

압전 세라믹 진동자를 이용한 초음파 분무기의 분무 특성

The Characteristics of an Ultrasonic Sprayer by using Piezoelectric Ceramic Resonator

배상태¹, 이수호^{2a}, 석정영², 김철환³, 사공건¹
(Sang-Tae Bae¹, Su-Ho Lee^{2a}, Jeong-Young Sug², Cheol-Hwan Kim³, and Geon Sa-Gong¹)

Abstract

The conventional ultrasonic nozzle produces a mist by applying an ultrasonic vibration into a non-flowering liquid. In this paper, we first present a novel designed nozzle type sprayer that is able to apply an ultrasonic vibration directly to the moving liquid and generate a mist instantly. For the novel nozzle, a ring-type actuator of the novel nozzle was designed and built using the PZW-PMN-PZT ceramics. This paper will describe a variety of physical, mechanical, and electrical characteristics of the ultrasonic nozzle. The characteristics of the mist particles was also measured as the amount of the outflow liquid was varied.

Key Words : Piezoelectric ceramics, Ultrasonic ring-type sprayer, Atomizing particles

1. 서론

압전 세라믹스를 이용한 각종 부품의 개발과 센서에서의 활용은 지금까지 꾸준히 연구되어져 일본 NEC, TOKIN 및 독일의 INNOTICS 등은 50[lpm] 성능정도의 압전 밸브 및 압전 펌프와 같은 각종 응용제품에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 기본적인 세라믹의 특성 개선과 더불어 이를 활용할 수 있는 기술의 개발은 바로 국가 산업에 이바지할 것이며 기술 경쟁력을 높일 수 있으므로 세라믹 응용 제품에 대한 연구개발의 필요성이 더욱 필요하다고 할 수 있다[1-3].

한편 유가의 급등으로 국내외에 매장량이 풍부하고 수급면에서 안정적인 에너지원으로서 석탄 활용에 대한 기대가 높아지고 있으나, 고체 연료를 액체 연료화 하기 위한 기술적인 적용에 대해서는

문제점이 지적되고 있다. 그러나 보다 효과적인 방안을 찾을 수 있다면 현재의 어려운 에너지 상황이 상당히 개선할 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 초음파 노즐을 사용하여 고체 에너지원을 분쇄화시켜 액체 연료와 같이 사용할 경우 해결이 가능할 것으로 기대된다. 따라서 분사구의 크기가 넓은 초음파 노즐에 대한 기술 개발이 필수적이라 할 수 있다.

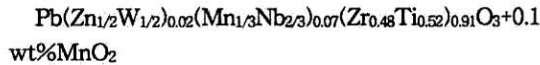
현재 연료 분사 및 유동 중인 유체를 직접 분사하기 위한 방법으로 고압의 연료 펌프를 이용하여 tip부분의 가는 구멍으로 액체 연료를 압출시키는 방법과 분출가스를 이용하는 spray식 분사방법으로 대별되고 있다. 그러나 이러한 방법 모두가 tip의 구조 및 크기와 압력에 따라 분무 액체 표면적의 불균일성은 물론 입경이 고르지 못한 입자가 발생하는 문제점이 있다. 또한 발생 열량 조절을 위한 연료 공급은 tip 부분의 구멍의 크기에 의해 조절되지만 깨끗하지 못한 연료 등으로 인하여 구멍의 막힘 등이 발생하여 장비 시스템의 수명을 단축시키는 결과를 초래하고 있다. 또한 이러한 분무 입자의 불균일성에 의해 연소 시에 불안정 연소가 발생하며, 이로 인해 공해발생과 효율이 떨어지는 문제점을 야기하게 된다.

1. 동아대학교 전기공학과
2. 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부
(대구시 북구 산격동 1370)
3. 울산대학교 전기공학과
a. Corresponding Author : leesuho@knu.ac.kr
접수일자 : 2009. 4. 6
1차 심사 : 2009. 4. 10
심사완료 : 2009. 4. 20

따라서 본 연구는 최근의 국가적인 정책으로 많은 경제적 지원이 이루어지고 있는 에너지 절감 대책과 대기권에 이산화탄소의 배출을 억제하기 위하여 액체 연료의 연소 효율을 높이기 위한 정책에 부합되는 기본적인 연구로 초음파 노즐형 분무기에 대한 분무의 이론적 배경을 제시하여 이를 토대로 분무 입자, 분무거리 및 최대 분무량을 제어하기 위하여 노즐의 길이의 변화를 주었으며, 얻어진 결과를 실제 분무 연소기의 제작을 위한 기본적인 데이터의 축적을 하여 균일하고 미세한 입자를 분무시키는 분무 시스템 개발에 목적을 두고 있다[4].

2. 실험 방법

본 실험에 사용된 압전 세라믹 진동자의 경우 이미 낮은 온도에서 높은 기계적 결합계수와 기계적 품질계수가 높은 아래의 조성을 사용하였다 [5-7].



또한 초음파 노즐 바디의 경우 진동되는 초음파 에너지의 전달을 최대 하기 위하여 탄성계수가 큰 스텐레스 재질의 금속을 선택하였다. 또한 초음파의 발생 강도를 높이기 위하여 세라믹 진동자를 2매 결합하여 그림 1과 같이 병렬로 접합하였으며, 액체의 분무량과 분무 입자의 크기 조절을 위하여 노즐의 길이 X와 분무구의 크기 y의 변화를 두고 제작하였다.

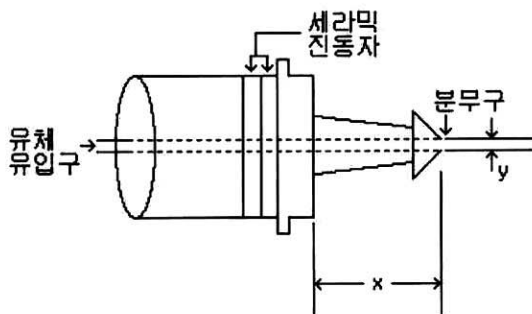


그림 1. 초음파 노즐의 형상.
Fig. 1. Shape of the ultrasonic nozzle.

3. 초음파 노즐의 분무 이론[8]

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 관 벽에 한번 충돌한다고 가정하였다. 우선 입자가 한번 충돌 시에 받는 에너지는 식 (1)과 같다.

$$\Delta \epsilon = \frac{\Delta P^2}{2m_d} = \frac{(F_c \tau_d)^2}{2m_d} \quad (1)$$

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.

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

여기서 A는 세라믹 진동자의 단면적, C는 세라믹 진동자의 형상비와 압전정수(g_{33})의 곱을 나타낸다. 또한 V는 인가되는 전압을 r_d 는 액체 입자의 반경을 의미한다.

따라서 F_c 와 τ_d 를 식 (1)에 대입하여 입자가 한번 충돌 시에 받는 에너지는 식 (3)과 같이 정리할 수 있다.

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

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

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

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

$$\Delta \epsilon_{cN} = \frac{2C r_d V l f}{A v_f} \quad (5)$$

여기서 f 는 세라믹의 진동주파수이며, l 은 노즐 관의 길이이다. 또한 v_f 은 액체의 관속 유속을 나

타낸다. 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.

$$\Delta E = \Delta \epsilon_{cN} - \frac{1}{2} m_d v_{fl}^2 (1 - e^{-\frac{t_l}{\tau}}) \quad (6)$$

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

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

$$\frac{t_l}{\tau} = \frac{m_d l}{b v_{fl}} = \frac{\frac{4}{3} \pi r_d^3 \rho l}{6 \pi \eta r_d v_{fl}} = \frac{2l r_d^2 \rho}{9 \eta v_{fl}} \quad (8)$$

여기서 η 는 액체의 점성계수이며, ρ 는 액체의 밀도이다.

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

따라서 공급에너지의 증가를 위해서는 분무기의 길이를 증가 시킬 필요가 있음을 알 수 있어 기존의 분무기 길이 22 mm를 기본으로 각종 분무 특성을 검토하였으며, 또한, 현 상태의 분무기의 길이(22 mm)를 27 mm, 32 mm, 37 mm로 변화시켜 가며 구동실험을 하였으며, 또한 분무구경에 따른 변화를 동시에 실험하였다.

4. 실험결과 및 고찰

그림 1과 같은 형태의 초음파 노즐에 사용할 압전 세라믹 진동자의 경우 유체에 초음파를 직접 인가해야 하므로 링 모양의 진동자에 기계적 변환 에너지의 발생이 최대로 될 수 있는 단면적을 실험적으로 찾아 제작하였다. 초음파 진동자의 공진 주파수 특성을 알기 위하여 임피던스 특성 곡선을 그림 2에 나타내었다. 이는 위에서 제시한 조성식에 의해 제조한 시편으로 공진주파수는 58.5 KHz

이며, 공진 임피던스는 14 Ω 로 상당히 낮은 값을 얻어 저온 소결에서도 우수한 공진 특성을 얻었음을 알 수 있다.

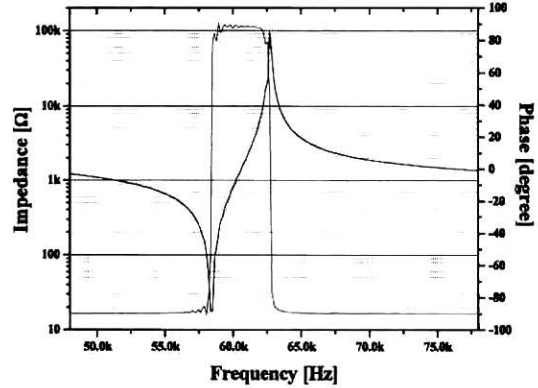
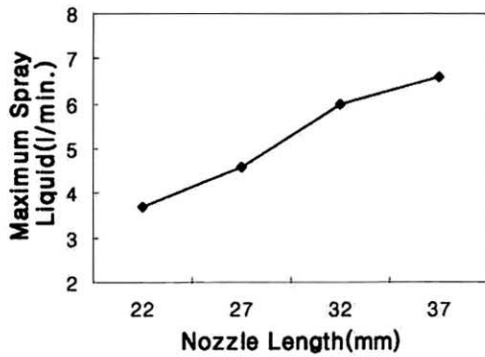


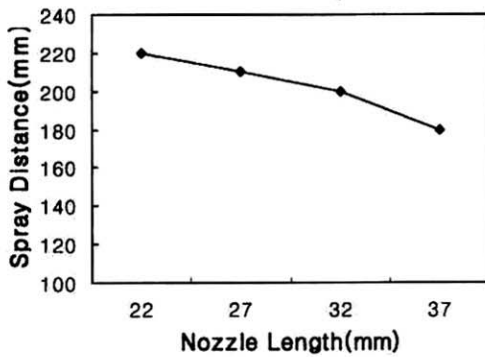
그림 2. 압전 세라믹 진동자의 공진 특성.
Fig. 2. Resonance curve of a piezoelectric ceramic resonator.

그림 3에는 그림 1에 나타낸 초음파 분무기의 형상에서 x 를 변화(22, 27, 32, 37 mm)시켰으며, 이때 공급하는 액체의 경우 같은 높이에서 같은 량의 액체를 공급하여 얻어지는 공진 주파수와 최대 분무량 및 분무거리를 측정하였다. 공진주파수의 경우 길이가 길어질수록 짧아지는 것을 알 수 있다. 이는 두께방향의 공진이 일어나는 경우 공진 주파수는 두께에 반비례하기에 일어나는 현상이라 생각된다. 또한 최대 분무량의 경우 길이가 길어질수록 증가하였으나, 분무거리는 오히려 짧아짐을 알 수 있다. 이는 식 (5)에 의해 분무하고자 하는 액체 연료에 전달되는 최대 에너지는 공진주파수와 분무기의 길이의 곱에 비례하고 있어 분무기의 길이는 증가하였지만 공진주파수의 감소에 의해 액체에 전달되는 에너지가 오히려 줄어들어 분무 입자의 크기가 증가되었기 때문이라 생각된다.

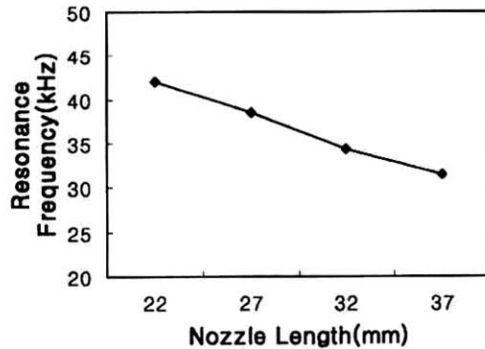
그림 4에는 초음파 분무기를 제작하여 분무시킬 경우 초음파 진동자에서 소비되는 전류와 초음파 분무기 표면에서 발생하는 열을 측정하였다. 발생하는 열은 세라믹 진동자의 열화 현상에 많은 영향을 끼치므로 중요한 요소이다. 우선 진동자에서의 소비전류가 1.8 A 정도로 높은 전류가 소요된다는 것은 joule 열에 의한 진동자의 발생열



(a) 최대 분무량



(b) 분무거리



(c) 공진주파수

그림 3. 초음파 분무기의 형상에 따른 특성.

Fig. 3. Properties depending on shapes of an ultrasonic sprayer.

량이 높음을 알 수 있다. 따라서 소비 전류를 1 A 이하로 떨어뜨리기 위하여 새로운 진동자의 설계가 필요할 것으로 사료된다. 세라믹스 진동자의

주파수에 따른 임피던스 특성곡선은 그림 2에 나타난 것과 같이 변화율이 무척 크다. 따라서 정확한 구동 주파수에서 구동이 되지 않을 경우 소비 전류가 높아지기에 정확한 구동회로의 설계가 필요할 것으로 생각된다. 또한 초음파 분무기의 표면에 발생하는 온도는 80 ℃까지 상당히 빠른 시간에 상승한다. 이는 위에서 언급한 것과 같이 높은 소비 전류에 의한 Joule열과 더불어 기계적인 진동에 따라 발생하는 열이 합쳐져서 높은 온도가 나타남을 알 수 있다.

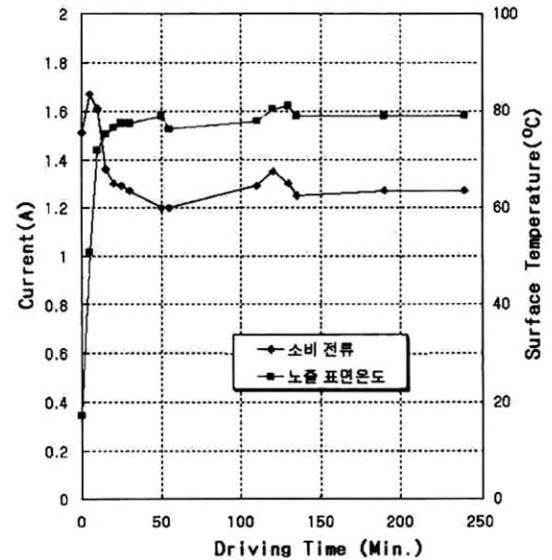


그림 4. 초음파 노즐의 소비전류 및 표면온도.

Fig. 4. Current and surface temperature of an ultrasonic nozzle.

그림 5의 (a)는 최소 분무 입자의 크기를 알기 위하여 5 ml/분, 10 ml/분의 양으로 액체를 공급하였으며, 이때 분무 되는 입자의 크기 분포도를 나타내고 있다. 분무 입자의 크기는 자동입자 측정기 (MALVERN MS-S)를 이용하여 분무구에서 50 cm 떨어져 측정하였다. 분무 입자의 크기는 2 μm 이하부터 20 μm 정도의 크기 분포도를 가지고 있으나, 대부분 5~8 μm 정도의 분무 입자 크기를 알 수 있다. 이는 분무 액체를 일정한 높이에서 높이에너지만을 이용하여 분무기에 공급하였기에 공급량이 작으면, 초음파 분무기의 구멍에 비해 공급 유량이 적어 액체가 초음파 분무기를 지나가는데

소요되는 시간이 많이 요구되어지기에 충분한 초음파 에너지를 받아 초음파 분무기의 tip 부분에서 미세 입자로 분사가 이루어졌다고 생각되어진다. 또한 그림 5의 (b)는 분무량을 최대 560 ml/분 까지 증가시킬 경우 분무량과 분무 입자의 크기를 알기 위한 분무입자의 분포도로 노즐의 tip에서 각각 0.5, 1.0, 1.5 m 떨어져 측정하였다. 분무량이 증가할수록 분무입자의 크기는 증가하는 것을 알 수 있는데 이는 위에서 언급한 것과 같이 유속이 빨라 액체가 초음파 노즐 내에서 머물 수 있는 시간이 적어 액체에 공급되는 초음파 에너지의 량이 상대적으로 적어 분무 입자가 커졌다고 생각된다. 또한 측정거리가 멀어짐에 따라 분무 입경이 크게 나타나고 있는데 이는 분무된 입자가 진행하면서 재결합이 이루어져 나타난 현상이라 생각된다.

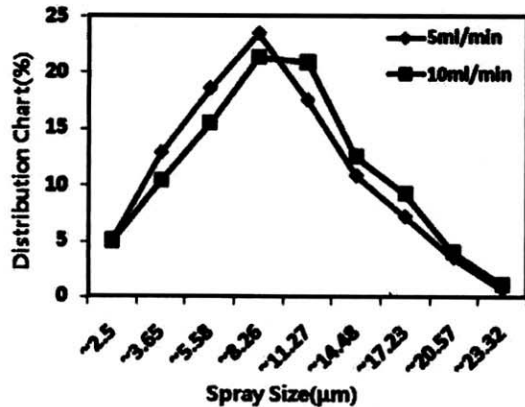
5. 결론

본 연구에서는 우수한 압전특성을 가진 세라믹 진동자로 제작된 초음파 노즐의 길이의 변화에 따른 노즐의 분무특성을 조사하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

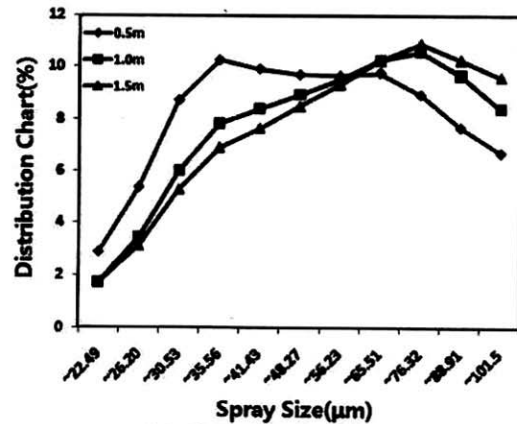
1. 노즐의 길이에 따라 공진주파수가 낮아져 분무 입자의 크기가 증가하였으나 최대 분무량이 증가되었음을 알 수 있었다.
2. 유속을 5 ml/min으로 조절하여 평균 분무 입자의 크기를 8 μm 정도로 균일하게 할 수 있었다. 또한 분무량을 증가 시에는 평균 분무 입자의 크기가 증가되었으며, 560 ml/min으로 할 경우 약 33 μm 정도로 나타났다.
3. 초음파 노즐을 설계하기 위해 유도한 이론적 고찰이 실험의 결과와 일치하여 추후 초음파 노즐의 설계 시 응용 가능성을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Jaffe, B., Cook Jr., W. R., and Jaffe, H., "Piezoelectric Ceramics", Academic Press, London, UK, 1971.
- [2] Xu, Y., "Ferroelectric Materials and Their Applications", Elsevier Science Publishers, Amsterdam, The Netherlands, 1991.
- [3] Haertling, G. H., "Ferroelectric ceramics: history and technology", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 82, p. 797, 1999.
- [4] Uchino, K., "Ferroelectric Devices", Marcel Dekker, Inc., New York, 2000.
- [5] J. H. Yoo, K. J. Yoo, H. S. Lee, S. H. Lee, K. H. Chung, H. G. Lee, and H. W. Kang, "Dielectric and piezoelectric properties of low-temperature-sintering $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3$ - $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ ceramics for multilayer piezoelectric actuator", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 44, p. 7042, 2005.
- [6] J. H. Yoo, C. B. Lee, Y. H. Jeong, K. H. Chung, D. C. Lee, and D. S. Paik, "Microstructural and piezoelectric properties of low temperature sintering PMN-PZT ceramics with the amount of Li_2CO_3 addition",



(a) 분무 입자의 크기



(b) 분무 입자의 분산도

그림 5. 분무 입자의 분산도.

Fig. 5. Distribution chart of atomizing particles.

- Chem. Phys., Vol. 90, p. 386, 2005.
- [7] I.-H. Im, H.-S. Chung, D.-S. Paik, C.-Y. Park, J.-J. Park, and S.-G. Bae, "Multilayer piezoelectric actuator with AgPd internal electrode", J. Eu. Ceram. Soc., Vol. 20, p. 1011, 2000.
- [8] S. H. Lee, J. H. Yoo, K. H. Yoon, J. Y. Sug, G. H. Rue, K. H. Shin, J. G. Kim, and J. I. Hong, "The dielectric and electric characteristics of piezoelectric ceramics for ultrasonic oscillator application", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 41, p. 7099, 2002.