03E10

촉감 메카니즘 해석을 위한 손끝의 동적 점탄성 반응

한은경, 권영하
경희대학교 섬유공학과

1. 서론

신체 보호와 체온유지를 담당하는 피부는 인체 최대의 감각기관이다. 피부에는 온각, 냉각, 압력, 통증, 촉각, 진동 등을 느끼는 외수용감각기들이 산재되어 있다. 그 중에서 촉감은 건축 자재, 필기구 재질, 자동차 내장재, 의류 원단과 안감 등 신체와 접촉하는 소재에 있어 제품의 질을 결정짓는 중요한 요소이다. 특히 섬유에서의 질감이란 경제적인 면과 직결되는 문제를 안고 있다. 실의 굵기, 실의 꼬임, 실의 종류, 제직 방법, 밀도, 가공처리(표면처리)등 다양한 방법에 의해 섬유의 질을 향상시키는 연구가 진행되어 왔다. 촉감은 일상생활에서 중요한 감각요소지만 주관적인 것이므로 개인마다 느끼는 정도가 다르므로 촉감을 객관화시키는 지표가 필요하다. 특히 촉각을 가장 잘 느낄 수 있는 손끝의 동력학적 점탄성 반응은 촉감의 객관화를 위한 실험 장치를 설계하는데 있어 중요한 요소이다. 따라서 본 연구에서는 점탄성 이론에 기초한 손끝의 점탄성 이론과 인간의 촉감 메카니즘에 대해 살펴보고 실험 장치를 설계하고자 한다.

2. 인간의 촉감 메카니즘

인간이 외부로부터 신체에 주는 감각은 촉각, 시각, 청각, 후각, 미각의 5가지 감각을 통해서 느끼게 되는데 그 중에서 촉각은 가장 원시적인 감각기관으로 시작하여 인간의 중요한 감각으로 여겨지고 있다. 피부자극에 의한 촉각을 감각기관으로부터 인간이 정신적으로 해석하여 느끼는 감정을 촉감이라고 생각할 수 있다. 손으로 물건을 쥐거나 문지를 때 손바닥과 물체 표면 사이의 물리적인 현상에 의해 자극이 손바닥으로 전달되어 뇌에서 반응하여 느끼게 된다. 인간의 피부로 안쪽에는 여러 가지 센서에 해당되는 기관들이 Fig. 1과 같이 존재하여 외부로부터 힘, 진동, 압력, 온도 등을 감지하여 촉감을 느끼게 된다. 손바닥과 같이 털이 존재하지 않는 피부는 표피, 진피, 피하조직으로 층을 이루고 있으며 내부에는 마이너스 소체(Meissner corpuscle), 촉반(Merkel disk), 파치니 소체(Pacinian corpuscle), 루피니 소체(Ruffini ending)등의 센서가 자유신경종말에 연결되어 외부적인 자극을 감지하고 있다. 외부적인 자극은 대부분 역학적인 성질을 갖는 진동, 압력, 힘, 온도 등으로 Table 1에 범위와 자극의 내용에 대해서 요약된다.

Table 1과 같이 소체들은 진동에 민감한 것을 알 수 있으므로 촉감 메카니즘의 해석에는 동적인 현상을 연구해야한다. 감지가능한 힘의 크기는 수 mN으로 대단히 작은 크기의 값을 측정하는 능력을 인간이 보유하고 있음을 알 수 있으며 특히 손을 움직일 때 느끼는 촉감은 압력과 더불어 움직이는 힘(진동)이 중요한 감지요소가 된다. 더욱이 털이 있는 피부는 지극히 미소한 힘의 변화도 느끼게 된다. 이와 같은 여러 가지 역학적인 자극으로 인해 질감을 창출하게 된다. 더우기 피부는 friction(마찰), stiffness(강도), vibration(진동)과 같은 역학적 특성을 처리하는 압축변형이 쉽게 일어나는 점탄성 매개체이다. 이런 특성으로인해 피부에 동적인 자극을 가하여 역학적으로 나타나는 impedance를 측정하여 점탄성 반응을 해석하게 된다.

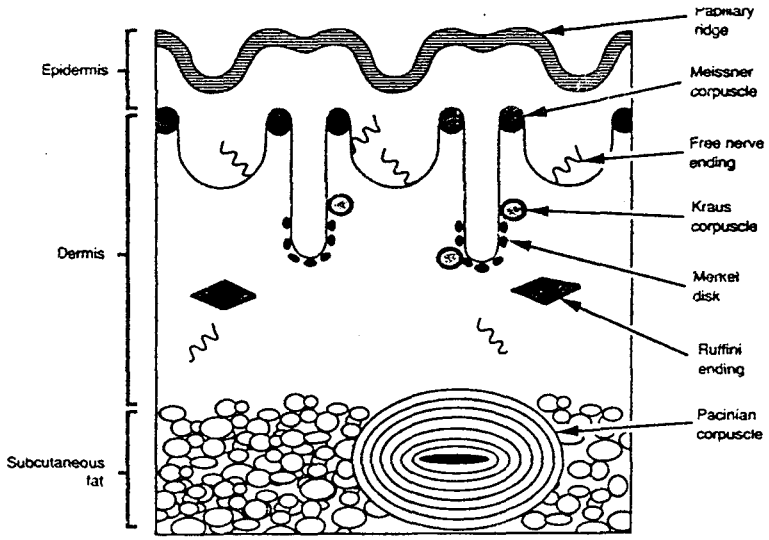

Fig. 1. 촉감관련 신경의 분포를 나타내는 손끝의 단면도

Table 1. 외부 자극에 따른 각 소체들의 반응 종류와 범위

Nerve ending	Receptive field(mm)	Vibration response(Hz)	Stimulus
Meissner	3-4	8-64	Texture, normal force
Merkel	3-4	2-32	Shape, edges, texture
Pacinian	10	64-400	Vibration
Ruffini	-	1-16	Lateral skin stretch

3. 점탄성이론

점성과 탄성을 각각 Newton과 Hooke의 법칙으로 나타내면 점탄성 거동은 선형미분 방정식의 형태로 나타내며 Boltzmann의 중첩원리로 표현하게 된다.

Boltzmann의 중첩원리는

$$\varepsilon(t) = C(t)\sigma(0) + \int_0^t C(t-\tau)\frac{d\sigma(\tau)}{d\tau}\,d\tau \tag{1}$$

$\varepsilon(t)$: 시간 t에서의 변형률

C(t) : 크리프 응답

$\sigma(\tau)$: $t=\tau$에서의 응력

Boltzmann의 중첩원리를 식에 적용하면 시간과 더불어 변화하는 변형 $\varepsilon(\tau)$에 대한 시간 t($\tau < t$)에서의 응력 은

$$\sigma(t) = K(t)\varepsilon(0) + \int_0^t K(t-\tau)\frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau}\,d\tau \tag{2}$$

K(t) : 응력완화계수

인간피부의 기본적인 점탄성 이론을 바탕으로 다음과 같이 식을 정리할 수 있다.

$$T^{(e)}(x) = \frac{b}{m}\left[\, e^{m(x-x_o)} - 1\right] \tag{3}$$

$T^{(e)}(x)$는 변위 x를 x_o 높이의 step function으로 입력시켰을 때 손끝의 force response이며, b, m은 실험에 의해서 결정할 수 있는 상수 값이다. 식 (3)으로부터 손끝의 stiffness k를 구할 수가 있다.

$$k = \frac{d\,T^{(e)}}{dx} = m\;T^{(e)} + b \tag{4}$$

이와 같이 손끝의 stiffness는 force response와 선형인 관계를 나타내게 된다. 점탄성체인 손끝에 가해진 힘의 reduced relaxation function (G(t))은 지수형태로 감소되는 것으로 가정하여 식을 정리하였다. 특히 감소 정도에 따라 10 msec이며, 10 ~100 msec, 그 이상의 3개 영역으로 나누어 설명할 수 있도록 하였다

$$G(t) = \frac{c_o + \sum_{i=1}^{3} c_i\, e^{-v_i t}}{\sum_{i=0}^{3} c_i} \tag{5}$$

c_i는 각 영역의 기여 정도를 나타내는 상수이며 v_i는 time constant이다. Pawluk의 실험에 의해서 구해진 각 상수의 값은 $c_o = 0.26$, $c_1 = 0.41$, $c_2 = 0.18$, $c_3 = 0.15$ $v_1 = 231$, $v_2 = 15$, $v_3 = 0.69$이며 이 값을 식 (5)에 대입시키면 Fig. 2와 같은 영역별 힘의 완화를 계산하였다. 시간에 대한 힘의 변화 반응 P(t)에 손끝이 변형되는 길이 x(t)를 적용시켜서 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$P(t) = \int_{-\infty}^{t} G(t-\tau)\frac{\partial\, T^{(e)}[x(\tau)]}{\partial x}\frac{\partial x(\tau)}{\partial \tau}\,d\tau \tag{6}$$

Fig. 3은 20mm/sec의 속도로 0 ~2 N 사이의 힘으로 손끝을 sinusoidal 형태로 4 Hz 변형시켰을 때 나타나는 반응을 보여주고 있다. Fig. 3과 같이 가해지는 힘의 증가에 따라 stiffness가 증가되며, 각 cycle의 peak점의 감소로서 힘의 이완을 확인할 수 있다.

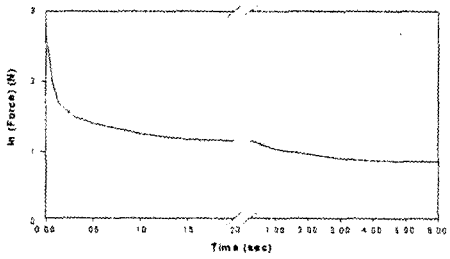

Fig. 2. 손끝의 force relaxation

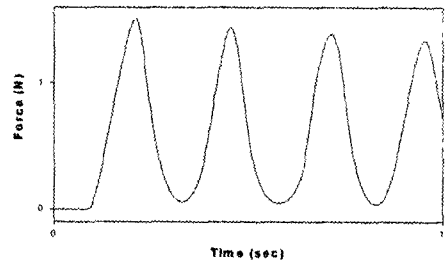

Fig. 3. Sinusidal position에 대한 손끝의 점탄성 반응

4. 실험장치의 설계

손끝의 동적 점탄성 반응을 측정하고 각 식의 상수 값을 결정하여 모델을 확립하기 위하여 fig. 4와 같은 실험 장치를 설계하였다. 일정한 질량을 linear motor에 부착시켜 손끝에 동적으로 원하는 힘의 크기와 변위를 가할 수 있도록 하였다. linear motor는 마찰저항에 따른 힘의 감소를 최소화시키며 위치, 속도, 힘의 크기를 임의로 조절할 수 있는 장점을 가지고 있다. 최대 이동속도는 1 m/s로 위치 분해능이 2.5 μm이며 0 ~10N까지 가해주는 힘의 크기를 자동 조정할 수 있는 장치이다. 더욱이 손끝을 mass 밑에 위치시키면 shear force가 가해질 때의 반응을 측정할 수 있도록 설계하였다.

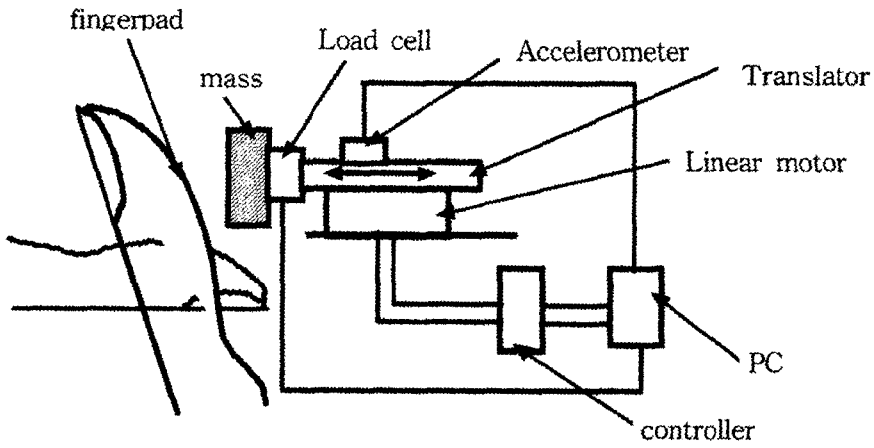

Fig. 4. 손끝의 점탄성 반응 측정장치의 개략도

5. 결론

손끝의 점탄성 특성을 기본적인 이론에 의하여 정리 하였다. 계산에 의한 동적 점탄성 반응을 확인하고 식의 상수 값을 정확하게 측정하기 위하여 실험장치를 설계하였다. 더욱이 수직방향 뿐 만 아니라 수평방향의 변형에 따른 점탄성 특성을 측정할 수 있도록 하였다. 손끝의 동적점탄성 반응은 인간의 피부와 유사한 prober의 제작에 사용되며 촉감을 객관적으로 측정하는 장치의 개발에 응용될 것이다.

6. 참고문헌

1) Lawrence Kruger, editor, Pain and Touch, University of California, Los Angeles.
2) L. Moss-Salentijn. The human tactile system. In H.R. Nicholls, editor, Advanced Tactile Sensing for Robotics. World Scientific, 1992.
3) K.E. Atkinson. An Introduction To Numerical Analysis. John Wiley and Sons, 1989.
4) A. W. Goodwin, A.S. Browning, and H.E. Wheat. Representation of curved surfaces in responses of mechanoreceptive afferent fibers innervating the monkey's fingerpad. The Journal of Neuroscience, 15:798-810, 1995.
5) A.Z. Hajian and R.D. Howe. Identification of the mechanical impedance at the human finger tip. ASME Journal of Biomechanical Engineering, 119:109-114, 1997.
6) R. Lundstrom. Local vibrations-mechanical impedance of the human hand's glabrous skin. Journal of Biomechanics, 17:137-144, 1984
7) J.F.M. Manschot and A.J.M Brakee. The measurement and modelling of the mechanical properties of human skin in vivo i. the measurement. Journal of Biomechanics, 19:511-516, 1986.
8) J.F.M. Manschot and A.J.M Brakee. The measurement and modelling of the mechanical properties of human skin in vivo ii. the measurement. Journal of Biomechanics, 19:517-521, 1986.
9) P. Tong and Y.C. Fung. The stress-strain relationship for the skin. Journal of Biomechanics, 9:649-657, 1976.
10) D.T.V. Pawluk. A Viscoelastic Model of the Human Fingerpad and a Holistic Model of Human Touch. Thesis, Harvard University, Cambridge, 1997.