

손끝 접촉반응의 모델링과 응용

Modeling and Applications for Contact Response of Fingerpad

권영하*, 한은경*, 강재식*, 이수민*, 박연규**, 강대임**

Young Ha Kwon*, Eun Kyung Han*, Jae Sik Kang*, Soo Min Lee*, Yon Kyu Park**, Dae Im Kang**

요 약 손끝으로 물건을 문지르거나 잡아 질감을 느끼는 경우 나타나는 현상을 Hertzian 접촉이론을 응용하여 수학적인 모델링을 하였다. 물체표면에 손끝이 접촉하여 눌러지게되면 변형이 일어나게 되고 변형된 모양과 정도에 따라 촉감을 느끼게 된다. 손끝은 비선형으로 변형되므로 누르는 변위에 따라 탄성계수 값이 변하는 현상을 실험을 통하여 확인하였으며 모델링한 식과 비교한 결과 유사한 경향을 보였다. 특히 손끝이 직물을 누르며 문지를 때 힘의 크기변화를 측정하여 질감표현과의 관계를 분석하였다.

1. 서론

의식수준이 향상되면서 소비자들은 제품의 기능, 품질, 가격 뿐 만 아니라 보다 사용하기 편리하고 감성적인 매력을 충족시켜주는 제품을 원하고 있다. 따라서 사용자 마음을 만족시킬 수 있는 고부가가치가 형성된 제품을 생산하는 것은 산업의 여러 분야에서 반드시 필요한 요소가 되고 있다. 이와 같은 감성적인 매력을 충족시키기 위해서는 먼저 인간의 감각에 대해서 연구하여야 하며 특히 질감에 대한 연구에 있어서는 손이나 피부와 접촉할 때의 촉각에 대해서 연구하여야 한다.

지금까지 촉각에 대한 연구는 주로 피부의 점탄성 성질에 대한 연구로서 대부분이 힘이 가해진 상태에서 역학적 특성을 결정하는데 중점을 두었다. 또한 피부를 구성하는 섬유질 단백질인 콜라겐과 엘라스틴에 대해 연구하여 물리적 해석을 통해 구조적 접근을 시도하였다. 직물의 촉감 평가 기술에 대한 연구는 직물의 역학적 특성을 인간의 감각과 관련지어 표현을 형성사

화 시키는 연구를 통해 객관화시켰다[1].

본 연구는 섬유제품의 감성 연구 중에서 질감연구에 접촉 특성이 중요하므로 피부와 접촉할 때 나타나는 역학적 현상을 연구하였다. 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 부드러운, 매끄러운, 딱딱함 등의 질감을 느끼게 된다. 따라서 손끝에서의 접촉 반응은 질감을 느끼는데 있어서 중요하므로 기본적인 접촉 이론에 의한 현상을 해석하여 질감 매커니즘 분석하였다. 한편 직물을 문지르며 질감을 느낄 때 손끝으로 누르는 힘을 측정하여 접촉현상과 질감표현과의 관계를 연구하였다.

2. 손끝의 접촉이론 모델

Hertzian 이론은 기본적인 접촉이론으로 두 물체가 접촉하고 있을 때 나타나는 반응의 압력분포와 접촉변형사이의 관계를 이론적으로 설명한 것이다[2, 3]. 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.

* 본 연구비는 과학기술부 G7 감성공학과제의 연구비 지원을 받아 수행되었음. (과제번호 : 17-02-01-A-02)

* 경희대학교, 기계·산업 시스템 공학부
Email : yhkwon@nms.kyunghee.ac.kr

** 한국 표준과학 연구원 역학부

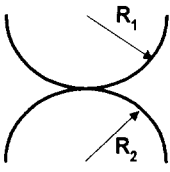


Fig. 1 Two Curved Surface of Different Radii Pressed against Each Other

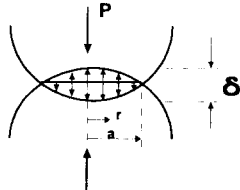


Fig. 2 Pressurized Distribution at the Surface Caused by Hertzian Pressure Acting on a Circular Solid Body

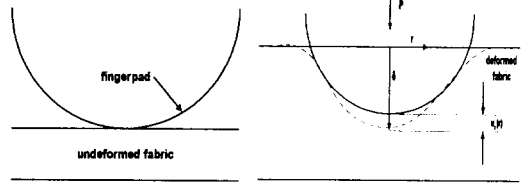


Fig. 3 Contact of Fingerpad and Undeformed Fabric Fig. 4 Indentation by a Fingerpad and Deformed Fabric

Hertzian 식에 의한 압력분포는 다음 식과 같다[3].

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

여기서 $p(r)$ 은 압력이고, p_0 는 최대압력, r 은 중심으로부터 거리이며 a 는 접촉면의 반지름이다. 변형된 길이 수직 변위는 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

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

최대 눌러진 변위와 압력은

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

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

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)를 식 (6)에 대입하여 누르는 힘 P 를 소거하면 식 (8)을 얻어서 다시 (1)식에 넣으면 압력 분포는 식 (10)으로 나타나게 된다.

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

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

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

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 질감을 느끼게 역학적 변형이 된다. 그리고 손끝의 Young's modulus(E_1)는 접촉변위(indentation displacement)에 따라 변하게 된다[4].

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

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 포아슨 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.

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

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

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

식 (14)은 압력이 가해졌을 때 늘려진 접촉변위 x 로 나타내며 누르는 힘 P 와 관계를 측정하여 식 (14)를 확인하였다.

3. 실험

직물표면을 누르며 문지를 때 손끝과 표면과의 접촉에 의해 나타나는 손끝의 반응, 즉 피부에 가해지는 압력이 균등치 않을 때 피부의 변형이 일어나서 촉각을 느끼게 된다. 이때 마이스너 소체와 피부 밑 조직, 근육, 관절 등에 분포하는 파치니소체가 촉각, 압각을 수용하게 된다. 따라서 접촉이론을 바탕으로 손끝이 직물을 누를 때 손끝의 접촉압축모델 식(14)에서 손끝을 누르는 힘(P)과 압축변위(x)측정하기 위하여 다음과 같은 측정장치를 구성하였다.

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 실시간으로 측정한다. Load cell과 변위 sensor는 data acquisition을 통해 컴퓨터에 시간축에 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.

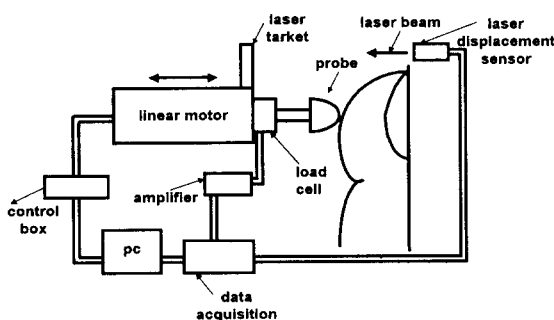


Fig. 5 Schematic Diagram of Experimental Setup

물체의 표면은 다양하므로 질감을 느낄 때의 손끝의 반응이 어떻게 나타나는지를 측정하기 위하여 본 연구에서는 대표적인 probe의 모양을 두 가지로 평평한

모양과 일정한 곡률을 갖고 있는 경우로 나누어서 측정하였다. 손끝이 평평한 표면을 누를 때 Fig. 6과 같이 가정하면 R_2 가 매우 크고 손끝의 반지름은 약 15 mm로 가정하였으므로 식 (7)에 의해 R 은 15 mm로 얻어지고 이것을 식 (14)에 대입하여 나타낸 그래프와 실험을 통해 얻어진 그래프를 비교하기 위하여 x 와 P 를 측정하였다.

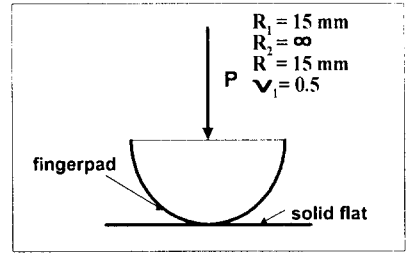


Fig. 6 Hertzian Contact between Fingerpad and Flat Solid Body

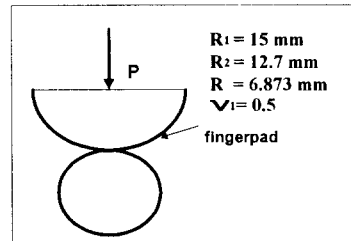


Fig. 7 Hertzian Contact between Fingerpad and Spherical Solid Body

Fig. 7은 볼록한 probe가 손끝을 누를 때를 가정한 것이며 R_2 의 값이 12.7 mm인 것으로 측정하였으므로 식 (7)에 의해 R 은 6.873 mm가 된다. 리니어 모터에 평평한 모양의 probe를 부착시키고 일정한 힘으로 손끝을 누를 때 접촉하는 순간부터 시간에 따라 변화하는 힘을 전기신호로 받아서 뉴턴(N)으로 변환시켜 필터링을 했다. 실험은 각 속도에 대해서 3번씩 했고 피험자는 1명으로 검지손가락을 측정했다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 8은 평평한 probe가 속도 1 mm/sec로 손끝을 누를 때 시간에 따라 압축하중을 측정한 경우이다. 약 2초 동안 2 N까지 힘을 가하여 힘이 완화된 것을 나타내고 있으며 힘이 급격하게 감소하다가 서서

히 감소하여 일정해지는 것을 알 수 있다. 압감은 주로 파치니소체가 감지하며 신경 말단에 있는 다수의 감각기관이 서로 중첩되어 감지하게 된다. 힘이 완화되는 동안 손끝의 맥박에 따라 pulse가 뚜렷하게 나타나는 것으로 보아 힘이 정밀하게 측정되는 것을 확인하였다. Pulse의 개수가 10초 동안 평균 12 - 13개로 1분 동안에 70 - 80번 맥박이 뛰고 있음을 확인하였다. 손끝의 반응이 누르는 속도에 따른 변화를 확인하기 위하여 1 mm/sec, 3 mm/sec, 5 mm/sec, 7 mm/sec로 변화시켜 측정하였다.

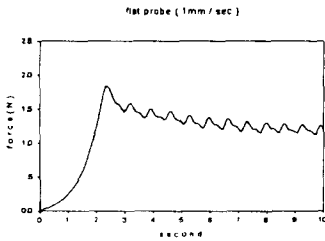


Fig. 8 Response Force of the Fingerpad between Fingerpad and Flat Solid Body

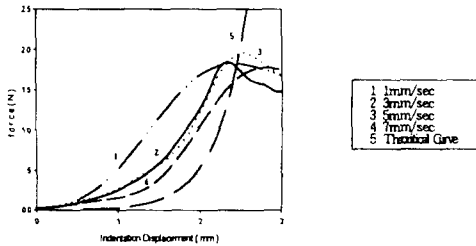


Fig. 9 Relation between Force and Indentation Displacement in Various Velocity

Fig. 9는 누르는 속도의 변화에 따라 나타나는 손끝의 접촉 변위와 누르는 힘을 측정된 그래프이다. 굵은 점선은 이론 식 (14)에 의해서 그려진 선이다. 실험에서 손끝에 무리한 힘을 가할 수 없기 때문에 2 N에서 정지시켰으며 바로 힘이 완화되는 현상이 나타나고 있다. 이론 식과 실험에 의한 힘의 변화 경향이 일치하는 것을 확인하였다. 또한 누르는 힘에 따른 압축 변위는 속도에 따라 차이는 있으나 일정한 경향을 발견할 수 없었다. 속도가 변함에 따라 압축변위에 대한

압축하중의 curve의 형태가 바뀌는 것으로 보아 속도에 영향을 받는 것을 확인하였다.

Fig. 10은 불룩한 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 있으며 평평한 probe에서와 마찬가지로 미비하지만 pulse가 나타나는 것을 확인하였다.

Fig. 11은 probe의 속도에 따라 압축 변위에 대한 압축하중을 나타낸 것이다. 평평한 probe로 눌렀을 때 보다 작은 힘에도 더 잘 눌러짐을 알 수 있다. 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.

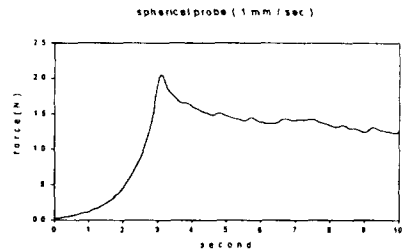


Fig. 10 Response Force of the Fingerpad between Fingerpad and Spherical Solid Body

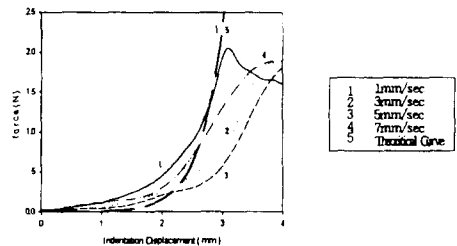


Fig. 11 Relation between Force and Indentation Displacement for Various Velocity

Fig. 9와 Fig. 11을 비교하여 볼 때, 압축 변위에 따른 누르는 힘의 크기는 누르는 대상의 곡률 반경이 작을수록 변화가 급격하게 증가함을 알 수 있었다. Fig. 9가 압축 변위에 따라 누르는 힘의 변화가 비교

적 작게 나타나다가 손끝이 많이 눌러질수록 압축하중이 급격하게 변하는 것을 알 수 있다.

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

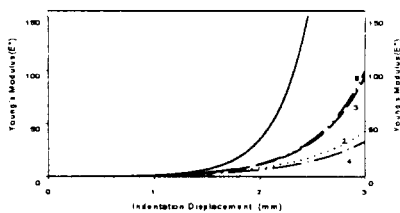


Fig. 12 Relation between Young's Modulus Indentation Displacement for Individual Subjects

Fig. 12는 다섯 사람의 손끝에서 측정된 Young's Modulus 변화를 식 (11)에 의해 압축변위에 따라 나타내고 있다. 이때 b, m값은 Table. 1에 표시하였으며 개인차에 따라 변화가 크게 나타나고 있다. 따라서 이론 식을 해석할 때에는 평균값을 이용하였다. 손끝의 Young's modulus는 아직 정립되어 있지 않아 앞으로 연구과제로서 진행이 필요하다.

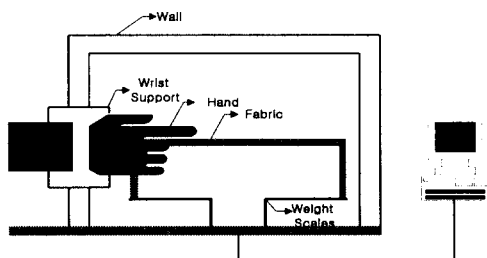


Fig. 13 Schematic Diagram Fingertip Force Measurement System

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 문지를 때 손의 움직임을 단순화시키기 위하여 손목을 고정시키고 검지, 중지, 약지의 끝으로만 직물을 문지를 수 있도록 하였다(5). 누르는 압력의 측정은 용량이 400 gf인 고정밀 저울을 사용하였으며 컴퓨터와 연결하여 문지를 때 손끝의 압력을 Digital로 Data화하여 측정하였다. 사용된 직물은 남성용 정장 여름용, 겨울용 각각 20개로서 모 100%이며 KES-F System으로 측정된 값은 두께가 0.5-0.8 mm, 무게는 11-19 mg/cm², 마찰계수는 0.09-0.14, 표면거칠기는 1-15 μm의 물리적 특성을 갖고 있다. 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. 실문을 통하여 서로 상반된 대표적인 '매끄럽다 - 걸쭉하다', '폭신하다 - 딱딱하다', '편편하다 - 우둘우둘하다', '부드럽다 - 뻣뻣하다'의 형용사 4쌍을 7점 척도로 질문을 하였다(7).

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. 걸쭉하고 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.

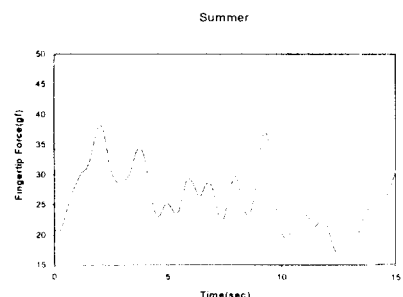


Fig. 14 Variation of Fingertip Force of Sample for Summer

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.

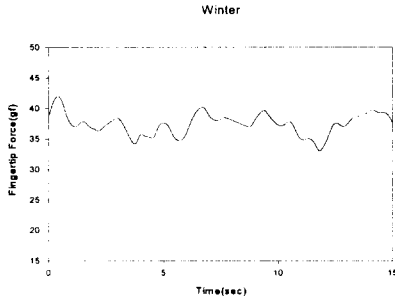


Fig. 15 Variation of Fingertip Force of Sample for Winter

5. 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. 표면이 거칠수록 누르는 힘은 감소하지만 변화는 크게 나타났다.

참고문헌

- [1] P. W. Harrison (1996), "Fabric : Sensory and Mechanical Properties", Textile Progress 26, (3)
- [2] K. L. Johnson. "Contact Mechanics" University of Cambridge.
- [3] Boresi, Sidebottom, Seely, Smith.(1998) "Advanced Mechanics of Materials", John Wiley & Son, NewYork
- [4] D. T. V. Pawluk(1997), "A Viscoelastic Model of the Human Fingerpad and a

Holistic Model of Human Touch" Thesis, Ph.D. Harvard University, Cambridge.

- [5] J. Hu, W. Chen, and A. Newton(1993) "A Psychophysical Model for Objective Fabric Hand Evaluation : An Application of Stevens's Law" J. Tex. Ins. 84, (3), 354-368
- [6] S. J. Lederman and M. M. Taylor(1972) "Fingertip Force, Surface Geometry, and the Perception of Roughness by Active Touch" Perception & Psychophysics, 12(5), 401-408
- [7] 권영하(1996), "촉각/질감 감성요소와 역학적 측정값과의 상관관계 연구", 한국표준과학연구원 위탁보고서

Modeling and Applications for Contact Response of Fingerpad

Young Ha Kwon, Eun Kyung Han, Jae Sik Kang, Soo Min Lee,
Yon Kyu Park*, Dae Im Kang*

College of Mechanical and Industrial System Engineering, Kyung Hee University
*Korea Research Institute of Standards and Science

Abstract Hertzian contact theory is applied to the modeling of contact response of fingerpad for human touch feeling when we touch and hold the surface of object. The pressurized contact deformation is occurred the area between the fingerpad and the surface. We can feel the tactile touch according to the normal and shear deformation of the fingerpad. The phenomenon of nonlinear deformation of the fingerpad can be expressed by modeling equation and it is verified in experimental data by using the special designed displacement and force measurement system. Also we have measured the fingertip force rubbing the surfaces of fabrics and compared the them with the subjective expressions.