

Behavior of ultrasonic transducer in air by using finite element method simulation

Yeon-Hwa Chae, Kyoon Choi[†] and Ho-Yong Lee^{*}

Icheon Branch, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Icheon 17303, Korea

^{*}R & D Center, Ceracom Co., Ltd., Cheonan 31094, Korea

(Received September 14, 2018)

(Revised September 19, 2018)

(Accepted September 28, 2018)

Abstract The Tonpilz transducer was implemented using the structural module of COMSOL which is a FEM simulation tool. In order to compare the sound pressure characteristics of the transducer with the simulated results, the spacial distribution of the sound pressure level (SPL) was simulated by the acoustic module of COMSOL and then compared with the SPL distribution measured by a microphone. As a result, the resonance frequency and the peak in SPL for the simulation were predicted to be 28 kHz and 163.5 dB, respectively. And the resonance frequency and the peak in SPL for the actual transducer were measured to be 28.84 kHz and 137.8 dB, respectively. It is also confirmed that the simulated SPL distribution and the actually measured one are formed in a similar pattern.

Key words Tonpilz transducer, FEM simulation, Sound pressure level (SPL), Dust agglomeratin, Microphone

FEM 시뮬레이션을 이용한 공기 중에서의 초음파 트랜스듀서의 거동

채연화, 최균[†], 이호용^{*}

한국세라믹기술원 이천분원, 이천, 17303

^{*}세라콤, 천안, 31460

(2018년 9월 14일 접수)

(2018년 9월 19일 심사완료)

(2018년 9월 28일 게재확정)

요약 Tonpilz 트랜스듀서를 FEM 시뮬레이션인 COMSOL의 structural module을 이용하여 구현하였다. 트랜스듀서의 음압 특성과 시뮬레이션 결과를 비교하기 위하여 acoustic module을 이용하여 형성된 음압의 공간적인 분포와 실제로 트랜스듀서를 구현하여 마이크로폰으로 측정된 음압 분포를 비교하였다. 그 결과, 공진주파수와 최대 음압은 시뮬레이션의 경우는 28 kHz에서 163.5 dB로 예측되었고 실제 제작된 트랜스듀서에서는 28.84 kHz에서 137.8 dB로 측정되었다. 또한 모사된 음압 분포와 실제로 측정된 음압 분포가 유사한 패턴으로 형성되는 것을 확인하였다.

1. 서론

매년 중국에서 발생하는 미세먼지의 유입과 화력발전, 소각, 자동차 배기 등에서 발생하는 분진으로 인하여 대기의 질은 늘 큰 환경적인 위협 요소로 작용하고 있다. 미세먼지는 그 자체가 독성물질을 쉽게 흡착하여 인체 내에 쉽게 흡수될 수 있기 때문에 넓은 의미에서 발암물질로 간주될 수 있고 이를 실내 환경으로부터 배제시키기 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 기존의 해파

필터 등을 활용한 공기정화기의 도입에서 한 걸음 나아가 미세먼지를 응집을 통하여 제거하는 방법 등이 적극적으로 검토되고 있다. 그 중에서 초음파 트랜스듀서를 이용한 미세먼지의 응집 및 제거에 대하여 여러 연구[1-3]를 통하여 그 가능성을 확인한 바 있다.

트랜스듀서를 이용하여 생성된 음압을 이용하여 작은 입자들을 응집시키는 방법은 단 시간으로도 충분한 응집 [4]을 일으킬 수 있어서 일정한 유량으로 진행되는 환기 시스템에도 적용할 수 있으며 후공정으로 필터를 통하여 먼지를 거를 때, 그 제거 효율을 크게 향상시킬 수 있다. 최근에 서 등[4, 5]은 FEM(finite element method) 시뮬레이션을 이용하여 압전 트랜스듀서의 초음파 거동과 먼

[†]Corresponding author
E-mail: knchoi@kicet.re.kr

지의 응집 특성을 예측한 바 있다. 이와 같은 FEM을 이용한 tonpilz 트랜스듀서의 설계 및 최적화[6, 7]는 설계의 실수로 인한 경제적 시간적 손실을 줄여주는 역할을 한다. 이를 통하여 충분한 음압을 유도할 수 있는 트랜스듀서를 이용하면 응집을 통하여 미세먼지를 쉽게 제거할 수 있으며 응집에 소요되는 시간은 0.1초 이내로 예측되었다[4].

본 연구에서는 압전체를 이용한 트랜스듀서를 실제로 제작하고 이를 구동하여 발생하는 음압을 FEM 시뮬레이션을 통하여 예측하였고 이를 실제 값과 비교하기 위하여 마이크로폰을 사용하여 음압을 평가할 수 있는 시스템을 구축하였다. 이를 통하여 트랜스듀서를 이용하여 먼지를 제거할 수 있는 시스템에 필요한 여러 가지 요소들의 영향을 탐색하고 실제 집진 시스템을 구축하는데 필요한 시간을 줄일 수 있도록 시뮬레이션을 통하여 가상 시스템을 구현하였다.

2. 실험 방법

2.1. FEM 시뮬레이션 조건과 음압 평가를 위한 장비 세팅

시뮬레이션에 사용된 트랜스듀서의 외형을 Fig. 1에 나타내었다. 트랜스듀서는 (주)세라콤에서 제공하였고 그

도면을 이용하여 시뮬레이션에 필요한 같은 재질로 된 트랜스듀서를 캐드 상에서 3차원으로 구현하였다. 트랜스듀서의 헤드와 테일, 및 혼 부분은 Aluminum 6063으로 제작되었고 이를 고정하기 위하여 사용된 볼트와 너트는 스테인레스 스틸로 제작되었다. 서로 반대 방향으로 폴링된 압전체(PZT-4)는 두께 3 mm 원형의 디스크로 4개의 층으로 구성되었고, 사이에 0.2 mm의 구리판을 전극으로 사용하였다. 헤드와 테일은 볼트와 너트를 사용하여 기계적으로 고정되었고 압전체에 인장 응력이 걸리는 상황을 회피하기 위하여 일정한 힘으로 압축 응력이 가해지도록 설계되었다. 앞선 연구[5]에서 시뮬레이션으로 확인했던 바와 같이 압축응력으로 인한 출력의 영향은 미미할 것으로 예측된다. 혼은 트랜스듀서에서 방출되는 음파의 직진성을 향상시키기 위한 도구[3]로써 시뮬레이션을 통하여 형상 최적화를 거쳐 적용하였다.

15 mm 두께의 아크릴로 둘러싸인 직방형(H390 × W380 × D280)의 공간에서 음압의 크기를 평가하였고 먼저 트랜스듀서의 공진 거동을 확인하기 위하여 트랜스듀서와 60 mm 떨어진 위치에 마이크로폰을 고정하고 20에서 30 kHz까지 주파수를 1 kHz 씩 변화를 주면서 그 때의 음압을 평가하였다. 트랜스듀서의 경우, 진동 시의 손실을 최소화하기 위하여 무게중심에서 알루미늄으로 제작된 고정 치구에 4 방향에서 볼트로 고정하여 Fig. 2와 같이 사용하였다.

음파를 생성하고 이를 마이크로폰으로 확인하기 위해

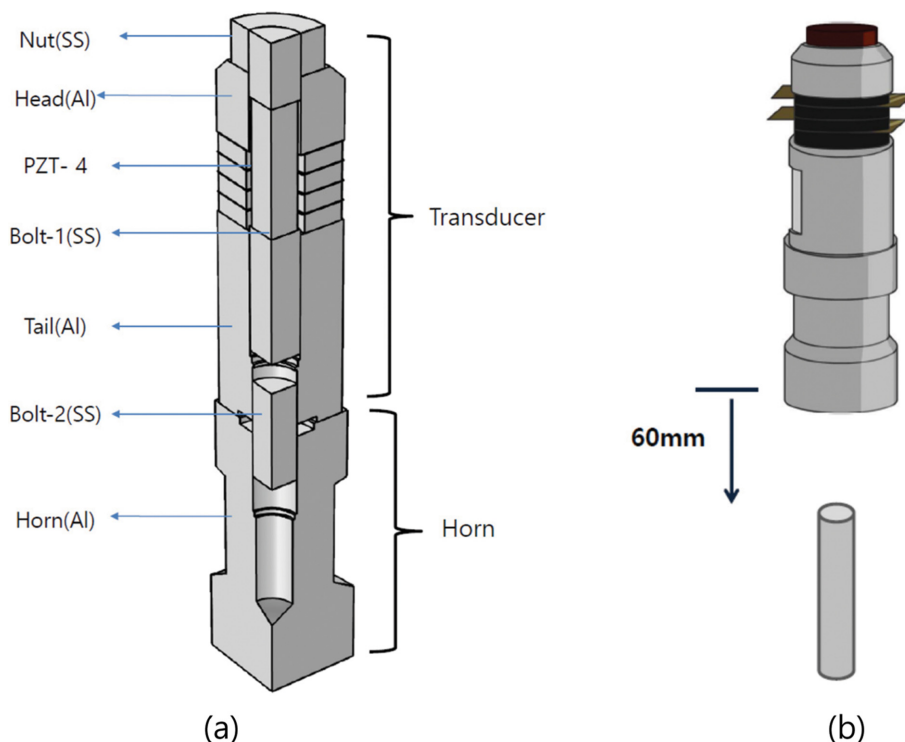


Fig. 1. Structure of piezoelectric transducer used for the measurement of sound pressure level (SPL).

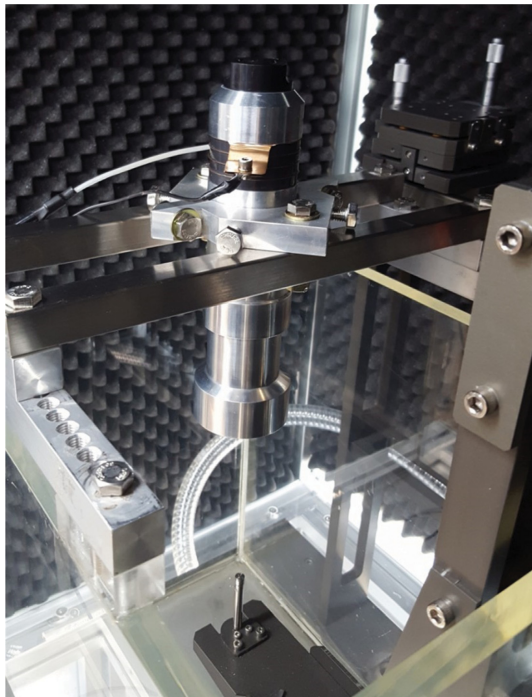


Fig. 2. Photograph of the transducer producing ultrasonic sound and the microphone detecting SPL.

서는 함수 발생기로 일정한 출력 값을 갖는 정현파를 생성하는 과정, 이를 증폭하여 트랜스듀서로 전원을 공급하는 과정, 아크릴 상자 내부에 위치한 마이크로폰 (GRAS 46BF-1)으로 발생된 음압을 측정하여 오실로스코프를 통해 컴퓨터로 전기 신호를 보내는 과정이 필요하다[9]. 이러한 과정을 Fig. 3에 모식적으로 나타내었다. 실험은 공진주파수를 확인하는 실험부터 먼저 진행한 후,

공진 주파수와 가까운 한 주파수를 정하여 수직방향과 수평방향으로 마이크로폰의 위치를 변경시키면서 음압을 평가하였다.

공진 주파수를 확인하기 위하여 트랜스듀서에는 48 V의 교류 전압(V_{pp})이 인가되었고, 20 kHz에서 30 kHz까지 사이를 1 kHz 단위로 주파수를 바꿔가면서 마이크로폰에서 검출되는 출력(V_{peak})을 측정하여 이를 음압치 (Sound Pressure Level: SPL)로 환산하였다. SPL은 기준 공기압에 대한 측정된 음압의 비를 나타내는 것으로 보통 dB를 단위로 표시한다. 이는 측정에 사용된 마이크로폰의 고유 값인 감도(sensitivity)를 이용하여 다음 식(2)로부터 계산될 수 있다. 실험에서 측정된 V_{peak} 을 식(1)에 대입하여 V_{rms} 값으로 환산한 후, 식(2)에 대입하면 SPL 값을 얻었다.

$$V_{rms} = \frac{V_{peak}}{\sqrt{2}} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \text{Sound Pressure Level [dB]} \\ = 20\log \frac{V_{rms} [\text{mV}]}{(2 \times 10^{-5}) [\text{Pa}] \times 3.6 [\text{mV/Pa}]} \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 3.6[mV/Pa]는 실험에 사용한 마이크로폰의 고유 감도이고, 2×10^{-5} [Pa]는 단위 공기압이다.

2.2. 트랜스듀서의 공진 특성과 음압 평가

사용한 트랜스듀서의 임피던스 특성을 임피던스 애널라이저(Agilant 4294A)를 통하여 평가한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 이를 통하여 예측되는 공진주파수는 28.74

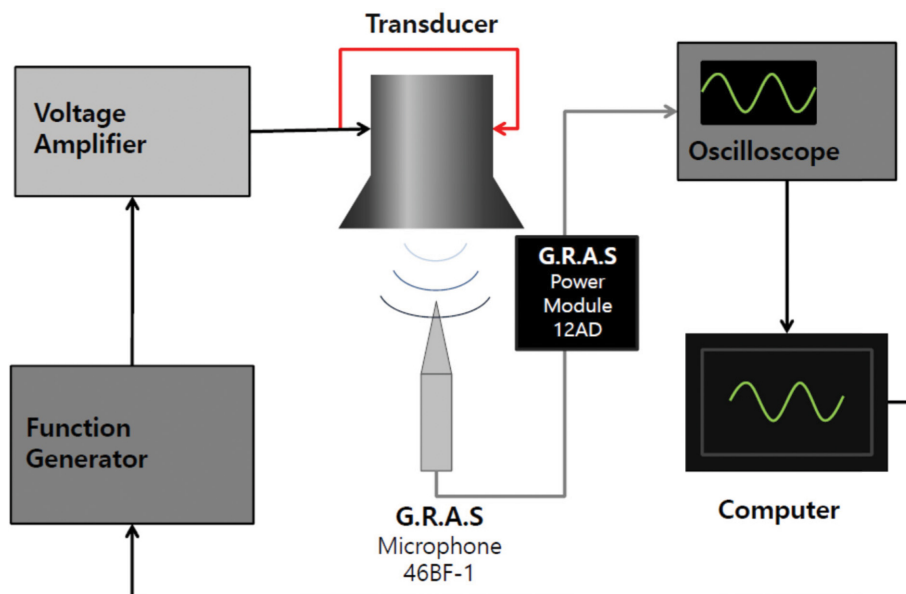


Fig. 3. Schematic of system measuring the SPL produced by the transducer.

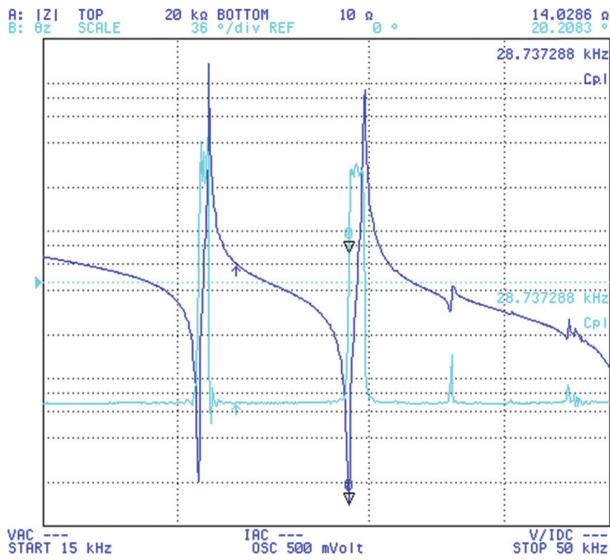


Fig. 4. Impedance characteristics of the piezoelectric transducer used.

kHz로 평가되었다.

시뮬레이션은 COMSOL의 acoustic module과 structural module을 사용하여 모사하였고 3차원으로 구현된 piezoelectric 트랜스듀서(Fig. 1(a))의 거동을 공기 중에서 구동하여 3차원 음압 분포를 예측하였다. 실험적으로 결정한 공진주파수 근처에서 주파수를 고정 값으로 두고 Z축과 Y축을 따라 위치를 바꾸면서 음압을 평가하였다. Z축 위치에 따른 음압분포의 평가는 마이크로폰이 트랜스듀서에서 30 mm 떨어진 점에서부터 수직 방향으로 5 mm 간격으로 거리를 멀게하면서 음압을 측정하였다. 또한 수평 방향에 따른 음압 분포의 평가는 마이크로폰과 트랜스듀서의 거리를 수직 방향으로 30 mm 고정시

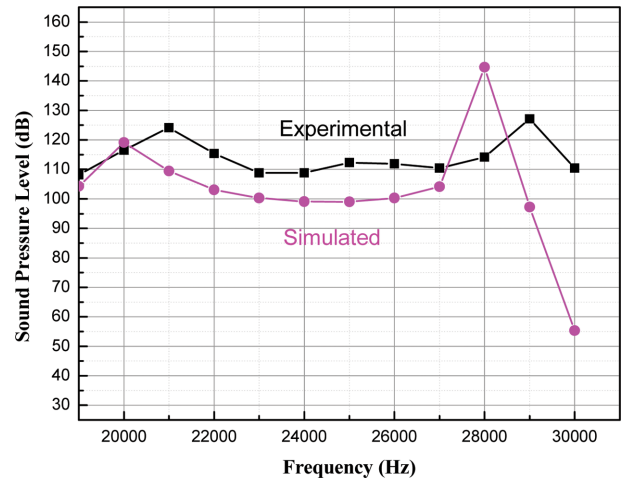


Fig. 5. Plot of the measured and simulated SPL vs frequency with 1 kHz variation between 20 and 30 kHz.

키고 수평 방향(Y축)으로 5 mm 씩 이동하면서 음압을 평가 측정하였다. 트랜스듀서에 인가한 교류 전압의 V_{peak} 값은 48[V]로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 공진주파수의 결정

실제 20에서 30 kHz의 범위에서 1 kHz 간격으로 측정 한 음압(SPL)의 변화와 시뮬레이션 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 실험적으로 측정된 SPL 값의 피크는 29 kHz에서 나타나는 반면, 시뮬레이션을 통하여 얻어진 최대 값은 28 kHz에서 얻어짐을 알 수 있다. 28 kHz에

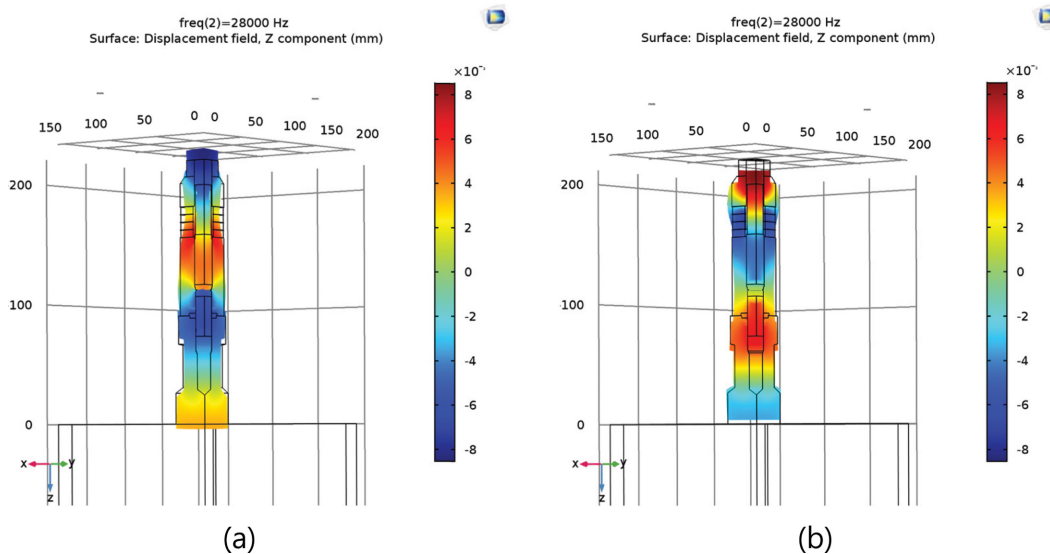


Fig. 6. (a) Maximum and (b) minimum displacement of piezoelectric transducer at 28 kHz.

서 나타나는 최대 신장과 최대 수축을 Fig. 6에 함께 나타내었다. 이를 보면 무게 중심에서의 고정점을 중심으로 양 쪽으로 수축과 신장이 번갈아 일어나는 것을 확인할 수 있다.

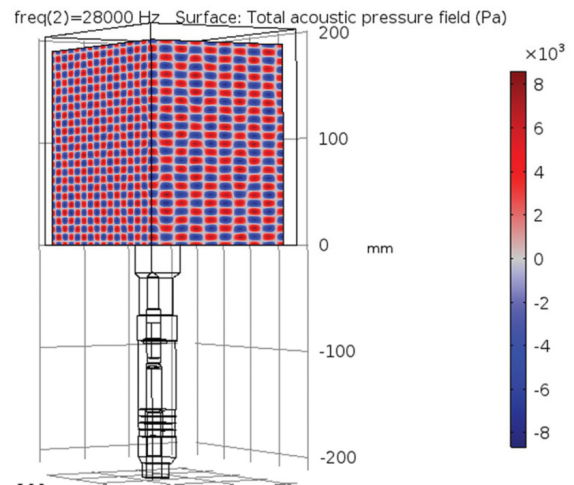
따라서 정확한 공진주파수를 결정하기 위하여 28에서 29 kHz 범위를 10 Hz 간격으로 음압 값을 측정된 결과, 28.84 kHz에서 최대 SPL 값은 137.8 dB로 평가되었다. 같은 조건으로 3차원 공간에서 10 Hz 씩 변화시키면서 시뮬레이션을 진행해보면 공진주파수는 28.0 kHz, SPL 값은 163.5 dB로 예측된다. 즉, 두 결과에서 공진주파수는 0.84 kHz 차이가 발생하고 SPL 값은 시뮬레이션이 25.7 dB 만큼 더 큰 결과를 나타내었다.

이러한 차이의 원인으로는 트랜스듀서의 동작 과정에서 발생하는 구동 손실, 음압을 측정하는 단계에서 발생하는 마이크론의 감도의 문제, 주변 환경에서 발생하는 여러 가지 간섭 등의 손실 등이 원인으로 추정된다. 또한 시뮬레이션에서 가정한 여러 가지 이상적인 가정들, 예를 들면 아크릴 표면에서의 완전 탄성 충돌이 실제 환경에서는 일어나지 못하여 나타나는 음압의 차이로 판단된다.

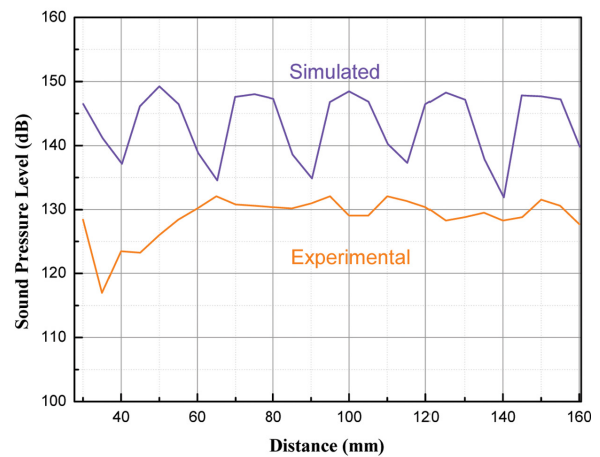
3.2. 3차원 음압 분포와 시뮬레이션의 비교

아크릴 박스 내에서 발생하는 음압의 분포를 시뮬레이션을 통하여 구현하면, Fig. 7(a)와 같이 트랜스듀서에서 발생하는 음파들이 아크릴 표면에서 나오는 반사파와 간섭을 일으켜서 일정한 진폭으로 산과 골이 반복되는 음압분포를 나타내게 된다. 이 때, 시뮬레이션에서 사용한 인가 주파수는 공진주파수에서 0.1 kHz 만큼 이동한 27.9 kHz에서 진행하였다. 이를 Z축과 Y축을 따라서 측정된 음압과 직접 비교하면, Fig. 7(b)와 7(c)와 같이 그려지는데 시뮬레이션에서 사용한 공진주파수가 실제 측정할 때 사용한 주파수 값인 28.7 kHz와 다르기 때문에 산과 골의 위치가 일정한 폭 만큼 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 공진 주파수에서 시뮬레이션에서의 음압 강도와 실제 측정 값과의 차이가 있는 것과 마찬가지로 이 경우에도 측정 값이 20 dB 정도 낮게 나오는 것을 확인할 수 있다. 이러한 차이는 측정시의 여러 가지 손실과 시뮬레이션의 가정에 의한 것으로 판단되는데 그럼에도 불구하고 전체적인 공간 분포는 상당히 유사하게 나오고 있음을 확인할 수 있다.

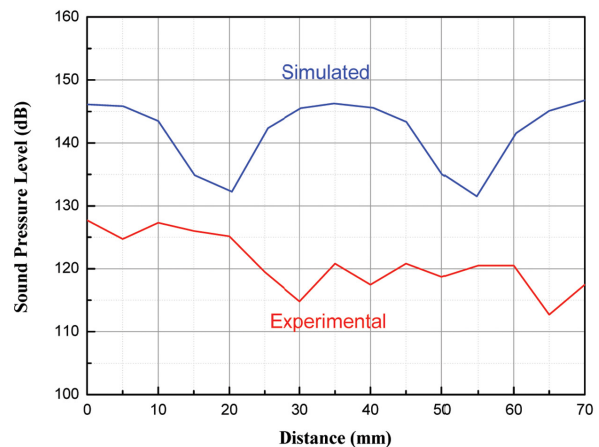
Fig. 7(b)에서 볼 수 있듯이 수직 방향으로 25 mm 간격으로 음압의 골이 형성되고 Fig. 7(c)와 같이 수평 방향으로 35 mm 간격으로 음압의 골이 형성되어 이곳으로 미세먼지가 모여들 것으로 예측할 수 있다. 세라콤에서 개발 중인 더 강력한 압전 단결정을 활용하면[9, 10] 더 큰 출력을 갖는 트랜스듀서의 구현이 가능하여



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. (a) 3-Dimensional distribution of acoustic pressure simulated by the FEM tool and the comparison of SPL of the simulated and measured along (b) Z-axis and (c) Y-axis.

더 넓은 범위에 걸쳐서 더 만족할 만한 집진 특성을 구현할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 압전 트랜스듀서를 이용하여 음압을 발생시키고 이를 이용하여 미세먼지를 응집시키는 연구의 첫 단계로 COMSOL의 structural module을 이용하여 압전 트랜스듀서를 3차원 상으로 구현하고 이를 acoustic module과 연계하여 3차원 공간 상에 음압 분포를 예측한 후 실측 값과 비교하였다. 이를 통하여 FEM 시뮬레이션으로 구현한 음압 분포가 실제 구현된 음압 분포와 일치함을 확인하였다. 향후 앞 선 연구에서 수행하였던 미세먼지의 응집 거동[4, 5]과 관련하여 먼지들의 크기에 따른 거동이나 응집 시간과 같은 구체적인 정보들을 시뮬레이션을 통하여 확인할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 환경기술선도사업(No. 2015000120001)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- [1] B. Bergmans, M. Dormann, F. Idczak, S. Petitjean, D. Steyls and B. Vanderheyden, "Advanced technique to reduce emissions of fine particulate matter using ultrasounds", in Sustainable Chemistry, Vol. 154, WIT Transactions on Ecology and the Environment (WIT press, 2011) p. 61.
- [2] D. Zhou, A. Luo, J. Jiang, H. Chen, M. Lu and M. Fang, "Experimental study on improving the efficiency of dust removers by using acoustic agglomeration as pretreatment", Powder Technol. 289 (2016) 52.
- [3] A. van Wijhe, "Acoustic coagulation of aerosols", M. Sc. Thesis (Delft University of Technology, Netherlands, 2013).
- [4] J.-W. Seo, K. Choi and H.-Y. Lee, "FEM simulation on dust-collecting performance of tonpilz transducer using finite element method", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 26 (2016) 252.
- [5] J.-W. Seo, K. Choi and H.-Y. Lee, "Effects of piezoelectric material on the performance of Tonpilz transducer using finite element method", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 26 (2016) 139.
- [6] J.L. Butler, J.R. Cipolla and W.D. Brown, "Radiating head flexure and its effect on transducer performance", J. Acoustic Soc. Am. 70 (1981) 500.
- [7] J. Kim, I. Kim and Y. Roh, "Design and fabrication of multimode wideband tonpilz transducers", J. Acoustic Soc. Korea 32 (2013) 191.
- [8] M. Robinson and C. Hopkins, "Effects of signal processing on the measurement of maximum sound pressure levels", App. Acoustics 778 (2014) 11.
- [9] S. Zhang, F. Li, X. Jiang, J. Kim, J. Luo and X. Geng, "Advantages and challenges of relaxor-PT ferroelectric crystals for electroacoustic transducers - A review", Prog. Mater. Sci. 68 (2015) 1.
- [10] H.-T. Oh, H.-J. Joo, M.-C. Kim and H.-Y. Lee, "Thickness-dependent properties of undoped and Mn-doped (001) PMN-29PT [Pb(Mg $_{1/3}$ Nb $_{2/3}$)O $_3$ -29PbTiO $_3$] single crystal", J. Korean Ceram. Soc. 55 (2018) 290.