Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 28(6) : 752~758, 2018
https://doi.org/10.5050/KSNVE.2018.28.6.752

한국소음진동공학회논문집 제 28 권 제 6 호, pp. 752~758, 2018
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

균일 미립화 응용을 위한 압전 초음파 진동자의 성능고찰

Performance Investigation of Piezoelectric Ultrasonic Vibrator for Uniform Atomization Application

한 영 민† · 최 승 복*

Young-Min Han† and Seung-Bok Choi*

(Received September 30, 2018 ; Revised November 26, 2018 ; Accepted November 26, 2018)

Key Words : Piezoelectric Actuator(압전작동기), Ultrasonic Vibrator(초음파 진동자), Uniform Atomization(균일 미립화), Conformal Coating(보호막코팅), Wall-wetting(월웨팅)

ABSTRACT

This study presents the performance evaluation of an ultrasonic vibrator for uniform atomization that can be applicable to conformal coating control in the light-emitting diode manufacturing process or wall-wetting control in fuel injection of vehicle engines. To achieve this goal, an ultrasonic vibrator was devised utilizing piezoelectric actuators to have longitudinal motion. After analytically analyzing the standing waves of the proposed ultrasonic vibrator, the concentrator horn of the vibrator was designed, and its design parameters were finally determined by a modal analysis through the finite element method. The uniform atomization properties of the sprayed droplets from the vibrator were evaluated by a fluid dynamics analysis using ANSYS FLUENT. To evaluate the effectiveness, the designed vibrator was manufactured, and the generated sound pressure level was measured. Subsequently, uniform atomization performances were experimentally demonstrated using the vibrator to uniformly conformal coat a light-emitting diode.

1. 서 론

최근 다양한 산업분야에서 지능재료를 활용한 작동기와 센서가 적용되고 있다[1]. 특히 압전재료는 가장 활발하게 산업에서 활용되고 있는 지능재료로서 이를 이용한 작동기는 고속 동작이 가능한 빠른 응답성과 미세 제어가 가능한 높은 분해능을 갖는 장점이 있기 때문에 자동차, 반도체, 의료장비 등의 다양한 산업분야에서 응용장치의 구동 메커니즘으로 활용되고 있다. 현재 이러한 압전작동기는 고주파 음향을 발생시키는 초음파 진동자의 구동요소로서도 다양하게 활용되고 있다. 초음파 진동자는 음파를 발생시키는 구동요소에 따라서 압전형, 자왜형, 전왜형 등 다양하게 나뉘고 있으며 현재 산업에서 가장 많이 활용되고 있는 초음파 진동자는 압전효과를 이용하는 것이다. 이는 압전작동기의 고속 응답성이 초음파 진동자의 구동요소로서 많은 장점을 제공하고 있기 때문이다.

이러한 압전 초음파 진동자는 오랫동안 음파탐지기에서 수중 음파를 생성하는 장치로서 활용되어 왔다. 하지만 초음파의 특징은 진동수가 크고 파장이 짧기 때문에 강도가 보통 음파보다 뚜렷하게 크다는 특징을 갖고 있다. 이를 이용하면 응결, 분산, 파괴 등의 물리적 및 화학적 변화를 일으키는 작용이 가능하기 때문에 최근

† Corresponding Author ; Member, Ajou Motor College
E-mail : ymhan@motor.ac.kr
* Fellow Member, Inha University

‡ Recommended by Editor Jae Hung Han

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

세척, 가습뿐만 아니라 유화, 세포파쇄, 연료분사, 분사 코팅 등의 새로운 분야로 응용이 확대되고 있다[2,3]. 일반적으로 20 kHz ~ 200 kHz에서 작동하는 초음파 진동자는 큰 진폭과 파워를 동시에 갖기 유리한 종방향모드(longitudinal mode)의 진동을 이용한다. 대표적으로 Langevin이 제안한 볼트 체결형 진동자가 있으며, 가장 일반적인 구조로서 진폭을 증대시키기 위해 혼과 연결되는 방식을 사용한다[4]. 이러한 초음파 진동자는 기계적, 전기적, 열적 요소에 의해 성능이 제한되지만 압전작동기의 고속응답성과 철이나 티타늄 등을 이용한 다양한 형태의 혼에 의한 높은 파워 밀도에 의해 다양한 분야에서의 응용이 가능하다[5]. 이러한 초음파 진동자는 현재 세계 여러 곳에서 개발이 되어 초음파 유화기, 세포파쇄기, 초음파 세척기 등으로 그 응용분야가 점차 확대되고 있다. 특히 압전작동기 갖고 있는 동적 응답성과 파워는 이러한 초음파 응용분야의 경계를 넓힐 수 있는 새로운 응용가능성과 잠재성을 제공한다.

따라서 이 연구에서는 이러한 초음파 진동자의 응용을 새로운 분야로 확대하고자 한다. 특히 초음파 레벨의 고주파로 음압 가진이 가능한 압전진동자는 미세입자의 분사뿐만 아니라 분사된 입자의 균일한 무화에 기여할 수 있으며 대표적으로 미세분무가 필요한 발광다이오드 제조공정의 보호막 코팅이나 엔진 연료분사 시스템의 월웨팅 제어 등으로의 응용 가능성이 매우 크다. 이 연구에는 이러한 분야로의 압전진동자 응용 가능성을 실험적으로 고찰하기 위해 2개의 압전 세라믹 링으로 도입한 초음파 진동자를 설계하였으며, 혼을 이용하여 그 변위를 증폭하도록 하였다. 그리고 FLUENT를 이용하여 진동자로부터 분사된 액체입자의 특성에 대하여 고찰한 후 초음파 압전진동자를 실제 제작하여 LED 코팅에 적용함으로써 미세 분무 및 무화 특성을 실험적으로 고찰하였다.

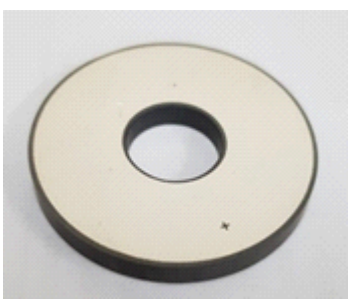


Fig. 1 The piezoelectric actuator

2. 초음파 진동자

2.1 진동자 구조

Fig. 1은 압전작동기를 이용한 초음파 진동자를 보여준다. 제안된 진동자는 고주파로 가진하기 위한 작동기와 변위를 증폭하기 위한 혼으로 이루어져 있다. 작동기에는 2개의 링타입 압전 세라믹이 적층되어 적용되었으며 그 앞과 뒤에 위치한 스테인레스 블록으로 체결되어 있다. 따라서 종(longitudinal) 방향의 가진에 의해 혼에서 초음파의 음압이 가진된다. 빠른 응답성과 높은 분해능의 특성을 갖는 압전작동기의 변위는 상당히 작기 때문에 여러 층으로 적층된 형태가 장장 일반적이다. 이러한 압전작동기의 거동은 일반적으로 다음과 같이 표현된다[6].

$$D = d_{33}T + \epsilon_{33}^{T}E$$
$$S = \frac{1}{c}T + d_{33}E \tag{1}$$

여기서 D는 압전변위텐서, S는 스트레인텐서, d는 압전재료 상수, ε^T는 유전율, c는 컴플라이언스, T는 스트레스텐서, E는 전기장이다. 이로부터 압전작동기의 힘은 입력전압에 대해 다음과 같이 표현된다[1].

$$f_p(t) = k_p\delta(t) - f_{ex}(t) = \alpha V(t)$$
$$k_p = \frac{Ac}{l}, \quad \alpha = \frac{Acd_{33}}{l} \tag{2}$$

여기서 k_p는 스프링상수, α는 비례상수, f_{ex}는 프리로드이며, A는 작동기 단면적, l은 작동기 길이이다. 이 연구에서 사용된 링타입 압전작동기는 PI사의 압전 세라믹 소자인 c181 세라믹이 적용되었으며 외경이 30 mm이다. 이 연구에서 사용된 압전작동기의 주요 사양은 Table 1에 나타내었다.

Fig. 2는 이 연구에서 제안한 초음파 진동자의 구조

Table 1 The mechanical specifications of the piezoelectric actuator

Specifications	Value
Thickness of a layer	3 mm
# of layers	2
Inner diameter	10 mm
Outer diameter	30 mm

를 보여주고 있다. 볼트 체결형 란쥬반 진동자(bolt-clamped Langevin transducer)의 구조를 채택하였으며, 링 타입의 압전소자 2개를 서로 마주 보도록 설치한 후 전기적으로 병렬로 연결하였고 상단 및 하단에 금속 블럭을 부착하여 전체를 볼트로 조인 구조를 갖는다. 이때 압전소자는 구동 신호를 기계적인 진동으로 변환시켜주는 역할을 하며 조립된 상태에서의 공진주파수로 인가된다.

2.2 진동자 모델링

Fig. 3은 진동자에 의한 액체 입자의 무화과정을 보여주고 있다. 이러한 초음파 가진에 따른 액체의 무화과정은 유막패턴(liquid film pattern) 이론으로 설명할 수 있다. 즉 고주파로 가진되는 진동자의 표면위에 형성된 액체 필름막이 미세한 액체 입자 단위로 쪼개져서 분사된다는 것이다. 따라서 표면장력파(capillary wave)에서 파장을 다음과 같이 정의할 수 있다[7].

$$\lambda = \frac{2}{f}\sqrt{\left(\frac{\lambda g}{2\pi}+\frac{2\pi\sigma}{\sigma\lambda}\right)\tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)} \tag{3}$$

여기서 f는 주파수, λ는 파장, g는 중력가속도, σ는 표면장력, ρ는 액체밀도, h는 유막 두께이다. 또한 유막이 매우 얇으며, 중력의 영향이 매우 적으므로 다음과 같은 가정의 도입이 가능하다.

$$\tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)\cong 1,\quad \frac{\lambda g}{2\pi}\ll\frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda} \tag{4}$$

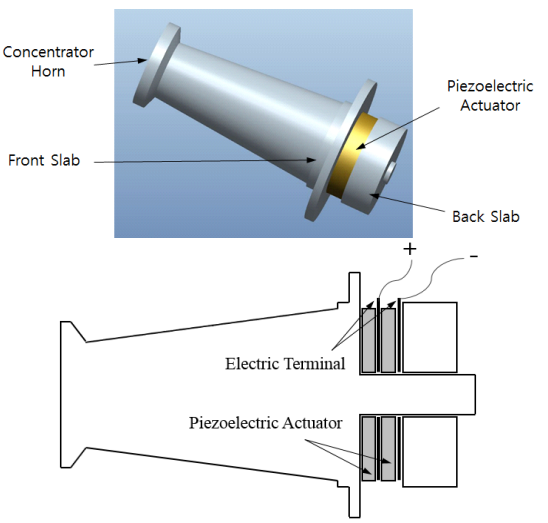


Fig. 2 Configuration of proposed ultrasonic vibrator

이로부터 식 (3)은 다음과 같이 간략하게 표현할 수 있다[8].

$$\lambda = K\left(\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2}\right)^{1/3} = \left(\frac{16\pi\sigma}{\rho f^2}\right)^{1/3} \tag{5}$$

여기서 K는 오차를 보완하기 위해 적용되었으며 약 1.26의 값을 갖는다. 그리고 유막에서 액체가 분리되어 입자로서 생성되는 현상에서 파의 에너지는 표면장력 에너지로 전환되므로 다음과 같은 관계식을 정의할 수 있다.

$$\frac{1}{2}m\omega^2A^2\cong N\sigma S$$
$$m = N\rho V \tag{6}$$

여기서 m은 유막의 질량이며, V는 액체입자의 평균체적이다. 그리고 A는 파의 진폭, ω는 파의 각주파수, N은 액체 입자수, S는 액체 입자의 평균 표면장력이다. 이때 액체필름과 분사된 입자의 질량은 동일하고, 파장과 진폭이 비례한다고 가정할 수 있다. 따라서 식 (5)와 (6)으로부터 분사 입자의 평균 직경을 정의할 수 있다.

$$D\cong\frac{3}{\pi}\cdot\frac{\sigma}{\rho f^2A^2} \tag{7}$$

여기서 표면장력에 영향을 미치는 것과 관련된 무차원수인 웨버 수(Weber number)를 도입하면 입자 직경은 다음과 같이 표현된다.

$$D = \frac{1}{\mathrm{We_P}}\cdot\frac{\sigma}{\rho v_P^2} \tag{8}$$

여기서 $\mathrm{We_P}$는 웨버 수이며 약 0.1의 값을 갖는다. v_P는 파의 진행속도이며, $v_P = f\lambda$로 주어진다. 따라서 식

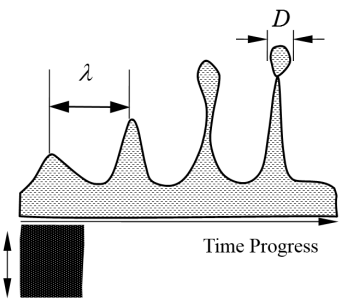


Fig. 3 Atomization process

(8)을 식 (5)에 대입하면 입자의 평균 직경은 다음과 같이 결정된다.

$$D = 0.73 \cdot \left(\frac{\sigma}{\rho \cdot f^2} \right)^{1/3} \tag{9}$$

발광다이오드의 코팅이나 엔진의 연료분사에서 입자의 평균 직경은 일반적으로 20 mm보다 작으므로 식 (10)로부터 압전진동자의 가진 주파수는 40 kHz 이상으로 결정된다.

제안된 초음파 진동자의 동적 거동은 종방향 진동으로 표현할 수 있으며 다음과 같이 수학적으로 표현된다.

$$\rho A(x) \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial x} \left[EA(x) \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} \right] = 0 \tag{10}$$

여기서 $v(x,t)$는 변위, $A(x)$는 단면적, ρ는 밀도, E는 영의 계수이다. 여기서 $v(x,t) = V(x)T(t)$로 가정하고 homogeneous 경계조건하에서 다음과 같은 간단한 상미분 방정식과 그 해가 도출된다[9].

$$\begin{aligned} &\frac{\partial^2 V(x)}{\partial x^2} + \frac{1}{A(x)} \frac{\partial A(x)}{\partial x} \frac{\partial V(x)}{\partial x} + k^2 V(x) = 0 \\ &\frac{d^2 V(x)}{dx^2} + k^2 V(x) = 0 \\ &V(x) = C_1 \sin kx + C_2 \cos kx \end{aligned} \tag{11}$$

여기서 $k = \omega_r / c$는 파수(circular wave number)이며, ω_r는 각주파수, $c = \sqrt{E/\rho}$는 종파의 전파속도이다. 따라서 일정한 속도 c로 진행하는 파형의 파장 λ_r는 다음과 같이 주어진다.

$$\lambda_r = 2\pi \frac{1}{k} = 2\pi \frac{c}{\omega_r} \tag{12}$$

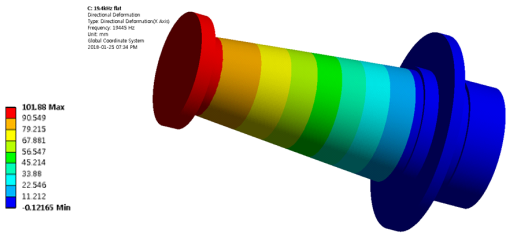
이로부터 이 연구에서 제안된 초음파의 진동자의 길이를 결정할 수 있다. 이때 최대진폭을 얻기 위해서 혼의 길이는 음파의 절반이 되도록 하였다.

이 연구에서 혼을 포함한 음파 집중기의 총 길이 72.5 mm로 설정되었으며, Fig. 4는 ANSYS에 의한 압전진동자의 유한요소 모달해석 결과로서 모드형상과 선단변위를 고찰하였다. 결과로부터 종방향 모드에서 공진주파수는 19.4 kHz, 최대 선단 변위는 0.1367 mm로 나타났다.

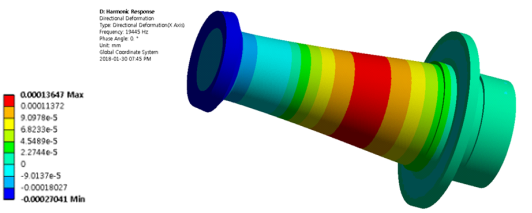
3. 압전진동자의 무화성능

제안된 진동자를 제작하기에 앞서 이 연구에서는 초음파 진동자에 의해 분사 및 미세화되는 입자의 특성을 수치해석적으로 분석하였다. 이를 위해 상용 해석 프로그램인 ANSYS FLUENT를 이용하였다. 초음파 분사에 의한 무화 현상은 진동자의 끝단에서부터 이후 공기 중(air zone)에서 발생하게 되므로 대기압 하에서 해석이 수행되었으며, 유막의 파동으로부터 입자의 표면장력으로 전달되는 에너지에 근거하여 입자의 속도와 직경 등을 FLUENT를 이용하여 유체동력학적 해석을 통해 고찰하였다.

Fig. 5는 분사 입자의 동적해석을 위한 격자 모델을 보여준다. 여기에 사용된 격자는 hexahedral과 tetra-



(a) Mode shape



(a) Harmonic response

Fig. 4 Modal analysis

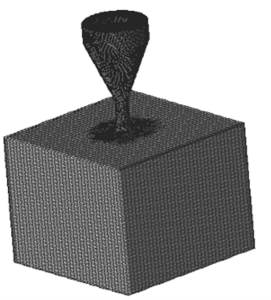
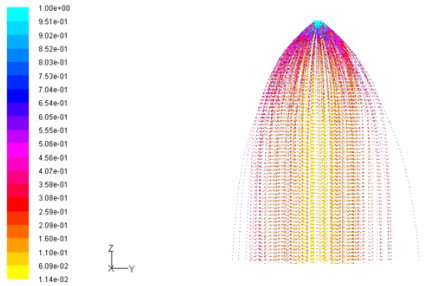
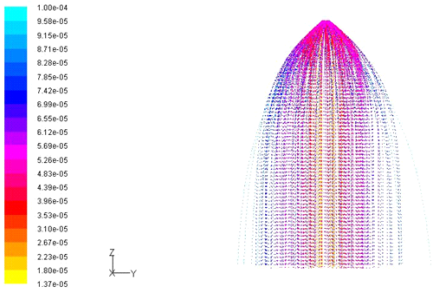


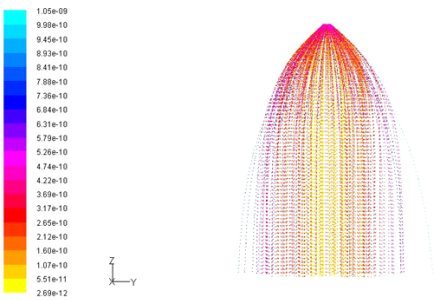
Fig. 5 Grid system for FLUENT analysis



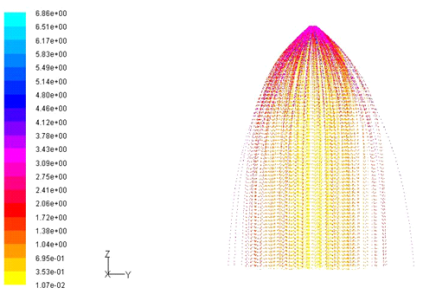
(a) Velocity



(b) Diameter



(c) Mass



(d) Reynolds number

Fig. 6 Analysis results by FLUENT

Table 2 Analysis results of droplets properties

Properties	Value
Droplets velocity	0.26 m/s
Flow rate	0.0045 kg/s
Mean diameter	0.019 mm

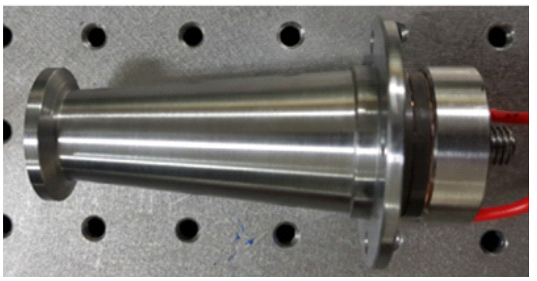


Fig. 7 Manufactured vibrator

hedral이며 격자의 최소 크기는 0.5 mm이다. 분사 액체로서 실리콘이 적용되었다. 이때 도입된 실리콘의 점도는 7000 cp, 밀도는 2000 kg/m^{3}이다. Fig. 6과 Table 2는 해석결과를 나타내고 있다. 결과로부터 실리콘 입자의 평균 분사속도와 직경은 각각 0.26 m/s, 0.019 mm로 나타났다. 이는 식 (7)의 진동자 설계에서 목표로 한 입자직경 0.020 mm와 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 입자질량의 분포는 최대 1.05 mg에서 최소 0.00269 mg이며, 이때 최대 레이놀즈 수는 6.86으로 매우 낮은 값을 유지하고 있으므로 안정적으로 분사됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 이 연구에서 실제 제작된 초음파 진동자를 보여주고 있다. 좌측 및 우측의 금속 블록 사이에 압전소자 2개를 서로 마주 보도록 설치한 후 전체를 볼트로 체결한 란쥬반 진동자의 구조를 갖고 있다. 이 연구에서는 미세입자로서 20 μm와 40 μm 입자크기를 형성할 수 있도록 각각 19 kHz (길이 88.5 mm)와 41 kHz (길이 62.3 mm)의 공진주파수를 갖는 2개의 진동자가 제작되었다. 이때 제작된 압전 링 좌우측의 금속블럭은 스테인레스강(S45C)의 재질로 이루어져 있으며, 우측의 금속블럭은 질량으로서 압전소자에서 두께 방향으로 발생하는 진동의 진폭을 증폭시키는 역할과 진동자에서 발생하는 열을 흡수 및 냉각시키는 역할을 한다. 압전소자 좌측의 금속 블럭은 하방의 파를 반사하는 역할을 하며 압전소자에 비해 현저히 낮은 음향 임피던스를 갖는다. 그리고 혼은 압전작동기에 발생한 진동을 진폭을 증폭시키는 역할을 한다.

Fig. 8은 실제 제작된 시작품의 고주파 음향 특성을 시험하기 위해 고전압앰프(NF사의 HSA4012)와 음압센서(PCB Piezotronics사의 378B02 마이크로폰)를 설치하여 구축한 음압 테스트환경을 나타내고 있다. 음압 시험에서 발진자에 인가되는 입력전압은 사인파형으로 진폭은 70 V(0 V ~ 140 V)이며, 주파수는 0.1 Hz에서 20 kHz까지 범위에서 가진하였다. 발생한 음압은

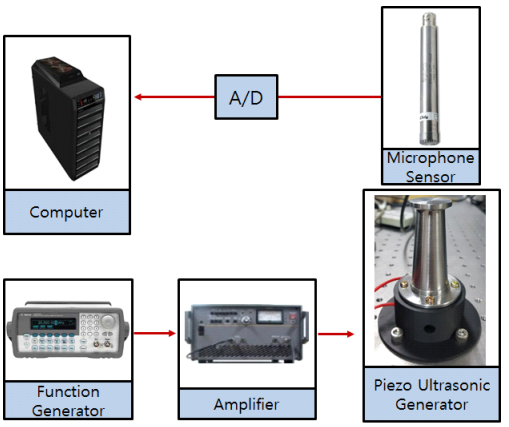
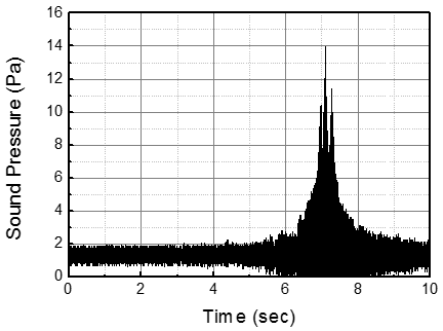
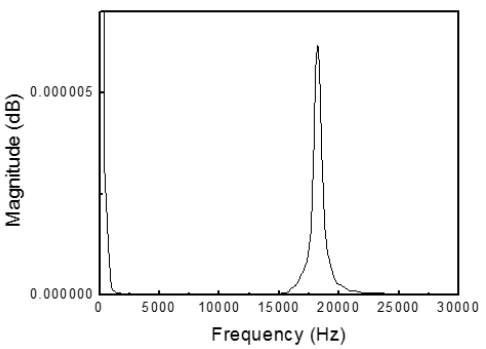


Fig. 8 Experimental setup sound level test



(a) Time domain

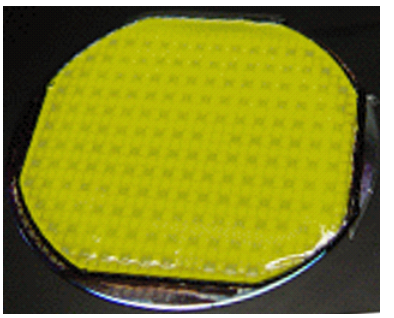


(b) Frequency domain

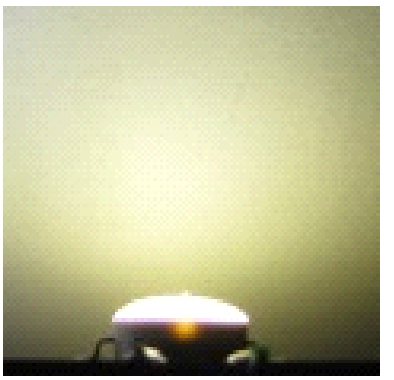
Fig. 9 Measured sound pressure

마이크로폰으로 측정하였으며 그 결과는 Fig. 9와 같다. 결과에 나타낸 바와 같이 공진주파수는 18.2 kHz이며 해석결과와의 오차는 6.2 % 이하로서 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 그리고 이 때 발생하는 최대 음압은 13.8 Pa로서 항공기 이륙시 음압(20 Pa)과 비교하면 매우 높은 음압이 형성되었음을 알 수 있다.

제안된 압전진동자가 미세입자의 균일한 분사와 무화가 가능함을 입증하기 위해 제작된 압전진동자를 이용하여 웨이퍼에 실리콘을 코팅하였으며 이로부터 제작된 발광다이오드를 이용하여 조사된 빛의 분포결과를 Fig. 10에 나타내었다. 결과에 나타난 바와 같이 빛의 조사가 고른 것을 알 수 있으며 조사각 70° 이내에서 빛의 중심부와 주변부의 색온도 차이가 9 % 이내로 나타났다. 이로부터 압전작동기를 이용한 초음파 분사장치가 미세입자의 균일한 무화를 만들어 낼 수 있음을 알 수 있다.



(a) Coated wafer



(b) Light distribution

Fig. 10 Measured sound pressure

4. 결 론

이 연구에서는 초음파 음압에 의한 액체의 미립화와 미세입자의 균일한 분산에 따른 새로운 응용가능성을 제시하기 위해 초음파 무화 및 응용특성을 실험적으로 고찰하였다. 이를 위해 링 타입의 압전작동기를 이용한 초음파 진동자를 고안하고 동적모델링과 해석을 수행하였다.

해석결과로부터 진동자의 공진주파수와 최대 진폭을 도출하기 위한 진동자 길이를 결정하였다. 또한 압전

진동자를 실제 제작하여 음압특성을 실험적으로 고찰하였고, 입자분사 특성을 수치해석적으로 분석하였다. 결과로부터 실리콘 입자의 평균 분사직경은 0.019 mm 이며, 안정적으로 분사됨을 알 수 있었다. 나아가 실제 응용장치인 발광다이오드 표면의 실리콘 도포에 적용하여 조사된 빛의 분포가 9 % 이내로 나타남을 고찰함으로써 압전 초음파 진동자에 의한 미세입자의 균일무화 특성을 실험적으로 입증하였다. 이 연구에서 제작된 압전진동자는 다음 연구단계에서 엔진의 연료 분사장치에 적용하여 분사된 입자의 무화와 월웨팅 저감 특성을 고찰하는 연구로 확대하고자 한다.

후 기

이 논문은 2017년 대한민국 과학기술정보통신부와 한국연구재단의 기초연구사업(중견연구)의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017R1A2B1009998).

References

(1) Choi, S. B. and Han, Y. M., 2010, Piezoelectric Actuators: Control Applications of Smart Materials (Chapter 3~8), CRC Press, Boca Raton, FL.

(2) Dobre, M. and Bolle, L., 2002, Practical Design of Ultrasonic Spray Devices: Experimental Testing of Several Atomizer Geometries, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 26, No. 2-4, pp. 205~211.

(3) Son, B. H. and Choi, S. B., 2009, Design and Analysis of Ultrasonic Vibrator for Conformal Coating in LED Packaging, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 12, pp. 1289~1295.

(4) Medis, P. S. and Henderson, H. T., 2005, Micromachining Using Ultrasonic Impact Grinding, J. Micromech. Microeng., Vol. 15, No. 8, pp. 1556~1559.

(5) Muhlen, S. S., 1990, Design of an Optimized High-Power Ultrasonic Transducer, Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium. pp. 1631~1634.

(6) Cady, W. G., 1964, Piezoelectricity, an Introduction to the Theory and Applications of Electro-mechanical Phenomena in Crystals, Dover, NY, USA.

(7) Lang, R. J., 1962, Ultrasonic Atomization of Liquids, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 34, pp. 6~8.

(8) Dobre, M. and Bolle, L., 1999, Visualization and Analysis of Liquid Film Surface Patterns Formed on Ultrasonic Atomisers, Paper presented at ILASS-Europe, Tousouse, France.

(9) Meirovitch, M., 1967, Analytical Methods in Vibrations (Chapter 2), Macmillan, New York, USA.

Young-Min Han received the Ph.D. degree in mechanical engineering from Inha University, Incheon, Korea in 2005. Since 2011, he has been a Professor at Ajou Motor College, Chungman, Korea. His current research interest includes design and control of functional mechanisms utilizing smart materials such as active mounts, semi-active shock absorbers, hydraulic valve systems, robotic manipulators and human-machine interfaces.