

압전 필름을 이용한 초지향성 스피커 기술 연구

이학수, 문원규*

포항공과대학교 기계공학과

Research on the piezoelectric film type parametric loudspeaker.

Haksue Lee, Wonkyu Moon*

Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology

jolary@postech.ac.kr, wkmooon@postech.ac.kr*

요약

파라메트릭 라우드스피커(parametric loudspeaker)는 초음파의 지향성 발생 특성과 발생된 초음파의 비선형 전파 현상을 이용하여 간접적으로 가청음을 발생시키는 기술을 이용한다. 이를 이용하면 소리를 직진 형태로 전파 시킬 수 있기 때문에 원하는 영역에만 음향 신호를 전달할 수 있다. 본 연구에서는 파라메트릭 라우드스피커의 연구 진행 상황을 간략히 살펴보고, 현재 이 분야에서 가장 실용적인 초음파 발생기 방식으로 알려진 압전 필름형 초음파 발생기의 디자인 기술과 이를 적용한 파라메트릭 라우드스피커에 관하여 논한다. 그리고 이러한 스피커 시스템이 실용화되기 위해 해결해야 하는 문제점을 살펴본다.

압전체로 배열형 초음파 발생기를 설계했기 때문에, 높은 제작비용 등의 문제로 상용화하지 못했다.

현재 실용화에 가장 근접했다고 평가 받는 연구 그룹은 미국의 ATC(American Technology Corporation)이다. 이들은 압전 폴리머인 PVDF(Poly-vinylidene fluoride) 필름을 이용하여 낮은 제작 단가로도 쉽게 고출력의 초음파 발생기를 제작할 수 있었다. 이와 함께 VSB(Vestigial-Sideband) AM 방식을 기반으로 신호처리 장치를 설계해 실용화에 다가서고 있다. 본 연구진은 이들이 적용한 압전 필름 방식의 파라메트릭 라우드스피커를 자체적으로 설계 제작하여 특성을 평가하고 이 기술의 문제점 등에 대해 간략히 논한다.

1. 서론

파라메트릭 라우드스피커는 오래전부터 수중 소나(SONAR)에서 적용하고 있는 파라메트릭 어레이(parametric array)를 응용 하고 있다. 1970년대 중반 David T. Blackstock 등에 의해 이 현상이 공기 중에서도 발생한다는 것이 실험적으로 검증된 후, 1980년대 Masahide Yoneyama 등에 의해 초지향성 초음파 스피커로 처음 제안되면서 일본과 미국을 중심으로 이 분야의 연구가 본격적으로 이루어졌다[1, 2]. 하지만 당시에는 고출력의 초음파를 발생시키기 위해 수백에서 수천 개의

2. 파라메트릭 라우드스피커

파라메트릭 라우드스피커의 구동 원리 및 배경 이론은 기존 문헌[2]에 잘 정리되어 있으므로 본 논문에서는 생략한다. 파라메트릭 라우드스피커는 크게 세 가지 요소로 구성된다. 기본적으로 비선형 음향 현상을 이용하기 때문에 고출력의 초음파 발생기와 이를 구동할 고출력의 파워 앰프가 요구된다. 이와 함께 음성 신호를 초음파 대역으로 변조해주는 신호처리장치가 사용된다. 본 논문에서는 이 세 가지 요소 중 초음파 발생기(특히 압전 필름형 초음파 발생기)에 대해 주로 논한다.

3. 초음파 발생기 설계 및 제작

3.1 PVDF 필름형 초음파 발생기 유닛 설계

PVDF 필름은 전압을 가하면 면 방향으로 늘어나거나 수축하게 된다. 이를 이용하여 원형 멤브레인 모드(membrane mode)로 구동되는 초음파 발생기를 제작하기 위해 그림 1과 같은 구조를 설계했다. 필름 자체를 방사면으로 사용하는데, 필름에 초기-스트레스(initial-stress)를 가한 상태에서 원주를 고정단(clamped B.C)을 만든 후 방사면의 앞뒷면에 압력차(P)를 가한다. 이렇게 방사기를 구성하면 전기적 입력 신호에 따라 PVDF 필름이 수축 혹은 팽창하게 되어 멤브레인 모드로 구동시킬 수 있다.

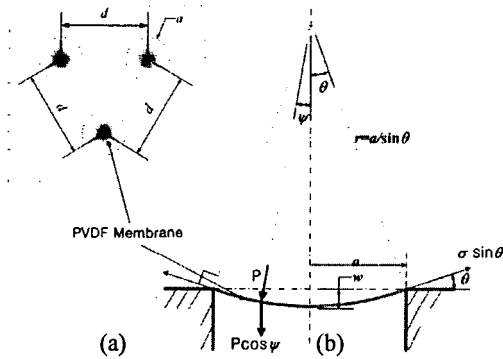


그림 1. (a) PVDF 필름형 초음파 발생기 배열 모델 (평면도), (b) 단순화된 해석 모델 (단면도)

실제 방사기는 구면 멤브레인의 형상을 갖지만, 이의 동적 모델링은 다소 난해하다. 본 논문에서는 멤브레인의 처짐이 작다는 가정 하에 평면의 원형 멤브레인으로 단순화 하였다. 반지름이 a 인 멤브레인의 1차 고유 주파수는 다음과 같다[3].

$$f_{01} = 0.38274 \frac{1}{a} \sqrt{\frac{\tau}{\rho_s}} \quad (1)$$

이때, τ 는 방사방향의 단위 길이당 장력(N/m), ρ_s 는 면밀도(kg/m^2)이다. τ 는 초기-스트레스와 압력차에 의해 형성되는데 이를 변화시켜 고유 주파수를 조절한다.

초기-스트레스가 커서 필름은 멤브레인의 특성이 강하므로, 그림 1(b)에서 처진 곡면은 반지름이 r 인 구면의 한 부분이라 가정했다. 이때 처진 깊이(w)는 필름의 물성과 필름에 가해진 초기-스트레스(σ_i), 압력차(P)에 의해 결정이 된다. 멤브레인에 압력차가 고르게 가해진

고 할 때, 중심의 최대 처짐량 w_{center} 는[4],

$$\frac{1}{w_{center}} = \left[\frac{1}{w_{plate}} + \frac{1}{w_{membrane}} \right]_{r=0} \quad (2)$$

$$= \left[\frac{1}{\frac{Pa^4}{64D} \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^2} + \frac{1}{\frac{Pa^2}{4\sigma_i h} \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]} \right]_{r=0}$$

위 관계는 필름의 판 특성도 함께 고려한 것으로, $D(= Eh^3/12(1-\nu^2))$ 는 굽힘 강성(flexural rigidity)이다. 기하학적으로 $\sin\theta = a/r$ 이고 $\cos\theta = (r-w_{center})/r$ 이므로,

$$a(1-\cos\theta) = w_{center} \sin\theta \quad (3)$$

멤브레인 면에 가해진 압력에 의한 수직방향의 힘과 장력에 의한 원주에서 수직 방향 힘과의 평형 관계에서,

$$\int_0^\theta 2\pi r \sin\phi (P \cos\phi) r d\phi = 2\pi a r \sin\theta \quad (4)$$

식 (4)를 적분하면,

$$\tau = Pa \cos 2\theta / 4 \sin^3 \theta \quad (5)$$

즉, 주어진 상황에서는 식 (4)에서 θ 를 구해 식 (5)에서 단위 길이 당 걸리는 장력을 계산 할 수 있다.

초음파 발생기 설계에서 $a=2mm$ 인 경우, 원하는 공진 주파수가 55kHz 일때 식 (1)에서 $\tau=9911.95N/m$ 가 요구된다. 이를 이용해 식 (5)에서 θ 는 9.72°가 되고 이를 이용해 식 (3)에서 $w_{center}=170\mu m$ 가 된다. 방사판 후면이 완벽한 진공 조건일 때, 압력차 P 는 $1.013 \times 10^5 N/m^2$ 가 되고 식 (2)에서 대략 $\sigma_i=20.35MN/m^2$ 가 요구됨을 알 수 있다. 즉, 이론적으로 20.35MN/m²의 초기-스트레스를 가한 후 방사면을 고정시키고 진공을 잡아주면 원하는 공진 주파수를 확보 할 수 있다. 참고로 사용한 PVDF 필름은 Measurement Specialties사의 T28 μm 필름으로 $E=3GN/m^2$, $\nu=0.4$ 이고, ρ_s 는 전극이 은(silver)인 경우 0.12kg/m²이다. 필름면 전체의 크기는 0.2m \times 0.3m이다.

3.2 구동기 제작 과정

설계한 초음파 발생기의 배열을 쉽게 제작하기 위해 PVDF 필름 전체를 한번에 이용하여 제작하는 방법을 고안했다. 그림 2(a)는 배열형 초음파 발생기의 도면으로 베플(baffle)과 베이스(base)로 이루어 졌다. 베플에는 반지름이 2mm이고 중심간 거리 d 를 8mm을 유지하면서

정육각형 배열 구조로 원형 구멍들을 18x18=324개 뚫었다. 방사면의 면적은 대략 145x125mm으로 일반적인 초음파 방사기(D300mm)보다 작은 편이다.

배플에 저온 에폭시를 얇게 바른 후 장력을 미리 가한 전체 PVDF 필름을 붙였다. 이렇게 만든 배플과 오링(O-ring)을 넣은 베이스를 볼트로 체결하고 펌프를 이용해 진공을 잡아 주어 초음파 발생기를 완성했다. 그림 2.(b)는 PVDF 필름의 각 4면에 미리 장력을 가해 주기위한 장치이다. 이론상 각각의 원형 멤브레인의 방사 방향으로 일정한 장력을 가해야 하지만, 실질적으로 불가능하여 4면에 장력을 가하는 방법을 이용했다. 그림 3.(a)-(d)는 배열형 초음파 발생기를 제작하는 과정을 나타낸 것이고 그림 3.(e)는 완성된 모습이다.

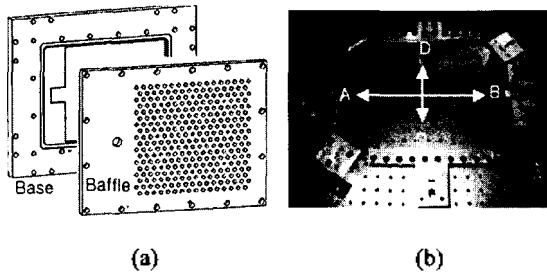


그림 2.(a) 설계한 방사기 배열의 도면, (b) 텐션을 가하는 장치

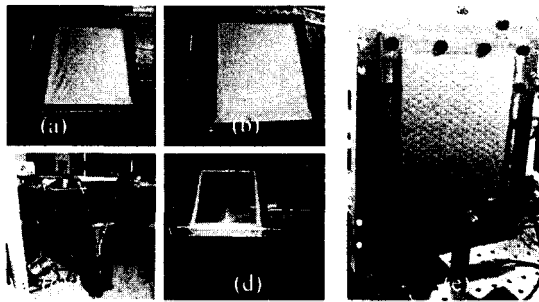


그림 3.(a) A-B 방향으로 당김, (b) C-D 방향으로 당김, (c) 장력을 주기 위해 질량체 이용, (d) 에폭시를 이용한 필름 부착, (e) 완성된 초음파 발생기 (silver 전극)

4. 실험 및 평가

4.1 실험 장치 구성

그림 4.는 파라메트릭 라우드스피커 실험을 위한 구성과 LDV(Polytec)를 이용한 진동 속도 측정을 위한 실험 구성이다. 신호처리는 AM 변조기(Agilent 33120)를

이용했고, 고출력 앰프는 자체 제작하여 이용하였다. 초음파 측정을 위해 마이크로폰은 B&K 4938 을 이용했다. 임피던스 측정은 Agilent 4294A 를 이용했다.

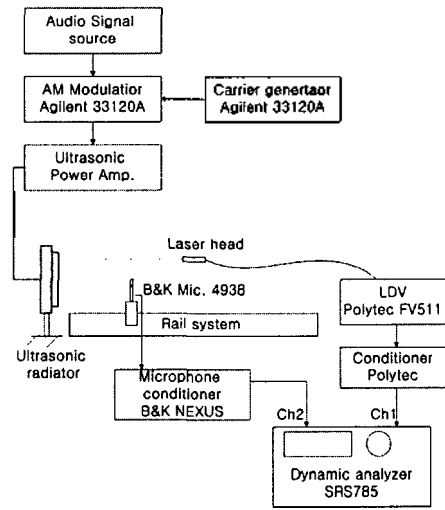


그림 4. 실험 구성도

4.2 초음파 방사기 특성 평가

제작한 초음파 발생기의 특성을 평가하기 위해 주파수에 따른 진동 속도와 출력 음압, 임피던스 등을 측정한 결과를 그림 5.에 나타냈다.

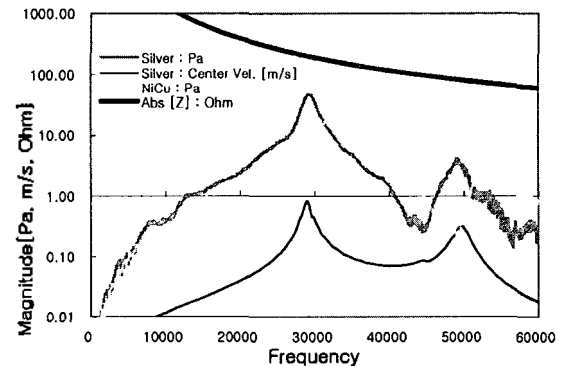


그림 5. 제작된 방사기의 특성 평가

LDV 를 이용해 방사면 중심의 진동 속도를 측정한 결과, 1 차 고유 주파수는 설계한 공진 주파수 55kHz 보다 크게 낮은 29.5kHz 이다. 이러한 오차가 발생하는 원인은 크게 다음과 같은 문제에 의한 것으로 판단된다. 무엇보다도 필름의 고정단을 형성할 때 에폭시를 이용하는데, 이로 인해 완벽한 고정단 조건이 형성되지 못하고 스트레스 또한 릴리즈(release)된 것으로 판단된다. 여기에 제작 과정에서 필름에 완벽한 초기-스트레스 분포를 만들기 어렵고 플라스틱 변형도 일어날 수 있다.

또한 이론상의 필름 물성 값이나 모델링에서 처짐량이 작다는 가정 등이 부정확할 수 있다.

음압 측정 결과 공진 부근에서 최대 127dB_{SPL} 의 높은 음압(100Vpk 를 인가, 방사판 정면에서 0.5m)을 얻을 수 있었다. 임피던스 측정을 통해 구동 구간에서 100-300Ω 정도가 측정되었는데, 결과적으로 고효율의 파워 앰프가 요구됨을 알 수 있다. 가청음 발생 실험에서는 은 전극형 필름 대신 NiCu 전극형 필름을 이용한 방사기를 사용했다. 이는 면밀도가 0.05kg/m² 로 작고 고유 주파수가 33.7kHz 로 다소 높았다.

4.3 가청음 발생 실험

본 실험은 제작한 방사기를 이용하여 파라메트릭 라우드스피커로 작동되는가의 여부를 검증하기 위한 것이다. 고압의 두 초음파의 차음(가청음)이 발생하는가를 확인하기 위해, 거리에 따른 각 성분의 음압을 측정했다.(그림 6.) 그리고 초지향성 가청음 발생이 이루어지는지 확인하기 위해 방향성 특성을 확인했다. (그림 7.) 실험 결과 비선형 현상에 의한 초지향성 가청음이 발생됨을 확인 할 수 있었다.

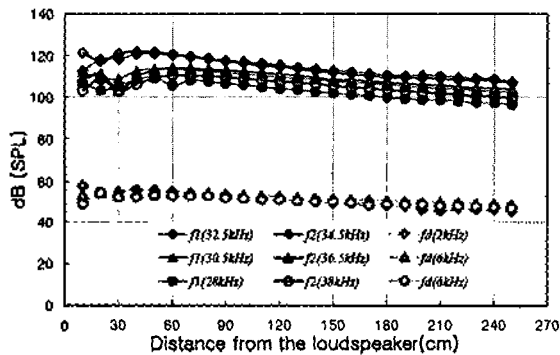


그림 6. 거리에 따른 가청음 발생 특성

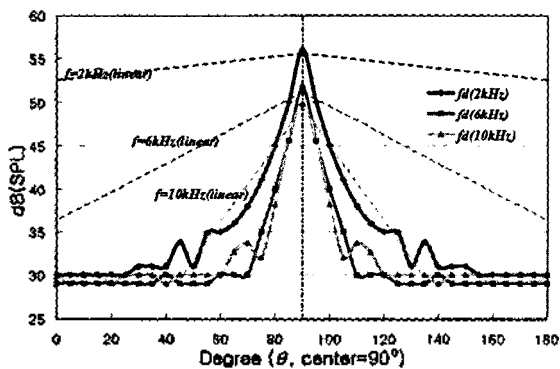


그림 7. 간접 발생 가청음과 직접 발생음의 방향성

비교 (f_0 : 간접 발생 가청음, f_1 : 직접 발생음)

5. 결론

본 연구에서는 압전 필름형 초음파 발생기를 설계·제작하고 이를 이용해 파라메트릭 라우드스피커의 기초적인 실험을 수행하였다. 음파의 비선형성을 이용한 가청음 발생 실험을 통해 초지향성의 가청음이 발생된다는 것을 확인 하였다. 가장 중점을 둔 방사기 설계에 있어서는 몇몇 문제로 설계된 방사기와 제작된 방사기의 고유 주파수의 차이가 적지 않게 발생했다.

연구 결과 압전 필름형 초음파 발생기 방식도 실용화의 측면에서 큰 문제가 있다는 결론을 내렸다. 이는 압전 필름 자체가 일종의 거대한 콘덴서와도 같아서 수백 와트 이상의 큰 파워를 소모하게 된다는 점이다. 즉, 고효율의 고주파 앰프가 요구되어 제작비용 상승으로 직결된다. 또한 필름 자체의 단가 또한 상당히 고가이다. 이러한 비용의 문제와 함께, 필름 자체의 내구성이 좋지 않고 필름 사이로 공기가 서서히 흡입되어 진공이 유지 되지 못한다는 문제점도 있다.

따라서 파라메트릭 라우드스피커가 실용화되기 위해서는 보다 간단한 구조를 지나면서도 고효율을 갖는 새로운 초음파 방사기 방식이 제안되어야 할 것이다.

참고문헌

1. Mary Beth Bennett and David T. Blackstock, "Parametric array in air," *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 57(3), 1975.
2. Masahide Yoneyama, Jun-ichiroh Fujimoto, Yu Kawamo and Shoichi Sasabe, "The audio spotlight: An application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design," *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 73(5), 1983.
3. L. Kinsler, A. Frey, A. Coppens, and J. Sanders, *Fundamentals of Acoustics* (Wiley New York), 1982.
4. W P Mason, *Electromechanical Transducer and Wave Filters*, Van Nostrand Remhold, New York, 2nd edn, 1948.