

# 표면탄성파를 이용한 이송장치의 IDT 형상 변화에 따른 특성 연구

## Characteristic analysis and design of a precise manipulation device using surface acoustic wave

엄진우 · 박노철† · 박영필\*

Jinwoo Eom, No-Cheol Park and Young-Pil Park

**Key Words** : SAW, Surface acoustic wave, IDT, Interdigital transducer, Particle velocity

### ABSTRACT

In this paper, SAW devices are fabricated using various IDT shape(Single/Double) to check an effect of the IDT on SAW device. And based on theory of a particle velocity moved by SAW and IDT, a particle velocity is measured and calculated. Depend on insert power, a particle velocity using Single-IDT SAW device is about two times bigger than Double-IDT SAW device and it's almost same with a theoretical different.

### 1. 서 론

세포나 박테리아, 반도체 등을 이용하는 많은 분야에서 이러한 미세입자들을 원하는 데로 이송시키고 제어하는 기술을 많이 이용하고 있다. 이러한 입자들을 정확하게 제어할 수 있는 기술은 미세입자들을 관찰하고 그들의 메커니즘을 연구하는 연구자들에게 필수적으로 이용된다.

입자들을 이송시키고 제어하는 기술에는 광학기술, 자력을 이용하는 기술 그리고 표면탄성파를 이용하는 기술이 있다. 하지만 광학기술을 이용한 장비인 Optical tweezer의 경우 높은 정확도에도 불구하고 레이저를 이용함으로써 세포 등 생체분자들에 생리학적 피해를 입힐 수 있고 자력을 이용한 장비인 Magnetic tweezer의 경우 입자들이 자성을 띄어야 한다는 조건이 있다. 이와 반면에 표면탄성파를 기반으로 한 SAW(Surface acoustic wave) device는 앞선 두 기술을 이용한 장비와는 달리 탄성파를 이용하여 물리적으로 입자들을 이송시키는 것이기에 상대적으로 비침투적이고 어떠한 조건에서도 사용이 가능하고 구조가 간단하다는 이점이 있다. 이와 더불어 기술의 고성능화, 안정성을 따르는 현재

추세에 맞춰 입자들을 이송시키고 제어하는데 표면탄성파를 이용한 연구들이 수행되고 있다.

표면탄성파를 이용하여 입자들을 이송시키고 제어하는 기존의 연구는 양쪽에서 전파되는 표면탄성파의 중첩에 의해 발생한 압력 절점에 입자들을 정렬시키고 이송시키는데 주파수를 변경하는 연구에 집중해왔다. 하지만 주파수를 변경함에 따라 감쇠계수가 달라지고 이에 따라 압력 절점의 위치가 달라지기 때문에 입자들을 원하는 위치로 이송시키기에 정확도가 떨어진다. 또한 SAW에 의해 미세입자들이 이동하는 속도를 이론적으로 정리한 식에는 SAW device의 Interdigital transducer(IDT)에 따른 영향이 들어있지 않다.

따라서 본 연구에서는 미세입자들의 속도를 예측하여 정확하게 이송할 수 있는 기반을 마련하고자 하였다. IDT와 압전기판 사이의 손실을 줄이기 위해 결합계수가 가장 높은  $128^\circ \text{LiNbO}_3$ 를 압전기판으로 사용하였고 미세입자의 속도에 관한 이론식과 실험에서 측정된 속도를 비교하기 위해 유체의 종류 및 미세입자의 크기를 변경시켜가며 실험을 진행하였다. 이를 기반으로 Single/Double-IDT형

† 박노철; 연세대학교 기계공학과  
E-mail : pnch@yonsei.ac.kr

Tel : (02)2123-4677, Fax : (02)365-8460  
\* 연세대학교 기계공학과

상을 갖는 SAW device 를 이용하여 미세입자의 속도를 측정 및 계산하였고 IDT 형태에 대한 이론적인 접근을 통해 IDT 형태가 미세입자의 속도에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 IDT(Inter-digital transducer)

압전 기관 위에 빗살 무늬 형태로 새겨진 IDT가 교류전압을 받으면 각각 압축, 팽창을 통해 SAW를 전파한다. 압전 기관과 IDT의 형상에 의해 SAW의 특성이 결정되기 때문에 설계과정에서 IDT의 폭과 전극 쌍의 개수를 바꿔줌으로써 SAW의 중심주파수와 파장을 선택할 수 있다. IDT의 정보를 담고 있는 array factor,  $A_j$  는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(1)</sup>

$$A_j(x) = A_1(x) * A_N(x) \quad (1)$$

위 식에서  $A_1$  은 Figure 01 과 같이 한 주기에 전극이 어떻게 배열되어있는지를 나타내고  $A_N$  은 한 주기를 나타내는 한 쌍의 전극들이 전체 전극에서 받는 영향을 나타낸다.

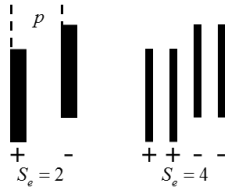


Figure 1 Schematic of an one period Single / Double IDT

한 주기에 전극이 2개( $S_e = 2$ )인 Single-IDT의 경우 하나하나의 전극들이 교류전압과 접지로 교대로 이어져 있기 때문에 각 전극들의 영향을 델타함수로 표현할 수 있다. 하지만 한 주기에 전극이 여러 개인 경우 각 전극이 교류전압을 받는지 접지 되어있는지에 따라 받는 영향은 다르다. Figure 01과 같이 한 주기에 전극이 4개( $S_e = 4$ )인 Double-IDT의 경우 각 전극에서 교류전압의 신호가 중첩되거나 접지의 영향이 중첩되기 때문에 하나하나의 전극이 양 옆에 있는 전극의 영향을 받는다. 그렇기 때문에  $A_1$  은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_1(x) = \delta(x), \quad (S_e = 2) \quad (2)$$

$$= \delta\left(x + \frac{p}{2}\right) + \delta\left(x - \frac{p}{2}\right), \quad (S_e = 4) \quad (3)$$

위의 식과 같이  $A_1$  은 한 주기의 전극들이 어떤 식으로 배열되고 각 전극들이 주고 받는 영향에 따라 바뀔 수 있으며 전극의 폭에 영향을 받는다.

$A_N$  은 Fig 3과 같이 한 쌍의 전극들이 전체 전극에 주고 받는 영향을 나타낸다.

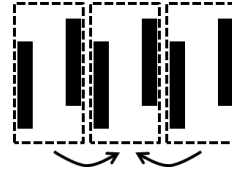


Figure 2 Schematic of one electrode period's effect

IDT를 이루고 있는 전극들은 Fig 3( $S_e = 2$ ) 과 같이 전압을 받는 전극 하나와 접지가 되는 전극 하나로 쌍을 이룬다. 점선으로 묶여진 한 쌍의 전극들은 IDT를 이루고 있는 전체 전극 쌍들에 영향을 주고 받으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(1)</sup>

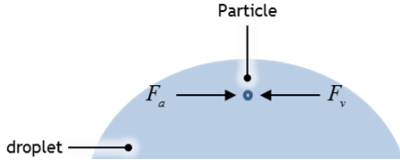
$$A_N(x) = \sum_{n=1}^{N_p} \delta\left[x - (2n - N_p - 1) \frac{pS_e}{2}\right] \quad (4)$$

위 식에서  $N_p$ ,  $S_e$  는 각각 전극 쌍의 개수와 한 주기를 이루고 있는 전극의 개수를 의미한다. 식 (4) 과 같이 한 쌍의 전극들이 전체 전극 쌍들에 주고받는 영향은 IDT를 이루고 있는 전체 전극 쌍의 개수와 IDT 폭에 의해 다양한 값을 갖을 수 있다.

본 연구에서는 미세입자들의 속도 측정을 위해 중심주파수 13.66MHz를 갖는 SAW Device를 설계하였고 IDT 형상에 관한 특성을 확인하기 위해서 Single-IDT( $S_e = 2$ )와 Double-IDT( $S_e = 4$ ) 로 설계하였다.

### 2.2 Particle velocity

SAW를 이용하여 미세입자들을 이동시킬 때 유체 내의 미세입자들은 Acoustic radiation force,  $F_a$  와 점성력,  $F_v$  의 영향을 받는다.



**Figure 3** Schematic of forces at particle

압전 기관 표면에서 일정한 진폭을 갖는 SAW는 유체 안으로 전파됨에 따라 기관 표면과 유체의 압력 차로 leaky SAW를 발생시킨다. 유체 안으로 전파된 leaky SAW는 진폭과 에너지가 약화되며 유체의 점도에 따라 약화되는 정도가 다르다. 또한 유체 내에서 압력 변동을 유발시키며 이로 인해 Acoustic radiation force가 발생한다. 점성이 있는 유체 내에서 Acoustic radiation force와 점성력의 영향을 받는 미세입자의 속도는 이론적으로 다음과 같다.<sup>(2)</sup>

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

$$p_0 = \sqrt{\frac{P_{ac} Z}{A}} = \sqrt{\frac{P_{ac} \rho c}{A}}$$

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

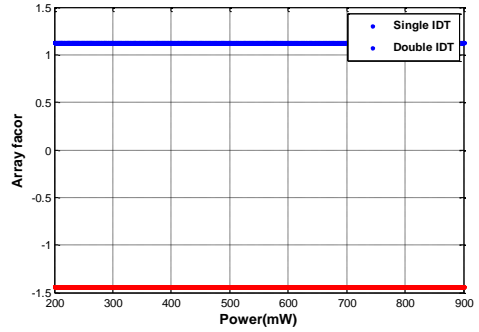
식(4)에서  $p_0$ ,  $V_c$ ,  $r_c$ ,  $\eta$ 는 각각 탄성압, 미세입자의 부피, 반경, 유체의 점도,  $\rho_c$ ,  $\beta_c$ ,  $\rho_w$ ,  $\beta_w$ 는 각각 입자의 밀도, 압축률, 유체의 밀도와 압축률을 의미한다.  $\lambda$ ,  $P_{ac}$ ,  $Z$ 는 SAW의 파장, acoustic power와 acoustic impedance에 해당한다. 유체 내에서 SAW에 의해 움직이는 미세입자의 속도는 식(4)와 같이 유체와 미세입자의 종류, 입력전압에 크기의 영향을 받는다. 하지만 IDT 형태에 따라 달라지는 Acoustic power는 반영되지 않았기에 정확한 속도예측을 위해서는 IDT 형태에 관한 고려가 필요하다.

IDT로부터 전환되는 power는 IDT의 폭, 전극 쌍의 개수 등과 압전 기관의 유전율과 관련이 있으며 그 식은 다음과 같다.<sup>(1)</sup>

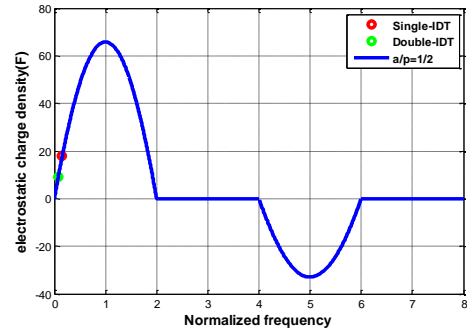
$$P_s = \frac{\omega W \left| j \Gamma_s V_i \bar{A}_j(k_0) \bar{\ell}_j e^{\left(\frac{-1}{2} k_x L\right)} \right|^2}{4 \Gamma_s} \quad (5)$$

$W$ ,  $L$ ,  $\bar{A}_j$ ,  $\bar{\ell}_j$ 은 각각 IDT의 길이, 칩의 길이,

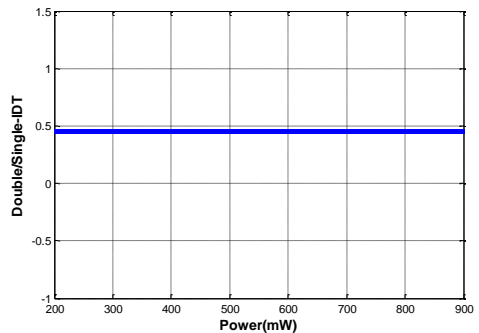
array factor 그리고 electrostatic charge density에 해당하며 IDT의 형태가 달라짐으로써 바뀌는 영향을 담고 있다.  $\Gamma_s$ 는 압전 기관의 유전율과 결합계수의 곱으로 나타내며 압전 기관의 영향을 담고 있다. Single/Double - IDT 형태로 제작된 SAW Device에서 다른 설계조건이 같다고 할 시에 바뀌는 값은  $\bar{A}_j$ ,  $\bar{\ell}_j$ 이며 그 값은 다음과 같다.



**Figure 4** Array factor of Single/Double-IDT



**Figure 5** Electrostatic charge density of Single/Double-IDT at  $a/p=1/2$



**Figure 6** the fraction of a power of Double/Single-IDT

$\bar{A}_j$ ,  $\bar{\ell}_j$ 는 Power에 독립된 값이며 Figure 6과 같이 항상 일정한 값을 갖기 때문에 두 값의 비율을 이용하면 Single/Double - IDT로부터 전환되는

SAW power의 차이를 확인할 수 있다.

### 3. 실험 및 고찰

#### 3.1 미세입자의 이론 속도식 검증

본 연구에서는 다양한 IDT 형상을 갖는 SAW에 의한 미세입자의 이동속도 예측을 진행하기에 앞서 미세입자의 속도를 이론적으로 나타내는 식의 검증을 진행하였다.

식 (4)를 참고하면 미세입자의 속도는 이론적으로 유체와 미세입자의 종류, 입력전압의 크기 그리고 SAW Device의 따라 변할 수 있다. 각 변수 중  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $c$ ,  $A$ 는 Table 1과 같이 압전 기판의 특성이기 때문에 설계 과정에서 정해진다.

**Table 1** SAW Device parameters

Parameter		Value
Substrate density	$\rho$	$4650kg / m^3$
SAW velocity	$c$	$3998m / s$
Wave length	$\lambda$	$284\mu m$
Area	$A$	$10^{-4} m^2$

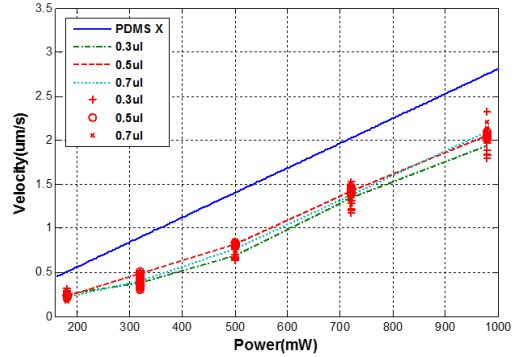
본 연구에서는 유체와 미세입자의 종류에 따른 영향을 확인하기 위해 DI water, glycerin을 유체로 사용하고 미세입자의 크기를 7, 10um 로 변경시켜 가며 실험을 진행하였다.

실험은 Fig 7 과 같이 PDMS 위에 미세 입자와 유체를 올려두고 현미경을 통하여 미세입자들의 움직임을 촬영하였다.

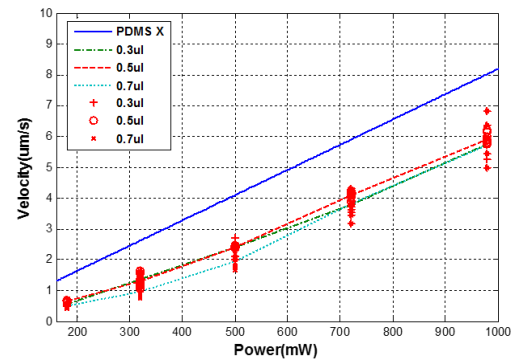


**Figure 7** Schematic of fluid and particles on PDMS

촬영한 동영상상을 10ms 구간으로 나누어 미세 입자들의 이동 속도를 측정하였고 입력전압의 크기를 높이기 위해 Signal generator (aglient N5181A)로부터 나온 신호를 증폭기 (ar 100A 250A)를 통해 증폭시킨 뒤 SAW를 발생시켰다. 중심주파수 13.66 MHz를 갖는 Single-IDT 모델을 사용하여 유체에 양과 종류에 따라 계산한 속도와 실험을 통해 측정된 속도는 다음과 같다.

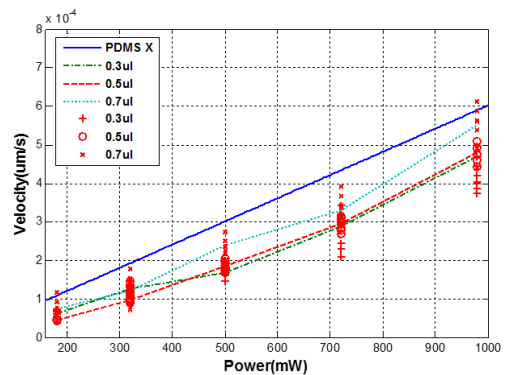


**Figure 8** Theoretical and experiment velocity of 7 um particles in DI water

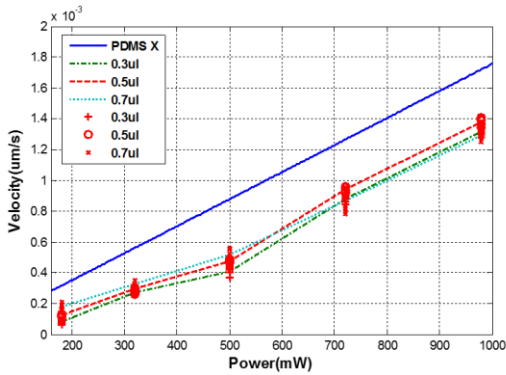


**Figure 9** Theoretical and experiment velocity of 10 um particles in DI water

Figure 8과 9는 유체로 DI water를 사용하였을 때 7um와 10um 두 가지 미세입자들을 가지고 이론적인 속도와 실험을 통하여 측정된 속도이다. PDMS가 없는 조건에서의 이론식이기에 실험을 통해 측정된 값과 약 20~120%의 차이가 발생하였다.



**Figure 10** Theoretical and experiment velocity of 7 um particles in glycerin



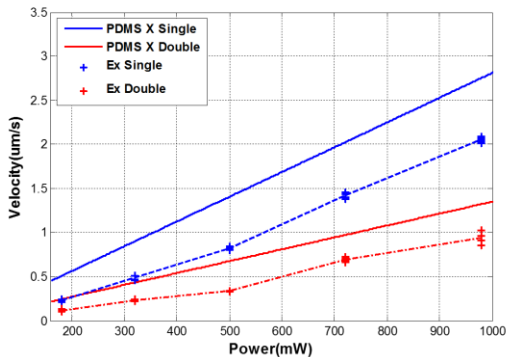
**Figure 11** Theoretical and experiment velocity of 10  $\mu\text{m}$  particles in glycerin

유체로 glycerin을 사용하여 동일한 실험을 진행하였다. DI water를 사용했을 때와 마찬가지로 약 17~111%의 차이가 발생하였다. 유체의 종류와 미세입자의 종류를 변경시켜가며 실험을 진행해보았을 때 어느 정도 PDMS가 없는 조건에서 계산한 이론적인 속도와 비슷한 경향성을 띠는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.2 IDT 형태에 따른 미세입자의 속도

식(4)의 경우 SAW Device를 구성하는 압전 기관의 특성에 대한 영향을 담고 있기 때문에 압전 기관을 다른 것으로 선정함으로써 미세입자의 속도가 바뀐다는 것을 생각할 수 있다. 하지만 IDT의 형태에 관한 요소를 포함하지 않기 때문에 IDT 형태에 따라 달라지는 미세입자의 속도를 나타낼 수 없다. IDT 형태에 따른 영향을 추가하기 위해서 Figure 6의 값을 이용하여 이론식을 수정하였다.

실험은 앞선 실험과 동일한 조건에서 진행하였고 유체와 미세입자는 일치시킨 채 IDT형태 별로 실험을 진행하였다.



**Figure 12** Particles velocity measurement using Single-IDT, Double-IDT

앞선 실험과 동일한 조건으로 진행하였을 때 Single-IDT의 경우 약 34~117 %의 오차가 발생하였고 Double-IDT의 경우 약 40~111 %의 오차가 발생하였다. 또한 Figure 6를 이용하여 계산한 값으로 Single/Double-IDT에서의 미세입자 속도를 계산하였을 때 이론적인 값은 약 2.1배 정도 차이가 나고 실험으로 측정된 값은 약 2.04~2.46배로 잘 들어맞는 것을 확인하였다.

## 4. 결론

본 연구에서는 IDT 형태에 따른 미세입자의 속도를 예측하기 위하여 Single/Double-IDT 형태로 제작된 SAW Device를 이용하여 실험을 진행하였다. IDT 형태에 대한 이론적인 배경을 기존 이론식에 적용하였고 실험을 통해 구한 값과 비교하였다. 실험값과 이론값 모두 약 2배 정도로 잘 들어맞는 것을 확인하였다. 추후 실험조건에서 발생한 오차를 줄이기 위해 PDMS에 대한 영향을 추가하고 Single/Double-IDT 형태 만이 아닌 다른 형태의 IDT도 추가할 계획이다.

## 참고문헌

- (1) DAVID P. MORGAN, 1991, Surface-Wave Devices for Signal Processing, ELSEVIER, New York.
- (2) Jinjie Shi, Daniel Ahmed, Xiaole Mao, Sz-Chin Steven Lin, Aitan Lawit and Tony Jun Huang, 2009, Acoustic tweezers: patterning cells and microparticles using standing surface acoustic waves(SSAW), Lab Chip, Vol. 9, pp. 2890~2895.