

LED 공정의 균일 코팅을 위한 초음파 진동자 설계 및 해석 Design and Analysis of Ultrasonic Vibrator for Conformal Coating in LED Packaging

손 병 호*·최 승복†

Byeoun-Ho Son and Seung-Bok Choi

(2009년 9월 14일 접수 ; 2009년 10월 7일 심사완료)

Key Words : Ultrasonic Vibrator(초음파 진동자), Piezoelectric Actuator(압전작동기), Conformal Coating(균일 코팅), LED(발광 다이오드)

ABSTRACT

This paper presents design and analysis of ultrasonic vibrator featuring the piezoelectric actuator. After describing a geometric configuration of the proposed vibrator, an analytical model of the ultrasonic vibrator is formulated by adopting liquid film pattern theory and wave theory. The dynamic analysis and geometric optimization are then undertaken using a software ANSYS. The optimization is performed by taking the amplitude of the tip displacement as an objective function. The fluid flow characteristics of the proposed vibrator are analyzed by taking three different fluids: water, silicon oil and ethylene-glycol. This is achieved using a software FLUENT.

1. 서 론

최근 조명광원으로서 light emitting diode(LED)가 큰 주목을 받고 있다. 이것은 LED가 에너지 절약, 친환경, 비용절감 등의 측면에서 기존의 형광등보다 좋은 특성을 나타내기 때문이다. 하지만 LED의 불균등한 광 분포는 조명광원으로서의 활용을 저해하는 요인이다. 광원의 색 온도 분포를 결정하는 형광체의 균등 균일 코팅기술은 수십 마이크로 크기의 형광체 분말을 얇은 막 내에서 균일한 분산 상태로 만들어야 하는 형광체 막 형성 공정으로서 LED의 성능향상에 매우 중요한 공정이다. LED 공정에서 코팅기술은 dispensing, molding, screen printing(스크린 프린팅), electrophoretic deposition(전기영동법), spray coating(스프레이 코팅) 등 다

양하다. 스프레이 코팅에는 기본적으로 압축공기를 이용하여 스프레이 하는 방법과 초음파를 이용하여 스프레이 하는 방법 두 가지로 나뉘어진다. 초음파를 이용하여 분무하는 시스템은 기본적으로 초음파를 발생시키는 압전소자, 발생된 초음파를 증폭하고 전달하는 진동자, 에너지 전달이 일어나는 분무표면으로 용액을 운반하는 노즐로 구성되어 있다. 초음파 진동자의 진동 특성은 분무용액의 특성에 큰 영향을 미친다⁽¹⁾. 분무용액의 특성은 형광체의 균등 균일 코팅에 영향을 미치며 이는 곧 LED 광 분포에 영향을 미치는 것을 의미한다. 많은 연구자들이 초음파 진동자를 이용한 분무에 대해 연구하고 있다. Amin은 FEM을 이용하여 초음파 혼을 해석하였다⁽²⁾. Dobre와 Bolle은 여러 가지의 초음파 진동자를 제작 실험했으며 최대 엔트로피 이론을 이용하여 분무 특성을 이론적으로 예측하였다^(3,4). Sherrit는 electromechanical equivalent method를 이용하여 초음파 응용을 위한 혼의 모델링을 연구하였다⁽⁵⁾. 그러나 대부분의 연구는 물과 같은 매우 낮은 점도

† 교신저자; 정회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : seungbok@inha.ac.kr
Tel : (032)860-7319, Fax : (032)868-1716
* 정회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

의 액체를 분무 하는데 그치고 있다. LED 공정에
 서 사용되는 유체는 실리콘과 같은 높은 점도의 용
 액이며 높은 점도의 용액을 분무하는 초음파 진동
 자에 대한 연구는 부족하다.

이 연구에서는 새로운 타입의 적층형 압전 초음
 파 진동자를 제안하였다. 이 진동자는 LED 공정에
 서 코팅공정을 위해 사용되며 형광체의 균등 균일
 코팅에 필요한 모듈이다. 진동자의 요소는 압전작동
 기, 전압단자, 후방질량, 혼 등으로 구성된다. 진동
 자를 설계하기 위해 liquid film pattern theories와
 빔의 축 방향 진동 방정식을 활용하였다. Liquid
 film pattern theories은 유체에 초음파가 가해지면
 일어나는 액적 이탈 현상을 유도한 이론이다. 이 식
 을 활용하여 필요한 액적의 지름을 만드는 작동 주
 파수를 계산한다. 축 방향 진동 방정식을 이용해서
 는 작동 주파수에 따른 각 위치에서의 변위를 계산
 한다. 또한 이 진동자의 동적 특성을 예측하기 위해
 서 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용
 하였다⁹⁾. 이 연구에서는 또한 분무의 유동을 상용
 전산유체 프로그램인 GAMBIT과 FLUENT를 이용
 하여 여러 조건하에서 액적의 평균 지름, 낙하 속
 도, 분무 특성 등을 예측하였다. GAMBIT은 유체
 및 고체 부분의 모델링에 사용되며 FLUENT는
 GAMBIT에서 만들어진 모델을 계산하는데 사용되
 었다.

2. 초음파 진동자의 모델링

이 연구에서는 압전작동기를 기반으로 하는 새로
 운 형태의 초음파 진동자를 제안한다. 새로운 형태
 의 초음파 진동자를 Fig. 1에 나타내었다. 초음파 진
 동자는 압전작동기, 전압 단자, 후방질량, 전방질량
 혼으로 구성된다.

압전작동기에 전압을 인가해 주면 축 방향 진동
 이 초음파 진동자에 발생하게 된다. 이때 인가해 주
 는 전압의 주파수에 따라 액적의 지름이 결정된다.
 초음파에 의한 분무현상은 Kelvin에 의해서 처음으
 로 공식화 되었다¹⁾.

$$\lambda_s f_s = \sqrt{\left(\frac{\lambda_s g}{2\pi} + \frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda_s}\right) \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda_s}\right)} \quad (1)$$

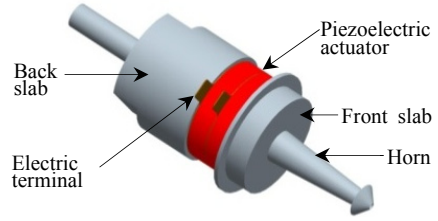


Fig. 1 Configuration of the proposed ultrasonic vibrator

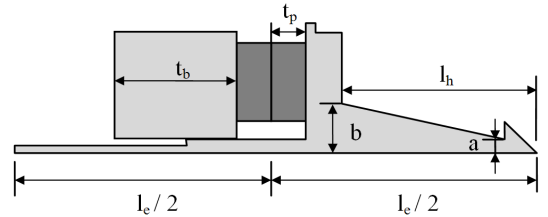


Fig. 2 A cross section of the ultrasonic vibrator

여기서, f_s 는 유체 막의 진동 주파수를 나타내며 g
 는 중력가속도를 나타낸다. σ 는 유체의 표면장력,
 ρ 는 유체의 밀도, λ_s 는 Kelvin이 유도한 분무현상
 에 나타나는 square wave의 이론적 파장을 각각 나
 타낸다. 이후 Lang에 의해서 여러 가정을 바탕으로
 분무현상을 초음파 진동자에 다음과 같은 식으로
 적용되었다⁶⁾.

$$\lambda_{s,Lang} = \left(\frac{8\pi\sigma}{f^2\rho}\right)^{1/3} \quad (2)$$

여기서, f 는 초음파 진동자의 작동 주파수, $\lambda_{s,Lang}$
 는 Lang이 유도한 분무현상에 나타나는 square
 wave의 이론적 파장을 각각 나타낸다. 하지만 이론
 적 파장과 다음의 실제 파장 사이에는 차이가 있다.

$$\lambda = 1.26\lambda_{s,Lang} = \left(\frac{16\pi\sigma}{f^2\rho}\right)^{1/3} \quad (3)$$

여기서, λ 는 실제 파장을 나타낸다. 일반적으로 초
 음파에서 분무가 일어나는 현상은 두 단계로 진행
 된다. 첫 번째 단계에서는 초음파 진동자 끝 분무표
 면에 형성된 유체 막에 가진 된 초음파에 의해
 square wave pattern이 발생한다. 두 번째 단계에서
 형성된 square wave pattern이 자유진동수에 도달하

면 그 크기가 성장하면서 진동의 마루로부터 액적이 이탈하게 된다. 이러한 액적이 모여 분무를 이루게 된다. 액적의 이탈현상은 표면장력과 진동 힘에 의해서 유도될 수 있다. 유체 막의 진동 에너지는 액적의 운동에너지와 표면장력에너지로 전환 된다. 이때 초음파 진동자에서 액적의 속도는 1 m/s 이하로 매우 작다. 그러므로 약간의 손실을 제외한 대부분의 진동에너지는 다음과 같은 액적의 표면장력에너지로 변환된다고 할 수 있다.

$$\frac{1}{2}m\omega^2 A^2 \cong N\sigma S \quad (4)$$

위에서 좌항은 유체 막의 진동에너지이며 우항은 액적의 표면장력에너지이다. A , ω , N , σ , S 는 각각 진동의 크기, 가진 각주파수, 액적의 수, 액적의 표면장력, 액적의 평균 표면적을 나타낸다. 여기서,

$$m = N\rho V \quad (5)$$

이때 V 는 액적의 평균 체적을 의미한다. 식 (4)와 식 (5)를 조합하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$D \cong \frac{3}{\pi^2} \frac{\sigma}{\rho f^2 A^2} \quad (6)$$

여기서, D 는 액적의 평균 지름을 의미한다. Square wave pattern과 진동의 크기가 비례한다고 가정하면 식 (6)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = const \cdot \frac{\sigma}{\rho f^2 \lambda^2} \quad (7)$$

여기서, 식 (7)에서의 비례상수는 10이다.

$$v_p = f\lambda \quad (8)$$

v_p (pattern velocity)를 정의하면 식 (7)은 wave pattern을 위한 Weber number로 표현된다.

$$We_p = \frac{v_p^2 \rho D}{\sigma} \quad (9)$$

Weber number는 상화에 따라 다르지만 일반적으로 0.1로 알려져 있다. 식 (7)에 식 (3)을 대입하면 액적의 평균 지름은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = 10 \cdot \frac{\sigma}{\rho f^2 \left(\frac{16\pi\sigma}{f^2 \rho} \right)^{2/3}} = 0.73 \cdot \left(\frac{\sigma}{f^2 \rho} \right)^{1/3} \quad (10)$$

LED 공정에서 코팅의 두께는 30 μm 이 적정한 것으로 알려져 있으며 이에 따라 액적의 지름은 20 μm 보다 작도록 모델링 하였다. 상기의 식과 주어진 조건을 바탕으로 하여 작동 주파수는 40 kHz로 결정되었다.

제안된 진동자의 진동을 축 방향의 단축 진동으로 가정하면 얇은 막의 축 방향 진동 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\rho A(x)\ddot{u} - [EA(x)u']' = 0 \quad (11)$$

이 식을 $EA(x)$ 로 나누면,

$$\frac{1}{A(x)} [EA(x)u']' = \frac{\rho}{E} \ddot{u} \quad (12)$$

이 된다. 여기서,

$$u = u(x, t) = U(x)T(t) \quad (13)$$

$$\sqrt{\frac{E}{\rho}} = c \quad (14)$$

의 식 (13)과 (14)를 이용하고 위치에 따라 단면적이 변하는 것을 고려하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{c^2}{U(x)} \left(U(x)'' + \frac{1}{A(x)} A(x)' U(x)' \right) = \frac{\ddot{T}(t)}{T(t)} = -\omega^2 \quad (15)$$

$$U(x)'' + \frac{1}{A(x)} A(x)' U(x)' + \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 U(x) = 0 \quad (16)$$

$$\ddot{T}(t) + \omega^2 T(t) = 0 \quad (17)$$

$$U(x) = \frac{1}{\sqrt{A(x)}} (A \sin Kx + B \cos Kx) \quad (18)$$

$$T(t) = e^{\pm i\omega t} \quad (19)$$

여기서, $U(x)$ 는 변위 함수이며, x 는 축 방향 위치,

$A(x)$ 는 단면적이다. A, B, K 는 초기조건에 따른 비례상수이다. 위의 공식에 기초하여 초음파 진동자 모델의 전체 길이(l_e)는 62.3 mm로 결정되었다. 전체적인 초음파 진동자의 크기를 줄이기 위해서 전방 질량과 혼을 결합한 모양의 진동자를 설계하였다. 초음파 진동자의 단면도가 Fig. 2에 도시되어 있다. 혼의 치수는 임의로 초기값이 결정되었으며 다음과 같다. $l_h=26$ mm, $a=2$ mm, $b=4.5$ mm. 초음파 진동자는 두 개의 압전 세라믹을 이용하여 가진 하게 되는데 그 두께(t_p)는 5 mm이다. 두 개의 압전 디스크타입 세라믹을 분극방향이 마주보도록 겹쳐서 그사이에 전극을 연결하고 전방 질량에 볼트를 이용하여 후방 질량을 결합하는 형태로 되어 있다. 압전 세라믹은 볼트를 이용하여 pre-load가 가해져 있다. 모든 재료는 부식 방지를 위해 스테인리스 철을 사용하였다. 진동자의 끝 부분은 평면모양, 미세노즐, 콘 모양 등 여러 가지 모양을 적용할 수 있으며 분무를 넓게 하기 위해서 콘의 모양으로 적용하였다.

이 연구에서 초음파 발진을 위해 사용한 압전 세라믹은 FUJI CERAMICS사의 C-203 모델이다. 압전 재료의 전기적, 기계적 관계는 다음과 같다^(7,8).

$$D = dT + \varepsilon^T E \quad (20)$$

$$S = s^E T + dE \quad (21)$$

여기서, T 는 응력 벡터이며 D 는 전기적 변위 벡터이다. S 는 변형률 벡터를 나타낸다. ε 는 일정한 변형률에서의 유전상수를 s^E 는 일정한 전기장에서의 컴플라이언스 행렬을 각각 나타낸다. 이러한 행렬들은 다음과 같다.

$$s^E = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(s_{11} - s_{12}) \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{13} \end{bmatrix} \quad (24)$$

식 (20)과 (21)에서 최소 포텐셜 에너지 원리를 이용한 시스템의 운동 지배방정식을 구하면 다음과 같다.

$$[M_{uu}]\{\ddot{u}\} + [K_{uu}]\{u\} + [K_{u\Phi}]\{\Phi\} = F_B + F_S + F_P \quad (25)$$

$$[T_{u\Phi}^T]\{\ddot{u}\} + [K_{\Phi\Phi}]\{u\} + [K_{u\Phi}]\{\Phi\} = Q_S + Q_P \quad (26)$$

여기서,

$$[M_{uu}] = \iiint N_u^T N_u dV \quad : \text{질량행렬}$$

$$[K_{uu}] = \iiint B_u^T B_u dV \quad : \text{강성행렬}$$

$$[K_{u\Phi}] = \iiint B_u^T d^t B_\Phi dV \quad : \text{압전 결합행렬}$$

$$[K_{\Phi\Phi}] = \iiint B_\Phi^T \varepsilon^S B_\Phi dV \quad : \text{절연 강성행렬}$$

F_B : 체적력(body force)

F_S : 표면력(surface force)

F_P : 점 하중(point force)

$Q_S + Q_P$: 전기적 표면력

압전 세라믹으로 사용 되어 지는 PZT의 물성 값은 Table 1과 같다.

이것을 ANSYS를 이용하여 해석하기 위해서는 압전 상수와 유전 상수를 분극 방향에 맞추어 입력해 주어야 한다. 이 논문에서는 분극 방향을 y 축 방향으로 맞추었으며 다음과 같은 물성 값을 입력하였다.

$$d = \begin{bmatrix} 0 & 89.3 & 0 \\ 0 & -39.1 & 0 \\ 0 & 89.3 & 0 \\ 25.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 25.3 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} 1470 & 0 & 0 \\ 0 & 1450 & 0 \\ 0 & 0 & 1470 \end{bmatrix} \quad (28)$$

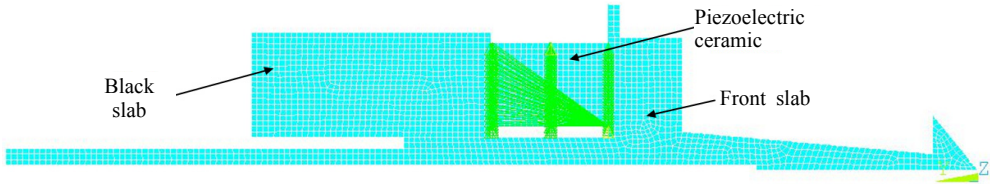
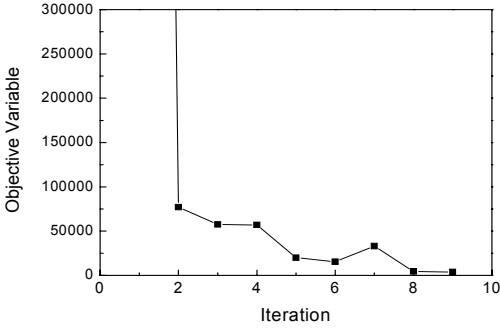
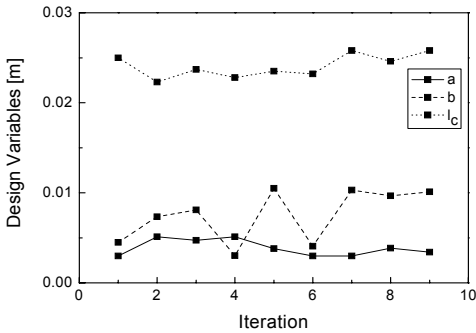


Fig. 3 The finite element model of vibrator



(a) Objective function



(b) Design variables

Fig. 4 Optimization results

Table 1 Property of PZT

Elastic stiffness [N/m ²]	Piezoelectric constants [C/m ²]	Permittivity constants [F/m ²]
$s_{11}=7.2 \times 10^{10}$	$d_{31}=89.3$ $d_{33}=-39.1$ $d_{15}=25.3$	$\epsilon_{11}=1470$ $\epsilon_{22}=1450$ $\epsilon_{33}=\epsilon_{11}$
$s_{12}=5.3 \times 10^{10}$		
$s_{13}=5.2 \times 10^{10}$		
$s_{33}=6.0 \times 10^{10}$		
$s_{44}=2.3 \times 10^{10}$		
Density [kg/m ³]	Poisson's rate	
7700	0.29	

입력 전압은 실제 사용하는 0 V~100 V의 범위에서 해석했다. 모델링과정에서 PZT의 분극 방향을 y축 방향으로 지정하였기 때문에 전기장 방향도 y축 방향이 되도록 하였다.

3. 초음파 진동자의 설계 및 해석

초음파 진동자는 Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 볼트를 이용하여 pre-load가 가해지도록 조립하였다. 동적 해석을 위해 상용 유한요소 해석 소프트웨어인 ANSYS를 사용하였다. 정확한 시뮬레이션을 하기 위해서 pre-load를 적용하기 위해 압전 세라믹에는 35 MPa의 압력을 가하였다. 압전 세라믹은 두 개의 디스크 타입을 분극 방향이 마주 보도록 설치되어 진동 시에 서로 반대로 작동하도록 설계되어 있다. 진동자의 구조가 축 방향 대칭이기 때문에 평면의 진동자 모델이 사용되었다. 평면의 모델을 사용함으로써 계산시간을 상당량 단축시킬 수 있었다. 압전 세라믹을 시뮬레이션 하기 위해 평면요소 13을 사용하였으며 나머지 재료들을 위해서는 평면요소 42를 사용하였다. Harmonic해석을 위해서 35 kHz에서 60 kHz사이의 0 V에서 최대 100 V의 싸인파의 전압을 인가하였다. 이 연구에서는 modal해석과 harmonic해석을 수행하였다. Modal해석에서는 초음파 진동자의 자유진동수를 해석하였으며 harmonic해석에서는 전압인가에 따른 진동자의 동적 특성을 해석하였다. 진동자의 유한요소 모델은 Fig. 3에 도시하였다. 진동자 끝 단의 변위를 증대시키기 위해 혼의 구조에 한하여 최적화를 수행하였다. 혼의 길이(l_h), 단면적의 최대 최소 길이(a, b)가 설계 변수로 선정하였으며 진동자 끝 단의 변위를 목적 함수로 선정하였다. 최적화는 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 수행하였다. 최적화에 사용된 기법은 sub-problem approximation method이다. 최대 연산횟수는 15회로 결정하였다. 최적화의 결과는 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 목적 함수의 최소화 과정을 나타내었다. 최적화 결과로부터 목적 함수의 값이 연산을 반복함에 따라 최소값으로 수렴함을 확인할 수 있다. Fig. 4(b)는 설계변수를 나타내었다. 최적화 실행 후 진동자 끝 단의 변위는

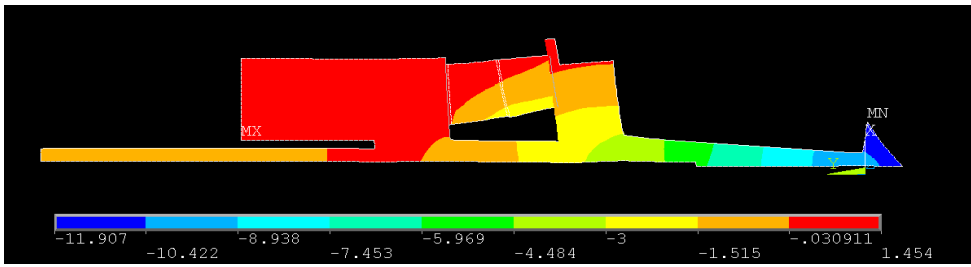


Fig. 5 Mode shape at 41.08 kHz

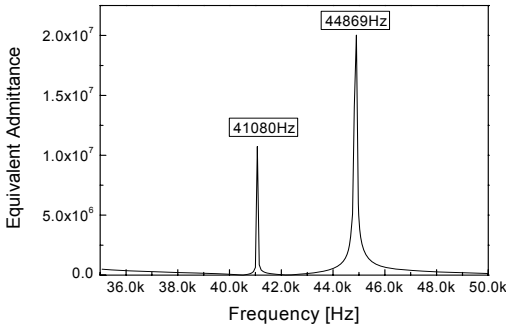


Fig. 6 Equivalent admittance

20% 증가되었으며 혼의 치수는 각각 $l_h=25.8$ mm, $a=3$ mm, $b=10$ mm으로 결정 되었다. 35 kHz와 50 kHz사이에는 두 개의 축 방향 진동 모드가 존재하며 값은 각각 41.08 kHz와 44.87 kHz이다.

앞서 언급했듯이 40 kHz 이상의 작동 주파수를 결정해야 하기 때문에 41.08 kHz로 결정하였다. 41.09 kHz에서의 모드 형상은 Fig. 5에 도시하였다. Fig. 6은 주파수에 따른 equivalent admittance을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 41.08 kHz와 44.87 kHz 두 주파수에서 높은 값을 나타냄을 알 수 있다.

이 연구에서 분무의 유동 특성은 상용 프로그램인 FLUENT를 이용하여 해석하였다. GAMBIT을 이용하여 초음파 진동자 부분과 분무가 유동하는 부분을 모델링 하였으며 중력장의 영향을 받아 액적이 낙하하도록 설정하였고 에너지 기법을 이용하여 계산하였다. 대표적으로 물과 실리콘 그리고 Ethylene-glycol을 시뮬레이션 하였다. 물(점도: 1 cp)의 경우, 유량은 0.0029 kg/s이며 액적의 평균 낙하 속도는 0.19 m/s이다. 액적의 평균 지름은 0.010 mm이다. 실리콘(점도: 7000 cp)의 경우, 유량은 0.0045 kg/s이며 액적의 평균 낙하 속도는 0.26 m/s이다.

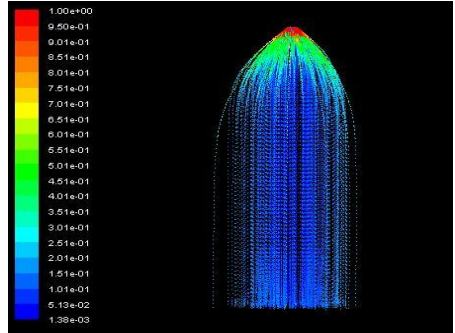


Fig. 7(a) A velocity distribution of droplet(water)

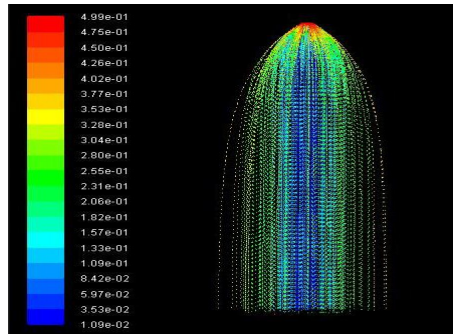


Fig. 7(b) A velocity distribution of droplet(silicon)

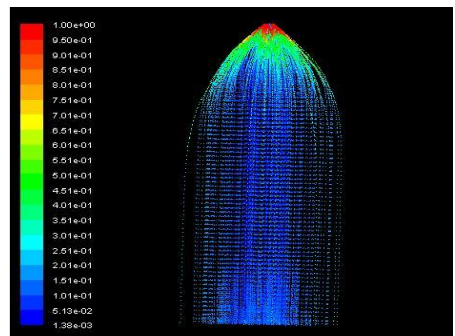


Fig. 7(c) A velocity distribution of droplet(ethylene-glycol)

액적의 평균 지름은 0.019 mm이다. Ethylene-glycol (점도: 21.4 cp)의 경우, 유량은 0.0031 kg/s이며 액적의 평균 낙하 속도는 0.20 m/s이다. 액적의 평균 지름은 0.012 mm이다. 시뮬레이션의 결과 중 액적의 낙하 속도를 Fig. 7에 나타내었다. 처음 액적이 유체 필름으로부터 이탈하는 곳(그림의 상단부분)은 속도의 크기가 크다. 이후 공기의 저항을 받으면서 속도가 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 액적의 평균 크기는 점도가 클수록 증가하는 것을 알 수 있다. 유량도 점도가 클수록 증가하는 것으로 보이나 점도의 영향보다는 밀도의 영향으로 판단된다. 물과 실리콘은 분무의 형태와 속도 분포에서 많은 차이를 보이고 있으며 물과 Ethylene-glycol은 큰 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있다. 물과 Ethylene-glycol보다 실리콘(silicon)이 낙하 속도가 크며 분무형태도 물보다 더 넓게 퍼지는 것을 알 수 있다. 이것은 실리콘의 높은 점도와 밀도에 기인하는 것으로 판단된다. 점도로 인하여 유체 막이 더 넓게 분포하면서 분무 형태가 더 넓어지는 것이다.

4. 결 론

이 연구에서는 LED 공정에서 코팅에 사용되는 스프레이를 위한 새로운 형태의 초음파 진동자를 제안 하였다. 제안한 초음파 진동자는 압전 세라믹이 구동기로서 사용 되었다. 디스크 타입의 세라믹을 분극 방향이 서로 마주보도록 하여 전압 인가 시에 서로 반대 방향으로 작동하도록 하였다. 빔의 축 방향 진동식과 liquid film surface pattern theories를 이용하여 진동자를 모델링 하였다. 재료는 부식방지를 위해 스테인리스 철을 사용하였다. 초음파 진동자의 동역학적 특성은 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 해석하였다. 진동자의 효율을 높이기 위해 최적화를 수행하였으며 혼의 치수를 설계 변수로 선정하고 진동자 끝 단의 변위를 목적 함수로 선정하여 최적화를 실행하였다. 최적화 결과 진동자 끝 단의 변위는 20% 증가하였다. 진동자의 해석결과를 바탕으로 유체의 분무 형태에 관한 시뮬레이션도 수행하였다. 시뮬레이션에는 상용 전산 유체 프로그램인 GAMBIT과 FLUENT를 이용하였다. FLUENT를 이용하여 액적의 평균 지름, 낙하 속도, 유량 등의 값을 예측하였으며 분무형태에 대

해서도 예측해 볼 수 있었다.

후 기

이 연구는 한국 산업기술 평가원(Korea Evaluation Institute of Industrial Technology)의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Dobre, M. and Bolle, L. 1999, "Visualisation and Analysis of Liquid Film Surface Patterns Formed on Ultrasonic Atomisers," TILASS-Europe'99.
- (2) Amin, S. G., Ahmed, M. H. M. and Youssef, H. A., 1995, "Computer-aided Design of Acoustic Horns for Ultrasonic Machining Using Finite-element Analysis," J. mater. Process. Technol. pp. 254-260.
- (3) Dobre, M. and Bolle, L., 1999, "Theoretical Prediction of Ultrasonic Spray Characteristics Using the Maximum Entropy Formalism," ILASS-Europe'98.
- (4) Dobre, M. and Bolle, L., 2002, "Practical Design of Ultrasonic Spray Devices: Experimental Testing of Several Vibrator Geometries," Experimental Thermal and Fluid Science, pp. 205-211.
- (5) Sherrit, S., Dongin, B. P., Bar-Cohen, Y., Pal, D., Kroh, J. and Peterson, T., 1999, "Modeling of Horns for Sonic/ultrasonic Applications," Proceedings of IEEE Ultrasonic Symposium, pp. 647-651.
- (6) Lang, R. J., 1962, "Ultrasonic Atomization of Liquids," J. Acoust. Soc. Am. 34, pp. 6-8.
- (7) Wang, F. J., Zhao, X. Y., Zhang, D. W. and Wu, Y. I., 2009, "Development of Novel Ultrasonic Transducers for Microelectronics Packaging," Journal of Materials Processing Technology, pp. 1291-1301.
- (8) Lee, H. S. and Cho, C. D., 2003, "Finite Element Analysis of a Piezoelectric Actuator," Proceedings of the KSME Annual Autumn Conference 2003, pp. 1401-1405.
- (9) Kim, I. K., Hong, S. H. and Lee, S. I., 2008, "Vibration Analysis of Ultrasonic Horn for Flip-chip Bonding," Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 364-367.