

손끝 접촉반응의 모델링과 응용

한은경, 권영하, 강제식, 이수민, 강대임*, 박연규*
경희대학교, 섬유공학과, * 한국표준과학연구원

경기도 용인시 기흥읍 서천리 1번지, 대전시 유성구
yhwon@nms.kyunghee.ac.kr

Modeling and Applications for Contact Response of Fingertpad

Eun Kyung Han, Young Ha Kwon, Jae Shik Kang, Su Min Lee, Dae Im Kang* and Yon-Kyu Park*
Department of Textile Engineering, Kyung Hee University
1, Seocheon-Ri, Kihung-Eup, Yongin-City, Kyunggi-Do 449-701, Korea

*Korea Research Institute of Standards and Science
Yuseong, Taejon, Korea

Abstract

손끝으로 물건을 문지르거나 잡아 질감을 느끼는 경우 나타나는 현상을 Hertzian 접촉이론을 응용하여 수학적 모델링을 하였다. 물체표면에 손끝이 접촉하여 눌러지게 되면 변형이 일어나게 되고 변형된 모양과 정도에 따라 촉감을 느끼게 된다. 손끝은 점탄성체로서 누르는 변위에 따라 탄성계수와 점성계수 값이 비선형으로 변하게 되는 현상을 이론과 실험을 통하여 연구하였다. 특히 손끝이 직물을 누를 때 나타나는 현상을 측정하여 질감표현과의 관계를 분석하였다.

서론

인간은 시각으로 판단할 수 없는 경우 촉감을 이용하여 정보를 받아들이며 피부와 대상체 표면과의 접촉에 의해서 질감을 느낀다. 피부는 대뇌의 체성감각 피질과 관련이 있다. 피부에는 여러 가지 감각 수용체들이 산재되어 있어 손끝이 대상체 표면과 접촉했을 때 손끝의 압력변화에 의해 부드러움, 매끄러움, 딱딱함 등의 질감을 느끼게 된다. 따라서 손끝에서의 접촉 반응은 질감을 느끼는데 있어서 중요하므로 기본적인 접촉 이론에 의한 현상을 해석하여 질감 메카니즘 현상

을 분석하였다. 한편 직물을 문지르며 질감을 느낄 때 손끝으로 누르는 힘을 측정하여 접촉현상과 질감표현

과의 관계를 연구하였다.

Hertzian 이론

Hertzian 이론은 기본적인 접촉이론으로 두 물체가 접촉하고 있을 때 나타나는 반응의 압력분포와 접촉변형사이의 관계를 이론적으로 설명한 것이다. Fig. 1과 같이 R_1, R_2 의 곡률 반경을 갖고 있는 두 물체가 서로 접촉하여 하중 P 가 가해지게 되면 Fig. 2와 같은 접촉압력에 의해 변형이 일어난다고 가정하였다. Hertzian equation에 의한 압력분포는 다음 식과 같다.

$$p(r) = p_0 \{1 - (r/a)^2\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

여기서 $p(r)$ 은 압력이고, p_0 는 최대압력, r 은 중심으로부터 거리이며 a 는 접촉면의 반지름이다. 변형된 길이 normal displacement는 u_z 로 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$u_z = \frac{1-\nu^2}{E} \frac{\pi p_0}{4a} (2a^2 - r^2) \quad (2)$$

ν 는 포아슨 비, E 는 Young's modulus이다.

두 개의 접촉 물체의 Young's modulus가 다를 경우 (E_1, E_2, ν_1, ν_2) 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (3)$$

그리고 a 는 가해진 하중 P 와 Young's modulus와 접촉곡률 반지름과의 관계로 나타내면

$$a = \left(\frac{3PR}{4E^*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

최대 눌러진 변위와 압력은

$$\delta = \frac{a^2}{R} = \left(\frac{9P^2}{16RE^{*2}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

$$p_0 = \frac{3P}{2\pi a^2} = \left(\frac{6PE^{*2}}{\pi^3 R^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

이다. 이 때 곡률(R)은 다음과 같은 관계가 된다.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (7)$$

그리고 식 (4)을 식 (6)에 대입하여 누르는 힘 P 를 소거하면 식 (8)을 얻어서 다시 (1)식에 넣으면 압력분포는 식 (10)으로 나타내게 된다.

$$p_0 = \frac{2E^* a}{\pi R} \quad (8)$$

$$P = \int_0^a p(r) 2\pi r dr = \frac{2}{3} p_0 \pi a^2 \quad (9)$$

$$p(r) = \frac{2E^*}{\pi R} [a^2 - r^2]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

손끝의 접촉이론 모델

손끝이 직물을 누르게 되면 직물과 손끝 사이의 변형이 생기며 Hertzian 이론에 의해 다음과 같은 모델을 만들었다. Fig. 3과 같이 손끝이 직물과 접촉할 때 직물이 눌러져 아래로 내려가면서 동시에 손끝도 접촉이론에 의해 변형된다고 가정할 수 있다. 누르는 손끝을 강체로 가정하면 Fig. 4의 접선과 같이 누르는 방향으로 이동만을 하지만 손끝은 $u_z(r)$ 의 변형이 동시에 일어난다. 이 때 손끝의 접촉 변형 $u_z(r)$ 은 손끝에서 걸감을 느끼게 역학적 변형이 된다. 그리고 손끝의 Young's modulus는 indentation displacement에 따라 변하게 된다.

$$E_1 = \frac{2b}{m} [e^{mx} - 1] \quad (11)$$

식 (3)에서 E_2 를 강체로 가정하면 E_1 에 비해 E_2 가 매우 커지므로 식 (3)은

$$\frac{1}{E^*} \rightarrow \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} \quad (12)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 손끝 포아손 비 ν_1 은 일반적인 silicon이나 rubber로 간주하여 0.5로 가정하였다. 식 (6)과 식 (12)를 식 (2)에 대입하여 손끝의 변위를 다음 식과 같이 얻었다.

$$u_z(r) = \frac{1}{E^*} \left(\frac{3PE^{*2}}{32a^3 R^2} \right)^{\frac{1}{3}} [2a^2 - r^2] \quad (13)$$

식 (13)에서 손끝의 변위 $u_z(r)$ 과 하중을 측정하여 손끝의 접촉특성을 해석하였으며 실험을 통하여 증명하였다. 식 (13)에서 $r=0$ 인 경우 손끝이 가장 많이 눌러져 변위($u_z(0)$)은 최대 변위(δ)가 된다. 실험에 의해서 δ 와 P 를 측정하여 손끝의 compliance 변화를 살펴 실험식과 이론 식을 비교하였다.

$r=0$ 일 때의 $u_z(0) = x$ 라고 하면

$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{E^*} \left[\frac{3PE^{*2}}{32a^3 R^2} \right]^{\frac{1}{3}} [2a^2] \\ &= \frac{1}{E^*} \left(\frac{9P^2 E^*}{16R} \right)^{\frac{1}{3}} \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)은 압력이 가해졌을 때 눌러진 indentation displacement, x 로 나타내며 누르는 힘 P 와 관계를 측정하여 식 (14)를 확인하였다.

실험장치

리니어 모터와 load cell, laser displacement sensor를 이용하여 probe가 손끝에 닿을 때의 반응을 측정하였다. Fig. 5와 같이 좌우로 움직이는 linear motor에 부착된 load cell은 손끝을 누르는 힘을 측정하며 laser displacement sensor는 probe가 손끝을 누를 때 손끝은 압축변위를 real time으로 측정한다. Load cell은 amplifier를 거쳐서 data acquisition에 변위 sensor는 data acquisition을 통해 컴퓨터에 time 축에 따라 동시에 저장된다. 손끝을 측정 중에 움직이지 않도록 고정할 수 있게 설계하였다. 또한 손끝을 누르는 하중의 속도에 따라 변위가 다르게 나타나므로 probe의 누르는 속도를 1 mm/sec, 3 mm/sec, 5 mm/sec, 7 mm/sec로 변해가며 실험을 하였다.

실험방법

식 (14)에서 손끝을 누르는 probe는 평평한 모양과 일정한 곡률을 갖고 있는 두 가지 경우로 나누어서 측정하였다. 손끝이 평평한 표면을 누를 때 Fig. 6과 같이 가정하면 R_2 가 매우 크고 손끝의 반지름은 약 15 mm로 가정하여 식 (7)에 의해 R 을 얻을 수 있다. 식 (14)와 비교하기 위해 x 와 P 를 측정하였다. Fig. 7은 불룩한 probe가 손끝을 누를 때를 가정한 것이며 R_2 의 값이 12.7 mm인 것으로 측정하였다.

결과

Fig. 8은 평평한 probe가 속도 1 mm/sec로 손끝을 누를 때 시간에 따라 압축하중을 측정한 경우이다.

약 2초 동안 2 N까지 힘을 가하여 힘이 완화되는 것을 나타내고 있다. 힘이 완화되는 동안 손끝의 맥박에 따라 pulse가 나타나는 것으로 보아 힘이 정밀하게 측정되는 것을 확인하였다. 손끝의 반응이 누르는 속도에 따른 변화를 확인하기 위하여 1 mm/sec, 3 mm/sec, 5 mm/sec, 7 mm/sec로 변화시켜 측정하였다. Fig. 9는 누르는 속도의 변화에 따라 나타나는 손끝의 압축 변위(indentation displacement)와 누르는 힘을 측정된 그래프이다. 붉은 점선은 Fig. 6에 의한 값을 이룬 식 (14)에 대입하여 matlab을 이용하여 나타낸 것이다. 이론 식과 실험식의 경향이 일치하는 것을 확인하였다. 또한 누르는 힘에 따른 압축 변위는 속도에 따라 차이는 있으나 일정한 경향을 발견할 수 없었다. Fig. 10은 볼록한 probe가 속도 1 mm/sec로 손끝을 누를 때 시간에 따라 누르는 힘을 측정된 것이다. 약 3초 동안 2.2 N까지 힘을 가하여 힘이 완화되는 것을 나타내고 있다. Fig. 11은 probe의 속도에 따라 압축 변위를 나타낸 것이다. Fig. 8과 Fig. 10을 비교하면 평평한 면으로 손끝을 누를 때 2 N까지 도달하는 시간이 짧고 최대 압축하중도 작으며 pulse도 뚜렷하게 나타나는 것으로 보아 접촉 probe의 모양에 관계하는 것을 알 수 있다.

Fig. 11에서 압축 변위에 따른 누르는 힘의 크기는 누르는 대상의 곡률반경이 작을수록 변화가 급격하게 증가함을 확인하였다. Fig. 9가 압축 변위에 따라 누르는 힘의 변화가 비교적 작게 나타나다가 손끝이 많이 눌러질수록 압축하중이 급격하게 변하는 것을 알 수 있다. Fig. 12는 피험자 손끝의 Young's modulus는 식 (11)에서 b, m에 영향을 받기 때문에 table 1의 값으로 압축 변위에 따른 손끝의 Young's modulus를 나타낸 것이며 개인차에 따라 변화가 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서 이론 식을 해석할 때에는 평균값을 이용하였다. 손끝의 Young's modulus가 아직 정립되어 있지 않으므로 앞으로는 연구과제로의 진행이 필요하다.

응용

손끝이 직물의 질감을 느끼기 위하여 문지르며 누르는 압력변화와 질감과의 관계를 다음과 같은 실험을 통하여 연구하였다. 손끝의 누르는 압력을 측정하기 위하여 Fig. 13과 같이 실험장치를 구성하였다. 손끝으로 직물을 문지르며 손의 움직임을 단순화시키기 위하여 손목을 고정시키고 세손가락 즉, 검지, 중지, 약지의 끝으로만 직물을 문지르 수 있도록 하였다. 누르는 압력의 측정은 용량이 400 gf인 고정밀 저울을 사용하였으며 컴퓨터와 연결하여 문지르며 손끝의 압력을 Digital로 Data화하여 받아들였다. 직물은 40종류를 사용하였다. 국내 모기업에서 남성 정장용으로 봄, 여름용과 가을, 겨울용으로 분류시켜놓은 견본 직물중에서 각 20종류씩 추출했으며 모든 직물의 혼용률은 모

100%였다. 질감의 영향을 최소화하기 위하여 피험자는 직물을 보지 못하도록 장치를 구성하였다. 저울 위에 직물을 올려놓고 30 gf 로 통일된 인장을 가하여 피험자가 손끝으로 직물을 누를 때 따라서 움직이지 못하게 하였다. 질문을 통하여 서로 상반된 대표적인 '매끄럽다 - 걸끄럽다', '폭신하다 - 딱딱하다', '편편하다 - 우물두들하다', '부드럽다 - 뻣뻣하다'의 형용사 4쌍을 7점 척도로 질문을 하였다.

Fig.14는 대표적인 여름용, 겨울용 직물의 손끝의 문지르는 압력의 변화이다. 손끝의 누르는 압력의 평균은 여름용이 약 27.38 gf이며 겨울용은 약 38 gf이며 표준편차는 여름용이 약 5.17 gf이었으며 겨울용은 약 3.29 gf 이었다. 걸끄럽고 딱딱한 여름용 직물은 문지르며 질감을 느낄 때는 누르는 압력을 감소시키지만 표준편차는 증가하는 경향이 있었다. 폭신한 겨울용 직물은 여름용 직물에 비해 질감의 변화가 상대적으로 작아 느낌을 느끼기 위하여 누르는 압력이 증가하는 현상이 나타났다. Fig.15는 누르는 압력변화와 매끄러운 표현 정도의 관계를 나타내고 있다. 여름용 직물은 걸끄러울수록 표준편차가 증가하였으며 압력의 평균은 힘이 덜 가해지고 있었다. 그러나 겨울용 직물은 걸끄러울수록 표준편차가 감소하며 여름용에 비해 폭신하기 때문에 힘의 변화가 작음을 알 수 있었다.

결론

Hertz의 접촉이론을 바탕으로 손끝의 접촉반응에 대한 모델을 만들었다. 실험장치를 구성하여 실험적 측정이 가능하도록 하였으며 이론 식과 유사한 결과를 얻었다. 약 2초까지는 누를 때 곡률 반경이 작을수록 압축변위에 따라 힘의 변화가 작으나 그 후부터는 더 급격하게 힘이 증가하였다. 손끝은 접촉면의 상태에 따라 반응하는 것이 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 한편 누르는 힘과 질감과의 관계는 직물의 표면을 문지르는 압력을 측정하여 확인하였다. 표면을 거칠수록 누르는 힘은 감소하지만 변화는 크게 나타났다.

참고문헌

- 1) K.L.Johnson. "Contact Mechanics" University of Cambridge.
- 2) Boresi/Sidebottom/Seely/Smith. "Advanced Mechanics of Materials"
- 3) D.T.V. Pawluk. "A Viscoelastic Model of the Human Fingerpad and a Holistic Model of Human Touch" Thesis, Harvard University, Cambridge, 1997.
- 4) D.T.V.Pawluk, W.J.Peine, P.S.Wellman and R.D.

Howe. "Simulating Soft Tissue with a Tactile Shape Display" Harvard University, Cambridge.

- 5) Jinlian Hu, Wenxiang Chen, and A. Newton "A Psychophysical Model for Objective Fabric Hand Evaluation : An Application of Stevens's Law" J. Tex. Ins. 1993, 84, No 3, 354-368
- 6) Susan J; Lederman and M. M Taylor "Fingertip force, Surface Geometry, and the Perception of roughness by active touch" Perception & Psychophysics, 1972, Vol 12(5), 401-408
- 7) P. W. Harrison BSc CTextFTI, "Fabric : Sensory and Mechanical Properties", Tetile Progress Vol 26, No.3

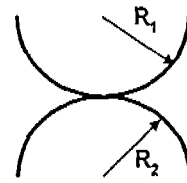


Fig.1 Two Curved Surfaces of Different Radii Pressed against Each Other

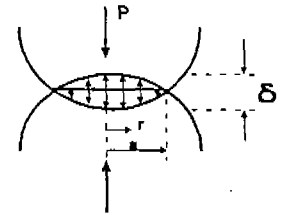


Fig. 2 Pressurized Distributions at the Surface Caused by Herts Pressure Acting on a Circular Area

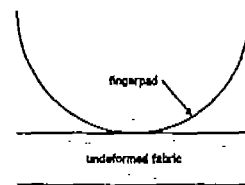


Fig. 3 Contact of Fingerpad and Undeformed Fabric

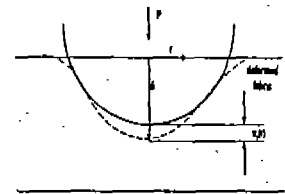


Fig. 4 Indentation by a Fingerpad and Deformation of Fabric

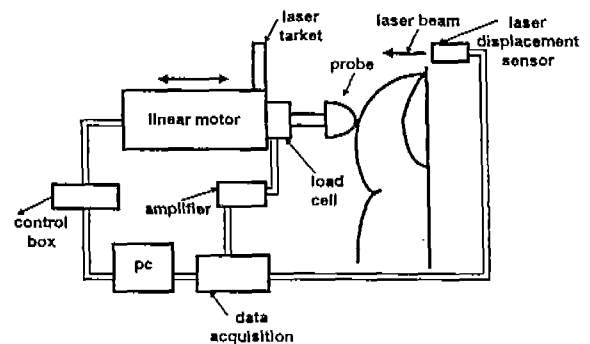


Fig. 5 Schematic Diagram of Experimental Setup

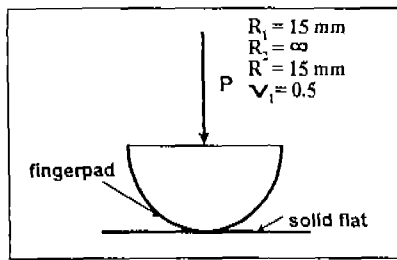


Fig. 6 Hertzian Contact between Fingerpad and Flat Solid Body

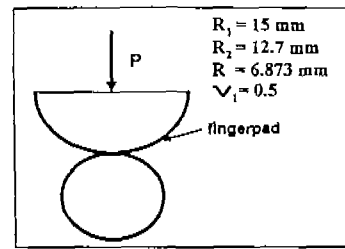


Fig. 7 Hertzian Contact between Fingerpad and Spherical Solid Body

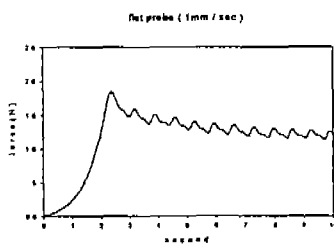


Fig. 8 Response Force of the Fingerpad between Fingerpad and Flat Solid Body

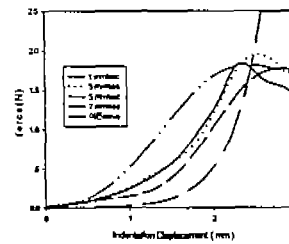


Fig. 9 Relation between Force and Indentation Displacement in Various Velocity

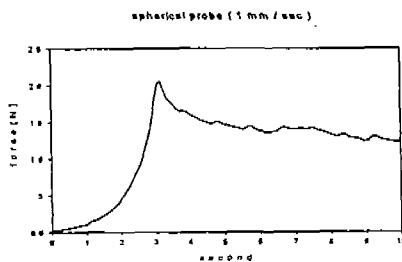


Fig. 10 Response Force of the Fingerpad between Fingerpad and Spherical Solid Body

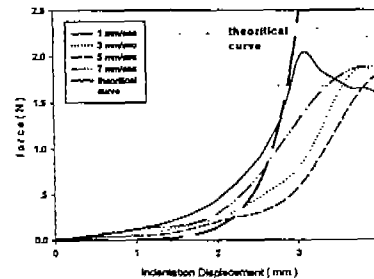


Fig. 11 Relation between Force and Indentation Displacement for Various Velocity

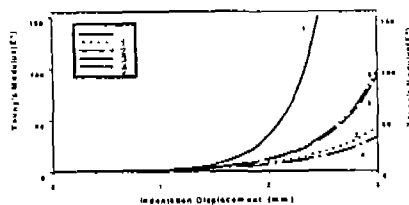


Fig. 12 Relation between Young's Modulus Indentation Displacement for Individual Subjects

Table 1 Model Parameters for Individual

subject	m (mm^{-1})	b (N/mm)
1	3.2	0.092
2	1.6	0.28
3	2.1	0.18
4	1.6	0.22
5 (means)	2.1	0.19

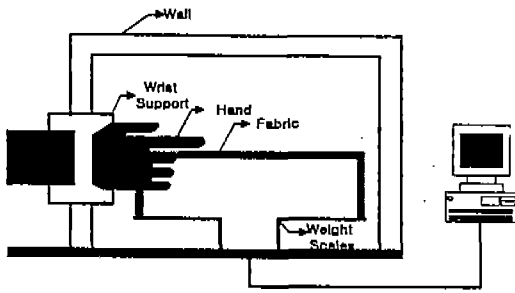


Fig. 14 Schematic Diagram of Fingertip Force Measurement System

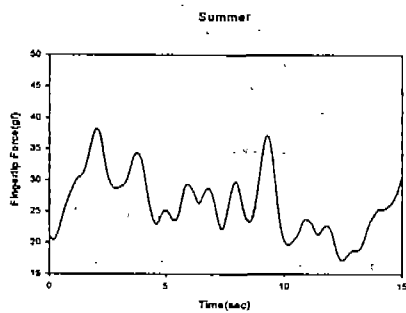


Fig. 15 Variation of Fingertip Force of Sample for Summer

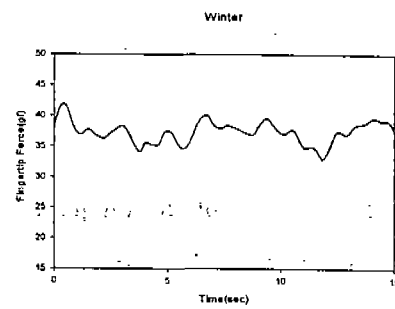


Fig. 16 Variation of Fingertip Force of Sample for Winter

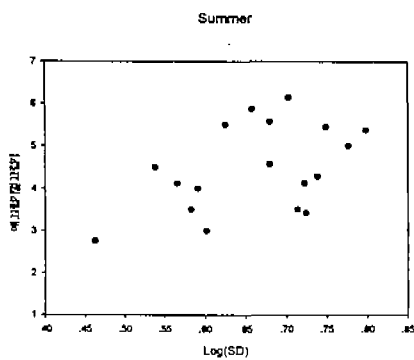


Fig. 17 Relation between SD of Fingertip Force and Subjective Measurements in Smoothness for Summer

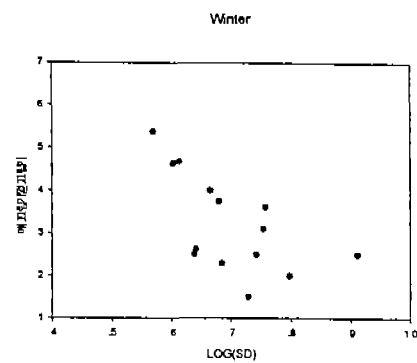


Fig. 18 Relation between SD of Fingertip Force and Subjective Measurements in Smoothness for Winter