

교류방식 열선 유속 측정법 개발

정원석* · 권오명** · 최두선*** · 이준식†

Tunable AC Mode Hotwire Anemometry

Won Seok Chung*, Ohmyoung Kwon**, Du Seon Choi*** and Joon Sik Lee†

Key Words : phase lag(위상 뒤짐), alternating current(교류), hot wire(열선)

Abstract

This paper suggests and demonstrates a novel flow measurement technique, tunable AC mode hotwire anemometry that allows simple integration, robust measurement, and extremely high accuracy. The principle and simple theoretical analysis of the technique are shown. To find the optimal frequency 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 10 mm/s. To optimize the sensitivity of technique, the periodic thermal characteristic of the hotwire should be understood and is currently under study.

	기호설명
c_p	비열 [J/kg·K]
h	대류열전달계수 [W/m ² ·K]
I	전류 [A]
l	열선의 길이 [mm]
\dot{q}	단위부피당 열량 [W/m ³]
R	저항 [Ω]
r	열선의 반지름 [μm]
T	온도 [K]
t	시간 [s]
U	속도 [m/s]
V	전압 [V]

Δ	두 값의 차이
θ	온도차 [K]
ρ	밀도 [kg/m ³]
τ	열시간상수 [s]
ω	주파수 [rad/s]

하첨자

AC	교류성분
h	열선
opt	최적점
S	부가저항
∞	유동
0	진폭

그리스문자

α	저항온도계수 [K ⁻¹]
ϕ	위상 뒤짐 [°]
γ	비저항 [$\Omega\cdot\text{m}$]

1. 서론

마이크로 시스템에서의 정확한 유동 측정은, 화학 성분 분석 과정, 의약품 투약, 반도체 제조 공정 등의 다양한 분야에서 매우 중요한 비중을 차지하고 있다. 마이크로 유동센서는 매우 제한된 공간에 위치시켜야 하고, 센서의 제작 과정이 마이크로 시스템의 제작 공정에 쉽게 통합될 수 있어야 하므로 그 구조가 매우 간단해야 한다.

† 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : jslee@gong.snu.ac.kr
TEL : (02)880-7117 FAX : (02)883-0179

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 고려대학교 기계공학과

*** 한국기계연구원

동시에 측정 정밀도는 지극히 높아야 하는데, 이는 마이크로 채널 내부의 유동 속도가 매크로 스케일의 유동에 비해서 매우 느리기 때문이다. 최근 20 여년동안 마이크로 가공 기술을 이용하여, 다양한 마이크로 유동센서들이 개발되어 왔지만, 위의 조건을 만족시키는 센서를 찾기 힘들다. 이에, 본 연구에서는 구조적으로 매우 간단하면서도 그 측정 범위와 정밀도는 보다 향상된 새로운 유동 측정법을 개발하였다.

유동센서들은 작동 원리에 따라 크게 기계적 유동센서(mechanical flow sensor, non-thermal flow sensor)와 열적유동센서(thermal flow sensor)로 나눌 수 있다⁽¹⁾. 기계적유동센서는 유동이 지나가면서 생기는 압력 강하⁽²⁾나 항력(drag force), 전향력(Coriolis force) 등을 유동 측정에 이용하는 것으로서, 에너지 소모가 적고, 유체가 가열되지 않으나, 구조가 복잡하여 마이크로 밸브나 펌프 등과 함께 전체 시스템에 통합시키기 어려운 단점이 있다. 이에 반해, 열적유동센서는 구조가 간단하고 전기적으로 간단하기 때문에, 마이크로 시스템을 구성하는 경우에 기계적유동센서보다 선호되고 있다.

열적유동센서들은 발열체와 유체사이에서 일어나는 열전달 과정을 이용하여 유동을 측정하게 되는데, 현재까지 연구 개발된 센서들은, 가열된 센서에 공급되는 열량의 변화나 저항의 변화를 측정하는 열선/박막 방식(hot-wire/film type)⁽³⁾⁻⁽⁷⁾, 열원 주위 온도의 비대칭성을 측정하는 열량측정 방식(calorimetric type)^{(8),(9)}, 열 맥동(heat pulse)이 일정 거리를 지나가는 데 걸리는 시간을 측정하는 이동시간측정 방식(time-of-flight type)⁽¹⁰⁾ 등으로 크게 나눌 수 있다. 이러한 열적유동센서들은, 앞에서 언급한대로 구조가 간단하다는 장점 이외에도, 열선/박막 방식의 경우엔 센서의 반응속도가 빠르고 감도가 좋으며, 히터와 센서가 동일하다는 장점이 있고, 열량측정 방식은 히터의 상, 하류에 있는 센서 때문에 유동의 방향을 알 수 있다는 등의 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 단점 등이 있다. 또한 측정 방식에 따라서 측정 범위에 제한이 있거나(열량측정 방식), 열확산이 일어나서 저속 측정에 적합하지 못한 문제(이동시간측정 방식)가 발생하기도 한다.

이러한 문제들을 해결하기 위해, 센서에 주기적으로 직류 전원을 공급하여 센서가 유동에 미치는 영향을 최소화하려 하려는 연구와^{(5),(6)}, 측정 회로에 보정 저항(compensation resistor)을 삽입하여 주위 유체 온도의 영향을 보정하려는 연구 등이 수행되었고⁽⁷⁾, 센서 밑부분에 박막층을 더하거나⁽⁸⁾, 유속의 범위에 따라 두 가지의 측정방식을 따로 적용함으로써^{(11),(12)} 제한된 유속 측정 범위를 확장 시키기 위한 노력들도 시도되었다. 이러한 연구들의 결과로 기존 센서들의 단점을 어느 정도 보완할 수는 있지만, 센서나 측정 회로의 구조 또는, 센서에 전류를 공급하는 장치가 복잡해지는 문제가 발생한다.

본 연구에서는 열적유동센서에서 생기는 문제점들을 근본적으로 해결하기 위해, 교류방식 열선 유속 측정법을 새롭게 고안하였다. Figure 1은 그 기본 원리를 나타낸 그림이다. 속도를 측정하고자 하는 유동에 놓여있는 열선에 교류 전원을 공급해주면 그림과 같이 주기적으로 열이 발생되며, 이 경우 열선의 온도는 열량의 주기적인 변화에 비해 어느 정도의 위상 뒤짐을 가지고 주기적으로 움직이게 된다. 이 위상 뒤짐은 열선의 대류열전달계수와 관련이 있고, 대류열전달계수는 유체의 속도와 밀접한 관계를 가지고 있으므로, 위상 뒤짐을 측정하게 되면 유체의 속도를 알아낼 수 있게 된다.

열원에 교류 전원을 가해주는 측정 방식은 기존 연구에서도 찾아볼 수 있는데, Bedö 등⁽⁹⁾은 교류 전원을 이용하여 가운데에 있는 열원을 가열하고 열원의 상, 하류 양쪽에 있는 센서에서 신호를 측정함으로써 유속을 측정하였다. 이 방법

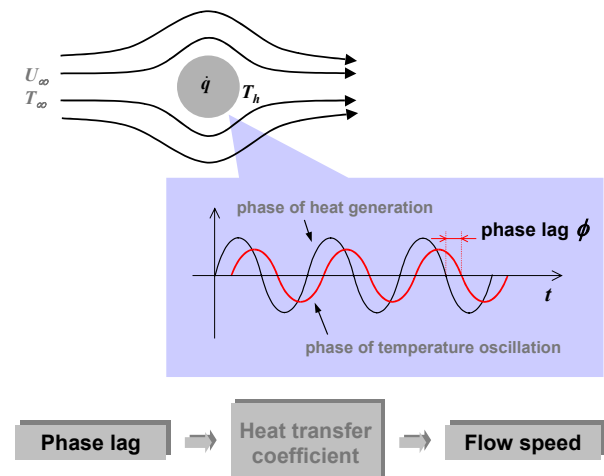


Fig. 1 Principle of tunable AC mode hotwire anemometry

은 변조 기술(modulation technique)을 이용함으로써 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 현상이 발생하고, 주파수가 높은 열파의 경우에는 빠르게 감쇠 되므로 센서를 매우 높은 온도로 가열해야 하는 등(질소 유속 측정 시, 약 210 °C ~ 290 °C), 여전히 기존 열적유동센서의 단점들을 완전히 극복하지는 못하고 있다.

이에 비해, 교류방식 열선 유속 측정법은 다음과 같은 장점들을 가지고 있다. 첫 번째로, 가열 주파수에서 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 영향을 받지 않는다. 두 번째로, 주파수 공간에서의 위상 뒤짐을 측정하는 것이기 때문에 원칙적으로 측정 정밀도가 열 발생량에 의존하지 않고, 센서와 열원이 동일하기 때문에 발생하는 열량의 손실이 매우 적다. 따라서, 센서가 감지할 수 있는 정도의 최소한의 열량만으로도 원하는 신호를 측정할 수 있으므로, 센서를 작동시키는 데 필요한 에너지 소모가 적고, 센서의 온도가 높지 않기 때문에 유체의 가열량이 최소화 될 수 있다. 세 번째는 디지털 신호 처리 기술의 발달로 매우 정밀하게 위상을 잴 수 있기 때문에, 매우 느린 유동의 속도까지 높은 정밀도로 정확하게 측정할 수 있다. 그밖에도 공급해주는 교류 전원의 주파수를 변화시킴에 따라, 쉽게 넓은 범위에 걸쳐서 유속 측정이 가능하며, 센서와 열원이 동일하므로 구조가 간단하기 때문에 미소 유체 시스템에 적용시키기도 용이하다. 이와 같은 장점으로 인해, 교류방식 열선 유속 측정법은 온도 변화가 있는 유동장의 유속 측정이나, 마이크로 시스템에서의 유속 혹은 유량을 측정하는데 적합하다.

2. 교류방식 열선 유속 측정법에 대한

이론적 해석

여기서는 본 측정법의 원리를 이해하기 위해서 열선에서 일어나는 현상을 first order system 으로 가정하여 간단한 해석을 시도하였다. 일반적으로 주기적인 현상이 아닌 경우의 열 시스템에 대해

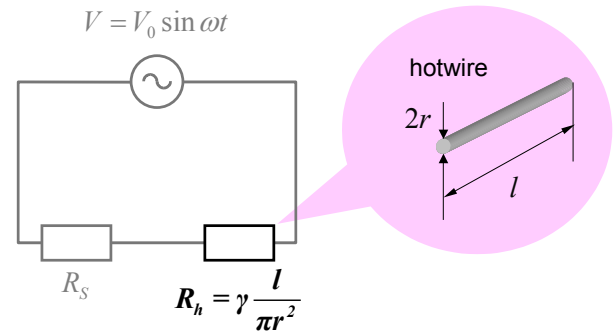


Fig. 2 Schematic of circuitry for tunable AC mode hotwire anemometry

first order system 으로 가정하고 해석하면 상당히 정확한 결과를 얻을 수 있다는 것은 잘 알려진 사실이다. 그러나 본 현상은 주파수가 상대적으로 높은 주기적인 열 현상이므로 first order system 으로 가정하고 해석하는 것이 반드시 적절하지 않을 수도 있다. 하지만 이와 같은 간단한 이론 해석을 통해 본 방법의 물리적 원리를 쉽게 이해할 수 있고 교류 열전달 현상이 직류 열전달 현상과 다르다는 것을 이해할 수 있는 비교 기준이 된다는 점에서 그 의미를 찾을 수 있다.

ω 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 저항이 온도에 따라 변하는 것이 회로에 흐르는 전류에 미치는 영향이 작으므로 아래와 같은 식이 성립한다.

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

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

$$\begin{aligned} \dot{q}(2\omega) &= \frac{I^2 R_h}{Volume} = \frac{I_0^2 \sin^2 \omega t}{\pi r^2 l} \cdot \gamma \frac{l}{\pi r^2} \\ &\equiv \dot{q}_0 \left(1 + \sin(2\omega t - \frac{\pi}{2}) \right) \end{aligned} \quad (2)$$

r 은 열선의 반지름, l 은 열선의 길이, γ 은 열선의 비저항이며, \dot{q}_0 은 발생하는 열량의 진폭을 의미한다.

유동 속에 놓여있는 열선의 온도를 해석할 때, 열선의 반지름이 2.5 μm 로 매우 작으므로 열선의 온도가 전체적으로 균일하게 변한다고 가정하면 아래와 같은 에너지 평형식이 성립한다.

Table 1 Steady periodic electro-thermal analysis

	Frequency	Amplitude	Phase lag
Source voltage	ω	V_0	0
Current	ω	$\frac{V_0}{R_s + R_h} \equiv I_0$	0
Heat generation per unit volume	2ω	$\frac{I_0^2 \gamma}{2\pi^2 r^4} \equiv \dot{q}_0$	$-\frac{\pi}{2}$
Temperature	2ω	$\frac{r\dot{q}_0}{2\sqrt{h^2 + (\rho c_p r \omega)^2}} \equiv \theta_0$	$\phi - \frac{\pi}{2}$
3ω signal	3ω	$\frac{I_0^3 \alpha \gamma_0 \gamma l}{8\pi^3 r^5 \sqrt{h^2 + (\rho c_p r \omega)^2}} = \left(\frac{I_0 R_{h,0} \alpha}{2}\right) \theta_0$	$\phi - \pi$

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

여기서, θ 는 열선의 온도와 주위 유동의 온도 사이의 차이($T_h - T_\infty$)이다. 위의 식 (3)을 풀면 열선의 직류, 교류, 감쇠 성분 온도를 구할 수 있는데 이 중에서 시간에 따라 진동하는 교류 성분만 따로 적어보면,

$$\begin{aligned} \theta_{AC}(2\omega) &= \frac{r\dot{q}_0}{2\sqrt{h^2 + (\rho c_p r \omega)^2}} \sin\left(2\omega t - \frac{\pi}{2} + \phi\right) \\ &\equiv \theta_0 \sin\left(2\omega t - \frac{\pi}{2} + \phi\right) \end{aligned} \quad (4)$$

이 된다. 이때, ϕ 는 열선에서 발생하는 열량과 열선의 온도 사이에 생기는 위상 뒤짐이며, 위상 뒤짐, 교류 전원의 주파수, 대류열전달계수 사이에는 아래와 같은 관계가 성립한다.

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

여기서 τ 는 열시간상수로 정의한다.

열선의 저항은 온도의 함수이기 때문에, 열선의 온도와 저항은 같은 주파수를 가지고 변하게 된다. 따라서 ω 의 주파수로 회로에 공급되는 전류와 2ω 의 주파수로 변하는 열선의 저항에 의해, 열선에는 3ω 의 주파수로 진동하는 전압이 생기게 된다.

$$\begin{aligned} V(3\omega) &= I(\omega)R_h(2\omega) \\ &= \frac{I_0 R_{h,0} \alpha \theta_0}{2} \sin(3\omega t + \phi - \pi) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $R_{h,0}$ 는 상온에서의 저항, α 는 저항온도계수이다. 결과적으로, 열선으로부터 3ω 의 주파수를 갖는 전압을 측정하여, 그 전압의 위상 뒤짐을 측정하면 유체의 속도를 알아낼 수 있게 된다. 측정된 전압신호의 크기를 이용하여, 다른 정보를 얻어낼 수도 있는데, Table 1에서 3ω 신호에 대한 관계식을 살펴보면, 3ω 의 주파수를 가지는 전압으로부터 열선 온도의 교류성분 진폭을 구할 수 있게 된다. 또한 온도에 관한 관계식으로부터 대류열전달계수를 구할 수 있게 되고, 그로부터 열선 온도의 직류성분도 구할 수 있다.

주어진 주파수에서, 센서의 감도는 아래의 식 (7)과 같이, 주파수를 일정하게 하고 위상 뒤짐을 열시간상수로 미분한 것으로 정의할 수 있다.

$$(sensitivity) = \left. \frac{\partial \phi}{\partial \tau} \right)_{\omega=const.} \quad (7)$$

센서가 최적의 감도를 가지는 조건을 알아보기 위해 식(5)의 양변을 τ 에 관해 미분하면,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial \tau} \sec^2 \phi &= -\omega = \frac{\tan \phi}{\tau} \rightarrow \frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \frac{1}{2\tau} \sin 2\phi \\ \therefore \left. \frac{\partial \phi}{\partial \tau} \right)_{opt} &= \frac{1}{2\tau} \left(\text{when } \phi = \frac{\pi}{4} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

이 되므로 ϕ 가 $\pi/4$ 가 되는 주파수에서 센서가 최적의 감도를 가진다는 것을 알 수 있다.

3. 실험 장치 및 신호 측정 방법

Figure 3은 실험 장치 및 신호 측정 회로의 개략도이다. 그림의 왼쪽 부분은 시린지 펌프, 열선, 우레탄 튜브 등으로 이루어진 실험 장치를 나타내고 있다. 길이 1 mm, 지름 5 μm 의 텅스텐 와이어를 유속 측정 센서인 열선으로 사용하였으며 작동 유체로는 비전해질 액체인 에탄올을 이용하였다. 열선을 내경 4 mm의 우레탄 튜브 중심에 삽입한 뒤, 시린지 펌프에 장착되어 있는 주사기에 튜브의 한 쪽 끝을 연결하였다. 주사기 내부에 에탄올을 채운 상태에서 시린지 펌프를 이용하여 주사기의 뒷부분을 일정한 속도로 밀어주면, 에탄올은 열선이 삽입되어 있는 우레탄 튜브를 흘러가게 되는데, 이 때 열선으로부터 원하는 신호를 얻어냄으로써 유동의 속도를 측정하게 된다.

Figure 3의 오른쪽 그림은 열선, lock-in amplifier, 차동 증폭기(differential amplifier), 가변저항(potentiometer) 등으로 이루어진 신호 측정 회로를 나타낸 것이다. 위상 뒤짐의 값은 부도체의 전도열전달계수를 측정하는데 널리 사용되고 있는 3ω 법⁽¹³⁾을 이용하여 측정하였다. lock-in amplifier는 열선에서 나오는 여러 가지 주파수의 전압 신호 중 3ω 의 주파수를 갖는 전압 신호만을 선택하여 그 진폭과 위상 뒤짐을 측정하는 역할과 열선을 가열하기 위한 교류 전압을 제공하는 역할을 한다. 또한, lock-in amplifier 내부의 자체 임피던스는 열선과 가변저항에 비해 훨씬 큰 값을 가지기 때문에 열선의 온도 변화에 의한 저항 변화가 전체 회로에 흐르는 전류의 변화에 미치는 영향을 작게 만들어 준다. 가변저항은 각

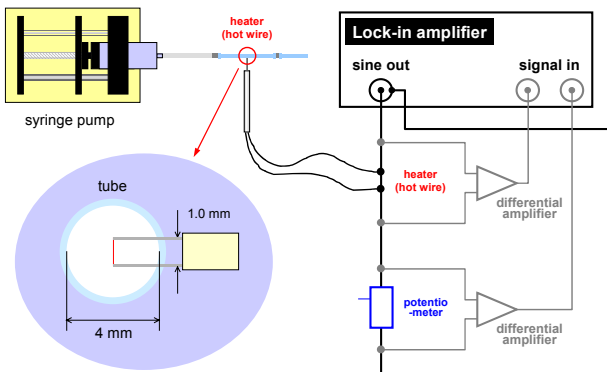


Fig. 3 Schematic of experimental setup

실험 조건에 따라 변하는 열선의 저항과 같은 값으로 조절을 하였다. 이 경우 같은 크기의 전압이 열선과 가변 저항에 걸리게 되고, 열선과 가변저항의 양단에 얻어낸 전압을 빼게 되면, 측정에 불필요한 ω 주파수의 전압 신호를 먼저 제거할 수 있으므로 3ω 주파수의 전압 신호를 보다 쉽게 얻어낼 수 있다. 두 개의 차동 증폭기는 각각 열선과 가변저항의 양단에 걸리는 전압을 뽑아내어 lock-in amplifier의 입력단자에 공급하는데 사용하였다.

4. 실험 결과 및 분석

Figure 4는 교류 전원의 주파수가 15 Hz, 열선에 가해주는 열량이 약 4 mW로 일정할 때, 유속을 2 ~ 10 mm/s로 변화시키면서 위상 뒤짐을 측정하는 결과이다. 그림에서 보면, 유속과 위상 뒤짐의 값이 정확히 선형적인 관계를 이루고 있지는 않지만, 유속이 증가함에 따라 위상 뒤짐의 값이 계속 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 위상 뒤짐의 값을 이용하여 유속을 측정할 수 있음을 확인할 수 있다. 위상 뒤짐 값이 떨리는 것은 시린지 펌프가 주사기를 균일한 속도로 밀어주지 못하기 때문인데, 이는 유속이 증가함에 따라 떨림의 주기가 빨라지는 것과, 중력에 의해 흐르는 알코올로 실험을 하였을 때는 위상 뒤짐 값에 떨림이 없는 것으로부터 확인할 수 있다. 이어지는 연구에서 일정한 유속의 유동을 공급할 수 있는 실험 장치를 구성하여 다시 실험을 한다면 보다 안정된 결과를 얻을 수 있을 것이다.

센서의 감도가 가장 좋아지는 교류 전원의 주파수를 찾기 위한 실험을 수행하여 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 열선에 가해준 열량은 앞에

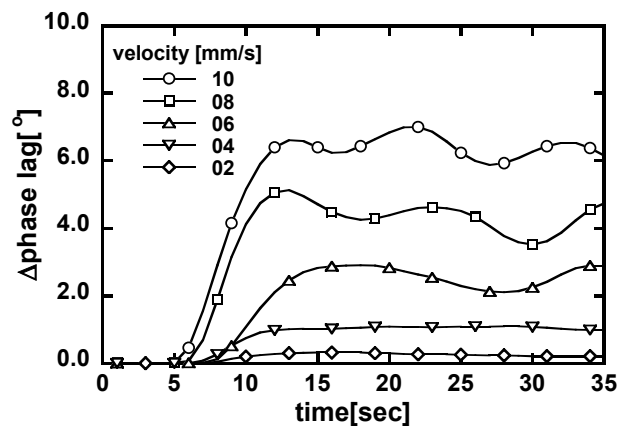
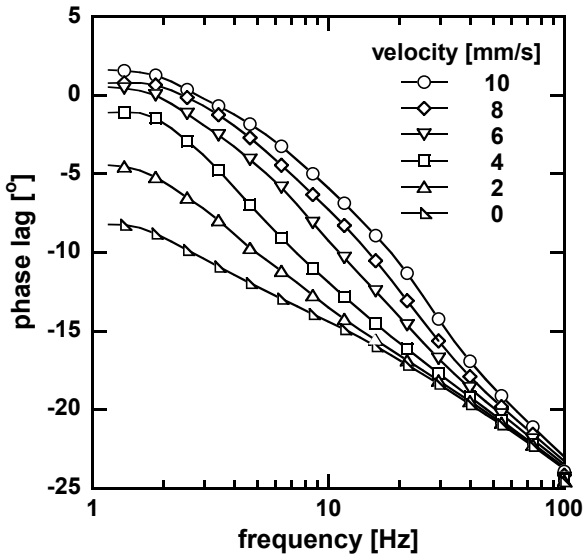
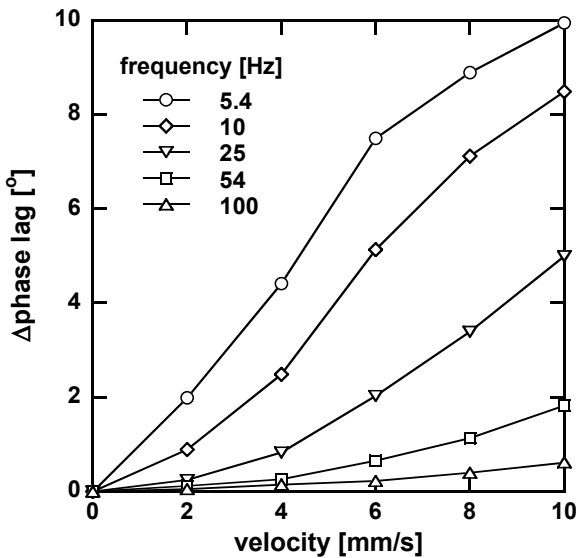


Fig. 4 Phase lag variation for different velocity (frequency = 15 Hz)



(a) Frequency vs. phase lag



(b) Velocity vs. phase lag

Fig. 5 Phase lag variation for different velocity and frequency

서와 마찬가지로 약 4 mW 이며, 에탄올의 유속은 0 ~ 10 mm/s 의 범위에서 단계적으로 변화시켰으며, 각각의 속도에 대해 주파수를 1 ~ 100 Hz 로 변화시키면서 위상 뒤짐을 측정하였다. Fig 5(a)는 주파수 변화에 따른 위상 뒤짐의 변화를 각 유속에 대해서 그린 것이며, Fig 5(b)는 몇몇 주파수에 대해 속도 변화에 따른 위상 뒤짐의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 전체적으로 주파수가 낮아질수록 각 유속에 따른 위상 뒤짐 간의 차이가 커지고, 주파수가 10 Hz 일 때는 1 mm/s 의 속도 당 1° 정도의 위상 뒤짐 차

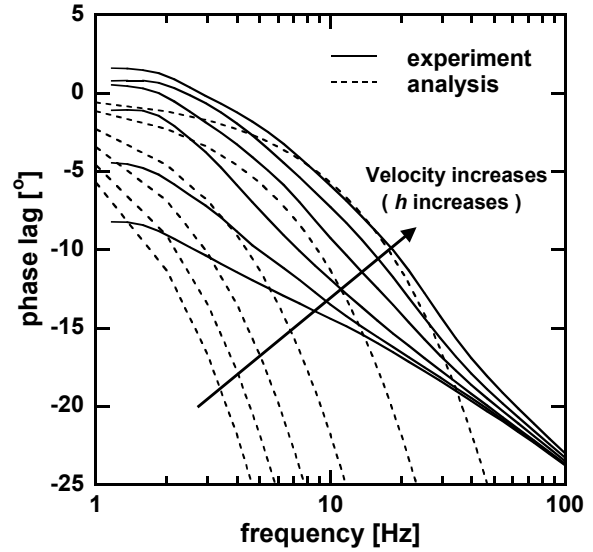


Fig. 6 Different trend of decrease in phase lag between experiment and analysis

이를 가지는 것을 알 수 있다. lock-in amplifier 의 측정 정밀도가 10^{-3}° 정도임을 감안한다면, 매우 정밀하게 속도를 측정할 수 있음을 예상할 수 있다.

실험 결과를 살펴보면, 최적의 감도를 나타내는 주파수가 존재할 것이라는 해석 결과와는 다르게 주파수가 감소할수록 센서의 감도가 좋아지는 모습을 보이는데, 이렇게 예측 결과와 실제 측정 값이 차이를 보이는 것은, 센서에서 일어나는 현상을 first order system 으로 가정하여 해석한 반면, 실제 현상은 그렇지 않기 때문인 것으로 생각된다. 즉, 해석 과정에서는 대류열전달계수를 단순히 상수로 가정하였지만, 실제로는 주기적으로 발생하는 열량 때문에 대류열전달계수가 복소수성분을 가지는 복잡한 값이 되기 때문이다.

이 사실을 확인하기 위해 위상 뒤짐의 이론적인 값과 실제 측정값을 함께 그려보았다. Figure 6 에서 실선은 몇몇 속도에서 주파수 변화에 따른 위상 뒤짐 값을 측정한 것을 그린 것이고, 점선은 식(5)에서의 ϕ 값을, 몇몇 대류열전달계수 값에서 주파수 값을 변화시켜가면서 그린 것이다. 유동의 속도나 대류열전달계수가 변함에 따라 위상 뒤짐이 변하는 경향에 있어서 이론치와 측정치의 차이가 분명한 것을 알 수 있다. 따라서 보다 자세하고 정확한 해석을 통해 실제 현상을 정확히 예측하는 것이 필요하며, 센서 측정 정밀도의 한계, 최소 소비 전력 등에 대한 다양한 후속 연구들이 계속 이루어져야 한다.

5. 결 론

본 논문에서는 간단한 구조로 유체의 가열을 최소화 하면서 매우 느린 유동의 속도까지 정밀하게 측정할 수 있는 새로운 유속 측정 방법으로서 교류방식 열선 유속 측정법을 제안하였다. 측정에 대한 기본적인 원리 설명 및 이론적 해석을 수행하였으며, 텅스텐 와이어를 열선으로 이용하고 에탄올을 작동 유체로 사용한 실험 장치를 구성하여 열선에서 발생하는 열과 열선 온도 사이의 위상 뒤짐을 측정함으로써 실제 유속을 측정할 수 있음을 확인하였다. 0 ~ 10 mm/s 의 유속에서 주파수를 1 ~ 100 Hz 로 변화시키면서 위상 뒤짐을 측정한 결과, 유속이 증가함에 따라 위상 뒤짐이 점점 커지고 주파수가 10 Hz 일 때는 1 mm/s 당 1° 정도의 차이를 보이는 것을 알 수 있었다. 이러한 경향은 해석을 통한 예상과는 다른 결과이며, 보다 자세하고 정확한 해석을 통해 실제 현상을 보다 정확하게 예측하는 것이 필요하다.

후 기

본 연구는 마이크로열시스템연구센터의 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 ω method," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 61, No. 2, pp. 802-808.