

미세입자의 정밀제어를 위한 표면탄성과 장치의 특성연구 및 설계

Characteristic Analysis and Design of a Precise Manipulation of Microparticle using Surface Acoustic Wave Device

김 동 준* · 엄 진 우* · 고 병 한* · 박 노 철† · 박 영 필**

Dongjoon Kim, Jinwoo Eom, Byung-Han Ko, No-Cheol Park and Young-Pil Park

(Received July 9, 2015 ; Revised July 9, 2015 ; Accepted October 12, 2015)

Key Words : SAW(표면탄성파), Microparticle Velocity(미세입자 속도), Insertion Loss(삽입손실)

ABSTRACT

Surface acoustic wave(SAW) device is used for transporting and patterning micro-scale particles such as cells. In this research, velocity of particles was investigated moved by SAW device with two types of interdigital electrode transducers(IDTs) under various conditions. SAW devices which have single IDTs and double IDTs were designed and fabricated. On the previous studies, resultant velocities of particles were predicted considering output power and power ratio between IDTs-shape. For more accurate prediction, power loss in SAW device and a power difference between two types of IDTs-shape were considered. Maximum error between the test results and predicted values was 5% so the power loss must be considered in the velocity prediction of the particles.

1. 서 론

세포와 박테리아와 같은 마이크로 크기의 입자를 이동시키거나 배열하는 기술은 입자들을 분류, 정렬하거나 입자들 간 상호작용에 관한 연구 등에 필수적이기 때문에 이에 관한 많은 연구들이 진행되어왔다. 대표적인 기술들로 레이저를 이용한 광 트위저, 자성을 이용하여 입자를 조종하는 자기 트위저, 그리고 표면탄성파(surface acoustic wave, SAW)에 기반한 음향 트위저 등이 있다. 광 트위저의 경우 레이저로부터 발생하는 열과 다광자 흡수 현상으로 인해 세포 등의 생체 시편이 손상될 수 있고, 자기 트위저는 자성 입자에만 사용 가능하다는 한계가 있는 반면⁽¹⁻³⁾, 음향 트위저는 상대적으로 생

체 시편에 큰 영향을 미치지 않으며 재료의 특성과 관계없이 대부분의 마이크로 크기 입자에 적용 가능한 기술이기 때문에 많은 연구 분야들에서 응용되고 있다^(4,5).

음향 트위저로 사용되는 SAW 장치는 장비의 작동 주파수와 중심 주파수를 바꿈으로써 SAW 장치 위에 올려진 유체 내부의 입자의 위치나 움직임을 제어하게 된다⁽⁶⁾. 기존 연구에서는 작동 주파수가 변함에 따라 압력 절점의 위치가 바뀌는 현상을 이용하여 미세 입자의 위치를 정렬하거나 움직임을 제어하였다. 그러나 작동 주파수가 변함에 따라 SAW의 진폭과 감쇠계수도 함께 바뀌기 때문에 변수가 많아짐에 따라 정밀한 제어가 어렵다는 단점이 있다. 또한 SAW에 의한 입자의 속도는 유체의 점성력과 음향 방사력 등 여러 인자들이 포함된 이론식

† Corresponding Author ; Member, Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei University
E-mail : pnch@yonsei.ac.kr

* Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei University

** Member, Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei University

‡ Recommended by Editor Il Kwon Oh

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

을 통해 유도될 수 있지만, 이 값은 제작된 장치의 삽입손실 및 IDT 형상에 의한 영향들이 고려되지 않았기 때문에 정확한 입자의 속도 예측이 어렵다. 따라서 이 연구에서는 정밀한 입자 제어를 위하여 입자의 크기나 매질 종류에 따라 유체 내부에서 움직이는 입자의 속도를 측정하였고, 기존의 이론식을 보완하여 입자의 속도를 정확히 예측하고자 하였다. 이를 위하여 SAW 장치의 삽입손실에 따른 출력과 위를 측정하였고, 입자의 속도를 측정하기 위한 실험 장치를 구성하였다. 또한 얻어진 여러 실험 결과들로부터 기존에 주어진 이론식의 보완점에 대하여 고찰하였다.

2. 표면탄성과 장치

SAW 장치는 Fig. 1과 같이 압전 기판과 한 쌍의 IDT로 구성된다. IDT는 여러 목적에 따라 그 형상이 매우 다양한데, 기본적으로 인접한 두 전극에 각각 반대방향의 전압이 인가되도록 전극 양 끝이 +극과 -극에 번갈아가며 연결되어 있다. 따라서 SAW 장치에 전원이 인가될 경우, 기판의 압전효과에 의해 인접한 각 전극 사이 기판 표면에서 팽창과 수축이 발생하고, Fig. 1과 같이 압전기판 표면을 따라 SAW가 발생한다. 반대쪽 IDT에 도달한 SAW는 역압전효과에 의해 같은 방법으로 전기 신호로 변환된다.

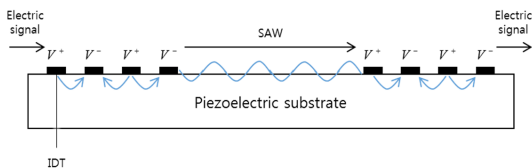


Fig. 1 Schematic diagram of surface acoustic wave device

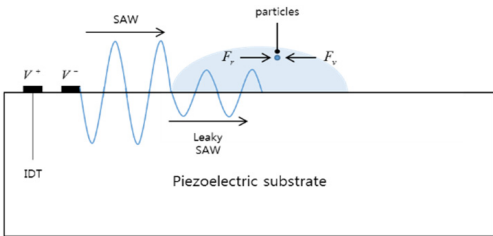


Fig. 2 Schematic diagram of Leaky SAW

장치에서 발생하는 SAW는 입력신호를 비롯한 여러 인자들에 의해 일정한 진폭을 갖는다. 만약 Fig. 2와 같이 기판 위에 유체가 올려져 있고, 장치에서 발생한 표면탄성과가 유체 내부로 전파되면 leaky SAW가 발생하는데, leaky SAW는 유체 내부의 압력 차를 유발하게 되고 이로 인해서 음향 방사력 F_x 이 발생한다. 이와 더불어 Fig. 2와 같이 유체 내부에 기본적으로 존재하는 점성력 F_v 와 음향 방사력 두 힘이 유체 내부 미세 입자의 움직임에 직접적인 영향을 미치게 된다. 음향 방사력과 점성력이 평형 상태를 유지하게 되면 내부 입자는 균일한 속도를 가지게 되는데 이는 식 (1)~(3)과 같다⁽⁷⁾.

$$v = - \left[\frac{p_0^2 V_c \beta_w}{12 \lambda \eta r_c} \right] \phi(\beta, \rho) \sin \left(\frac{4 \pi x}{\lambda} \right) \tag{1}$$

$$p_0 = \sqrt{\frac{P_T Z}{A}} = \sqrt{\frac{P_T \rho c}{A}} \tag{2}$$

$$\phi(\beta, \rho) = \frac{5 \rho_c - 2 \rho_w}{2 \rho_c + \rho_w} - \frac{\beta_c}{\beta_w} \tag{3}$$

이때 $p_0, \lambda, Z, \rho, c, k$ 는 각각 탄성압, SAW 파장, 음향 임피던스, 압전기판의 밀도, SAW 속도와 파수를 의미하고 이는 압전체의 특성과 연관되어 있다. 또한 $\rho_c, \beta_c, V_c, \rho_w, \beta_w, P_T, \eta$ 는 입자의 밀도, 압축률, 부피와 유체의 밀도, 압축률, 입력파워와 유체 점성도를 의미한다. 종합하면, SAW 전파에 따른 입자 속도는 유체와 입자의 종류, 입력파워, 그리고 SAW 장비의 특성에 따라 결정됨을 알 수 있다. 그러나 식 (1)은 입력파워와 출력파워가 같은 이상적인 SAW 장치를 가정하였기 때문에 실제 SAW 장치에 적용할 경우 오차가 발생한다. 오차의 원인은 SAW 장치와 delay line에 올려진 유체 등에 의해 발생하는 삽입손실로써, 이를 고려해야만 정확한 입자의 속도를 계산할 수 있다. 실제 SAW 장치의 입력파워 P_T 와 출력파워 P_R 은 식 (4)와 같이 삽입손실 IL 에 의해 일정한 비율을 나타내며, 따라서 출력파워를 식 (1)에 적용한다면 삽입손실이 고려된 정확한 입자의 속도를 계산할 수 있다.

$$P_R = \frac{P_T}{10^{IL/10}} \tag{4}$$

또한 식 (1)에서는 IDT 형상에 대한 변수가 없으므로 이를 고려해줄 필요가 있다. 식 (2)의 파워는 IDT 구조에 따라 식 (5), (6), (7), (8)과 같이 계산된다⁽⁸⁾.

$$P_s = \frac{\omega W |\phi_s(\omega)|^2}{4\Gamma_s} \tag{5}$$

$$\Gamma_s = \frac{1}{\epsilon + \epsilon_p^r} \frac{v_0 - v_m}{v_0} \tag{6}$$

$$\phi_s(\omega) = j\Gamma_s V_t \bar{A}_f(\omega) \bar{\ell}_f(\omega) e^{\left(\frac{-1}{2}jk_s L\right)} \tag{7}$$

$$\bar{A}_f(\omega) = \begin{cases} \left(\frac{\sin\left(\frac{N_p \omega p S_e}{2}\right)}{\sin(\omega p S_e)} \right), & S_e = 2 \\ \left(\frac{\sin\left(\frac{N_p \omega p S_e}{2}\right)}{\sin(\omega p S_e)} \right) 2\cos\left(\frac{\omega p}{2}\right), & S_e = 4 \end{cases} \tag{8}$$

여기서 ω, W, ϕ_s 는 입력 신호 주파수, IDT의 길이, 포텐셜 밀도를 의미하고, $\epsilon, V_t, \bar{\ell}_f, v_0, L$ 는 각각 압전 기관의 유전율, 포텐셜, 정전하 밀도, SAW 속도와 chip 길이를 뜻한다. 식 (8)의 \bar{A}_f 는 IDT의 array factor로 IDT 정보를 담고 있는데, S_e, p, N_p 는 한 주기에 배열된 전극의 수, 전극 간의 거리, 전체 전극 쌍의 수를 뜻한다. 따라서 IDT 형상이 Fig. 3 과 같이 single IDT에서 double IDT로 변할 때 array factor를 계산하면 IDT변화에 따른 출력파워를 알 수 있고, 이를 통해 정확한 입자의 속도를 계산할 수 있다.

3. SAW 장치 설계 및 실험 구성

3.1 표면탄성과 장치 설계

이 연구에서는 IDT 형상에 따른 영향을 관찰하고자 두 종류의 SAW 장치를 설계하고 제작하였다. SAW 장치의 중심주파수, 주파수 대역 및 파장 등

에 영향을 미치는 중요한 인자에는 압전 기관의 재료와 IDT 구조 형상이 있다. 먼저 기관 재료로는 높은 결합계수를 가지고 있어 입력손실이 작은 128° LiNbO₃을 사용하였다. 그리고 IDT 형상에 따른 차이를 관찰하고자 가로길기와 세로길이가 4 in인 웨이퍼에 30쌍의 IDT를 Fig. 3과 같이 두 가지 타입으로 설계하였다(single IDT, double IDT). 기관의 두께는 500 μm 이며, 웨이퍼 크기를 고려하여 single IDT SAW 장치의 finger 폭은 71.0 μm 로, double IDT SAW 장치의 finger 폭은 35.5 μm 로 설계하였고, finger간 갭은 IDT 폭과 마찬가지로 각각 71.0 μm 와

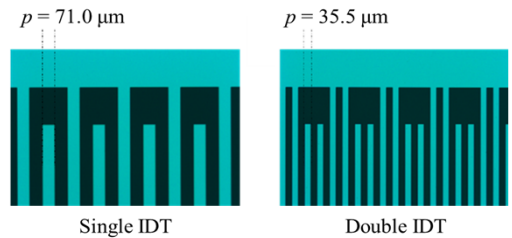


Fig. 3 Designed SAW devices with single IDT and double IDT

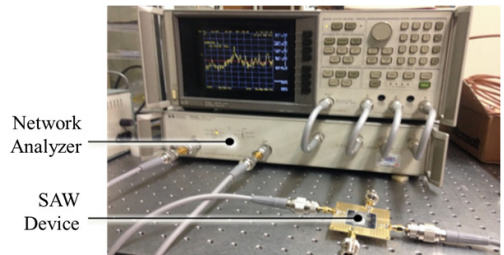


Fig. 4 Experimental setup for frequency response measurement of SAW device

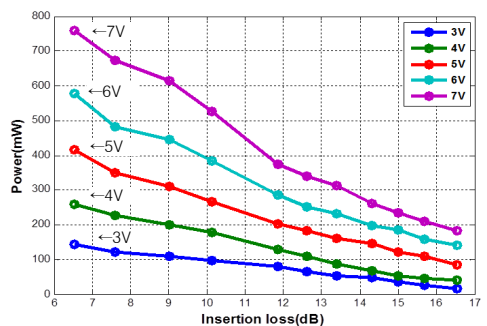


Fig. 5 Output power of SAW device with respect to the insertion loss and input voltage

35.5 μm 로 설계하였다. 이에 따라 설계된 장치의 파장은 284 μm 로 나타난다. 기관 표면의 앞뒤로 발생하는 벌크 음향파의 효과를 최소화하고 장치의 입력 손실을 줄이고자 IDT의 길이는 정해진 기관 크기 한도 내에서 최대한 길게 설계하였다.

3.2 SAW장치 출력파워 측정

입력되는 전기 신호가 SAW로 전환되고 기관 표면을 따라 전파될 때 여러 요인들에 의해 장치의 입력 손실이 생기게 된다. 먼저, 같은 형상의 여러 SAW 장치 샘플들을 제작 하였지만, 제작공차에 의해 입력손실이 소폭 다를 수 있다. 또한, 유체를 비롯한 이물질이 SAW 장치 위에 올려져 있을 경우 탄성파의 진행을 방해하므로 장치의 입력손실이 증가하게 된다. 특히, SAW 장치 위에 올려놓은 유체 내부의 입자들의 속도를 제어하거나 정렬하고자 할 때, 유체의 형상과 양을 정량화하기 위하여 PDMS로 만든 가이드를 제작하여 장치에 부착하게 되는데⁽⁸⁾, 이 또한 입력손실을 유발한다. 이러한 여러 요인들에 의해 발생한 입력손실은 장치의 입력파워 대비 출력파워를 감소시켜 입자 제어에 영향을 미치므로 이를 정량적으로 측정하는 것은 매우 중요하다.

따라서 제작된 장치의 입력손실을 변경하며 이에 따른 출력파워를 측정하기 위한 예비실험을 설계 하였다. SAW 표면의 유체량을 선형적으로 증가시킬

때 변화하는 입력손실을 Fig. 4와 같이 network analyzer를 이용하여 측정하였고, 마찬가지로 변화하는 출력파워를 오실로스코프를 이용하여 측정하였다. 연구에 사용된 network analyzer의 입출력 임피던스는 모두 50 Ω 이며, 유체량의 경우 마이크로필렛을 이용하여 수 μl 단위로 정밀하게 측정하였다. SAW 장치에는 신호 발생기를 이용하여 3 V부터 7 V까지 중심주파수에 해당하는 정현파를 입력해 주었다. 실험 결과는 Fig. 5와 같다. 장치 표면에 올려진 유체 양에 따라 입력손실이 6.5 dB부터 16.5 dB까지 선형적으로 증가하는 것을 관찰할 수 있었고, 이에 따라 출력파워도 감소하는 것을 알 수 있었다. 감소율은 입력 전압에 따라 차이를 보였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 실험 설정

다음으로 SAW에 의한 입자의 움직임을 관찰하고 그 속도를 정량적으로 측정하였다. 실험장치는 Fig. 6과 같이 제작된 SAW장치 위에 PDMS 가이드를 이용하여 입자가 포함된 유체를 올려놓았다. 유체의 형상 및 유체량은 PDMS 가이드와 마이크로필렛을 사용함으로써 통제하였다. 10 ms 간격으로 입자의 위치 변화를 측정함으로써 입자의 속도를 계산하였고, SAW장치의 출력파워도 함께 측정하여 두 값 간 관계를 관찰하였다. 이 때 장치 표면의 PDMS와 유체로 인해 입력 손실이 크므로 이를 보상하기 위하여 Fig. 7과 같이 신호발생기와 앰프를 연결하여 신호를 인가하였다.

입자의 속도에 대한 식 (1)에서 바뀔 수 있는 변수로는 매질, 입자, SAW 장치와 입력파워 등이 있는데, SAW장치의 설계는 Table 1과 같이 모든 샘플이 동일하다. 따라서 이 실험에서는 파워를 동일하게 입력하였고, 매질과 입자를 Tables 2, 3과 같이 변경하였을 때 입자의 속도변화를 관찰하였다. 입력 신호의 주파수는 설계된 SAW장치의 중심주파수인 13.66 MHz로 선정하였고, 입력파워는 180 mW부터 980 mW까지 변경하였다.

4.2 삽입손실에 의한 영향

입력파워에 따른 입자의 속도를 측정한 결과와 식 (1)을 통해 예측한 결과를 Figs. 8, 9, 10, 11과

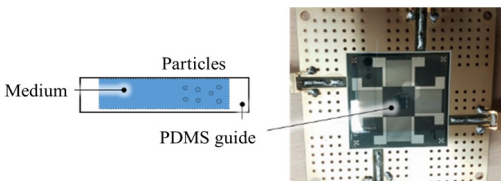


Fig. 6 Schematic diagram of PDMS guide and fabricated SAW device

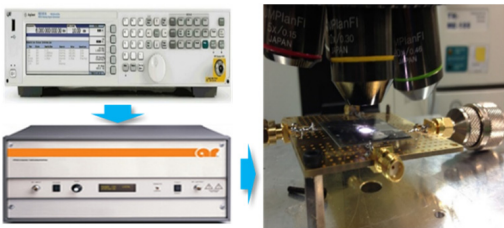


Fig. 7 Experimental setup for particle velocity measurement

Table 1 Design parameters and material properties of SAW device

Parameter		Value
Substrate density	ρ	4,650 kg/m ³
SAW velocity	c	3,998 m/s
Wave length	λ	284 μ m

Table 2 Material properties of fluid medium

Material	Viscosity $\eta \times 10^{-4}$ (Pa·s)	Density (kg/m ³)	Compressibility $\beta \times 10^{-11}$ (1/Pa)
DI water	8.94	997	4.6
Glycerin	12,000	1,260	21

Table 3 Diameters and material properties of micro particle

Particle	Diameter r (μ m)	Density ρ (kg/m ³)	Compressibility $\beta \times 10^{-8}$ (1/Pa)
Particle1	7	1,050	2
Particle2	10	1,050	2

같이 비교하였다. Fig. 8과 9는 DI water가 매질일 때 Table 3과 같은 두 종류의 미세입자에 대한 실험 결과이다. 실험 결과로 입자의 크기가 커지면 입자의 이동속도도 증가하는 것을 관찰할 수 있었는데, 입력과워를 식 (1)에 대입하여 계산한 결과는 실험 결과와 큰 차이를 보였으며, 최대 오차는 입자 1에서 116%, 입자 2에서 123%로 측정되었다. 이러한 오차의 가장 큰 원인은 식 (1)이 삽입손실이 고려되지 않은 이상적인 조건을 가정했기 때문이다. Fig. 5의 결과에 의하면 장치의 삽입손실과 출력과워는 선형적인 관계를 가지므로 식 (1)에 입력과워가 아닌 측정된 출력과워를 대입하여 입자의 속도를 다시 계산하였다. 결과, 최대 오차가 입자 1에서 2.8%, 입자 2에서 4.1%로 계산되어 이론식에서 삽입손실을 고려해 입자의 속도를 예측할 경우 매우 잘 맞는다는 사실을 확인할 수 있었다.

Fig. 10과 Fig. 11은 매질이 glycerin인 경우 앞서 실험과 동일한 두 종류의 미세입자의 속도에 대한 실험 결과이다. DI water에 비해 glycerin의 viscosity가 매우 높기 때문에 입자의 속도가 대폭 줄어든 것을 알 수 있다. 또한 앞의 결과와 마찬가지로 입력과워를 식 (1)에 대입하여 계산한 결과는 실험 결과와

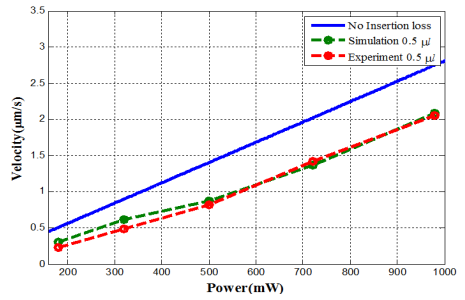


Fig. 8 Relationship between input power and velocity of 7 μ m particle(DI water)

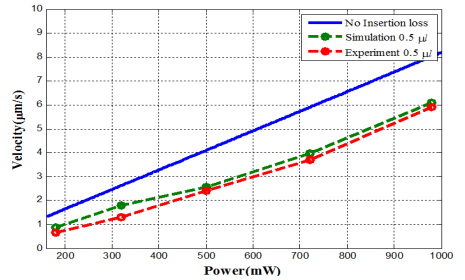


Fig. 9 Relationship between input power and velocity of 10 μ m particle(DI water)

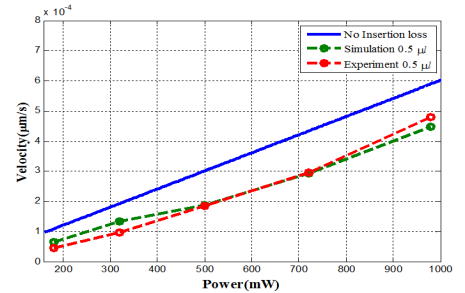


Fig. 10 Relationship between input power and velocity of 7 μ m particle(glycerin)

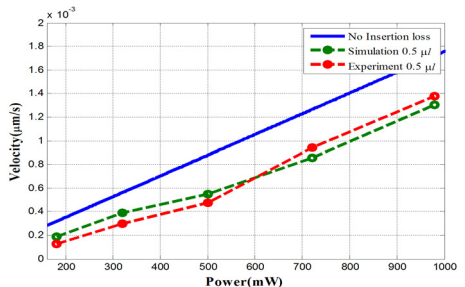


Fig. 11 Relationship between input power and velocity of 10 μ m particle (glycerin)

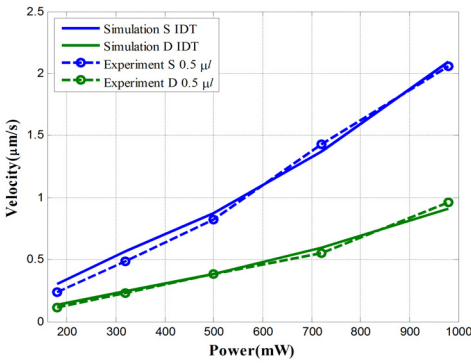


Fig. 12 Relationships between input power and velocity of 7 μm particle with different IDT shapes

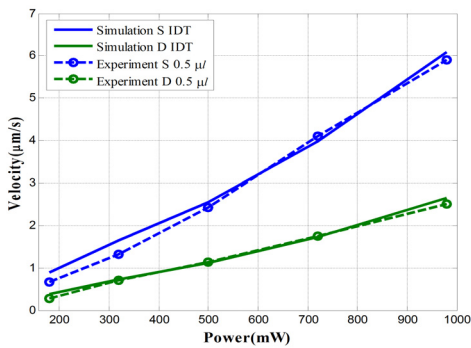


Fig. 13 Relationships between input power and velocity of 10 μm particle with different IDT shapes

큰 차이를 보였으며, 측정된 출력파워를 이용해 계산한 입자의 속도와 실험 결과는 최대오차가 입자 1에서 3.9%, 입자 2에서 5%로 매우 잘 맞았다. 따라서 SAW 장치에 입력되는 파워가 아닌 출력파워를 이론식에 대입하면 기기의 삽입손실이 고려되어 유체 내부 입자의 속도를 매우 정확하게 예측할 수 있을 것이다.

4.3 IDT 형상에 의한 영향

다음으로는 다른 형상의 IDT를 가지는 두 가지 SAW 장치를 제작하고 이들을 작동시켰을 때 나타나는 유체 속 입자 속도의 차이를 측정하였다. 식 (1) 자체에는 IDT 형상에 따른 영향이 전혀 고려되어 있지 않지만, IDT 형상에 따른 입력파워의 변화는 식 (4)~(6)을 통해 예측할 수 있으며, 이를 바탕으로 서로 다른 IDT 형상의 SAW 장치 간 파워비를 계산할 수 있다. 이 연구에서는 두 가지 타입의

IDT 형상을 가진 SAW 장치를 제작하였으며, 측정 결과 single IDT SAW 장치와 double IDT SAW 장치의 출력 파워비는 0.454의 값을 보였다. 앞서 single IDT 장치의 출력파워는 측정된 바 있으므로, 파워비를 적용하여 double IDT의 출력파워를 계산하였다. 또한 이를 바탕으로 Table 3의 두 입자가 포함된 DI water를 각각의 장치에 올려놓고 장치를 작동시켰을 때 입자의 속도를 계산하고 이를 측정 결과와 비교하였다.

결과는 Figs. 12, 13과 같다. Fig. 12는 입자 1에 대한 실험 결과이고, Fig. 13은 입자 2에 대한 실험 결과이다. 먼저 single IDT 장치에 비해 double IDT의 파워가 작게 나타나므로 입자의 속도도 더 작게 관찰된 것을 볼 수 있다. 또한 앞서의 결과들과 마찬가지로, 큰 입자의 경우 더 빠른 속도로 움직이는 것을 확인하였다. 다음으로, 이론식을 통해 예측한 결과와 측정 결과를 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 기기와 PDMS, 유체에 의한 삽입손실과 더불어 IDT 형상에 따른 파워비를 적용하여 식 (1)을 계산한 결과와 측정 결과가 모든 경우에서 매우 잘 맞았으며, 최대 오차는 입자 1 조건에서 5%, 입자 2 조건에서 3.6%로 나타났다. 따라서 IDT 형상이 변화할 경우, 원래 모델 대비 바뀐 IDT 형상의 출력비를 계산하여 이를 이론식에 대입하면 IDT의 영향이 고려되어 입자의 속도를 매우 정확하게 예측할 수 있을 것이다.

5. 결론

이 연구에서는 SAW 장치를 작동시켰을 때, 장치 위에 올려진 유체 내부의 미세입자의 속도에 관하여 여러 변수들을 변경하며 실험들을 수행하였고, 기존에 제안된 이론식을 통한 예측과 잘 맞는 지 여부를 확인하였다. 이를 위하여 서로 다른 두 가지 IDT 형상을 갖는 SAW 장치를 설계/제작하였고, 삽입손실 변화에 따른 출력파워를 측정하였다. 다음으로 매질, 입자의 종류, IDT 형상을 바꾸어 입자의 속도를 측정하였고, 기기의 삽입손실과 IDT 형상에 따른 파워비를 이론식에 적용하여 입자속도를 계산하였다. 결과는 측정과 예측 결과가 최대 5%를 보이며 매우 잘 맞는 것을 확인할 수 있었다. 이상의 결과들을 바탕으로 SAW 장치의 삽입손실, 그리고

IDT 형상에 따른 파워비를 알 수 있다면 입자의 속도를 매우 정확하게 예측할 수 있을 것이며, 이를 통해 SAW 장치를 이용하여 추후 연구에서 미세입자를 보다 정확하게 제어할 수 있을 것이라 기대한다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1A5A1037668).

References

- (1) Snezhko, A. and Aranson, I. S., 2011, Magnetic Manipulation of Self-assembled Colloidal Asters, *Natural Material*, Vol. 10, No. 9, pp. 698~703.
- (2) Manosas, M., Spiering, M., Zhuang, Z., Benkovic, S. J. and Croquette, V., 2009, Coupling DNA Unwinding Activity with Primer Synthesis in the Bacteriophage T4 Primosome, *Nat Chemical Biology*, Vol. 5, No. 12, pp. 904~912.
- (3) Khademhosseini, A., May, M. H. and Sefton, M. V., 2005, Conformal Coating of Mammalian Cells Immobilized Onto Magnetically Driven Beads, *Tissue Engineering*, Vol. 11, No. 11-12, pp. 1797~1806.
- (4) Friend, J., and Yeo, L., 2011, Microscale Acoustofluidics: Microfluidics Driven via Acoustics and Ultrasonics, *Reviews of Modern Physics*, Vol. 83, No. 2, pp. 647~704.
- (5) Lenshof, A. and Laurell, T., 2010, Continuous Separation of Cells and Particles in Microfluidic Systems, *Chemical Society Reviews*, Vol. 39, No. 3, pp. 1203~1217.
- (6) Ding, X., Lin, S. S., Kiraly, B., Yue, H. J., Li, S. X., Chiang, I., Shi, J. J., Benkovic, S. J. and Huang, T. J., 2012, On-chip Manipulation of Single Microparticles, Cells, and Organisms using Surface Acoustic Waves, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 109, No. 28, pp. 11105~11109.
- (7) Hahimoto, K.-Y., 2000, *Surface Acoustic Wave Devices in Telecommunications*, Berlin etc.; Springer, Telecommunications. Springer Verlag.
- (8) Morgan, D. P., 1991, *Surface-wave Devices for Signal Processing*, ELSEVIER.
- (9) Shi, J. J., Ahmed, D., Mao, X., Lin, S. S., Lewita, A. and Huang, T. J., 2009, Acoustic Tweezers: Patterning Cells and Microparticles using Standing Surface Acoustic Waves, *Lab on a Chip*, 9, pp. 2890~2895.
- (10) Subramanian, H., Varadan, V. K., Varadan, V. V. and Vellekoop, M. J., 1997, Design and Fabrication of Wireless Remotely Readable MEMS based Microaccelerometers, *Smart Materials and Structures*, Vol. 6, No. 6, pp. 730~738.
- (11) Schmid, L., Wixforth, A., Weitz, D. A. and Franke, T., 2012, Novel Surface Acoustic Wave (SAW)-driven Closed PDMS Flow Chamber, *Microfluid Nanofluid*, Vol. 12, No. 1-4, pp. 229~235.
- (12) Kim, J.-G., Lee, T.-J., Lim, S.-C., Park, N.-C., Park, Y.-P. and Park, K.-S., 2010, Design of Capacitive Displacement Sensor and Gap Measurement with High Precision Using Surface Acoustic Wave Device, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 20, No. 5, pp. 437~443.



Dongjoon Kim received a B.S. degree in Dept. of Mechanical Engineering from Yonsei University in 2014. He is currently in an integrated M.S. and Ph.D. candidate at the same department. His research interests include the mechanical vibration and piezoelectric component.



No-Cheol Park received a B.S., M.S. and Ph.D. degree in Dept. of Mechanical Engineering from Yonsei University in 1986, 1988 and 1997 respectively. He is currently working in Yonsei University as a professor of the Mechanical Engineering. His research interests include the mechanical vibration and opto-mechatronics system.