

# 초고주파수 진동 감지를 위한 이온 질량기반 진동센서

김 광 호\* · 서 영 호†

(2007년 11월 7일 접수, 2008년 7월 10일 수정, 2008년 8월 8일 심사완료)

## Ion-Based Micro Vibration Sensor for Ultra-High Frequency Vibration Detection

Kwang-Ho Kim and Young Ho Seo

**Key Words :** Vibration Sensor(진동 센서), Mechanical-Electrical Coupling(기계적-전기적 커플링), Ionic Vibration Potential(IVP, 이온의 진동 포텐셜), hydrated ions(수화이온)

### Abstract

This paper presents ion-based micro vibration sensor for the ultra-high frequency vibration detection. Presented sensor uses the motion of anion and cation in an electrolyte. Electrolyte vibration sensors have the high shock survival characteristics and a simple read-out circuit because of the small mass and own charges of ions. Presented sensor measures the induced electric potential by the mechanical-electrical coupling. It consist of electrolyte chamber and detection electrode. Electrolyte chamber was fabricated by PDMS molding. Detection electrode was made of gold evaporation on pyrex glass. Size of electrolyte chamber was designed as 600×600×100um. Detection electrode had 200nm-thick and 42um-gap. In the experimental study, 5.8M sodium Chloride (NaCl) solution was used as electrolyte in 36nl-chamber. Mechanical vibration was measured from 2kHz to 4MHz.

### 기호설명

$n_i$  : 리터당 이온 수  
 $r$  : 이온의 반지름(m)  
 $m$  : 이온의 질량(kg)  
 $m_H$  : 수소이온의 질량(kg)  
 $m^{ap}$  : 수화이온의 질량(kg)  
 $e_0$  : 전하량(C)  
 $e_i$  : 이온의 전하량(C)  
 $z_i$  : 이온의 전하 수  
 $v_0$  : 전해질의 속도(m/s)  
 $v_i$  : 이온의 속도(m/s)  
 $\Psi$  : 점성벡터(N·s/m)  
 $\eta$  : 전해질의 점성(Pa·s)  
 $E$  : 이온 사이의 전기장

$V$  : 전해질에 전달되는 탄성파의 속도(m/s)  
 $k$  : 전해질의 상대 유전율  
 $\sigma$  : 전해질의 전도율(S/m)  
 $\epsilon_0$  : 전해질의 자유공간 유전율(F/m)  
 $\Phi$  : 포텐셜(V)  
 $\omega$  : 이온에 전달되는 주파수(Hz)

### 1. 서 론

지금까지 물리적 진동은 질량체(proofmass)를 이용한 가속도 센서에 의해 대부분 측정되어 왔다. 기존의 가속도 센서의 구조는 질량체가 스프링 구조물에 매달려 있는 형태로 설계되어 있다. 기본 원리는 가속도가 질량체에 전달되면, 질량체의 관성력과 스프링의 복원력이 균형을 이루는 지점의 변위를 측정하여 입력된 가속도를 추정하는 것이다.

기존의 MEMS 가속도계의 질량체는 질량이 수 $\mu$ g으로, 주파수 응답이 수십 kHz로 제한되어 왔다.<sup>(1)</sup> 주파수 응답 범위를 늘리기 위해 질량체의 질량을

† 책임저자, 강원대학교 기계-메카트로닉스 공학부

E-mail : mems@kangwon.ac.kr

TEL : (033)250-6378 FAX : (033)257-4190

\* 강원대학교 기계-메카트로닉스 공학부

줄이면, 가속도 센서의 기계적 노이즈가 증가되므로 주파수 응답 범위가 제한 받게 된다.<sup>(2)</sup> 이러한 특징으로 인해 50kHz 이상의 고주파 진동은 레이저 진동 측정기(laser vibrometer)를 사용하여 측정해 왔다. 레이저 진동 측정기는 고가일 뿐 아니라 부피가 커 작은 구조물의 진동측정에는 적합하지 않다.

본 연구는 기존의 구조적 특징에 따른 문제점을 해결하기 위해 전해질내 양이온과 음이온의 작은 입자의 움직임을 이용하여 초고주파수의 기계적 진동을 간단히 감지하는 방법을 제안한다.

제안되는 진동센서는 5.8M 염화나트륨(NaCl) 전해질내 나트륨 이온(Na<sup>+</sup>)과 염소 이온(Cl<sup>-</sup>)을 이용한다. 측정원리는 이온의 기계적-전기적 커플링 현상(Mechanical-Electrical Coupling)으로 발생하는 이온 진동 포텐셜(ionic vibration potential, IVP)을 측정한다. Debye 의 연구에 의하면, 양이온과 음이온에 의해 유도되는 전기적 포텐셜은 1Hz 에서 10<sup>8</sup>Hz 까지 일정하게 유지된다. 따라서, 이론적으로 수 MHz 주파수의 기계적 진동까지 감지가 가능하다.<sup>(3)</sup>

전해질내 양이온과 음이온을 이용하면, 이온의 자기전하(self-charged) 성질로 인해 센서에 구동전원을 가하지 않아도 감지가 가능한 장점이 있다. 양이온과 음이온 사이의 수화이온(hydrated ions)의 관성차는 전해질의 종류에 따라 쉽게 증가되거나 감소될 수 있으므로, 진동 센서의 감도(sensitivity)는 조절이 가능하다. 또한, 지지된 질량체가 없으므로 충격에 대해서도 본래의 특성이 보장될 수 있다.

## 2. 동작원리 및 이론

### 2.1 이온의 기계적-전기적 커플링

이온의 기계적-전기적 커플링은 전해질 내에 양이온과 음이온이 존재하고 각각 질량의 차이가 존재한다고 가정할 경우, 외부의 기계적 진동(excitation)에 의해 전해질내 이온의 전기적 포텐셜이 발생하는 현상이다.<sup>(3)</sup> 전해질에 기계적 진동이 가해지면 양이온과 음이온의 관성의 차이로 인한 변위차가 발생된다. 이때, 각 이온의 변위차이로 인한 전기장으로부터 전기적 포텐셜이 발생된다. 전해질내의 각 이온들의 지배방정식은 다음과 같다.<sup>(3)</sup>

$$e_i E = m_i \frac{\partial v_i}{\partial t} + \psi_i (v_i + v_0) \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (n_i v_i) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{4\pi e_0}{k\epsilon_0} \sum n_i e_i \quad (3)$$

식 (1)은 평형방정식(equilibrium)으로 각 항은 힘을 나타내며, 전해질내 양이온과 음이온 사이의 전기장에서 발생하는 전기력을 관성력과 점성력의 합으로 나타낸다. 식 (1)의 점성벡터  $\psi_i$  는 다음의 보조방정식으로 대신할 수 있다.

$$\psi_i = 6\pi \cdot \eta \cdot r_i \quad (4)$$

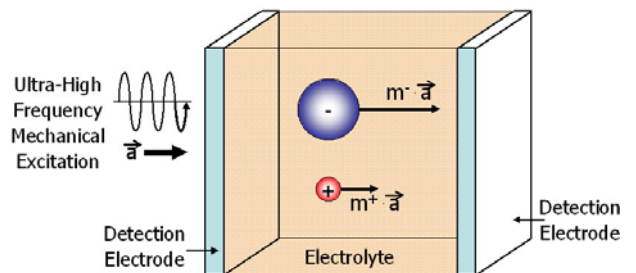
위의 식 (4)는 이온이 받는 점성력이 전해질과 이온 사이의 상대속도에 의존하는 것을 보여준다. 식 (2)는 연속방정식(conservation of charge)으로 갇힌 전해질 내에서 각 이온의 수가 보존되는 것을 나타낸다. 기계적 진동이 주기적이라고 가정하면, 식 (3)의 푸아송 방정식(poisson's equation)에 의해 이온 진동 포텐셜이 유도 된다. 그 결과는 Debye's 방정식으로 다음과 같다.<sup>(4)</sup>

$$\phi(t) = \frac{m_H}{e_0} v_0 V \frac{(z_- m_-^{op} / r_-) - (z_+ m_+^{op} / r_+)}{(z_-^2 / r_-) + (z_+^2 / r_+)} \times \frac{4\pi(\sigma / k\epsilon_0 \omega)}{\sqrt{1 + (4\pi(\sigma / k\epsilon_0 \omega))^2}} e^{j(\omega t - \kappa x - \Delta)} \quad (5)$$

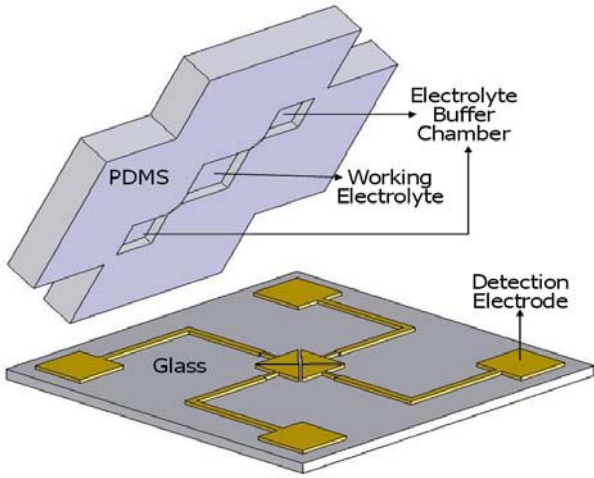
식 (5)와 같이, 주기적인 기계적 진동은 이온 사이에 변위차를 발생시키므로 이온 진동 포텐셜을 측정하여 기계적 진동을 감지 할 수 있다.

### 2.2 진동센서의 동작 원리

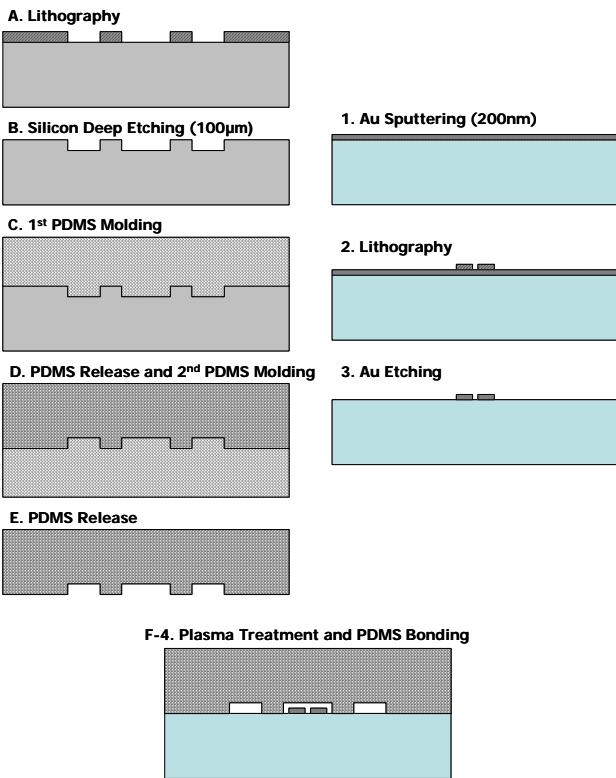
Fig. 1 은 이온의 기계적-전기적 커플링을 이용한 진동센서의 원리를 보이고 있다. 전해질에



**Fig. 1** Working principle of the vibration measurement device using anion and cation for ultra-high frequency mechanical vibration detection



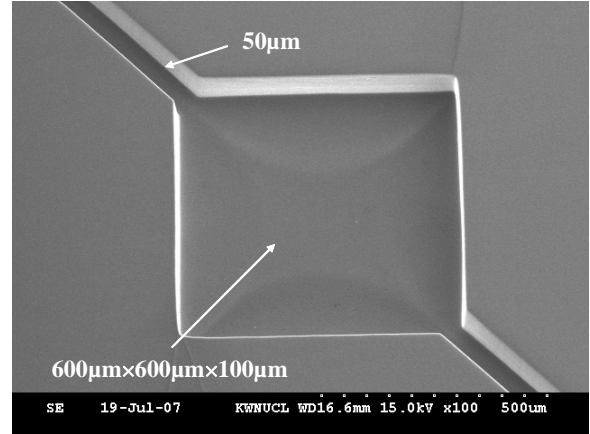
**Fig. 2** Schematic view of the ultra-high frequency vibration sensor



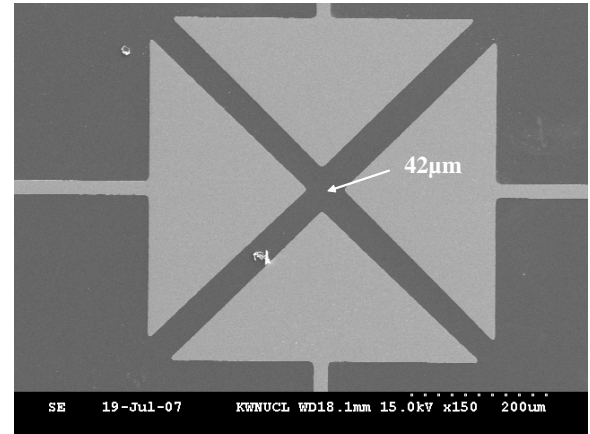
**Fig. 3** Fabrication process of the ultra-high frequency vibration sensor

기계적 진동이 가해지면, 전해질내 이온에 탄성파의 형태로 가속도가 전달 된다.<sup>(5)</sup> 탄성파가 이온에 전달되면, 양이온과 음이온 사이의 관성차에 의한 상대변위가 발생된다. 이때의 각 이온의 질량은 수화이온의 질량이다.

상대변위 차이에 의해 발생하는 포텐셜은 전해질 양단의 전극을 통해 측정이 가능하다. 진동센서는



(a)



(b)

**Fig. 4** SEM image of the fabricated vibration sensors: (a)upper electrolyte chmaber (PDMS); (b)lower gold electrode

수화이온의 질량과 반지름, 양이온과 음이온의 전위차와 같은, 포텐셜 방정식의 크기 관련 인자들을 이용하여 감도를 조절할 수 있다.

### 3. 설계 및 제조 공정

#### 3.1 센서의 설계

진동센서는 Fig. 2 에서와 같이 전해질 챔버를 가진 상판과 전극을 가진 하판으로 구성되어 있다. 상판은 메인챔버와 보조챔버로 구성되어 있고, 하판은 금-전극으로 구성되어 있다. 가로 600µm, 세로 600µm, 높이 100µm 크기를 가진 상판의 메인챔버는 전해질이 주입되어 동작되는 공간이다. 메인챔버의 양쪽에는 대칭으로 50µm 너비의 마이크로 채널이 연결되어 있다.

연결된 마이크로 채널 양쪽에는 메인챔버의 손상 없이 전해질을 주입하기 위한 보조챔버를 설계 하였다. 하판의 측정전극은 삼각형 형태의 전극으로

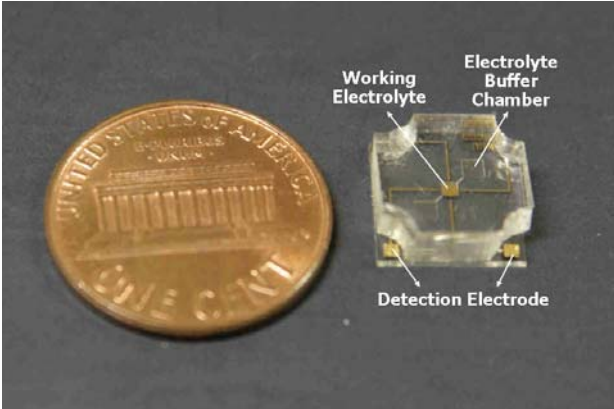


Fig. 5 Photograph of the fabricated vibration sensor with a cent

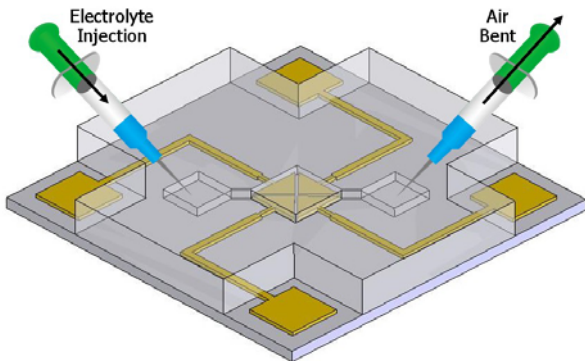


Fig. 6 Schematic view of electrolyte injection method

두 축 방향의 진동을 측정하기 위해 두 쌍으로 설계되었다. 각 전극 사이는 42 $\mu$ m 간격을 두고 떨어져 있다.

3.2 센서의 제작공정

Fig. 3 은 제안한 진동센서의 제작 공정도를 나타낸다. 먼저, 상판의 메인챔버는 실리콘 몰드를 이용하여 PDMS(polydimethylsiloxane) 몰딩에 의해 만들어 졌다. 실리콘 몰드는 실리콘 웨이퍼에 실리콘 건식 식각(silicon deep RIE) 처리에 의해 패터닝 되었고, PDMS 의 원활한 이형을 위해 실란(silane) 처리를 하였다. 상판과 하판의 부착면이 매끈한 표면을 유지되기 위해 Fig.3-C 와 같이, 실리콘 몰드를 PDMS 로 몰딩한 후 떼어낸 역상의 PDMS 형상을 다시 PDMS 로 몰딩하여, 에칭 공정에 의한 손상된 표면을 피할 수 있도록 제작하였다.

PDMS(Dow Corning Sylgard 184 silicone elastomter base) 몰딩은 10:1 의 비율로 PDMS 와 경화제를 섞어 진공챔버로 기포를 제거한 뒤 85 $^{\circ}$ C 위에서 3 시간 동안 경화시켜 수행하였다.

하판의 측정 전극은 금(gold)의 스퍼터링 (sputtering)

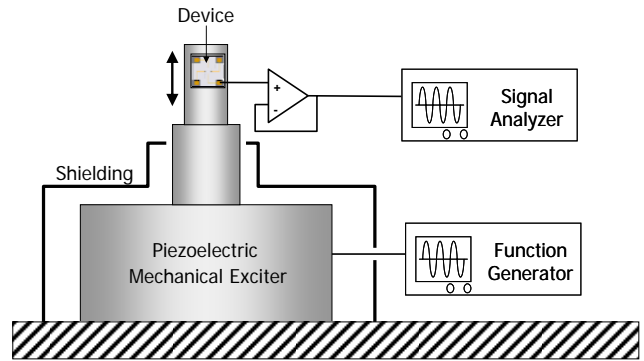


Fig. 7 Schematic diagram of the experimental apparatus

을 통하여 유리기판(Pyrex glass wafer)위에 200nm 두께로 증착 시키고, 습식 식각(wet etching) 공정에 의해 패터닝 되었다. Fig. 4(a)와 (b)는 제작된 상판의 메인챔버와 하판의 측정 전극의 SEM (scanning electron microscope)사진을 각각 나타낸다.

상판의 PDMS 전해질 챔버와 하판의 측정전극은 플라즈마 처리후, 2 시간동안 85 $^{\circ}$ C의 열을 가하여 접합된다. Fig. 5 는 접합된 진동센서를 1 센트 동전의 크기와 비교한 사진이다.

제작된 진동센서는 Fig. 6 과 같이 직경이 250  $\mu$ m(31 gauge)인 주사기 2 개를 사용하여, 보조챔버를 통해 5.8M 의 염화나트륨(NaCl) 전해질을 보조챔버와 메인챔버에 기포가 생기지 않도록 주사하여 완전히 채우게 된다. 이때, 하나의 주사기를 통해 전해질을 주입하고 반대편의 주사기를 통해 공기를 빼낸다. 주입된 전해질은 PDMS 의 탄성특성으로 인해 바늘을 제거한 후에도 누수 되지 않음을 확인 하였다.

4. 실험방법 및 실험결과

Fig. 7 은 실험장치의 구성모습을 보이고 있다. 기계적 진동을 발생시키기 위해서, 초음파 변환기(Daeyoung Elec. Co.)을 이용한 압전형 기계적 가진 장치를 사용하였다. 초음파 변환기의 입력전원은 함수 발생기에 의해 주파수가 조절된다. 입력 주파수를 1Hz 에서 4MHz 까지 변화시키며 출력전압을 측정하였다.

압전형 기계적 가진 장치의 노이즈 및 외부요인을 제거하기 위해 금속박막으로 실딩(Shielding)한 후, 장치 위에 진동센서를 부착 하였다. 진동센서의 신호는 증폭회로와 노이즈 필터회로 없이 단지 voltage follower 만을 사용하여 오실로스코프를 통해 측정하였다.

2kHz 이하의 저주파수 진동에서는 진동센서의



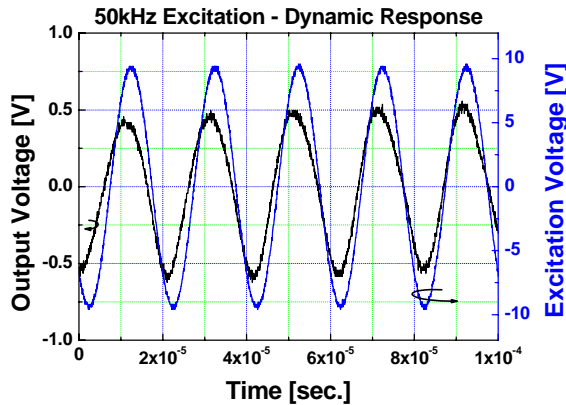


Fig. 8 Dynamic response of the vibration sensor at 50kHz mechanical vibration. (5.8M NaCl Electrolyte)

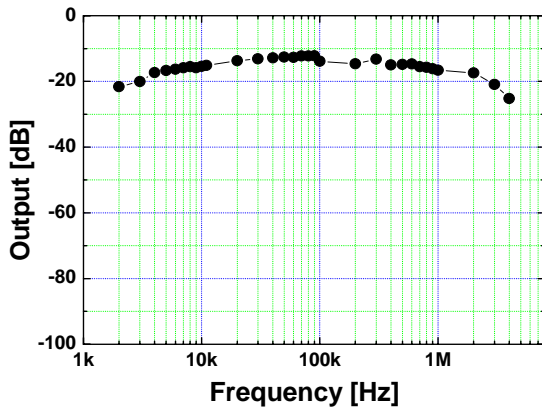


Fig. 9 Frequency response of the vibration sensor up to 4MHz mechanical vibration. (5.8M NaCl Electrolyte)

출력이 미약하여 신호를 분리할 수 없었지만, 2kHz 이상의 진동 주파수부터 출력 포텐셜을 측정할 수 있었다. 저 주파수 영역에서의 응답을 얻지 못한 것은 이온의 작은 관성차로 인하여 노이즈 레벨보다 낮은 출력을 보이는 것으로 생각된다. 추후, 포텐셜의 크기 관련 인자들의 조절을 통하여 개선해 나갈 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 8 은 50kHz 의 주파수에서 제안된 진동센서의 동적 응답을 보이고 있다. 주파수 응답은 그림에서와 같이 측정된 신호가 입력 신호의 주파수와 일치하여 나타났다. 그러나, 주파수와 비례하는 위상차가 발생되었다. 2kHz 에서 4MHz 까지 dB 단위로 변화시키며 측정된 진동센서의 주파수 응답 결과를 Fig. 9 에 나타내었다. 그림에서와 같이 1MHz 이상의

입력 대하는 동적 응답이 급격히 감소되는 것을 확인하였다.

## 5. 결 론

본 연구는 기존의 진동센서의 구조적 특징에서 오는 주파수 응답의 제한과 충격에 의한 신뢰성 문제를 해결하기 위해 전해질 속의 양이온과 음이온을 이용한 질량체가 없는 초고주파수 응답의 진동센서를 제시 하였다. 5.8M 의 염화나트륨(NaCl) 36nℓ를 이용하여 만들어진 진동 센서는 2kHz 에서 4MHz 까지의 초고주파수의 기계적 진동에 따른 포텐셜을 가지는 것을 실험을 통해 입증하였다. 제안된 초고주파수 진동센서는 고속회전기기의 진동 감지 등에 응용될 수 있을 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 2007 년도 강원대학교 학술연구조성비의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Brüel & Kjær, High frequency Piezoelectric Accelerometer, Data sheet.
- (2) Ki-Ho Han and Young-Ho Cho, 2003, "Self-Balanced Navigation-Grade Capacitive Microaccelerometers Using Branched Finger Electrodes and Their Performance for Varying Sense Voltage and Pressure," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol.12, Issue 1, pp. 11~20.
- (3) J. Carlos Santamarina and Dante O. Fratta, 2003, "Dynamic Electrical-Mechanical Energy Coupling in Electrolyte-Mineral System," *Transport In Porous Media*, 50, pp. 153~178.
- (4) Zana, R. and Yeager, E.B., 1982, "UltraSonic Vibration Potentials," *Modern Aspects of Electrochemistry*, No. 14, pp. 1~60
- (5) Debye, P., 1933, "A Method for the Determination of the Mass of Electrolytic Ions," *J. Chem. Phys.*, 1, pp. 13~17.
- (6) Marlow, B. J. and Fairhurst, D., "Colloid Vibration Potential and the Electrokinetic Characterization of Concentrated Colloids," *Langmuir* 4, (1988) pp. 611~626
- (7) Koneshan, S., Rasaiah, Jayendran C., Lynden-Bell, R. M. and Lee, S. H., "Solvent Structure, Dynamics, and Ion Mobility in Aqueous Solutions at 25°C," *J. Phys. Chem. B* 102, (1998), pp. 4193~4204.