

전파 경로상의 유체에 의한 표면 탄성과 장치의 응답 특성 해석

An Analysis of SAW Device Loaded by Fluid on the Propagation Path

김재근* · 이택주** · 임수철*** · 박경수* · 박노철* · 박영필* · 엄원석†
Jaegeun Kim, Taek-Joo Lee, Soo-Cheol Lim, No-Cheol Park, Young-Pil Park, and Won-Suk Ohm

1. 서 론

표면 탄성파(SAW; Surface acoustic wave)는 Lord Rayleigh 에 의해 최초로 수학적으로 유도된 이후 다양한 현상에 대한 이론적 연구와 더불어 응용을 목적으로 많은 연구가 진행되어 왔다. 최근에는 압전 재료에 일정 패턴을 형성시킴으로써 특정 대역의 주파수를 통과시키는 필터로서의 응용을 통해 고주파 통신 시스템에 적용되었을 뿐만 아니라, 이에 따른 전자기적 입출력 특성이 규명 되었다. 또한 이를 이용한 지연선 또는 임피던스 센서로 적용되었고, 다양한 물리적 화학적 상태량의 측정이 이루어졌다. 그 외에도 기관의 타원 변위를 이용한 선형 구동기로서의 적용뿐만 아니라, 미소 입자의 이송 시스템 및 단백질 제거 시스템 등의 다양한 종류의 센서 및 구동기로 적용되었다. 이 중 센서로서의 응용은 주로 S-파라미터의 변화를 이용한 측정이 수행 되었다. S-파라미터는 입출력 포트에서의 전기적 응답 비율을 나타낸 것으로, 그 값은 입출력 임피던스 또는 지연선 내의 물성 또는 경계 조건에 의해 변화를 수반하게 된다. 그러나 지연선 내의 변화의 경우 그 예측이 매우 어려워, 기존의 연구는 모두 실험을 바탕으로 응답 변화를 관찰하는 방법으로 이루어졌다. 표면 탄성과 장치의 응답은 입출력 전극의 임피던스 및 지연선 내에서의 임피던스를 통해 해석적으로 구할 수 있다. 따라서 정확한 응답의 예측 및 이를 통한 성능의 개선을 위해 지연선에서의 Mass loading 에 의한 효과를 고려한

응답 모델의 구현이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 이를 위해 지연선 상의 일정 부분에 특정 물체의 존재에 따른 관계를 고찰하며, 이 중 유체의 존재에 따른 Streaming 현상 및 이에 따른 응답 특성을 구하는 것을 그 목적으로 한다.

2. 이론적 배경

2.1 기계적 범위

표면 탄성과 장치의 기본 구조는 압전 기관과 양단에 형성된 입출력 IDT(IDT; Inter digital transducer), 그리고 지연선(Delay line) 으로 구성된다. 입력 IDT 에 전기 신호가 가해지면, 압전 효과에 의해 표면의 타원 운동이 발생하여 기관을 따라 진행 하게 된다. 이 때 지연선 상에 유체가 존재 하게 되면, 유체 내부에서 Rayleigh angle 을 따라 누설 표면 탄성파(LSAW; Leaky SAW)를 발생시키게 된다. LSAW 에 의해 지연선 내의 유체에서는 Acoustic streaming 현상이 발생하게 되며, 이때의 유체 입자의 변위는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$u_x = A \exp(j\omega t) \exp(-jk_L x) \exp(-\alpha k_L z) \quad (1)$$

$$u_z = -j\alpha u_x, \quad \alpha = 1 - (v_L / v_w)^2$$

이때 k_L , v_L , v_w 은 각각 LSAW 의 wave number, velocity 그리고 longitudinal wave velocity 를 나타내며, Campbell 과 Jones 의 방법으로 구할 수 있으며, 128° YX LiNbO₃ 또는 YZ LiNbO₃ 와 물이(water) 접촉한 경우에 대해 Bhattanabotla 등에 의해 정리 되었으며, 이 중 wave number 를 표 1 에 정리되었다.

Table 1 LSAW velocity

Crystal cut	Water-loaded LSAW velocity (m/s)
128° YX LiNbO ₃	3931+j68.1
YZ LiNbO ₃	3194+j268.3

† 교신저자; 연세대학교 기계공학과

E-mail : ohm@yonsei.ac.kr

Tel : 02-2123-5819, Fax : 02-312-2159

* 연세대학교 기계공학과

** ITF(주)

*** 삼성전기(주)

따라서, 기관 표면의 변위는 유체를 통과하면서 감쇄하게 되며, 이에 비례하는 전기적 신호가 출력된다. 이 때, SAW 가 통과하는 유체 접촉 면의 크기는 압전 기관과 접촉 유체간의 표면 장력에 의해 식 (2)와 같이 결정된다.

$$S = \pi \cos^2 \theta \left(\frac{3V}{\pi(2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta)} \right)^{2/3} \quad (2)$$

$$V = \pi r^3 \left(\frac{2}{3\cos^3\theta} - \frac{1}{\cos^2\theta} + \frac{1}{3} \right)$$

이 때, V 는 접촉 유체의 부피를, θ 는 기관과의 접촉 각을, r 은 접촉면에서의 반경을 나타낸다.

2.1 전기적 응답

SAW 장치의 전기적 응답은 그림 1 과 같이 구성된 블록 선도로 표현할 수 있다. 이 때 H_1 , H_2 는 각각 전기적/기계적 신호의 입력에 따른 응답을 나타내며, $\exp(r \operatorname{Im}(k_L))$ 는 접촉 유체를 통과하면서 발생하는 신호의 감쇄를 나타낸다. 그러나 이는 2 차원 단면에 따른 거리로 실제 적용을 위해서는 SAW 가 실제로 발생하는 거리인 IDT 의 크기가 고려된 등가 모델이 필요하다. 이는 반경 r 의 원의 넓이와 IDT 와 등가 접촉길이에 의한 면적이 같다고 가정함으로써 구할 수 있고, 이에 따른 접촉 길이는 $\pi r^2 / W / 2$ 로 구할 수 있어, 이를 반영한 감쇄함수는 $\exp(\pi r^2 / W / 2 \operatorname{Im}(k_L))$ 로 식(3) 와 같이 정리된다. 이때 $|H_1(f)| |H_2(f)|$ 는 식(4)과 같이 유도된 바 있다. 따라서 이를 이용하여 식을 다시 정리하면, 식 (3)는 식 (5)와 같이 최종적으로 정리된다.

$$|H(f)| \quad (3)$$

$$= |H_1(f)| |H_2(f)| \exp(\pi r^2 / W / 2 \operatorname{Im}(k_L))$$

$$|H_1| |H_2| = \frac{y_{ab} Z_L}{(1 + y_{aa} R_S)(1 + y_{bb} Z_L) - y_{ab}^2 R_S Z_L} \quad (4)$$

$$|H(f)| = \frac{|y_{ab} Z_L| \exp(\pi r^2 / W / 2 \operatorname{Im}(k_L))}{|(1 + y_{aa} R_S)(1 + y_{bb} Z_L) - y_{ab}^2 R_S Z_L|} \quad (5)$$

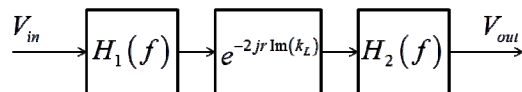


Fig. 1 Block diagram of SAW device

3. 실험

식 (5)로 유도 된 응답 특성의 확인을 위해 SAW 장치의 지연선에 유체를 증가 시키면서, 그 응답 변화를 살펴 보았다. SAW 장치에 사용된 압전 재료는 128° YX LiNbO₃ 이며, 중심 주파수 13.74 MHz 를 가지도록 설계 되었다. 이 때, IDT 의 개수 와 높이는 각각 30쌍, 9 mm 이다. 또한 IDT 의 입출력 임피던스는 모두 50 Ω 로 하였다. 접촉 유체는 물이 사용 되었으며, 분해능 1 μl 의 마이크로 피펫을 통해 기관위로 이동 되었다. 실험은 기관의 중앙에 유체를 중첩하여, 접촉시키는 방법으로 진행되었으며, 이에 따른 이론적 실험적 중심 주파수 응답은 그림 2와 같다. 실험 결과 최대 오차 10 % 를 가짐을 알 수 있었고, 따라서 기관에서의 유체에 따른 응답 특성 모델이 타당함을 알 수 있었다.

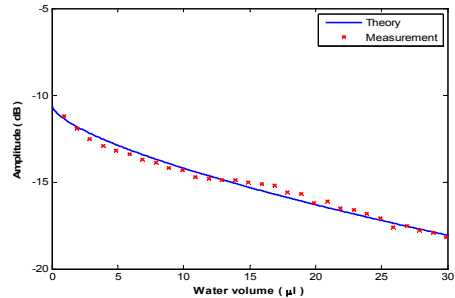


Fig.2 Theoretical/experimental results

3. 실험

본 연구에서는 지연 선 상에서의 유체에 의한 sAW 장치의 응답 특성 확인을 위해 접촉한 유체의 acoustic streaming 현상을 고려하였고, 이를 통한 변위의 감쇄 및 전기적 응답의 변화를 수식적으로 유도하였고, 실험을 통해 그 타당성을 증명하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 수식은 타당하며, 이를 바탕으로 다양한 종류의 유체에 따른 SAW 응답 특성의 예측 및 이를 이용한 센서의 성능 개선이 가능함을 알 수 있다.

후 기

본 논문은 한국 과학재단 일반 연구자 지원사업의 기본 연구사업(과제번호 2010-0015965)의 지원을 받아 실시되었음.