

FEM simulation on dust-collecting performance of tonpiliz transducer using finite element method

Jin-Won Seo, 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 November 4, 2016)

(Revised November 14, 2016)

(Accepted November 18, 2016)

Abstract Dust-collecting behavior of tonpiliz transducer was simulated with finite-element-method (FEM) software. In order to optimize the performance of tonpiliz transducer, the shape factors including the thickness of head mass, the diameter of tail mass and the depth of bolt were analyzed as variables. As a vibrating energy source, the piezoelectric materials was also tested with PZT-4 and two kinds of piezoelectric single crystals. The output power of the transducer was maximized with the shape factors and then the behavior of the dust-collection was demonstrated with the multi-physics software, COMSOL.

Key words Tonpiliz, Finite element method (FEM), Piezoelectric transducer, Dust-collection, Single crystal

FEM 시뮬레이션을 이용한 tonpiliz 트랜스듀서의 먼지 응집 거동

서진원, 최균[†], 이호용^{*}

한국세라믹기술원 이천분원, 이천, 17303

^{*}세라콤, 천안, 31094

(2016년 11월 4일 접수)

(2016년 11월 14일 심사완료)

(2016년 11월 18일 게재확정)

요약 Tonpiliz 트랜스듀서를 이용한 미세먼지의 포집 거동을 살펴보기 위하여 유한요소법(FEM) 시뮬레이션을 이용하여 미세먼지의 응집 거동을 모사하였다. 원판형 head mass의 두께와 tail mass의 직경, 그리고 고정 볼트의 깊이를 트랜스듀서의 형상 변수로 고려하였다. 도넛형 압전체의 소재로는 기존의 PZT-4 소재와 서로 다른 특성의 두 가지 압전 단결정에 대하여 그 출력에 미치는 형상 변수의 최적화를 구현하였고 이를 통하여 얻은 트랜스듀서를 이용하였을 때 나타나는 미세먼지의 응집 거동을 다중 물리해석 S/W인 COMSOL을 이용하여 모사하였다.

1. 서론

현대인들의 최대 관심사 중의 하나는 건강과 복지, 노후 등 개인의 안락한 삶을 구현하는 데 필요한 삶의 방식이나 문화라고 생각되며 이를 위하여 특히 강조되는 것이 대기 등의 환경적 요소들이다. 특히, 지하철 등 폐쇄된 대중교통에서의 대기 관리는 이용자의 건강과 편의를 위해서 운영자가 반드시 구현해야 할 의무이다. 지하철에서의 대기 수준은 공조장치의 운용과 필터 등의 시

스템 요소에 의하여 결정되는데 여기에 활용될 수 있는 시스템 중의 하나로서 트랜스듀서를 이용한 집진 시스템이 주목받고 있다[1-3].

트랜스듀서는 전기적 신호를 음향파로 바꾸거나 음향파를 전기적 신호로 바꾸는 장치로써 많은 경우에는 동시에 이 두 가지를 수행한다. 가장 많이 활용되고 있는 tonpiliz 트랜스듀서는 큰 head mass와 이를 구동하는 작은 디스크 형의 압전체, 이를 고정하는 tail mass와 볼트로 구성되며 저주파 고효율의 특징을 갖고 있다. 1958년 처음 발명된 이래[4], 수중 초음파 발생기, 초음파 세척기, 초음파 웰더나 커터 등 여러 용도에 널리 활용되고 있으며 일방향 지향성을 갖고 있어서 2차원 정렬을 통

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

하여 수중 SONAR 시스템에도 적용되고 있다[5, 6]. 한편, 트랜스듀서의 음압을 이용하여 미세입자를 분리 혹은 응집하고자 하는 시도가 제시되었는데 이는 최근 문제로 대두되고 있는 황사나 미세먼진에 의한 대기오염과 연관되어 대기 환경을 개선하고자 하는 공학적인 한 가지 접근법으로 기대되고 있다[1-3].

Tonpilz 트랜스듀서를 설계하기 위해서는 실험적인 방법이나 대수 계산을 통하여 기본적인 구조설계가 가능하지만, 소재나 형상에 따른 구조의 최적화에는 도달할 수 없는 한계가 있다. 최근에는 FEM(finite element method)에 기반한 상업적인 S/W를 활용함으로써 더 손쉽게 그 초음파 특성을 예측할 수 있다[7, 8]. 서 등[9]은 head mass의 구조와 크기가 수중 트랜스듀서의 특성에 어떤 영향을 미치는 지를 제시하였고 특히 리랙서 단결정인 PMN-PZT계 단결정을 이용하였을 때 그 물리적 특성을 최대화할 수 있음을 확인하였다[10, 11]. 본 연구에서는 구조의 최적화를 통하여 구현한 tonpilz 트랜스듀서의 집진 효과를 다중물리 FEM S/W를 활용하여 살펴보고 기존의 PZT-4와 비교하였을 때 전기기계 결합계수가 큰 PMN-PZT계 리랙서 단결정을 트랜스듀서 발진 소재로

적용하였을 때 어떤 특성이 예측되는지를 시뮬레이션을 통하여 구현하였다.

2. 계산방법

시뮬레이션에 사용된 소재는 head mass로는 알루미늄 소재를 tail mass와 고정 볼트로는 강철 소재(steel)를 적용하였다. 이용된 소재의 물성치와 관련해서는 이전의 논문에서 인용된 값을 그대로 사용하였다[9]. 또한 시뮬레이션에 사용된 리랙서 단결정의 물성치는 (주)세라콤으로부터 제공되었으며 그 값을 Table 1에 나타내었다. 구조를 단순화하기 위하여 공기와의 임피던스 매칭을 위한 층은 도입하지 않았고 전극의 두께도 고려하지 않았다. 시뮬레이션에 사용된 tonpilz 트랜스듀서의 외형을 Fig. 1(a)에 나타내었다. Head mass의 두께와 tail mass의 직경 그리고 볼트의 깊이를 최적화의 변수로 사용하여 각 소재에 대하여 최적화를 수행하였다. 리랙서 단결정으로는 두 가지 PMN-PZT 단결정을 비교하였는데 CPSC160-95와 HPSC200-145를 압전소재로 사용하였다.

Table 1
Physical properties of piezoelectric materials used for these simulations

Materials	Density (g/cm ³)	Relative permittivity	Coupling factor [k_{33}]	Dielectric loss	Mechanical loss (QM)	Mechanical damping	d_{33} (pC/N)
PZT-4	7.5	{762.5, 762.5, 663.2}	0.7	0.004	500	1/500	289
CPSC160-95	7.9	{2568.08, 2568.08, 918.61}	0.93	0.005	100	1/100	2000
HPSC200-145	7.9	{880, 880, 510}	0.9	0.002	1000	1/1000	1100

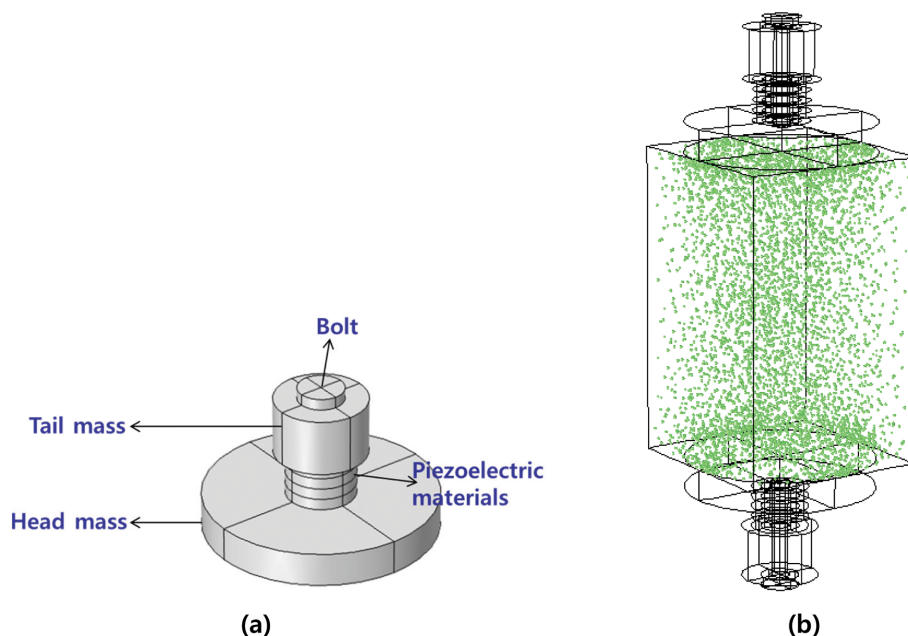


Fig. 1. (a) Geometrical dimensions and designations of components of tonpilz transducer and (b) its 3-dimensional configuration to show dust-collecting behavior.

두 단결정은 Table 1에서 확인할 수 있듯이 d_{33} 값은 CPSC160-95 쪽이 커서 변위량이 더 크고 더 높은 출력을 기대할 수 있으나 HPSC200-145 단결정이 고온 특

성이 우수하고 특히 손실이 적어서 고주파 특성이 우수할 것으로 기대된다. 모든 압전체는 d_{33} 모드를 이용하였고 서로 반대 방향으로 폴링된 4개의 디스크로 구성되

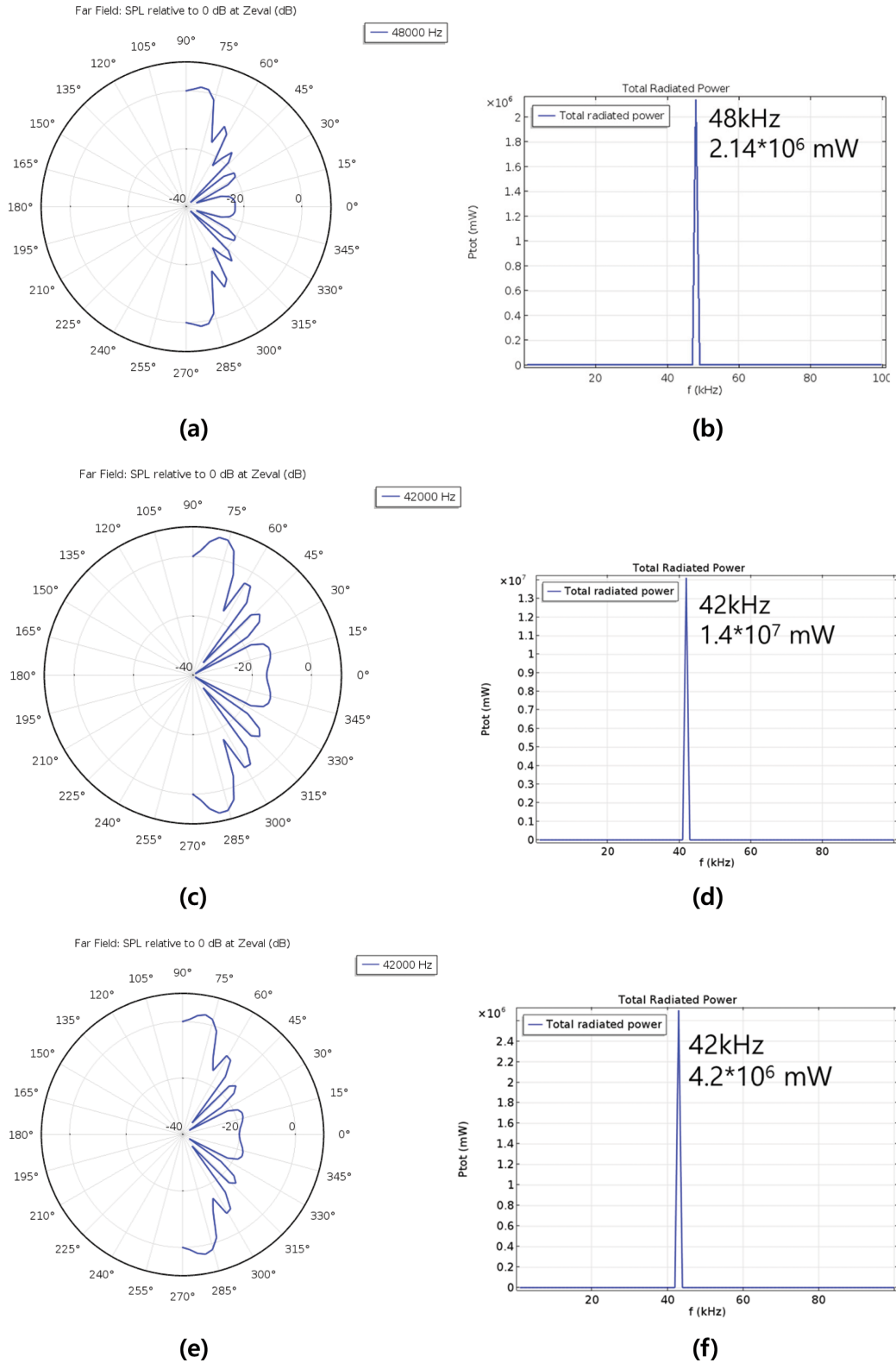


Fig. 2. Polar distribution of sound pressure level of (a) PZT-4, (c) CPSC160-95, (e) HPSC200-145 and total output of tonpizl transducer of (b) PZT-4, (d) CPSC160-95, (f) HPSC200-145.

며 구동 전압은 100 V/mm rms(root mean square)의 교류전압으로 가정하였다. 이로부터 트랜스듀서의 초음파 응답특성을 상용 FEM인 COMSOL software를 이용하여 예측하였다.

집진이 일어나는 3차원 공간의 크기는 가로 세로 높이가 $40 \times 40 \times 60 \text{ mm}^3$ 인 공간으로 Fig. 1(b)와 같이 완전 탄성체인 벽으로 둘러싸인 공간에서 PM 2.5(particulate matter less than $2.5 \mu\text{m}$)의 모사를 위한 $2.5 \mu\text{m}$ 인 단일 입도의 먼지 1만 개를 대상으로 밀도 0.5 g/cm^3 으로 가정하여 먼지와 음향 압력 간의 상호작용을 고려하였다. 이 때 압전체의 구동 전압은 100 V/mm rms)의 교류전압이었고 유동 공간은 중력의 영향을 받는다고 가정하였으며, 10초 동안의 먼지의 응집 거동을 모사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Tonpiliz 트랜스듀서의 음파 지향특성의 비교

트랜스듀서의 공진 특성은 압전체의 종류와 크기[10] 뿐만 아니라 head mass의 형상과 크기, tail mass의 형상과 크기 그리고 이들을 기계적으로 하나로 묶는 역할을 하는 볼트의 형상과 크기 특히, head mass에 연결되는 볼트의 깊이와 같은 변수에 따라서 전혀 다른 거동을 나타내므로[9] 이에 대한 충분한 FEM 해석이 필수적이다. 본 연구에서는 head mass의 직경을 40 mm로 고정하고 두께를 5 mm에서 8 mm까지 0.1 mm 간격으로 바꾸면서 최적화를 진행하였고 tail mass의 경우에는 높이를 10 mm로 고정하고 직경을 10 mm에서 16 mm까지 0.1 mm 간격으로 바꾸었으며 볼트의 깊이는 1 mm에서 3 mm까지 0.1 mm 간격으로 깊이를 조절하면서 최적화를 진행하였다.

이런 과정을 거쳐서 압전체의 소재를 PZT-4, CPSC160-95, HPSC200-145로 바꾸어 가면서 최대의 출력이 나오는 구조를 확인하였다. 그 결과 PZT-4의 경우에는 head mass의 두께가 6 mm이고 tail mass의 직경이 16 mm, 그리고 볼트의 깊이가 1 mm일 때 Fig. 2(a)와 같은 음압(sound pressure level: SPL)의 방향성과 Fig. 2(b)와 같은 출력의 주파수 특성을 나타내었다. CPSC160-95의 경우에는 head mass의 두께가 7.1 mm이고 tail mass의 직경이 17.9 mm이며 볼트의 깊이가 2.1 mm일 때 Fig. 2(c)와 같은 SPL의 방향성과 Fig. 2(d)와 같은 출력의 주파수 특성을 나타내었다. 끝으로 HPSC200-145 단결정의 경우에는 두께가 5.9 mm이고 tail mass의 직경이 12.3 mm이며 볼트의 깊이가 2 mm일 때 Fig. 2(e)와 같은 SPL의 방향성과 Fig. 2(f)와 같은 출력의 주파수 특성을 나타내었다.

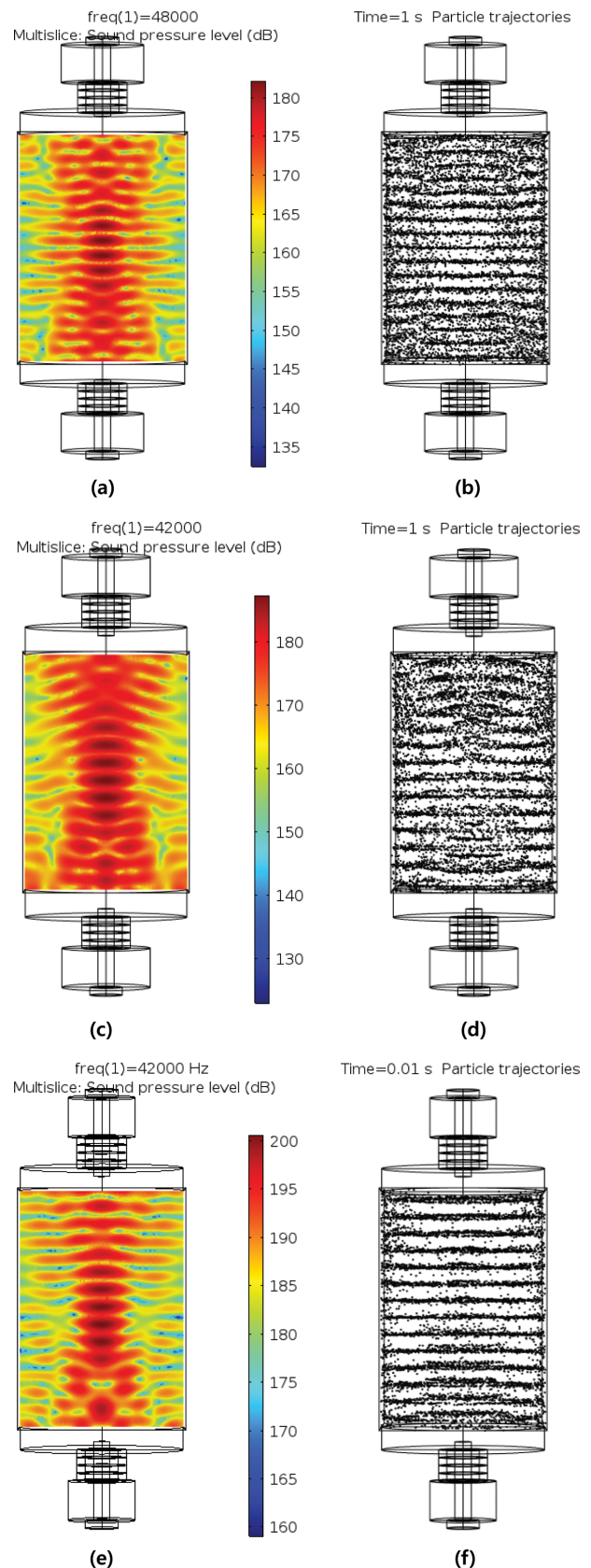


Fig. 3. Spatial distribution of sound pressure level with (a) PZT-4, (c) CPSC160-95, (e) HPSC200-145 transducer and dust-collecting behavior with (b) PZT-4 at 1 second, (d) CPSC160-95 at 1 second, (f) HPSC200-145 at 0.01 second.

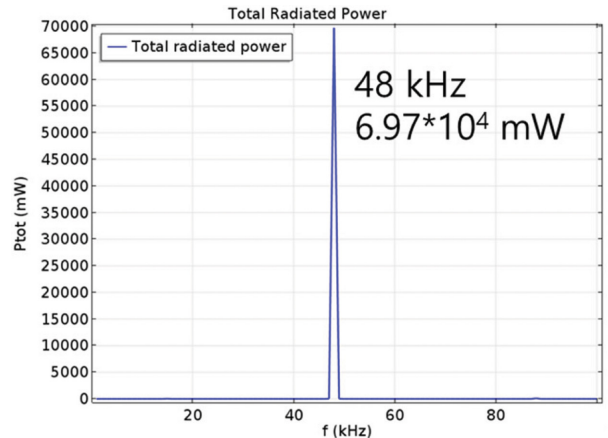
트랜스듀서의 방향성은 소재에 따라 다른 형상을 나타내었는데 직진성의 측면에서는 CPSC160-95가 가장 뛰어난 특성을 발휘하였다. 한편 공진주파수는 CPSC160-95와 HPSC200-145는 같은 42 kHz에서 최대 출력을 나타내었고 PZT-4는 48 kHz에서 최대값을 보였다. 그 크기는 CPSC160-95, HPSC200-145, PZT-4의 순으로 출력이 감소하는 경향을 나타내었다. 이와 같은 주파수 특성과 트랜스듀서의 방향성을 바탕으로 위 아래 두 개의 트랜스듀서를 마주 보고 배치한 집진기의 집진 특성을 다중물리 S/W를 이용하여 구현하였다.

3.2. Tonpilz 트랜스듀서를 이용한 먼지 응집현상의 구현

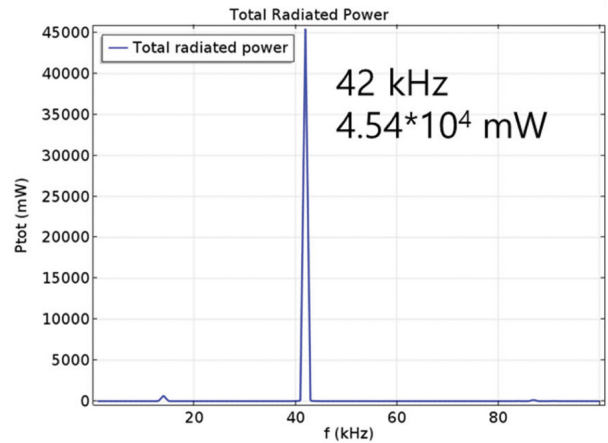
두 개의 트랜스듀서를 40(width)×40(depth)×60(height) mm³의 공간에 서로 마주보고 배치한 후, 공진주파수의 교류전압을 부가하였을 때 구현되는 음압 분포를 PZT-4와 CPSC160-95, HPSC200-145에 대하여 각각 Fig. 3(a), Fig. 3(c), Fig. 3(e)에 나타내었다. 음압의 분포와 크기는 완전 탄성체인 벽에서의 반사되는 초음파와 양 방향으로 투사된 초음파의 간섭으로 인하여 다소 복잡한 음압 분포를 나타내게 된다. 총 1 만개의 2.5 μm의 먼지(PM 2.5)를 공간 내에 투입하였을 때, 먼지의 분포는 압력이 낮은 공간을 따라 모여 들면서 Fig. 3(b), Fig. 3(d), Fig. 3(f)와 같이 PZT-4와 CPSC160-95, HPSC200-145에 대하여 각각 형성된다. 먼지가 모이는 시간은 음압 분포에 따라 PZT-4와 CPSC160-95의 경우에는 1초, HPSC200-145에서는 0.01초가 소요되었으며 그 이상의 시간에서도 그대로 유지되었다.

형성된 먼지의 공간적 분포와 음압의 분포는 거의 일치하는 것을 관찰할 수 있으며 특히 음압이 낮은 곳을 따라서 먼지가 모이는 것을 확인할 수 있었다. 특히 공진 주파수에서 더 출력이 큰 CPSC160-95 트랜스듀서보다 HPSC200-145의 경우에 먼지의 응집 현상이 더 빠르게 나타난 점이 특징적이다. 이는 두 트랜스듀서에서 나오는 음파 간의 간섭에 의하여 SPL의 3 차원 분포가 결정될 때, 트랜스듀서의 출력의 방향성과 주변 geometry에 대한 영향으로 판단되며 임의의 구조에 적용하기 전에 반드시 시뮬레이션을 통하여 해석하여야 할 이유 중의 하나로 생각된다. 여기에 고주파 영역에서 발생하는 두 가지의 loss factor인 유전 손실(dielectric loss)과 기계적 손실(mechanical loss)을 고려하면 트랜스듀서의 SPL의 방향성은 별로 영향이 없고 출력은 트랜스듀서에 따라 크게 감소하여 Fig. 4와 같이 나타난다.

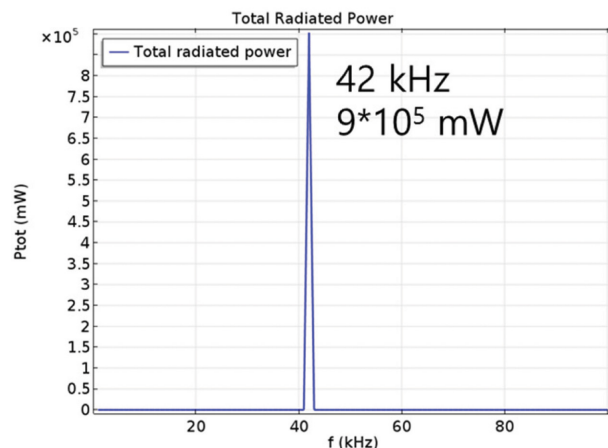
Loss factor에 의한 출력의 감소는 CPSC160-95, PZT-4, HPSC200-145의 순으로 크게 나타나면서 CPSC160-95에서는 99.7%, PZT-4에서는 96.7%, HPSC200-145의 경우에는 78.6%씩 출력이 크게 감소하였다. 그 결과,



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. Total output power of tonpilz transducer of (a) PZT-4, (b) CPSC160-95, and (c) HPSC200-145 after consideration of dielectric and mechanical losses.

출력의 크기는 HPSC200-145, PZT-4, CPSC160-95 순으로 나타났고 최대의 출력은 HPSC200-145의 9×10^5 mW로 나타났다. 이와 같은 loss factor에 의한 출력의 감소까지 고려한 후 나타나는 HPSC200-145의 집진 거

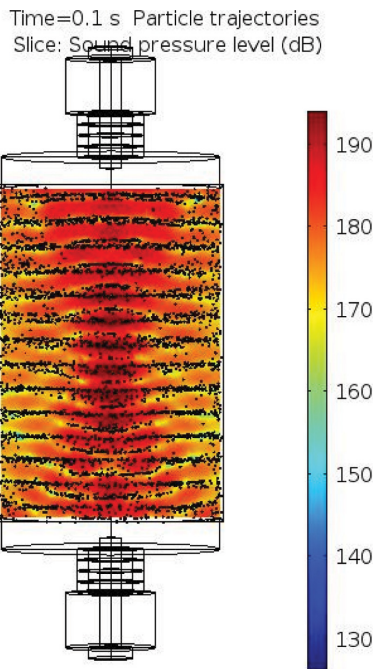


Fig. 5. Spacial distribution of sound pressure level and dust-collecting behavior with HPSC200-145 at 0.1 second after consideration of dielectric and mechanical losses.

동을 Fig. 5에 나타내었다. 이 경우 집진에 소요되는 시간은 0.01초에서 10배로 증가하여 0.1초까지 소요되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 tonpiliz 트랜스듀서를 이용하여 PM 2.5에 해당하는 미세먼지를 집진하는 과정을 다중물리 software를 사용하여 구현하였다. 일반적인 압전소재인 PZT-4와 두 종류의 리랙서 단결정을 압전체로 비교하였을 때 HPSC200-145 단결정의 경우에 가장 짧은 시간인 0.1초 내에 집진이 일어나는 것을 확인하였으며 이런 집진 현상을 이용하여 대기 중의 초미세 분진의 제거에 응용할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 환경기술선도사업의 지원(Grant #: E315-00012-0501)으로 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", *Sus. Chem.* 154 (2011) 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 Tech.* 289 (2016) 52.
- [3] A. van Wijhe, "Acoustic coagulation of aerosols", M. Sc. Thesis (Delft University of Technology, Netherlands, 2013).
- [4] K. Cepni, "A Methodology for Designing Tonpiliz-type Transducers", M. Sc. Thesis (Middle East Technical University, Turkey, 2011) p. 13.
- [5] Q. Yao and L. Bjorno, "Broadband Tonpiliz Underwater Acoustic Transducers Based on Multimode Optimization", *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.* 44 (1997) 1060.
- [6] S. Chhith and Y. Roh, "Wideband tonpiliz transducer with a void head mass", *Proc. Sym. Ultrason. Electro.* 30 (2009) 361.
- [7] J.L. Butler, J.R. Cipolla and W.D. Brown, "Radiating head flexure and its effect on transducer performance", *J. Acoust. Soc. Am.* 70 (1981) 500.
- [8] J. Kim, I. Kim and Y. Roh, "Design and fabrication of multi-mode wideband tonpiliz transducers", *J. Acous. Soc. Kor.* 32 (2013) 191.
- [9] J.-W. Seo, K. Choi and H.-Y. Lee, "Optimization of head mass for tonpiliz transducer using finite element method", *J. Kor. Crystal Growth and Crystal Tech.* 25 (2015) 140.
- [10] J.-W. Seo, K. Choi and H.-Y. Lee, "Effects of piezoelectric material on the performance of Tonpiliz transducer using finite element method", *J. Kor. Crystal Growth Crystal Tech.* 26 (2016) 139.
- [11] 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.