

# 질감 메카니즘 해석을 위한 손끝의 접촉이론 연구

한은경, 권영하

경희대학교 섬유공학과

## 1. 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 현상을 분석하였다.

## 2. 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 P가 가해지게 되면 fig. 2와 같은 접촉압력에 의해 변형이 일어난다고 가정하였다.

Hertzian equation에 의한 압력분포는

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

여기서  $p(r)$ 은 압력이고,  $p_0$ 는 최대압력,  $r$ 은 중심으로부터 거리이며  $a$ 는 접촉면의 반지름이다. 변형된 길이 normal displacement는  $\bar{u}_z$ 로 다음과 같은 식으로 나타낸다

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

$\nu$ 는 포아슨 비,  $E$ 는 Young's modulus이다.

두 개의 접촉 물체의 Young's modulus가 다를 경우( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\nu_1$ ,  $\nu_2$ ) 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 P와 Young's modulus와 접촉곡률 반지름과의 관계로 나타내면

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

최대 늘려진 변위와 압력은

$$\delta = \frac{a^2}{R} = \left( \frac{9P^2}{16RE^{*2}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5) \quad p_o = \frac{3P}{2\pi a^2} = \left( \frac{6PE^{*2}}{\pi^3 R^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

이다. 이 때 곡률(R)은 다음과 같은 관계가 된다.

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

압력과 접촉면적에 따른 total force P는 계산되며 식 (4)을 식 (6)에 대입하여 P를 소거하면 식 (8)을 얻어서 (1)식에 넣으면 압력분포는 식 (10)으로 나타나게 된다.

$$p_o = \frac{2E^*a}{\pi R} \quad (8) \quad P = \int_0^a p(r)2\pi r dr = \frac{2}{3} p_o \pi a^2 \quad (9)$$

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

### 3. 손끝의 접촉이론 모델

손끝이 직물을 누르게 되면 직물과 손끝 사이의 변형이 생기는데 Hertz 이론에 의해 다음과 같은 모델을 만들었다.

Fig. 3과 같이 손끝이 직물과 접촉할 때 직물이 늘려지는 것과 동시에 손끝도 접촉이론에 의해 변형된다고 가정할 수 있다. 누르는 손끝을 강체로 가정하면 fig. 4와 같이 누르는 방향으로 이동만을 하지만 손끝은  $u_z(r)$ 의 변위가 동시에 일어난다. 이 때 변위  $u_z(r)$ 은 손끝에서 질감을 느끼게 한다. 그리고 손끝의 Young's modulus는 displacement에 따라 변하게 된다. 3)

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

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 fingerpad의  $\nu_1$ 은 문헌 1)에 의해 약 0.5이다. 식 (6)과 식 (12)을 식 (2)에 대입하여 손끝의 변위

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

이 얻어진다. 그러므로 손끝의 변위  $u_z(r)$ 과 하중을 측정하여 손끝의 접촉특성을 해석하였다. 접촉이론의 모델로서 손끝이 강체를 누른다고 가정하였다.

식 (13)에서  $r=0$ 인 경우 손끝이 가장 많이 늘려져 변위( $u_z(0)$ )은 최대 변위( $\delta$ )가 된다. 실험에 의해서  $\delta$ 와 P를 측정하여 손끝의 compliance 변화를 살펴 실험식과 이론식을 비교하였다.

$r=0$ 일 때의  $u_z(0) = x$ 라고 하면

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

식 (14)은 압력이 가해졌을 때 눌러진 변형(indentation displacement),  $x$ 를 나타내며  $P$ 와 관계를 측정하여 식 (14)을 확인하였다.

#### 4. 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. 손끝이 측정 중에 움직이지 않도록 고정을 할 수 있게 설계하였다. 또한 손끝을 누르는 하중의 속도에 따라 변위가 다르게 나타나므로 probe의 압축속도를 1 mm/sec, 3 mm/sec, 5 mm/sec, 7 mm/sec로 변해가며 실험을 하였다.

#### 5. 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 볼록한 probe가 손끝을 누를 때를 가정한 것이며  $R_2$ 의 값이 12.7 mm인 것으로 측정하였다.

#### 6. 결과

Fig. 8은 평평한 probe가 속도 1 mm/sec로 손끝을 누를 때 시간에 따라 압축하중을 측정한 경우이다. 약 2초 동안 2N까지 힘을 가하여 힘이 완화된 것을 나타내고 있다. 힘이 완화된 동안 손끝의 맥박에 따라 pulse가 나타나는 것으로 보아 힘이 정밀하게 측정되는 것을 확인하였다. Fig. 9는 손끝의 반응이 변하므로 1 mm/sec, 3 mm/sec, 5 mm/sec, 7 mm/sec인 경우에 손끝의 압축 변위(indentation displacement)에 따른 압축하중을 측정한 그래프이다. 굵은 점선은 fig. 6에 의한 값을 이룬 식 (14)에 대입하여 matlab을 이용하여 나타낸 것이다. 이론 식이 실험식과 잘 맞는다는 것을 확인하였다. 또한 압축 하중에 따른 압축 변위는 속도에는 영향을 받지 않는 것을 알게 되었다. Fig. 10은 볼록한 probe가 속도 1 mm/sec로 손끝을 누를 때 시간에 따라 압축하중을 측정한 것이다. 약 3초 동안 2.2 N까지 힘을 가하여 힘이 완화된 것을 나타내고 있다. Fig. 11은 probe의 속도에 따라 압축 변위를 나타낸 것이다. Fig. 8과 fig. 10를 비교하면 fig. 8이 maximum force로 될 때까지 걸린 시간이 짧고 최대 압축하중도 작으며 pulse도 뚜렷하

계 나타나는 것으로 보아 접촉 probe의 모양에 관계하는 것을 알 수 있다. Fig. 9와 fig. 11를 비교해 보면 fig. 9가 압축 변위에 따라 압축하중이 작게 나타나다가 손끝이 많이 눌러질수록 압축하중이 급격하게 변하는 것을 알 수 있다. Fig. 12는 피험자 손끝의 Young's modulus는 식 (11)에서  $b$ ,  $m$ 에 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.

## 7. 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.

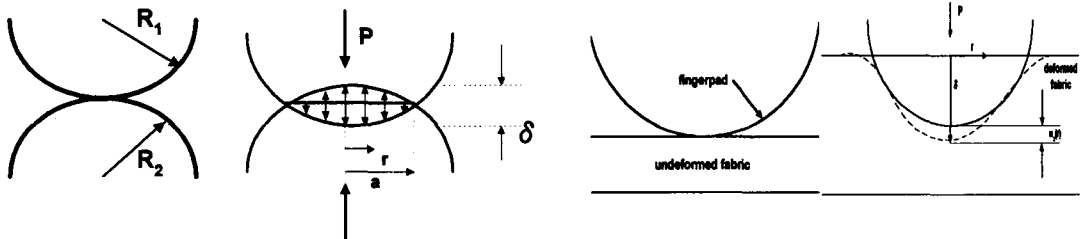


Fig 1. Two curved Surfaces of Different Radii Pressed against Each Other

Fig 2. Pressuried Distributions at the Surface caused by Hertz Pressure Acting on a Circular Area

Fig 3. Contact of Fingerpad & Undeformed Fabric Fig 4. Indentation by Fingerpad & Deformation of Fabric

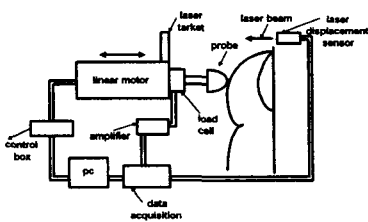


Fig 5. Schematic Diagram of Experimental Setup

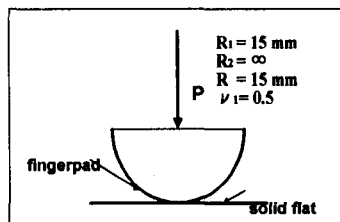


Fig 6. Hertzian Contact between Fingerpad and Flat Solid Body

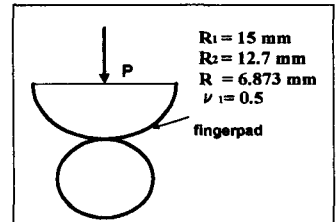
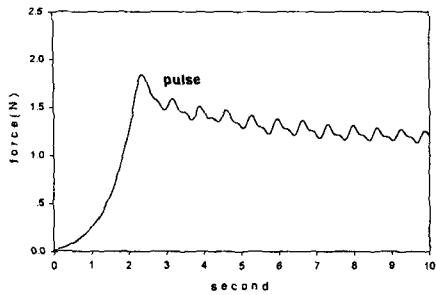
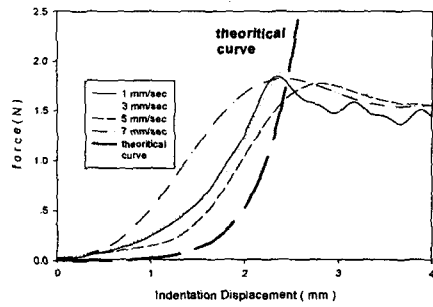


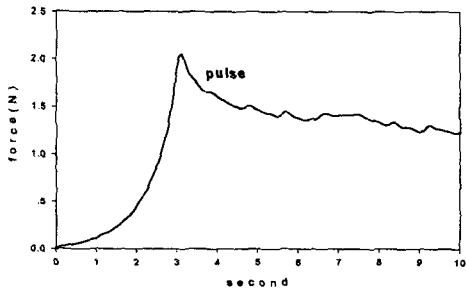
Fig 7. Hertzian Contact between Fingerpad and Spherical Solid Body



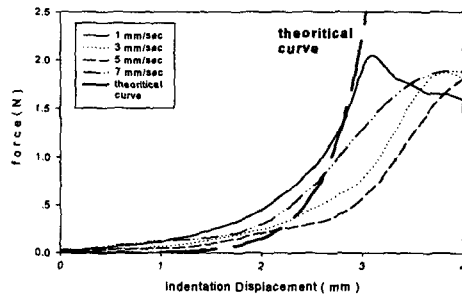
**Fig 8.** Response Force of the Fingerpad between Fingerpad and Flat Solid Body



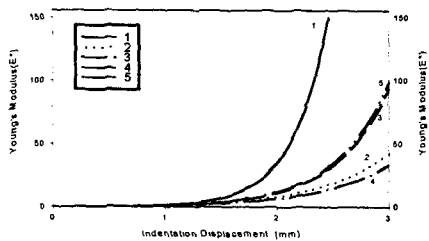
**Fig 9.** Relation between Force and Indentation Displacement in Various Velocity



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



**Fig 11.** Relation between Force and Indentation Displacement in Various Velocity



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

**Table 1** Model parameters for individual subjects

subject	m ( $\text{mm}^{-1}$ )	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