

압전 세라믹을 이용한 초음파 스피커의 설계 및 제작

문창호*, 노용래**

* 경북대학교 센서공학과

** 경북대학교 전자전기공학부/센서공학과

Design of an Ultrasonic Speaker with Piezoelectric Ceramic and Fabrication of its Prototypes

Changho Moon*, Yongrae Roh**

* Department of Sensor Engineering, Kyungpook National University

** Department of Electronics / Sensor Engineering, Kyungpook National University

요 약

본 논문에서는 지향성이 좋고, 대역폭이 넓은 초음파 스피커를 설계, 제작하는 것을 목표로 하였다. 이를 구현하기 위하여 초음파를 발생시키는 데 널리 이용되고 있는 압전 세라믹인 PZT를 사용하였다. 먼저 스피커 제작을 위하여 금속진동판의 종류와 크기, 감도, 대역폭 등의 최적값을 도출하여 주변고정, 마디지지, 주변지지의 형태로 스피커를 1차로 제작하여 음압을 측정하였고, 큰 음압을 구현하기 위해 동일한 성능을 가지는 마디지지의 스피커를 60개 배열하여 스피커로서 사용을 검증하였다.

I. 서 론

사람이 들을 수 있는 가청 주파수대역은 20 ~ 20,000 Hz이다. 절대적인 주파수 값으로 보면 그다지 넓은 대역은 아니지만, 상대적인 음역은 약 10 옥타브에 이르는 넓은 대역이다.^{1) 2)} 따라서 통상의 moving coil형 loud speaker로는 한변에 구현하기가 매우 어려워, 대부분의 경우 Woofer, Mid-Range, Tweeter 등 별도의 주파수대역을 담당하는 몇 개의 트랜스듀서를 동시에 사용하여 전체 대역을 구현하고 있고, 전체적 효율은 아무리 좋은 loudspeaker일 경우에도 1%를 넘기 힘든 실정이다. 본 연구에서는 지향성이 매우 좋으며, 부극(side lobe)이 거의 없는 초음파 스피커를 개발하고자 한다. 이를 위하여 압전소자질 이용한 초음파 스피커를

이론적으로 설계하고, 설계 결과를 토대로 시제품을 제작하고 구동회로와 연결하여 음압을 측정함으로써 그 성능을 분석하였고, 이론적인 결과와의 비교를 통하여 설계이론의 타당성을 검증하였다. 나아가 특성이 같은 압전 초음파 스피커를 배열하여 더 큰 음압을 구현하고자 하였다.

II. 초음파 스피커의 동작원리

음향파란 동적 신호로서 인근하는 두 개의 주파수 성분이 만나면 그 상호작용에 의하여 본래의 값과는 다른 새로운 주파수 값을 나타내는 특성을 가진다. 인근하는 두개의 신호 $S_1(t)$, $S_2(t)$ 가 주어지고,

$$S_1(t) = \sin[2\pi f_1 t], S_2(t) = \sin[2\pi f_2 t] \quad (1)$$

이 두 개의 신호가 상호 작용을 하면 아래의 식에 나타난 바와 같이 서로 다른 2개의 주파수 f_1 과 f_2 가 농적 결합을 이루게 되어, 이들과는 완전히 다른 새로운 주파수 성분인 f_1+f_2 와 f_1-f_2 가 발생한다.

$$S_1(t) * S_2(t) = \frac{1}{2} \{ \cos[2\pi(f_1 - f_2)t] - \cos[2\pi(f_1 + f_2)t] \} \quad (2)$$

각각의 주파수의 합과 차이를 가지는 두 주파수 값

음 만들어 내는 이러한 특성은 이미 오래전부터 알려져 왔는 것으로서, 각종 기계류의 상태 진단이나 음향 효과를 만들어내는데 유용하게 이용되어서 왔다. 이러한 특성은 앞 장에서 설명한 본 연구의 목표를 구현하는데 유용하게 이용할 수 있는 것이다. 즉, 식 (1)에 나타난 2개의 주파수 값을 설정함에 있어 적절한 초음파 스피커에 의해 f_1 은 임의의 주파수를 가지는 초음파 신호로 설정하고, f_2 는 f_1 에 비해 가청영역만큼 변하는 신호인 $f_2 = f_1 + \Delta f$ 로 둔다면, 이들 두 신호는 동적 결합을 통해 $2f_1$ 과 $2f_2$ 라는 신호를 만들어낸다. 이때 Δf 가 통상의 가청영역인 20 ~ 20,000 Hz를 망라한다면, 스피커로서의 기능을 수행할 수 있다.

III. 압전 초음파 스피커의 설계 및 제작

압전 스피커는 압전 세라믹과 금속진동판의 접착으로 이루어진 스피커 소자, 음압을 크게하는 케이스와 지지방식, 구동회로의 세부분으로 구성된다. 본 절에서는 이장에서 설명한 압전 스피커를 이루는 각 구성요소의 특성을 해석하고, 주어진 사양에 맞는 규격을 설계하였다. 주어진 사양으로는 공진주파수가 200 kHz이고, 최대 음압을 가지면서 대역폭은 20 kHz보다 큰 것을 가지도록 하였다.

1. 스피커 소자

스피커 소자는 양면전극이 형성된 압전 세라믹을 얇은 금속진동판에 접합시킨 복합진동자로 구성되며 압전 세라믹은 초음파를 발생하는 능동소자로서, 스피커 소자에서 가장 중요한 요소이다. 본 연구에서 개발하고자 하는 초음파 스피커는 압전 세라믹의 경방향(radial mode)진동을 이용한다. 진동자의 경방향진동의 공진을 이용하는데 있어서 고려해야할 사항으로는 두께(thickness mode)진동의 공진과 차이를 크게 두어, 그 영향이 미치지 못하게 해야 한다는 것으로 일반적으로 10배 이상의 충분한 주파수 차이를 둔다. 따라서 압전 세라믹인 PZT의 크기를 지름 10 mm, 두께 0.95 mm로 택하여 진동자의 경방향진동의 공진과 두께진동의 공진과 차이를 크게 두어, 그 영향이 미치지 못하게 하였다.¹⁴⁾ 압전 세라믹의 재료로는 우수한 압전 특성과 시효 특성을 가지고 있으며, 주로 Actuator에 많이 사용되는 hard계열의 PZT 4를 택하였다. 금속진동판으로는 황동, 알루미늄, 철, 티타늄, 스테인레스로 이루어진 것을 이용한다. 이들중 넓은 대역폭과 얇은 두께를 가지면서 제작의 이점이 가장 큰 알루미늄판을 선택하였다. 그리고 앞에서 결정한 압전 세라믹과의 최적의 지름과

두께비를 가지는 금속진동판의 두께는 압전 스피커의 공진 주파수에 의해서 결정되고, 지름은 감도에 의해서 결정된다. 앞에서 결정한 200 kHz의 공진주파수를 만족하는 알루미늄판의 두께는 0.25 mm, 최적의 감도를 가지는 지름은 23 mm로 결정되었다.

2. 지지와 케이스

스피커 소자에 구속 경계조건을 인가하지 않고 진동시키면 음은 대단히 작다. 이는 진동된 음의 위상을 생각할 때 스피커 소자의 중앙부와 외주부, 및 전면과 이면에서 180° 다르므로 공기의 진동이 상쇄되어 음이 작게 된다. 따라서 음을 크게 하기 위해서는 스피커 소자를 적당한 케이스에 넣고, 위상이 180° 다른 음을 음향적으로 차폐함으로써 위상에 의한 상대분을 감소시키고 케이스에 음향공동을 만들어 특정 주파수의 음압을 높이는 방법을 취하고 있다.¹⁵⁾ 위상에 의한 영향을 제거하는 구체적인 방법으로는 자유로 진동시킨 스피커 소자의 진동 절부를 지지 고정하고, 또 스피커 소자의 중앙부의 외주부를 음향적으로 격리하고, 중앙부의 동위상 성분만을 공중으로 쏘아 내는 방식과 스피커 소자의 외주부를지지 고정함으로써 진동의 절부를 외주부로 이동시켜 진동면에서의 음파를 동위상으로 하는 방법이 있다. 일반적으로 스피커 소자의 진동 절부를 지지 고정을 하는 방식으로는 마디지지, 주변지지, 주변고정등의 세가지가 주로 이용되고 있다. 이들중 마디지지의 형태로 시제화된 스피커의 사진을 그림 1에 나타내었다.

3. 구동회로

구동회로의 발음주파수는 초음파 스피커의 공진주파수에 의해서 결정된다. 또한 구동회로는 공진주파수의 초음파 신호와 입력신호 주파수, 공진주파수를 포함한 초음파를 발생시키는 구조로 되어 있다. 초음파 스피커 시스템의 Block Diagram을 그림 2에 나타내었다. 이 시스템은 구동회로에 음악 신호(f_1)를 입력하면 회로내의 Crystal Oscillator에서 고정 신호(f_0)를 만들어 입력 음악 신호와 고정 신호를 Mixer시키 Amp를 통하여 증폭시키고, 이 증폭된 신호($f_0 + f_1$, $f_0 - f_1$)는 압전 스피커를 통하여 출력되면서, 상호작용에 의해 원래의 음악 신호(f_1)를 만드는 구조이다.

IV. 성능평가 및 결과고찰

1. 초음파 스피커

구동회로에서 출력된 초음파 신호가 스피커를 통과하여 출력되면서 상호 간섭하여 원래의 신호를 만들어 내는 것을 검증하기 위해 실제의 음악 신호를 인가하여 스피커를 통한 출력이 원래의 음악 신호 인지를 검증한 결과 앞 절의 이론과 같이 원래의 음악 신호가 출력되었다. 이러한 결과로서 초음파를 이용한 압전 스피커의 이용은 가능하다고 검증되었지만, 스피커로서 사용을 위해 구동회로에 1차로 제작된 주변고정, 주변지지, 마디지지의 형태로 제작된 초음파 스피커를 연결하여 주파수의 변화에 따른 음압을 측정하였고, 그 결과로 최대 대역폭을 가지면서 균일한 음압을 가지는 마디지지의 형태가 초음파 스피커로서 가장 적당하다는 것을 알 수 있다. 그리고 마디지지의 최고 음압은 65.5 dB이고, -3 dB 대역폭은 12 kHz에 이른다. 본 연구에서 개발된 초음파 스피커가 스피커로서 사용이 가능하다는 것이 검증되었다. 그러나, 1차로 제작한 스피커는 스피커로 사용하기에는 음압이 낮은 문제가 있어, 2차로 스피커를 제작할 때에는 그러한 문제를 개선하기 위하여 가장 넓은 대역폭과 동일한 성능을 가지는 마디지지의 형태 스피커 60개의 배열을 설계, 제작하였다.

2. 초음파 스피커 배열(Array)

2-1. 배열 설계 및 제작

본 연구에서 1차로 개발된 초음파 스피커의 음압을 측정할 결과, 스피커로 사용하기에는 음압이 낮은 문제가 있어 초음파 스피커를 배열(Array)하여 충분한 음압을 얻고자 하였다. 넓은 대역폭을 가지는 마디지지의 형태로 스피커 60개의 배열과 방사패턴을 설계하였다. 이를 설계함에 있어서 중요한 사항은 전체 배열 모양이 대칭적인 구조를 가지게 하여서 음압의 측정위치에 따라 특성이 변하지 않게 하였다. 배열의 설계에는 First-product theorem을 이용하였다. 이렇게 제작된 스피커 배열의 사진을 그림 3에 나타내었다.

2-2. 성능평가 및 결과고찰

배열을 하기위해서 먼저 대칭적인 배열의 모양을 결정하고, 배열에서 압전 스피커간의 간격을 결정하기 위해서 방사패턴을 알기 위하여 First Product Theorem을 이용하여 시뮬레이션하였다. 그리고, 임피던스 특성

이 같은 마디지지의 스피커 60개를 제작하였다. 구동회로와 2차로 제작한 스피커 배열을 연결하여 1차와 동일한 조건하에서 음압을 측정하여 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 배열을 하여 음압이 100 dB에 이르는 것으로 나타났다. 이상의 결과를 바탕으로 압전 세라믹을 이용한 초음파 스피커가 개발되었다. 2차로 개발된 스피커는 가청주파수 영역에서 평탄한 대역을 가지고, 음압도 스피커로서 이용이 가능하게 되었고, 더 큰 음압을 구현할 수 있다.

V. 결론

본 연구에서 1, 2차로 제작된 스피커를 시험해 본 결과 나타난 것은 초음파 스피커로서의 기본 작동은 성공적으로 이루어진다는 것을 확인하였다는 것이다. 앞 절의 이론과 설계대로 초음파간의 간섭을 통하여 사향성이 좋은 가청 주파수가 생기는 것을 검증하였다. 그리고 최대 음압이 100 dB에 이르는 새로운 개념의 스피커를 개발함에 있어서 기본 작동원리를 분석하고 이를 실험적으로 확인 한 것은 큰 성과라고 할 수 있고, 나아가 더욱 큰 음압을 가지도록 스피커를 배열하여 제작도 가능하게 되었다. 향후에는 초음파 스피커와 구동회로의 지속적인 성능 향상을 이루어 지고, 나아가 구동회로와 스피커 배열의 크기 축소, 다양한 모양의 설계등이 이루어 진다면, 성능과 효율, 지향성이 우수한 초음파 스피커가 상용화될 것이고, 이는 가청주파수를 분할하여 구현하며 무지향인 loudspeaker의 단점을 극복할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Kinsler, Frey, Coppens, Sanders, " Fundamentals of Acoustics ", 3th, John Wiley & Sons, New York, 1982.
2. Allan D. Pierce, " Acoustics ", Acoustical Society of America, 1989.
3. "IEEE Standard on Piezoelectricity ", IEEE Std. 176, 1978.
4. O. T. Von Ramm and S. W. Smith, " Beam Steering with Linear Array ", IEEE Trans. son. Ultrason., Vol. BME-30(8), 1983.
5. 西山 浩司, 加賀 公衛, " 壓電發音部品と その應用", 綜合技術總販, 1985.

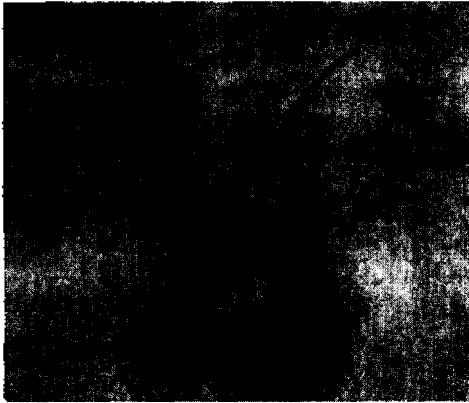


그림 1. 시제작된 압전 스피커

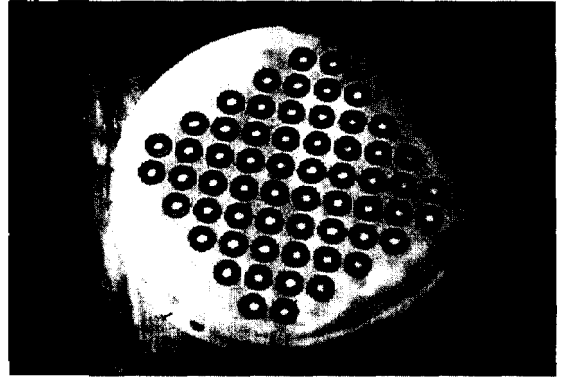
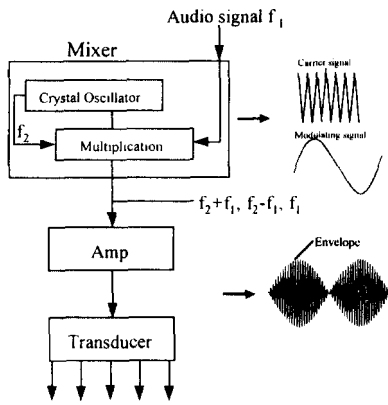


그림 3. 시제작된 초음파 스피커 배열



f_1 : audio signal frequency
 f_2 : carrier signal frequency

그림 2. 초음파 스피커 시스템의 Block Diagram

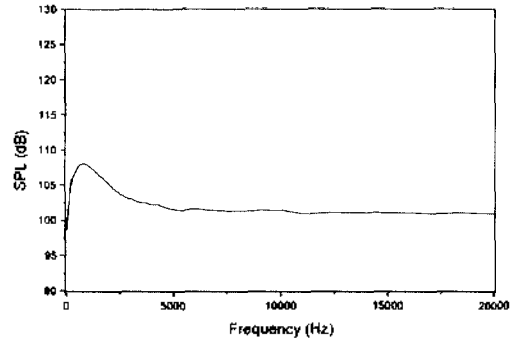


그림 4. 초음파 스피커 배열의 SPL