

교류 가열법을 이용한 박막 액체 레벨 센서 개발

홍종간* · 최선락* · 김동식†

Development of thin-film liquid-level sensors using AC heating method

Jonggan Hong, Sun Rock Choi and Dongsik Kim

Key Words : Thermal sensor(열 센서), Liquid level sensor(액체 레벨 센서), 3 omega method(3 오메가 방법), AC heating method(교류 가열법)

Abstract

This work reports development of novel liquid-level sensors based on the 3ω method. The sensors determine the liquid level by measuring the thermal response as in the conventional hot-wire technique. However the sensors employ an AC heating method to enhance the sensitivity, noise resistance and time response. Also, the microfabricated thin-film structure of the sensor provides mass-producibility as well as improved sensor performance owing to the increase in the surface-volume ratio of the sensor. Two different types of the sensor are developed: one for point detection of the fluid phase and the other for monitoring continuous variation of liquid level. Notable is that the performance of the sensor is not considerably affected by the liquid flow.

기호설명

b : 박막 열선의 폭의 절반 (m)
 C : 체적열용량 ($J/m^3 \cdot K$)
 k : 복소 파수 (m^{-1})
 l : 점 측정 박막 열선의 길이 (m)
 L : 연속 측정 박막 열선의 길이 (m)
 P : 교류 가열 파워의 진폭 (W)
 t : 시간 (s)
 ΔT : 박막 열선의 온도의 진폭 (K)
 ΔV : 박막 열선의 전압 진동의 진폭 (V)
 x : 액체 레벨 (m)

(그리스 문자)

κ : 열전도율 ($W/m \cdot K$)
 λ : 적분 변수
 v : 동점도 (m^2/s)
 ω : 가열 각주파수 (s^{-1})

(첨자)

avg : 열선 전체 평균
 f : 신호 하강 구간
 g : 기체 시료
 l : 액체 시료
 r : 신호 상승 구간
 s : 기관
 u : 시료(액체 또는 기체)

1. 서론

액체 레벨의 측정은 산업적으로 널리 필요한 기술로서, 특히 연료 또는 윤활유의 양 측정이나 화학 공정 등에서 자주 사용된다. 현재까지 다양한 물리량에 기반한 레벨 센서들이 개발되어 왔으며 상용화도 많이 이루어져 왔다. 대표적인 액체 레벨 센서의 예로는 기계적 부표, 초음파 센서, 광섬유 센서, 축전기형 센서, 열선 센서 등이 있다.⁽¹⁻⁷⁾ 하지만 기존의 센서를 이용하기에는 힘든 극심한 주변 환경 때문에 레벨 측정이 힘든 경우도 있다. 예를 들어, 압축기 내의 윤활유의 레벨을 측정하려 할 때 압축기 내의 협소한 공간, 기계 진동, 윤활유의 유동으로 인해 기존의 센서들을 사용하기

† 포항공과대학교 기계공학과
E-mail : dskim87@postech.ac.kr
TEL : (054)279-2179 FAX : (054)279-5899

* 포항공과대학교 기계공학과

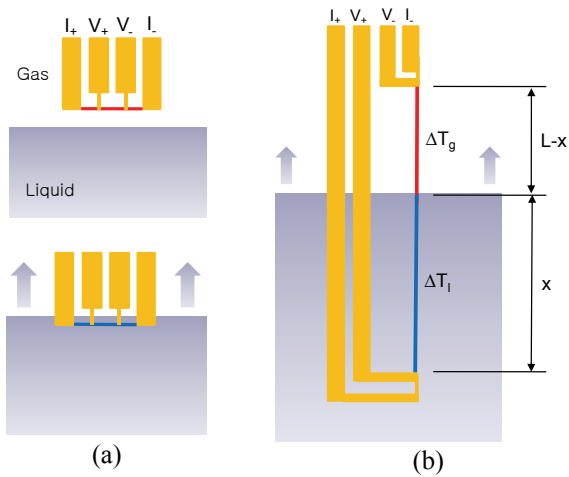


Fig. 1 Schematic diagrams of liquid-level sensors; (a) point level sensor, (b) continuous level sensor

힘들다. 따라서 이러한 측정의 어려움을 해결할 수 있는 새로운 액체 레벨 측정 기술이 필요하다.

열선 센서는 열선 주위의 유체의 열물성 변화에 따라 열전달 성능이 바뀌는 것을 감지하여 액체 레벨을 측정하는 장치이다. 기존의 열선 센서 기술은 크게 직류 가열법⁽⁶⁾과 교류 가열법⁽⁷⁾으로 나눌 수 있다. 직류 가열법은 직류 전류로 가열하고 센서의 평형 온도를 측정하는 반면에 교류 가열법은 교류 전류로 열선을 가열한 후 온도 진동의 진폭을 측정하는 방법이다. 직류 가열법은 교류 가열법에 비해 간단하지만 센서가 평형 온도에 이르는데 걸리는 시간 때문에 응답 속도가 다소 느리며 외부 온도에 의해 영향을 받는 오프셋 온도에 의한 측정 오차가 발생할 수 있다. 한편, 교류 가열법을 사용하면 센서가 준평형 온도에 이르는데 걸리는 시간이 매우 짧아 응답 속도가 빠르며 외부 온도에 의한 오프셋 온도를 제거할 수 있다.

본 연구에서는 교류 가열 기술인 3 오메가(ω) 방법을 사용한다. 3 오메가 기술은 초소형 박막 열선을 이용하여 고체 또는 액체 시료의 열물성(열전도율, 체적열용량)을 측정하는 교류 열분석법이다.^(8,9) 열침투깊이가 얇기 때문에 준평형 온도에 빠르게 도달할 수 있으며 외부 유동이나 진동의 영향을 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 lock-in 증폭기를 이용한 신호 처리 기술은 잡음이 적고 신뢰성 있는 분석을 가능하게 한다. 박막 열선 구조는 체적 대비 면적이 크고 축열체가 작기 때문에 외부 시료의 변화에 따른 민감도가 우수하며 빠른 응답 속도를 가진다. 또한 초소형화가 가능하고 MEMS 기술을 이용한 대량 생산에 유리하다.

본 연구에서는 기존의 열선 레벨 센서보다 민감

도가 우수하고 응답 속도가 빠르며 외부 유동이나 진동에 영향을 많이 받지 않는 센서를 제작하는 것을 목표로 한다. 따라서 3 오메가 방법에 기반한 점 측정 및 연속 측정 액체 레벨 센서를 제작하고 성능을 확인하는 실험을 수행하였다.

2. 이론

그림 1 은 본 연구에서 개발한 액체 레벨 센서들의 개략도이다. 그림 1 (a)는 특정 위치에서 유체의 상을 감지하는 점 측정 레벨 센서이며, 그림 1 (b)는 액체 레벨의 연속적인 변화를 측정하는 연속 측정 레벨 센서이다. 각 센서의 박막 열선은 AC 전류를 공급하고 전압 신호를 읽어들이는 역할을 수행하는 4 개의 전극으로 연결되어 있다. 박막 열선에 ω -각주파수의 전류를 가하면 2ω -각주파수를 가지는 온도와 저항 변화가 일어난다. 2ω -각주파수의 저항 변화는 ω -각주파수를 가진 전류와 곱해져 3ω -각주파수를 가지는 전압 신호로 나타난다. 이때, 박막 열선의 저항 변화는 온도의 함수이므로 3ω -각주파수를 가지는 전압 신호로부터 박막 열선의 온도 변화를 측정할 수 있게 된다. 시료와 기관의 두께가 열침투깊이보다 매우 크고 대류 열전달 효과가 무시된다고 가정하면, 박막 열선의 온도 진동의 진폭은 식 (1)-(2)와 같다.⁽⁹⁾

$$\Delta T = \frac{P}{l\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin^2(\lambda b)}{(\lambda b)^2 (\kappa_u k_u + \kappa_s k_s)} d\lambda \quad (1)$$

$$k_j = \sqrt{\lambda^2 + i \frac{2\omega C_j}{\kappa_j}} \quad (2)$$

따라서 박막 열선의 온도 진동의 진폭은 시료와 기관의 열물성, 열선의 길이와 폭, 가열 주파수에 의해서 결정됨을 알 수 있다. 그림 1 (a)의 점 측정 레벨 센서는 기관의 열물성, 열선의 길이와 폭, 가열 주파수가 고정되어 있을 때 온도 진동의 진폭이 시료의 열물성의 변화에 민감하게 반응하는 특성을 이용한 것이다. 즉, 액체와 기체의 열물성의 차이는 상당히 크므로 온도 진동의 진폭은 열선에 닿아있는 시료의 상에 따라 민감하게 변화하게 된다.

그림 1 (b)의 연속 측정 레벨 센서는 박막 열선의 길이(L)가 길기 때문에 열선 길이 방향의 연속적인 액체 레벨의 변화를 감지할 수 있다. 식 (1)-(2)에 의해서 액체에 닿아있는 열선의 온도 진동의 진폭(ΔT_l)과 기체에 닿아있는 열선의 온도 진동의 진폭(ΔT_g)이 각각 결정되면 식 (3)과 같이 액체

레벨(x)에 선형적으로 변하는 열선의 평균 온도 진동의 진폭을 구할 수 있다.

$$\Delta T_{avg} = \frac{\Delta T_l \cdot x + \Delta T_g \cdot (L - x)}{L} \quad (3)$$

ΔT_l 와 ΔT_g 를 구할 때 액체와 기체의 열물성을 알고 있다면 식 (1)-(2)를 이용하여 계산할 수 있으며, 열물성을 모를 지라도 박막 열선 전체에 액체와 기체 시료를 각각 닿아있게 한 후 실험적으로 그 값들을 얻을 수도 있다.

3. 실험

그림 2 는 제작된 점 측정 레벨 센서와 연속 측정 레벨 센서의 사진이다. Borofloat 유리기판 (Schott 33)에 30 nm 두께의 Cr 박막과 300 nm 두께의 Au 박막을 전자빔 증착기로 증착하고 리소그라피 공정으로 박막 열선 패턴을 만들었다. 점 측정 레벨 센서의 폭과 길이는 각각 20 μm , 1 mm 이며 연속 측정 레벨 센서의 폭과 길이는 각각 20 μm , 50 mm 이다. 박막 열선에 전류를 공급하고 전압 변화를 측정하는 4 개의 전극 패턴이 있다. 특히, 연속 측정 센서에는 레벨을 육안으로 관찰할 수 있도록 눈금 패턴을 만들었다.

실험 장치의 구성은 기존의 3 오메가 방법과 동일하다.⁽⁸⁾ 3ω -각주파수를 가진 전압 신호를 잡음 없이 측정할 수 있도록 lock-in 증폭기(Stanford Research Systems, Model SR810)를 사용했다. 점 측정 레벨 센서에 공급하는 교류 전류의 주파수는 박막 열선의 온도 진동의 진폭과 센서의 응답 속도를 고려하여 1 kHz ($=\omega/2\pi$)로 설정하였다. 점 측정 레벨 센서의 가열 주파수 선정에 대한 논의는 다음 장에서 더 자세히 다루도록 한다. 연속 측정 레벨 센서의 경우에는 8 ~ 5000 Hz ($=\omega/2\pi$) 구간의 5 가지 다른 가열 주파수 조건에서 센서의 응답을 확인하였다. 각 센서에 가해지는 교류 파워의 진폭은 점 측정 레벨 센서의 경우 3.4 mW 이며 연속

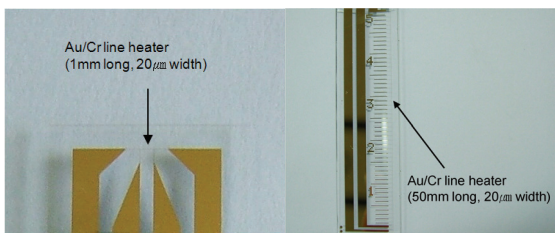


Fig. 2 Pictures of thin-film liquid-level sensors; (left) point level sensor, (right) continuous level sensor

측정 레벨 센서의 경우 42 mW 이다.

4. 결과 및 토의

그림 3 은 가열 주파수에 따른 점 측정 레벨 센서의 전압 및 온도 진동의 진폭을 측정한 것이다. 온도 진동의 진폭은 식 (1)-(2)에 의해서 시료의 체적열용량 및 열전도율이 작을수록 커지게 된다. 물, 에탄올, 공기 순으로 체적열용량 및 열전도율이 감소하므로 물, 에탄올, 공기 순으로 온도 진동의 진폭이 커지고 있음을 확인할 수 있다. 한편, 점 측정 레벨 센서에서 시료의 유동의 영향을 알아보기 위해서 자기교반기를 이용하여 에탄올과 물에 유동을 만들어 주었다. 강제 대류에 의한 열 전달의 향상으로 온도 진동의 진폭이 많이 감소할 것으로 예상하였으나 가열 주파수 12 ~ 5000 Hz ($=\omega/2\pi$) 영역에서 유동의 영향이 거의 없음을 확인할 수 있다. 아주 짧은 열침투깊이(대략 수 ~ 수십 μm)로 인해 대류열전달 효과가 거의 무시할 수 있을 정도로 작아진 것으로 생각된다. 따라서 교류 가열법을 이용한 점 측정 레벨 센서는 진동이 심하고 시료의 유동이 존재하는 조건에서도 충분히 이용될 수 있음을 확인하였다. 점 측정 레벨 센서 구동을 위한 가열 주파수는 온도 진동의 진폭과 센서의 응답 속도를 고려하여 선정하였다. Lock-in 증폭기는 기준 신호와 동일한 주파수 신호만을 필터링하여 측정할 수 있는 장치로서 기준 신호의 주파수가 낮으면 낮을수록 응답 속도가 느리다. 한편 높은 주파수에서는 온도 진동의 진폭이 작아져 센서의 신호 크기가 작아지는 단점이 있다. 따라서 빠른 응답 속도와 비교적 신뢰할 만한 센서의 신호 크기를 얻을 수 있는 1 kHz ($=\omega/2\pi$)를 가열 주파수로 선정하였다. 또한 1 kHz로 가열시 온도 진동의 최대 진폭이 1 K 를 넘지

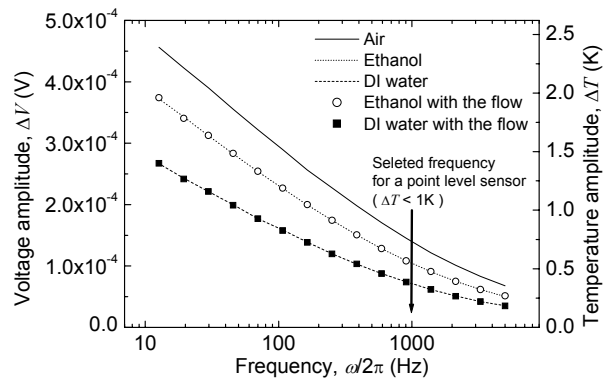


Fig. 3 Voltage and temperature responses of a point level sensor at various heating frequencies

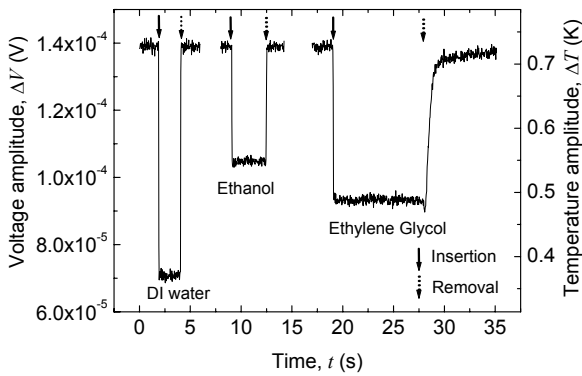


Fig. 4 Temporal variation of voltage and temperature responses in point level measurements of various liquids

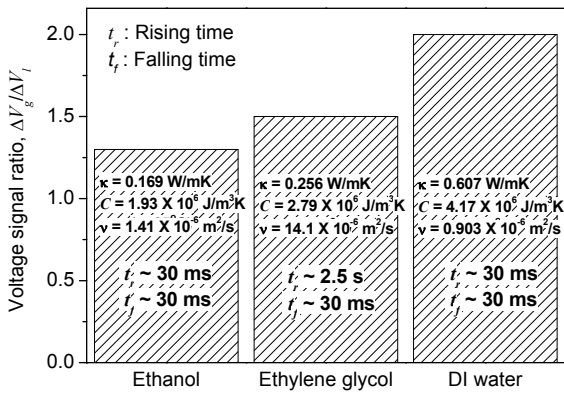


Fig. 5 The characteristics of the voltage output in point level measurements of various liquids

않아 시료의 온도 변화에 의한 열물성 변화를 최소화할 수도 있었다.

그림 4 는 물, 에탄올, 에틸렌 글리콜에 대하여 점 측정 레벨 센서의 시간에 따른 전압 및 온도 진동의 진폭 변화를 나타낸다. 그림 1 (a)와 같이 센서의 박막 열선이 액체 시료에 들어갔다 나오는 동안의 센서 신호를 관찰한 것이다. 체적열용량 및 열전도율이 상대적으로 작은 공기에 놓여 있던 박막 열선이 액체 시료에 들어가면 열전달이 향상되어 박막 열선의 온도 진동의 진폭이 급격하게 떨어지게 된다. 액체 시료 밖으로 박막 열선이 나오면 열전달이 다시 나빠져 박막 열선의 온도 진동의 진폭이 커지게 된다. 그림 5 는 그림 4 의 결과를 바탕으로 각 시료에 대한 센서의 응답 특성을 각 시료의 물성과 함께 도시한 것이다. 액체 시료의 체적열용량 및 열전도율이 공기보다 크면 클수록 전압 신호의 비($\Delta V_g/\Delta V_l$)가 커지기 때문에 레벨 측정의 민감도가 좋아진다고 볼 수 있다. 측정 시료들 중 체적열용량 및 열전도율이 가장 큰 물의 경우 신호의 비가 2 정도로 가장 크다. 물과 에탄올의 레벨이 변화할 때 센서의 응답 시간은

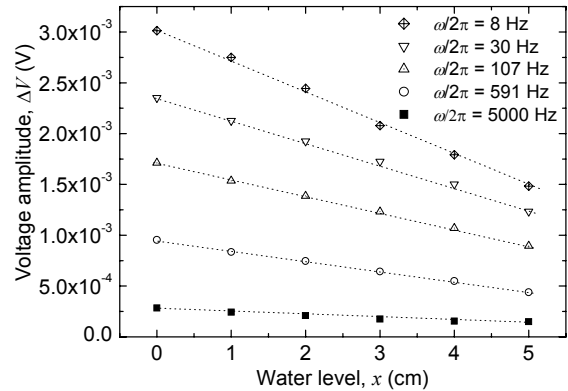


Fig. 6 Continuous water level measurements at various heating frequencies

데이터 수집 간격(~ 30 ms)보다 짧았다. 기존의 직류 가열을 이용한 센서의 경우 평형 온도에 도달하는 시간이 오래 걸리므로 센서의 응답 시간이 수 초에서 수 분까지 걸리기도 한다.⁽⁶⁻⁷⁾ 에틸렌 글리콜에 센서가 들어갈 때는 여전히 빠른 응답 속도를 보이지만 다시 나올 때는 센서에 묻은 시료가 흘러내리는 시간이 다소 걸려 대략 2.5 초 정도의 응답 시간을 보였다. 에틸렌 글리콜의 점성이 물과 에탄올보다 대략 10 배 이상이어서 센서에 묻은 시료가 빠르게 제거되지 못 했기 때문이다.

그림 5 는 연속 측정 레벨 센서를 이용하여 50 mm 범위의 물의 레벨 변화를 연속적으로 측정할 결과를 보여준다. 8 ~ 5000 Hz ($=\omega/2\pi$) 사이의 5 가지 가열 주파수에 대해서 실험을 수행하였으며 수위를 10 mm 씩 상승시키면서 레벨 센서의 전압 진동의 진폭을 측정하였다. 가열 주파수에 상관없이 식 (3)과 같이 물의 레벨 변화에 선형적으로 비례하는 전압 신호가 관찰되었다. 가열 주파수가 낮을수록 전압 진동의 진폭의 크기가 커져서 레벨의 변화에 대한 신호의 민감도가 증가한다고 볼 수 있지만, 앞서 언급하였듯이 lock-in 증폭기의 응답속도가 느려지는 단점이 있다. 따라서 연속 레벨 측정시 구동 조건에 따라 적절한 응답 속도와 민감도를 가질 수 있도록 가열 주파수를 설정하여 사용할 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 교류 가열법(3 오메가 방법)을 이용한 점 측정 및 연속 측정 박막 액체 레벨 센서를 개발하고 성능을 확인하는 실험을 수행하였다.

특정 위치에서 유체의 상을 감지하는 점 측정

레벨 센서를 이용하여 물, 에탄올, 에틸렌 글리콜에 대한 레벨 측정 실험을 수행하였다. 기체와 액체의 열물성 차이가 클수록 센서의 민감도는 좋아지며 레벨 변화에 따른 응답 속도는 30 ms 이하로 매우 빠르다. 하지만 액체 시료의 점성이 증가하면 센서에 묻은 시료가 흘러내리는 시간이 다소 걸려 응답 속도가 느려지는 특성이 관찰되었다. 특히, 자기 교반기에 의한 인위적인 유동 조건 속에서 측정한 점 측정 레벨 센서의 신호 결과를 통하여 유동의 영향이 센서 신호에 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 교류 가열법에 의한 짧은 열침투깊이로 인해 대류열전달 효과가 아주 작아졌기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서 개발한 점 측정 레벨 센서는 진동과 유동이 심한 산업용 압축기 내의 윤활유 레벨 측정 등과 같은 응용에 큰 잠재력을 가지고 있다.

액체 레벨의 연속적인 변화를 측정하는 연속 측정 레벨 센서를 이용하여 50 mm 범위의 물의 레벨 변화를 연속적으로 측정해 보았다. 8 ~ 5000 Hz ($=\omega/2\pi$) 사이의 5 가지 가열 주파수에 대해서 실험을 수행한 결과 물의 레벨 변화에 따라서 선형적으로 비례하는 전압 신호를 성공적으로 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 마이크로 열 시스템 연구 센터(ERC) 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- (1) Sakharov, V. E., Kuznetsov, S. A., Zaitsev, B. D., Kuznetsova, I. E. and Joshi, S. G., 2003, "Liquid Level Sensor Using Ultrasonic Lamb Waves," *Ultrasonics*, Vol. 41, pp. 319-322.
- (2) Golnabi, H. and Jafari, R., 2006, "Design and Performance of an Optical Fiber Sensor Based on Light Leakage," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 77, pp. 066103.
- (3) Chandani, S. M. and Jaeger, N. A. F., 2007, "Optical Fiber-based Liquid Level Sensor," *Opt. Eng.*, Vol. 46, pp. 114401.
- (4) Woodard, S. E. and Taylor, B. D., 2007, "A Wireless Fluid-level Measurement Technique," *Sens. Actuators. A phys.*, Vol. 137, pp. 268-278.
- (5) Cruz, F. and Bressan, O. J., 1969, "Sensitive Hot Wire Level Detector for Cryogenic Liquids," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 40, pp. 483-486.
- (6) Cantor, H. P. and Williams, O. M., 1976, "A Hot Wire Sensor for Liquid Level Detection," *J. Phys. E.*, Vol. 9, pp. 1136-1139.
- (7) Beaubatie, J. et al., 1986, "Thermal System for Measuring Liquid Levels," *US patent #4590797*.
- (8) Choi, S. R., Kim, J., and Kim, D., 2007, "3 ω Method to Measure Thermal Properties of Electrically Conducting Small-volume Liquid," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 78, pp. 084902.
- (9) Cahill, D. G., 1990, "Thermal Conductivity Measurement from 30 to 750 K: the 3 ω Method," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 61, pp. 802-808.