1999년도 한국음향학회 학술발표대회 논문집 제18권 제1(s)호

음향 홀로그래피를 이용한 기타의 방사음장 가시화

김영주*, 최정우*, 김양한*

한국과학기술원 기계공학과, 소음 및 진동제어 연구센터*

Visualization of the Sound Radiation from a Guitar Using Acoustic Holography

Young-Ju Kim*, Joung-Woo Choi*, Yang-Han Kim*

Center for Noise and Vibration Control, Department of Mechanical Engineering, KAIST*

요약

기타를 구성하고 있는 요소들, 즉 목, 몸체, 면 그리고 브리지 등이 서로 어떠한 음향학적 관계를 갖고 있고, 그들이 방사 특성에 구체적으로 어떻게 연관되어 있는지를 밝혀보고자 한다. 이를 위하여는, 기타의 전체 특성 및 개별 요소의 특성을 동시에 살펴볼 수 있는 음향 홀로그래피 방법이 가장 설득력이 있다. 본 연구에서는 이 홀로그래피 방법을 이용하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 즉, 고주파 대역의 소리는 주로 판을 통해 방사가 되며 저주파 대역은 구멍과 현의 진동을 통해 주로 방사가 된다.

1. 서론

현악기중 비교적 대중들에게 친숙한 악기인 기타는 여섯 개의 현을 가진 악기로서 커다란 구멍을 가진 앞판과 뒷판으로 이루어진 몸통, 목, 그리고 현과 현의 진동을 몸으로 전달해 주는 브리지로 이루어져 있다. 기타의 음향 방사는 이들의 유기적인 관계에 의해 특징 지워진다. 기타는 크게 클래식 기타, 포크 기타 그리고 일렉트릭 기타로 나뉘는데 본 논문은 이중 클래식 기타를 다루며 이의 음향학적인 특성을 음향 홀로그래피 방법을 이용하여 알아보기로 한다.

2. 실험장치 및 측정방법

기타에 대해 음향 홀로그래피를 하기 위해 기타를 가진하며 마이크로폰 어레이를 홀로그램 면 위로 소인(sweep) 하였다.

기타의 가진은 줄을 직접 가진 하는 방법을 선택하였다. 이는 실제 기타의 소리가 현의 진동에 의한 것과 현에 의해 가진되는 판의 진동에 의한 소리, 그리고 이런 진동에 의해 기타 몸체 내부에 만들어지는 모드에 의해 구멍에서 방사되는 소리 등으로 이루어지기 때문에 실제적인 기타의 소리 방사특성을 보려면 줄을 가진하는 것이 타당하기 때문이다.

기타 자체의 방사 특성에 영향을 주지 않으려면 자유경계조건을 부여하는 것이 바람직하나, 가진시에 기타의 강체 운동이 크면 홀로그램 데이터를 얻는데 문제가 있으므로 상대적으로 음향 방사에 영향이 적을 것으로 기대되는 목 끝부분과 옆판을 고정하되, 완전한 고정조건 대신 끈으로 무향실 내부의 10 곳의 지그(jig)에 연결하여 이로 인한 진동 에너지 손실을 줄이도록 하였다. (그림 1)

기타는 줄에 걸리는 장력의 변화에 따라 동역학적인 거동이 달라지게 되므로 장력을 어떤 기준에 맞출 필요가 있게 되는데 이를 위해 일반적으로 기타를 연주할 때 각 현을 조율하는 방법을 이용해 조율함으로써 각 줄에 장력을 부과하였다. (표 1.을 참고) 각 현의 주파수는 기준 마이크로폰 (B&K Type 4165)으로 측정한 신호를 주파수 분석하여 맞춰 주었다.

마이크로폰 어레이는 15cm 간격으로 13 개(총 1.8m)의 마이크로폰(free field type : PCB 130A)을 가로로 배열하여 만들었으며 상하 방향으로 13 점에 대하여 측정을 수행하였다. 이는 가장 짧은 파장을 가지는 개방현(330Hz)이 가진 하는 음장을 재구성하기 위해선 한 파장 안에 적어도 5~6 개의 측정점을 두어야 실제 음장과 큰 오차없이 음장을 예측할 수 있기 때문이다[1].

어레이의 총 구경 길이(aperture size)는 1.8m 로 196Hz (G_3)의 한 파장을 측정하기에 용이한 값이다. 홀로그램 면은 감쇠파(evanescent wave) 성분을 재구성 할 수 있도록 근접장(near field)에 설정되어야 하므로 측정할 최소 파장 길이의 1/3 이내를 고려하여 0.2m 거리에 위치시켰다.

마이크에서 나온 신호는 32 채널 주파수 분석기(Hp 3566A)를 사용하여 분석하였는데 여기서 주파수 응답함수 및 파워 스펙트럼(Power Spectrum), 그리고 상관 함수 등을 얻었다. 마이크의 신호 보정은 마이크로폰 어레이의 경우 array mic. calibration system (PCB 9080C), 기준 마이크로폰은 250Hz 94dB 를 발생하는 보정기(Pelican calibrator)를 사용하여 보정하였다. 홀로그램면에서의 음압 분포는 기타에서 10cm 떨어진 곳에 설치한 기준 마이크로폰과 20cm 떨어진 곳에 설치한 마이크로폰 어레이 사이의 주파수 응답함수를 이용하여 계산하였다.

기타의 가진은 개방현 중 가장 높은 주파수와 가장 낮은 주파수를 갖는 현을 이용하였으며 홀로그래피는 가진 된 주파수 중 기준 마이크로폰과 마이크로폰 어레이에서 측정된 음압의 상관 함수 값이 0.95 이상이 되는 주파수에서 행하였다.

표 1 기타의 조율 주파수

Frequency(Hz)	
E_2	82.4
A_2	110
D_3	147
G_3	196
B_3	247
E_4	330

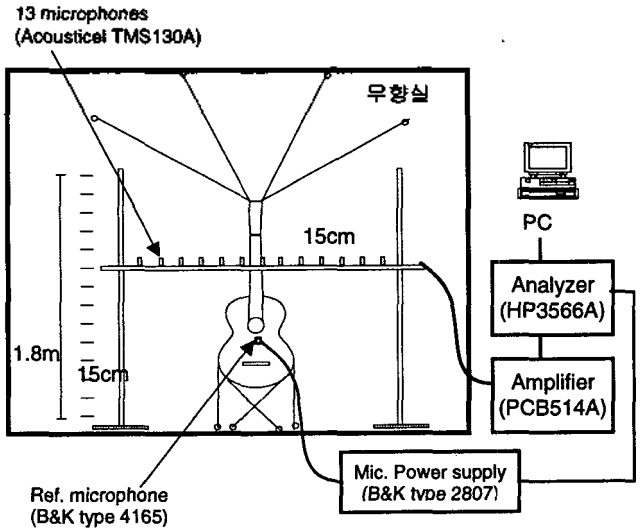


그림 1 기타의 음향 홀로그래피를 위한 실험 장치

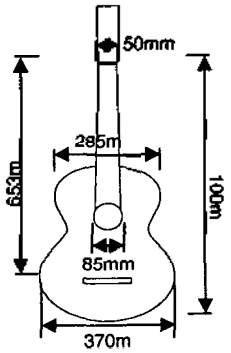


그림 2 클래식 기타 – 삼익 SC101

기타는 82~660Hz 의 낮은 주파수의 음을 방사하는 악기이기 때문에, 마이크로폰 어레이의 구경 크기가 매우 커야 하므로, 앞서 설정한 구경 크기(1.8m)는 기타의 저주파 방사 특성을 고찰하기에는 충분치 않다. 그러나, 무한정 구경 크기를 늘리기에는 무향실의 크기 제한 등 측정상의 제약이 따르게 된다. 만약 구경 크기 바깥의 음압 분포가 구경 안쪽에 비해 상대적으로 매우 작다면 설정된 홀로그램면에서 홀로그래피를 수행하는 것이 무한한 크기의 홀로그램면에서 홀로그래피를 하는 것에 근접된 결과를 줄 것이다. 이를 위해, 두 개의 마이크로폰 쌍을 이용하여 구경 크기 안팎에서 측정한 음압을 비교하는 예비 실험을 수행하였다.

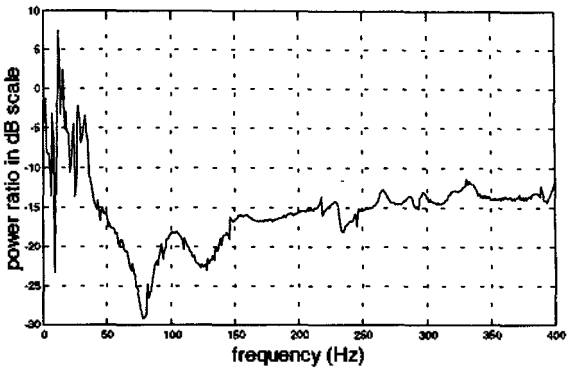


그림 3 구경 길이 안팎의 음향 파워 비

그림 3 은 기타 표면의 중심과 그로부터 구경 길이 경계면인 0.9m 우측, 홀로그램 면으로 가정한 거리 만큼 떨어진 곳에서, 가장 낮은 기본 주파수를 가지는 E_2현을 가진하여 측정한 파워 비를 dB scale 로 나타낸 것이다. 측정 주파수에서 음압이 25dB 이상 차이가 나므로, 구경 외측의 영향을 무시할 수 있다는 것을 확인하고, 둘러싸기 오차(wrap around error)를 줄이기 위하여 제로 패딩(Zero Padding) 방법을 사용하였다.[2]

3. 실험 결과

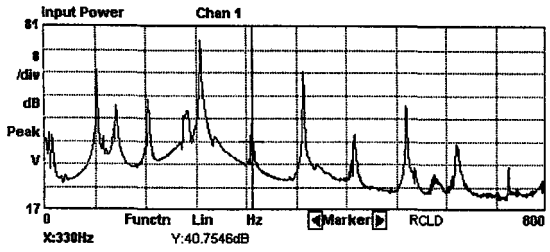
1)파워 스펙트럼 (Power Spectrum)

가시화 실험에 앞서, 줄을 가진 했을 때의 파워 스펙트럼을 기준 마이크로폰을 이용하여 관찰하였다. (그림 4 를 참고하기 바람)

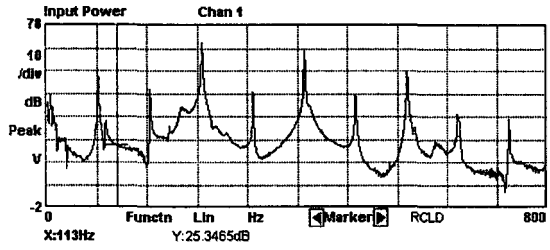
기타의 구멍이 소리의 방사에 미치는 영향을 알아보기 위하여 구멍을 열어 놓은 상태와 막은 상태 두 가지에 대해서 측정 하였다. 구멍은 흡음재(부직포)를 사용하여 막았는데, 이는 기타의 동역학적인 성질은 가능하면 그대로 보존하며 구멍에서 나오는 소리만 막아보고자 했기 때문이다.

그림 4-(a)는 구멍을 개방한 상태로 E_2현(기본 주파수 82.4Hz)을 가진하여 측정한 경우를 나타낸 것이다. 가진한 현의 기본 주파수 외에도 그의 정수배 진동, 그리고 다른 현의 주파수 성분도 작은 크기지만 함께 가진 되고 있음을 알 수 있다.

그림 4-(b)는 부직포로 구멍을 막고 실험한 결과를 보여주고 있다. 113Hz 성분이 관찰되지 않을 정도로 감소한 것을 볼 수가 있다. 전체적인 음압의 크기 변화를 살펴보면, 저주파 부근의 음압은 10dB 이상이 감소한 것을 볼 수 있지만 400Hz 이상에선 크기가 거의 차이가 없는 것을 관찰할 수 있다. 따라서, 구멍에서는 주로 113Hz 를 중심으로 하는 저주파 대역의 소리가 방사되며 고주파 성분은 구멍과는 연관성이 없음을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 4 82.4Hz 개방현 가진시의 파워 스펙트럼
(a)구멍 개방 (b)구멍 차폐

2) 음향 홀로그래피

구멍이 열린 경우

82.4Hz(그림 5)는 구멍과 구멍 바로 위의 왼쪽에서 주로 소리가 방사가 된다. 이는 현의 진동에 의해 나는 소리와 구멍을 통해 방사되는 소리이다.

113Hz(그림 7)는 마치 구멍에 단극(monopole)이 있는 것처럼 구멍을 통해 음을 방사하는 형태를 관찰할 수 있다.

330Hz(그림 8)는 구멍 아래쪽 부분의 판으로부터 소리가 방사되는 형태이며 구멍에서 나오는 소리는 거의 없는 것을 관찰할 수 있다.

411Hz(그림 10)는 그보다 약간 위쪽에서 방향성을 가지고 음이 방사되는 것이 관찰되었다.

구멍이 닫힌 경우

82.4Hz(그림 6)는 구멍에서 나오는 소리는 사라지고 현에 의해서만 소리가 나고 있다. 구멍이 열린 경우보다 음압의 크기가 3 배 정도(linear scale) 작으므로 파워는 대략 10dB 정도가 차이가 난다.

113Hz 는 피크 성분 자체가 사라지므로 전 평면에서 음압이 매우 작아 그 분포가 의미 없으므로 생략하였다.

330Hz(그림 9)는 소리의 방사 모양이 구멍이 열린 경우와 거의 같다. 음압은 구멍이 열린 경우가 1.3 배정도 더 크므로 파워는 약 2dB 정도 차이가 난다. 이는 앞서 실험한 파워 스펙트럼의 결과와 일치하는 것이다.

종합하여 보면, 기타는 저주파 대역에서는 주로 앞판의 구멍을 통해서 나오는 소리와 현의 진동에 의해 소리를 방사하고 고주파 대역에서는 주로 판의 진동에 의해 소리를 방사함을 알 수 있다. 특히 앞판의 구멍은 113Hz 를 중심으로 하는 소리를 주로 방사한다.

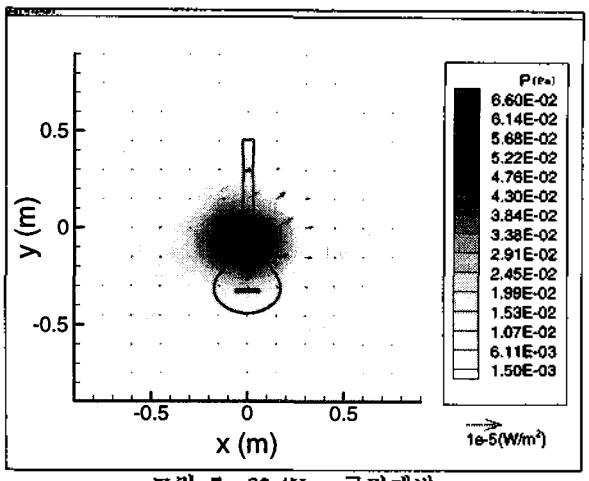


그림 5 82.4Hz 구멍개방
E_2(82.4Hz)현 가진

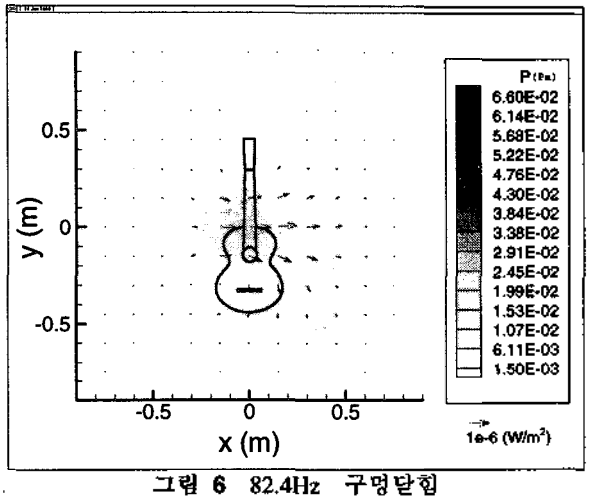


그림 6 82.4Hz 구멍닫힘
E_2(82.4Hz)현 가진

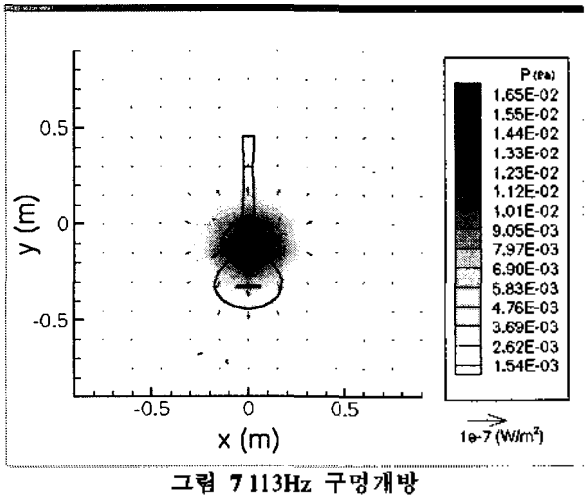


그림 7 113Hz 구멍개방
E_2(82.4Hz)현 가진

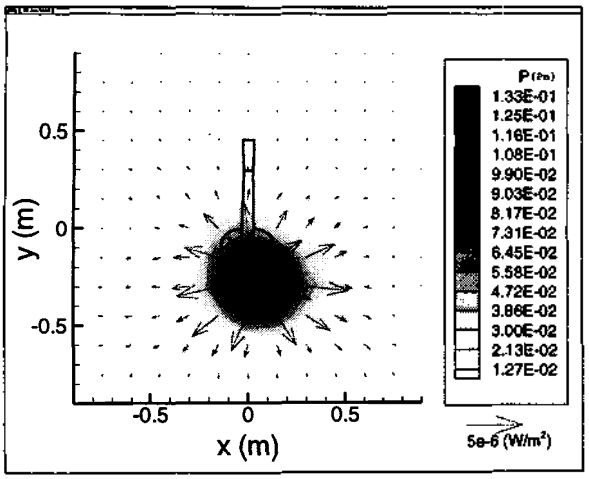


그림 8 330Hz 구멍개방
E_4(330Hz)현 가진

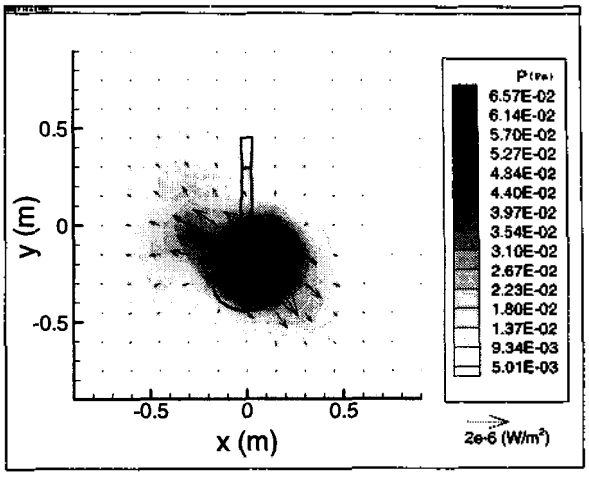


그림 10 411Hz 구멍개방
E_2(82.4Hz)현 가진

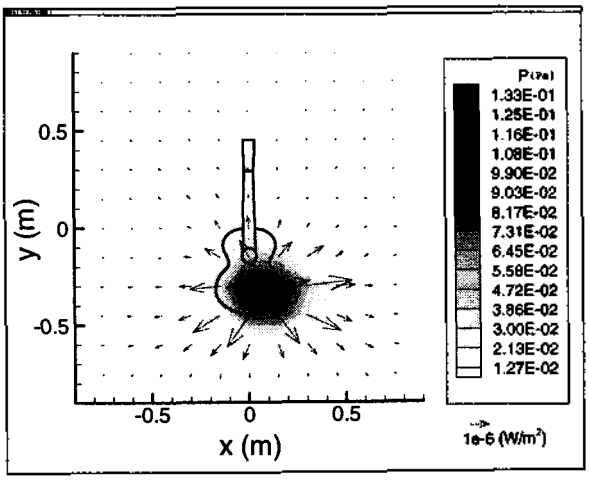


그림 9 330Hz 구멍닫힘
E_4(330Hz)현 가진

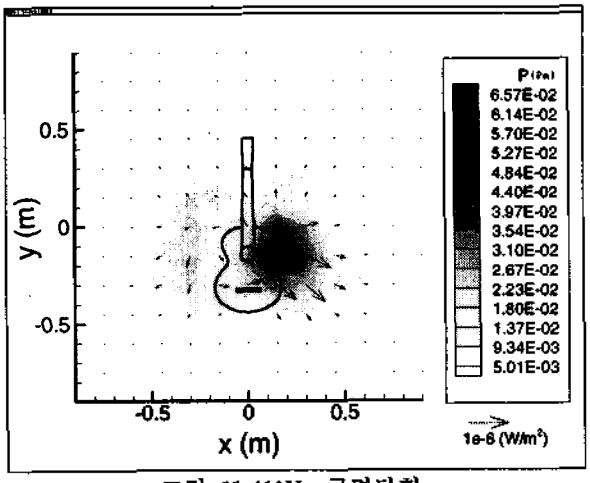


그림 11 411Hz 구멍닫힘
E_2(82.4Hz)현 가진

(Contour plot 의 음압 값은 기준 마이크로폰에서 측정된 음압 평균파 fff 를 곱한 값으로, 그래프 내의 상대적 기준, 혹은 같은 주파수의 두 그래프의 비교는 타당하나, 다른 주파수 간의 비교 기준이 되지 못함에 주의. Active intensity 의 크기도 마찬가지이다. 단, 기준 크기를 명시.)

4. 결론

기타의 음향방사 특성을 알아보기 위해 음향 홀로그래피 방법을 사용하였다. 기타의 소리는 현의 진동에 의한 소리와 기타 앞판의 구멍에서 나오는 소리, 그리고 판의 진동에 의한 소리로 이루어 진다. 이중 현의 진동에 의한 소리와 앞판의 구멍에서 나오는 소리는 주로 저주파 대역의 소리를 방사하였으며 높은 주파수의 소리는 판의 진동에 의해 방사되었다. 특히 앞판의 구멍에서 나오는 소리는 113Hz 를 중심으로 하는 peak 를 만들어 내는데 이는 기타 내부가 헬름홀쯔 공명기처럼 작동하고 있기 때문이라 생각된다. 이에 대해선 좀더 자세한 연구가 필요할 것이다.

기타의 음향 방사 특징을 더 자세히 알아보기 위해선 좀더 많은 주파수에 대해 실험을 해 보는 것과 모드해석 등을 통해 기타의 진동특성을 알아보는 것이 필요할 것으로 생각된다.

5. 참고문헌

[1] 김시문, "음향 홀로그래피에서 파라미터들이 음장 예측에 미치는 영향에 관한 연구", 한국과학기술원 석사학위논문 , 1994

[2] 김양한, 권휴상, "음향 홀로그래피를 이용한 방사 음장의 전방예측 방법에 관한 기본 이론 및 신호처리 방법", 대한기계학회, 제 16 권 9 호, pp. 1661~1662, 1992