

정상파와 초고주파 집속 빔을 이용한 음향집게시스템의 개발에 관한 연구

A Study on Development of Acoustic Tweezer System Using Standing Waves and Very High Frequency Focused Beams

양 정 원*, 하 강 렬*, 김 무 준*, 이 정 우**, K. K. Shung**
(Jeong-Won Yang*, Kang-Lyeol Ha*, Moo-Joon Kim*, Jung-Woo Lee**, K.K. Shung**)

*부경대학교, **University of Southern California, USA.

(접수일자: 2008년 8월 5일; 채택일자: 2008년 10월 1일)

정상파와 초고주파 집속 빔을 이용한 초음파 음향집게의 개발 가능성을 타진하는 것을 목적으로, 수중에 놓인 미세입자의 위치를 제어할 수 있는 시스템을 구축하였다. 그 시스템은 입자를 평면 정상파의 방사력에 의해 1차적으로 포획하여 집속 빔의 초점 부근으로 이동시킨 다음, 초고주파 집속 빔의 방사력을 이용하여 2차적으로 포획하는 것이다. 구축된 시스템에 의해 구형 미세입자의 위치제어 실험을 행한 결과, 정상파 음장에서서는 음압의 마디에 입자가 잘 포획되었으며, 주파수의 조정에 의해 그 입자들 임의 위치로 이동조작이 가능하였다. 그리고 단일의 초고주파 집속 빔에 의해서는 음원으로부터 멀어지는 방향으로만 구동력이 작용하나, 2개의 대향하는 집속 빔을 사용할 경우 그 중심 부근에 포획됨을 알았다.

핵심용어: 음향집게, 방사력, 포획, 초고주파, 정상파

투고분야: 물리음향 및 광음향 분야 (9,6)

For the purpose of possibility study on development of an acoustic tweezer using standing waves and very high frequency ultrasound focused beams, a system which can manipulate the position of particles in water has been constructed. It can move the particles to near focal point of a focused beam by the radiation force of standing waves, and then the particles would be trapped by the radiating force of the focused beam. The results show that micro sphere particles were trapped well at nodes of the standing waves and their position can be easily manipulated by frequency control. And, even though the radiation force by single focused beam pushes a particle away from the transducer, two focused confronted beams can trap it at near center.

Keywords: Acoustic tweezer, Radiation force, Trapping, Very high frequency, Standing wave

ASK subject classification: Physical Acoustics and Photo-Acoustics (9,6)

I. 서론

세포나 미생물 등 생체입자를 포함하는 마이크로미터 단위의 각종 미세입자를 비접촉적으로 원격 조정하여 원하는 위치에 포획 또는 배치하는 위치제어 기술은 생체 공학 및 마이크로머신분야에서 1970년대 이후부터 활발히 연구되고 있다. 그러한 기술 중의 하나로서 광집게(optical tweezer)에 관한 연구는 1980년에 사이언스지에 소개되는 등 크게 각광받고 있다 [1-3]. 광집게에 있어서 물체를 이동시키는 힘은 운동량의 변화에 기인하는

방사력(radiation force)에 의한 것으로서 그 크기는 빛의 속도 및 강도 분포, 물체와 주위 매질간의 굴절률, 투과계수와 반사계수에 의해 산출되며, 파장보다 큰 Mie 입자에 대해서는 기본적으로 광선이론이 적용되고 있다 [4,5]. 그러한 이론은 유파, 특히 초음파의 경우에도 유사하게 적용될 수 있는바, 최근 Lee 등 [6,7]은 초고주파(VHF) 영역에서의 집속 초음파에 의한 음향집게(acoustic tweezer)의 가능성을 음선이론을 적용하여 검토하고, 음파의 파장과 관련하여 물체가 어떤 특정한 크기 빛 음향 임피던스의 조건을 갖출 때 집속음장 내의 일정한 지점에 포획될 수 있음을 이론적으로 제시하고 있다. 음향집게를 최초로 제안한 사람은 Wu 등 [8,9]으로서, 그들은 집속 초음파 빔의 음축 상에 있는 구형 입자에 작용하는

책임서자: 하 강 렬 (hakl@pknu.ac.kr)
부천시 남구 대연3동 599-1 부경대학교 물리학과
(전화: 051-629-5570; 팩스: 051-629-5570)

음향방사력 산출을 통하여 음장강도의 변화율에 비례하는 힘이 강도가 강한 쪽으로 작용함을 밝혀내고, 이로부터 집속 빔의 초점부근에서의 입자 포획 및 위치제어의 가능성을 제시하고 있다. 그러나 현재까지 초고주파 집속 초음파의 방사력에 의해 미세입자를 포획하거나 정밀하게 위치 제어하는 실험적 연구결과는 아직 제시되지 못하고 있다. 한편, 정상파 (standing wave) 음장에서의 방사력은 Nyborg [10] 등에 의해 잘 알려져 있으며, Kozuka 등 [11][12]은 그 정상파의 방사력을 이용하여 수중 미세입자의 위치를 조종하는 기법을 구축하고자 시도하고 있다.

본 연구는 정상파와 초고주파 집속 빔을 동시에 사용한 초음파 음향집계시스템의 개발 가능성을 타진하는 것을 목적으로 수행된 것이다. 이를 위하여 수중에 놓인 입자를 먼저 500 kHz 대역의 정상파에 의해 1차적으로 포획하여 집속 빔의 초점 부근으로 이동시킨 다음, 32 MHz의 초고주파 집속 빔을 이용하여 2차적으로 포획하는 음향 집계시스템을 구축하고, 그 시스템에 의해 구형입자의 포획 및 위치제어 실험을 행하였다. 특히, 단일의 32 MHz의 초고주파 집속 빔에 의한 포획효과에 대해 Lee 등 [6]에 의한 이론적 해석결과와 비교하여 고찰하고, 포획 및 위치제어를 위해서는 대향하는 두개의 집속 빔이 필요함을 보인다.

II. 입자에 작용하는 음향방사력과 포획

2.1. 정상파 음장

액체 매질 내의 음장 중에 놓인 구형 입자에 작용하는 음향방사력 F 는 $kr_n \ll 1$ (단, k 는 액체 매질에서의 파수, r_n 는 입자의 반경)일 때 식(1)과 같이 주어진다 [10].

$$F = V\{R_p \nabla \langle K_E \rangle - (1-\gamma) \nabla \langle P_E \rangle\} \quad (1)$$

여기서, V : 입자의 체적, $\langle K_E \rangle$: 운동에너지 밀도의 시간평균, $\langle P_E \rangle$: 포텐셜에너지 밀도의 시간평균, γ : 입자와 액체의 압축율비이며, R_p 는 입자의 밀도 ρ_s 및 액체 매질의 밀도 ρ_w 에 의해 다음과 같이 주어지는 파라미터이다.

$$R_p = \frac{3(\rho_s - \rho_w)}{2\rho_s + \rho_w} \quad (2)$$

z 방향에 대한 일차원 정상파의 경우 음압 p 와 입자속도 u_z 는 그림 1(a)와 같이 나타낼 수 있으며, 그에 따른 $\langle K_E \rangle$ 및 $\langle P_E \rangle$ 는 그림 1(b)와 같은 형태가 된다. 그림 1(b)에서 알 수 있는 바와 같이

$$\frac{\partial \langle P_E \rangle}{\partial z} = - \frac{\partial \langle K_E \rangle}{\partial z} \quad (3)$$

관계가 성립하며, 이 관계를 (1)식에 대입하면, 정상파 음장에서의 방사력은 다음과 같이 주어진다.

$$F_z = V\{R_p + (1-\gamma)\} \frac{\partial \langle K_E \rangle}{\partial z} \quad (4)$$

한편, 역학적 포텐셜 U 는,

$$F_z = -\nabla U \quad (5)$$

와 같이 정의되므로, (4)식과 (5)식으로부터

$$U = -V\{R_p + (1-\gamma)\} \langle K_E \rangle \quad (6)$$

가 얻어진다. U 가 최저인 곳에서 입자는 안정되므로 정상파음장에서 입자의 포획위치는 $R_p + (1-\gamma) > 0$ 인 경우에 그림 1(c)에 흑점으로 나타낸 곳이 된다. 액체 매질이 물일 때 대부분의 고체 및 생체입자는 $R_p + (1-\gamma) > 0$ 의 조건을 만족시킨다. 따라서 일반적으로 입자는 그림 1(c)에서 알 수 있는 바와 같이 정상파 음압의 마디에 포획된다.

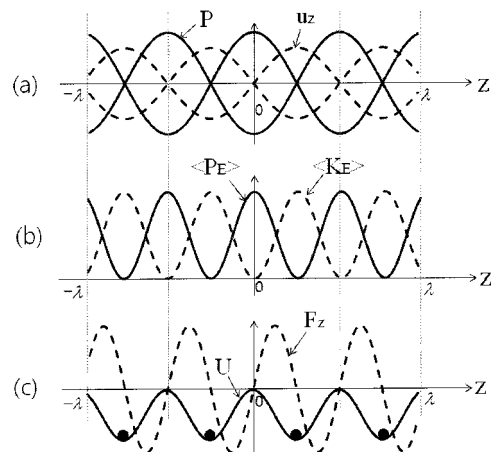


그림 1. 정상파 음장에서의 입자의 포획
Fig. 1. Trapping of particles in acoustic field by standing wave.

2.2. 집속 음장

입자의 반경이 파장에 비해 충분히 커서 음선이론의 적용이 가능하고, 음향임피던스가 주변매질의 임피던스와 비슷한 경우, 그림 2(a)에 나타난 바와 같이 집속형 트랜스듀서에서 나오는 음파가 x 방향으로 방사되고, 초점 부근에서의 음장 강도 I 가 y 방향으로 식 (7)과 같은 가우시안 분포를 가진다고 가정할 때,

$$I = \frac{P}{w(x)^2} \exp\left[-\frac{2y^2}{w(x)^2}\right] \quad (7)$$

단, P: 음향파워, w(x): 빔폭

집속 빔의 초점부근 음축 상에 있는 구형입자에 작용하는 음향방사력 F_z은 다음과 같이 산출된다 [6].

$$F_z = \frac{1}{c_w} \int_s \vec{i} \cdot \vec{ds} = \frac{P}{c_w} \int \frac{r_a^2}{w(x)^2} \exp\left[-\frac{2y^2}{w(x)^2}\right] H(\theta) d\theta \quad (8)$$

여기서, \vec{ds} 는 입자 위의 미소표면적, r_a는 입자의 반경, c_w는 주위 매질 (물)의 음속이며, H(θ)는 그림 2(b)에 나타난 바와 같이 입사되는 음선이 입자와 만나는 점과 입자의 중심을 연결한 선분 AO가 중심축과 이루는 각 θ에 따른 전달비율로서,

$$H(\theta) = \cos\theta \sin\theta \left\{ \cos(\theta_i - \theta) + R \cos(\theta_i + \theta) - \frac{T^2 [\cos(\theta_i - 2\theta) + R \cos(\theta_i + \theta)]}{1 + R^2 + 2R \cos 2\theta} \right\} \quad (9)$$

로 주어진다. 단, R과 T는 각각 반사계수와 투과계수이

며, x 지점에서의 빔폭 w(x)는 초선에서의 빔폭 w₀ 및 파장 λ에 의해 다음과 같이 나타내었다 [13].

$$w(x) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda x}{\pi w_0^2}\right)^2} \quad (10)$$

(8)식의 적분구간은 음선이 입자의 접선이 되는 영역까지로서 입자의 크기와 위치에 따라 달라진다. 그리고, (9)식은 특정의 θ에 대하여 입사각 θ_i와 그에 따른 굴절각 θ_r를 변화시키면서 계산되며, 입자의 포획은 식 (8)의 계산결과가 양에서 음으로, 또는 음에서 양으로 변하는 영역에서 이루어진다.

III. 음향집계시스템의 구성 및 특성

그림 3(a)와 (b)는 본 연구에서 구축한 음향집계시스템의 구성도와 그 사진을 나타낸다. 이 시스템은 입자의 움직임을 관찰하기 위한 고배율 광학현미경과 정밀 이동스테이지 및 3개의 신호발생기 (HP33120A, ED Lab, SG-1240 및 Goldstar FG-2002C)와 3개의 전력증폭기 (E&I 525LA, WR PA7E×2)로 이루어지는 초음파 송신장치에 의해 구성하였다. 여기서 사용한 광학현미경 (Sometech SV-35)은 대물렌즈의 시야에 포함되는 관찰영역을 CCD 카메라에 의해 비디오로 촬영한 후 컴퓨터에 저장할 수 있도록 되어 있으며, 영상기록계 (EZ Capture)와 연결되어 있어 피사체의 크기 및 피사체간의 상대적 위치를 정확히 파악할 수 있는 영상분석의 기능을 갖추고 있다. 트랜스듀서가 설치되어 있는 수조는 x, y 방향으로 미세조정이 가능한 정밀 이동스테이지와 회전스테이지 및 고나

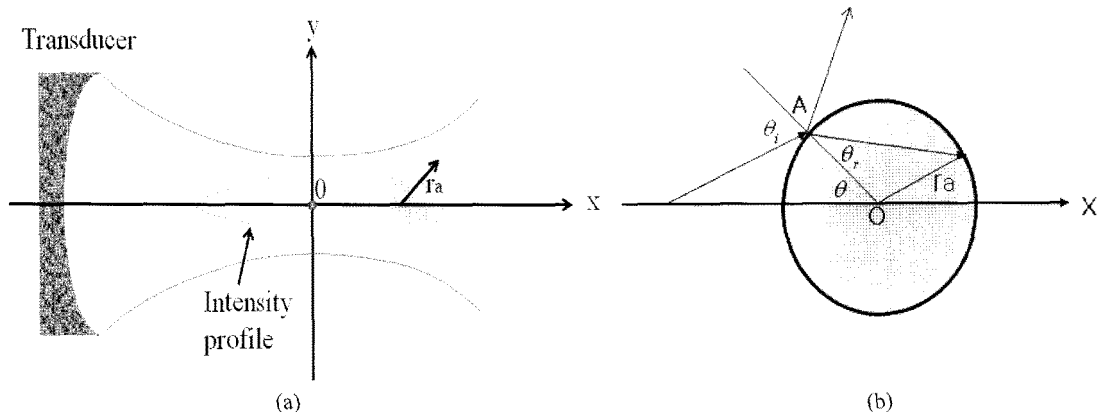


그림 2. 가우시안 집속 빔의 음축 상에 놓인 구형입자 (a) 좌표계, (b) 각 성분
 Fig. 2. A sphere particle centered on acoustic axis of an Gaussian focused beam. (a) Coordinate, (b) Angular components

오미터로 만들어진 시료설치대 위에 놓여진다.

입자의 포획을 위하여 PZT로 만든 2개의 중심주파수 500 kHz인 원형평면 트랜스듀서와 P (VDF-TrFE) 압전 막을 사용하여 만든 중심주파수 32 MHz의 원통집속 트랜스듀서를 그림 4와 같이 배치하였다. 그림에서 바닥 면에 설치한 평면 트랜스듀서는 수면에서의 반사파에 의해, 수평방향으로 설치한 평면 트랜스듀서는 마이크로미터에 연결되어 있는 반사판으로부터의 반사파에 의해 정상

파가 형성되도록 한 것이다. 여기서, 정상파의 마디 빛 배의 위치는 방사되는 음파의 주파수 및 물의 높이와 마이크로미터에 의해 조정된다.

그림 5는 사용한 2개의 평면 트랜스듀서에 의한 정상파음장을 Fresnel 회절영상법에 의해 가시화한 것인데, 음압의 마디가 $\lambda/2$ 간격으로 규칙적으로 나타남을 알 수 있다. 그림 6에는 슈리렌 (Schlieren)법을 사용하여 가시화한 집속음장의 영상을 이론계산 결과와 같이 나타내었

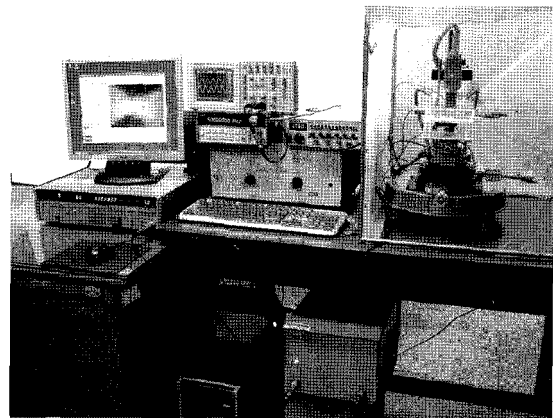
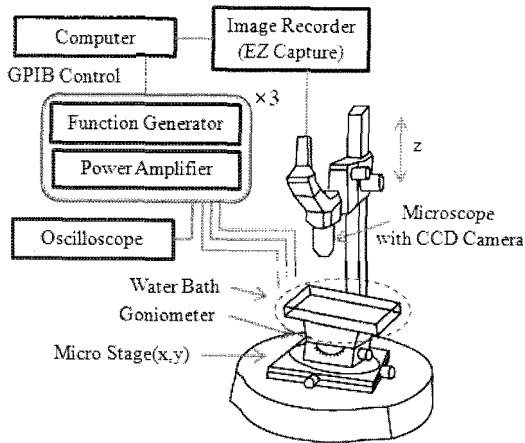


그림 3. 구축된 음향집게시스템 (a) 블록도, (b) 사진

Fig. 3. Constructed acoustic tweezer system (a) Block diagram, (b) Photograph.

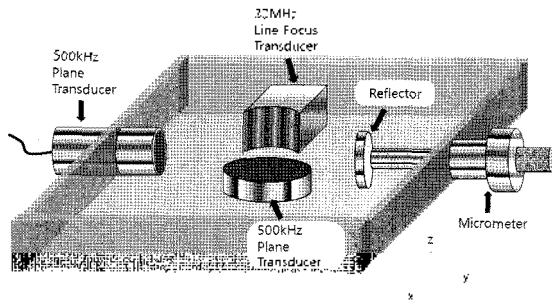


그림 4. 수조 내 초음파 트랜스듀서의 배치
Fig. 4. Setup of transducers in water bath.

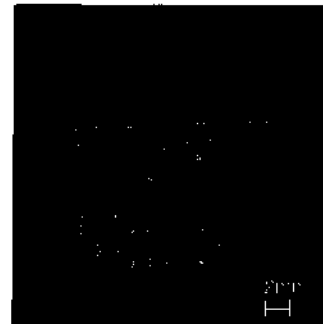


그림 5. 두개의 500 kHz 평면 트랜스듀서에 의한 정상파음장
Fig. 5. Acoustic field of standing waves obtained by two 500 kHz plane transducers.

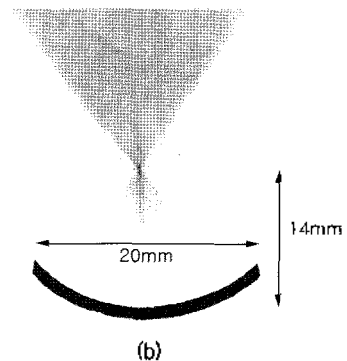
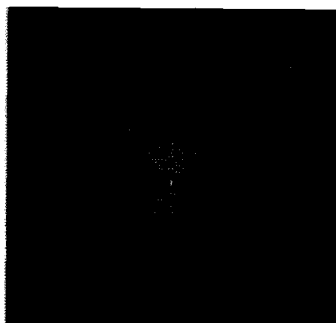


그림 6. 32 MHz 초음파 트랜스듀서에 의한 집속음장 (a) 시뮬레이션 결과, (b) 슈리렌 이미지
Fig. 6. Acoustic field by 32 MHz focusing transducer (a) Simulation, (b) Schlieren image.

다. 사용한 32 MHz 트랜스듀서는 개구 $l=20$ mm, 곡률 반경 $r=14$ mm인 원통형의 구리 배변체에 9 μm 의 P(VDF-TrFE)를 부착시켜 제작한 것인데, 측정할 음장이 이론해석 결과와 유사한 것을 고려하면 초점에서의 빔폭은 회절한계인 1λ 에 가까운 것으로 추정된다.

III. 위치제어 실험결과

본 연구에서는 폴리스티렌 (polystyrene: 직경 430 μm) 입자와 사체 제작한 파라핀 (paraffin: 직경 약 400 μm) 입자를 사용하여 실험을 행하였다. 폴리스티렌 입자는 Sigma-Aldrich사로부터 구입한 것이며, 파라핀 입자는 약 60°C의 물에 파라핀을 넣어 녹인 후, stir에 의해 교반시키면서 급랭시켜 제작하였다. 두 입자의 물성은 표 1에

나타내었다. 이 입자들은 정상파를 만드는 500 kHz의 파장 (약 3 mm)에 비해서는 충분히 작아 $kr_p \ll 1$ 의 조건을 만족시키며, 집속 음장을 만드는 32 MHz의 파장 (약 47 μm)에 비해서는 충분히 커서 집속 빔에 대한 음선이론의 적용이 가능하다.

고주파 집속 빔에 의한 포획현상을 규명하기 위해서는 입자를 집속 빔의 초점부근에 위치시켜야 하는데, 본 실험에서는 그림 4에 나타난 y, z 방향에 대해 먼저 일정 주파수의 정상파에 의해 입자를 포획한 후, 그 주파수를 미소하게 변화시켜 위치를 이동시켰다. 그림 7(a)은 원형 평면 트랜스듀서의 공진주파수인 500 kHz에 의한 정상파의 마디에 폴리스티렌 입자가 포획된 모습을 나타내며, 그림 7(b)와 (c)는 그 주파수를 중심으로 ± 10 kHz 주파수 변화를 시켰을 때 새롭게 형성된 정상파의 마디에 폴리스티렌 입자가 이동하여 포획된 모습을 나타낸다.

표 1. 실험에 사용한 입자의 물성
Table 1. Physical properties of the particle used in experiment.

particles	density (kg/m ³)	sound velocity (m/s)	acoustic impedance (MRays)	Z_p/Z_w	note
polystyrene	1051	2319	2.44	1.62	ref.[14]
paraffin	910	1740	1.76	1.17	measured

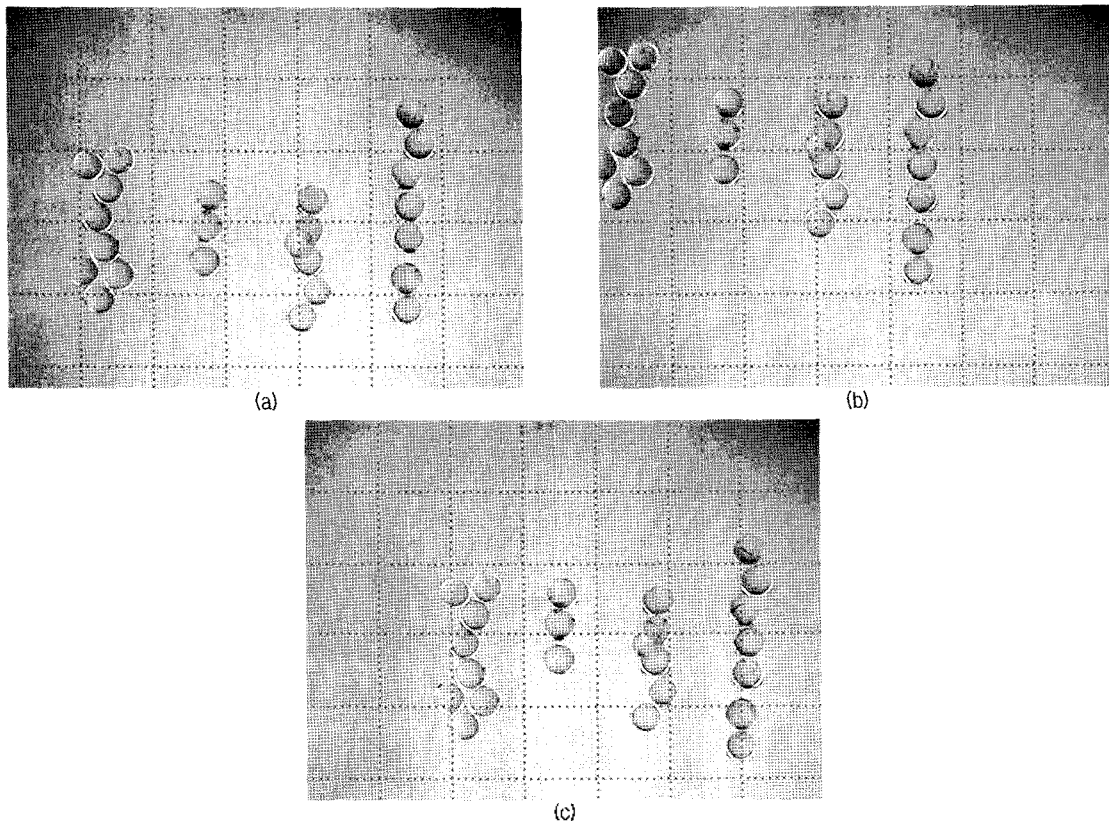


그림 7. 정상파 음장에 의한 폴리스티렌 입자 포획 (grid 간격: 1 mm) (a) 500 kHz. (b) 490 kHz. (c) 510 kHz
Fig. 7. Trapped polystyrene particles by acoustic field of standing waves (grid=1 mm). (a) 500 kHz, (b) 490 kHz, (c) 510 kHz

그림 7(a)~(c)에서 마디와 마디간의 간격은 각각 1.46 mm, 1.52 mm, 1.36 mm로 측정되었는데, 이것은 음속 약 1500 m/s에 대한 각 구동주파수의 $\lambda/2$ 와 거의 일치한다. 단, x 축 방향으로 초음파가 가해지지 않기 때문에 구속되지 않은 상태에서 입자가 자유로이 이동하는데, 그림 7에서는 수조 내 물의 미소한 크기의 대류 등에 의해 약간 아래방향으로 위치가 이동되었음을 알 수 있다. 입자는 그림 8의 모식도에 나타낸 것처럼 주파수를 증가시켰을 때 트랜스듀서에서 멀어지는 방향으로, 감소시켰을 때 접근하는 방향으로 이동하였다. 따라서 실험한 약 7 mm의 영역에 있어서는 전후로 자유롭게 조종 가능하였다.

하나의 입자를 집속 빔의 초점 부근에 이동하여 배치시킨 후 32 MHz의 음파를 방사시켰을 때 입자는 트랜스듀서로부터 멀어지는 방향으로만 움직였다. 그림 9는 폴리스티렌 및 파라핀 입자에 대해 트랜스듀서에 가해주는 전압을 27Vpp로 하였을 때 입자의 위치를 시간별로 측정 한 것이며, 그림 10은 폴리스티렌 입자에 대해 트랜스듀서 인가전압을 5Vpp 간격으로 변화시켰을 때 이동속도 변화를 나타낸다. 이 결과로부터 폴리스티렌 입자가 파라핀 입자보다 빠르게 이동하며, 가해주는 전압이 클수록 속도는 증가함을 알 수 있다.

VI. 고찰

단일의 초고주파 집속 빔에 의하여 사용한 입자들의 포획이 L_{00} 등 (6)이 이론적으로 제시한 것처럼 가능한지 여부를 파악하기 위하여 트랜스듀서에서 방사되는 음향 파워에 따른 방사력을 (8)식에 의해 계산하였는데, 그 결과를 그림 11에 나타내었다. 이 계산에서 초점면에서의 빔폭 $w_0 = \lambda$, 물에서의 음속은 1500 m/s로 가정하였다. 초점면에서 전체 에너지의 1/2이 빔폭 내에 집속된다고 가정할 때 1W는 208.6 dB의 음장강도를 갖는다. 그림 11에서 알 수 있는 바와 같이 폴리스티렌의 경우 음향방사력은 파워가 클수록 증가하며, 음의 값을 가지는 영역은 존재하지 않으나, 파라핀의 경우 입자의 중심이 초점 앞 약 0.3 mm 이내의 영역에 있을 때 음향파워에 무관하게 음의 값을 가지며, 파워가 클수록 그 값이 작아진다. 따라서 파라핀 입자는 초점부근에 포획되어야 하나 그림 9에서 나타낸 것처럼 실험결과 폴리스티렌 입자와 마찬가지로 포획되지 않았다. 또한, 입자의 움직임이 초점부근에서 가장 빠르며, 트랜스듀서에 가깝거나 초점에서

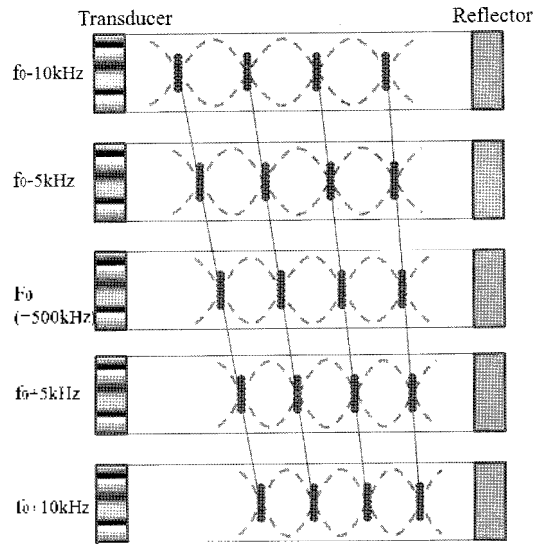


그림 8. 정상파 음장에서 주파수 변화에 따른 입자의 이동
Fig. 8. Schematics of particle movement in acoustic field of standing wave.

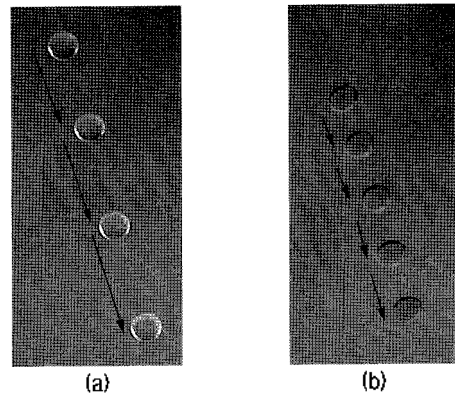


그림 9. 집속 빔에 의한 입자의 위치 이동 (20초 간격) (a) 폴리스티렌, (b) 파라핀

Fig. 9. Particle movement by acoustic field of focused beam (interval=20sec). (a) Polystyrene, (b) Paraffin

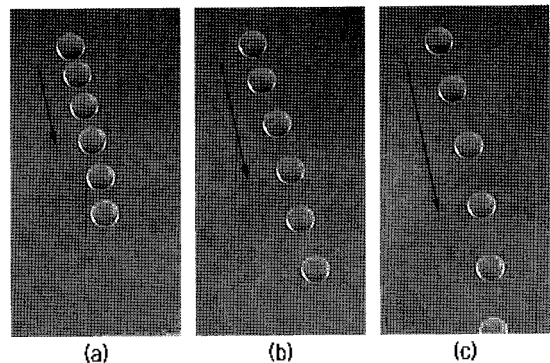


그림 10. 인가전압별 입자의 위치 이동 (10초 간격) (a) 22Vpp, (b) 27Vpp, (c) 32Vpp

Fig. 10. Particle movement by input voltage variation (interval=10sec). (a) 22Vpp, (b) 27Vpp, (c) 32Vpp.

멀리 떨어진 지점에서의 움직임은 약하게 나타났다. 이것은 방사력 이외에 음향류(acoustic streaming)의 영향

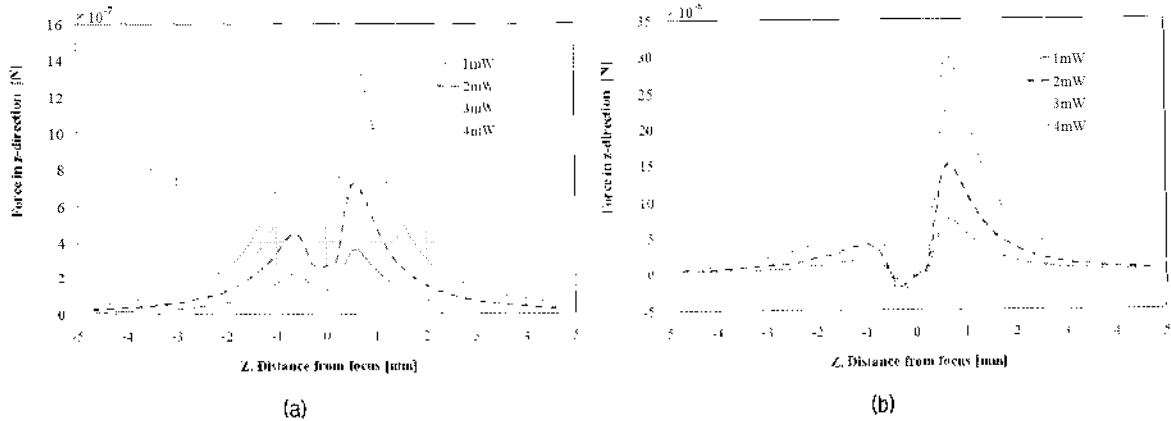


그림 11. 32 MHz 집속 빔에 의한 음향방사력의 계산 결과 (a) 폴리스티렌, (b) 파라핀
 Fig. 11. Calculated radiation forces by focused beam of 32 MHz. (a) Polystyrene, (b) Paraffin

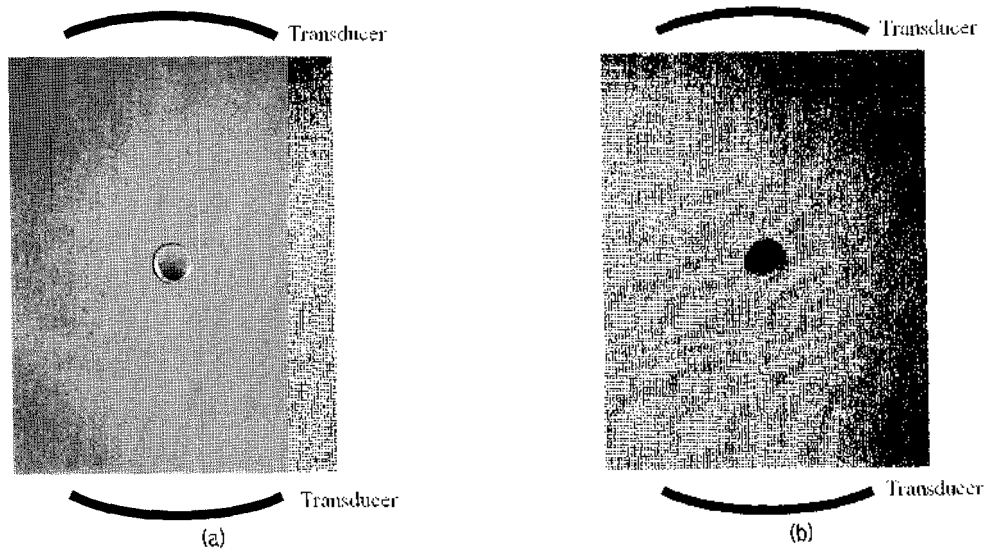


그림 12. 32 MHz의 대향하는 집속 빔에 의해 포획된 입자 (a) 폴리스티렌, (b) 파라핀
 Fig. 12. Trapped particles by 32 MHz two focused confronted beams. (a) Polystyrene, (b) Paraffin

이 크게 작용하기 때문인 것으로서, 입자를 일정지점에 포획하기 위해서는 Wu 등 (9)이 제시한 것처럼 동일한 2개의 집속 트랜스듀서를 대향되게 배치하여 그 영향을 줄일 필요가 있다. 그림 12는 동일한 2개의 32 MHz 집속 트랜스듀서를 초점이 일치하도록 대향되게 배치한 후 실험한 것으로서 입자가 초점 부근에 포획된 모습을 나타내는 영상이다. 이때 하나의 진력 증폭기 출력을 분기시켜 각각의 트랜스듀서의 구동신호로써 인가시켰으며, 시뮬레이션을 통해 계산된 음상의 초점 부근에 편셋을 이용하여 입자를 가져다 놓고, y 및 z 방향으로 정재파를 이용하여 입자의 위치를 조정하였다. 이 입자는 2개의 트랜스듀서 중 하나의 위치를 중심부근에서 음축 상으로 이동시키면 수 mm의 범위 내에서 그 트랜스듀서가 이동하는 방향으로 이동하였다.

V. 결론

정상파와 VHF 대역의 집속초음파를 동시에 사용한 음향집계시스템의 개발 가능성을 타진하는 것을 목적으로, 수중에 놓인 입자를 먼저 정상파에 의해 1차적으로 포획하여 집속 빔의 초점 부근으로 이동시킨 다음, 그 집속 빔을 이용하여 2차적으로 포획하는 음향집계시스템을 구축하고, 폴리스티렌 및 파라핀 입자에 대한 포획 실험을 행하였다. 그 결과, 입자들은 정상파 음압의 마디에 잘 포획되며, 주파수 조절에 의해 위치이동의 조종이 가능하였다. 또한, 단일 집속 빔에 의해서는 이론해석 결과와는 달리 트랜스듀서로부터 멀어지는 방향으로만 이동하나, 대향하는 집속 빔을 사용할 경우 그 중심에 포획되어, 트랜스듀서의 위치 변동에 따라 음축 상에서의 위치 제어

가 가능함을 알았다. 결론적으로, VHF 대역의 집속 빔을 대향 배치할 경우 정상파와 집속 빔에 의한 음향집계시스템의 개발이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 정부 (교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2005-042-D00219).

참고 문헌

1. A. Ashkin, "Acceleration and trapping of particles by radiation pressure," *Phys. Rev. Lett.*, **24**, 156-159, 1970.
2. A. Ashkin, "Applications of laser radiation pressure," *Science* **210**, 1081-1088, 1980.
3. A. Ashkin, "Optical trapping and manipulation of neutral particles using lasers," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **94**, 4853-4860, 1997.
4. T. C. Bakker Schul, G. Hesselink, B. G. de Grooth, and J. Greve, "Experimental and theoretical investigations on the validity of the geometrical optics model for calculating the stability of optical traps," *Cytometry* **12**, 479-485, 1991.
5. A. Ashkin, "Forces of a single beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime," *Biophys. J.*, **61**, 569-582, 1992.
6. J. W. Lee, K. L. Ha and K. K. Shung, "A theoretical study of the feasibility of acoustical tweezers: Ray acoustics approach," *J. Acoust. Soc. Am.*, **117**, 3273-3280, 2005.
7. J. W. Lee and K. K. Shung, "Radiation forces exerted on arbitrarily located sphere by acoustic tweezer," *J. Acoust. Soc. Am.*, **120**, 1084-1094, 2006.
8. J. Wu and G. Du, "Acoustic radiation force on a small compressible sphere in a focused beam," *J. Acoust. Soc. Am.*, **87**, 997-1003, 1990.
9. J. Wu, "Acoustical Tweezers," *J. Acoust. Soc. Am.*, **89**, 2140-2143, 1991.
10. W. L. Nyborg, "Radiation pressure on a small rigid sphere," *J. Acoust. Soc. Am.*, **42**, 947-952, 1967.
11. T. Kozuka, T. Tuziuti, H. Mitome, T. Fukuda, and F. Arai, "Control of position of a particle using a standing wave field generated by crossing sound beams," 1998 IEEE Ultrason. Symp. Proc., 657-660, 1998.
12. 小塚晃透, "超音波マイクロマニピュレーション," *日本音響學會誌*, **61**, 154-159, 2005.
13. S. Nemoto and H. Togo, "Axial force acting on a dielectric sphere in a focused laser beam," *Applied Optics*, **37**, 6386-6394, 1998.
14. 奥吉純一, 菊池喜充, 能本乙彦, *超音波技術便覧*, (日刊工業(日), 1968), 1352-1355.

저자 약력

•양 정 원 (Jeong-Won Yang)
한국음향학회지 Vol.26, No.1E 참조

•하 강 렬 (Kang-Lyeol Ha)
한국음향학회지 Vol.25, No.3E 참조

•김 무 준 (Moo-Joon Kim)
한국음향학회지 Vol.25, No.3E 참조

•이 정 우 (Jung-Woo Lee)
1995년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원에서 전자장 수치해석으로 석사학위 취득. 2006년 미국 University of Southern California, Dept. of Biomedical Engineering에서 박사학위 취득. 현재 동 대학에서 박사후 연구원으로 재직 중. 주관심분야는 의료용 초음파 트랜스듀서 설계, 제작과 그의 의공학적 응용기술개발임.

•K. K. Shung
1968년 대만 Cheng-Kung University 에서 전기공학 학사. 1970년 미국 University of Missouri 에서 전기공학 석사학위 취득. 1975년 University of Washington에서 전기공학 박사학위 취득. 그 후 Pennsylvania State University, Bioengineering Program에서 2002년까지 교수로 재직하였으며 현재 University of Southern California, Dept. of Biomedical Engineering의 교수로 재직 중. 1997년부터 NIH Resource Center on Medical Ultrasonic Transducer Technology 의 연구총책임자를 역임하고 있음.