

## 교류방식 유속 측정법 개발

정원석\* · 권오명† · 최두선\*\* · 박승호\*\*\* · 최영기\*\*\*\* · 이준식\*  
(2003년 9월 4일 접수, 2003년 11월 29일 심사완료)

### Development of AC Thermal Anemometry

Won Seok Chung, Ohmyoung Kwon, Du Seon Choi, Seungho Park,  
Young Ki Choi and Joon Sik Lee

**Key Words :** Phase Lag(위상 뒤짐), Alternating Current(교류), Hotwire(열선)

#### Abstract

This paper suggests and demonstrates a novel flow measurement technique: tunable AC thermal anemometry that allows simple integration, robust measurement, and extremely high accuracy. The principle and simple theoretical analysis of the technique are presented. To find the optimal condition at which the phase lag becomes most sensitive to flow speed change, the phase lag was measured scanning the heating frequency from 1 to 100 Hz, while the flow speed of ethanol was increased stepwise from 0 to 40 mm/s. The sensitivity of phase lag depended on the heating frequency and the flow speed. It was possible to measure the flow speed of 0.7 mm/s with the resolution of 0.1 mm/s at 4 Hz.

#### 기호설명

$C$	: 적분상수
$c_p$	: 비열 [J/kg·K]
$h$	: 대류열전달계수 [ $W/m^2 \cdot K$ ]
$I$	: 전류 [A]
$k$	: 열전도계수 [ $W/m \cdot K$ ]
$l$	: 열선의 길이 [mm]
Nu	: Nusselt 수
$\dot{q}$	: 단위부피당 열량 [ $W/m^3$ ]
$R$	: 저항 [ $\Omega$ ]
Re	: Reynolds 수
$r$	: 열선의 반지름 [ $\mu m$ ]
$T$	: 온도 [K]
$t$	: 시간 [s]

$u$	: 유속 [mm/s]
$V$	: 전압 [V]

#### 그리스문자

$\alpha$	: 열선의 저항온도계수 [ $K^{-1}$ ]
$\phi$	: 위상 뒤짐 [ $^\circ$ ]
$\gamma$	: 열선의 비저항 [ $\Omega \cdot m$ ]
$\Delta$	: 두 값의 차
$\theta$	: 온도차 [K]
$\mu$	: 점성계수 [kg/s·m]
$\rho$	: 밀도 [ $kg/m^3$ ]
$\omega$	: 교류 전원의 주파수 [rad/s]

#### 상첨자

\* : 무차원화 한 값

#### 하첨자

AC	: 교류성분
av	: 평균
b	: 상온상태
c	: 특성값
f	: 유체
h	: 열선

† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과  
E-mail : omkwon@korea.ac.kr  
TEL : (02)3290-3371 FAX : (02)926-9290

\* 회원, 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 회원, 한국기계연구원

\*\*\* 회원, 홍익대학교 기계시스템디자인공학과

\*\*\*\* 회원, 중앙대학교 기계공학부

- $min$  : 최소
- $S$  : 부가저항
- $0$  : 교류 성분의 진폭

1. 서론

마이크로 시스템에서의 정확한 유속 측정은 화학 성분 분석 과정, 의약품 투약, 반도체 제조 공정 등의 다양한 분야에서 매우 중요한 비중을 차지하고 있다. 마이크로 유속센서는 매우 제한된 공간에 위치시켜야 하고, 센서의 제작 과정이 마이크로 시스템의 제작 공정에 쉽게 통합될 수 있어야 하므로 그 구조가 매우 간단해야 한다. 동시에 측정 정밀도는 지극히 높아야 하는데, 이것은 마이크로 채널 내부의 유동 속도가 매크로 스케일의 유동에 비해서 매우 느리기 때문이다. 최근 20 여 년 동안 마이크로 가공 기술을 이용하여, 다양한 마이크로 유속센서들이 개발되어 왔지만, 위의 조건을 모두 만족시키는 센서를 찾기는 힘들다. 본 연구에서는 마이크로 시스템에 효과적으로 적용될 수 있도록 간단한 구조로 구현될 수 있으면서도 측정 범위와 정밀도는 보다 향상된 새로운 유속 측정법을 제안하고 이를 열선을 사용하여 실험적으로 증명하였다.

유속 측정 센서들은 작동 원리에 따라 크게 기계적 유동센서(mechanical flow sensor, non-thermal flow sensor)와 열적 유동센서(thermal flow sensor)로 나눌 수 있다.<sup>(1)</sup> 기계적 유동센서는 유동에 의해 발생하는 압력 강하<sup>(2)</sup>나 항력(drag force), 전향력(Coriolis force) 등을 유속 측정에 이용하는 것으로서, 에너지 소모가 적고 유체가 가열되지 않는 장점이 있으나, 구조가 복잡하여 마이크로 밸브나 펌프 등과 함께 전체 시스템에 통합시키기 어려운 단점이 있다. 이에 반해 열적 유동센서는 구조가 단순하고 전기적으로 간단하기 때문에 마이크로 시스템을 구성하는 경우, 기계적 유동센서보다 선호된다.

열적 유동센서들은 발열체와 유체 사이에서 일어나는 열전달 과정을 이용하여 유속을 측정하게 되는데, 현재까지 연구 개발된 센서들은, 가열된 센서에 공급되는 열량의 변화나 저항의 변화를 측정하는 열선/박막 방식(hotwire/film type),<sup>(3-7)</sup> 열원 주위 온도의 비대칭성을 측정하는 열량측정 방식(calorimetric type),<sup>(8,9)</sup> 열 맥동(heat pulse)이 일정 거리를 지나가는 데 걸리는 시간을 측정하는 이동시간측정 방식(time-of-flight type)<sup>(10)</sup> 등으로 크게 나눌 수 있다. 이러한 열적 유동센서들은, 앞에서 언급한대로 구조가 간단하다는 장점 이의

에도, 열선/박막 방식의 경우엔 센서의 반응속도가 빠르고 감도가 좋으며, 히터와 센서가 동일하다는 장점이 있고, 열량측정 방식은 히터의 상·하류에 센서가 위치해 있기 때문에 유동의 방향을 알 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 측정 정확도를 높이기 위해서는 열원의 온도를 높여야 하므로 센서 주위의 유체가 가열되는 문제가 있고, 센서가 주위 유체 온도의 변화에 민감하기 때문에 유체의 온도를 정확히 제어하거나 온도 변화를 보상해 주어야 한다는 단점이 있다. 또한 측정 방식에 따라서 측정 범위에 제한이 생기거나(열량측정 방식), 열확산이 일어나서 저속의 유동 측정에는 부적합해지는(이동시간측정 방식) 문제가 생기기도 한다.

이러한 문제들을 해결하기 위해, 센서에 맥동의 형태로 직류 전압을 공급하여 열적 표류 현상(thermal drift)를 최소화하려 하려는 연구와,<sup>(5,6)</sup> 측정회로에 보정 저항(compensation resistor)을 삽입하여 주위 유체 온도의 영향을 보정하려는 연구가 수행되었고,<sup>(7)</sup> 센서 밑 부분에 박막층을 더하거나,<sup>(8)</sup> 유속의 범위에 따라 두 가지의 측정 방식을 따로 적용함으로써<sup>(11,12)</sup> 제한된 유속 측정 범위를 확장시키기 위한 노력들도 이루어졌다. 이러한 연구들의 결과로 기존 센서들의 단점을 어느 정도 보완할 수는 있었지만, 센서나 측정 회로의 구조가 복잡해지는 것을 피할 수는 없었다.

본 연구에서는 기존의 열적 유동센서에서 생기는 문제점들을 근본적으로 해결하기 위해, 교류방식 유속 측정법을 새롭게 고안하였다. Figure 1은 본 연구에서 개발한 측정법의 기본 원리를 나타낸 그림이다. 속도를 측정하고자 하는 유동 속에 열선을 위치시키고 주기적으로 열을 발생시키면 열선의 온도는 열량의 주기적인 변화에 대해서 어느 정도 위상 뒤짐을 가지고 주기적으로 변

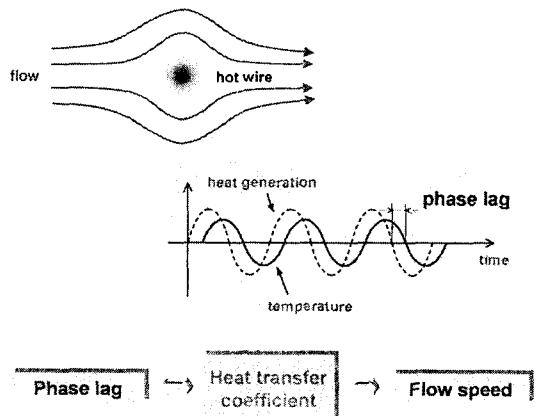


Fig. 1 Principle of AC thermal anemometry

하게 된다. 이 위상 뒤짐은 열선의 대류열전달계수와 관련이 있고, 대류열전달계수는 유체의 속도와 밀접한 관계를 가지고 있으므로, 열선 온도의 위상 뒤짐을 측정하게 되면 유체의 속도를 알아낼 수 있게 된다.

열원에 주기적으로 열을 발생시키는 측정 방식은 기존 연구에서도 찾아볼 수 있는데, Bedö 등<sup>(9)</sup>은 교류 전원을 이용하여 열원을 가열하고 열원의 상·하류 양쪽에 있는 센서에서 신호를 측정함으로써 유속을 측정하였다. 이 방법은 유속 변화에 대한 센서의 반응도가 향상되고, 주위 유체 온도의 변화에 영향을 덜 받게 되는 장점을 가지지만, 센서와 열원이 분리되어 있기 때문에 열파(heat wave)가 유동을 통해 열원에서부터 센서까지 전파되는 동안 열확산 현상과 열파의 감쇠 현상이 일어나므로 센서를 매우 높은 온도로 가열해야 하는 단점이 있다.

이에 비해, 본 연구에서 제안한 교류방식 열선 유속 측정법은 다음과 같은 장점들을 가지고 있다. 첫 번째로, 가열 주파수에서의 위상 뒤짐을 측정하기 때문에 주변에서 발생하는 모든 다른 주파수의 노이즈는 능동적으로 제거된다. 따라서, 유체의 물성치에 큰 영향을 미칠 정도로 주위의 온도변화가 매우 심해서 열유동장의 특성 자체가 변하지 않는 한, 센서가 주변 온도의 변화에 거의 영향을 받지 않는다. 두 번째로, 주파수 공간에서의 유속을 측정하기 때문에 측정 정밀도가 열 발생량에 의존하지 않는다. 위상 측정에 필요한 신호를 발생시킬 수 있는 최소한의 열량으로도 유속을 측정할 수 있으므로, 센서를 작동시키는 데 필요한 에너지 소모가 적고 유체의 가열량이 최소화 될 수 있다. 세 번째는 디지털 신호 처리 기술의 발달로 위상을 매우 정밀하게 잴 수 있기 때문에, 매우 느린 유동의 속도까지 높은 정밀도로 정확하게 측정할 수 있다. 또한 공급해주는 교류 전원의 주파수를 변화시킴에 따라, 넓은 범위에 걸쳐서 쉽게 유속 측정이 가능하며, 구조가 간단하기 때문에 미소 유체 시스템에 적용시키기도 용이하다. 이와 같은 장점으로 인해, 교류방식 유속 측정법은 온도 변화가 있는 유동장의 유속 측정이나 마이크로 시스템에서의 유속 또는 유량의 정밀 측정에 적합하다.

## 2. 1 차 시스템(First order system) 해석

교류방식 유속 측정법의 원리를 이해하기 위해 서 열선에서 발생하는 현상을 1 차 시스템(first order system)으로 가정하여 간단한 해석을 시도하

였다. 일반적으로 열 시스템을 1 차 시스템으로 가정하고 해석하면 상당히 정확한 결과를 얻을 수 있다는 것은 잘 알려진 사실이다. 그러나 본 현상은 주파수가 상대적으로 높은 주기적인 열 현상이므로 그 거동이 정확히 1 차 시스템의 거동을 따르지는 않는다. 하지만 여기서는 간단한 1 차 시스템 이론 해석을 통해 본 방법의 물리적 원리를 설명하였다. 본 해석결과와 측정결과를 비교하여 정상상태 열전달 현상과 주기적 열전달 현상의 차이를 분석한다.

$\omega$ 의 주파수를 가지는 교류 전원에 열선 및 부가 저항을 연결한 회로를 단순화한 그림을 Fig. 2에 나타내었다. 열선의 저항  $R_h$ 가 부가 저항  $R_s$ 보다 훨씬 작은 경우, 열선의 온도 변화에 의한 저항의 변화가 회로에 흐르는 전류에 미치는 영향이 작으므로 전류가 일정하다고 가정하면 아래와 같은 식이 성립한다.

$$I = \frac{V_0}{R_s + R_h} \sin \omega t \approx I_0 \sin \omega t \quad (R_s \gg R_h) \quad (1)$$

따라서 열선의 자체 저항에 의해 발생하는 단위 부피 당 열량을 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$\dot{q} = \frac{I_0^2 \gamma}{2\pi^2 r^4} \left[ 1 + \sin \left( 2\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (2)$$

여기서  $r$ 은 열선의 반지름,  $\gamma$ 는 열선의 비저항이다. 식 (2)로부터 열 발생량은  $2\omega$ 의 주파수를 가지고 진동하고 있음을 알 수 있다.

유동 속에 놓여있는 열선의 온도를 해석할 때, 열선의 반지름이 매우 작으므로 열선의 온도가 전체적으로 균일하게 변한다고 가정하면 아래와 같은 에너지 평형식이 성립한다.

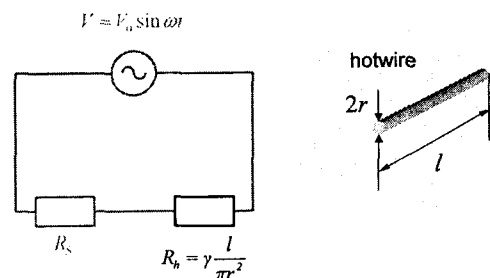


Fig. 2 Schematic of circuitry for AC thermal anemometry

Table 1 The results of steady periodic electro-thermal analysis

	Frequency	Amplitude	Phase lag
Source voltage	$\omega$	$V_0$	0
Current	$\omega$	$\frac{V_0}{R_s + R_h} \equiv I_0$	0
Heat generation per unit volume	$2\omega$	$\frac{I_0^2 \gamma}{2\pi^2 r^4} \equiv \dot{q}_0$	$-\frac{\pi}{2}$
Temperature (AC component)	$2\omega$	$\frac{r\dot{q}_0}{2\sqrt{h^2 + (\rho c_p r \omega)^2}} \equiv \theta_{AC,0}$	$\phi - \frac{\pi}{2}$
$3\omega$ voltage	$3\omega$	$\frac{I_0^3 \alpha \gamma_b \gamma l}{8\pi^3 r^5 \sqrt{h^2 + (\rho c_p r \omega)^2}} = \left(\frac{I_0 R_{h,b} \alpha}{2}\right) \theta_{AC,0}$	$\phi - \pi$

$$\rho c_p \pi r^2 \frac{\partial \theta}{\partial t} = \pi r^2 \dot{q} - h 2\pi r \theta \quad (3)$$

여기서  $\rho$  는 열선의 밀도,  $c_p$  는 열선의 비열,  $h$  는 대류열전달계수이며,  $\theta$  는 열선의 온도와 주위 유체 온도 사이의 차이( $T_h - T_f$ )이다. 식 (3)의 해는 다음과 같다.

$$\theta = C e^{-\frac{2h}{\rho c_p r} t} + \frac{\dot{q}_0 r}{2h} + \frac{r\dot{q}_0}{2\sqrt{h^2 + (\rho c_p r \omega)^2}} \sin\left(2\omega t - \frac{\pi}{2} + \phi\right) \quad (4)$$

여기서  $C$  는 적분 상수이며, 열선이 가열되기 전의 초기 온도 조건에서 구해진다. 식 (4)에서 우변의 첫 번째 항은 시간이 지남에 따라 사라지는 감쇠 성분, 두 번째 항은 시간의 변화에 무관하게 일정한 값을 가지는 직류 성분, 세 번째 항은 시간에 따라 진동하는 교류 성분을 나타낸다. 교류 성분 온도에 포함된  $\phi$  는 열선에서 발생하는 열량과 열선의 온도 사이에 생기는 위상 뒤짐이며 아래와 같다.

$$\tan \phi = -\frac{\rho c_p r \omega}{h} \quad (5)$$

위상 뒤짐은 교류 전원의 주파수와 열선에서의 대류열전달계수의 함수임을 알 수 있다.

주파수가 일정할 경우, 센서의 측정 감도

(sensitivity)는 아래의 식 (6)과 같이, 주파수를 일정하게 하고 위상 뒤짐을 속도로 미분한 것으로 정의할 수 있다.

$$(sensitivity) \equiv \left(\frac{\partial \phi}{\partial u}\right)_\omega \quad (6)$$

식 (5)와 (6)을 이용하면, 위상 뒤짐과 속도의 관계를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \phi}{\partial u}\right)_\omega &= \left(\frac{\partial \phi}{\partial h}\right)_\omega \left(\frac{\partial h}{\partial u}\right)_\omega \\ &= -\left(\frac{\rho_f r}{\mu_f}\right) \left(\frac{1}{Nu}\right) \left(\frac{\partial Nu}{\partial Re}\right) \sin 2\phi \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $\rho_f$  는 유체의 밀도,  $\mu_f$  는 유체의 점성계수이며,  $Re$  는 Reynolds 수,  $Nu$  는 Nusselt 수이다. 식 (7)로부터, 주어진 주파수에서는 위상 뒤짐이  $-\pi/4$  가 되는 속도일 때 측정 감도가 최대가 됨을 알 수 있다.

### 3. 신호 측정 방법 및 실험 장치

위상 뒤짐을 측정하여 유동의 속도를 측정할 수 있음을 알았다. 일반적으로 도체의 전기저항은 온도의 함수이므로, 열선의 온도 변화에 따라 열선의 저항도 온도와 같은 주파수와 위상 뒤짐을 가지고 변하게 된다. 이 때,  $\omega$  의 주파수로 열선에 공급되는 전류와  $2\omega$  의 주파수로 변하는 열선의 저항에 의해, 열선에는  $3\omega$  의 주파수로 진

동하는 교류 전압이 발생하게 되고 그 값은 아래와 같이 유도된다.

$$V_{3\omega} = \frac{I_0 R_{hb} \alpha \theta_{AC,0}}{2} \sin(3\omega t - \pi + \phi) \quad (8)$$

결국 열선에서  $3\omega$ 의 주파수를 가지는 전압을 측정하여, 그 위상 뒤짐으로부터 유동의 속도를 알아낼 수 있다. 한편 전류의 진폭  $I_0$ , 상온에서의 열선 저항  $R_{hb}$  및 열선의 온도 저항 계수  $\alpha$ 를 구하면 식 (8)로부터 열선의 교류 성분 온도의 진폭  $\theta_{AC,0}$ 도  $3\omega$  주파수의 전압으로부터 구할 수 있다.

주기적 정상상태 전열 해석(steady periodic electro-thermal analysis)을 통해서  $\omega$ 의 주파수를 가지는 교류 전압이 가해진 경우에 전류, 열발생, 온도 및  $3\omega$  주파수 전압의 주파수, 진폭 및 위상 뒤짐을 구하였으며 이를 Table 1에 정리하였다.

실험 장치의 개략도가 Figure 3의 왼쪽 부분에 나타나 있다. 유속 측정 센서인 열선으로는 길이 1 mm, 지름  $5 \mu\text{m}$ 의 텅스텐 와이어를 사용하였으며 그림에서의 확대된 부분과 같이 내경 4 mm인 우레탄 튜브의 중심에 열선을 삽입하였다. 에탄올의 유량은 미터링 밸브를 이용하여 압축 공기의 유량을 변화시킴으로써 조절하였다. 유동이 안정화되면, 일정 시간 동안 에탄올을 용기에 받아 전자저울로 질량을 측정하여 튜브에서의 평균 유속을 계산하였다.

Lock-in amplifier (LIA), 차동 증폭기(differential amplifier) 및 가변저항(potentiometer) 등으로 이루어진 신호 측정 회로가 Fig. 3의 오른쪽 부분에 나타나 있다. 회로의 구성은 부도체의 열전도도를 측정하는 데 널리 사용되는  $3\omega$  법<sup>(13)</sup>을 참고하였다. LIA를 사용하여 열선에서 발생하는  $3\omega$

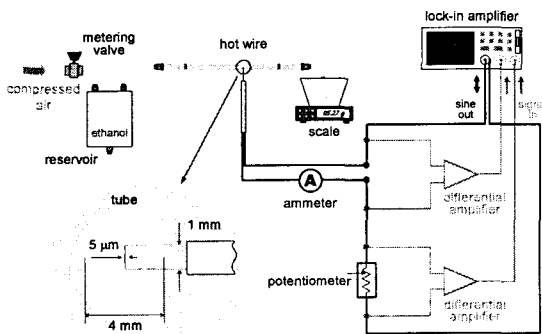


Fig. 3 Schematic of experimental setup and circuitry for data acquisition

전압의 진폭과 위상 뒤짐을 측정하였으며 전류계에서 회로에 흐르는 전류를 측정하여 열선의 교류 성분 온도 진폭을 계산하는 데 이용하였다.

#### 4. 실험 결과 및 분석

Figure 4는 일정한 유속으로 에탄올을 흐르게 하면서 측정한 온도의 위상 뒤짐 값을 시간의 함수로 나타낸 그림이다. 정지해 있던 에탄올이 흐르기 시작하면 위상 뒤짐 값이 점차 커지게 되고, 유동이 안정화되면서 유속에 따라 일정한 위상 뒤짐 값을 가지게 된다. Figure 4로부터 평균 유속이 빨라짐에 따라 위상 뒤짐 값이 커지는 것을 알 수 있으며 그에 따라 위상 뒤짐을 이용한 유속 측정이 가능하다는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 평균 유속과 위상 뒤짐은 선형적으로 비례하지 않는다. 평균 유속이 0.0 mm/s에서 3.9 mm/s로 증가했을 때 위상 뒤짐 값이 1.3° 증가했지만, 3.9 mm/s에서 8.3 mm/s로 4.4 mm/s 증가했을 때 위상 뒤짐 값은 4° 정도 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 유속 측정 정밀도가 유속에 따라서 달라짐을 의미한다.

유속 측정 정밀도가 가장 높아지는 조건을 찾기 위한 실험을 수행하여 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 유속은 일정하게 유지한 상태에서 교류 전원의 주파수를 1 ~ 100 Hz로 증가시키면서 온도의 위상 뒤짐 값과  $3\omega$  주파수의 전압의 진폭을 측정하였다. 이때 에탄올의 평균 유속은 0.0 ~ 50.0 mm/s의 범위 내에서 변화시켰다. 또한, 열

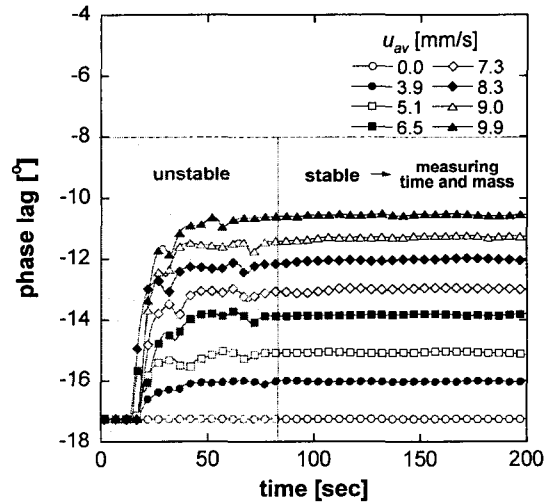


Fig. 4 Measured phase lag variation for  $\omega = 10$  Hz,  $\theta_{AC,0} = 3 \text{ }^\circ\text{C}$  at  $u_{av} = 0.0$  mm/s

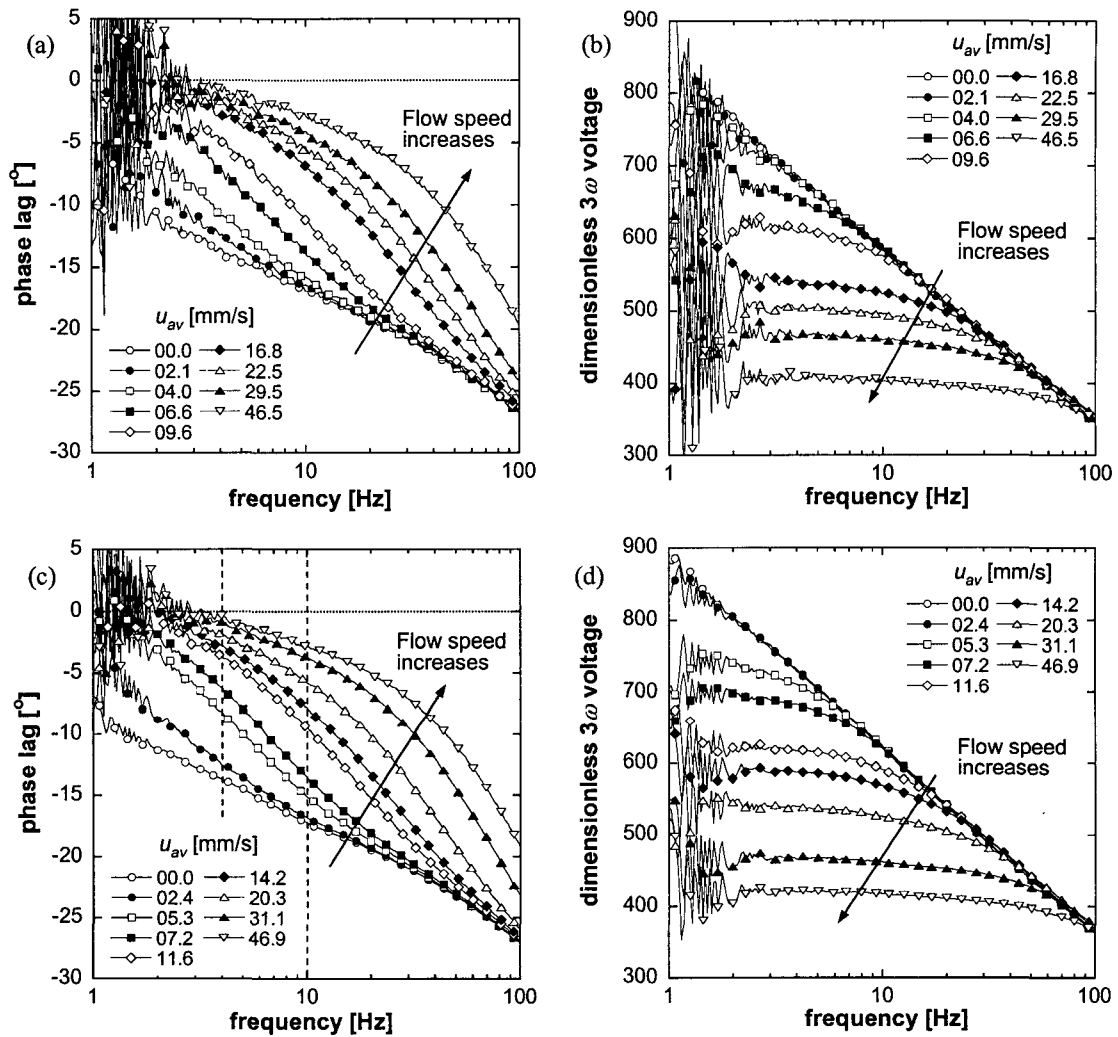


Fig. 5 Measured phase lag and dimensionless  $3\omega$  voltage versus frequency for various average velocities: (a) and (b) for  $\theta_{AC,0} = 0.6 \sim 1.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ; (c) and (d) for  $\theta_{AC,0} = 2.0 \sim 4.0 \text{ }^\circ\text{C}$

선의 온도가 유속 측정에 미치는 영향을 알아보기 위해, 유동이 없을 때의 열선 교류 성분 온도 진폭을 두 가지 범위(0.6 ~ 1.3 °C, 2.0 ~ 4.0 °C)로 바꾸어 실험을 수행하였다. 온도 조건이 범위로 주어지는 이유는, 열 발생 양이 동일하더라도 온도 진폭이 주파수에 따라 변하기 때문이다.

Figure 5(a)와 (c)를 비교해보면, 열선의 온도 조건이 변해도, 같은 주파수, 같은 유속 조건에서는 온도의 위상 뒤짐 값이 거의 같은 것을 볼 수 있다. 서론에서 설명한 바와 같이 본 측정 방법이 주파수 공간에서의 위상 뒤짐을 측정하는 것이기 때문이다. 또한, Bedö 등<sup>(9)</sup>의 경우 물의 유속을 측정할 때 히터의 교류 온도 성분 진폭이 25 °C 이었던 것과 비교하면 본 측정 방법의 가열 정도

가 매우 적은 것도 알 수 있다.

Figure 5(b)와 (d)는 측정된  $3\omega$  전압의 진폭을 아래의 식 (9)를 이용하여 무차원화 한 값으로 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned}
 V_{3\omega,0}^* &= \frac{V_{3\omega,0}}{V_c} = \frac{V_{3\omega,0}}{I_0 R_c} = \frac{V_{3\omega,0}}{I_0 R_{h,b} \alpha T_c} \\
 &= \frac{V_{3\omega,0}}{I_0 R_{h,b} \alpha \cdot \frac{q_0}{k/r^2}} = \frac{2\pi^2 k r^2}{R_{h,b} \alpha \gamma} \cdot \frac{V_{3\omega,0}}{I_0^2}
 \end{aligned} \tag{9}$$

위상 뒤짐 값과 마찬가지로, 무차원화 한  $3\omega$  전압의 진폭도 온도 조건에 상관 없이 거의 같은 값을 가지는 것을 볼 수 있다.  $3\omega$  전압의 진폭은 주파수가 낮을 경우엔 유속이 빨라짐에 따라 급

격히 작아지는 반면, 주파수가 높아질수록 유속과 무관하게 거의 일정해지는 것을 알 수 있다.

위상 뒤짐 값으로부터 유속을 측정하는 경우에 측정 감도는 유속 변화에 따른 위상 뒤짐의 변화로 정의할 수 있다. Figure 5(a)와 (c)에서 유속의 범위에 따라서 측정 감도가 가장 좋은 주파수가 달라지는 것을 볼 수 있다. 낮은 주파수로 갈수록 저속에서의 측정 감도가 좋아지고 주파수가 높아질수록 고속에서의 측정 감도가 좋아지므로 교류전원의 주파수를 조절함으로써 넓은 범위의 유속을 정밀하게 측정할 수 있다. 주파수와 측정감도의 관계를 좀더 자세히 살펴보기 위해서 Fig. 5(c)에 점선으로 표시해 놓은 주파수인 4 Hz( $\theta_{AC,0} = 3.6^\circ$ )와 10 Hz( $\theta_{AC,0} = 3.0^\circ$ )의 두 가지 경우에 대해서, 0.0 ~ 20.0 mm/s의 유속 범위에서의 위상 뒤짐을 측정한 후에 유속이 0.0 mm/s 일 때의 위상 뒤짐 값을 뺀 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Figure 6은 위상 뒤짐의 변화를 속도의 함수로 나타낸 그림이므로 곡선의 기울기를 센서의 측정 감도로 생각할 수 있다. 유속의 범위가 0.0 ~ 5.0 mm/s 인 경우에는 주파수가 4 Hz 인 경우에 센서의 감도가 더 좋고, 7.0 mm/s 이후의 경우에는 10 Hz 인 경우에 감도가 더 좋은 것을 알 수 있다.

본 실험에서 측정 가능했던 최저 유속과 최고 측정 정밀도를 나타내기 위해 Fig. 6(a)에서 유속 범위가 0.0 ~ 2.0 mm/s 인 부분만을 확대해서 Fig. 6(b)에 나타내었다. 그림에 표시한 바와 같이, 4 Hz의 주파수에서 최저 0.7 mm/s의 유속까지 측정이 가능하였고, 대략 1.4 ~ 1.5 mm/s의 유속 범위에서 0.1 mm/s의 유속 변화까지 측정할 수가 있었다. 본 실험에서는 미터링 밸브를 조절하여 에탄올의 유량을 조절하였는데, 밸브 조절의 한계 때문에 더 느린 유속 범위의 측정과 보다 정밀한 측정에 어려움이 있었다. 하지만 0.1 mm/s의 유속 변화에 0.1° 정도의 위상 뒤짐 차이가 나는 것과 LIA의 위상 측정 정밀도가 0.001°임을 고려한다면, 유동을 아주 정밀하게 제어하여 실험을 수행할 경우 수  $\mu\text{m/s}$  내외의 정밀도로 유속 측정이 가능할 것으로 예측된다.

한편, 위상 뒤짐의 실제 측정값과 1차 시스템 해석을 통한 예측값을 Fig. 7에 함께 나타내었다. 실선은 실험을 통해 측정한 위상 뒤짐 값이고, 점선은 식 (5)를 이용하여 계산한 위상 뒤짐 값이다. Figure 7은 주파수의 변화 및 유속의 변화( $h$ 의 변화)에 따른 실제 측정값과 1차 시스템 해석을 통한 예측값의 거동이 큰 차이가 있음을 보여주고 있다. 이는 1차 시스템 해석에서는 열선으로부터 주위로 전달되는 열유속의 주기적 변화와 열선 온

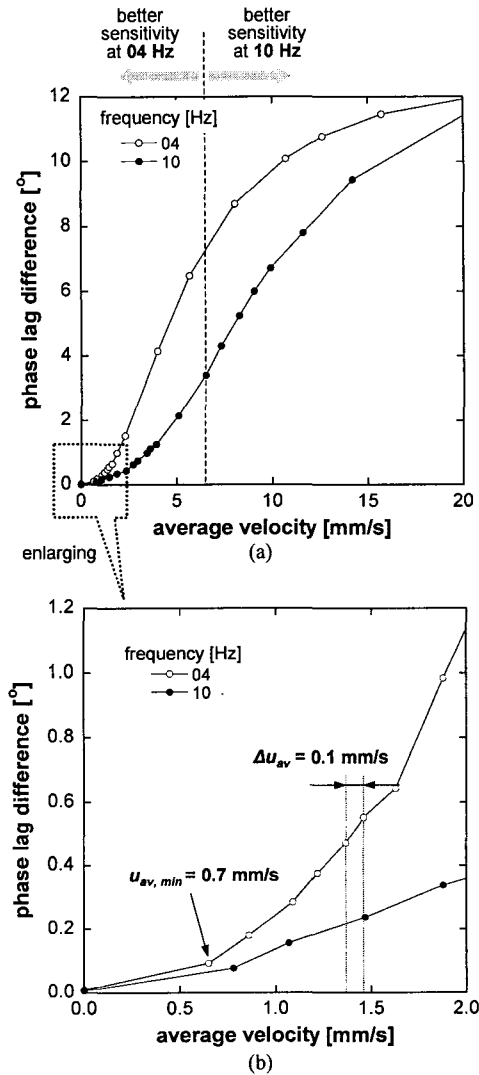


Fig. 6 Phase lag difference versus average velocities: (a)  $u_{av} = 0.0 \sim 20.0 \text{ mm/s}$  and (b)  $u_{av} = 0.0 \sim 2.0 \text{ mm/s}$

도의 주기적 변화가 동일한 위상을 갖는 것으로 가정하지만 본 경우처럼 비교적 주파수가 높은 주기적 열현상의 경우에는, 열선 내부의 주기적 열 발생과 열선의 온도 사이에 위상차이가 존재하듯이, 열선으로부터 주위로 전달되는 열유속의 주기적 변화와 열선의 온도의 주기적 변화 사이에도 위상차가 존재하기 때문으로 추측된다. 따라서 본 측정방법을 최적화하기 위해서는 높은 주파수에서의 교류 열전달 현상을 정확하게 예측하기 위한 이론적 연구가 필요함을 알 수 있다. 현재 유속 측정 정밀도를 최적화하기 위해서 열선에서의 주기적인 열 현상에 대한 보다 자세한 이론적

## 후 기

본 연구는 한국기계연구원의 지원으로 이루어졌습니다.

## 참고문헌

- (1) Nguyen, N. T., 1997, "Micromachined Flow Sensors – a Review," *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 8, No. 1, pp. 7~16.
- (2) Oosterbroek, R. E., Lammerink, T. S. J., Berenschot, J. W., Krijnen, G. J. M., Elwenspoek, M. C. and Ben A., 1999, "A Micromachined Pressure/Flow-Sensor," *Sensors and Actuators*, Vol. 77, pp. 167~177.
- (3) Neda, T., Nakamura, K. and Takumi, T., 1996, "A Polysilicon Flow Sensor for Gas Flow Meters," *Sensors and Actuators A*, Vol. 54, pp. 626~631.
- (4) Wu, S., Lin, Q., Yuen, Y. and Tai, Y. -C., 2001, "MEMS Flow Sensors for Nano-Fluidic Applications," *Sensors and Actuators A*, Vol. 89, pp. 152~158.
- (5) Okulan, N., Henderson, H. T. and Ahn, C. H., 2000, "A Pulsed Mode Micromachined Flow Sensor with Temperature Drift Compensation," *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES*, Vol. 40, No. 2, pp. 340~347.
- (6) Gamage S. K., Okulan, N. and Henderson, H. T., 2000, "Behavior of Bulk Micromachined Silicon Flow Sensor in the Negative Differential Resistance Regime," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 10, pp. 421~429.
- (7) Toda, K., Sanemasa, I. and Ishikawa, K., 1996, "Simple Temperature Compensation of Thermal Air-Flow Sensor," *Sensors and Actuators A*, Vol. 57, pp. 197~201.
- (8) Qui, L., Hein, S., Obermeier, E. and Schubert, A., 1996, "Micro Gas-Flow Sensor with Integrated Heat Sink and Flow Guide," *Sensors and Actuators A*, Vol. 54, pp. 547~551.
- (9) Bedö, G., Fannasch, H. and Müller, R., 2000, "A Silicon Flow Sensor for Gases and Liquids Using AC Measurements," *Sensors and Actuators*, Vol. 85, pp. 124~132.
- (10) Kuijk, J., Lammerink, T. S. J., Bree, H. -E., Elwenspoek, M. and Fluitman, J.H.J., 1995, "Multi-Parameter Detection in Fluid Flows," *Sensors and Actuators A*, Vol. 46~47, pp. 369~372.
- (11) Nguyen, N. T. and Kiehnscherf, R., 1995, "Low-Cost Silicon Sensors for Mass Flow Measurement of Liquids and Gases," *Sensors and Actuators A*, Vol. 49, pp. 17~20.
- (12) Ashauer, M., Glosch, H., Hedrich, F., Hey, N., Sandmaier, H. and Lang, W., 1999, "Thermal Flow Sensor for Liquids and Gases Based on Combinations of Two Principles," *Sensors and Actuators*, Vol. 73, pp. 7~13.
- (13) Cahill, D. G., 1990, "Thermal Conductivity Measurement from 30 to 750 K : the  $3\omega$  Method," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 61, No. 2, pp. 802~808.

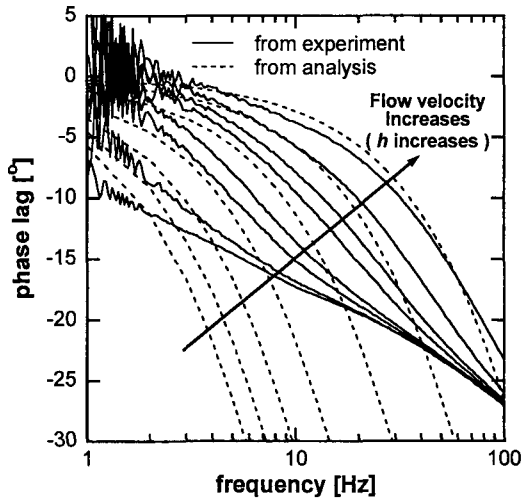


Fig. 7 Different trend of the phase lag decrease between experiment and analysis

해석, 측정 정밀도의 한계 및 센서의 최소 소비 전력 등에 대한 연구들이 수행되고 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 간단한 구조로 유체의 가열을 최소화 하면서 매우 느린 유동까지 정밀하게 측정할 수 있는 새로운 유속 측정 방법인 교류방식 유속 측정법을 제안하였으며 이를 실험적으로 입증하였다. 본 방법의 물리적 원리를 이해하기 위해서 1 차 시스템 해석을 수행하였으며 주기적 정상상태 전열해석을 통해서 그 측정원리를 설명하였다. 텅스텐 와이어를 열선으로 사용하고 에탄올을 작동 유체로 한 실험 장치를 구성하여 온도의 위상 뒤짐과 유속과의 관계를 측정하였으며 유속 측정 정밀도가 유동 속도와 교류 전압의 주파수에 따라 달라짐을 확인하였다. 저속에서는 낮은 주파수로 갈수록 측정 감도가 좋아지고 고속에서는 주파수가 높아질수록 측정 감도가 좋아졌다. 주파수가 4 Hz 인 경우, 최저 유속은 0.7 mm/s, 유속의 최고 측정 정밀도는 0.1 mm/s 까지 측정이 가능했다. 그러나 이러한 측정한계는 유속 조절의 정밀도에 의하여 제한된 것이며 유속을 좀 더 정밀하게 제어한다면 수  $\mu\text{m/s}$  내외의 정밀도로 유속 측정이 가능할 것으로 예측된다. 실험 결과와 1 차 시스템 해석결과는 상당한 차이를 보였다. 본 측정방법을 최적화하기 위해서는 높은 주파수에서의 교류 열전달 현상을 정확하게 예측하기 위한 이론적 연구가 필요함을 알 수 있었으며 현재 연구가 진행되고 있다.