

## Love파를 이용한 저점성 유체 점도 측정용 표면 탄성파 센서 개발

이상대 김기복 이대수

### Development of Surface Acoustic Wave Sensor for Viscosity Measurement of Low Viscose Liquid Using Love Wave

S. D. Lee K. B. Kim D. S. Yee

#### Abstract

Love wave is one of the shear horizontal waves and it can propagate between two layers in liquid without energy loss. The SAW (surface acoustic wave) sensor using Love wave is very useful for real time measurement of the viscosity of liquid with high sensitivity. In this study, the 77 MHz and 155 MHz Love wave SAW sensors were fabricated and use to measure the viscosity of low viscous liquid. To generate the surface acoustic wave, the inter-digital transducers were fabricated on the quartz crystal wafer. In order to obtain the optimal thickness of the coating film (novolac photoresist) generating the Love wave on the surface of SAW device, theoretical calculation was performed. The performances of fabricated Love wave SAW sensors were tested. As test liquid, pure water and glycerol solutions having different concentrations were used. Since the determination coefficients of the regression equations for measuring the viscosity of liquid are greater than 0.98, the developed Love wave SAW sensors in this study will be very useful for precise measurement of viscosity of liquid.

**Keywords** : Surface acoustic wave, Love wave, Viscosity, Low viscose liquid

#### 1. 서 론

점도는 유체의 유동적 성질을 지배하는 중요한 물리량이다. 이러한 유체의 점도를 측정하는 점도계는 식품, 의약품, 석유·화학제품 등과 같이 다양한 분야에서 이용되고 있다. 산업 분야에서 이용되는 점도계는 측정 원리에 따라 세관식, 회전식, 낙체식, 진동식 등으로 분류할 수 있다. 이러한 점도계 중에서 점도가 낮은 유체를 정확히 측정하기 위해 사용되는 점도계로서 대표적인 모세관 점도계와 Saybolt 점도계가 있으나 측정시간이 오래 걸리고 실험 방법이 복잡한 단점이 있다.

표면탄성파(Surface Acoustic Wave)는 초기에 SAW 필터로 많이 이용되었으나 표면탄성파 작동 원리를 응용하여 습

도나 가스 등을 검출하는 센서로도 이용되고 있다. 일반적으로 표면탄성파를 이용한 SAW 센서는 출력 IDT(inter-digital transducer)에서 발생된 표면파가 감지층을 지나 입력 IDT로 전달될 때 감지층에서 발생한 하중 변화가 감지층을 지나는 표면파의 삽입손실이나 주파수를 변화시키는 원리를 이용한다. SAW 센서는 크기가 작고 측정 방법이 간단하며 측정 감도가 높아 정확하고 세분화된 측정이 가능한 장점이 있다. 최근 이러한 표면탄성파 원리를 이용하여 저점성 유체의 점도나 밀도를 측정하는 연구가 진행되고 있으며 액상에 존재하는 소량의 단백질이나 세균 등을 검출하기 위한 기술의 필요성에 의해 SAM(self-assemble monolayer)이나 LB(Langmuir-Blodgett method) 등의 유기박막 제조 기술 등을 적용한 바이오센서

This study was conducted by the research fund supported by Ministry of Education, Science and Technology. This work was supported by the research grant of Chungbuk National University in 2006. The article was submitted for publication on 2008-6-16, reviewed on 2008-7-15, and approved for publication by editorial board of KSAM on 2008-7-23. The authors are Sangdae Lee, Research Student, Ki-Bok Kim, Principal Research Scientist, and Dae-Su Yee, Senior Research Scientist, Safety Metrology Group, Division of Metrology for Quality Life, Korea Research Institute of Standard and Science, Daejeon, Korea. Corresponding author: K. B. Kim, Principal Research Scientist, Safety Metrology Group, Division of Metrology for Quality Life, Korea Research Institute of Standard and Science, Daejeon, 305-340, Korea; E-mail: <kimkibok@kriss.re.kr>.

분야에서 다양한 연구가 수행되고 있다. 이러한 SAW 센서 중에서 Love파를 이용하는 센서는 압전기판 위에 유전성 (dielectric) 물질을 입혀 waveguide 층을 따라 이동하는 표면파를 생성시킨다. Love파 SAW 센서는 고주파에서 작동하는 전단파를 이용하는 센서로서 표면 섭동효과(perturbation)를 이용하여 높은 측정 감도를 가지며 waveguide 층을 따라 전단파가 전달되므로 액상에서 삽입 손실이 적은 장점이 있다.

Kovacs 등(1994), Jakoby 등(1998), Teston 등(2000)은 액상에서 작동하는 바이오센서 제작을 위해 SiO<sub>2</sub>를 waveguide 층으로 증착한 Love파 SAW 센서를 제작한 다음 물-글리세롤을 무계비로 배합한 점성 용액을 이용하여 점도 차이에 따른 삽입 손실과 주파수 변화를 측정하였다. 또한 Herrmann 등(1999)은 SiO<sub>2</sub>를 waveguide 층으로 하여 두 개의 Love파 SAW 센서를 제작하고 하나의 센서는 SiO<sub>2</sub> 표면에 일정한 간격의 홈을 판 후 홈을 내지 않은 센서와 비교하여 점성 용액의 밀도 차이에 의한 위상 변화를 측정하였다.

McHale 등(2002a, 2002b, 2002c, 2003)은 Love파 SAW 센서의 감도를 최대로 할 수 있는 waveguide 층의 두께를 수치 해석적으로 계산하였다. Gizeli 등(2000, 2003)은 waveguide 층을 고분자 재료로 제작하여 센서의 감도를 향상시키고 SAM 기술을 적용한 바이오센서를 제작하였다.

지금까지의 연구를 살펴보면 물과 같이 점도범위가 매우 낮은 유체에 대한 점도 측정 연구는 다소 미흡한 것으로 나타났다. 따라서 본 연구는 저점성 유체 점도 측정용 Love파 SAW 센서를 개발하기 위하여 수행되었으며 77 MHz와 155 MHz의 중심 주파수를 갖는 Love파 SAW 센서를 설계·제작한 후 점도 범위가 낮은 유체에 적용하여 저점성 유체 측정용 센서로서의 가능성을 분석하였다.

## 2. 이론적 배경

### 가. Love파 SAW 센서의 질량감도

Love파는 등방성 반무한체 위에 상대적으로 강성이 약하고 종파속도가 작은 waveguide 층이 존재하는 경우 발생된다. 이러한 Love파를 해석하기 위해 그림 1과 같이 두께 w인 등방성 압전기판(밀도 ρ<sub>s</sub>, Lamé 상수 λ<sub>s</sub>와 μ<sub>s</sub>) 위에 두께 d인 waveguide 층(밀도 ρ<sub>l</sub>, Lamé 상수 λ<sub>l</sub>와 μ<sub>l</sub>)을 갖는 구조를 가정하였다. 이 때 파의 진행방향은 x<sub>1</sub> 방향이고 변위는 x<sub>2</sub> 방향으로 발생한다.

Love파에 의해 발생하는 압전기판(u<sub>s</sub>)과 waveguide 층(u<sub>l</sub>)의 변위는 다음과 같은 파동 방정식을 이용하여 구할 수 있다 (McHale 등, 2002a, 2002b, 2002c, 2003).

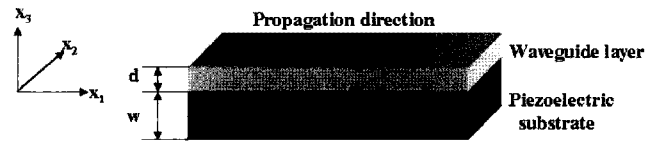


Fig. 1 Definition of axes and propagation direction for shear horizontally polarized waves in a finite substrate covered by a finite waveguide layer.

$$u_s = (0, 1, 0)[A_s e^{jT_s x_3} + B_s e^{-jT_s x_3}] e^{j(\omega t - k_1 x_1)} \quad (1)$$

$$u_l = (0, 1, 0)[C_l e^{-jT_l x_3} + D_l e^{jT_l x_3}] e^{j(\omega t - k_1 x_1)} \quad (2)$$

여기서, ω : 각주파수(rad/s)

k<sub>1</sub> : 웨이브 벡터(=√ω/v),

v : 유체의 위상속도(m/s)

A<sub>s</sub>, B<sub>s</sub>, C<sub>l</sub>, D<sub>l</sub> : 상수,

l : waveguide 층을 나타내는 첨자

s : 압전기판을 나타내는 첨자

한편, wave vector T<sub>s</sub>와 T<sub>l</sub>은 다음과 같이 주어진다.

$$T_s^2 = \omega^2 \left( \frac{1}{v_s^2} - \frac{1}{v^2} \right) \quad (3)$$

$$T_l^2 = \omega^2 \left( \frac{1}{v_l^2} - \frac{1}{v^2} \right) \quad (4)$$

여기서, v<sub>s</sub> : 압전기판의 전단속도(m/s)

v<sub>l</sub> : waveguide의 전단속도(m/s).

위 식에서 경계면에서의 변위와 응력에 관한 경계 조건을 이용하여 다음과 같은 분산 방정식을 구할 수 있다.

$$\tan(T_d) = \xi \tanh(T_s \omega) \quad (5)$$

여기서, ξ :  $\frac{\mu_s T_s}{\mu_l T_l}$ .

Love파는 wave vector T<sub>s</sub>가 실수이고 압전기판의 전단속도(v<sub>s</sub> = √μ<sub>s</sub>/ρ<sub>s</sub>)가 waveguide 층의 전단속도(v<sub>l</sub> = √μ<sub>l</sub>/ρ<sub>l</sub>)보다 빠르고 압전기판의 두께가 ω → ∞일 때 발생한다. 그림 2는 식 (5)에 식 (3)과 (4)를 대입하여 waveguide 층의 두께에 따른 Love파의 위상속도 변화를 나타낸 분산곡선을 나타낸다.

이 때 중심 주파수(f<sub>0</sub>)는 77 MHz와 155 MHz이고 압전기판의 두께(w)는 700 μm, 전단속도(v<sub>s</sub>)는 5100 m/s, 밀도(ρ<sub>s</sub>)는 2655 kg/m<sup>3</sup>이며 waveguide 층의 전단속도(v<sub>l</sub>)는 1100 m/s, 밀도(ρ<sub>l</sub>)는 1000 kg/m<sup>3</sup>이다.

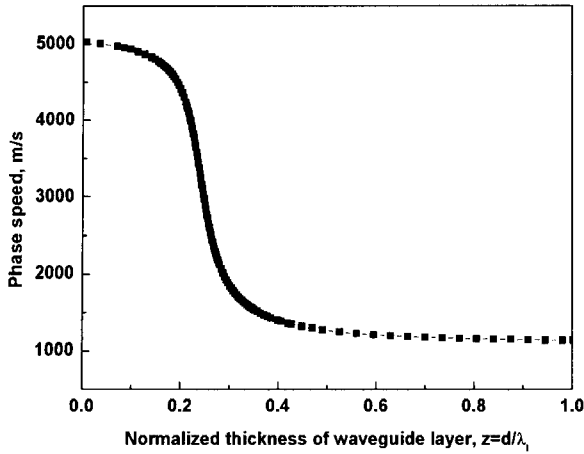


Fig. 2 Theoretical calculated phase speed as a function of normalized thickness of waveguide layer at given material conditions.

Love파 SAW 센서의 질량감도( $S_m$ , mass sensitivity)는 식 (5)의 분산 방정식을 이용하여 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_m = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta m} \left( \frac{\Delta v}{v_0} \right) \approx \frac{f_0}{\rho v_i} \left( \frac{d \ln(v)}{dz} \right)_{z=z_0} \quad (6)$$

- 여기서,  $\Delta m$  : waveguide 층에서의 하중 변화
- $\Delta v$  : waveguide 층에서의 전단속도 변화
- $v_0$  : waveguide 층에 하중이 없을 때의 전단속도
- $z$  : waveguide 층의 최적 두께(= $d/\lambda$ )

그림 3은 그림 2의 분산 곡선의 기울기 변화를 이용하여 waveguide 층의 두께 변화에 따른 질량감도 변화를 나타낸 것이다. 식 (5)와 (6)을 이용한 수치해석 결과 Love파 SAW 센서의 질량감도는 waveguide 층의 두께가  $\lambda/4$ 일 때 가장 높고 중심 주파수의 크기에 비례하는 것으로 나타났다.

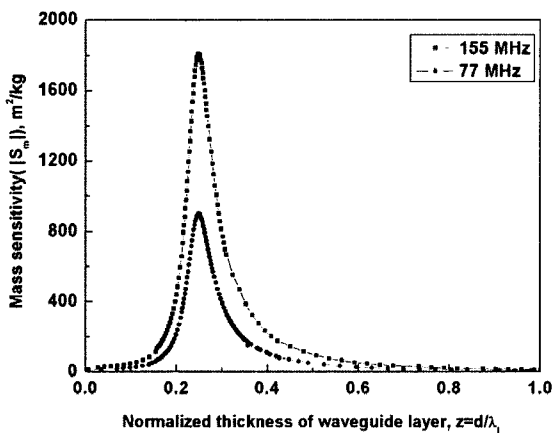


Fig. 3 Theoretical calculated mass sensitivity as a function of normalized thickness of waveguide layer at 77 and 155 MHz.

### 나. 점도 측정 원리

전단파는 이상적인 유체와는 상호작용을 하지 않으나 점성 유체와는 상호작용을 한다. 따라서, Love파는 전단파의 한 종류이므로 waveguide 층에 접촉해 있는 유체는 waveguide 층의 진동에 반응하게 된다. 즉, waveguide 층 표면에 유체의 점성 부하가 가해지면 점성 결합에 따라 표면 임피던스가 변화하게 되고 음파의 전파상수( $\gamma = \alpha + i\beta$ )가 변화하게 된다. 이 때 뉴턴유체와 같은 저점성 유체에서 전파상수의 실수부와 허수부는 다음과 같이 표현할 수 있다(Kovaes 등, 1994, Jakoby 등, 1998, Teston 등, 2000).

$$\Delta\alpha/\beta = \Delta\beta/\beta = S\sqrt{\frac{\omega\eta\rho}{2}} \quad (7)$$

- 여기서,  $\alpha$  : 감쇠상수
- $\beta$  : 위상상수
- $\omega$  : 각속도
- $\eta$  : 점도

이러한 변화는 분산 이론을 이용하여 해석할 수 있으며 전파상수의 변화는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\Delta\gamma}{\beta} = \frac{\Delta\alpha + j\Delta\beta}{\beta} \approx \frac{1+j}{\sqrt{2}} S\sqrt{\omega\eta\rho} \quad (8)$$

$\Delta\gamma$ 의 실수부는 감쇠를 나타내고 허수부는 파수(wave number)의 변화를 나타낸다. 전파 상수의 변화는 주파수의 변화와 전달 손실을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta\phi\lambda_s}{360L} = -\left(\frac{v_g}{v}\right)\frac{\Delta\beta}{\beta} = -\left(\frac{v_g}{v}\right)S\sqrt{\frac{\omega\eta\rho}{2}} \quad (9)$$

- 여기서,  $v_g$  : 군속도(m/s)
- $v$  : 전단속도(m/s)
- $S$  : 센서의 감도
- $f$  : 작동 주파수(Hz)
- $L$  : 표면탄성파 전달 거리(m)
- $\phi$  : 위상(degree)

식 (9)에서 Love파 SAW 센서의 주파수 변화는 위상 변화로 나타낼 수 있으며 주파수 변화와 위상 변화는 유체의 점도를 포함하는  $\sqrt{\omega\eta\rho}$ 에 대해 선형적으로 감소하는 것을 의미한다. 이러한 관계를 이용하여 Love파 SAW 센서의 위상 변화를 검출하여 유체의 점도를 측정할 수 있게 된다.

### 3. 재료 및 방법

#### 가. LOVE 파 SAW 센서 제작

본 연구에서 사용된 Love파 SAW 센서의 중심주파수는 77 MHz와 155 MHz로 설계되었으며 압전기판은 0.7 mm 두께의 42.75° ST-cut quartz를 선정하였다. IDT 패턴은 이중 구조 IDT이며 IDT의 창폭(finger overlap)은 77 MHz일 때 3.5 mm이고 155 MHz일 때 2 mm가 된다. IDT의 쌍수(finger pairs)는 20쌍으로 설계하였다. 입력 IDT와 출력 IDT 사이의 거리는 77 MHz일 때 6 mm이고 155 MHz일 때 4 mm로 하였다. 설계된 센서의 구조는 그림 4와 같다.

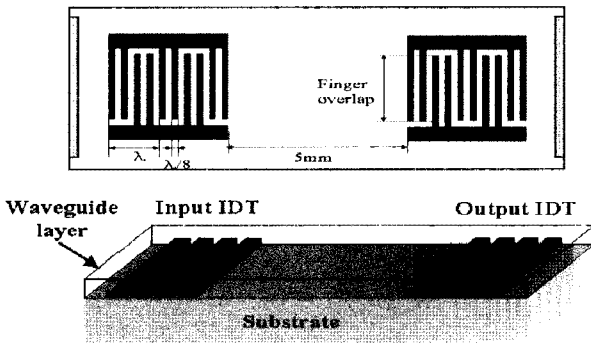
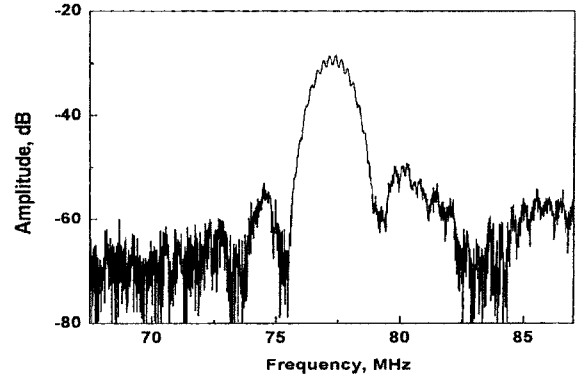


Fig. 4 Schematic of Love wave SAW device.

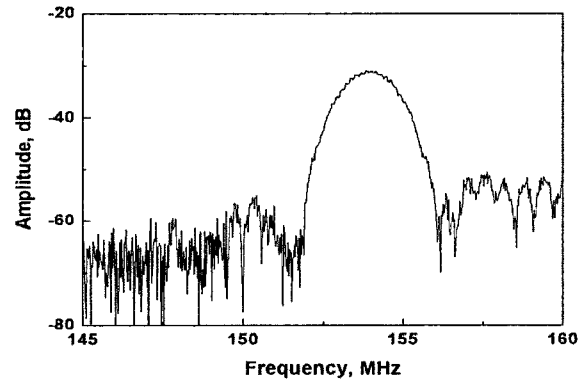
IDT는 quartz 기판 위에 Ti과 Au를 각각 20 nm와 100 nm 씩 DC sputter를 이용하여 증착한 후 IDT 패턴 마스크와 AZ1512 photoresist를 이용하여 Ti/Au가 증착된 quartz 위에 photoresist 패턴을 형성하였다. Quartz 기판 위에 형성된 photoresist 패턴은 건식 식각공정을 이용하여 IDT 패턴으로 제작하였다.

Waveguide 층의 재료는 Novolac 용액(Rohm and Haas Inc., USA)을 사용하였다. Novolac은 일반 photoresist 용액과 같이 패턴 형성이 가능하며 다른 물질과 결합력이 뛰어나고 thinner를 배합하여 두께 조절이 가능한 장점이 있다. 식 (5)의 분산곡선에서 구해진 waveguide 층의 최적 두께는 77 MHz일 때 약 3.6 μm이고 155 MHz일 때 1.8 μm인 조건을 적용하였다. Waveguide 층은 스프인코팅 공정으로 제작하였으며 코팅된 waveguide 층의 두께는 surface profiler(Veco Inc., USA)를 이용하여 두께를 측정하였다. 제작 공정이 끝난 quartz 기판은 dicing saw를 이용하여 절단하였다.

그림 5는 회로망분석기(HP8720D HP Inc., USA)를 이용하여 부하가 없는 상태에서 측정된 77 MHz와 155 MHz Love파 SAW 센서의 응답특성을 나타내며 설계 중심주파수를 만족하는 것으로 나타났다.



(a) 77 MHz



(b) 155 MHz

Fig. 5 Measured frequency responses of (a) 77 MHz and (b) 155 MHz Love wave SAW devices.

#### 나. 점도 측정 실험

제작된 Love파 SAW 센서는 PCB 기판과 SMA 커넥터로 구성된 지그에 연결하여 그림 6과 같이 측정 시스템을 구성하였다. 시료의 점도 변화에 따른 위상 변화를 측정하기 위해 회로망분석기를 이용하여  $S_{21}$  파라미터를 측정하였다. 회로망분석기는 USB/GPIB interface(82357A, Agilent Inc., USA)를 통해 노트북과 연결하였으며 측정된 데이터는 VEE pro(Agilent Inc, USA) 프로그램을 이용하여 위상 변화를 실시간으로 측정하였다.

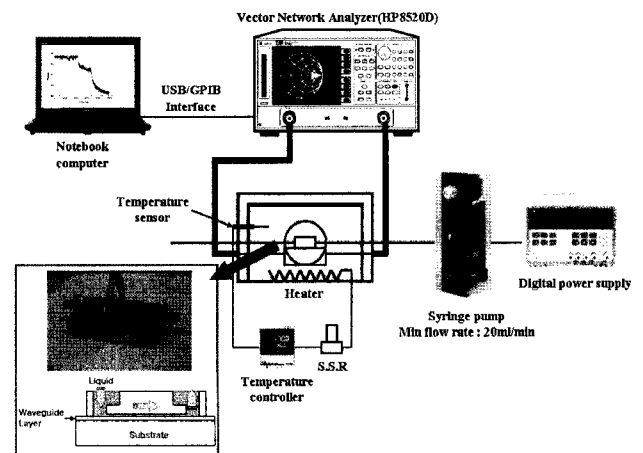


Fig. 6 Experimental setup for viscosity measurement.

SAW 센서의 감지부에 일정한 유량의 용액을 공급하기 위해 최소 10 ml/min의 속도로 용액을 공급할 수 있는 syringe pump(Cavro Inc., USA)를 사용하였다. 또한, 실험 환경의 온도를 일정하게 유지하기 위해 이중 아크릴 케이스 안에 열원과 온도조절기를 설치하여 아크릴 케이스 내부의 온도를 20°C로 일정하게 유지하였다.

실험에 사용된 용액은 점도 측정에서 1차 표준으로 사용하고 있는 20°C 증류수를 기준으로 하여 100 g의 증류수에 글리세롤을 무게비로 배합하여 점도를 조절한 용액을 사용하였다. 각 시료의 밀도와 점도는 표 1과 같다. 시료의 점도 변화를 측정하는 실험에서 센서의 감지층에 주어지는 시료의 양을 일정하게 하기 위해 그림 6에서 보논바와 같이 센서의 감지층 표면에 시료가 통과할 수 있는 0.2 mm 두께의 통로를 아크릴로 제작하였다.

Table 1 Viscosities and densities of various aqueous glycerol solutions at 20°C

Glycerol weight proportion (%)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosity (cP)
0	1000	1.005
10	1021	1.31
20	1043	1.76
30	1066	2.56
40	1090	3.72

Note: CRC Handbook of Chemistry and Physics, 58th Ed., 1977. 1 cP = 0.001 Pa·s.

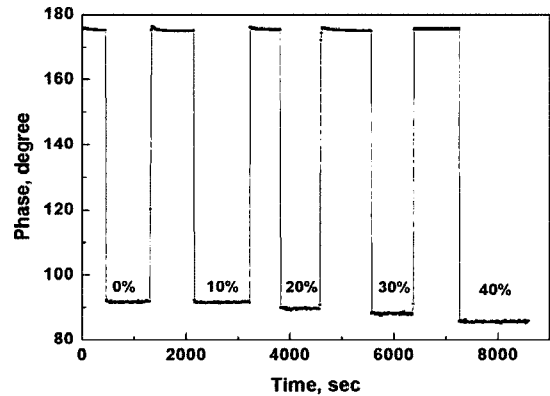
실험 방법은 시료를 센서의 감지층에 공급하기 전에 Love파와 SAW 센서의 위상 신호를 안정화시킨 다음 점도가 조절된 시료를 syringe pump를 이용하여 센서 표면에 공급하였다. 센서의 감지층을 시료로 채운 후 변화된 위상 신호가 충분히 안정화 되도록 기다린다. 위상 신호가 안정되면 감지층에 시료가 남지 않도록 완전히 제거하고 다시 위상 신호를 안정화시킨다. 이와 같은 실험을 시료의 점도 순서대로 반복하여 실시하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

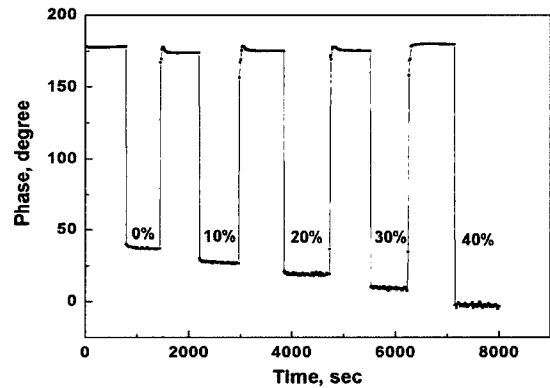
그림 7은 77 MHz와 155 MHz Love파와 SAW 센서에서 시료의 점도변화에 따른 센서의 위상변화를 실시간으로 측정한 결과를 나타내며 글리세롤의 무게비에 따라 위상변화가 뚜렷하게 변화하고 있음을 알 수 있다. 그림 8은 증류수와 글리세롤의 무게비에 따른 위상값 변화를 나타내며 그림 9는 식 (9)의  $\sqrt{\eta\rho}$ 을 x축으로 하여 위상 변화를 나타낸 것으로 글리세롤의 무게비에 따라 위상변화가 증가하는 것으로 나타났으며 155 MHz 센서의 감도가 77 MHz 센서보다 감도가 우수한

것으로 나타났다. 점성 용액은 식 (9)에서 표현된 것과 같이  $\sqrt{\eta\rho}$ 에 선형적으로 비례하여 위상이 변화하였으며 77 MHz와 155 MHz Love파와 SAW 센서에서 모두 결정 계수가 0.98 이상으로 높게 나타났다.

측정된 데이터를 이용해 제작된 SAW 센서의 실제 측정 감도를 계산한 결과 77 MHz SAW 센서의 감도( $S_p$ )는  $3.56 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s/kg}$ 이고 질량감도( $S_{pm}$ )는  $2.74 \text{ m}^2/\text{kg}$ 으로 계산 되었으며 155 MHz SAW 센서의 감도( $S$ )는  $1.12 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s/kg}$ 이고 질량감도( $S_m$ )는  $17.24 \text{ m}^2/\text{kg}$ 로 나타났다.



(a) 77 MHz



(b) 155 MHz

Fig. 7 Real-time phase changes of (a) 77 MHz and (b) 155 MHz Love wave SAW devices at various glycerol weight proportion.

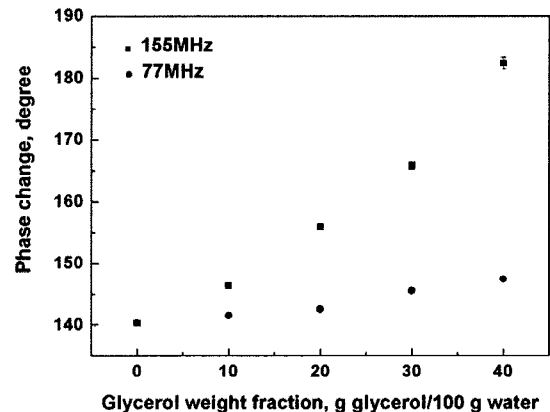


Fig. 8 Phase variations for different weight concentrations of aqueous glycerol solution.

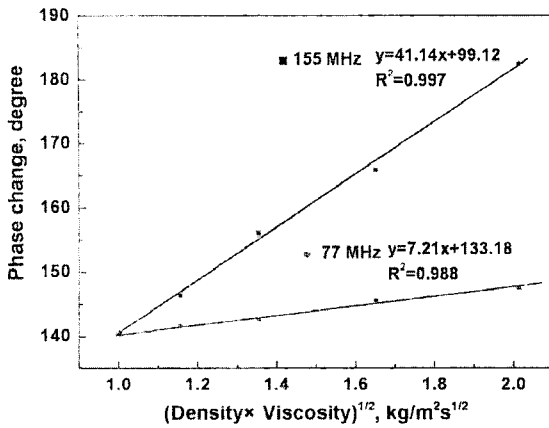


Fig. 9 Phase change variations for  $\sqrt{\eta\rho}$  of aqueous glycerol solution.

### 5. 요약 및 결론

본 연구는 저점성 유체의 점도를 정확하게 측정할 수 있는 Love와 SAW 센서를 개발하기 위해 수행되었으며 주요 연구 결과는 다음과 같다.

- (1) 최적 감도를 갖는 Love와 SAW 센서를 제작하기 위해 시뮬레이션을 통해 waveguide 층의 최적 두께를 계산한 결과 waveguide 층의 두께가  $\lambda/4$ 일 때 Love와 SAW 센서의 질량감도가 가장 높은 것으로 나타났으며 이를 바탕으로 77 MHz와 155 MHz Love와 SAW 센서를 제작하였다.
- (2) 100 g의 증류수에 글리세롤을 부계비로 배합하여 점도를 조절한 시료를 이용하여 점도 변화에 따른 Love와 SAW 센서의 위상 변화를 측정된 결과 Love와 SAW 센서의 위상 변화는 시료의  $\sqrt{\eta\rho}$ 에 선형적으로 비례하였으며 77 MHz와 155 MHz Love와 SAW 센서에서

모두 결정 계수가 0.98 이상으로 높게 나타나 정확한 유체의 점도 측정이 가능한 것으로 판단된다.

1. Gizeli, E. 2000. Study of the sensitivity of the acoustic waveguide sensor. *Analytical Chemistry* 72:5967-5972.
2. Gizeli, E., F. Bender, A. Rasmusson, K. Saha, F. Josse and R. Cernosek. 2003. Sensitivity of the acoustic waveguide biosensor to protein binding as a function of the waveguide properties. *Biosensors and Bioelectronics* 18:1399-1406.
3. Herrmann, F., D. Hahn and S. Buttgenbach. 1999. Separate determination of liquid density and viscosity with sagittally corrugated LOVE-mode sensor. *Sensors Actuators* 78:99-107.
4. Jakoby, B. and M. J. Michael. 1998. Viscosity sensing using a Love-wave device. *Sensors and Actuators* 68:275-281.
5. Kovacs, G., M. J. Vellekoop, R. Haueis, G. W. Lubking and A. Venema. 1994. A Love wave sensor for (Bio)chemical sensing in liquids. *Sensors and Actuators* 43:38-43.
6. McHale, G., M. Newton and F. J. Martin. 2002. Layer guided shear horizontally polarized acoustic plate modes. *Applied Physics* 91(9):5735-5744.
7. McHale, G., M. Newton and F. J. Martin. 2002. Theoretical mass sensitivity of Love wave and layer guided acoustic plate mode sensors. *Applied Physics* 91(12):9701-9710.
8. McHale, G., F. Martin and M. J. Newton. 2002. Mass sensitivity of acoustic wave devices from group and phase velocity measurement. *Applied Physics* 92(6):3368-3373.
9. McHale, G. 2003. Generalized concept of shear horizontal acoustic plate mode Love wave sensors. *Measurement Science and Technology* 14:1847-1853.
10. Teston, F., G. Feuillard, L. P. Tessier, H. H. Tran and M. J. Lethiecq. 2000. Analysis of the coupling between shear horizontal plate waves and liquids. *Applied Physics* 15:689-694.