〈학술논문〉 DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.4.355

침입자 탐지용 인공 유동감지모의 응답 모델링

박 병 규*† · 이 준 식**
* 서울대학교 정밀기계설계공동연구소 , ** 서울대학교 기계항공공학부

Responses of Artificial Flow-Sensitive Hair for Raider Detection via Bio-Inspiration

Byung Kyu Park*† and Joon Sik Lee**
* Institute of Advanced Machinery and Design, Seoul Nat'l Univ.
** School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.

(Received August 17, 2009 ; Revised February 11, 2010 ; Accepted February 11, 2010)

Key Words: Artificial Flow Sensory Hair(인공 유동감지모), Raider Detection(침입자 탐지), Flow Sensor(유동 센서), Response Characterization(응답 특성), Bio-Inspiration(바이오 영감)

초록: 주위 매질의 움직임에 반응하는 섬유상 감지모는 대부분의 생물체에 존재하여 침입자를 감지하는 역할을 한다. 이 기능을 모방한 인공 감지모의 가능한 작동영역 및 응답특성을 파악하기 위하여 인공유동센서의 수학 모델에 대한 매개변수 해석을 수행하고, 각 변수들의 영향을 고찰하였다. 진동성분을 갖는 복합 공기 유동장에서 감지모의 길이 및 직경이 기계적인 감도와 주파수 응답을 결정하는 주요 인자인 것으로 나타났다. 감지모의 길이에 따라 각속도, 각속도, 각가속도를 감지할 수 있는 주파수 영역이 달라질 수 있는 것으로 나타났다. 또한 항력 및 가상 질량에 의한 토크가 매우 작지만 감지모의 움직임에 매우 큰 영향을 나타냈다. 감지모의 길이 및 직경이 증가함에 따라 공진 주파수는 감소하는 것으로 나타났다.

Abstract: Filiform hairs that respond to movements of the surrounding medium are the mechanoreceptors commonly found in arthropods and vertebrates. In these creatures, the filiform hairs function as a sensory system for raider detection. Parametric analyses of the motion response of filiform hairs are conducted by using a mathematical model of an artificial flow sensor to understand the possible operating ranges of a microfabricated device. It is found that the length and diameter of the sensory hair are the major parameters that determine the mechanical sensitivities and responses in a mean flow with an oscillating component. By changing the hair length, the angular displacement, velocity, and acceleration could be detected in a wide range of frequencies. Although the torques due to drag and virtual mass are very small, they are also very influential factors on the hair motion. The resonance frequency of the hair decreases as the length and diameter of the hair increase.

- 기호설명 -

D : 감지모 부착 기질 원기둥의 직경 [m]
d : 감지모의 직경 [m]
f : 원거리장 유동의 주파수 [Hz]
h : 시간변동 함수, 정의식(12) [-]
I : 감지모의 관성모멘트 [Nms^2/rad]
L : 감지모의 길이 [m]
R : 감지모의 감쇠계수 [Nm·s/rad]
S : 감지모의 기계 강성계수 [Nm/rad]
s : 무차원 진동수, 정의식(8) [-]
Re_x : Reynolds 수 $(= u_0 x/\nu)$
T_0 : 회전 토크 [Nm]
$T_{0,\,am}$: 부가질량에 의한 회전 토크 [Nm]
u_f : 유체의 유동속도 [m/s]
u_{mean} : 원거리장 유속의 평균성분 [m/s]
u_{osc} : 원거리장 유속의 진동성분 [m/s]
u_r : 상대속도 $(= u_f - y\dot{\theta})$ [m/s]
u_0 : 원거리장에서의 유속 [m/s]

† Corresponding Author, bkpark@snu.ac.kr

그리스문자

α : 저항온도계수 [K]
δ_{BL} : 경계층 두께 [m]
ρ : 유체의 밀도 [kg/m^3]
ρ_h : 감지모의 밀도 [kg/m^3]
θ : 감지모의 각변위 [rad]
$\dot{\theta}$: 감지모의 각속도 [rad/s]
$\ddot{\theta}$: 감지모의 각속도 [rad/s^2]
τ : 시정수 [s]
ν : 동점성계수 [m^2/s]

하첨자

ρ : 유체 밀도에 의한 성분
μ : 유체 점성에 의한 성분

1. 서 론

유동측정은 거의 모든 산업 및 연구분야에 중요한 기반기술로서, 다양한 원리와 방법으로 제작되어 실제 현장에서 활용되고 있다. 반도체제조 공정기술이 발달함에 따라 이를 이용한 고정밀도를 갖는 초소형 유량센서가 개발되어 왔다. 특히, 최근에는 생물체의 감각체계를 모방하고 개량 실현하기 위한 소위 바이오-영감 감지시스템 기술이 주목을 받고 있다.[1~5] 곤충의 꼬리, 갑각류의 다리에는 섬유모양의 고감도 감지모가 있는데, 생물이 이것들을 이용하여 침입자의 접근이나 먹이감을 감지하지 못하면 자신의 생존이 위태롭기 때문이다.

많은 생물들의 정교한 감지기관들은 헤어셀(hair cell)을 기반으로 하고 있다. 사람 귓속에는 소리를 듣고 균형과 방향감각을 담당하는 청각기관이 있고, 동물 귀, 물고기 옆줄도 사람 귀와 비슷한 기능을 하고, 히드라나 해파리 같은 해저생물에도 청각기관이 있다. 이들의 공통적인 특징은 지름이 수백 nm에서 수십 μm이고, 길이가 수백 μm 정도의 기다란 막대형태의 구조이다. 물고기는 측선 내부의 감지모를 이용하여 주위 물의 유동을 감지하고, 거미는 다리에 있는 감지모를 이용한다. 특히 곤충들은 헤어셀을 이용하여 0.1 m/s 이하의 미세한 유동을 감지할 수 있는 것으로 알려져 있다. 귀뚜라미는 다른 곤충들과는 달리 상대적으로 긴 미강모를 가지고 있으며 이 꼬리털에 부착된 섬유상 감지모(filiform hair)를 이용하여 침입자를 감지한다. 현재 생체의 헤어셀은 공학적 센서보다 감도가 훨씬 좋은 것으로 알려져 있다.

생물체의 감지모는 그 특성 및 기능에 따라 다양한 크기로 분포되어 있고, 일반적으로 가늘고 작아서 상당부분이 교란유동장의 유동 경계층 내에 놓이게 된다. 절지동물의 섬유상 헤어셀을 모방한 많은 기존의 연구[6,7]에서는 멤스(MEMS) 공정을 이용하여 인공모 형태의 폴리머 섬유가 외팔보(cantilever) 선단 상부에 달려있고, 외팔보의 기저부에는 도핑한 실리콘 박막센서가 설치되는 구조로 제작하고 있다. 이 외팔보는 그 일부를 박막 물질로 스퍼터링(sputtering)함으로써 유동에 의해 생성되는 미소한 물리량의 변화가 신호조정을 통해 유용한 신호로 출력되도록 하는 센서의 핵심 요소이다. Humphrey 등[8]은 원기둥 표면에 평행하거나 수직인 유체의 진동유동만을 고려한 해석 해를 구하였으며, 25 HZ 이상에서 생물학적으로 의미 있고 실질적인 결과를 얻었다.

본 연구에서는 상대적으로 낮은 저유속에서 유동이 야기하는 섬유상 감지모의 기계적 운동 특성을 파악하고 성능이 우수한 유동감지모 센서를 설계하기 위하여 모델링을 통하여 거동을 고찰하고자 한다. 이를 위해 경계층을 고려한 해석 모델에서 정상상태 유동 및 진동유동이 공존하는 복합유동에 의한 인공 감지모의 운동특성을 고찰한다. 또한 측정가능한 유속범위 및 센서의 특성을 파악하고 향후 실제 유동이 있는 경우 마이크로 외팔보가 동작하는 섬유상 유동 감지모의 공정설계에 반영해서 고정밀 유동감지모의 개발을 도모하고자 한다.

2. 섬유상 유동감지모 해석 모델

2.1 섬유상 유동감지모의 구조

섬유상 감지모인 헤어셀의 감지원리는 주위 환경으로부터 오는 음파의 진동이나 미세한 유동변화가 감각기관(감지센서)의 진동 주파수, 변위로 변환되어 신경세포로 전달되는 것으로 알려져 있다. 거미와 같은 절지동물의 섬유상 감각모(hair sensilla)는 Fig. 1과 같이 크게 2가지로 나눌 수 있다. 축 주위의 점성력에 의한 토크에 의해 휘어지지 않는 감지모(trichobothrium)는 질량 M 및 관성모멘트 I가 중요한 인자이고, 선단 자극력에 의해 실질적으로 휘

어지는 촉모(tactile hair)는 체적탄성계수 E 및 단면 2차모멘트 J가 중요한 인자이다. 최근 개발된 감지모 센서[6,7]는 Fig. 1의 상단 좌측에 도식적으로 나타낸 바와 같이 2차 감쇠 기계시스템으로 모델링하여 점성저항으로 인하여 야기되는 토크에 의해 변형된 맴브레인 커패시터의 용량 변화를 측정함으로써 유속이나 진동 주파수를 파악하였다.

감지모 센서에 의한 특성변화를 공학적으로 감지하기 위한 신호변환방법으로는 크게 저항, 커패시터, 공진 회로 등을 이용할 수 있고, 이것을 신호조정회로와 결합함으로써 유용한 측정 데이터를 얻을 수 있다. 따라서 마이크로 섬유상 감지모의 매개변수 해석을 통하여 각변위, 각속도, 각가속도의 응답 특성을 고찰하였다.

2.2 섬유상 유동감지모의 해석 모델

실제 물리 현상을 정확하게 해석하기 위해서는 컴퓨터 계산능력, 격자수, 수치해석 방법을 고려하여 적절한 수학 모델을 설정해야 한다.

진동유동의 회전 토크에 의해 야기되는 섬유상 감지모의 각변위, 각속도, 각가속도에 대한 해석 모델[5]이 제시되었고, 이를 공기 중의 감지모에 적용하기 위해 다음과 같이 가정하였다. 유체는 비압축성, 균일 물성, 저 레이놀즈수 유동이고, 운동량 전달에서 비선형 관성효과는 무시한다. 또한 감지모에 작용하는 유체 점성력은 일방향 결합(one way coupling)으로 가정하고 감지모의 단면 형상은 일정하다고 가정한다. 자연상태에서 생물의 움직임으로 인하여 감지모 주위의 복합유동은 정상상태 유동과 비정상상태 주기 유동이 복합된 유동이라고 가정한다. 섬유상의 유동감지모의 기하학적 해석모델은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 직경 d, 길이 L, 밀도 ρ_h 인 원기둥으로 가정한다. 주위 유체의 밀도 ρ, 점성계수 μ이고, 원거리장 유동은 고체표면에 평행하고 감지모에 수직한 방향으로 주파수 f 인 진동함수를 포함하는 복합유동에 의해 운동한다. 이 모델의 회전원점에 대한 각운동량 보존식은 유속과 감지모의 상대속도 $u_r\left(=u_f - y\dot{\theta}\right)$을 고려하여 정리하면 최종적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.[8]

$$\begin{aligned}(I + I_\rho + I_\mu)\ddot{\theta} + (R + R_\mu)\dot{\theta} + S\theta \\ = 4\pi\mu G\int_0^L u_f\, y\, dy \\ + \left(\frac{\pi\rho d^2}{4} - \frac{\pi^2\rho\mu G}{g\omega}\right)\int_0^L \dot{u}_f\, y\, dy\end{aligned} \tag{1}$$

여기서 I, I_ρ, I_μ, R_μ 는 각각 감지모의 관성모멘트, 유체 매질의 관성모멘트, 유체 매질의 밀도 및 점성에 의한 감지모의 감쇠계수로서 다음과 같이 표시된다.

$$I = \frac{\pi\rho_h d^2}{48}\left(4L^3 + \frac{3}{4}d^2 L\right) \tag{2}$$

$$I_\rho = \frac{\pi\,\rho d^2 L^3}{12} \tag{3}$$

$$I_\mu = -\frac{\pi^2\mu\, GL^3}{3g\omega} \tag{4}$$

$$R_\mu = \frac{4}{3}\pi\mu\, GL^3 \tag{5}$$

여기서 g, s는 다음과 같다.

$$G = -\frac{g}{\left(g^2 + \pi^2/16\right)} \tag{6}$$

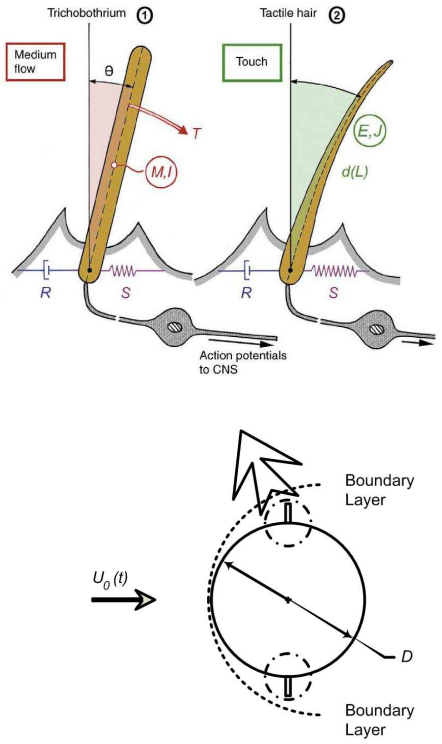


Fig. 1 Schematic model for filiform flow sensor

$$g = 0.577 + \ln(s) \tag{7}$$

$$s = \left(\frac{d}{4}\right)\left(\frac{2\pi f}{\nu}\right)^{0.5} \tag{8}$$

섬유상 감지모의 비틀림 복원계수 S 및 감쇠계수 R을 결정하기 위한 방법은 계산과 실험을 조합함으로써 여러 가지로 나눌 수 있지만, 여기서는 Humphrey 등[9]에 의한 실험 상관관계식을 이용하였다.

$$R = 2.031 \text{ x } 10^{-9}\ L^{1.909} \tag{9}$$

$$S = 1.272 \text{ x } 10^{-5}\ L^{2.030} \tag{10}$$

식 (1)의 우변 괄호안의 항은 각각 부가질량[10] 및 압력구배 항에 의한 토크를 나타낸다. 이 식들은 초기치 문제로서 초기변위 및 초기 각속도가 0인 초기조건을 사용하여 수치적으로 계산할 수 있다. 그러나 이 식은 매우 강성이 크므로 원하는 정밀도를 얻기 위해서는 적절한 스텝크기 제어 및 오차 제어 알고리듬을 사용해야 한다.[11] 또한 식 (1)에서 복합유동에 의한 유체의 속도 분포가 주어져야 한다. 이 유체의 속도는 측정치를 사용하는 것이 가장 바람직하지만 섬유상 감지모가 움직이는 상황에서 측정하는 것은 매우 어렵다. 따라서 진동성분을 포함하는 유체 유동에 대한 원거리장에서의 속도분포는 과도함수를 고려하여 다음 식을 사용한다.

$$u_0(t) = h(t)\left[u_{mean} + u_{osc}\sin(\omega t)\right] \tag{11}$$

$$h(t) = \frac{2}{1+e^{-t/\tau}} - 1 \tag{12}$$

여기서 $\omega = 2\pi f$, $h(t)$는 초기 과도함수를 나타내고, 시정수 τ는 0.01 s로 고정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유체의 속도분포

공기 중에 놓여있는 유동감지모의 경우 복합유동 유체에 대한 기질면 위에서의 속도분포는 원거리장에서의 속도가 고체표면에서 형성되는 경계층 개념을 고려하여 다음과 같이 나타냈다.

$$u_f(t,y) = u_0(t)\left\{\frac{3}{2}\frac{y}{\delta_{BL}} - \frac{1}{2}\left(\frac{y}{\delta_{BL}}\right)^3\right\} \quad (y \le \delta_{BL}) \tag{13}$$

여기서

$$\frac{\delta_{BL}}{x} = 4.64\left(\mathrm{Re}_x(t)\right)^{-1/2} \tag{14}$$

$$x = 2\pi\,(D/2)/4 \tag{15}$$

$$\mathrm{Re}_x(t) = x u_0(t)/\nu \tag{16}$$

이다. 모든 계산에 사용한 물성치들은 300K에서의 값을 사용하였다. Barth 등[5]의 자료를 참고로 기준이 되는 복합유동은 정상상태의 평균 유속이 60 mm/s, 진동성분의 진폭이 10 mm/s, 주파수가 100 Hz 인 진동성분의 합으로 구성되는 것으로 설정하고 각 매개변수 변화의 영향을 고찰하였다. Fig. 2는 평균 유속 10 mm/s, 진동성분의 진폭 10 mm/s인 경우 시간변화에 따른 유체의 y 방향 속도분포를 나타낸 것으로 경계층 내부에서의 유속 변화를 쉽게 확인할 수 있다.

3.2 복합유동

과도 복합유동에 의한 섬유상 유동감지모의 응답에 대해 해석하였다. 원거리장에서 복합유동이 존재할 때 전형적인 거미 다리의 직경을 기준으로 직경 2 mm인 원통 주위에 유동 경계층이 발달하고, 주유동 방향에 수직한 원통의 표면에 돌

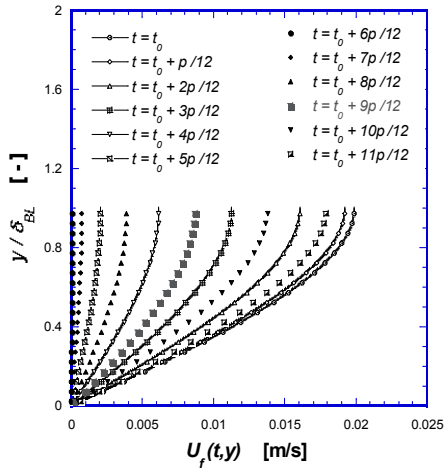
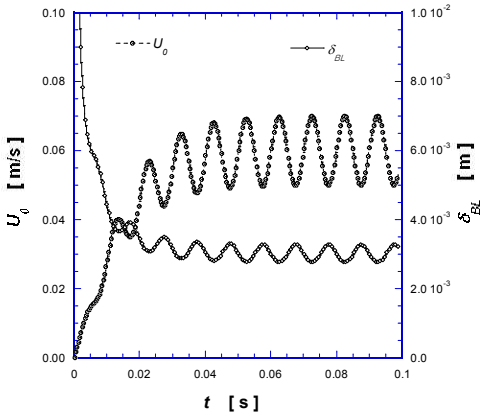
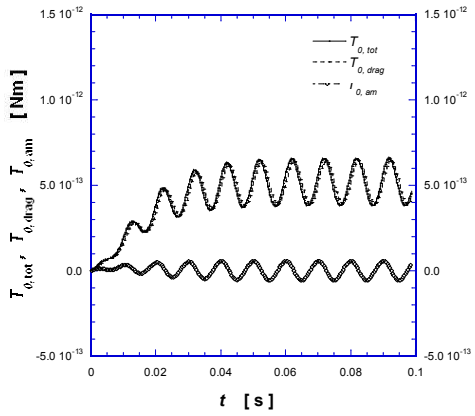


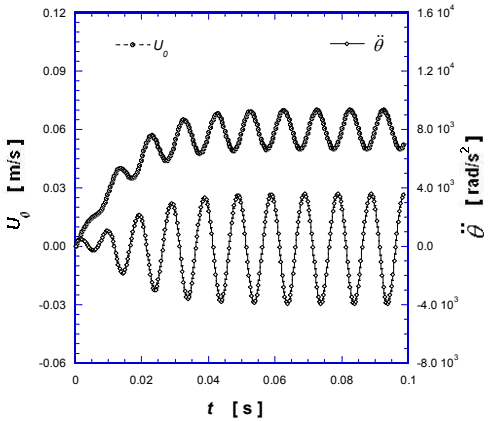
Fig. 2 Influence of far-field velocity on the fluid velocity profile near the boundary layer (u_{mean}=10 mm/s, u_{osc}=10 mm/s)



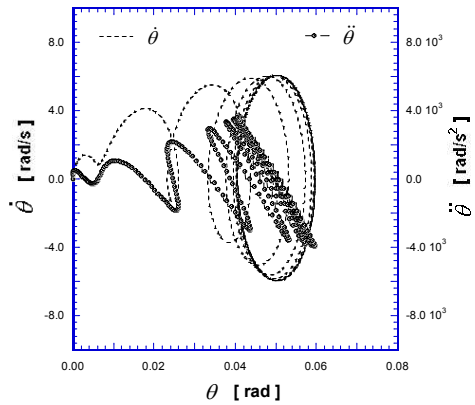
(a) Farfield velocity and boundary layer thickness



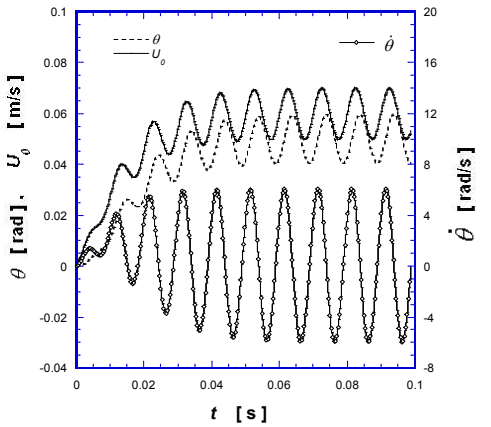
(d) Torques due to drag and added mass



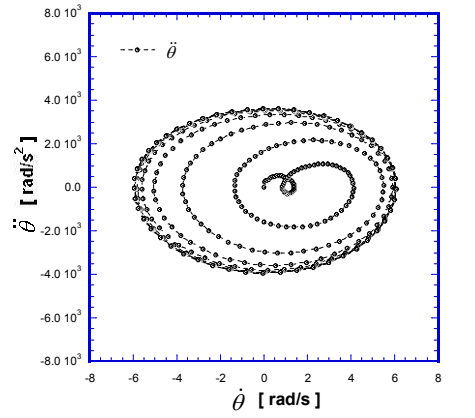
(b) Farfield velocity and angular acceleration



(e) Angular velocity and acceleration versus angular displacement



(c) Angular displacement and angular velocity



(f) Angular acceleration versus angular velocity relation

Fig. 3 Calculated results of response characteristics (u_{mean}=60 mm/s, u_{osc}=10 mm/s)

출되어 있는 섬유상 유동 감지모는 길이 1000 μm, 직경 5 μm인 원기둥으로 설정하고, 원거리장 과도함수의 시정수는 0.01s로 고정하였다.[12] 유동 감지모 주위에 형성되는 유동에 대해 해석한 결과를 Fig. 3에 나타냈다. Fig. 3(a)로부터 원거리장 유속 $u_0(t)$ 및 경계층 두께 δ_{BL} 은 정상 주기상태

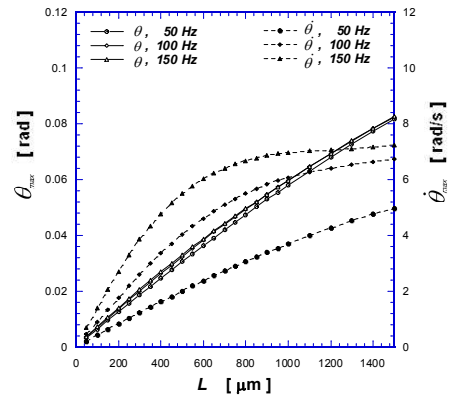
에 도달하는데 50 ms 정도가 걸리는 반면, 주기 운동의 효과는 약 20 ms 이후에 명확하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 2 및 Fig. 3(a)로부터 현재의 계산 기준조건에서는 감지모의 선단이 경계층 하부에 존재함을 쉽게 알 수 있다. 일반적으로 대표적인 조건에서 돌출된 섬유상 유동 감지모는 이를 지지하는 기질에 형성된 경계층 내부에 포함될 가능성이 매우 크다.

Fig. 3(b), Fig. 3(c)는 각각 최대 각도, 최대 각속도, 최대 각가속도를 각각 나타낸 것이다. 계산 조건에서 길이가 1000 μm 인 유동감지모의 최대 각도, 최대 각속도, 최대 각가속도는 평형상태에 도달한 정상 주기상태에서 각각 0.06 rad, 6.0 rad/s, 4000 rad/s^2 으로 나타났다. Barth 등[13]에 따르면 감지모에 연결된 감각세포의 반응 포텐셜은 이보다 훨씬 작은 값에서 나타나기 때문에 충분히 감지가 가능하다. Fig. 3(d)는 섬유상 감지모에 작용하는 회전 토크를 나타낸 것이다. 감지모에 작용하는 항력 및 부가질량의 영향을 감지모 길이를 따라 적분하여 구한 것으로 감지모 운동의 구동토크를 나타낸다. 여기서는 부가질량의 영향이 항력의 경우보다 약 13% 이하로 상당히 작지만 무시할 수는 없음을 알 수 있다.

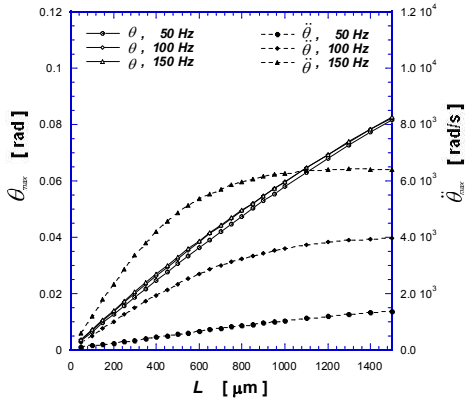
위의 계산 결과로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 유동감지모는 평균 평형각도를 중심으로 진동하고 자연환경에서 일반적인 속도의 유동은 수 ms 이내에 감지세포의 반응을 일으키기에 충분한 각도와 각속도를 가지며, 과도현상이 유동감지모의 반응특성에 영향을 미친다. 정상상태 주기유동은 원거리장에서의 속도에서 진동성분이 주된 영향을 미침을 알 수 있다. 또한 Stokes 항력이론[9]으로부터 Reynolds 수가 1보다 충분히 작으면 진동 주파수는 유동의 주파수와 동일하고, Reynolds 수가 1보다 커지면 Reynolds 수에 따른 항력의 비선형성에 의해 감지모 운동의 위상에도 영향을 끼치게 됨을 짐작할 수 있다. Fig. 3(e) 및 Fig. 3(f)는 각변위에 대한 각속도, 각가속도의 궤적을 표시하는 위상면도로서 각 점은 시스템의 상태를 나타내므로 전체적인 운동 상태를 파악할 수 있다. 즉, 원점에서 출발하여 시간이 경과함에 따라 시스템이 과도기적 경로를 거쳐 정상 주기상태에 도달하는 해의 궤적을 쉽게 확인할 수 있다. 이로부터 원거리장에서의 유속과 각변위, 각속도, 각가속도 사이에는 위상차가 존재하고, 정상 주기상태에서 대략적으로 각변위는 0.04 ~ 0.06 rad, 각속도는 -6.0 ~ 6.0 rad/s, 각가속도는 -4.0x10^3 ~ 4.0x10^3 rad/s^{2}임을 쉽게 알 수 있다.

3.3 감지모 길이에 따른 응답

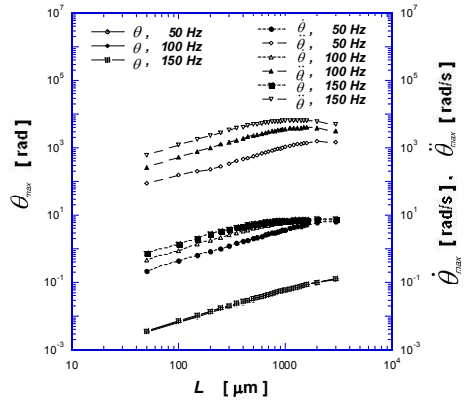
유동감지모의 직경이 5 μm이고, 유동의 진동



(a) Angular displacement and angular velocity

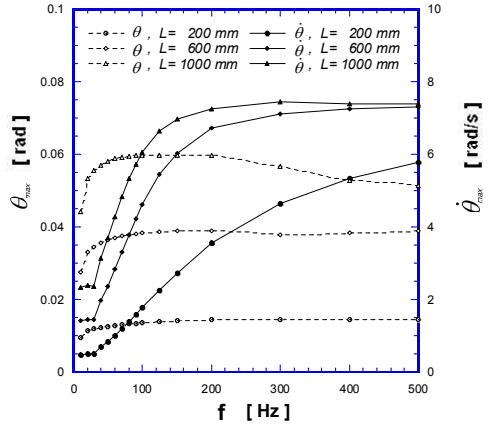


(b) Angular displacement and angular acceleration

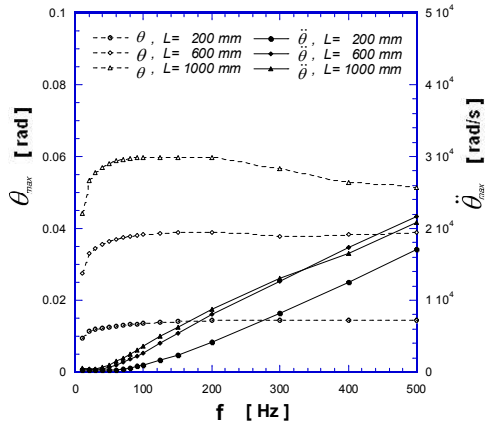


(c) Log-log scale

Fig. 4 Effects of hair length on the angular acceleration, angular velocity, angular displacements (L= 200 μm, 600 μm, 1000 μm)

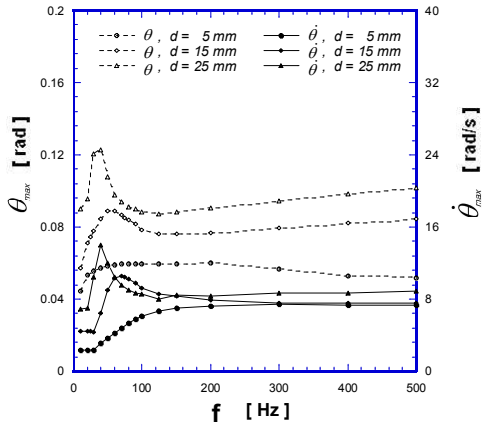


(a) Angular displacement and angular velocity

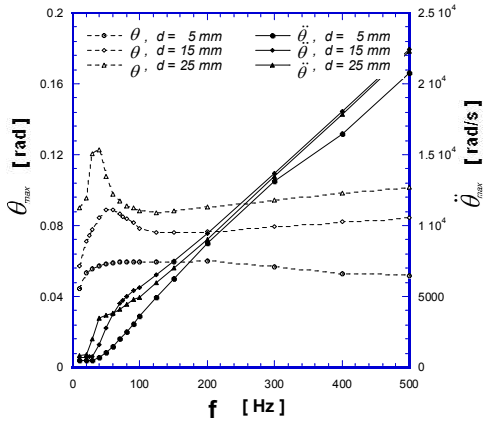


(b) Angular displacement and angular acceleration

Fig. 5 Hair movement responses in air as a function of flow oscillation frequency for different lengths (L= 200 μm, 600 μm, 1000 μm).



(a) Angular displacement and angular velocity



(b) Angular displacement and angular acceleration

Fig. 6 Hair movement responses in air as a function of flow oscillation frequency for different diameters (d= 5 μm, 15 μm, 25 μm)

주파수가 50 Hz, 100 Hz, 150 Hz 인 경우에 대해서 유동감지모의 길이에 따른 최대 각변위, 각속도, 각가속도의 변화를 Fig. 4에 나타냈다.

Fig. 4(a) 및 Fig. 4(b)는 각각 최대 각변위 및 최대 각속도, 최대 각가속도를 나타낸 것이다. 시각 및 y 좌표에 따른 유체속도의 분포가 유동감지모의 길이에 따른 응답특성에 미치는 영향을 나타낸 것으로, 감지모의 길이가 증가함에 따라 최대 각변위는 거의 선형적으로 증가하고 진동유동의 주파수의 영향은 미소함을 알 수 있다. 최대 각속도는 진동주파수가 높을수록 빨리 포화되는 경향을 나타내며, 진동주파수 150 Hz인 경우, 길이 약 1200 μm 부근에서 최대 각속도는 7.5 rad/s로 포화된다. 진동주파수가 낮을수록 포화되는 길이가 크게 증가하는 경향을 나타낸다. 최대 각가속도 역시 최대 각속도와 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있다. Fig. 4(c)는 로그-로그 좌표축을 사용하여 응답을 한 개의 그림에 명확하게 나타낸 것이다. 여기서 최대 각가속도, 최대 각속도, 최대 각변위의 크기를 비교해보면, 각가속도의 절대적인 값은 대략 각변위의 10^4 - 10^5 배, 각속도의 10^2 - 10^3 배 차이가 남을 알 수 있다. 따라서 응답 특성을 파악하기 위한 물리량의 측정시 값이 큰 각가속도, 각속도, 각변위의 순으로 유리하고 상대오차를 줄일 수 있으며, 최대 각변위는 감지모의 길이에 따른 영향은 크지만 측정주파수의 영향이 상대적으로 적음을 알 수 있다. 따라서 실제 측정방법의 선정 시에는 측정 범위 및 오차, 측정 용이성, 시스템의 크기 및 제작성 등을 종합적으로 검토하여 결정해야 함을 알 수

있다.

3.4 주파수에 따른 길이 및 직경의 영향

자극의 진동성분만으로 감지하는 방식을 선정하는 경우, 일반적으로 속도 감지식은 저주파수에 적합하고 가속도 감지식은 높은 가속도를 갖는 고주파수에 적합하다. 유동 감지모의 경우 보통 500 Hz 이하에서 기계적인 동조현상이 일어나고, 유속이 시간에 따라 정현함수로 변하지만 감지모의 응답을 결정하는데 있어서 가상질량에 의한 관성 모멘트는 공기 중에 있는 감지모의 공진 주파수에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.(5)

감지모의 운동진폭은 자극의 주파수 스펙트럼에도 크게 의존한다. 일반적으로 침입자나 먹이감이 일으키는 공기 중의 교란은 감지모에 도달할 때 대부분의 에너지가 낮은 주파수에 집중되는 것으로 알려져 있다.(3) 이러한 자극 스펙트럼의 특성 및 공기 중에 있는 감지모의 운동특성은 넓은 주파수 범위에서 감지모의 큰 변위를 초래한다. 이러한 주파수 판별은 감지모의 길이를 다르게 함으로써 서로 다른 주파수 범위에서 변위, 속도, 가속도 감지 기능을 할 수 있도록 한다. 회전토크와 각속도의 곱으로 표시되는 감지모 구동동력은 매질의 종류에 따라 다르고, 따라서 공기 중에서 감지모의 운동 및 반응 특성은 감지모의 길이 및 직경에 매우 민감하게 된다.

혼합유동(u_{mean}=60 mm/s, u_{osc}=10 mm/s)에서 유동감지모의 길이가 200 μm, 600 μm, 1000 μm인 경우, 진동유동 주파수에 따른 각변위, 각속도, 각가속도를 Fig. 5에 나타냈다. 진동유동의 주파수가 증가함에 따라 최대 각변위는 급격히 증가한 다음 100Hz 부근에서 포화됨을 알 수 있고, 감지모 길이에 비례해서 최대 각변위가 증가함을 알 수 있다. 최대 각속도는 길이가 길수록 빨리 포화되는 경향을 나타내며, 길이 1000 μm 인 유동감지모의 최대 각속도는 약 200 Hz 부근에서 7.5 rad/s로 포화된다. 길이가 짧을수록 포화되는 주파수가 크게 증가하지만 상대적인 각속도의 크기는 낮아지는 경향을 나타낸다. 각가속도는 주파수가 증가함에 따라 급격히 증가하는 특성을 나타내며, 고주파수에서는 시간증분에 민감한 것으로 나타났다. Fig. 5(a)에서 진동유동 주파수 20Hz 이하에서 편평한 특성을 나타내는 것은 과도함수 $h(t)$의 영향임을 확인하였다.

한편, 혼합유동(u_{mean}=60 mm/s, u_{osc}=10 mm/s)에서 유동감지모의 직경이 5 μm, 15 μm, 25 μm인 경우, 진동유동 주파수에 따른 각변위, 각속도, 각가속도 등의 응답특성을 Fig. 6에 나타냈다. 직경이 증가하는 경우에도 직경의 증가에 따라 관성모멘트가 증가하고, 회전토크도 증가하여 주파수 증가에 따라 나타나는 응답특성은 길이가 증가하는 경우와 대체로 유사할 것으로 짐작할 수 있다. 그러나 Fig. 6(a)에서 알 수 있는 바와 같이 진동유동 주파수의 증가에 따라 유동 감지모의 직경이 5 μm인 경우에는 나타나지 않던 최대 각변위 및 최대 각속도의 피크가 나타나는데 이는 공진현상을 나타내는 주파수가 존재함을 의미한다. 직경이 증가함에 따라 이 공진주파수는 낮아지는 경향을 나타내고, 최대 각변위 및 최대 각속도의 피크치는 급격히 증가하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 따라서 생체모방 정밀기계 감지시스템의 개발에서 측정방법의 선정 시에는 공진현상을 이용할 것인지 회피할 것인지 여부에 따라 센서의 설계 및 제작, 측정시스템의 선정 및 구성 등(14,15)에 여러 가지 세심한 주의를 기울여야 함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 생물의 감각기능을 모방하고 인공 유동감지모의 제작을 위한 설계 모델링을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 정상상태 및 주기 유동이 공존하는 복합유동 상태에서 시간에 따른 경계층의 두께, 인공감지모의 거동, 주파수 변화에 따른 응답특성을 예측하였다.

(2) 공기 중에서 감지모의 운동 및 반응 특성은 감지모의 길이 및 직경에 매우 민감하였고, 수행한 계산 기준조건에서 최대 각가속도, 각속도 및 각변위는 각각 0.06 rad, 6.0 rad/s, 4000 rad/s^2 으로 나타났다.

(3) 주어진 유동 중에 있는 감지모의 운동특성은 감지모의 길이, 직경을 다르게 함으로써 서로 다른 주파수 범위에서 변위, 속도, 가속도의 감지가 가능하다.

(4) 진동유동 성분이 없거나 진동 주파수가 낮을수록 각변위를 측정하는 것이 유리하고 진동

주파수가 높을수록 각속도 및 각가속도의 측정이 상대적인 측정오차를 줄일 수 있다.

(5) 측정시스템 구성 시에는 매개변수해석을 통하여 공진현상의 이용 또는 회피 여부에 세심한 주의를 기울여야 한다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-J03002)을 받아 수행된 연구입니다. 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Nguyen, N. T., 2006, Fundamentals and Applications of Microfluidics, Artech House.

(2) Shimozawa, T., Kumagai, T. and Baba, Y., 1998, "Structural Scaling and Functional Design of the Cercal Wind-Receptor Hairs of a Cricket," *J. Comp. Physiol., A,* Vol. 183, No. 2, pp. 171~186.

(3) Barth, F. G., Humphrey, J. A. C. and Secomb, T. W., 2003, Sensors and Sensing in Biology and Engineering, Springer-Verlag.

(4) Bathellier, B., Barth, F. G., Albert, J. T. and Humphrey, J. A. C., 2005, Viscosity-Mediated Motion Coupling Between Pairs of Trichobothria on the Leg of the Spider Cupiennius Salei, *J. Comp. Physiol. A,* Vol. 191, pp. 733~746.

(5) Barth, F. G., Wastl, U., Humphrey, J. A. C., and Devarakonda, R., 1993, "Dynamics of aRthropod Filiform Hairs II. Mechanical Properties of Spider Trichobothria," *Philos. Trans., Biol. Sci.,* Vol. 340, No. 1294, pp. 445~461.

(6) Chen, N., Tucker, C., Engel, J., M., Yang, Y., Pandya, S., and Liu, C., 2007, Design and Characterization of Artificial Haircell Sensors for Flow Sensing with Ultrahigh Velocity and Angular Sensitivity, *J. of MEMS,* Vol. 16, No. 5, pp. 999~1014.

(7) Krijnen, G. J. M., Dijkstra, M., van Baar J. J., Shankar, S. S., Kuipers, W. J., de Boer, R. J. H., Altpeter, D., Lammerink, T. S. J., and Wiegerink, R., 2006, MEMS Based Hair Flow-Sensors as Model Systems for Acoustic Perception Studies, *Nanotechnology,* Vol. 17, S84~89.

(8) Humphrey, J. A. C., Devarakonda, R., Iglesias, I., and Barth, F. G., 1993, "Dynamics of Arthropod Filiform Hairs. I. Mathematical Modeling of the Hair and Air Motions," *Philos. Trans. Roy. Soc. Lond.,* Vol. B340, pp. 423~444.

(9) Barth, F. G., Humphrey, J. A. C., and Voss, K., 2001, "The Motion Sensing Hairs Of Arthropods: Using Physics to Understand Sensory Ecology And Adaptive Evolution," Ecology of Sensing, F. G. Barth and A. Schmid, Eds., Springer-Verlag.

(10) Newman, J. N., 1977, Marine Hydrodynamics, MIT Press.

(11) Kim, C-.J., 2007, An Introduction to the Numerical Analysis, 3rd ed., Pan Korea Book Corporation.

(12) Casas, J., and Simpson, S. J., 2008, Advances in Insect Physiology - Insect Mechanics and Control, Vol. 34, Elsevier.

(13) Barth, F. G., Humphrey, J. A. C., Wastl, U., Halbritter, J. and Brittinger, W., 1995, "Dynamics of Arthropod Filiform Hairs III. Flow Patterns Related to Air Movement Detection in a Spider," *Philos. Trans. R. Soc. London,* Vol. 347, pp. 397~412.

(14) Park, B. K. and Lee, J. S., 2009, "Measurements of Thermal Characteristics for a Micro-Fabricated Thermal Mass Air Flow Sensor with Real-Time Controller," *Transactions of the KSME B*, Vol. 33, No. 8, pp. 573~579.

(15) Harley, J. A. and Kenny, T.W., 2000, "1/F Noise Considerations for the Design and Process Optimization Of Piezoresistive Cantilevers," *J. MEMS,* Vol. 9, No. 2, pp. 226~235.

(16) Park, B. K. and Lee, J. S., 2008, "Micro-fabrication and Thermal Characteristics of a Thermal Mass Air Flow Sensor for Real-Time Applications," *Transactions of the KSME B*, Vol. 32, No. 7, pp. 542~548.

(17) Lorenz, H., Despont, M., Fahrni, N., LaBianca, N., Renaud, P., and Vettiger, P., 1997, "SU-8: A Low-Cost Negative Resist for MEMS," *J. Micromech. Microeng.,* Vol.7, No.3, pp. 121~124.

(18) Yu, X., Thaysen, J., Hansen, O., and Boisen, A.,

2002, "Optimization of Sensitivity and Noise in Piezoresistive Cantilevers," *J. Appl. Phys.,* Vol. 92, No.10, pp. 6296~6301.

(19) Kumagai, T., Shimozawa, T., and Baba, Y., 1998, "The Shape of Wind-Receptor Hairs of Cricket and Cockroach," *J. Comp. Physiol. A,* vol. 183, No. 2, pp. 187~192.

(20) Bhusan, B., 2009, "Biomimetics: Lessons from Nature - an Overview," *Philos. Trans. Roy. Soc., Mathematical, Physical, & Engineering Sciences,* Vol. A367, pp. 1445~1486.

(21) Telionis, D. P., 1981, Unsteady Viscous Flows, Springer-Verlag.

(22) Barth, F. G., 2004, "Spider Mechanoreceptors," *Curr. Opin. Neurobiology,* Vol. 14, pp. 415~422.