돼지피부의 공기노출 시간에 따른 응착, 마찰 및 변형거동

신현덕 · 안효석[†]

서울과학기술대학교 기술경영대학 MSDE전공

Adhesive, Friction, and Deformation Behaviors of Pig Skin under Various Exposure Times to Air

Hyunduk Shin and Hyo-Sok Ahn[†]

*Manufacturing Systems and Design Engineering Programme,
Seoul National University of Science and Technology*

(Received September 25, 2013 ; Revised October 30, 2013 ; Accepted November 2, 2013)

Abstract – Understanding steel/skin contact phenomena is important for the study of object manipulation in robotics and has been a topic of great interest. In this study, pig skin was taken as a surrogate model for human skin, and its adhesive, friction, and deformation behaviors were measured under various exposure times to air. Indentation, friction, and scratch tests were performed at 25°C and 45% relative humidity. The influences of adhesion and deformation on the coefficient of friction were characterized; the pig skin was found to be sensitive to the sliding velocity and normal load under the controlled experimental conditions.

Keywords – bio-tribology (바이오토타볼로지), pig skin (돼지피부), frictional behavior (마찰거동), deformation behavior (변형거동), adhesive force (응착력), indentation (압입)

1. 서 론

1-1. 배경

돼지피부는 인간피부와 유사한 조직으로서 인간피부를 연구하는 모델동물로 널리 사용되어 왔으며[1-4], 인간피부에 대한 윤활학적 연구에서도 모델동물로 사용되었다[5, 6]. 돼지피부는 색깔, 털, 모공 및 피하조직이 인간피부와 유사하며[7], 돼지피부의 상피층과 진피층의 평균두께도 각 55 μm 와 3.36 mm로서 인간피부의 각 두께와 비슷하다[8]. Forbes[9]에 따르면 돼지피부는 다른 동물피부보다 인간피부와 가장 유사하다고 하였다.

피부에 대한 윤활학적 연구는 로봇제어 연구의 하나로 로봇의 말단장치(end-effector)로 인간피부와 흡사한 생체피부를 조작(manipulation)하는 경우나 점탄성의 인공피부로 덮여있는 말단장치로 다른 물체를 조작하는

경우의 접촉현상을 이해하는 데 중요하다. 따라서 돼지 피부에 대한 응착, 마찰 및 변형 연구를 통해 말단장치와 물체 간의 접촉현상에 대한 기본 정보를 획득하기 위하여 본 연구를 수행하였다.

1-2. 인간피부의 응착특성

인간피부는 비선형의 점탄성 특성이 있어 복잡한 역학적 접촉과 마찰거동을 보이지만, 각질층, 표피 및 진피로 정교하게 구성된 층구조는 외부자극에 단일층 재료처럼 반응하므로 피부를 균질한 재료로 가정하여 피부의 복잡한 특성을 해석할 수 있다[10].

외부로부터 피부를 보호하기 위한 지질(lipidic) 박막은 피부와 물체 간의 접촉에서 응착력을 발생시키는데, 응착력은 접촉하는 각 재료의 성질에 민감할 뿐만 아니라 측정방법 및 조건에 종속적이므로 정량화하기 매우 어렵다. 강구를 이용한 압입시험으로 응착력을 측정할 경우에는, 압입속도가 500 $\mu\text{m/s}$ 보다 작으면 응착력

[†]Corresponding author : hsahn@seoultech.ac.kr

에 대한 유체동압(hydrodynamic) 효과를 무시할 수 있으며 강구의 반지름이 증가할수록 응착력은 증가한다[11]. 일반적으로 상대시편과 어떤 재료와의 접촉면에 액체막이 있는 경우에 응착력은 액체막의 성질에 지배적인 영향을 받는데, 액체막의 증가에 따라 응착력이 증가하는 경향을 보인다[12]. 액체막과 관련한 응착력의 성질은 매끄러운 탄성중합체와의 접촉에도 성립하며 총 응착력은 다음과 같이 표현될 수 있다[13].

$$F_{ad} = F_w + F_H + F_S \quad (1)$$

본 연구에서 피부시편에 대한 응착력평가를 위한 방법으로 박막평가에 널리 사용되고 실험조건에 크게 민감하지 않은 시험인 압입시험을 사용하였다.

1-3. 인간피부의 마찰특성

Derler[14]가 피부마찰을 주제로 최근 발표한 리뷰는 문에 따르면 응착 메커니즘이 피부마찰에 지대한 영향을 준다고 하였다. 응착에 의한 마찰은 접촉면의 전단 현상에 근거하므로 다음과 같이 표현될 수 있다[15].

$$F_{int} = \tau A \quad (2)$$

$$\mu = \frac{F_{int}}{W} = \frac{\tau A}{W} = \frac{\tau}{p} \quad (3)$$

Derler[16]에 따르면, 젖거나 촉촉한 피부는 높은(>1) 마찰계수를 보이며 수직하중이 증가할수록 마찰계수가 감소하는 반면에 건조한 피부는 상대적으로 낮은(<0.6) 마찰계수를 보이며 마찰계수는 수직하중에 독립적이라고 한다. 또한, 중간영역에서의 마찰은 피부의 수화상태(hydration state)와 미시적범위(microscopic level)에서의 건조하거나 촉촉한 접촉지역(contact zone)의 분포에 달려있다고 한다. 마지막으로, 완전히 젖은 경우에는 유체동압 윤활 효과로 매우 낮은(<0.1) 마찰계수를 보인다고 한다. Stick-slip 마찰은 동적 마찰계수보다 정적 마찰계수가 큰 경우나 미끄럼속도의 증가에 따라 마찰계수가 감소하는 경우에 나타나는데[17], 이 현상은 주로 젖고 매끈한 표면에 나타나며 피부마찰 현상에서도 일어날 수 있다.

상대시편과의 접촉에 의한 피부변형은 마찰에 영향을 주는 요소로서, 일반적으로 점성마찰보다 주는 영향이 작으며 그 정도는 마찰계수로 0.04-0.06 범위에 있다고 보고된 바 있다[18]. 점탄성 변형에 의한 피부 표면 하의 에너지소실(energy dissipation)은 변형마찰

이라고 하며, Adams[19]의 two-term non-interacting 모델을 사용하여 점탄성 피부의 총 마찰을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_{tot} = F_{ad} + F_{def} \quad (4)$$

1-4. 헤르츠 접촉이론

피부의 기계적 접촉거동과 마찰메커니즘을 설명하기 위하여 여러 이론적 모델(i.e., Hertz, Johnson-Kendall-Roberts, Greenwood-Williamson)이 사용되었다. 헤르츠 접촉모델은 강구를 이용한 인간피부의 마찰시험에서 접촉압력을 계산하는 데 이용할 수 있으며[14], 수직방향 변형량에 대해 표현하면 다음과 같다.

$$d = \frac{a^2}{R} = \left(\frac{9N^2}{16RE_c^2} \right)^{1/3} \quad (5)$$

$$E_c = \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \cong \frac{E_{skin}}{1-\nu_{skin}^2} \quad (6)$$

Adam[19]는 강구를 이용하여 인간피부의 팔뚝 부위에 압입시험을 하였는데, 이때 포아송비를 0.49로 가정하여 헤르츠 접촉모델을 통해 구한 피부의 탄성계수(Modulus of elasticity)는 40 kPa이었다. 반면에 Pailler-Mattéi[11]는 이와 비슷한 압입시험을 통하여 구한 탄성계수가 10 kPa이었다. 피부의 최외곽에 있는 각질층의 탄성계수는 약 1000 MPa이지만 아래에 있는 부드러운 조직의 영향으로 피부의 탄성계수는 이보다 훨씬 작은 값을 나타낸다[14, 21].

본 연구에서는 인간피부의 대용으로 사용한 돼지피부를 공기 중에 노출한 시간에 따라 마찰 및 스크래치 및 압입시험을 실시하여 결과를 분석하였다. 돼지피부시편은 노출시간에 따라 건조되면서 시편표면이 마르고 단단해지는데, 이러한 성질변화는 피부의 응착 및 변형현상과 관계가 깊으며 현재까지 공기노출 시간에 따라 변형거동 분석을 한 논문은 없는 것으로 보인다. 그러므로 공기노출 시간에 따른 피부시편의 성질변화를 이용한 본 연구는 피부의 응착, 마찰 및 변형거동 분석에 기발한 시험방법을 제시한다고 생각한다.

2. 시편 및 시험방법

2-1. 시편

돼지피부는 암돼지(120 kg, 6-12개월, 잡종)의 복부 피부 전층을 3-4 mm 두께로 박리한 냉장포장육을 대

Fig. 1. (a) Packaged porcine skin. (b) Removal of oils. (c) Magnified view of sample. (d) Test configuration.

전에 위치한 육가공 업체에서 구매하였으며(Fig. 1a), 시험 전까지 -20°C 에서 보관하였다. 시험을 하기 위하여 돼지피부를 5°C 에서 완전히 해동한 뒤 시험시작 10분 전에 5분간 50°C 의 핫플레이트를 이용해 간접가열하고 나머지 5분간 실내공기(RT 25°C , RH 45%)에 노출하여 실내 온도와 같아지도록 하였다. 돼지피부시편이 실내온도와 같아지는 동안 표면조직이 온전한 부분을 골라 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 면적의 사각형 모양으로 절단한 다음 단단한 플라스틱판 위에 올려 접착제(Loctite 401)로 고정하였다. 150분의 시험을 하는 동안 30분 간격으로 피부분비물을 일반 기름제거필름으로 가볍게 눌러 제거하였다(Fig. 1b).

2.2. 실험 방법

돼지피부가 공기 중에 노출되는 시간에 따른 응착, 마찰 및 변형특성을 고찰하기 위해 압입, 마찰 및 스크래치시험기(UMT-Apex, Bruker)를 사용하였다(Fig. 1d). 시편은 3 mm 두께로 균등하게 가공된 돼지피부를 너비 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 크기로 잘라 이용하였고, 상대시편은 1 mm 지름의 강구(steel ball)를 이용하였다. 각 피부시편이 실내 공기에 노출되어 경화되는 동안 압입, 마찰 및 스크래치 시험을 실시하였다. 노출시간은 0-150분이었으며 시험은 30분 간격으로 1회씩 실시하였

Table 1. Conditions for friction and scratch tests

Equipment	Micro-tribometer (UMT-Apex)
Type	Ball-on-plate
Specimen	Pig skin (Tc 3 mm, AA $5 \times 5 \text{ cm}^2$)
Counterpart	Steel Ball ($\varnothing$ 1 mm)
Exposure Time (min)	0-150
Sliding Velocity (mm/s)	0.1/0.2
Normal Load (mN)	15/30 (friction test) 10-35 (scratch test)

Fig. 2. Schematics of measurements: (a) adhesion test; (b) indentation test for $300 \mu\text{m}$ penetration.

다. 시편의 표면은 노출시간 동안 촉촉하고 부드러운 상태에서 건조하고 딱딱한 상태로 변화하였다.

Table 1은 마찰시험과 스크래치시험 조건이다. 수직 하중은 헤르츠 접촉이론으로 구한 접촉압력이 일반 로봇핸드의 접촉센서가 감지하는 범위($\sim 140 \text{ kPa}$)로 하여 [22], 마찰시험에서는 15 mN과 30 mN을 가하였고

스크래치시험에서는 10-35 mN을 가하였다. 미끄럼속도는 식 (1)의 응착력에 대한 유체동압 항을 무시할 수 있도록 500 $\mu\text{m/s}$ 미만으로 하여, 미끄럼거리 4 mm에서 0.1 mm/s와 0.2 mm/s로 정하였다.

응착력시험을 위해서는, 표면에서 50 μm 깊이로 압입한 뒤 30 $\mu\text{m/s}$ 의 저속으로 강구를 시료 표면에서 후퇴시켰을 때 접촉면에 발생하는 응착력을 측정하였다(Fig. 2a). 압입시험을 위해서는, 45 $\mu\text{m/s}$ 의 저속에서 150 μm 의 깊이까지 압입하거나 30 $\mu\text{m/s}$ 의 저속에서 300 μm 깊이까지 압입하는 두 가지 조건으로 시험을 실시하였다(Fig. 2b). 피부가 압입으로 인한 변형으로부터 원래의 상태로 회복하려는 힘과 그 변화를 측정하기 위해, 강구가 150 μm 와 300 μm 깊이로 압입된 상태에서 수직변위를 15초 동안 정지시켜 그 동안 강구가 받는 수직력의 변화를 관찰하였다(Fig. 2b). 압입깊이 150 μm 와 300 μm 는 각각 돼지피부 시편의 표피두께와 진피두께의 약 10%가 되도록 한 깊이로서 모재인 진피나 플라스틱판의 영향을 받지 않도록 하기 위함이었다[20].

2-3. 통계적 분석

시험결과의 통계적 의미를 살펴보기 위해 선형 및 곡선 회귀분석 또는 Savitzky-Golay Smoothing 필터링을 하였다. 시편 21개 이상으로부터 얻은 결과 값으로 통계처리를 하였지만 시편의 특성상 결과 값의 편차가 크게 나타났기 때문에[16], 회귀분석과 필터링을 사용하는 게 더 적절하다고 판단하였다. 결과 값을 처리하는 과정에서 임의로 삭제한 자료의 수는 약 1,700개 중에서 0.3% 미만이었다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 응착력 및 압입거동

공기노출 시간에 따라 돼지피부 시편은 가장자리부터 건조 및 경화되었으며, 150분이 지났을 때 시편의 중앙 부분까지 건조되어 단단해짐을 확인할 수 있었다. Fig. 3은 150분의 경화과정 동안 시편 중앙부에 압입시험을 통해 평가한 응착력 거동이다. 그래프의 곡선은 회귀분석으로 그린 2차 곡선으로서 다음과 같다.

$$y = 0.313 - 0.0030x + 10^{-5}x^2 \quad (7)$$

사용된 시편의 수는 37개로 많은 수를 시험했음에도 표준편차의 평균은 0.09 mN으로 컸으며 이는 피부시

Fig. 3. Adhesive forces at various exposure times.

Fig. 4. (a) Normal loads at various exposure times. (b) Decrease ratios of normal load at various exposure times.

편의 특성으로 생각한다. 노출시간이 길어짐에 따라 응착력은 전반적으로 줄어들지만 감소 폭이 점점 줄어

150분이 되었을 때는 거의 감소하지 않게 되었다. 0분에서 최고치인 0.31 mN과 150분에서 최저치인 0.1 mN의 응착력이 측정되었다. 이러한 거동은 강구와 돼지피부사이의 접촉면적과 접촉압력의 분포를 변화시킬 수 있다. 150분의 건조 및 경화과정 동안 시편표면 위의 액체막이 먼저 증발하고 어느 시점부터 피부지질에 있는 수분도 함께 증발한 것으로 생각한다.

피부의 기계적성질을 평가하기 위해 대개 사용된 방법은 시편을 비틀거나 흡입 또는 늘림으로써 평가하였으나, 실험조건에 의해 결과가 왜곡되기 쉽고 정량측정이 어렵다는 한계가 있었다[11]. 압입시험은 상기한 단점을 극복할 방법으로 피부의 점탄성 특성을 비교적 정확하게 평가할 수 있다. Fig. 4a는 두 가지 압입깊이에서 강구가 받는 수직력을 식 (5)와 (6)을 통하여 계산한 탄성계수를 노출시간에 따라 나타낸 결과이다. 그래프의 직선은 선형 회귀분석의 결과이며 압입깊이 150 μm 와 300 μm 일 경우에 대한 각 식은 다음과 같다.

$$y = 87.4 + 2.33x \quad (8)$$

$$y = 74.2 + 1.16x \quad (9)$$

사용된 시편의 수는 21개였으며 표준편차의 평균은 77.5 kPa이다. 노출시간이 길어짐에 따라 탄성계수는 선형적으로 증가하는 거동을 보였으므로, 독립변수 x 를 노출시간으로 하고 종속변수 y 를 탄성계수로 한 선형적관계가 성립한다. 150 μm 와 300 μm 에 대한 기울기는 각각 2.33 kPa/min과 1.16 kPa/min으로 압입깊이가 얇은 경우가 더 컸다. 얇게 압입시험을 한 경우에 탄성계수가 더 크게 나온 이유는 각질층의 높은 탄성계수의 영향을 더 받았기 때문으로 보인다. 다른 연구[11, 19]에서 인간피부에 대하여 구한 탄성계수 보다 본 연구에서 구한 값이 더 큰 이유도 압입깊이가 더 얇아 각질층의 영향을 크게 받았기 때문이라고 생각한다. 그러므로 피부시편의 탄성계수는 압입깊이와 노출시간에 영향을 받으며 각각 반비례 및 비례함을 알 수 있다.

Fig. 4b는 시편에 150 μm 또는 300 μm 압입한 상태에서 5초 또는 15초간 정지시켰을 때 감소하는 돼지피부의 탄성계수를 노출시간에 따라 나타낸 결과이다. 그래프의 곡선은 회귀분석으로 그린 3차 곡선으로서 다음과 같다.

$$y = 31.6 - 0.052x + 0.0011x^2 - 5.0x^3 \quad (10)$$

$$y = 22.4 - 0.029x + 7.3x^3 - 3.6x^2 \quad (11)$$

$$y = 24.2 - 0.057x + 0.0013x^3 - 5.7x^3 \quad (12)$$

$$y = 15.7 - 0.057x + 0.0013x^2 - 5.9x^3 \quad (13)$$

여기서 식 (10)과 (11)은 150 μm 로 압입한 경우이나 각각의 압입정지시간이 15초와 5초이며, 식 (12)과 (13)은 300 μm 로 압입한 경우이나 각각의 압입정지시간이 15초와 5초이다. 사용된 시편의 수는 21개였으며 탄성계수의 감소비율을 구하는 데 사용한 자료의 표준편차의 평균은 64.4 kPa 이었다. 발견한 흥미로운 결과는 압입깊이나 정지시간에 따라 나타나는 탄성계수의 감소비율은 달랐지만 노출시간에 따라 나타나는 값은 다소 일정한 값을 유지한다는 점이다. 이러한 거동은 아마도 돼지피부가 노출시간에 따라 건조되고 경화되어도 수직변형로부터 저항하는 힘을 만들어내는 피부의 기계적 구조가 고유의 형태를 유지한 채 경직되어갔기 때문으로 생각한다. 그밖에 나타난 결과로는 정지시간이 길수록 탄성계수의 감소비율의 시간에 따른 변화율은 줄어든다는 점으로서, 압입 시 15초 동안 정지하면서 감소한 비율이 5초 동안 정지하면서 감소한 비율의 두 배도 채 되지 않는다는 사실에서 드러난다. 또한, 압입깊이가 더 깊은 경우가 얇은 경우보다 탄성계수의 감소비율이 낮았다. 마지막으로, 노출시간에 따라 나타나는 탄성계수의 감소비율 거동은 3차 곡선으로 나타낼 수 있었는데 같은 깊이로 압입한 경우를 정지시간을 달리하여 비교해 보면 곡선의 형태가 압입정지 시간에 따라 변하지 않는 것으로 보였다. 이는

300 μm 깊이로 압입한 결과인 식 (12)과 (13)의 계수가 거의 같은 점을 근거로 들 수 있다.

응착 및 압입거동의 결과를 요약하면, 응착력시험을 통해 돼지피부가 공기 중에 건조 및 경화하면서 응착력이 오목한 2차 곡선의 형태로 줄어드는 추세를 관찰하였다. 압입시험을 통해서는 노출시간에 따라 강구가 받는 탄성계수를 일정 압입깊이에서 선형방정식으로 표현하였으며 탄성계수의 감소비율이 노출시간과 비교적 무관함을 관찰하였다.

3-2. 마찰 및 변형거동

3-2-1. 마찰시험 결과

Fig. 5와 Fig. 6는 공기노출 시간에 따른 마찰 및 접촉압력 또는 수직변형거동을 수직하중과 미끄럼속도를 변화시켜 얻어낸 마찰시험결과이다. 각 시험에서 사용된 시편 수는 21개였으며 마찰계수와 수직변형에 대한 표준편차의 평균은 0.18로 우연히 같았다. Fig. 5에

Fig. 5. Friction and apparent contact pressure behavior of different speed as a function of exposure time. (a) 15 mN and (b) 30 mN.

서는 공기노출 시간에 따라 수직하중과 미끄럼속도에 관계없이 마찰계수는 전반적으로 감소하는 거동을 보이는데, 응착력의 감소에 따른 점성마찰의 감소가 원인으로 보인다(Fig. 3). Derler[14]에 따르면, 인간피부의 팔뚝 부위에 강구로 마찰시험을 한 여러 논문의 결과에서 피부상태가 건조한 경우에는 마찰계수가 $0.5(\text{mean value} \pm \text{SD: } 0.57 \pm 0.32)$ 이며 접촉압력에 독립적이고 젖은 경우에는 마찰계수가 $1(\text{mean} \pm \text{SD: } 1.5 \pm 0.6)$ 이상이며 접촉압력에 종속적이라고 하였다. 따라서 Fig. 5의 마찰거동에서 노출시간 약 2-30분을 기준으로 이전 구간에는 피부가 다소 젖어있는 상태로 볼 수 있고 이후 구간에는 건조한 상태로 볼 수 있다. 또한 2-30분 구간에서는 속도의 차이에 의한 접촉압력의 차이가 작아 마찰계수에 주는 영향이 적으며 나머지 구간에서는 차이가 점점 벌어졌지만 피부시편이 충분히 건조되어 마찰계수에 주는 영향이 적은 것으로

Fig. 6. Deformation behavior of different speed as a function of exposure time. (a) 15 mN and (b) 30 mN.

생각된다. Fig. 6에서는 공기노출 시간에 따라 수직하중과 미끄럼속도에 관계없이 변형은 전반적으로 감소하는 거동을 보이는데, 피부시편이 경화되면서 탄성계수가 증가하기 때문으로 보인다(Fig. 4a).

0.15 mN의 수직하중을 가했을 때(Fig. 5a), 0.2 mm/s와 0.1 mm/s의 미끄럼속도로 시험한 결과의 차이는 0분일 때 0.11 정도로 미끄럼속도가 빠른 경우가 더 컸고 시간이 흐름에 따라 감소하는 경향을 보였다. 이는 응착력이 감소하는 거동과 흡사하다고 볼 수 있으며, 속도 증가에 따른 마찰의 증가는 속도와 양의 상관관계가 있는 점성마찰의 영향 때문으로 생각한다. 0.15 mN의 수직하중 하에 공기노출 시간에 따른 수직 변형거동을 나타낸 Fig. 6a에 의하면 0.2 mm/s와 0.1 mm/s의 미끄럼속도로 시험한 경우의 수직변형 차이가 노출시간 0-60분 구간에서 다소 일정하였지만 Fig. 5a

를 보면 각 속도에서의 마찰계수의 차이는 같은 구간에서 일정하지 않았다. 따라서 노출시간 0-60분 구간에서는 미끄럼속도의 차이로 인한 수직변형의 차이가 마찰계수의 차이와는 큰 관계가 없다는 것을 알 수 있다. 0.3 mN의 수직하중을 가했을 때(Fig. 5b), 공기노출 시간에 따라 0.2 mm/s와 0.1 mm/s의 미끄럼속도로 시험한 결과의 차이는 0분일 때 0.06 정도로 미끄럼속도가 빠른 경우가 더 컸다. 그러나 시간이 흐름에 따른 일정한 추세가 나타나지 않고, 90분 이전까지는 일정하다가 감소하였고 그 이후부터 비교적 가파르게 증가하는 복잡한 거동을 보였다. 이러한 거동은 0.15 mN의 수직하중을 가했을 때와는 달리 접촉면적에 따른 점성마찰과 변형마찰을 고려할 필요가 있다. Fig. 6b는 0.3 mN의 수직하중을 가했을 때, 공기노출 시간에 따른 수직변형거동을 나타낸 그림이다. 20분 정도 노출시간이 지났을 때, 0.2 mm/s와 0.1 mm/s의 미끄럼속도에 따른 곡선이 노출시간 20분경에서 교차하였다. 약 20분을 기준으로 이전에는 빠른 속도일 경우가 느린 속도일 경우보다 변형이 작았으나, 그 이후에는 빠른 속도일 경우가 변형이 더 컸다. 헤르츠 접촉모델로 접촉면적을 수직변형에 대한 관계로 나타내어 계산하면 0.3 mN의 수직하중을 가한 경우의 접촉면적은 약 20분이 지나기 전에는 빠른 속도일 때가 더 작음을 알 수 있다. 그러므로 Fig. 5b에서 0-30분 동안 빠르고 느린 미끄럼속도로 시험한 결과의 차이가 감소하지 않고 일정했던 이유는 약 20분이 지나기 전까지 빠른 속도일 경우가 접촉면적이 더 작아 식 (3)에 의하여 상대적으로 점성마찰이 줄었기 때문으로 생각한다. 공기노출 시간이 150분 지났을 때에는 빠른 속도가 느린 속도의 마찰계수보다 0.04라는 비교적 큰 차이로 컸는데, 이 현상은 빠른 속도가 느린 속도보다 변형이 0.06 mm라는 비교적 큰 차이로 컸으므로 변형마찰이 그에 따라 증가하여 총 마찰이 증가했기 때문으로 볼 수 있다.

요약하면, 두 가지의 하중 및 속도로 마찰시험을 하여 얻은 결과를 비교하여 응착력, 접촉압력, 접촉면적 및 수직변형의 영향을 알아보았다. 피부시편이 다소 젖어 있거나 건조한 노출시간 60분 이전 구간에서는 응착력, 접촉압력 및 접촉면적과 관련한 점성마찰의 영향이 지배적이지만 나머지 구간에서는 수직변형과 관련한 변형마찰의 영향도 무시할 수 없게 된다.

3-2-2. 스크래치시험 결과

Fig. 7와 Fig. 8은 공기노출 시간과 하중에 따라서

Fig. 7. Friction map as a function of exposure time and load: (a) sliding speed of 0.1 mm/s; (b) sliding speed of 0.2 mm/s.

마찰계수 또는 변형의 변화를 나타낸 결과이다. 사용된 시편의 수는 모두 21개였으며 표준편차의 평균은 각각 0.19와 0.15였다. 노출시간에 따라 마찰계수 또는 변형이 감소하는 경향이 보이며, 각각 미끄럼속도가 0.2 mm/s일 때가 상대적으로 느린 속도인 0.1 mm/s일 때보다 컸다.

같은 미끄럼속도 0.1 mm/s의 경우인 Fig. 7a와 Fig. 8a를 비교해 보면 노출시간이 0분일 때 각각 13 mN과 35 mN 정도를 중심으로 솟아올라 있는 모양에 가깝다는 것을 알 수 있다. 반면에 미끄럼속도 0.2 mm/s의 경우인 Fig. 7b와 Fig. 8b를 비교해 보면 노출시간이 120-150분일 때 모두 15 mN을 중심으로 가라앉아 있는 모양에 가깝다는 것을 알 수 있다. Fig. 7을 보면 (a)의 노출시간이 약 20분일 때와 (b)의 노출시간이 약 30분일 때에는 15-30 mN의 수직하중

Fig. 8. Deformation map as a function of exposure time and load: (a) sliding speed of 0.1 mm/s; (b) sliding speed of 0.2 mm/s.

범위에서 마찰계수가 일정한 거동을 보이고 있다. 각각의 노출시간을 임계노출시간이라고 명명했을 때, 이 임계노출시간을 기준으로 마찰계수의 경계선이 부채꼴 모양임을 확인할 수 있다. 따라서 각 임계노출시간에는 하중과 관계없이 일정한 마찰계수를 보이며, 이 시간을 기준으로 왼쪽 영역에서는 하중의 증가에 따라 마찰계수가 감소하고 오른쪽 영역에서는 하중의 증가에 따라 마찰계수가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 9에 의하면, 노출시간이 0분과 30분인 경우는 피부시편이 젖은 상태인 경우인데 접촉압력의 증가에 따라 마찰계수는 감소하나 0.6 이상의 큰 값을 보였으며, 시편이 상대적으로 건조한 상태가 되는 노출시간 60분 이후의 경우에는 마찰계수가 0.6 이하이며 접촉압력이 증가함에 따라 마찰계수가 점차 감소하며 120분 이후에는 접촉압력과 관계없이 일정하고 낮은 마찰계수를 보였다. 이는 인간피부에 대한 비슷한 조건에

Fig. 9. Friction coefficients as a function of apparent contact pressure (mean values $\pm$ SD or range) indicate that the friction coefficients of wet skin (exposure times of 0-30 min) depend on the contact pressure, whereas for dry skin (exposure times of 30-150 min) no pressure-dependence can be seen.

서의 기존 연구와 수치와 경향 모두 유사한 결과를 보이고 있다[14]. 그러므로 본 연구의 돼지피부에 대한 연구결과는 인간피부 연구에 직접 연계시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 노출시간을 길게 할 경우 피부가 건조되는 것을 넘어 굳은살처럼 경화되는 과정까지의 마찰거동을 살펴봄으로써 매우 건조한 상태의 마찰거동을 습한 상태의 마찰거동과 효과적으로 비교해 볼 수 있었다.

결론

인간피부 연구의 대용인 돼지피부를 공기 중에 노출시켜 시편이 경화되어감에 따라 변화하는 윤활학적 거동을 압입, 마찰 및 스크래치시험을 실시하여 평가하였다. 공기노출 시간에 따른 시험은 독창적인 방법으로서, 피부마찰에 중요한 요소인 응착과 변형을 효과적으로 비교 및 분석할 방법임을 확인하였다. 응착 및 압입시험을 통해 150-300 μm 의 압입깊이 범위에서 탄성계수가 노출시간에 비례해 선형적으로 증가하나 탄성계수의 감소비율은 노출시간과는 거의 무관하였다. 마찰시험을 통해서도 피부시편이 젖어 있거나 다소 건조한 상태가 되는 노출시간인 60분 이전 구간에서는 점성마찰의 영향이 지배적이지만 나머지 구간에서는 변형마찰의 영향을 무시할 수 없는 것으로 사료된다. 스크래치시험을 통해서도 노출시간과 하중에 따른 마

찰력과 변형의 관계를 규명하였으며, 임계노출시간을 기준으로 마찰계수와 하중 간의 상관관계를 살펴볼 수 있었다. 접촉압력에 따른 마찰거동 분석에서 돼지피부에 대한 본 연구의 시험결과가 인간피부에 대한 기존 결과와 유사하였으므로 돼지피부 연구가 인간피부 연구에 중대한 기여를 할 수 있음을 확인하였다.

Nomenclature

F_{ad}	Adhesion friction component
F_w	Wettability force or short-range surface attraction through the liquid phase
F_H	Hydrodynamic force or the viscous force
F_s	Capillary meniscus force
F_{int}	Friction force
τ	Interfacial shear strength associated with rupture of short range molecular interactions
A	Area of contact
F_{tot}	Total friction force
F_{def}	Deformation friction component
μ	Coefficient of friction
W	Total normal load
p	Contact pressure
d	Vertical deformation
a	Radius of the circular contact zone
R	Radius of the sphere
N	The normal force
E_c	Composite elastic modulus
E_1	The elastic modulus of the spherical probe
E_2	The elastic modulus of the skin
ν_1	Poisson ratio of the spherical probe
ν_2	Poisson ratio of the skin
E_{skin}	Approximated elastic modulus of the skin
ν_{skin}	Approximated Poisson ratio of the skin

Acknowledgements

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

[1] Lim, J. et al., "Mechanical response of pig skin under

dynamic tensile loading," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 38, pp. 130-135, 2011.

- [2] Miles, A. A. and Miles, E. M., "Vascular reactions to histamine, histamine e-liberator and leukotaxine in the skin of guinea-pigs," *Journal of Physiology*, Vol. 118, No. 2, pp. 228-257, 1952.
- [3] Simon, G. A. and Maibach, H. I., "The pig as an experimental animal model of percutaneous permeation in man: qualitative and quantitative observations - an overview," *Skin Pharmacology and Physiology*, Vol. 13, pp. 229-234, 2000.
- [4] Tsukise, A. Z. and Meyer, W., "Histochemistry of complex carbohydrates in the hairy skin of the domestic pig," *Histochemical Journal*, Vol. 15, pp. 845-860, 1983.
- [5] Chen, S. and Bhushan, B., "Nanomechanical and nanotribological characterization of two synthetic skins with and without skin cream treatment using atomic force microscopy," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 398, pp. 247-254, 2013.
- [6] Bhushan, B. et al., "Friction and durability of virgin and damaged skin with and without skin cream treatment using atomic force microscopy," *Beilstein Journal of Nanotechnology*, Vol. 3, pp. 731-746, 2012.
- [7] Hall, E.J., *Radiobiology for the Radiologist*, third edition. J.B. Lippincott Company, Philadelphia, 1988.
- [8] Renaudeau, D. et al., "Differences in skin characteristics in European (LargeWhite) and Caribbean (Creole) growing pigs with reference to thermoregulation," *Animal Research*, Vol. 55, pp. 209-217, 2006.
- [9] Forbes, P. D., "Vascular supply of the skin and hair in swine," Chapter XXVII in *Advances in Biology of Skin*, Vol. IX, Hair Growth, Montagna, W. and R. L. Dobson (editors), Pergamon Press, Oxford, pp. 419-432, 1969.
- [10] Agache, P., *Physiologie de la peau et explorations fonctionnelles cutanées*, Editions Me'dicales Internationales, 2000.
- [11] Paillet-Mattéi, C. and Zahouani, H., "Analysis of adhesive behaviour of human skin in vivo by an indentation test," *Tribology International*, Vol. 39, pp. 12-21, 2006.
- [12] Bocquet, L. et al., "Physics of humid granular media," *Comptes Rendus Physique*, Vol. 3, pp. 207-215, 2002.
- [13] Johnson, K. L. et al., "Surface energy and the contact of elastic solids," *Proceedings of the Royal Society A*, Vol. 324, pp. 301-313, 1971.
- [14] Derler, S. and Gerhardt, L.-C., "Tribology of skin: review and analysis of experimental results for the friction coefficient of human skin," *Tribology Letters*, Vol. 45, pp.1-27, 2012.
- [15] Subrahmanyam, M. et al., "Friction of the Human Finger Pad: Influence of Moisture, Occlusion and

- Velocity," Tribology Letters, Vol. 44, pp. 117-137, 2011.
- [16] Derler, S. and Rotaru, G.-M., "Stick-slip phenomena in the friction of human skin," Wear, Vol. 301, pp. 324-329, 2013.
- [17] Berman, A. D. et al., "Origin and characterization of different stick-slip friction mechanisms," Langmuir, Vol. 12, No. 19, pp. 4559-4563, 1996.
- [18] Kwiatkowska, M. et al., "Friction and deformation behaviour of human skin," Wear, Vol. 267, pp. 1264-1273, 2009.
- [19] Adams, M. J. et al., "Friction and lubrication of human skin," Tribology Letters, Vol. 26, pp. 239-253, 2007.
- [20] Wang, T. H. et al., "Analysis of the substrate effects of strain-hardening thin films on silicon under nanoindentation," Applied Physics A, Vol. 86, pp. 335-341, 2007.
- [21] Park, A. C., and Baddiel C. B., Journal of the Society of Cosmetic Chemists, Vol. 23, No. 3, 1972.
- [22] Alcazar, J. A. et al., "Estimating Object Grasp Sliding via Pressure Array Sensing," 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1740-1746.