

정재초음파를 이용한 유동중 미세 입자 위치 제어

Position Control of Micro Particles in a Fluid Flow Using Ultrasonic Standing Wave

조승현*[†], 서대철*, 안봉영*, 김기복*, 김용일**

Seung Hyun Cho*[†], Dae-Cheol Seo*, Bongyoung Ahn*, Ki-Bok Kim* and Yong-Il Kim**

초 록 정재초음파를 이용하면 유체에 잠겨 있거나 유체를 따라서 흐르는 미세 입자의 조작이 가능하다. 정재초음파 장이 입자에 힘을 작용하여 입자를 음압마디 또는 반음압마디로 이동시킨다. 본 연구에서는 정재초음파의 주파수를 조정함으로써 유동 중 미세 입자의 위치를 제어하는 방법을 제안하고자 한다. 이를 위해 먼저 수침형 초음파 트랜스듀서를 이용하여 폭 수 밀리미터의 미세 채널을 가지는 정재초음파 발생시스템을 구성하였다. 제안한 발생시스템을 이용하여 주파수 2 MHz부터 2.5 MHz까지 영역에서 정재초음파 장을 발생시키고, 물을 따라 흐르는 수 마이크로미터 내외의 탄화규소 입자가 음압 마디로 잘 이동함을 확인하였다. 이때, 미세 채널의 폭과 주파수가 입자의 거동에 미치는 영향을 관찰하였으며, 주파수가 미세입자의 이동 위치를 결정하는 중요한 파라미터임을 확인하였다. 결과적으로, 초음파의 주파수를 조정함으로써 입자의 이동 위치를 제어할 수 있음을 실험을 통해 확인하였으며 최대 범위는 약 261 마이크로미터이다. 본 연구로부터 유체내의 입자 조작에 있어서 정재초음파의 다양한 응용 가능성을 확인할 수 있었다.

주요용어: 정재초음파, 미세 입자 조작, 미세 채널, 입자 위치 제어

Abstract Using ultrasonic standing waves, micro particles submerged or flowing in fluid can be manipulated. Due to acoustic radiation force of ultrasound, particles are forced to move to pressure nodal or antinodal lines. In this work, we propose a method to control the position of micro particle in a flow by adjusting the frequency of the standing wave. To this end, standing wave field generation system including a few millimeter thick micro channel was established using an immersible ultrasonic transducer. The present generation system works valid in a frequency range between 2.0 MHz and 2.5 MHz. We observed the SiC particles in water moved to pressure nodal lines by the standing wave. The effect of the channel thickness and operating frequency was also investigated. Interestingly, it was shown that the operating frequency have a close relation with the location of the pressure nodal line. Consequently, it can be said that the position of particle movement can be controlled by adjusting the ultrasound frequency. The maximum range of the controllable position was about 261 micrometers under the given condition. The resulted observations reveal the possibility of various applications of the ultrasonic standing wave to the manipulation of particles submerged in a fluid.

Keywords: Ultrasonic Standing Wave Field, Micro Particle Manipulation, Micro Channel, Particle Position Control

1. 서 론

유체에 섞여 있는 미세 입자를 조작(manipu-

lation)하는 기술은 다양한 분야에서 매우 중요한 필수적인 과정 중 하나이다[1]. 이러한 입자 조작 방법 중에서 비교적 소수의 입자를 조작하는 방법

으로는 광학적 방법, 자기적인 방법, 유전체전기영동(dielectrophoresis)법 등의 방법이 있다[2]. 반면 다수의 입자를 대상으로 하는 방법으로는 침전, 여과, 원심분리 등의 방법이 있다. 최근 이러한 방법들과 더불어 정재초음파(ultrasonic standing wave)를 입자 조작에 이용하는 방법이 제안되어 다양한 연구사례가 보고되고 있다[2-5].

진행 방향이 반대인 초음파가 중첩되면 마치 제자리에 머물러 있는 것과 같은 효과가 나타나는데 이를 정재초음파라고 한다. 이러한 정재초음파 공간에서는 음압(acoustic pressure)이 항상 영인 지점과 시간에 따라 음압이 극대/극소로 변하는 지점이 존재한다. 일반적으로 정재초음파가 발생하는 유체 내에 입자가 있으면 음압의 차이로 인하여 입자에 힘이 작용한다. 이러한 원리를 이용하면 정재초음파를 이용하여 유체내에 섞여있는 입자의 위치를 조작하는 것이 가능하다.

현재 정재초음파를 이용한 입자 조작 기술은 폭넓게 연구가 진행되고 있다. 1990년대 후반에 들어 생명공학 분야에서 혈장 정화(clarification), 미생물 제거, 체액내의 항원 감지 등에 응용한 연구가 보고된 바 있다[6-8]. 2000년대 들어서는 실리콘 공정 기술을 이용하여 전체 입자 분리시스템을 MEMS 또는 Lab-on-a-chip 기구로 제작하여 소형화하는 연구가 활발하고[2,9-11], 또한 세포 포집 등 바이오 분석을 비롯한 여러 분야에서 응용 사례가 발표되고 있다[2,5,11]. 특히, 정재초음파를 이용하는 기술은 유체의 유동 여부와 무관하게 섞여 있는 입자를 조작할 수 있다는 장점이 존재하므로 세포 수집, 입자의 크기별 분리, 입자 배열 및 구속 등 많은 연구가 주로 정밀 분석 이전의 전처리 과정의 효율을 높이는 데 초점이 맞추어져 있다. 한편, 국내에서도 초음파를 이용하여 유체내 입자를 분리하고자 하는 연구가 진행되어왔다. 특히, 압전 진동소자와 스테인레스 스틸 재질의 정합층 및 반사층으로 구성된 정재초음파 발생시스템을 제안하고 이를 모래(sand) 입자의 부양에 적용한 연구가 보고된 바 있다[12,13]. 또한 실린더형 수침형 초음파 트랜스듀서를 이용하여 초음파 발생 시스템을 구성하고 이를 진흙입자의 거동에 적용한 연구도 진행되었다[14].

본 연구에서는 이러한 기존의 연구에서 더 나아가 정재초음파를 이용하여 흐르는 유체에 섞인 미세 입자의 위치를 제어하는 방법을 제안하고자 한다. 이를 위하여, 먼저 수침형 초음파 트랜스듀서를

이용하여 유체가 흐를 수 있는 미세 채널에 정재초음파를 형성할 수 있는 장치를 구축하였다. 이렇게 마련된 입자 분리 시스템에 수 마이크로 미터 직경의 탄화규소(silicon carbide, SiC) 입자가 섞인 물을 정재초음파가 형성된 채널에 흘려주면서 채널 폭, 초음파 주파수, 입력 파워 등의 파라미터를 변경해 가면서 입자의 거동을 관찰하였다. 결과적으로, 본 연구에서는 정재초음파를 이용하면 유동 중인 입자를 효과적으로 특정 위치로 이동시킬 수가 있을 뿐 아니라, 주파수를 조정하여 그 위치를 제어할 수 있음을 보였다.

향후 이와 같은 입자의 조작 기술은 다양한 분석 측정 분야뿐만 아니라 실시간 물질 성분검출 및 분석 등 다양한 분야에 응용이 가능할 것으로 생각된다.

2. 정재초음파의 형성 및 입자 조작 원리

주파수가 동일한 두 파가 서로 마주보며 진행하다가 만나면 서로 중첩된다. 즉, 두 파의 진폭이 서로 보강 및 상쇄되어 마치 파가 이동하지 않고 제자리에 머물러 있는 것과 같은 효과를 보이는데 이를 정재파(standing wave)라고 한다.

Fig. 1(a) 와 같이 유체에서 초음파가 전파할 때, 음향임피던스(acoustic impedance)가 큰 반사체(reflector)를 만나면 대부분의 입사파의 에너지가 반사하게 된다. 이때 반사체 근처에서는 진행반향이 서로 반대인 입사파와 반사파가 중첩되어 정재초음파가 형성된다. 따라서, 초음파 트랜스듀서와

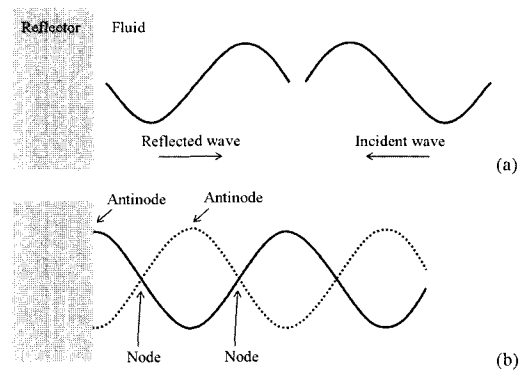


Fig. 1 (a) The superposition of the incident wave and the reflected wave from the rigid reflector, (b) formation of ultrasonic standing wave field near the reflector

반사체를 설치하여 초음파가 반사체에 수직으로 입사하게 하면 쉽게 정재초음파 장(field)을 만들어 낼 수 있다.

반사체 부근에서 음압의 분포는 시간에 따라 Fig. 1(b)와 같이 정지되어 진동하는 양상을 보인다. 따라서, 정재초음파 장에서는 항상 음압이 영이 되는 지점이 존재하는데, 이를 음압마디(pressure node)라고 지칭한다. 반대로 시간에 따라 음압이 극대/극소를 이루는 지점은 반음압마디(pressure antinode)라고 한다. 반사체의 음향임피던스가 유체의 음향임피던스에 비해 현저히 크다면, 반사체와 유체와의 경계면은 반음압마디가 되고 경계로부터 파장의 4분의 1에 해당하는 위치에 음압마디가 위치한다. 또한 이웃하는 음압마디 사이의 간격이나 반음압마디 사이의 간격은 파의 반파장($\lambda/2$) 길이와 같다. 이 때, 초음파의 파장은 주파수에 따라 변하므로 주파수를 변화시키면 음압마디의 위치를 조절할 수 있다.

정재초음파 장 내에 입자가 위치하면, 이 입자는 정재파의 음압분포로 인해 힘을 받는다[15]. 이러한 힘에 의해 입자는 정재파의 음압마디 또는 반음압마디로 이동하게 된다. 이 때, 입자가 정재파로 인하여 받는 힘은 다음 식 (1)로 표현이 가능하다[16].

$$F_{sw} = -\frac{\pi P_0^2 V \beta_0}{2\lambda_0} \phi(\beta, \rho) \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda_0}\right) \quad (1)$$

이 때, P_0 는 음압 크기, V 는 입자 부피, β 는 압축률, ρ 는 밀도를 각각 나타낸다. 식 (1)에서, $\phi(\beta, \rho)$ 로 표현되는 대비계수(contrast factor)는 다음 식 (2)와 같이 밀도와 압축률의 함수로 표현된다.

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

식 (1)과 (2)에서 아래첨자 0와 c는 각각 유체매질과 입자를 뜻한다. 식 (1)과 (2)에서 알 수 있듯이, 입자가 유체 내에서 정재파에 의해 받는 힘은 유체매질과 입자의 밀도와 압축률에 따라서 방향이 바뀔 수 있다. 이것은, 입자와 유체의 물성에 따라서 입자가 음압마디에 모일수도 있고 반대로 반음압마디에 모일 수도 있음을 내포 한다. 예를 들면, 유체가 물일 때는 금속입자 등은 음압마디쪽으로 공기방울은 반음압마디쪽으로 힘이 작용한다.

유체매질 내의 입자는 정재파로 인한 힘 이외에도 다양한 인자에 영향을 받는다. 이러한 영향 요인으로는 중력(gravity), 부력(buoyancy), 유동 저항(drag force) 등이 있다. 경우에 따라서는 입자 사이에 작용하는 입자간 힘(inter-particle force)과 벽과 입자사이에서 작용하는 반 데르 발스(Van der Waals) 힘 또한 함께 고려되어야 좀 더 정확한 입자의 거동 분석이 가능하다. 하지만, 본 연구에서는 정재파를 수평방향으로 유동을 수직방향으로 설정하여, 정재파로 인한 힘이 중력, 부력 및 유동 저항과 서로 독립적이도록 하였다. 또한 미소 힘은 고려하지 않았다.

3. 정재초음파 발생 시스템 구성

유체가 흐르는 채널에 정재초음파를 형성하기 위해 Fig. 2와 같이 정재초음파 발생 시스템을 구축하였다. 채널의 양 벽면은 각각 스테인레스 스틸 재질의 반사체와 상용 수침형 초음파 트랜스듀서(Panametrics, A330S-SU)로 구성되었다. 초음파 트랜스듀서 구동을 위해 고출력 파워앰프(T&C Power Conversion Inc., AG 1017L)를 이용하였고,

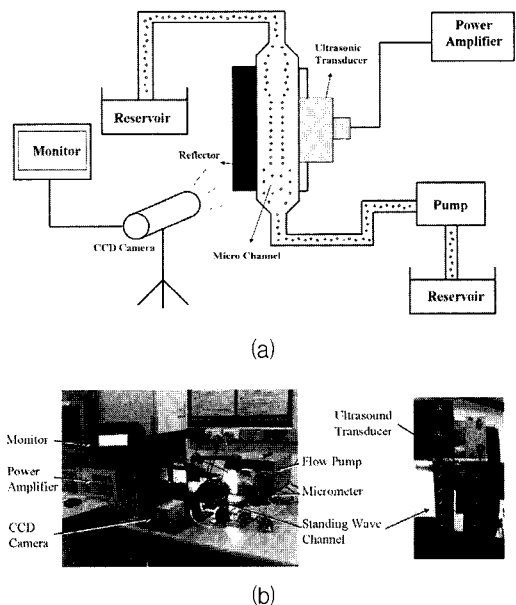


Fig. 2 (a) The conceptual diagram and (b) the photograph of the experimental setup for the ultrasonic standing wave formation in a micro channel and the particle position control

앰프는 특정 주파수의 연속 사인파(continuous sine wave)를 초음파 트랜스듀서에 공급하는 역할을 한다. 또한 앞서 설명하였듯이 중력 및 부력의 영향과 정재파로 인한 영향을 독립적으로 관찰할 수 있도록 채널은 수직을 이루도록 하여 유동이 아래에서 위로 흐르도록 설계하였다. 더불어, 채널의 폭을 자유롭게 조절할 수 있도록 고안되었고, 투명 아크릴 창을 이용하여 입자의 거동을 관찰할 수 있도록 제작되었다. 줌렌즈가 달려있는 CCD 카메라와 모니터를 이용하여 입자의 거동을 관찰하였고, 입자가 섞인 유체를 초음파 분리장치로 이송시키기 위하여 정량이송펌프를 이용하였다.

입자는 탄화규소 입자(Aldrich 社)를 물에 섞은 것을 사용하였다. 입자의 크기는 400 메쉬(mesh) 이하로서 직경은 대략 수 마이크로미터 내외이다. 탄화규소는 물에 비해 밀도가 크고 압축률은 현저히 작으므로 식 (2)의 대비계수는 양의 값을 갖는다. 따라서 물속의 탄화규소 입자는 정재초음파로 인해 음압마디쪽으로 힘을 받는다.

4. 실험 결과

4.1. 정재초음파에 의한 입자 거동

Fig. 3은 정재초음파 발생 시스템의 가동 전과 후에 입자의 거동이다. 초음파 트랜스듀서가 작동하지 않을 때는 유체 유동에 따라 무작위로 이동하던 탄화규소 입자들이 트랜스듀서에 전압을 걸어주면 특정 선상에 일렬로 늘어서 이동하는 것을 관찰할 수 있다. 앞서 설명하였듯이 정재초음파로 인하여 탄화규소 입자가 음압마디쪽으로 힘을 받으므로, 입자들이 배열한 선상이 정재파가 형성하는 음압마디로 볼 수 있다. Fig. 3(b)의 음압 마디사이의 간격은 약 0.34 mm로 이는 가진 주파수 2.16 MHz 초음파의 반파장에 해당하는 길이이다. 유체가 물이므로 음압마디 사이의 간격은 다음 식과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} \frac{\lambda}{2} &= \frac{c}{2f} \\ &= \frac{1490 \text{ m/s}}{2 \times 2.16 \text{ MHz}} = 0.34 \text{ mm} \end{aligned} \tag{3}$$

첫 번째 음압마디는 위치는 반사체로부터 파장의 4분의 1에 해당하는 0.17 mm 떨어져 있지만, 카메

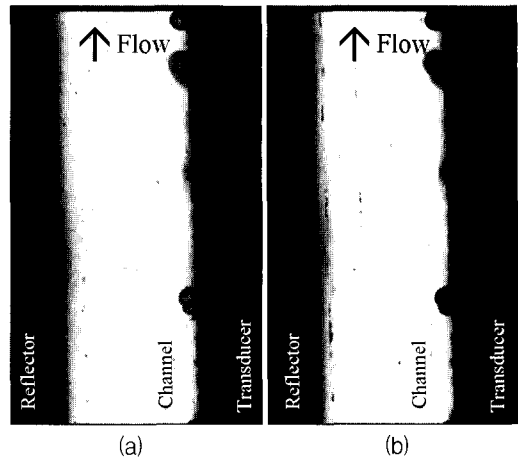


Fig. 3 Silicon carbide particle behavior (a) before and (b) after ultrasonic standing wave field formation. (Frequency: 2.16 MHz, channel width: 1.5 mm)

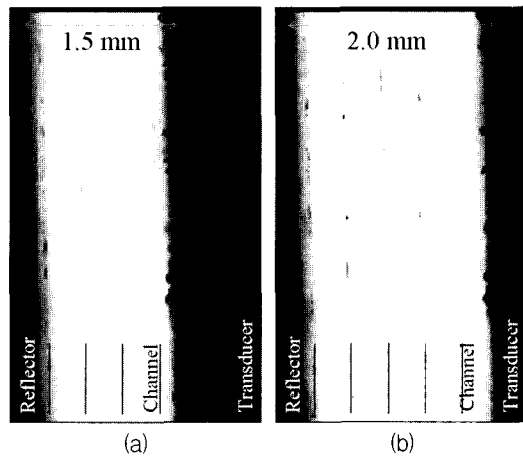


Fig. 4 Particle alignment with the channel width of (a) 1.5 mm and (b) 2.0 mm. (Frequency: 2.16 MHz)

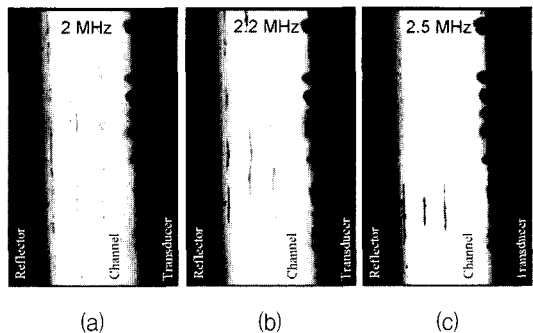


Fig. 5 Particle alignment with the actuating frequency of (a) 2 MHz, (b) 2.2 MHz, and (c) 2.5 MHz. (Channel width: 1.5 mm)

라 특성상 반사체와 유체의 경계를 확인하는데 어려움이 있었다. 트랜스듀서 표면에서 관찰되는 공기방울은 트랜스듀서 내부 진동소자의 발열 또는 공동(cavitation) 현상으로 인해 발생할 가능성이 있으나, 정확한 이유에 대해서 본 논문에서는 고찰하지 않았다.

4.2. 미세 채널 폭의 영향

Fig. 4는 채널 폭을 변화시켰을 때 입자가 모이는 양상을 보여준다. 본 연구에서 구성한 정제초음파 발생 시스템에서는 반사체로부터의 음압마디의 위치가 채널 폭과 상관없이 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 즉, 채널 폭의 변화는 음압마디의 위치에는 별다른 영향을 주지 않았다.

하지만, 채널 폭은 정제파 발생 시스템의 공진과 밀접한 관련이 있다. 가령 채널의 양쪽 벽에서 음파의 전반사가 발생한다고 가정하면 채널 폭이 정제파 반파장의 정수배일 때 공진이 발생하여 정제파 생성이 효율적이다. 그럼에도 불구하고, 본 연구의 실제 실험 구성에서는 반사체에서 이상적인 전반사가 발생하지 않고, 더구나 트랜스듀서는 초음파를 효율적으로 투과하도록 설계되어 있기 때문에 시스템의 공진이 채널 폭에 의해서만 결정되지 않는다.

정제초음파 발생 효율이 전체 시스템의 주파수 응답 특성에 영향을 받을 것으로 생각되므로, 특정 구동 주파수를 가지는 정제파 발생 시스템을 설계할 때는 반사판의 두께와 채널의 두께 등이 각각 해당 주파수에서 공진이 발생하도록 결정되어야 한다. 반대로 어느 정도 넓은 주파수 대역에서 구동하고자 할 때는 되도록 대역전체에 걸쳐 선형 응답을 갖는 시스템을 설계할 필요가 있다. 본 연구에서 구성한 정제초음파 발생 시스템에서는 1.0 mm ~ 3.0 mm 사이에서 채널폭을 변경하더라도 2.0 MHz ~ 2.5 MHz의 주파수 대역에서 정제초음파 생성이 계속 유지되는 것을 관찰할 수 있었다.

4.3. 주파수를 이용한 입자 위치 제어

정제초음파에 의한 음압마디의 위치는 파장의 길이의 함수이므로, 트랜스듀서 구동 주파수의 변경으로 음압마디의 위치를 조절할 수 있다. 결과적으

Table 1 The distance of SiC particle position from the reflector at the frequency of 2.0 MHz and 2.5 MHz

	2.0 MHz	2.5 MHz
1 st pressure node ($\lambda/4$ from the reflector)	0.186 mm	0.149 mm
2 nd pressure node ($3\lambda/4$ from the reflector)	0.559 mm	0.447 mm
3 rd pressure node ($5\lambda/4$ from the reflector)	0.931 mm	0.745 mm
4 th pressure node ($7\lambda/4$ from the reflector)	1.304 mm	1.043 mm

로 탄화규소 입자가 모이는 위치는 음압마디이므로 주파수의 조정을 통해 유동 중인 입자의 위치제어가 가능하다. Fig. 5에서 주파수 변화에 따른 입자 위치의 변화를 확인할 수 있다. 본 시스템에서는 2.0 MHz부터 2.5 MHz까지 연속적으로 주파수의 변경이 가능하므로, 각 음압마디에서 제어가능한 위치는 Table 1과 같다. 즉, 주파수를 높이면 입자들이 반사체쪽으로 이동하고, 반대로 주파수를 낮추면 트랜스듀서 쪽으로 이동을 한다.

본 시스템에서 반사체는 주파수가 변하더라도 항상 반음압마디 상태를 유지하므로, 주파수 변화에 따른 음압마디 위치의 변화는 반사체로부터 멀리 있을수록 크다. 따라서, 반사체로부터 멀리 떨어진 노드일 수록 위치제어 가능 범위가 넓어진다. Table 1에서 보듯이 상기 주파수 대역에서 위치제어 범위가 반사체로부터 첫 번째 음압마디의 경우 약 35 마이크로미터이지만, 4번째 음압마디의 경우 약 261 마이크로미터에 달한다. 만약 정제초음파를 유지하면서 연속적으로 변경 가능한 주파수 대역이 넓다면, 제어할 수 있는 위치의 범위는 더욱 커질 수 있음을 예측할 수 있다.

5. 결론

미세 채널에서 정제초음파 발생 시스템을 구성하고 정제초음파를 이용해서 유동 내 입자의 위치를 제어하는 연구를 수행하였고, 몇가지 결론을 도출하였다.

- 1) 초음파 트랜스듀서와 반사체를 평행하게 배열하여 미세 채널을 형성하면 정제초음파 장을 형성

할 수 있다. 이 때, 반사체와 채널의 경계면은 항상 반음압마디가 된다.

- 2) 채널에 정재초음파를 발생시키면 직경 수 마이크로미터 내외의 탄화규소 입자를 음압마디의 위치에 일렬로 배열시킬 수 있다.
- 3) 정재초음파의 음압마디의 위치는 채널의 폭과는 무관하고 주파수와는 밀접하게 관련이 있다.
- 4) 초음파의 주파수를 조정함으로써, 입자가 모이는 위치를 제어할 수 있다. 이 때, 제어할 수 있는 위치의 범위는 연속적으로 정재초음파를 유지할 수 있는 주파수 범위 및 반사체로부터 몇 번째 음압마디인지와 관련이 있다.

참고문헌

- [1] Y. Shen, "Modelling the electro-acoustic characteristics of flow-through ultrasonic separators," University of Southampton, Ph. D thesis, (2003)
- [2] M. Wiklund and H. M. Hertz, "Ultrasonic enhancement of bead-based bioaffinity assays," *Lab Chip*, Vol. 7, pp. 1279-1292, (2006)
- [3] M. Gröschl, "Ultrasonic separation of suspended particles - Part I: Fundamentals," *Acustica*, Vol. 84, pp. 432-447, (1998)
- [4] W. T. Coakley, "Ultrasonic separations in analytical biotechnology," *Trends in Biotechnology*, Vol. 15, pp. 506-511, (1997)
- [5] M. Evander, L. Johansson, T. Lilliehorn, J. Piskur, M. Lindvall, S. Johansson, M. Almqvist, T. Laurell and J. Nilsson, "Noninvasive acoustic cell trapping in a microfluidic perfusion system for online bioassays," *Anal. Chem.*, Vol. 79, pp. 2984-2991, (2007)
- [6] M. S. Limaye, J. J. Hawkes and W. T. Coakley, "Ultrasonic standing wave removal of microorganisms from suspension in small batch systems," *Journal of Microbiological Methods*, Vol. 27, pp. 211-220, (1996)
- [7] P. Jenkins, R. A. Barnes and W. T. Coakley, "Detection of meningitis antigens in buffer and body fluids by ultrasound-enhanced particle agglutination," *Journal of Immunological Methods*, Vol. 205, pp. 191-200, (1997)
- [8] C. M. Cousins, P. Holownia, J. J. Hawkins, C. P. Price, P. Keay and W. T. Coakley, "Clarification of plasma from whole human blood using ultrasound," *Ultrasonics*, Vol. 38, pp. 654-656, (2000)
- [9] M. Hill, "The selection of layer thicknesses to control acoustic radiation force profiles in layered resonators," *J. Acoust. Soc. Am*, Vol. 114, No. 5, pp. 2654-2661, (2003)
- [10] N. R. Harris, M. Hill, R. Townsend, N. M. White and S. P. Beeby, "Performance of a micro-engineered ultrasonic particle manipulator," *Sensors and Actuators B*, Vol. 111-112, pp. 481-486, (2005)
- [11] A. Neild, S. Oberti, F. Beyeler, J. Dual and B. Nelson, "A micro-particle positioning technique combining an ultrasonic manipulator and a microgripper," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 16, pp. 1562-1570, (2006)
- [12] 이영섭, 권재화, 서대철, 윤동진, "초음파를 이용한 입자 분리 장치 연구", 한국비파괴검사학회 춘계학술대회 논문집, pp. 324-329, (2005)
- [13] 이영섭, 권재화, "A particle separating devices using ultrasonic standing wave," 한국음향학회 춘계학술대회 논문집, (2005)
- [14] 서대철, 권재화, 안봉영, 이영섭, "수침형 초음파탐촉자를 이용한 입자분리 연구", 한국비파괴검사학회 추계학술대회 논문집, pp. 148-151, (2006)
- [15] K. Sollner and C. Bondy, "The mechanism of coagulation by ultrasonic waves," *Trans. Faraday Soc.*, Vol. 32, pp. 616-623, (1936)
- [16] L. P. Gor'kov, "On the forces acting on a small particle in an acoustical field in an ideal fluid," *Sov. Phys.-Doklady*, Vol. 6, pp. 773-775, (1962)