

인공 감각모의 동적 거동에 미치는 진동유동의 영향

박 병 규^{*†} · 이 준 식^{**}

* 서울대학교 정밀기계설계공동연구소, ** 서울대학교 기계항공공학부

Effects of Oscillating Flow on the Dynamic Behavior of an Artificial Sensory Hair

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 May 26, 2011 ; Revised June 9, 2011 ; Accepted June 10, 2011)

Key Words: Oscillating Flow(진동유동), Flow Sensor(유동 센서), Artificial Sensory Hair(인공 감각모), Modulus of Elasticity(탄성계수), Response Characteristics(응답 특성)

초록: 주위 매질의 움직임에 반응하는 섬유상 감각모는 대부분의 생물체에 존재하여 먹이, 침입자, 또는 동족 여부를 감지하는 역할을 한다. 이 기능을 모방한 인공 감각모를 설계 제작하기 위하여 유연 감각모를 기초로 한 수학모델을 제안하고, 작동영역에서의 응답특성을 파악하기 위하여 매개변수 해석을 수행하고 각 인자들의 영향을 고찰하였다. 유동 감각모의 변위를 일반화 좌표 및 고유 진동모드로 나타낸 결과, 탄성계수가 비교적 큰 Cytop 감각모의 경우 고유진동의 기본모드가 지배적인 것으로 나타났다. 주어진 유동 중에 있는 감각모의 동적거동은 형상에 크게 의존하였다. 또한 탄성계수가 큰 인공 감각모에서는 생물학적으로 중요한 주파수 범위 내에서 공진현상은 나타나지 않았다.

Abstract: Filiform hairs that respond to movements of the surrounding medium are the mechanoreceptors commonly found in arthropods and vertebrates. The hairs function as a sensory system for perceiving information produced by prey, predators, or conspecifics. A mathematical model is proposed, and the parametric analyses for the response of artificial filiform hair are conducted to design and predict the performance of a microfabricated device. The results for the Cytop hair, one of the most popular polymer optical fibers (POFs), show that the fundamental mode has a dominant effect on the hair behavior in an oscillating medium flow. The dynamic behavior of sensory hair is also dependent on the physical dimensions such as length and diameter. It is found that the artificial hair with a high elastic modulus does not show a resonance in the biologically important frequency range.

- 기호설명 -

- d_h : 감각모의 직경 [m]
- E : 탄성계수 [Pa]
- f : 외부유동 주파수 [Hz]
- I : 단면 2차 관성모멘트 [m⁴]
- h : 시간변동 함수, 정의식 (11) [-]
- L : 감각모의 길이 [m]
- $q_n(t)$: n차 모드 일반화 좌표 [-]
- $\dot{q}_n(t)$: n차 모드 일반화 좌표 변화율 [-/s]

- R : 감각모의 내부 감쇠계수 [Nm·s/rad]
- S : 감각모의 내부 기계강성계수 [Nm/rad]
- s : 무차원 진동수, 정의식 (6) [-]
- u_f : 유체의 유동속도 [m/s]
- u_r : 상대속도 (= $u_f - \dot{w}(x,t)$) [m/s]
- u_0 : 외부 진동유동 속도의 진폭 [m/s]
- w : 감각모의 변위 [m]
- \dot{w} : 감각모의 속도 [m/s]

그리스문자

- δ_{ibl} : 계면경계층 두께 [m]

[†] Corresponding Author, bkpark@snu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

ν	: 동점성계수 [m^2/s]
ρ	: 유체의 밀도 [kg/m^3]
ρ_h	: 감각모의 밀도 [kg/m^3]
τ	: 시정수 [s]
ω	: 외부유동의 각속도 ($=2\pi f$) [rad/s^2]

하첨자

ρ	: 유체 밀도에 의한 성분
μ	: 유체 점성에 의한 성분

1. 서 론

최근 반도체제조 공정기술이 확산됨에 따라 이를 이용한 고정밀 초소형 유동센서가 개발되고 있다. 특히, 생물체의 감각체계를 모방하고 개량 실현하기 위한 소위 생체모방 감지시스템 기술이 주목받고 있다.⁽¹⁻³⁾ 곤충을 비롯한 많은 생명체는 감각기관을 이용하여 침입자의 접근을 감지하거나 먹이감을 탐지하지 못하면 자신의 생존이 위태롭게 되기 때문에 감지기능이 매우 발달되어 있다. 생물체의 이러한 정교한 감각기관은 헤어셀(hair cell)과 같이 외부자극에 대한 수용기를 포함하는 특화된 세포를 가지고 있고 이 세포들은 신경세포와 연결되어 신호를 뇌로 전달한다.

생물체의 감각모는 그 특성 및 기능에 따라 다양한 크기로 분포되어 있으며, 일반적으로 단면적이 작아서 가늘고 긴 형상을 하고 있다. 절지동물의 섬유상 헤어셀을 모방하기 위하여 멤스(MEMS) 공정으로 가능한 구조로 설계 제작하는 연구가 시도되어 왔다. Shimozawa 등⁽⁴⁾은 스프링 및 댐퍼로 이루어진 강체모형을 이용한 선도적인 연구를 수행하였고, Krijnen 등⁽⁵⁾은 Stokes 유동에 의해 여기되는 시스템의 응답거동을 예측하였다. Humphrey 등⁽⁶⁾은 원기둥 표면에 평행한 유체의 진동유동을 고려한 해를 구하였으며, 낮은 주파수 영역에서 공진이 발생할 수 있음을 밝혔다. Liu 등⁽¹⁾은 감각모 선단에 집중력 및 모멘트가 작용하도록 센서를 설계 제작하고 정상상태 거동을 고찰하였다.

본 연구에서는 생물체에 널리 존재하는 섬유상 감각모를 모사하여 기계적 운동 특성을 파악하고 성능이 우수한 유연 재질의 유동 감각모 센서를 설계 제작하는데 필요한 자료들을 확보하고자 한

다. 따라서 유연보(flexible beam)를 기초로 한 수학적모형을 제안하고 매개변수 해석을 통하여 거동을 고찰한다.

2. 섬유상 유연 감각모 모델 및 해석

2.1 감각모 해석 모델

생물의 섬유상 감각모는 주위 환경으로부터 오는 미세한 유동변화나 음파의 진동이 감각 수용기의 변위나 속도, 진동 주파수로 변환되어 신경세포로 전달된다. 거미와 같은 절지동물의 섬유상 감각모(hair sensilla)는 크게 강체특성을 갖는 강성 감각모(trichobothrium)와 촉모와 같은 유연감각모의 2가지로 나눌 수 있다.⁽²⁾ 일반적으로 강성 감각모 센서는 유속이나 진동 주파수 변화에 따른 점성력에 의해 구동되는 강체모형로서 해석되고, 촉모는 접촉력에 의해 구동되는 모델로서 해석되고 있다. 그러나 확대현미경사진에 의하면 감각모는 가는 줄기주위에 밀집한 가지로 구성되어 있어서 유연성을 가질 수 있다. 이를 근거로 기존의 강체모형 대신 근사적으로 유연보로 해석할 수 있는 유동 감각모 해석모형을 제안한다.

진동유동에 의해 야기되는 유연한 섬유상 감각모의 변위에 대한 해석을 수행하기 위해 다음과 같이 가정한다. 유체는 비압축성, 균일 물성, 진동유동이고, 운동량 전달에서 비선형 관성효과는 무시한다. 또한 감각모에 작용하는 유체 점성력은 일방향 결합(one way coupling)으로 가정한다. 자연상태에서 다른 생물의 움직임으로 인한 감각모 주위의 유동은 비정상상태 주기유동이라고 가정한다. 이 비정상상태 유동장에 놓여 있는 유연감각모 센서의 거동을 특성화하기 위해서 Fig. 1과 같은 모델을 사용한다. 즉, 유연감각모의 형상은 단면적이 일정하고, 세장비가 큰 원기둥 형태로서 하부 선단은 기질에 고정되고 상부 선단은 움직임이 자유로운 탄성 외팔보로 가정한다. 변위가 작은 경우 선형 외팔보로 가정하면, 진동하는 점성 유동장에 감각모가 놓여 있을 때, 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI(x) \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \right] + \rho A(x) \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} + R \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} + S w(x,t) - P \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} = f(x,t) \quad (1)$$

식 (1)에서 $w(x,t)$ 는 유연 감각모 센서의 측방향 변위이고, E, I, ρ, A 는 각각 유연 감각모 센서의 탄성계수, 단면 2차모멘트, 밀도, 단면적을 나타낸다. 우변의 $f(x,t)$ 는 인공 감각모 길이방향으로 거리가 x 인 지점에서 주위 유체의 상대운동에 의해 감각모에 법선방향으로 작용하는 단위길이 당 힘으로서 다음과 같이 점성 및 밀도에 의한 항들로써 나타낼 수 있다.⁽⁶⁾

$$f(x, t) = F(\mu, u_r) + F(\mu, \dot{u}_r) + F(\rho, \dot{u}_r) \quad (2)$$

$$= 4\pi\mu G u_r - \frac{\pi\mu G \dot{u}_r}{2gf} + \frac{\pi\rho d^2 \dot{u}_r}{4}$$

본 해석 모델의 경우 지배방정식 (1)에서 S, P를 포함하는 항은 충분히 작아서 무시할 수 있는 것으로 가정한다. 또한 감각모에 작용하는 힘은 식 (2)에서 외부유동의 유속과 감각모의 상대속도 $u_r (= u_f(x,t) - \dot{w}(x,t))$ 로 표시되어 있음을 주목할 필요가 있다. 식 (2)의 우변 두 번째 및 세 번째 항은 각각 부가질량⁽⁷⁾ 또는 가상질량과 관련된 양이다. 식 (2)를 식 (1)에 대입하고 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$EI \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + \left\{ \frac{\rho_h \pi d_h^2}{4} + \frac{\rho_f \pi d_f^2}{4} - \frac{\pi\mu G}{2gf} \right\} \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2}$$

$$+ (R + 4\pi\mu G) \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} \quad (3)$$

$$= 4\pi\mu G u_f + \left(\frac{\pi\rho_f d_f^2}{4} - \frac{\pi\mu G}{2gf} \right) \dot{u}_f$$

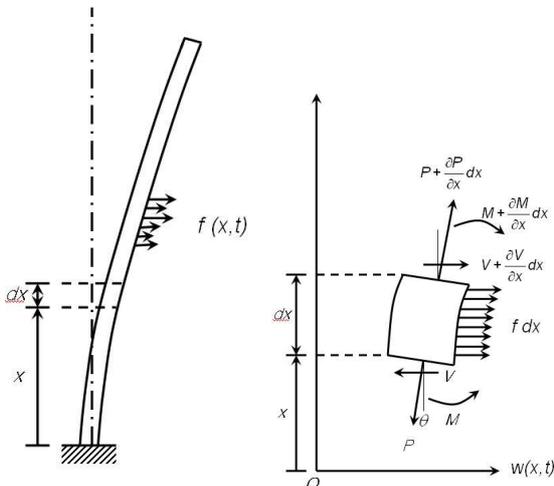


Fig. 1 Schematic model of filiform flow sensor

여기서 G, g, s, f 는 각각 다음과 같다.

$$G = -\frac{g}{(g^2 + \pi^2/16)} \quad (4)$$

$$g = 0.577 + \ln(s) \quad (5)$$

$$s = \left(\frac{d}{4} \right) \left(\frac{2\pi f}{v} \right)^{0.5} \quad (6)$$

$$f = \omega/2\pi \quad (7)$$

질량과 관련이 있는 식 (3)의 좌변 두 번째 항에서 괄호안의 첫 번째 항은 유연 감각모의 질량에 의한 것이고, 두 번째 항은 구조체 및 유체의 밀도차에 의해 배제된 유체에 의한 것으로 공기 중의 유연 감각모에서는 매우 작다. 세 번째 항은 여기진동수에 의존한다. 또한 식 (3)에서 진동유동에 의한 외부 유체의 속도 분포에 대한 정보가 필요하다. 생물체의 감각모는 기하학적 형상 및 기계적인 물성치의 변화가 크기 때문에 식 (3)를 이용한 응답은 정성적으로만 파악할 수 있고, 또한 상당부분을 실험 자료에도 의존해야 한다. 실제 모근 내에 있는 감각모의 감쇠계수 R의 영향을 살펴보기 위하여 아래의 Humphrey 등⁽⁶⁾에 의한 실험 상관관계식을 사용한다.

$$R = 2.031 \times 10^{-9} L^{1.909} \quad (8)$$

2.2 해석 방법

전술한 지배방정식의 해는 감각모의 하단이 기절에 고정되고 상단은 움직임이 자유로운 외팔보의 특성함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} W_n(x) q_n(t) \quad (9)$$

여기서 $W_n(x)$ 는 n차 모드 특성함수이고, $q_n(t)$ 는 n차 모드의 일반화 좌표이다. 특성함수의 성질을 이용하여 지배방정식을 정리하면, 연립 초기치 상미분 방정식으로 변환할 수 있고, 변위 및 속도가 0인 초기조건을 사용하여 수치적으로 계산할 수 있다. 그러나 이 식은 매우 강성이 크므로 원하는 정밀도를 얻기 위해서는 적절한 스텝크기 제어 및 오차 제어 알고리즘을 사용해야 한다.⁽⁸⁾

모든 계산에 사용한 물성치들은 300 K에서의 값을 사용하였고, 유연 감각모의 재질은 Cytop

으로 탄성계수는 $E = 1.0 \text{ GPa}$ 으로 가정하였다. 참고로 공정조건에 따라 크게 달라지는 PDMS (poly-dimethyl siloxane)의 탄성계수는 $E = 1.7 (0.05 \sim 3.8) \text{ MPa}$ 이다.⁽⁹⁾ 계산의 기준조건으로 감각모의 직경은 $5 \mu\text{m}$, 길이는 $1000 \mu\text{m}$, 진동유동의 진폭은 10 mm/s , 주파수는 100 Hz 로 설정하고 각 매개변수의 영향을 고찰하였다.

2.3 유체의 속도분포

곡률이 있는 기질면 상부에 위치한 유동 감각모의 경우 진동하는 유동은 기질면에서의 Strouhal 수, 진동 Reynolds 수에 의존하고, 따라서 외부유동 Reynolds 수, 스트리밍 Reynolds 수에 의존한다.⁽¹⁰⁾ 생물학적으로 의미있는, 예를 들면, 직경이 2 mm 인 거미다리에 있는 유모세포의 경우, 표면근처의 속도가 기질면의 곡률에 의한 스트리밍 경계층에도 의존한다. 정확한 속도분포는 너무 복잡하게 상호작용하여 매개변수의 영향을 파악하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 기질면의 곡률이 감각모의 곡률에 비해 충분히 큰 경우에 대하여 진동유동의 고체표면에 형성되는 진동유동 경계층과 외부 경계층을 계면경계층(interface boundary layer) 개념으로 포괄하여 유속 분포를 다음과 같이 가정한다.

$$u_f(t, x) = h(t) u_o \left[\sin \omega t - \exp\left(-\frac{x}{\delta_{ibl}}\right) \cdot \left\{ \sin\left(\omega t - \frac{x}{\delta_{ibl}}\right) \right\} \right] \quad (10)$$

$$h(t) = \frac{2}{1 + e^{-t/\tau}} - 1 \quad (11)$$

여기서 $h(t)$ 는 초기 과도함수, 시정수 τ 는 0.01 s 로 하였고, δ_{ibl} 은 계면경계층 두께로서 다음 식으로 나타낸다.

$$\delta_{ibl} = 4.6 \left(\frac{2\nu}{\omega} \right)^{0.5} \quad (12)$$

이다. 따라서 유동주파수가 일정한 경우 정상상태 주기유동의 경계층 두께는 시간에 따라 변하지 않는다.

3. 결과 및 고찰

3.1 과도상태 진동유동

주유동에 평행한 기질면에 수직으로 돌출되어

있는 섬유상 유연 감각모는 길이 $1000 \mu\text{m}$, 직경 $5 \mu\text{m}$ 인 원기둥으로 설정하고 비정상상태 주기진동유동에 의한 섬유상 유동 감각모의 응답에 대해 해석하였다.

유모세포에 역학적인 힘을 공급하는 유동 감각모는 크기가 매우 작은 유연 외팔보로서 고유진동모드로 나타낼 수 있고, 유연 감각모의 운동은 근사적으로 이 고유함수와 시간에 따라 변하는 일반화된 좌표들의 조합으로 나타낼 수 있다⁽¹¹⁾. 이 비정상상태 진동유동에 의한 유연 감각모의 동특성 해석 결과를 각 고유진동모드의 일반화된 좌표 및 변화율로 Fig. 2에 나타냈다. 이로부터 유속이 정상 주기상태에 도달하는데 약 30 ms 정도가 걸리는 것을 알 수 있다. Fig. 2(a)에서는 진동모드별 일반화된 좌표에 미치는 영향의 상대적인 크기를 나타낸 것으로, 특히 가장 낮은 고유진동모드가 유연한 감각모의 거동을 좌우함을 쉽게 알 수 있다. 이 Cytop 감각모의 해석결과를 PDMS의 경우와 비교해 보면, 탄성계수가 클수록 고차모드의 영향이 현저히 줄어들음을 알 수 있다. Fig. 2(b)에서는 진동모드별 일반화된 좌표 변화율에 미치는 영향의 크기를 나타낸 것으로, 가장 낮은 고유진동모드가 유연한 감각모의 속도를 좌우하며, 0.1 s 에서는 변위와는 위상차가 뚜렷하게 나타남을 쉽게 확인할 수 있다. 평형상태에 도달한 정상 주기상태에서 길이가 $1000 \mu\text{m}$ 인 유동 감각모의 일반화 좌표 및 그 변화율은 각각 1.0×10^{-6} , $5.0 \times 10^{-4} / \text{s}$ 로 나타났다. 일반적으로 돌출된 섬유상 유동 감각모의 길이가 기질에 형성된 계면경계층 두께와 유사한 크기 부근에서 민감도가 매우 크다.

Fig. 3은 시간에 따른 감각모의 대표적인 점들의 거동을 나타낸 것이다. 주기 진동유동에 의해 유연한 유동 감각모가 정지된 초기조건에서 과도상태가 진행되는 동안 대표적인 위치, 즉, $0.00L$, $0.25L$, $0.50L$, $0.75L$, $1.00L$ 에서의 변위 및 속도를 나타낸 것이다. 변위가 최대일 때 속도의 크기가 최소가 되고 변위가 0일 때 속도가 최대가 됨을 확인할 수 있다. PDMS와 같이 탄성계수가 낮은 유동 감각모는 위치에 따라 위상차가 다르게 나타나지만,⁽¹²⁾ Cytop의 경우 탄성계수가 상당히 커서 위치에 따른 위상차가 거의 없음을 알 수 있다. 기준조건에서 정상 주기상태에서 감각모 선단에서의 최대 변위 및 속도는 각각 대략 $-2.4 \sim 2.4 \mu\text{m}$, $-1.5 \sim 1.5 \text{ mm/s}$ 로 나타났다.

정상상태에 도달할 때까지의 유연 감각모의 위치

를 일정시간간격으로 연속적으로 나타내면, PDMS의 경우 종모양⁽¹²⁾이지만, Cytop의 경우 Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이 원추모양이 됨을 알 수 있다.

3.2 감각모 길이의 영향

유동의 진동 주파수가 50 Hz, 100 Hz, 150 Hz 인 경우에 대해서 유동 감각모의 길이에 따라 정

상상태 주기운동에 도달할 때까지의 최대 변위, 최대 속도의 변화를 Fig. 5에 나타냈다. 감각모의 길이가 증가함에 따라 최대 변위 및 속도는 증가하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. Fig. 5(a)에서 감각모의 길이가 1500 μm 이하에서는 주파수가 높은 경우 감각모 길이에 따라 최대 변위가 빠르게 증가한다. 그러나 감각모 길이가 2000 μm 일 때 진동 주파수 150 Hz의 최대 변위가 50 Hz의 경우보다도 작아지는 역전현상이 나타남을 알 수 있다. Fig. 5(b)에서 최대 속도는 감각모 길이에 따라 뚜렷한 차이를 나타내고, 전체적인 거동은 최대 변위의 경우와 같이 증가 경향을 나타낸다. 그러나 진동주파수 150 Hz인 경우, 감각모 길이에 따라 급격히 증가한 다음 증가율이 둔화되어, 감각모 길이가 약 2000 μm 부근에서 최대 변위

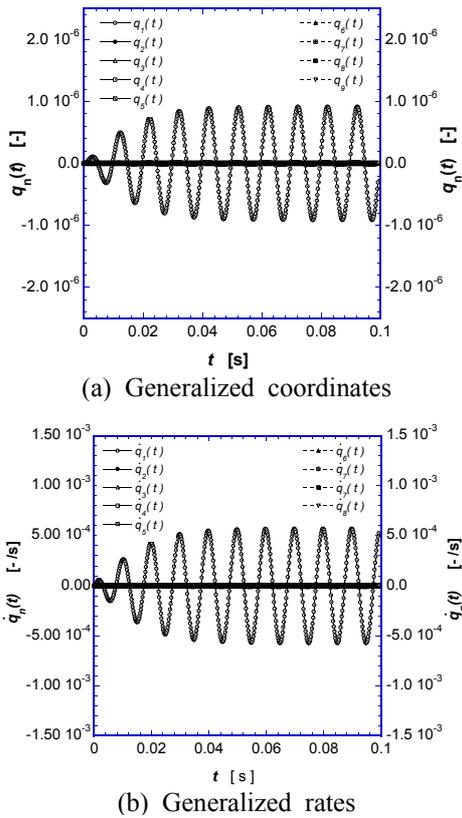


Fig. 2 Transient response in the n^{th} normal modes ($u_o = 10 \text{ mm/s}$)

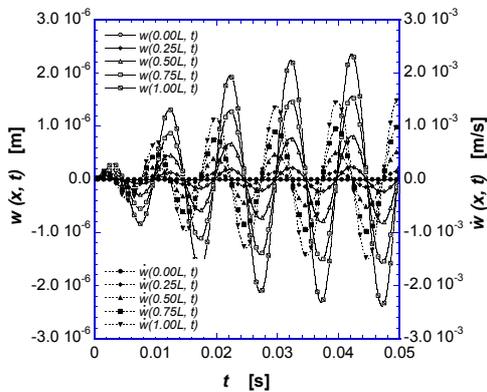
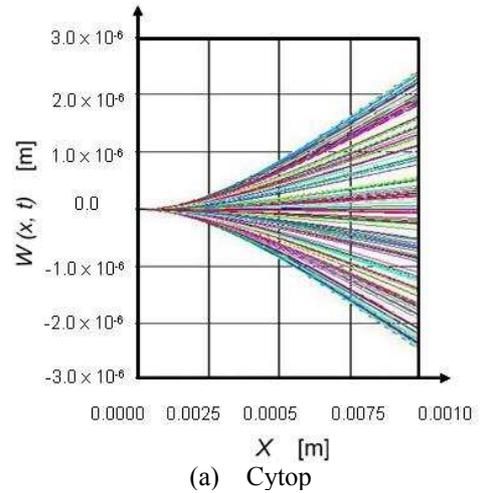
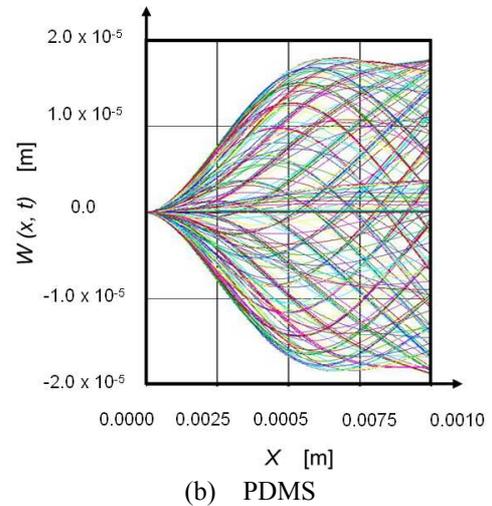


Fig. 3 Transient behavior of the Cytop filiform hair ($f = 100 \text{ Hz}$)



(a) Cytop



(b) PDMS

Fig. 4 Development of motion profile of the filiform hair

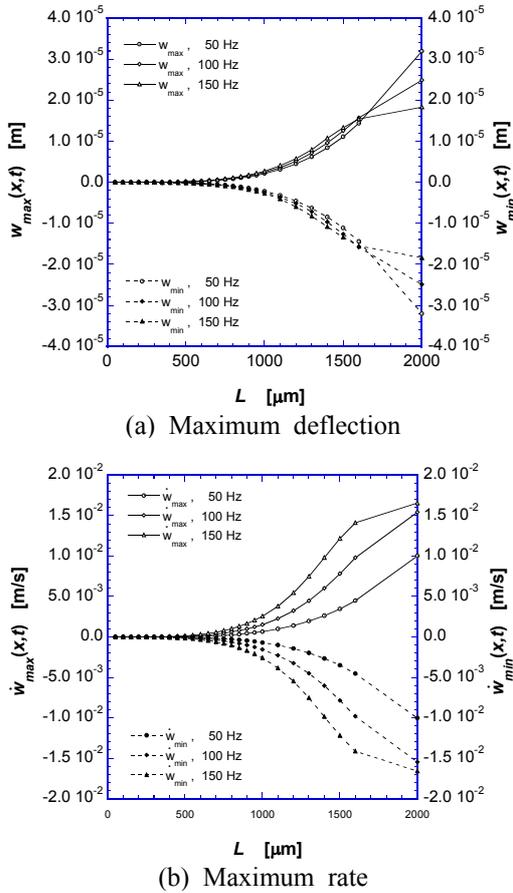


Fig. 5 Effects of Cytop hair length on the maximum deflection and rate ($f = 50 \text{ Hz}, 100 \text{ Hz}, 150 \text{ Hz}$)

는 $20 \mu\text{m}$ 로 포화되고, 최대속도는 17 mm/s 정도로 증가율이 둔화되는 것으로 나타났다. 진동 주파수가 낮은 50 Hz 의 경우에는 길이에 따라 증가율이 계속적으로 커지는 특성을 나타냈다.

3.3 감각모 직경의 영향

유연 감각모의 직경이 $5 \mu\text{m}, 10 \mu\text{m}, 15 \mu\text{m}$ 로 변할 때, 진동유동 주파수가 최대 변위 및 최대 속도에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타냈다. 공진주파수 특성을 나타내는 강체 감각모⁽⁶⁾ 및 PDMS 유연 감각모의 경우와는 달리 Cytop의 경우에는 Fig. 6(a)에서 알 수 있는 바와 같이 진동 유동 주파수가 생물학적으로 의미가 있는 500 Hz 까지는 단조 증가하고 공진에 의한 피크는 나타나지 않았다. 생물학적으로 의미가 있는 영역은 수직접선의 왼쪽(500 Hz 이하)으로 알려져 있다. 높은 주파수(800 Hz 이상)에서 조금 불안정한 거동을 나타내는데 이에 대해서는 향후 추가적인

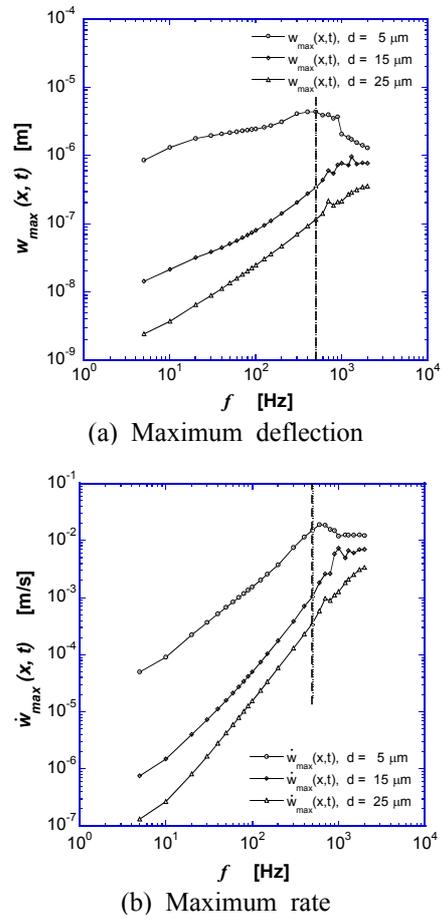


Fig. 6 Effects of flow oscillation frequency on the maximum deflection and rate of Cytop hair ($d_h = 5 \mu\text{m}, 15 \mu\text{m}, 25 \mu\text{m}$)

연구가 필요한 것으로 생각된다. 또한 진동유동 주파수가 유연 감각모의 최대 속도에 미치는 영향을 Fig. 6(b)에 나타냈으며, 500 Hz 이하에서는 진동유동 주파수에 따라 단조 증가하는 것으로 나타났다. 본 계산조건하에서는 탄성계수가 큰 인공 감각모의 경우 뚜렷한 공진현상은 확인되지 않았다. 따라서 실제 감각모 센서의 설계 제작시에는 직경 및 길이, 재질, 외부유동 주파수, 측정 범위 및 오차, 측정 방법 등을 주의깊게 결정해야 함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 생물의 감각기능을 모방한 유연한 인공 유동 감각모의 제작을 위한 설계 모델링을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유연성이 있는 유동 감각모에 대한 세장보

모델을 제시하고 과도 및 정상 상태 주기유동에서 시간에 따른 응답특성을 예측하였다.

(2) 유동 감각모의 변위를 일반화 좌표 및 고유진동모드로 나타낸 결과, 탄성계수가 클수록 고차 함수의 영향이 급격히 줄어든다.

(3) 주어진 유동 중에 있는 감각모의 동적거동은 감각모의 길이, 외부매질유동의 주파수에 크게 의존한다. 정상상태 주기유동에서 탄성이 높은 감각모의 운동특성은 원추모양을 형성한다.

(4) 공기 중에서 감각모의 최대변위는 감각모의 물성에 매우 민감하고, 주파수가 증가함에 따라 감각모 직경이 클수록 주파수의 영향이 크게 나타난다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-J03002)을 받아 수행된 연구입니다. 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Liu, C., 2007, Micromachined Biomimetic Artificial Haircell Sensors, *Bioinsp. & Biomim.* Vol. 2, s162-9.
- (2) Barth, F. G., Humphrey, J. A. C. and Secomb, T. W., 2003, Sensors and Sensing in Biology and Engineering, Springer-Verlag.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) Newman, J. N., 1977, Marine Hydrodynamics, MIT Press.
- (8) Kim, C.-J., 2007, An Introduction to the Numerical Analysis, 3rd ed., Pan Korea Book Corporation.
- (9) Fuard, D., Tzvetkova-Chevolleau, T., Decossas, S., Tracqui, P. and Schiavone, P., 2008, "Optimization of PDMS Substrates for Studying Cellular Adhesion and Motility," *Microelectronic Engineering*, Vol. 85, pp. 1289~1293.
- (10) Telionis, D. P., 1981, Unsteady Viscous Flows, Springer-Verlag.
- (11) Kays, W.M. and Crawford, M.E., 1980, Convective Heat and Mass Transfer, 2nd ed., McGraw Hill.
- (12) Park, B.K. and Lee, J.S., 2011, Dynamic Behavior of Flexible Sensory Hair in an Oscillating Flow, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Submitted.
- (13) 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.
- (14) 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.
- (15) 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.
- (16) Casas, J. and Simpson, S. J., 2008, Advances in Insect Physiology - Insect Mechanics and Control, Vol. 34, Elsevier.
- (17) Barth, F. G., 2004, "Spider Mechanoreceptors," *Curr. Opin. Neurobiology*, Vol. 14, pp. 415~422.