

LOVE파를 이용한 유체 점도 측정용 표면 탄성파 센서 개발

Development of Surface Acoustic Wave Sensor for Viscosity measurement of Liquid using LOVE Wave

김기복* 이상대* 김만수**
정회원 정회원 정회원
K. B. Kim S. D. Lee M. S. Kim

1. 서론

최근 빠른 분석시간과 현장에서 직접 사용이 가능한 소형화된 바이오센서의 수요가 증가하고 있다. 이에 따라 미세가공기술(MEMS)에 기반을 둔 바이오센서에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며 이러한 미세가공기술을 이용한 방법으로 음파를 이용한 바이오센서가 큰 관심을 받고 있다. 음파를 이용한 방법 중에서도 광학적인 방법보다 감도가 크고 광학적 방법에서 얻을 수 없는 정보도 얻을 수 있는 표면탄성파를 이용한 센서가 주목을 받고 있다.

표면파를 이용한 센서는 주로 가스나 냄새 등을 검출하는 센서에 이용되었다. 그러나 액상에 존재하는 물질을 검출해 내는 기술의 필요성에 의해 유체와 고체의 경계면에서 음향 손실이 없는 전단파(shear wave)를 생성할 수 있는 표면파 센서가 주목을 받고 있다. 그 중에서 QCM(Quartz Crystal Microbalance)은 단순한 구조를 이용하여 전단파를 생성할 수 있어 가장 널리 이용된 방법이다. 그러나 QCM은 작동 주파수가 낮아 측정 감도에 한계가 있었다. LOVE 파 센서는 압전 기판 위에 유전성(dielectric) 물질을 입혀 waveguide 층을 따라 이동하는 표면파를 생성시킨다. 이러한 LOVE 파 센서는 고주파에서 작동하는 전단파를 이용하는 센서로 표면 perturbation 효과를 이용하여 높은 측정 감도를 갖는다(김 , 2005, Gizeli 등, 1997, Gizeli, 2000).

본 연구는 항원-항체 반응을 이용한 바이오센서 제작을 위한 기초 연구로 77MHz LOVE 파 센서를 설계·제작하였으며 그 작동 특성을 알기 위해 점도가 다른 유체를 이용하여 센서의 작동 특성을 측정하였다.

2. 이론적 배경

2.1 Mass sensitivity

LOVE 파는 등방성 반무한체(the semi-infinite half-space material) 위에 상대적으로 강성이 약하고 종파 속도가 작은 이질층(waveguide layer)이 존재하는 경우 발생된다. 이러한 LOVE 파를 해석하기 위해 그림 1과 같이 두께 w 인 등방성 압전 기판(밀도 ρ_s , Lamé 상수 λ_s 와 μ_s) 위에 두께 d 인 waveguide 층(밀도 ρ_l , Lamé 상수 λ_l 와 μ_l)을 갖는 구조를 가정하였다. 이 때 파의 진행 방향은 x_1 방향이고 변위는 x_2 방향으로 발생한다.

* 한국표준과학연구원 삶의질표준부 안전그룹

** 충남대학교 농업생명과학대학 생물산업기계공학과

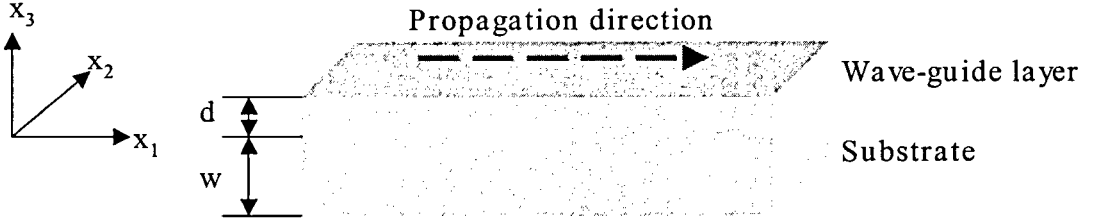


Fig. 1 Definition of axes and propagation direction for shear horizontally polarized waves in a system of a finite substrate covered by a finite waveguide layer.

LOVE 파에 의해 발생하는 압전 기관(u_s)과 waveguide 층(u_l)의 변위는 파동 방정식의 해를 이용하여 구할 수 있다(McHale 등, 2002, 2003).

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

$$u_s = (0, 1, 0)[C_s e^{jT_s x_3} + D_s e^{-jT_s x_3}]e^{j(\omega t - k_1 x_1)} \quad (2)$$

여기서, ω = The angular frequency, k_1 = The wave vector ($=\sqrt{\omega/v}$)

v = the phase velocity of the solution,

A_l, B_l, C_s and D_s = constant

l and s = Subscript for waveguide layer and substrate

Wave vector T_s 와 T_l 은 다음과 같이 주어진다.

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

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

경계면에서의 변위와 응력에 관한 경계 조건을 이용하여 다음과 같은 분산 방정식(the dispersion equation)을 구할 수 있다.

$$\tan(T_l d) = \xi \tanh(T_s w) \quad (5)$$

LOVE 파는 wave vector T_s 가 실수이고 기관의 전단 속도($v_s = \sqrt{\mu_s/\rho_s}$)가 질량 층의 전단 속도($v_l = \sqrt{\mu_l/\rho_l}$)보다 빠르며 압전 기관의 두께가 $w \rightarrow \infty$ 일 때 발생한다. 그림 2는 식 (5)의 분산 방정식을 이용하여 waveguide 층의 두께에 따른 LOVE 파의 위상 속도(phase velocity) 변화를 나타낸 분산 곡선(dispersion curve)이다. 이 때 중심 주파수(f_0)는 77MHz이고 압전 기관의 두께는 700 μ m, 위상속도는 $v_s=5100$ m/s, 밀도는 $\rho_s=2655$ kg/m³이며 waveguide 층의 위상속도는 $v_l=1100$ m/s, 밀도는 $\rho_l=1000$ kg/m³로 하였다.

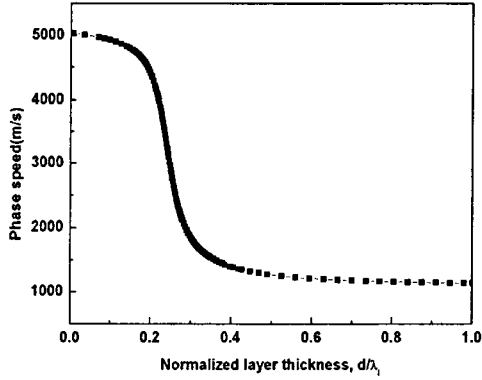


Fig. 3 Theoretical calculated phase velocity as a function of normalized guiding layer thickness.

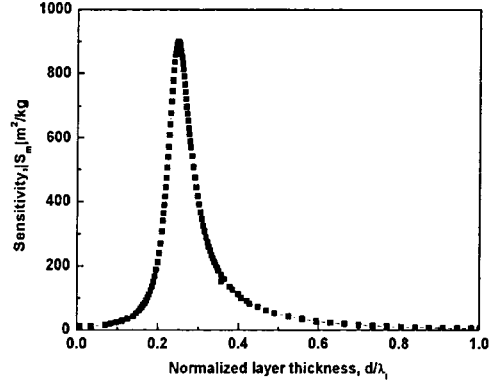


Fig. 4 Theoretical calculated mass sensitivity as a function of normalized guiding layer thickness.

LOVE 파 센서의 질량 감도(S_m , mass sensitivity)는 식 (5)의 분산 방정식을 이용하여 식(6)과 같이 구해진다.

$$S_m = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta m} \left(\frac{\Delta v}{v_0} \right) \approx \frac{f_0}{\rho_l v_l} \left(\frac{d \ln(v)}{dz} \right) \quad (6)$$

여기서, Δm =Change of mass at waveguide layer,

Δv =Change of phase velocity at waveguide layer,

z =The normalized thickness(= d/λ_l),

v_0 =Phase velocity at waveguide layer without mass loading

그림 3은 그림 2의 분산 곡선을 이용하여 계산된 질량 감도를 나타낸다. 분산 방정식을 이용한 수치해석 결과 waveguide 층의 두께는 $\lambda_l/4$ 일 때 센서의 질량 감도가 가장 높은 것으로 나타났다.

2.2 유체의 점도 측정

전단파(shear wave)는 이상적인 유체(ideal liquid)와는 상호 작용을 하지 않는 반면 점성 유체와는 상호작용을 한다. LOVE 파는 전단파의 한 종류이므로 waveguide 층에 접촉해 있는 유체는 waveguide 층의 진동에 반응하게 된다. 이 때 음파의 유효 침투 깊이(the effective liquid thickness)는 다음과 같이 계산된다(Gizeli 등, 2000).

$$\delta = \sqrt{\frac{2\eta}{\rho\omega}} \quad (7)$$

여기서, η = The viscosity of liquid, ρ = The density of liquid,

ω = the angular frequency

작동 주파수가 77MHz일 때 순수(pure water)에서 음파의 유효 침투 깊이는 63nm로 계산된다.

Waveguide 층 표면에 유체의 점성 부하가 가해지면 점성 결합에 따라 표면 임피던스가 변화하게 되고 음파의 전파 상수(the propagation constant, $\gamma = \alpha + i\beta$)가 변화하게 된다. 뉴턴 유체와 같은 저점도 유체에서 전파 상수의 실수부와 허수부는 $\Delta\alpha/\beta = \Delta\beta/\beta = S\sqrt{w\eta\rho}$ 와 같이 표현할 수 있다. 이러한 변화는 분산 이론을 이용하여 해석할 수 있으며 전파 상수의 변화는 다음과 같이 표현할 수 있다(Kovacs 등, 1994, Jakoby 등, 1998, Teston 등, 2000).

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

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

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

$$\Delta IL = \frac{40\pi L}{\ln(10)\lambda} \frac{\Delta\alpha}{\beta} = \frac{40\pi\lambda}{\ln(10)L} S\sqrt{\frac{w\eta\rho}{2}} \quad (10)$$

여기서, v_g = the group velocity(m/s), v = the phase velocity(m/s)

S = the device sensitivity, f = the operating frequency

L = the length of the propagation path of wave,

ϕ = the wave phase in degree,

ΔIL = the insertion loss

식 (9)에서 v_g/v 항은 주파수 변화에 따른 전파 상수의 변화와 관계가 있다. 또한 주파수 변화는 위상 변화로도 표현할 수 있으며 주파수와 위상 변화는 $\sqrt{w\eta\rho}$ 에 대해 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다.

3. 실험 및 방법

3.1 LOVE파 센서 제작

센서의 중심주파수는 77MHz로 설계하였으며 압전 기관은 0.7mm 두께의 42.75° ST-cut quartz를 선정하였다. IDT(interdigital transducer) 패턴은 이중 구조 IDT이고 IDT의 창폭(finger overlap)은 3.5mm이며 IDT의 쌍수(finger pairs)는 20쌍으로 설계하였다. 입력 IDT와 출력 IDT 사이의 거리는 5mm로 하였다. 설계된 센서의 구조는 그림 4와 같다.

IDT는 quartz 기관 위에 Cr과 Au를 각각 20nm와 100nm씩 DC sputter(A-tech system,

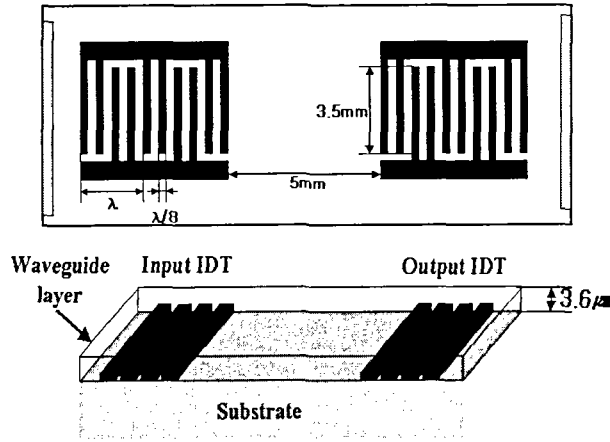


Fig. 5 Schematic of LOVE wave device.

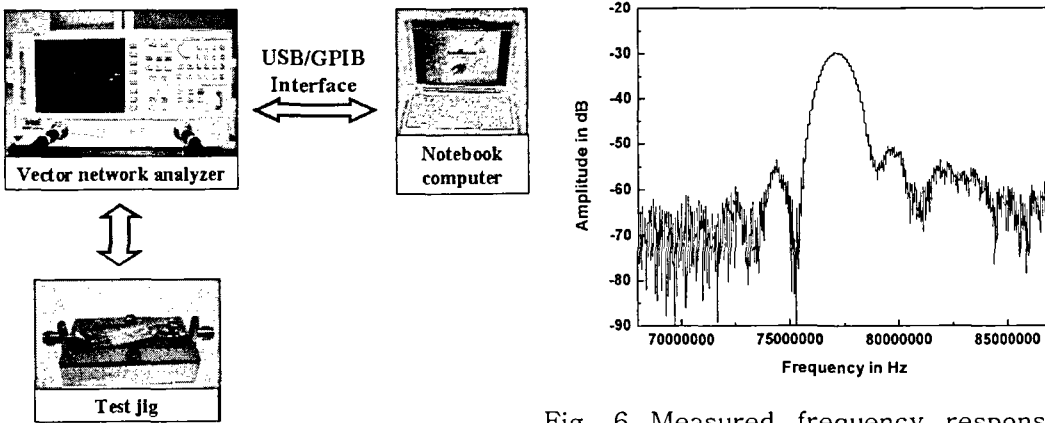


Fig. 6 Measured frequency response of the 77MHz SAW device.

Korea)로 증착한 후 IDT 패턴 마스크(PKL, Korea)와 AZ1512 감광제(photoresist)를 이용하여 Cr/Au 가 증착된 quartz 위에 PR 패턴을 형성하였다. 그 다음 dry etcher (A-tech system, Korea)를 이용하여 IDT 패턴을 제작하였다.

Waveguide 층의 재료는 MicroChem 사의 SU-8 2002 photoresist 용액을 사용하였다. SU-8 2002는 epoxy resin 계열의 제품으로 일반 photoresist 용액과 같이 패턴 형성이 가능하며 다른 물질과 결합력이 뛰어나고 약 $2\mu\text{m}$ 까지 두께 조절이 가능한 장점을 가지고 있다. waveguide 층의 두께는 최적 설계 조건에 의해 약 $3.6\mu\text{m}$ 로 계산되었으며 spin coater(A-tech system, Korea)를 이용하여 1000rpm에서 30초 동안 코팅하여 제작하였다. 코팅된 waveguide 층의 두께는 surface profiler(Veeco, USA)를 이용하여 두께를 측정하였다. 제작 공정이 끝난 quartz는 dicing saw(AM Tech., Korea)를 이용하여 절단하였다.

3.2 점도 측정 실험

제작된 LOVE와 센서는 PCB 기판과 SMA 커넥터로 구성된 지그에 연결하여 그림 5와 같은 측정 시스템을 구성하였다. 측정 장비는 회로망 분석기(HP8750D, Hewlett Packard,

Table 1. Viscosities and densities of aqueous glycerol solution at 20°C.

Glycerol weight proportion(%)	Density(kg/m ³)	Viscosity(cP)
0	1000	1.005
10	1021	1.31
20	1043	1.76
30	1066	2.56
40	1090	3.72
50	1115	6.00
60	1142	10.8
70	1188	27.57

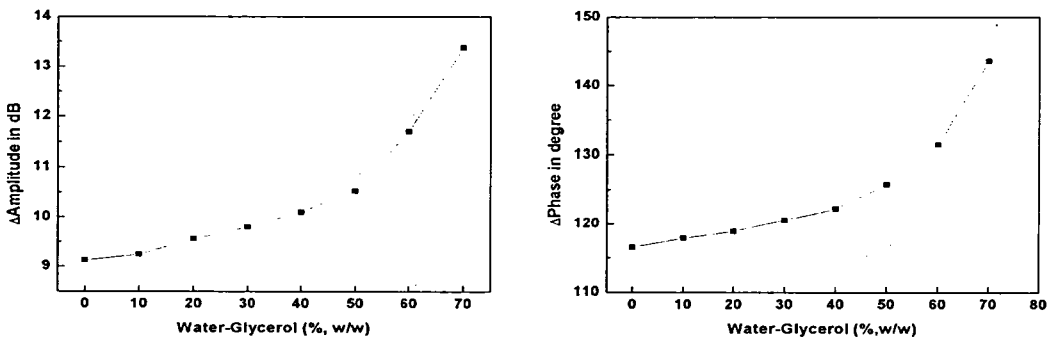


Fig. 8 Amplitude and phase variations for different weight concentrations of aqueous glycerol solution.

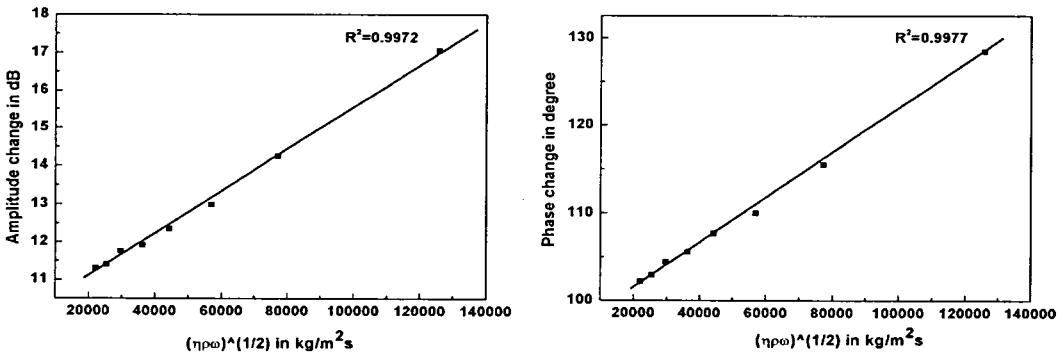


Fig. 9 Amplitude and phase variations for $\sqrt{\omega\eta\rho}$ of aqueous glycerol solution.

USA)를 이용하였으며 점도 변화에 따른 위상과 삽입손실의 변화는 S 파라미터 중 S_{21} 파라미터를 측정하여 데이터를 얻었다. 측정된 데이터는 USB/GPIB interface(82357A, Agilent, USA)를 이용하여 노트북에 저장하여 분석하였다.

그림 6은 waveguide 층에 부하가 없는 상태에서 측정된 S_{21} 신호를 나타내며 중심 주파수는 설계 중심 주파수인 77MHz와 일치하고 삽입손실은 약 -27dB로 나타났다.

점도 변화에 따른 실험을 하기 위해 SAW 센서의 표면 위에 17×7×10mm 크기의 아크릴

케이스를 제작하여 점성 유체를 담을 수 있도록 하였다. 실험 유체의 점도는 순수(pure water)에 글리세롤을 무게비로 배합하여 0~70%까지 10% 단위로 배합비율을 조절하여 실험하였다. 표 1은 배합비율에 따른 유체의 밀도와 점도를 나타낸다. 실험에 사용되는 용액의 양을 일정하게 하기 위해 마이크로 피펫(DV1000, Poland)을 사용하였으며 1회 사용량은 200 μ l로 하였다.

4. 결과 및 고찰

물과 글리세롤의 무게 비에 따라 제작된 유체의 점도 변화를 측정하기 위해 Vector network analyzer의 S_{21} 신호를 측정하여 중심 주파수인 77MHz에서의 phase와 amplitude의 변화를 측정하였다. 그림 7은 물과 글리세롤의 무게 비에 따른 phase와 amplitude의 변화량을 나타낸다. 표 1을 보면 물과 글리세롤의 무게 비가 50% 이상되는 점에서부터 점도가 크게 높아지는 것을 볼 수 있으며 이러한 형상은 그림 7의 amplitude와 phase의 측정 결과에서도 동일하게 나타나고 있다.

식 (9)와 (10)에서 v_g/v 와 S 는 waveguide 층의 두께에 의해 결정되는 값이므로 상수로 취급할 수 있으며 $\Delta f/f$ 와 ΔIL 은 $\sqrt{wn\rho}$ 의 값에 비례한다. 그림 8은 x축을 $\sqrt{wn\rho}$ 로 하여 amplitude와 phase의 변화를 나타낸 것으로 $\sqrt{wn\rho}$ 에 대한 amplitude와 phase의 변화는 결정계수가 각각 0.9972와 0.9977로 매우 높은 상관관계를 나타내었다.

실험을 통해 측정된 데이터를 이용해 제작된 센서의 실제 측정 감도를 알기 위해 식 (9)에 phase 값을 적용하여 계산하면 센서의 감도(S_p)는 6.49×10^{-8} m's/kg이고 질량감도(S_{pm})는 31.37 m²/kg로 계산되었다. 그리고 식 (10)에서 amplitude 값을 적용하면 센서의 감도(S_a)는 1.21×10^{-8} m's/kg로 계산되었으며 센서의 질량감도(S_{am})는 5.834 m²/kg로 계산되었다. phase의 변화량이 amplitude의 변화량보다 약 5배 이상 큰 것으로 나타났다. LOVE 파 센서를 이용한 실험에는 변화량이 적은 amplitude 값보다 변화량이 큰 phase 값을 측정하는 것이 더 유리한 것을 알 수 있다.

5. 요약 및 결론

바이오 센서 제작을 위해 77MHz LOVE 파 센서를 제작하여 점도 측정에 이용하였다. 제작된 LOVE 파 센서는 20쌍의 double IDT 구조를 가지며 입-출력 IDT 사이의 거리는 5mm이고 창폭은 3.5mm로 설계되었다. 설계된 LOVE 파 센서는 반도체 제작 공정을 이용해 제작되었으며 waveguide 층은 최적 감도를 갖도록 하기 위해 시뮬레이션 결과에 따라 3.6 μ m 두께로 제작하였으며 waveguide 층 재료로는 특정 패턴형성이 가능한 Microchem사의 SU-8 2002 photoresist 용액을 이용하였다.

제작된 LOVE 파 센서는 물과 글리세롤을 무게 비로 배합하여 제작한 수용액을 이용하여 점도 변화에 따른 amplitude와 phase 변화를 측정하였다. LOVE 파 센서의 amplitude와 phase는 저점도 유체에서 $\sqrt{wn\rho}$ 에 비례하는 것을 알 수 있었다. 또한 LOVE 파 센서를 이용한 실험에서는 amplitude보다 phase를 측정하는 것이 유리한 것으로 나타났다.

6. 참고문헌

1. 김기복, 2005, 표면탄성파를 이용한 biosensor 기술의 최신 연구동향, Trends in Agriculture & Life Sciences, TALS 2005 Vol.3 NO.2:1-7.

2. Gizeli E., Lowe C. R., Liley, M. and Vogel, H., 1997, Direct acoustic immunosensor, *Anal. Chem.* 69, 9,4808-4913.
3. Gizeli E., 2000, Study of the sensitivity of the acoustic waveguide sensor, *Anal. Chem.* 72, 5967-5972.
4. McHale, G., Newton, M. and Martin, F. J., 2002, Layer guided shear horizontally polarized acoustic plate modes, *Appl. Phys.* 91(9) :5735-5744.
5. McHale, G., Newton, M. and Martin, F. J., 2002, Theoretical mass sensitivity of Love wave and layer guided acoustic plate mode sensors, *Appl. Phys.* 91(12) :9701-9710.
6. McHale, G., Martin, F. and Newton, M. J., 2002, Mass sensitivity of acoustic wave devices from group and phase velocity measurement, *Appl. Phys.* 92(6) :3368-3373.
7. McHale, G., 2003, Generalized concept of shear horizontal acoustic plate mode Love wave sensors, *Meas. Sci. Technol.* 14, 1847-1853.
8. Kovacs, G., Vellekoop, M. J., Haueis, R., Lubking, G. W. and Venema, A., 1994, A Love wave sensor for (Bio)chemical sensing in liquids, *Sens. Actuators*, 43, 38-43.
9. Jakoby, B. and Michael, M. J. *Sens.*, 1998, Viscosity sensing using a Love-wave device, *Sens. Actuators*, 68, 275-281.
10. Teston, F., Feuillard, G., Tessier, L. P., Tran, H. H. and Lethiecq, M. J., 2000, Analysis of the coupling between shear horizontal plate waves and liquids, *appl. Phys.* 15, 689-694.