 또한 실내에서 스피커의 설치 위치에 따라서도 공진 주파수와 피크와 딥의 크기들이 달라진다.

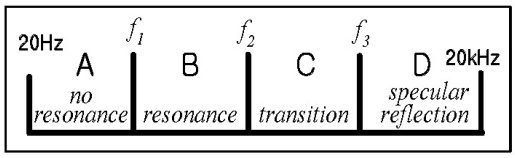

그림 1. 오디오 대역의 구분
Fig. 1. Four regions of audio frequency range.

공진 주파수의 관점에서 오디오 대역은 그림 1과 같이 4개의 대역으로 구분할 수 있다. A영역은 공진이 발생되지 않은 대역이고, f_1~f_2의 B영역은 공진이 발생되는 대역이다. C영역은 천이 영역이고, 천이 영역 이상의 D영역에서는 파장이 짧으므로 벽에 음이 입사되면 빛과 같이 정반사되는 영역이다. D영역에서는 모드 주파수 사이의 간격이 아주 좁으므로 공진에 의한 문제는 없다. 그러나 B와 C영역에서는 모드 주파수 사이의 간격이 넓어서 음질에 영향을 주게 된다. f_1, f_2, f_3는 식(2)로 구한다.[3] 여기서 l(m)은 실내의 가장 긴 변의 길이, V는 체적(m^3), RT60은 잔향 시간(초)을 의미한다.

$$f_1 = 170/l,\ f_2 \approx 1893\sqrt{\frac{RT60}{V}},\ f_3 \approx 4f_2 \qquad (2)$$

2.2 정재파가 음질에 미치는 영향

공진 주파수에서는 음압 레벨이 증가되기도 하고 감소되기도 한다. 예를 들어, 가로, 세로, 높이가 모두 3.2 m인 직방체의 스튜디오에서는 공진 주파수가 53.5 Hz에 집중되어 크게 부스트 된다. 그림 2에는 53.5 Hz의 공진 주파수에서 약 30 dB 정도 부스트된 스피커의 전송 주파수 특성을 측정한 것이다. 따라서 이 특성은 저음이 너무 강조되어 둔탁한 음으로 들리게 된다.[1]

음압 레벨이 증가된 주파수의 음은 감쇠 시간도 길어지고, 그 주파수에 대응되는 음표는 연주를 멈춘 뒤에도 지속된다(ringing). 그림 3은 그림 2의 전송 주파수 특성을 3차원으로 나타낸 것이다. 이 그림에서 공진 주파수의 감쇠 정도가 다른 주파수에 비해 더 느린 것을 알 수 있다. 따라서 특정 저음은 다른 음

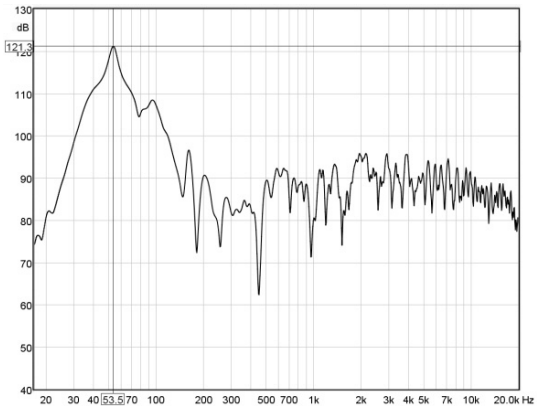

그림 2. 가로, 세로, 높이가 3.2 m인 스튜디오에서의 전송 주파수 특성
Fig. 2. Transmission frequency response in the studio of 3.2 m×3.2 m×3.2 m.

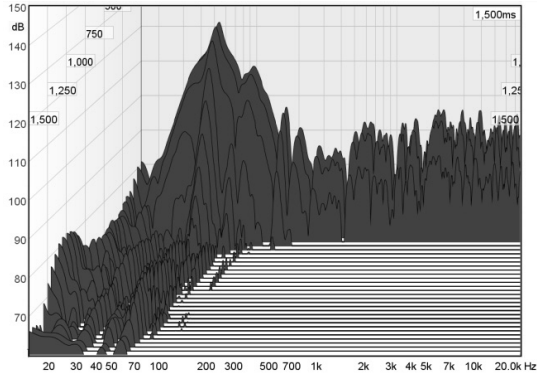

그림 3. 전송 주파수 특성에서 공진 주파수의 ringing
Fig. 3. Ringing of resonance frequency on the transmission frequency response.

에 비해 더 오랫동안 지속된다. 이러한 특성을 갖는 실내의 잔향 시간 주파수 특성에서는 저음의 잔향 시간이 길어지는 것이 특징이다. 이러한 공간에서 음악을 들으면 음색이 둔탁해지고, 공진 주파수의 저음이 중고음을 마스킹하여 음성이나 음악의 중고음이 명료하게 들리지 않게 된다.

이러한 이유 때문에 어느 컨트롤 룸에서 믹싱된 음악을 다른 실내에서 들으면 전혀 다른 음색으로 들린다. 물론 스피커도 동일하지 않아서 음색이 다르게 들리지만, 가장 큰 원인은 실내 공진 주파수 특성이 다르기 때문이다. 특히, 공진 주파수는 저역에 대한 영향이 크므로 고주파보다 저주파 믹싱이 어렵다. 즉, 실내에서 발생되는 공진 주파수 때문에 저음 악기의 음압 레벨과 음색이 실내의 위치에 따라서 달라지게 된다. 또, 특정 지점에서는 저음이 너무 많아서 둔탁하게 들리는데, 이러한 현상을 부밍(booming)이라고 한다. 아무리 좋은 음향 기기를 사용하여도 실내에서 공진이 발생하면 좋은 저음을 재생하기 어렵다.

III. 룸 튜닝 방법에 관한 고찰

3.1 이퀄라이저를 이용한 룸 튜닝

실내에서 공진 모드의 영향을 최소화하기 위하여 스피커의 전송 주파수 특성을 이퀄라이징(frequency domain equalizing) 하는 것을 룸 튜닝(room tuning)이라고 한다. 즉, 룸 튜닝이란 실내 공진에 의해 부스트된 주파수 대역은 커트하고, 딥 주파수는 부스트하여 주파수 특성을 평탄하게 만드는 작업이다. 일반적으로 룸 튜닝은 스펙트럼 분석기로 주파수 특성을 관측하면서 이퀄라이저로 전송 주파수 특성을 보정한다. 대표 청취 지점에 무지향성 마이크를 설치하고, 마이크의 출력을 스펙트럼 분석기로 모니터링하면서 과도한 피크나 딥이 있으면 보정한다.[2]

그림 4에는 이퀄라이징하지 않은 전송 주파수 특성을 나타낸다. 그림 4의 전송 주파수 특성을 이퀄라이징한 주파수 특성을 그림 5에 나타낸다.

이퀄라이저를 이용하여 룸 튜닝을 하는 것은 다음과 같은 문제점과 전기적으로 현실적인 한계를 가지고 있다.[1]

① 마이크를 설치한 지점에서는 전송 주파수 특성이 보정되지만, 다른 지점에서의 특성은 더 나빠질 수도 있다.

실내에서 각 지점의 응답 특성이 다르므로 어느 한 지점에서의 룸 튜닝은 다른 지점에서 효

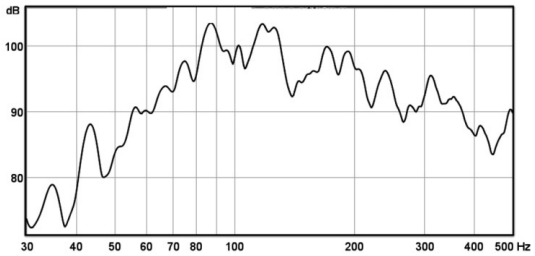

그림 4. 전송 주파수 특성
Fig. 4. Transmission frequency response.

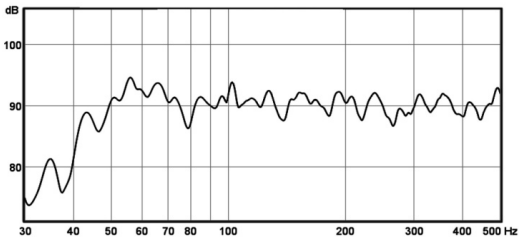

그림 5. 그림 4의 특성을 이퀄라이저로 보정한 전송 주파수 특성
Fig. 5. Transmission frequency response after room tuning of figure 4.

과가 없다. 따라서 룸 튜닝을 자신이 앉아 있는 자리에서만 실시한다면 더 큰 문제가 발생될 수도 있다. 즉, 룸 튜닝한 지점을 조금만 벗어나도 음질 특성이 크게 달라지므로 동일한 실내의 다른 지점이나 다른 실내에서는 전혀 효과가 없다.

② 측정 지점에서의 스펙트럼 특성이 평탄하게 보정되었더라도 보정된 특성은 직접음과 반사음, 그리고 잔향음(평탄하지 않은 특성)이 합성된 음이므로 음색이 좋지 않은 경우도 많다.

③ 음악이나 음성은 임펄스 형태의 음인데 대하여 RTA 보정 시에 사용하는 음원은 핑크 잡음으로서 정적이고 연속적인 신호이므로 실제 음악을 청취할 때와는 다른 특성을 갖는다.

④ 이퀄라이저로 주파수 특성은 보정할 수 있지만, 위상과 시간 특성들은 보정되지 않는다.

3.2 스피커 설치 위치의 최적화에 의한 룸 튜닝

실내에서 정재파의 발생을 최소화하는 다른 방법은 스피커와 청취 위치를 정재파 모드가 최소가 되는 위치에 설치하는 것이며, 이것을 스피커 설치의 최적화라고 한다. 즉, 스피커의 위치를 정재파의 발생이 최소가 되는 위치에 설치하는 것이다. 특히 스피커를 축파 모드의 노드 지점에 설치하면 큰 효과를 기대할 수 있다. 이것은 축파 모드는 다른 모드에 비하여 에너지는 큰 반면에 감쇠가 느려서 음질에 미치는 영향이 크기 때문이다.[3]

만약 1차 공진 주파수의 노드 지점에 스피커를 설치하면, 이 공진 주파수들은 활성화되지 않는다. 즉, 스피커의 설치 위치에 따라서 특정의 공진 주파수가 활성화되기도 하고 비활성화되기도 한다. 따라서 실내에서 스피커의 최적 설치 위치는 공진 주파수의 노드 지점에 설치하는 것이 가장 좋다.[5]

I	P from Length	Q from Width	R from Height
1	16.7	20.7	53.7
2	33.4	41.4	107.4
3	50.0	62.2	161.1
4	66.7	82.9	214.7
5	83.4	103.6	268.4
6	100.1	124.3	322.1
7	116.7	145.1	375.8
8	133.4	165.8	429.5
9	150.1	186.5	483.2
10	166.8	207.2	536.9

그림 6. 10.3 m×8.3 m×3.2 m 실내의 축파 모드의 주파수
Fig. 6. Axial mode frequency for 10.3 m×8.3 m×3.2 m room.

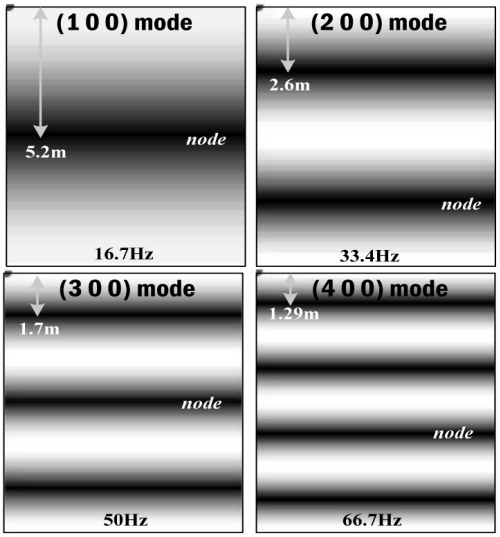

그림 7. 길이 방향의 축파 모드
Fig. 7. Axial mode along the length direction.

그림 6은 가로, 세로, 높이가 10.3 m × 8.3 m × 3.2 m인 강의실의 공진 주파수 중에서 축파 모드의 주파수만을 계산한 것이다. 이 실내에서의 최저 공진 주파수는 16.7 Hz(=170/10.3)가 된다.

그리고 잔향 시간(RT60)이 0.5초이므로 f_2의 주파수는 80.9 Hz가 된다.

$$f_2 \approx 1893\sqrt{\frac{RT60}{V}} = 1893\sqrt{\frac{0.5}{273.6}} = 80.9Hz$$

따라서 공진 주파수 대역은 28~80.9 Hz가 되고, f_3는 323.6 Hz가 된다. 그림 7은 길이 방향으로 구한 축

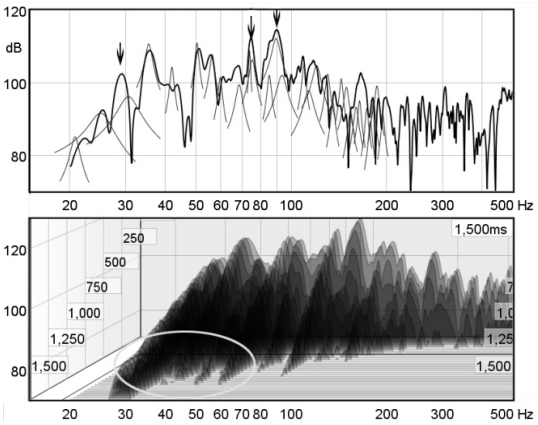

그림 8. 공진 주파수 34 Hz 대역이 활성화된 특성
Fig. 8. Activated response of 34 Hz, the resonance frequency.

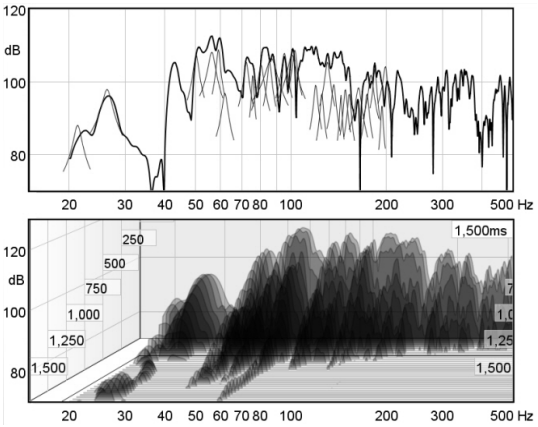

그림 9. 공진 주파수 34 Hz 대역이 비활성화된 특성
Fig. 9. Deactivated response of 34 Hz, the resonance frequency.

파 모드를 나타낸 것으로써 (1, 0, 0)에서 (4, 0, 0) 모드까지를 나타낸다. 길이 방향에 대한 축파 모드의 기본 주파수는 16.7 Hz이고, 2차 주파수(f_2)는 33.4 Hz, 3차 주파수(f_3)는 50 Hz, 4차 주파수(f_4)는 66.7 Hz가 된다. 기본 주파수의 크기가 배음들에 비하여 크기 때문에 기본 주파수를 활성화시키지 않은 것이 중요하지만, 16.7 Hz는 가청 주파수 대역 이하이므로 2차 공진 주파수(f_2)인 33.4 Hz를 활성화시키지 않도록 하는 것이 음질 향상에 큰 도움이 될 수 있다.

그림 8과 그림 9는 길이 방향으로 벽으로부터 1 m와 2.6 m가 되는 지점에 스피커를 설치한 경우들의 각각의 전송 주파수 특성을 나타낸다. 벽에서부터 2.6 m를 떨어뜨려 설치한 경우에는 35 Hz 대역이 활성화되지 않을 뿐만 아니라, 저역에서 ringing도 많이 줄어 든 것을 알 수 있다. 이것은 음질에도 많은 영향을 준다. 그림 7에서 알 수 있듯이 2.6 m 지점에서는 (2, 0, 0) 모드인 33.4 Hz가 활성화되지 않았다. 그리고 75 Hz와 90 Hz도 활성화되지 않은 특성이다. 25 Hz에서는 작은 피크가 관측되고 있지만, 이것은 스피커의 재생 대역 이하이므로 문제가 되지 않는다. 그러나 이 방법은 공간 내에서 스피커를 설치하는 위치에 현실적인 제약이 있는 것이 단점이다.

IV. 음향적인 룸 튜닝 실험

3절에서 기술한 바와 같이 룸 튜닝 방법은 이퀄라이저를 이용한 방법과 축파 모드를 최소화할 수 있도록 스피커를 설치하는 방법이 있다. 이퀄라이저를 이용한 방법은 한 지점에서만 룸 튜닝이 유효하고, 다른 지점에서는 그 효과가 없다. 이때에 피크 주파수를 커트해도 ringing이 없어지지 않아서 여전히 부밍 현상은 남게 된다. 그리고 스피커 설치 위치에 따른 최적화 방법은 실내 공간에서 현실적으로 어려운 경우가 있다. 따라서 이들 방법은 최상의 룸 튜닝 방법은 아니라는 것을 알 수 있다. 4절에서는 이러한 룸 튜닝 방법들의 단점을 보완한 음향적인 룸 튜닝 방법에 대해 기술할 것이다.

저음을 흡음하는 재료를 베이스 트랩(bass trap)이라고 한다. 베이스 트랩은 저음이 합판을 진동시키도록 만들고, 합판의 뒤에 진동을 제어할 수 있도록 흡음재를 부착하여 만든다. 만약 실내를 베이스 트랩으로 처리하면, 저주파수에 의한 잔향이 줄어들므로 음악은 더 명료하게 들린다.[1,6]

본 논문에서는 3절에서 기술한 바와 같이 10.3 m × 8.3 m × 3.2 m 강의실에서 정재파의 발생을 최소화하기 위하여 베이스 트랩을 제작하여 실험하였다. 베이스 트랩을 설치하기 이전의 강의실에 대한 워터폴 특성은 그림 10과 같고, 50~100 Hz 대역에서 ringing이 나타나는 것을 알 수 있다. 이 ringing을 줄이기 위하여 본 베이스 트랩을 제작하였다. 베이스 트랩의 공진 주파수는 식(3)으로부터 구할 수 있다.[3]

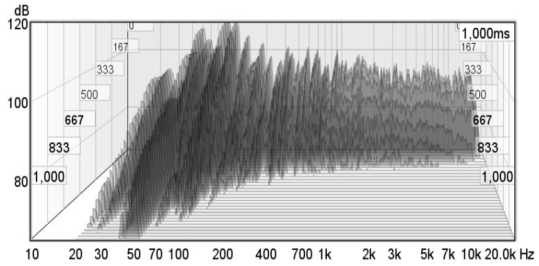

그림 10. 강의실의 워터폴 특성
Fig. 10. The waterfall response measured for the untreated lecture room.

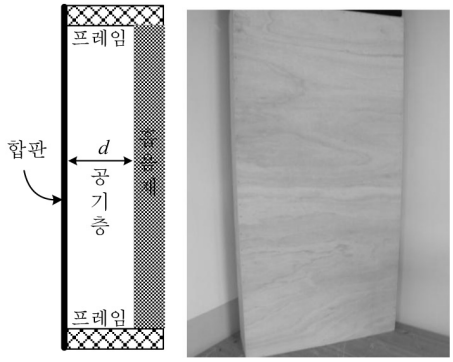

그림 11. 베이스 트랩의 구조
Fig. 11. The structure of bass trap.

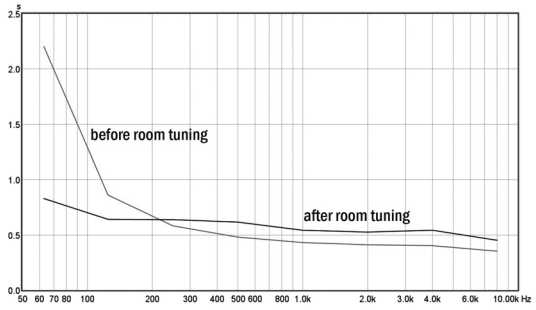

그림 12. 베이스 트랩으로 룸 튜닝 전후의 잔향 시간 비교
Fig. 12. Comparison of reverberation time between before and after the room tuning.

$$f_0 = \frac{600}{\sqrt{md}}[Hz] \tag{3}$$

여기서 m은 합판의 밀도(kg/m^2), d는 공기 층의 두께(cm)이다.

본 실험에서는 두께와 밀도가 9 mm와 5 kg/m^{2}인 합판을 사용하고 공기 층을 20 cm로 만든 베이스 트랩을 제작하였다(그림 11). 공진 주파수를 식(3)으로부터 계산하면 60 Hz가 된다. 그리고 실험적으로 구한 공진 주파수 대역 폭은 50~90 Hz이었다. 이 베이스 트랩을 강의실의 각 구석에 설치한 이후에 측정한 잔향 시간은 63 Hz 대역에서 2.2초에서 0.8초로 감소되었다(그림 12). 그러나 중고음에서 잔향 시간이 약간 증가된 것은 합판의 반사음에 의한 것으로 판단된다. 그림 13에는 베이스 트랩이 설치되기 이전과 이후의 스펙트로그램을 비교하여 나타내고, 베이스 트랩이 설치된 이후에 50~100 Hz 대역에서의 ringing이 감소된 것을 볼 수 있다. 그리고 8지점에서 측정한 워터폴 특성에 대해 분석한 결과를 보면, 모든 지점에서 ringing이 감소된 것을 확인할 수 있었다. 그림 14~15에서는 대표적인 2지점의 특성을 나타낸다.

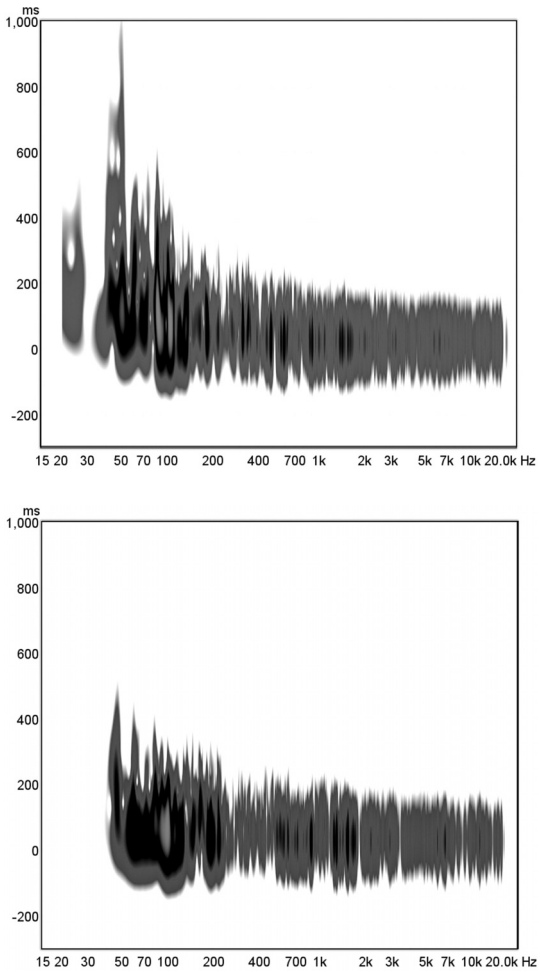

그림 13. 베이스 트랩을 설치하지 않은 경우와 설치한 경우의 스펙토그램
Fig. 13. Comparison of the spectrograms measured for the untreated and treated rooms.

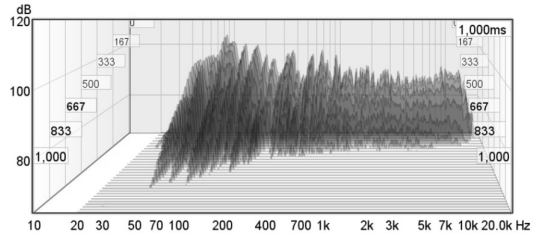

그림 14. 실내 처리한 경우 워터폴 특성(1지점)
Fig. 14. Waterfall of the treated room (1st position).

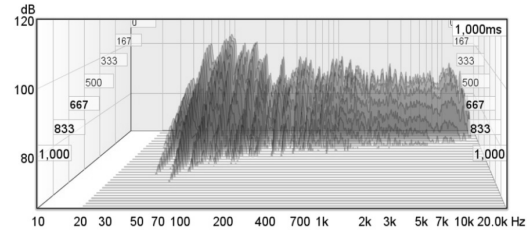

그림 15. 실내 처리한 경우 워터폴 특성(2지점)
Fig. 15. Waterfall of the treated room (2nd position).

V. 결 론

실내에서 스피커를 재생하면 정재파에 의해서 저음의 특성이 불규칙적으로 변하며 ringing 현상도 발생한다. 따라서 음색이 둔탁하게 들리며, 청취 위치마다 전부 다른 음색으로 들리게 된다. 이러한 영향을 주는 정재파를 최소화하기 위하여 룸 튜닝을 하지만, 이퀄라이징하는 방법이나 정재파 모드가 활성화되지 않은 위치에 스피커를 설치하는 방법에는 여러 가지 한계점이 있다.

실내의 정재파를 완벽하게 없앨 수는 없지만, 실내 치수를 적절하게 설계하고 저음의 흡음을 많게 하면 최소화할 수 있다. 그러나 기존의 실내에서는 건축적인 방법으로 정재파를 최소화하기 어려우므로 이퀄라이저를 이용하여 룸 튜닝을 하지만, 베이스 트랩을 설치하여 정재파를 최소화하는 방법이 최상이라고 할 수 있다. 베이스 트랩을 이용한 룸 튜닝은 공진 주파수의 최소화와 ringing의 제거로 실내의 여러 지점에서 명료한 음악을 청취할 수 있다.

참고문헌

1. 강성훈, "이퀄라이저를 이용한 룸 튜닝의 한계," *한국음향학회 춘계학술대회 학술발표회논문집*, 30권, 1(s)호, pp. 185-188, 2011.
2. 강성훈, *음향시스템의 기초*, 사운드미디어, 고양시, 2011. 13장 음향시스템 튜닝과 룸 튜닝.
3. F. A.Everest, *The master handbook of acoustics*, TAB Books, 1994.
4. http://forum.blu-ray.com/subwoofers/48286-guide-subwoofers-part-ii-standing-waves-room-modes.html.
5. 강성훈, *건축음향*, 사운드미디어, 고양시, 2012. 19장 리스닝 룸 음향.
6. 강성훈, "음향적인 룸 튜닝," *한국음향학회 춘계학술대회 학술발표회논문집*, 30권, 1(s)호, pp. 189-192, 2011.

저자 약력

▸ 강 성 훈 (Seong-Hoon Kang)

1981년: 광운대학교 전자공학과 공학사
1983년: 연세대학교 대학원 전자공학과 공학석사
1987년: 고베대학교 대학원 전자공학과 공학박사
1988년 ~ 1996년: 한국전자통신연구원 음향연구실장
1996년 ~ 현재: 대전보건대학교 방송제작과 교수
〈주요 연구 분야〉 전기음향시스템 설계 및 튜닝, 음향 측정 및 평가, 건축음향