

액체 연료의 분무를 위한 압전 세라믹 진동자의 설계 및 동작 특성

The Design and Driving Characteristics of Piezoelectric Ceramic Oscillator for Spraying of Liquid Material.

이수호*, 석정영*, 류기홍*, 김한근**, 김진규***, 류주현#, 사공건###

(S. H. Lee, J. Y.Seok, G. H. Ryu, H. G. Kim, J. G. Kim, J. H. Yoo, G. Sa-Gong)

Abstract

The application of the ultrasonic nozzle has been extended because it is possible atomization of liquid material. In this study, the characteristics of the ultrasonic nozzle and ceramic oscillator were investigated. The oscillator for the ultrasonic nozzle were made piezoelectric ceramic of $Pb[(Sb_{1/2}Nb_{1/2})_{0.035}-(Mn_{1/3}Nb_{2/3})_{0.065}-(Zr_{0.49}Ti_{0.51})_{0.96}]O_3$. The electromechanical coupling factor(k_p) and mechanical quality factor(Q_m) showed the values of 0.555, 1,214 respectively when the Zr/Ti ratio was 49/51. Moreover, this oscillator will have the temperature stability because it's curie temperature is 322[°C].

The driving current of ultrasonic nozzle showed the value of 80[mA] when the driving time was 10[min.]. Also, The surface temperature of ceramic oscillator showed 80[°C] at driving time 10[min.]. We knew that the ultrasonic nozzle had stable driving above 10[min.].

Key Words : Ultrasonic nozzle, Aerosol, Ceramic Oscillator

1. 서 론¹⁾

최근 산업의 발달에 따라 액체 연료의 사용이 증가하고 있다. 따라서 액체 연료의 효율적인 사용을 위하여 액체 연료의 미립 입자화로 만들어 사용하고 있다. 기존의 액체 연료의 미립화를 위해서는 고압 펌프를 이용하여 tip부분의 가는 구멍으로 액체 연료를 압출 방법으로 분사시키는 기계적인 방법을 사용하고 있다. 따라서 이러한 방법은 분사구의 구조와 압력에 따라 분무 액체 표면적의 불균일성과 고르지 못한 입경에 의해 연소에너지를 이용할 시에는 불안정 연소가 발생하며, 이로 인해 공해발생과 효율이 떨어지는 문제점을 가지며, 또한 부품의 도포공정에 사용한다면, 도포표면이 거칠게 되는 단점을 가진다. 그러나 초음파를 사용하여 액체연료를 분무할 시에 균일한 입경과 미립화가 용이하여 에너지 절약과 공

해방지등을 할 수 있으며, 또한 유속과 유량에 관계 없이 이용할 수 있기에 반도체 분야의 반도체 웨이퍼와 평판 표시기상에 사진 석판용 화학물질의 균일도포, 컴퓨터 하드디스크의 광택제 도포등에 사용할 수 있다. 또한 의학/생의학분야에 약품의 분사 건조, 진단 시험키트에 대한 코팅등에 응용이 가능하며 또한 초저의 유출 용량을 요구하는 모든공정 및 액체 연료의 분사가 요구되는 모든 산업에 적용할 수 있다. 초음파를 사용하여 액체를 분무시키는 방법으로는 초음파 진동자 표면에서 직접 진동에너지를 전달 받아 액체가 분무되는 것과 일정한 유속이 있는 곳에서 액체 연료 전부에 대한 진동을 가하여 액체의 표면 부분에서 분무가 일어나는 것이 있다. 본 실험에서는 두 번째 방법을 사용하였으며, 이는 일정시간당 공급되는 액체 연료를 분무시키기에 적당한 방법으로 생각된다.

초음파 노즐(nozzle)에 대한 연구로는 Mochida¹⁾와 Berger²⁾등이 70년대 말에 보고 되었으며, 또한 Nakayama³⁾등은 초음파를 사용하여 균일한 입경 생성에 관한 보고를 하였다. 또한 Hiroyas⁴⁾등은 초음파 분사공에 대하여 보고하였다. 그러나 이는 노즐의 기계적인 메카니즘에 대한 연구로서 초음파 진동

* : 경북대학교 전자전기공학부
(Tel.:053-950-7321, leesuho@knu.ac.kr)

** : 경남정보대학 제어계측과

***: 상주대학교 전자전기공학부

: 세명대학교 전기공학과

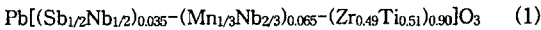
: 동아대학교 전기공학과

을 이용하여 액체 연료의 분무 효율을 향상시키기 위해서는 노즐의 기계적인 메카니즘과 더불어 진동자의 특성향상이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 초음파 진동자로서 응용을 위한 압전 소자⁵⁻⁶⁾의 개발을 통하여 얻어진 압전 진동자를 이용하였으며, 사용되어지는 액체 연료의 요구조건에 맞는 초음파 노즐의 형상의 변화에 따른 분무특성을 검토하였으며, 액체 연료의 조건 변화에 따른 노즐의 구동 안정성 등을 검토하였다.

2. 실험

2.1 초음파 진동자의 제조

초음파 진동자로서의 기계적인 구동을 하기에 온도 안정성 및 기계적인 강도가 중요하다. 따라서 본 실험에서는 큐리온도가 300[°C] 이상이 되는 PZT 계열의 세라믹에 제반 특성을 향상시키기 위해 PMN과 PSN을 치환하여 다음과 같은 조성식으로 제조하였다⁶⁾.



2.2 초음파 노즐의 제작

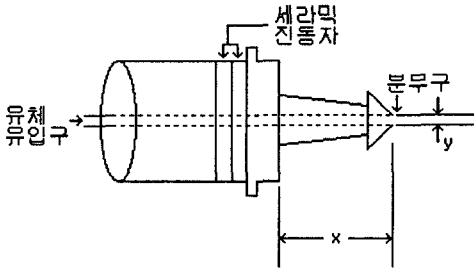


그림 1. 초음파 노즐의 모양
Fig. 1. Form of ultrasonic nozzle.

제조된 초음파 진동자를 사용하여 그림 1과 같은 초음파 노즐을 제작하였다. 노즐의 설계시 세라믹 진동자에 최대 진동이 전달될 수 있도록 하였으며, tip부분은 분무시 분무 범위를 넓게 하기 위하여 45°의 각을 주고 처리하였다. 또한 액체 연료의 분무시에 기계적인 동작 특성을 알기 위하여 노즐의 길이를 변화시켰으며, (x: 22, 27, 32, 37mm) 또한 노즐의 분사구의 크기에 (y: 1.6, 1.8, 2.0, 2.2mm) 다른 분무 특성을 검토하였다.

3. 초음파 노즐의 분무 배경 이론

액체 연료의 분무를 설명하기 위하여 액체가 노즐에 유입되어 분무되어 나가는 동안의 에너지 관점에서 정리하였다. 따라서 분무현상을 설명하기 위하여 세라믹 진동자가 한번 진동할 시에 액체 연료 입자가 노즐의 관벽에 한번 충돌한다고 가정하였다. 우선 입자가 한번 충돌시에 받는 에너지는 식 (2)와 같다.

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta P^2}{2m_d} = \frac{(F_c \tau_d)^2}{2m_d} \quad (2)$$

여기서 m_d 는 입자 하나의 질량을 의미하며, τ_d 는 입자 하나의 충돌 시간, F_c 는 입자 하나가 받는 힘의 세기를 말한다. 또한 세라믹 진동자를 사용할 시에 F_c 와 τ_d 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_c = \frac{P}{A} = \frac{CV}{A} = m_d a_d \quad \tau_d = \frac{2r_d}{a_d} = \frac{2r_d m_d}{F_c}$$

여기서 A 는 세라믹 진동자의 단면적, C 는 세라믹 진동자의 형상비와 압전정수(g_{33})의 곱을 나타낸다. 또한 V 는 인가되는 전압을 r_d 는 액체 입자의 반경을 의미한다. 따라서 F_c 와 τ_d 를 식 (2)에 대입하여 입자가 한번 충돌시에 받는 에너지는 식 (3)과 같이 정리할 수 있다.

$$\Delta \varepsilon_{cl} = \frac{F_c^2}{2m_d} \frac{2r_d m_d}{F_c} = F_c R_d \quad (3)$$

$$\Delta \varepsilon_{cl} = \frac{C r_d V}{A}$$

또한 입자 하나가 노즐의 관을 지나면서 총 충돌횟수를 식 (4)와 같이 생각할 수 있다. 따라서 총 충돌 에너지는 식 (5)와 같이 정리 된다.

$$N = \frac{2lf}{v_\eta} \quad (4)$$

$$\Delta \varepsilon_{cN} = \frac{2C r_d V l f}{A v_\eta} \quad (5)$$

여기서 f 는 세라믹의 진동주파수이며, l 은 노즐 관의 길이이다. 또한 v_η 는 액체의 관속 유속을 나타낸다. 그리고 점도 및 운동을 하고 있는 유체는 전달되는 진동에너지를 축소하는 역할을 하게 된다. 따라서 이를 고려하여 식 (5)를 재정리하면 식 (6)과 같이 된다.

$$\Delta E = \Delta \varepsilon_{cN} - \frac{1}{2} m_d v_\eta^2 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (6)$$

여기서 t/τ 를 유체의 밀도와 점성의 관계식에 의해 아래의 식 (7)과 같이 표현할 수 있다. 이렇게 표현된 식 (7)를 식 (6)에 대입하여 정리하여 얻어진 식 (8)의 에너지가 일정한 점성을 가지는 유체의 결합에너지보다 커야 입자의 분리를 얻을 수 있다.

$$\tau = \frac{b}{m_d}, \quad t_l = \frac{l}{v_\eta} \quad (7)$$

$$\frac{t_l}{\tau} = \frac{m_d l}{b v_\eta} = \frac{\frac{4}{3} \pi r_d^3 \rho l}{6 \pi \eta r_d v_\eta} = \frac{2l r_d^2 \rho}{9 \eta v_\eta}$$

여기서 η 는 액체의 점성계수이며, ρ 는 액체의 밀도이다.

$$\Delta E = \frac{2C r_d V l f}{A v_\eta} - \frac{1}{2} m_d v_\eta^2 (1 - e^{-\frac{2l r_d^2 \rho}{9 \eta v_\eta}}) > 0 \quad (8)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 초음파 진동자의 특성

초음파 노즐을 구동시에 기계적인 진동을 이용하므로 많은 열을 발생시켜 노즐의 표면 온도가 상승하

여 세라믹 진동자에도 그 영향을 미치게 되어 열적 열화 현상이 일어날 수 있기에 높은 큐리 온도를 가지는 세라믹 진동자가 중요하다. 따라서 PSN-PMN-PZT 세라믹스를 이용하여 세라믹 진동자를 제작하였으며, 이에 대한 보고는 이전에 발표하였다.⁶⁾ 표 1에 나타난 제반 특성들을 검토하여 세라믹 진동자로서 가장 적당할 것으로 생각되는 Zr/Ti의 비가 49/51인 재료를 선택하였다.

표 1. PSN-PMN-PZT 세라믹스의 특성

Table 1. Properties of PSN-PMN-PZT Ceramics

| Sample Zr/Ti | Dielectric constant | K _p | Q _m | E _c [kV/cm] | T _c [°C] | Grain size[μm] |
|--------------|---------------------|----------------|----------------|------------------------|---------------------|----------------|
| 51/49 | 1130 | 0.560 | 1104 | 10.5 | 303 | 1.51 |
| 50.5/49.5 | 1065 | 0.562 | 1089 | 11.43 | 311 | 1.91 |
| 50/50 | 1065 | 0.562 | 1040 | 11.75 | 313 | 2.05 |
| 49.5/50.5 | 1257 | 0.562 | 713 | 11.93 | 318 | 2.20 |
| 49/51 | 1228 | 0.555 | 1214 | 12.06 | 322 | 1.79 |
| 48/52 | 1159 | 0.525 | 1419 | 13 | 331 | 2.20 |

3.2 초음파 노즐의 특성

초음파 노즐의 구동을 위하여 그림 6과 같은 구동 회로를 설계하여 시간당 유량 0.9l/hr를 공급하여 분무의 정도를 확인하였으며, 상온에서의 공진주파수 42[KHz]로 구동시켰다.

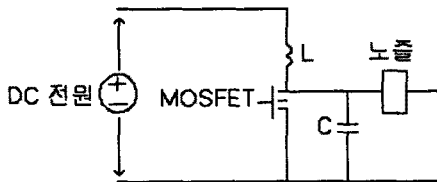


그림 2. 초음파 노즐의 구동회로
Fig. 2. Driving circuit of ultrasonic nozzle.

기계적인 진동을 이용하는 노즐의 경우 구동시에 발생하는 진동자의 표면 온도가 중요하다. 따라서 그림 3은 초음파 노즐의 구동시에 세라믹 진동자의 표면 온도 상승을 나타내고 있다. 여기서 1차, 2차 구동 모두 유량 0.9[l/hr] 공급시이며, 2차구동은 1차 구동후 10분간 동작을 정지시킨 후 재동작 시킨 것을 의미한다. 세라믹 진동자의 표면 온도는 최대 74 [°C] 정도로 유지되어 장시간 구동시에도 문제가 없을 것으로 생각된다. 또한 최대 유량을 공급하여 분무시키는 경우 세라믹 진동자의 표면 온도가 145[°C] 까지 증가하여 분무 유량의 증가를 위해서는 노즐의 기계적인 구조의 변화가 필요하다. 따라서 유도된 식 (8)에 의해 진동에너지의 증가는 노즐의 길이

비례하므로 그림 4에는 초음파 노즐의 길이 변화에 따른 최대 분무량을 나타내었다. 유도된 식 (8)과 잘 일치함을 알 수 있었다.

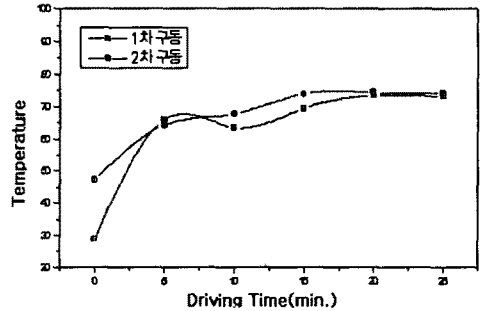


그림 3. 구동시간에 따른 진동자의 표면 온도.
Fig. 3. Surface temperature of oscillator with driving time.

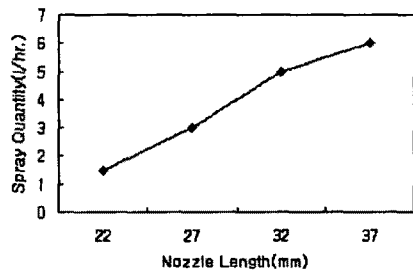


그림 4. 노즐의 길이에 따른 분무량.
Fig. 4. Spray quantity with nozzle length.

그림 5는 구동시간에 따른 소비전류를 나타낸 것으로 1, 2차 구동 모두 약 80mA의 낮은 소비전류를 나타내었다. 그러나 유속이 빠른 경우 분무를 위한 소비전류는 점차 증가하였으며, 또한 유체의 점도가 높아 질수록 소비전류가 증가함을 알 수 있었는데, 이를 그림 6에 유속의 변화에 따른 소비전류를 나타내었다. 이는 식 (8)에서 유도된 것과 같이 유속이 진동에너지의 전달에 반비례하므로 분무에 필요한 에너지가 커지기 때문으로 생각된다.

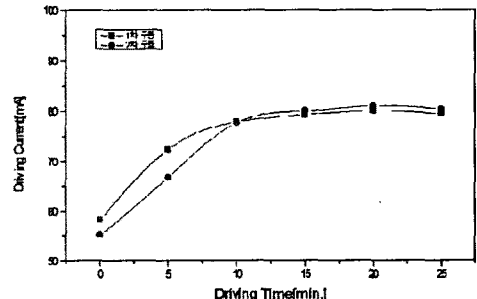


그림 5. 구동 시간에 따른 구동전류
Fig. 5. Driving current with driving time.

그림 7는 초음파 노즐의 소비전력을 나타내고 있다. 소비전력도 세라믹 진동자의 온도가 상승되는 10분 정도까지의 증가를 나타내다가 온도가 포화되기 시작하면 소비전력도 18.5[W]로 일정한 값을 나타내고 있다. 2차구동시에 소비전류와 소비전력 모두 1차구동시보다 다소 낮은 값에서 출발하는데 이는 세라믹 진동자의 표면온도가 1차 구동에 의해 이미 가열이 되어 있어 1차 구동시 처럼 순간 과전류가 흐르지 않고 임피던스에 의해 소비전류가 유도되기 때문이라 생각된다. 또한 액체 연료의 점도의 변화에 따른 소비전류의 변화와 온도의 변화에 따른 노즐의 구동 특성등을 검토하였다.

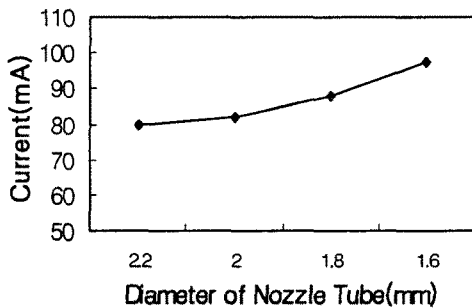


그림 6. 노즐의 관의 크기에 따른 구동전류
Fig. 6. Driving current with diameter of nozzle tube.

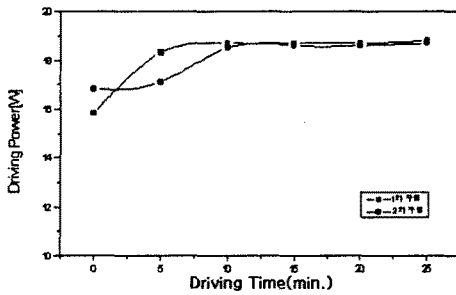


그림 7. 구동시간에 따른 구동전력
Fig. 7. Driving power with driving time.

4. 결론

초음파 노즐의 기계적인 구조의 변화에 따른 분무특성을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 초음파 노즐을 구동시킬 때 세라믹 진동자의 표면 온도가 10분 이후부터 약 75[°C]로 포화되어 온도의 안정성을 기대할 수 있었다.
2. 초음파 노즐의 분무 유량의 증가를 위해서는 노즐의 길이의 변화에 따라 가능함을 알 수 있었다.

3. 초음파 노즐의 구동시에 소비전류 약 80[mA]로 비교적 낮은 소비전류를 나타내었다. 그러나 유속의 증가에 따라 소비전류는 증가하였다.

4. 노즐의 구동전력이 약 18[W]로 낮아 에너지 효율을 향상시킬수 있을 것으로 기대되었다.

위에서 얻어진 결과들이 분무에 필요한 에너지의 유도식과 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. 따라서 최적의 초음파 노즐의 제작을 위하여 식 (8)을 적용할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 초음파 노즐의 응용을 위해서는 액체 연료의 분무 입자 크기, 실질적인 연소와 도포 등의 실험을 통하여 효율에 대한 고찰이 필요하며, 이는 지속적인 실험을 통하여 검토하고자 한다.

참고 문헌

- [1] Mochida T. "Ultrasonic Atomization of Liquids" Proc. 1st Inter. Con. on Liquid Atomization and Sprays(ICLAS-78), pp.193~200, 1978.
- [2] Berger H. L., "Characterization of a Class of Widely Applicable Ultrasonic Nozzle", Proc. 3rd Inter. Con. on Liquid Atomization and Spray Systems(ICLAS-85), 1985.
- [3] M. Nakayama, "Study of Uniform Liquid Droplet Formation by Ultrasonic Vibration", JSME(B), Vol. 52, No. 482, 1986.
- [4] 廣安博之, "超音波噴射に関する研究", 日本機械學會論文集(B), 51卷, 475号, 1985.
- [5] 이수호, 민석규, 윤광희, 류주현, 사공건, "구동회로에 따른 초음파 노즐의 분무 특성", 한국전기전자재료학회 하계학술대회논문집, 2001.
- [6] 이수호, 민석규, 윤광희, 류주현, "초음파 진동자용 압전세라믹스의 유전 및 전기적 특성", 한국전기전자재료학회 추계학술대회논문집, 2000.