

초음파 이용 입자 분리 및 제어 기술

조 승 현*

(한국표준과학연구원)

1. 머리말

노벨상의 패러디인 이그노벨상(Ig Nobel Prize, <http://www.improbable.com/ig>)의 2000년 수상작 중 네덜란드 네이메겐 대학과 영국 브리스톨 대학의 교수들이 개구리를 공중부양 시키는 실험을 수행한 연구결과가 있다. 실제 논문에 발표되는 과학적 업적 가운데 '반복될 수 없거나 반복되어서는 안 되는(that cannot or should not be reproduced)' 재미있는 연구결과에 수여하는 이그노벨상의 다른 연구들과 마찬가지로 세계적인 토픽으로 소개되어 일반인들의 많은 관심이 집중되었는데, 아마도 개구리라는 다소 엉뚱한 대상 때문이 아닌가 생각된다. 이 연구에서는 의료진단용 MRI에 사용되는 자기장의 수 배에 해당하는 약 16 T의 강력한 자기장을 가해 자기력과 중력을 평형을 이루게 함으로써 살아있는 개구리를 공중부양 하였다. 한편 이와 함께, 몇 년 전 미국의 라이브사이언스(livescience.com)라는 과학매체는 중국의 과학자들이 거미, 개미, 무당벌레 등의 몇몇 곤충을 공중부양시킨 연구를 소개한 바 있다. 앞의 연구와는 달리 이번에는 생물을 띄우기 위해서 음파가 이용되었다는 점이 눈길을 끈다.

앞의 연구결과처럼 음파를 이용하여 곤충을 공중에 띄운 실험은 그 대상이 살아있는 생물이라는 점으로 인해 세간의 이목을 집중시킨 바 있지만

음파를 이용하여 물체를 공중에 띄울 수 있다는 점은 그다지 새로운 사실은 아니다. 물리학에는 전기, 자기, 광 등을 이용한 여러가지 부양 기법들이 있고, 그 중 음파를 이용하여 물체를 띄우는 것을 음향 부양(acoustic levitation)이라고 일컫는다. 음향 부양 기법을 이용하면 수 킬로그램 정도의 무거운 물체까지 들어올릴 수 있고, 무엇보다 외부와 접촉이 차단된 상태에서 진행해야 하는 다양한 실험을 수행할 수 있다는데 강점을 지닌다. 음향 부양 장치는 서로 면이 마주보게 설치된 음향 변환기(acoustic transducer)와 반사체로 구성된다(그림 2). 음향 변환기에서 발생된 음파는 반사체와 변환기의 전면에서 반복적으로 반사되면서 정재파(定在波, standing wave)를 형성한다. 이때 정재음장 내에 위치한 물체에는 정재파의 음압마디(pressure node)쪽으로 음향방사력(acoustic radiation force)이라는 힘이 작용한다. 결과적으로, 물체에 작용하는 음향방사력과 중력이 평형을 이루는 점으로 물체가 이동함을 쉽게 예측할 수 있다.

음향방사력은 음파의 비선형 효과중의 하나로, 음파로 인하여 음장 내에 위치한 물체에 작용하는 의력 뜻한다. 일반적으로 매질을 따라 진행하는 음파의 감쇠(attenuation)는 파의 산란(scattering)과 흡수(absorption)에 기인하는데, 음파 에너지의 흡수는 매질의 발열 또는 운동량 변화를 야기한다. 이때 매질의 운동량 변화에 의한 힘이 음향방사력이

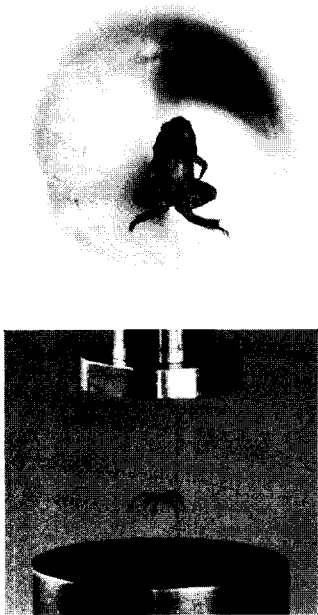


그림 1 살아있는 개구리의 자기 부양(magnetic levitation) 실험(상) 및 거미의 음향 부양 실험(하) (출처: <http://www.wikipedia.com>, <http://www.livescience.com>)

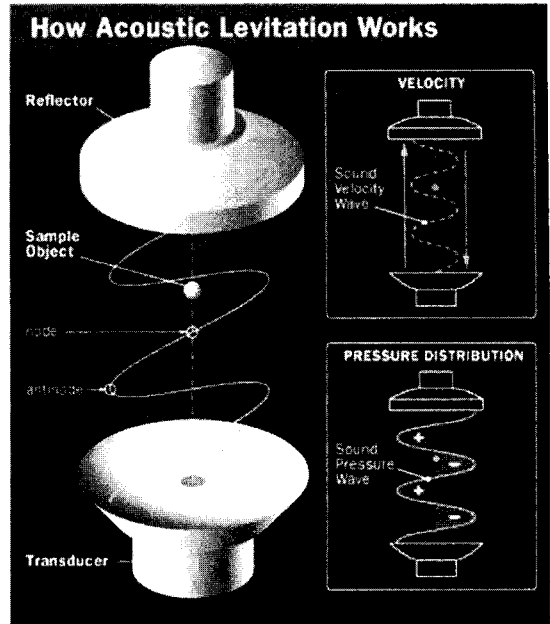


그림 2 음향 부양 장치와 음향 부양 원리 (출처: <http://www.howstuffworks.com>)

다. 음향방사력은 공기나 수중에 있는 물체를 띄우는데 이용될 수 있지만, 감쇠가 심한 경우에는 음파의 파형을 왜곡하는 원인으로 작용한다. 예를 들면, 초음파 의료진단 분야에서는 상대적으로 높은 2~10 MHz 사이의 주파수를 주로 사용하기 때문에 음향방사력으로 인한 신호 파형의 왜곡이 심하다.

음향방사력을 이용하면 음파를 이용하여 물체에 외력을 가할 수 있다는 사실은 물체가 작아지더라도 여전히 유효하다. 일반적으로 크기가 직경 수 마이크로미터 또는 수 나노미터 정도인 미세입자의 경우에도 입자의 거동에 영향을 줄 수 있을 만큼 충분히 큰 음향방사력이 작용한다. 따라서 음파를 이용하면 마이크로입자(microparticle)나 나노입자(nanoparticle)를 움직일 수 있으므로, 근래에 이러한 원리를 이용하여 미세입자를 조작하고 거동을 제어하는 다양한 연구가 여러 분야에서 활발히 수행되고 있다. 이 글에서는 음파의 음향방사력을 이용한 미세입자 제어 기술과 몇몇 연구 사례를 소개하고자 한다.

2. 입자제어 기술

입자제어는 입자의 다양한 물리적 특성을 이용하여 입자의 성장(growing), 분리(separation), 포집(trapping, harvesting), 집속(focusing), 정제(purification), 여과(filtration), 응집(agglomeration) 등 입자의 다양한 거동을 제어하는 모든 기술을 다루는 독립적인 학문 분야이다. 대표적인 응용 분야만 살펴 보아도 대기 및 수질을 분석하는 정밀 환경 측정 분야, 분말 원료의 제어가 필요한 소재 및 화학 공정 분야, 박막 및 세정 공정을 수반하는 반도체 제조 분야, 대기 및 수질 오염 방지를 위한 오염 방지 기술 분야, 항원-항체 반응을 비롯한 각종 분석이 필요한 미생물, 식품 및 보건의료 분야 등 일일이 따져 나열하는 것이 무의미 할 정도로 그 응용범위가 넓고 다양하다. 제어의 대상인 입자는 크기에 따라 매크로, 마이크로, 나노입자로 분류할 수 있고, 그 성질에 따라 박테리아, 세포 등 유기입자(organic particle)와 먼지, 세라믹 분말 등의 무기입자(inorganic particle)를 포함한다.

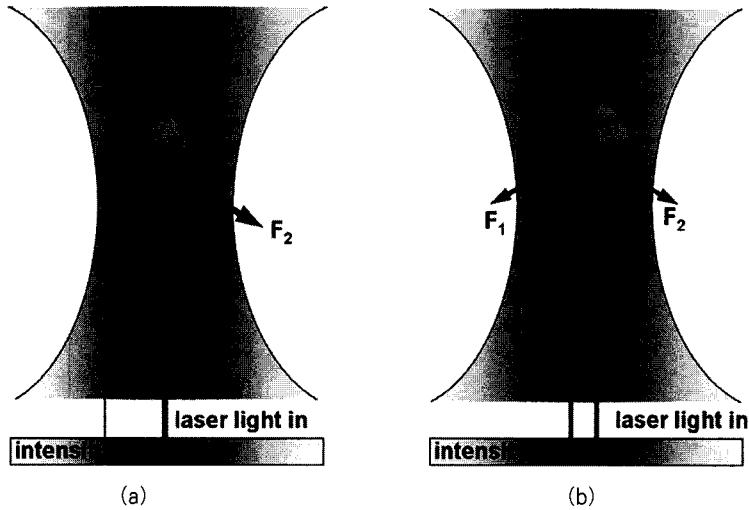


그림 3 광 핀셋의 원리: 레이저가 입자에 조사될 때, 입자가 레이저 광의 강도가 큰 방향으로 힘을 받음, (a) 입자가 레이저 강도가 가장 큰 위치로 왔을 때 힘의 평형 상태에 이룸, (b) 레이저의 위치를 조절하여 미세입자를 이동 시킬 수 있다. (출처: <http://www.wikipedia.com>)

입자제어를 위해서 다양한 기전(mechanism)이 이용된다. 그 중 대표적인 입자제어 기전으로는 전자기적, 광학적, 역학적 등이 있다. 전자기적 방법 중 전기영동(電氣泳動, electrophoresis)은 전하를 띠고 있는 입자에 전기장을 인가하여 거동을 제어하는 방법이고, 유전영동(誘電泳動, dielectrophoresis)은 입자는 전하를 띠지 않지만 인가된 전기장에 의해 입자가 분극되면서 전기력이 작용하는 것을 말한다. 자기력을 이용하는 자기영동(磁氣泳動, magnetophoresis) 역시 전자기적인 입자제어 방법이라고 하겠다. 이외에도 레이저 광압(laser optical radiation pressure)을 이용한 광 핀셋(optical tweezers, 그림 3)과 같은 광학적 방법, 원심분리법(centrifugation), 공기역학(aerodynamic)법, 열영동(thermophoresis) 등의 역학적 방법이 있다.

이 외에도 수많은 미세입자 제어 방법이 존재하지만, 이 글에서 소개하는 음향방사력을 이용한 입자 제어 기술은 역학적인 방법 중 하나로서, 전자기적, 광학적 특성 보다는 입자의 크기, 밀도, 체적 탄성율(bulk modulus) 등의 역학적 특성과 밀접한 관련이 있다. 장(場) 기반(field-based) 제어 기법으로 대량의 입자를 동시에 다룰 수 있

고, 입자의 반응 속도가 상당히 빠르다. 또한, 분석 원리가 전자기 또는 광학적 방식일 때도 간섭이 없으므로 독립적으로 응용할 수 있다. 하지만, 현재의 기술로서는 정밀한 제어가 쉽지 않고 랩 온어칩(Lab-on-a-chip)으로 구성할 때, 음파 발생을 위한 압전재질이 함께 포함되어야 한다는 번거로움이 있다. 물론, 이러한 장단점은 절대적이라기 보다는 각 응용 사례별로 다소 차이가 있을 것이다.

3. 정재초음파를 이용 미세입자 제어

음향방사력을 이용하여 미세입자의 거동을 제어하고자 할 때 음파의 주파수는 주로 가청주파수 대역(20 Hz ~ 20 kHz)을 넘어선다. 그 이유는 미세입자를 제어하고자 하는 범위가 일반적으로 크지 않으므로 큰 파장의 음파가 불필요하고, 가청주파수 대역 이상의 주파수에서도 음압의 세기가 입자 제어에 충분할 만큼 크다. 사람들이 들을 수 있는 소음의 유발이 적고, 주파수가 높을수록 음파 발진부를 소형화하는데 유리하다는 점 또한 빼 놓을 수 없는 이유기도 하다. 이러한 이유로 음향방사력을 이용한 입자 제어는 주

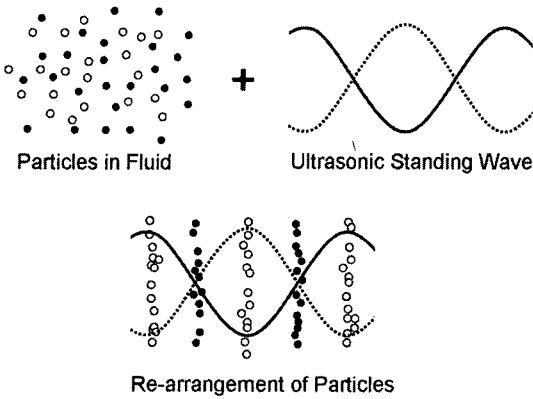


그림 4 정재초음파에 의한 유체 내 입자 재배열. 입자의 대비계수가 양의 값이면 음압마디로, 음의 값이면 반음압마디로 이동함

로 가청주파수 이상의 초음파 영역의 음파를 이용한다. 더불어 정재파가 형성되었을 때 음압 세기가 극대화되고 입자의 제어가 용이하므로 음향방사력을 이용하는 입자제어 기법은 대개 정재초음파 이용 입자 조작(particle manipulation using ultrasonic standing wave)라는 명칭으로 언급된다.

정재초음파의 음장에서 음압이 항상 영(零)인 지점을 음압마디(sound pressure node), 음압이 극대 또는 극소를 이루는 지점을 반음압마디(sound pressure antinode)라고 부른다. 평행하게 형성된 정재초음파 음장에서는 음압마디면(nodal plane)과 반음압마디면(antinodal plane)이 반복적으로 형성된다. 미세입자가 섞여있는 유체에 정재초음파를 가하면 정재초음파의 음향방사력으로 인해 미세입자가 재배열 한다(그림 4, 5). 이때, 단일 미세입자에 가해지는 음향방사력(F_{RF})은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$F_{RF} = -\frac{\pi p_0^2 V \beta_0}{2\lambda_0} \phi(\beta, \rho) \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda_0} z\right)$$

$$\phi(\beta, \rho) = \frac{5\rho_c - 2\rho_0 - \beta_c}{2\rho_c + \rho_0} \frac{\beta_c}{\beta_0}$$

- p_0 : Pressure amplitude
- V : Particle volume
- λ_0 : Wavelength of sound

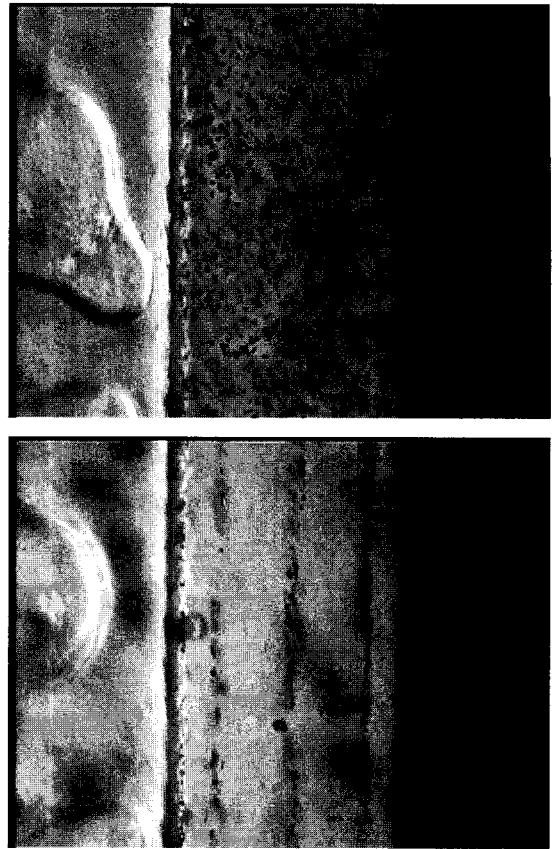


그림 5 폭 1.5 mm 미세 채널 내에서 물에 섞여있는 수 마이크로미터 직경의 탄화규소(SiC) 입자의 분리; 정재초음파 인가 전(상), 정재초음파 인가 후(하)

- V : Particle volume
- λ_0 : Wavelength of sound
- β, β_0 : Compressibility of particle and fluid
- ρ, ρ_0 : Density of particle and fluid
- z : Location from pressure nodal line

위 식에 따르면, 대비 계수(contrast factor, ϕ)는 유체와 입자의 밀도와 압축률의 함수이다. 즉, 미세입자의 밀도와 압축률의 상대적인 값에 따라 음향방사력의 방향이 바뀔을 의미한다. 유체가 물일 경우 금속 또는 유리 입자처럼 유체에 비해 밀도가 큰 입자는 대개 대비 계수가 양(positive)의 값을 가지므로 음압마디쪽으로 음향방사력이 작용한다. 반대로 기름방울(oil bubble), 공기방울(air bubble) 등은 음(negative)의 대비 계수 값을 갖고 반

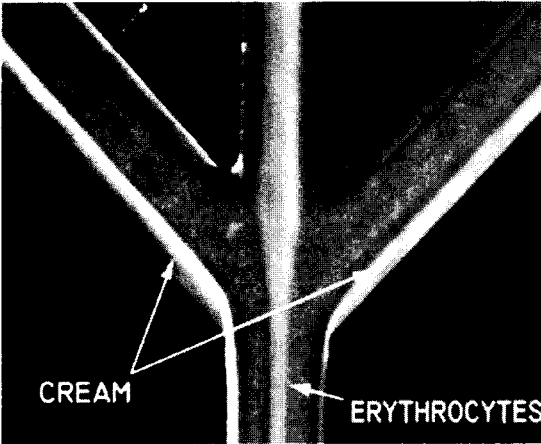
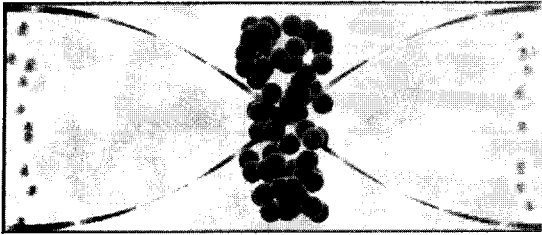


그림 6 적혈구와 지질의 분리: 음장에 따른 적혈구(음압마디)와 지질(lipid, 반음압마디)의 분포(상), 3 분지 채널 내 분리(하). (출처: Petersson et. al., Analyst, 2004, Petersson et. al., Anal Chem, 2005)

음압마디쪽으로 음향방사력이 작용한다. 만약 유체 내에 양과 음의 대비 계수 값을 지닌 이종의 미세입자가 섞여 있다면, 정재초음파는 이들을 각각 음압마디와 반음압마디쪽으로 이동시켜서 분리할 수 있다. 예를 들면, 혈액내의 적혈구와 지질(脂質, lipid)은 혈장을 기준으로 서로 반대 부호의 대비 계수를 갖는다. 따라서, 정재초음파 음장 내에서 적혈구는 음압마디 방향으로 지질은 반음압마디 방향으로 힘을 받으므로 채널을 적절히 설계하여 적혈구와 지질을 분리한 연구 결과가 최근 보고된 바 있다(그림 6). 또한, 대비계수가 반대 부호의 값을 지니도록 적절히 유체를 선택하여 이종의 미세입자를 적절히 분리해 낼 수 방법도 생각해 볼 수 있겠다.

4. 정재초음파를 이용한 미세입자 포집 및 집속

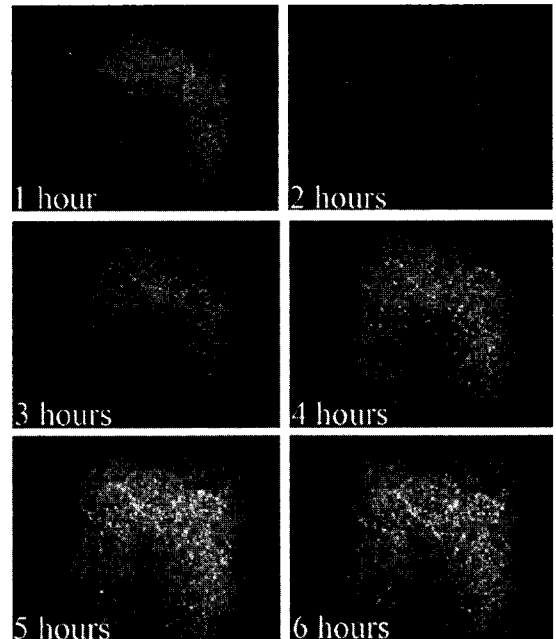
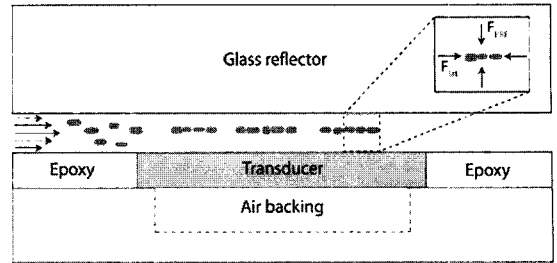


그림 7 정재초음파를 이용한 입자 포집; 축력으로 인한 입자 포집 원리(상), 시간에 따른 이스트 셀 포집 결과(하) (출처: Evans et. al., Anal Chem, 2007)

평행한 채널 내에서 정재초음파를 인가하면 입자에는 음향방사력에 의한 힘 이외에도 축력(lateral force)이 작용함이 밝혀진바 있다. 이는 입자에 의한 음장의 공간적인 변화나 음향 흐름(acoustic streaming)에 의해 기인한다고 알려져 있으며, 입자들이 음압마디선 상의 특정 위치에서 안정상태를 유지하도록 한다. 이로 인해서 입자에 유동에 대한 항력(drag force)이 생기고, 유동을 따라 흐르던 입자들이 특정 위치에 구속된다. 따라서, 정재초음파 음장을 계속 유지하면서 유동을 흘려주면 다량의 입자를 특정위치에 모이게 할 수 있는데 이를 정재초음파 이용 미세입자 포

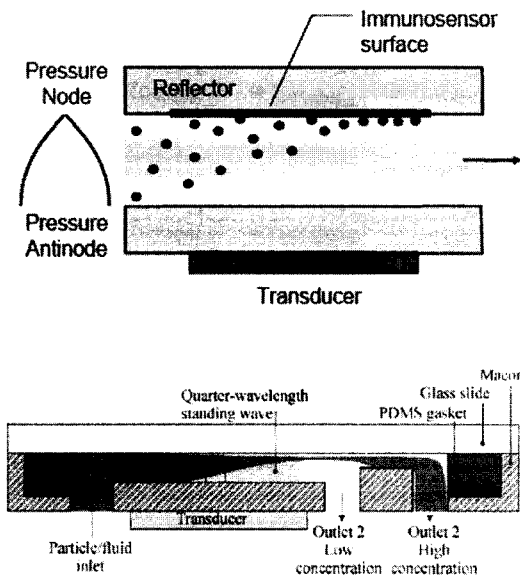


그림 8 4분의 1파장 정재초음파를 이용한 항원 항체 반응 기반 바이오 센서: 집속원리(상) 및 전체 랩온어칩 단면도(하).
(출처: Hill et. al., Ultrasonics, 2008)

집 (particle trapping, harvesting using ultrasonic standing wave)이라고 한다. 이러한 미세입자 포집 기술은 다양한 응용 가능성을 지니는데, 분석하고자 하는 시료의 농도가 센서의 검출감도보다 낮아서 측정 부위에서 입자의 농도를 높여야 한 다거나, 관찰을 위해서 넓게 퍼져 있는 입자를 한 곳으로 모아야 하는 경우(그림 7) 특히 유용하게 응용이 가능하다.

검출 감도와 더불어 검출 시간은 항원-항체 면 역반응을 기반 원리로 하는 세균 검출 바이어 센서의 중요한 성능 지표 중 하나이다. 시료내의 측정 대상이 감응 물질과 효과적으로 반응하기 위해서는 측정 대상 입자가 감응물질이 위치한 센서의 표면에 집중시켜야 할 필요가 있다. 보통 정재 초 음파 음장은 채널의 벽면이 반음압마디를 이루기 때문에 입자가 채널의 벽으로는 접근하지 못하지

만, 최근 4분의 1 파장(quarter wavelength) 정재 초 음 파를 이용하면 입자를 채널의 한 쪽 벽면으로 집 속(focusing)시켜 이러한 문제를 해결한 연구가 소 개되었다(그림 8).

5. 맺음말

음향방사력에 대한 물리적 현상이 1800년대 후반 Rayleigh 경에 의해 발견된 후, 1900년 초반 이미 유체 내의 입자에 작용하는 음향방사력에 대한 방정식이 밝혀졌을 정도로 초음파를 이용 한 입자 제어의 가능성은 새삼스러운 것이 아니 다. 그럼에도 불구하고, 새로운 압전 재질 발견, 미세 반도체 제작 공정 기술의 발전 등 제반 기 술의 발전과 현대 산업에서의 입자 처리 공정의 급속한 증가 및 환경 보건 분야에서 정밀 측정에 대한 요구 등의 수요가 맞물려 정재초음파 이용 입자 제어 기술은 최근 들어 많은 관심과 주목을 받고 있다.

필자는 이 기술에 대한 연구가 성숙해지고 응 용 범위의 확대되기 위해서는 좀더 정교하고 세 련된 설계 및 해석, 제작 기법이 필요하다고 판단 하고 있다. 특히 정밀 입자 제어, 극미세 및 대형 입자 적용, 난류(turbulence) 유동 적용 및 대량 입 자 처리 등 아직 연구자들의 흥미를 이끄는 많은 주제가 남아있어 향후 경제·산업 파급효과가 지속적인 증가할 것으로 기대된다. 무엇보다도, 현재 세계적으로 연구를 주도하고 있는 연구 그 룹이 주로 응용분야의 전문가라는 점은 누구보 다 음향 및 초음파 기기에 대한 이해가 깊은 소음 진동 공학자들에게 시사하는 바가 크다고 하겠 다. 비록, 초음파의 한 응용 분야에 대한 간략한 소개 그쳤지만 초음파 기술이 더 다양한 분야와 만나는 계기가 되기를 조심스럽게 기대하면서 이에 갈음한다. 🌟