

초음파 진동자를 이용한 분무기의 개발 현황

이수호 교수 (동아대학교 전기공학과)

1. 서론

현대 사회는 급속한 산업의 발달로 인하여 환경 오염에 대한 문제와 높은 가격으로 수입되는 석유, 그리고 석유사용에 따른 부작용들이 심각하게 대두되고 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위한 비용이 기하급수적으로 증가하면서 이를 해결할 수 있는 대안제시가 요구되고 있다.

이러한 문제점들을 해결하기 위한 대안으로써 전 세계가 국가차원에서 경쟁적으로 환경오염 개선과 비용절감을 위해 연료 사용량의 대폭적인 절감 및 대체에너지개발에 총력을 쏟고 있는 추세이나, 대체에너지가 완전한 실용화 단계에 진입되지 않고 있어 에너지 절약은 물론 에너지 효율이 우수한 제품의 개발 및 기존 제품의 효율개선을 위한 연구가 진행되고 있다. 이미 초음파를 이용하여 액체 연료를 분무하여 에너지원으로 사용할 경우 20-30% 정도의 효율이 높게 나타난다는 발표가 국내·외에서 발표가 되고 있다 [1]. 그러나 기존의 분무장치에 접목시켜 시스템으로 가동할 경우 제품의 신뢰성 등에 문제가 야기되면서 상용화가 되기 위해서는 상당한 어려움이 있는 실정이다.

한편 유가의 급등으로 국내·외에 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

을 찾을 수 있다면 현재의 어려운 에너지 관련한 연구개발이 상당히 개선할 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 초음파 노즐에 사용될 특성이 우수한 압전 세라믹 진동자의 기술개발이 필수적이라 할 수 있다.

현재 연료 분사 및 유동 중인 유체를 직접 분사하기 위한 방법으로 고압의 연료 펌프를 이용하여 Tip 부분의 가는 구멍으로 액체 연료를 압출시키는 방법과 분출가스를 이용하는 Spray식 분사방법으로 대별되고 있다 [2]. 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 연소시에 불안정 연소가 발생하며, 이로 인해 공해발생과 효율이 떨어지는 문제점을 야기하게 된다.

현재 국내에서 제조하고 있는 연료펌프의 경우 대부분 일본 기술에 의존하고 있으며, 분무 Tip의 노즐의 경우 전량 수입하여 사용하고 있다. 따라서 국내·외적으로 이와 관련한 연구가 절실히 요구되고 있는 실정이므로 이와 관련한 기술을 연구함으로써 수입의 대체효과를 증대시키고, 국제 경쟁력 우위의 확보는 물론 국가 산업 경쟁력 강화에 기여하고자 한다.



또한 분출 가스를 이용한 Spray식 분무 방법의 경우 장시간 연속적인 분무를 위해서는 별도의 장치가 필요할 뿐만 아니라 인체에 유해한 가스가 발생되는 문제점을 안고 있다. 그러나 액체를 작은 입자 형태로 분무 가능케 하는 본 연구는 이러한 기계장치 외에 의약품, 전자부품 및 바이오 제품 등에 응용이 가능하므로 그 시장이 확대될 것이고, 이로 인해 산업적 효과가 지대할 것이다. 아울러 기존의 시스템에 본 연구의 기술을 접목시킨다면 새로운 연소시스템의 개발이 가능하므로 장비 산업에 대한 부가가치도 높아질 수 있을 것으로 기대된다.

2. 국내·외 관련 기술의 현황

2.1 국내

최근 유가의 상승이 계속되면서 산업체 및 사회적으로 비용이 증가하면서 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다. 이러한 유가의 급등이 일시적인 현상이 아니라 지속적으로 일어날 것으로 국내·외 여러 곳에서 판단하고 있기에 세계 각국에서 대체 에너지 개발에 대한 관심이 높아지고 있다. 그러나 대체 에너지가 완전히 실용화 단계가 되지 않아 에너지 절약과 에너지 효율이 우수한 제품의 개발과 기존 제품도 효율 개선을 위한 연구가 진행되고 있다. 이미 초음파를 이용하여 액체 연료를 분무하여 에너지원으로 사용할 경우 20-30% 정도의 효율이 높게 나타나는 것은 국내에서도 발표가 된 적이 있으나 장치에 접목시켜 시스템으로 가동할 경우 제품의 신뢰성 등에 다소 문제를 나타내면서 상용화를 이루기에는 어려움을 나타내고 있는 실정이다. 그러나 외국의 경우 부분적으로 장착한 제품을 발표함으로써 경쟁력을 높여가고 있다. 따라서 국내의 자체 기술을 개발하여 보유하고 있어야 경쟁력 있는 제품의 생산이 가능할 것으로 사료된다.

또한 유가의 급등은 국내·외에 매장량이 풍부하고 지역적으로 편재되어 있지 않아 수급면에서 안정적인 에너지원으로 석탄이 활용에 대한 기대가 높아지고 있으나, 고체 연료를 액체 연료화를 위한 기술적인 적용에 대한 문제점을 가지고 있거나 보

다 효과적으로 방안을 찾게 되면 현재의 어려운 에너지 상황이 상당히 개선할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 초음파 노즐을 개발하는 과정에 발생하는 압전 세라믹 진동자의 개발을 이러한 문제점을 해결할 수 있는 기술적인 접근이 필요할 것으로 생각된다.

2.2 국외

이미 압전 세라믹스를 이용한 각종 부품의 개발과 센서에서의 활용은 꾸준히 이루어져 일본 NEC, TOKIN 및 독일의 INNOTICS 등은 50 lpm 성능 정도의 압전 밸브 및 압전 펌프와 같은 각종 응용제품을 소개하고 있다. 이는 고정밀, 초소형을 이룰 수 있기에 활용 가능성이 넓어지고 있다. 기본적인 세라믹의 특성 개선과 더불어 이를 활용할 수 있는 기술의 개발은 바로 국가의 산업에 부가가치를 높이고 제품의 경쟁력을 높일 수 있기에 세라믹 응용 제품의 개발의 필요성은 높다고 할 수 있다.

또한 프랑스의 푸조 자동차에서는 초음파 분사를 이용한 엔진 시스템 개발을 통하여 연소 효율을 이미 30% 이상 개선시켰다고 보고하고 있다. 또한 미국 등에서는 수소에너지를 이용하여 기존의 자동차 효율향상을 위한 연구가 보고 되고 있다. 이렇게 국외에서는 에너지 효율 향상을 위한 연소 시스템에 대한 다양한 연구와 개발이 진행되고 있어 국내의 연구를 통하여 기술적으로 접근하지 못하면, 수입에 의존하여 연료와 연소시스템 모두를 수입을 통하여 국내 산업에 공급해야 하는 실정이 될 것으로 생각된다.

3. 초음파 진동자 및 노즐의 설계

우수한 압전 특성을 가지는 압전 세라믹스를 기반으로 우선 기계적 에너지 발생이 높은 진동자의 설계가 이루어져야 한다 [7]. 이는 Ring 형태의 진동자를 제작할 때에 진동자 단면적의 변화에 따른 최적의 조건을 구하고, 이를 이용하여 공진주파수가 500~1,000[KHz] 범위 내에 있는 초음파 진동자를 개발하여야 한다. 또한 장시간 초음파 구동에 발생되

는 온도에 대한 소자의 안정성을 담보하기 위한 초음파 진동자의 구동회로에 대한 연구를 병행하여야 한다. 이러한 구동회로는 세라믹 진동자의 열화 현상에 의해 발생될 수 있는 공진점의 이동에 따른 특성변화에도 추종될 수 있도록 구동전류 검침을 통하여 전류를 제어함으로써 열화현상을 해결할 수 있는 회로를 설계한다.

초음파 노즐의 경우 사용 가능한 주파수 대역은 50~100[KHz]에서 동작될 수 있도록 한다. 이는 높은 주파수 대역에 맞추기 위해서는 노즐의 크기가 지나치게 작아지게 되어 소형의 정밀한 노즐 제작이 어려워지고, 또한 분무량의 최적제어 등의 어려움점을 감안한 것이다. 아울러 노즐의 표면온도를 85[°C] 이하로 억제시켜 진동자의 열화 현상을 억제시킨다.

초음파 진동자의 디자인 설계에 따른 분무 특성이 상당한 영향을 받을 수 있기에 체계적이고 정확한 설계를 위하여 진동자 형태에 따른 분무 특성을 검토하여야 한다. 우선 그림 1과 같이 진동자를 설계하고 또한 그림 2와 같은 노즐을 설계하여 x, y의 변화에 따른 분무 특성을 검토한다. 또한 그림 3에 실제 제작되어 활용되고 있는 노즐의 시제품을 나타내었다.

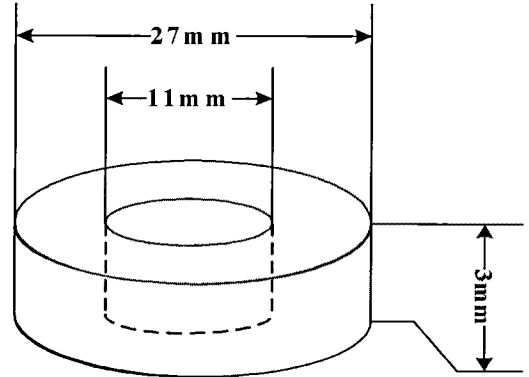


그림 1. 진동자의 형태.

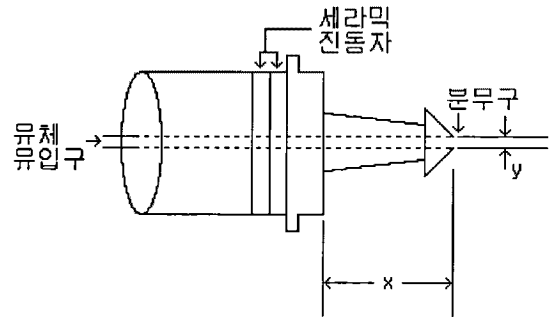


그림 2. 노즐의 형태.

4. 초음파 노즐의 분무 이론

액체 연료의 분무를 설명하기 위하여 액체가 노즐에 유입되어 분무되어 나가는 동안의 에너지 관점에서 정리하여 보면 식 (1)과 같이 물체가 운동할 때 가지는 에너지를 표현할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{1}{2}mv^2 + \vec{V} \quad (1)$$

여기에서 우변의 첫 번째 항은 액체 연료의 운동 에너지이며, \vec{V} 는 액체 연료의 포텐셜 에너지이다. 포텐셜 에너지의 경우 0이라고 가정을 하면 액체 연료의 운동에너지만 존재하게 된다. 우선 분무현

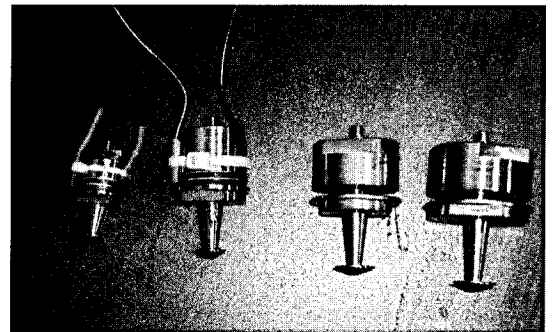


그림 3. 크기별 초음파 노즐 제작품.

상을 설명하기 위하여 세라믹 진동자가 한번 진동할 시에 액체 연료 입자가 노즐의 관 벽에 한번 충돌한다고 가정하였다. 우선 입자가 한번 충돌 시에 받는 에너지는 입자 하나가 가지는 질량과 충돌시간에 따른 에너지로 얻기 위하여 식 (2)과 같이 운동량 P를 도입하여 식 (1)에 대입하여 정리하면 식 (3)과 같다.

$$P = mv, F_c = \frac{dP}{dt} \quad (2)$$

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta P^2}{2m_d} = \frac{(F_c \tau_d)^2}{2m_d} \quad (3)$$

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 초음파 세라믹 진동자를 사용할 시에 F_c 와 τ_d 는 세라믹 압전 정수를 도입하여 재설계할 필요성이 있다. 일반적으로 세라믹의 변위를 가져오는 힘 F의 경우 식 (4)과 같이 정리할 수 있다.

$$F_c = \frac{P}{A} = \frac{CV}{A} = m_d a_d \quad (4)$$

$$\tau_d^2 = \frac{2r_d}{a_d} = \frac{2r_d m_d}{F_c}$$

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

따라서 F_c 와 τ_d 를 식 (3)에 대입하여 입자가 한번 충돌 시에 받는 에너지는 식 (5)과 같이 정리할 수 있다.

$$\tau_d^2 = \frac{2r_d}{a_d} = \frac{2r_d m_d}{F_c} \quad (5)$$

$$\Delta\epsilon_{cl} = \frac{Cr_d V}{A}$$

또한 입자 하나가 노즐의 관을 지나면서 총 충돌 횟수를 식 (6)과 같이 생각할 수 있다. 따라서 총 충돌 에너지는 식 (7)과 같이 정리 된다.

$$N = \frac{2lf}{v_{fl}} \quad (6)$$

$$\Delta\epsilon_{cN} = \frac{2Cr_d V l f}{A v_{fl}} \quad (7)$$

여기서 f 는 세라믹의 진동주파수이며, l 은 노즐 관의 길이이다. 또한 v_{fl} 은 액체의 관속 유속을 나타낸다. 그리고 점도 및 운동을 하고 있는 유체는 전달되는 진동 에너지를 축소하는 역할을 하게 된다. 따라서 이를 고려하여 식 (6)을 재정리하면 식 (7)과 같이 된다.

$$D = 0.34 \left(\frac{8\pi T}{\rho f^2} \right)^{1/3} \quad (8)$$

여기서 h/τ 를 유체의 밀도와 점성의 관계식에 의해 아래의 식 (8)과 같이 표현할 수 있다. 이렇게 표현된 식 (8)을 식 (6)에 대입하여 정리하여 얻어진 식 (9)의 에너지가 일정한 점성을 가지는 유체의 결합에너지보다 커야 입자의 분리를 얻을 수 있다.

$$\tau = \frac{b}{m_d}, t_l = \frac{l}{v_{fl}} \quad (9)$$

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

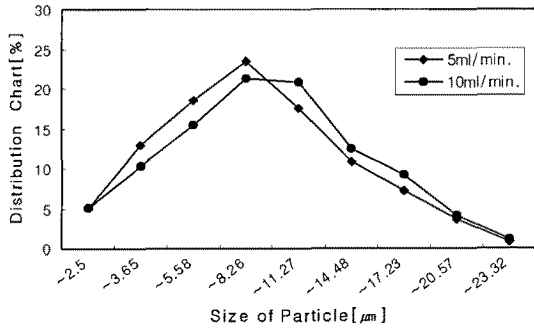
여기서 η 는 액체의 점성계수이며, ρ 는 액체의 밀도이다.

$$\Delta E = \frac{2Cr_d V l f}{Av_{fl}} - \frac{1}{2} m_d v_{fl}^2 (1 - e^{-\frac{2l r_d^2 \rho}{9\eta v_{fl}}}) > 0 \quad (10)$$

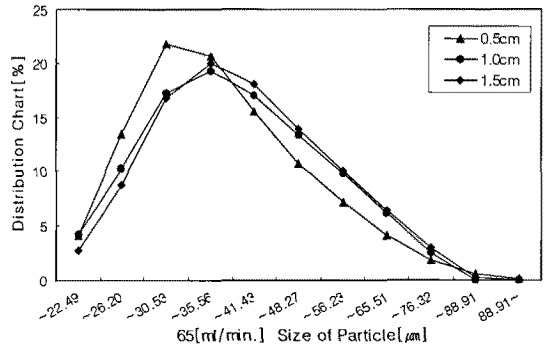
5. 초음파 노즐의 분무 특성

그림 4(a)는 최소 분무 입자의 크기를 알기 위하여 5[ml/min.], 10[ml/min.]의 양으로 액체를 공급하였으며, 이때 분무되는 입자의 크기 분포도를 나타내고 있다. 분무 입자의 크기는 자동입자 측정기

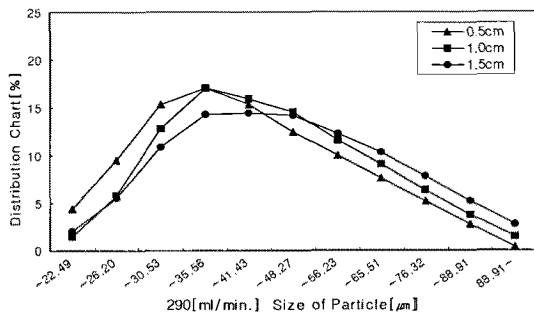
(MALVERN MS-S)를 이용하여 분무 입구에서 5[mm] 떨어진 거리에서 측정하였다. 분무 입자의 크기는 2[μ m] 이하부터 20[μ m] 정도의 크기 분포도를 가지고 있으며, 60 % 가량이 3.65~11.27[μ m] 정도의 분무 입자 크기임을 알 수 있었다. 이는 분무 액체를 일정한 높이에서 위치(Potential) 에너지만을 이용하여 분무기에 공급하게 되므로 공급량이 작으면, 초음파 분무기의 구멍에 비해 공급 유량이 적게 되어 액체가 초음파 분무기를 지나가는데 소요되는 시간이 많이 소요되어지므로 충분한 초음파 에너지를 받아 초음파 분무기의 tip 부분에서 미세 입자로 분사가 이루어졌다고 사료된다.



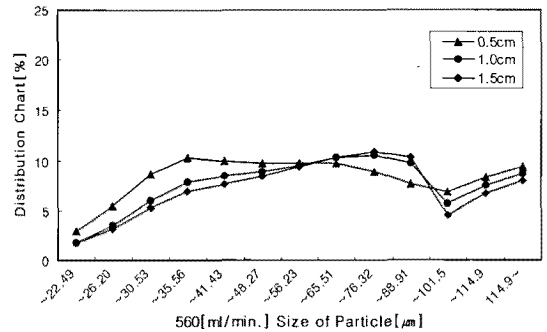
(a) Spraying Particle Size



(b) Spraying Particle Size



(c) Spraying Particle Size



(d) Spraying Particle Size

그림 4. 분무 입자 분포도.

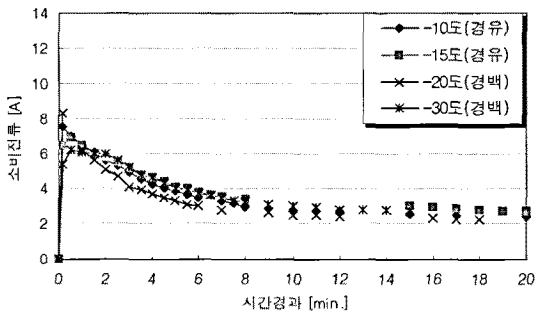


그림 5. 시간에 따른 노즐의 소비전류.

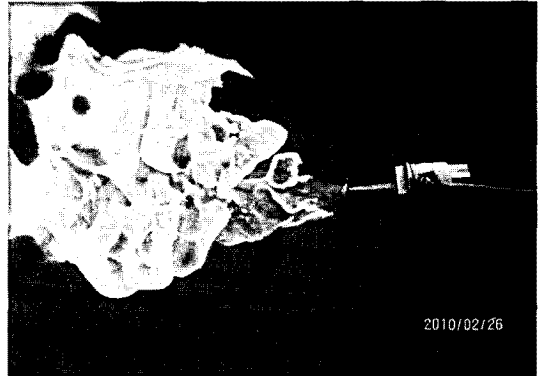


그림 6. 노즐의 연소사진.

그림 4(b)는 분무량을 최대 65[ml/min.]까지 증가시킬 경우 분무 거리에 따른 분무입자의 크기와 분포도를 나타낸 것이다. 분무 입자의 크기는 22.5[μ m] 이하부터 88.9[μ m] 정도의 크기 분포도를 가지고 있으며, 60 % 가량이 26.2~41.3[μ m] 정도의 분무 입자 크기임을 알 수 있었다.

그림 4(c)는 분무량을 최대 290[ml/min.]까지 증가시킬 경우로 분무 입자의 크기는 22.5[μ m] 이하부터 88.9[μ m] 정도의 크기 분포도를 가지고 있으며, 60 % 가량이 26.2~48.3[μ m] 정도로 평균입자의 크기가 다소 증가됨을 알 수 있었다.

그림 4(d)는 분무량을 최대 560[ml/min.]까지 증가시킬 경우로 분무 입자의 크기는 22.5[μ m] 이하부터 114.9[μ m] 이상의 크기 분포도를 가지고 있으며, 전반적으로 비슷한 크기의 분무입자가 발생되어 평균 입자의 크기가 증가되었음을 알 수 있다. 이는 분무량이 증가하는 것은 같은 크기의 노즐을 사용할 경우 유속이 빨라지는 것을 의미한다. 따라서 앞의 분무 이론에서 언급한 것과 같이 식 (5)에 의해 액체 연료가 노즐의 관을 지나면서 충돌횟수가 줄어들게 되어 액체가 받는 에너지의 크기가 적어지게 된다. 이에 의해 분무입자의 증가를 가져옴을 알 수 있다.

그림 5는 노즐의 산업적 응용 가능성을 제시하기 위하여 분무 액체를 일반적으로 산업용 연소기에 많이 사용되어지는 경유 및 혼합유(경백 : 경유+백등

유 동일비율 혼합)를 선택하여 분무 가능성을 검토하였다. 경유의 경우 동점성이 상온에서 4.0[cSt]로 백등유에 비해 3배정도 높다. 따라서 순수 경유의 경우는 혼합유보다 빙점이 높기 때문에 -15[$^{\circ}$ C]까지의 상태에서 분무특성을 측정하였고, 혼합유에 대해서는 -15[$^{\circ}$ C]이하에서 -30[$^{\circ}$ C]까지 측정하였다. 이는 산업적 보일러의 경우 주로 저울철에 사용되어지기에 저온 온도 범위에서의 분무 특성을 검토할 필요성이 있었기 때문이다.

그림 5의 경우 노즐의 길이가 22[mm]인 경우로 소비전류가 2.5[A] 정도로 물에 비해 다소 높은 전류가 나타나고 있지만, 이는 기름인 경우 물에 비해 점성이 높아 식 (2-37)에 의해 분무를 위한 에너지가 높아짐을 알 수 있었다. 또한 혼합유의 경우 순수 경유에 비해 낮은 동점성에 의해 점성이 떨어져 낮은 온도에서도 분무를 위해 필요한 에너지는 비슷한 것으로 나타났다.

또한 자체 제작된 모든 노즐의 표면온도가 저온의 액체와 주위의 온도에 의해 발열이 억제되어 자체 제작된 노즐 모두가 30 $^{\circ}$ C를 넘지 않아 실용 가능성을 보여주었다.

또한 그림 6에 실제 제작된 노즐의 응용으로 연료의 연소상태를 나타내고 있다. 이는 기존의 연료 분무 방식에 비하여 상당히 높은 연소효과를 얻을 수 있음을 기대할 수 있다.

참고 문헌

- [1] 배상태, 이수호, 석정영, 김철환, 사공진, "압전 세라믹 진동자를 이용한 초음파 분무기의 분무 특성", 한국전기전자재료학회 논문집, 22권 5호, p.405~410 (2009).
- [2] Shigeru Maeda, Satoru Kanamori, Morio Imayoshi and Toshio Takeshita, Low viscosity COM (coal oil mixture) using tall-oil as an additive, Fuel, Volume 65, Issue 12, p.1658-1662(1986).
- [3] C. Tapaonoi, S. Tashiro and H. Igarashi, "Piezoelectric properties of fine-grained lead zirconate titanate ceramics modified with $Pb(Sb_{1/2}Nb_{1/2})O_3$ ", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 33, No. 9B, p.5336 (1994).
- [4] H. W.katz : "Solid State Magnetic and Dielectric Devices", John Wiley and Sons, Chap5, pp 170 ~ 232 (1959).
- [5] S. Kawashima, O. Ohnishi et al., "Third order longitudinal mode piezoelectric ceramic transformer and its application tohigh-voltage power inverter" Proc. 1994, IEEE Ultrason. Symp., pp.525~530, (1994).
- [6] A.P. Burdukov, V.I. Popov, V.G. Tomilov and V.D. Fedosenko, The rheodynamics and combustion of coal-water mixtures, Fuel, Volume 81, Issue 7, p.927-933(2002).
- [7] Uchino K., "Ferroelectric Devices", Marcel Dekker, Inc., New York, (2000).
- [8] J. Curie and P. Curie, "C. R. Acad. Sci.", Paris 91, 1880, p.294.
- [9] B. Jaffe, W.R. Cook, Jr. & H. Jaffe, "Piezoelectric Ceramics", Academic Press, London & New York, p.19(1971).
- [10] 岡崎 清, "セラミック誘電體工學", 學獻社, p.327, (1983).

저|자|약|력



성 명 : 이수호

◆ 학 력

- 1989년 동아대학교 공과대학 전기공학과 공학사
- 1991년 동아대학교 대학원 전기공학과 공학석사
- 1996년 동아대학교 대학원 전기공학과 공학박사

◆ 경 력

- 1996년 - 2000년 세경대학 전기과 전임강사
- 2000년 - 2009년 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부 연구교수
- 2009년 - 현재 동아대학교 전기공학과 조교수

