



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

**피부의 기계적 특성을 모사하는  
피부 팬텀 개발 연구**

**Development of skin phantom mimicking  
mechanical properties of the skin**

2022년 8월

서울대학교 대학원

기계공학부

김 현 지

# 피부의 기계적 특성을 모사하는 피부 팬텀 개발 연구

지도교수 김 호 영

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함  
2022년 4월

서울대학교 대학원  
기계공학부  
김 현 지

김현지의 공학석사 학위논문을 인준함  
2022년 6월

위 원 장           송  성  진           (인)

부위원장           김  호  영           (인)

위      원           황  원  태           (인)

## 초 록

사람의 피부는 얇은 층의 상피인 표피, 그 아래의 진피, 그리고 피하조직으로 구성되어 있으며 각각 물리적 특성이 다르다. 그중 피부의 탄력에 주된 요인이 되는 구성 성분은 진피에 위치한 콜라겐과 엘라스틴이다. 콜라겐은 진피 내에서 피부를 구조적으로 지탱해 주는 역할을 하며 엘라스틴은 변형된 피부가 원래 상태로 돌아오게 하는 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 히알루론산은 진피 내에서 프로테오글리칸과 부착하여 프로테오글리칸 집합체를 이루고 있으며, 수분 결합 특성을 가지고 있기 때문에 피부 보습 역할을 한다. 사람 피부는 노화가 진행됨에 따라 콜라겐과 엘라스틴 섬유조직이 경화되고 불용성이 된다. 또한, 히알루론산의 양이 감소하기 때문에 피부의 탄력은 노화 진행에 따라 줄어든다.

피부의 특성을 반영한 피부 팬텀을 개발하는 연구가 다양한 관점에서 이루어지고 있다. 피부의 광학적 특성, 음향학적 특성, 표면적 특성, 기계적 특성 등 여러 특성을 모사하는 목적으로 개발되는 피부 팬텀들이 존재한다. 본 연구에서는 피부의 탄력을 측정할 수 있는 기반을 마련하기 위해 탄력과 관계된 기계적 특성을 모사하는 피부 팬텀을 개발하였다. 제작한 피부 팬텀은 다층 구조로 각 층의 기계적 특성을 반영하고 있으며, 진피 팬텀은 다공성 구조를 가지고 있다. 또한 본 연구에서 개발한 피부 팬텀은 실제 피부의 점탄성 특징을 모사하고 있다.

본 연구에서는 우선 피하지방 팬텀을 제작하고, 피부의 탄력과 깊은 연관성이 있는 진피의 팬텀을 제작한 다음, 그 위에 표피 팬텀을 제작하여 결합하는 방법으로 다층 구조의 피부 팬텀을 제작하였다. 피부의 표피와 피하지방은 탄성 물질에 해당하므로 각 층과 같은 탄성

계수를 가지는 실리콘을 사용하여 팬텀을 제작하였다. 표피 팬텀의 경우 실제 피부의 표피가 매우 얇기 때문에 두께를 실제 피부와 같게 맞추기 위해 스핀 코터를 사용하여 얇게 제작하였다. 사람의 진피는 점탄성 물질로 알려져 있기 때문에 진피 팬텀 또한 점탄성을 가지도록 제작하였다. 진피 내 탄력 섬유가 하는 역할을 모사하기 위해 하이드로젤을 동결건조하였으며, 동결건조하는 조건을 바꾸어가며 실제 피부와 같은 공극의 크기를 갖도록 제작하였다. 동결건조한 하이드로젤 안에 액체를 주입하여 완성된 진피 팬텀이 점탄성을 갖도록 하였다.

사람 피부의 탄력을 측정하는 접촉형 기술로는 다음의 네 가지 대표적인 기술이 있다. 첫 번째는 힘을 주었을 때 해당 변위를 측정하는 방법이고 두 번째는 전극을 사용하여 저항을 측정하는 방법이며, 세 번째는 음압을 주어 변위를 측정하는 방법이고 마지막으로 이미터가 분파동을 리시버가 분석하는 방법이다. 그중 본 연구에서는 첫 번째 기술을 사용하였으며 구형 프로브로 응력 완화 시험을 진행하여 점탄성을 분석하였다. 팬텀으로 실험하기 전 돈피로 실험을 한 결과 피부는 두 개의 지수적 감쇠 함수의 합으로 나타낼 수 있어야 함을 확인하였고, 제작한 팬텀 또한 돈피 측정 결과와 잘 맞는 것을 확인하였다.

피부 팬텀의 제작 과정의 단계별로 제작 조건에 따라 응력 완화 시험 결과가 달라지며 본 연구에서 이를 분석하였다. 젤라틴 농도가 증가할수록 일반화된 맥스웰 모델에서 탄성에 해당하는 계수들이 증가한다. 팬텀 내 액체의 점성이 증가하면 시상수들이 증가한다. 이 결과들을 활용하여 본 연구에서 개발한 피부 팬텀은 실제 피부의 탄력과 관련이 있는 요소들의 변화를 반영할 수 있다.

피부 팬텀의 개발은 신뢰성 있는 탄력 측정 기기 개발의 밑바탕이 된다. 기존의 탄력 측정 기기와는 다르게 콜라겐, 엘라스틴 등 피부의

탄력에 영향을 주는 요소들을 구분하여 측정할 수 있다면 이는 피부의 탄력을 측정하는 방법을 새롭게 표준화할 수 있는 기틀이 될 것이다. 향후에는 이를 기반으로 고객에게 피부 분석 결과를 바탕으로 피부 고민에 대한 맞춤 해결 방안을 제시할 수 있을 것이다.

**주요어** : 피부 팬텀, 진피, 점탄성, 압흔 시험, 응력 완화 시험, 소프트 물질

**학 번** : 2020-24145

# 목 차

제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 피부의 구조 .....	1
제 2 절 피부의 노화 .....	2
제 2 장 피부 팬텀의 제작 .....	3
제 1 절 표피와 피하지방 팬텀의 제작 .....	3
제 2 절 진피 팬텀의 제작 .....	9
제 3 절 피부 팬텀의 제작 .....	14
제 3 장 피부의 기계적 특성의 측정 .....	16
제 1 절 피부의 탄력 측정 .....	16
제 2 절 압흔 시험 .....	18
제 3 절 응력 완화 시험 .....	20
제 4 절 피부 팬텀의 기계적 특성 .....	26
제 4 장 피부의 탄력 요소 분석 .....	28
제 1 절 진피 팬텀 구성 물질 함량에 따른 탄력 분석 .....	28
제 2 절 진피 팬텀 내부 액체에 따른 탄력 분석 .....	30
제 5 장 결 론 .....	32
참고문헌 .....	33
Abstract .....	35

## 표 목차

[표 1] 희석제를 첨가한 폴리머와 첨가하지 않은 폴리머의 영률 .....	6
--	---

## 그림 목차

[그림 1] 폴리머 종류별 인장 시험 결과 .....	5
[그림 2] 표피 팬텀 폴리머의 인장 시험 결과 .....	7
[그림 3] 스핀 코팅 시간에 따른 표피 팬텀 폴리머의 두께 .	8
[그림 4] 동결건조 후 진피 팬텀의 현미경 사진 .....	11
[그림 5] (a) $-10^{\circ}\text{C}$ 에서 동결 (b) $-40^{\circ}\text{C}$ 에서 동결한 젤라틴 하이드로젤의 SEM 사진.....	12
[그림 6] 진피 팬텀 제작 과정 .....	13
[그림 7] 피부 팬텀 결합 과정 및 제작한 피부 팬텀 .....	15
[그림 8] 프로브 모양 별 PDMS 압흔 실험 결과와 Hertz 접촉 이론과의 비교.....	19
[그림 9] 돈피의 응력 완화 시험 결과 .....	22
[그림 10] Generalized Maxwell 모델.....	23
[그림 11] 돈피의 응력 완화 시험 결과 .....	24
[그림 12] 돈피 응력 완화 시험 결과와 피팅 결과.....	25
[그림 13] 피부 팬텀 응력 완화 시험 결과와 피팅 결과 ....	27
[그림 14] 젤라틴 농도에 따른 탄력 관련 변수들.....	29
[그림 15] 첨가 액체의 점성에 따른 시상수 변화.....	31



# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 피부의 구조

피부는 얇은 층의 상피인 표피, 그 아래의 진피, 그리고 피하조직으로 구성되어 있다. 사람 피부의 경우 표피의 평균 두께는 수백  $\mu\text{m}$ 이며 진피의 평균 두께는 수천  $\mu\text{m}$ 로, 진피가 표피보다 10배 정도 두껍다. 국내에서 사람 얼굴의 피부 두께를 측정한 결과[1] 표피와 진피를 합한 두께는 1.51 mm에서 1.97 mm이고, 피하조직의 경우 1.61 mm에서 5.14 mm이다. 탄성 계수의 경우 표피는 수 MPa이고 진피는 수십 kPa이며 피하조직은 수 kPa이다. 즉, 피부는 얇고 단단한 껍질 안에 말랑말랑한 물질이 들어있는 구조이다.

사람 진피의 주된 구성 성분은 물과 섬유상 단백질인 콜라겐과 엘라스틴, 기질인 프로테오글리칸과 히알루론산이다. 콜라겐의 지름은 약 10  $\mu\text{m}$ 이며, 인장 강도는 대략 1 GPa이다[2]. 콜라겐은 단단하고 굵은 섬유상 단백질로 진피 내에서 피부를 구조적으로 지탱해 주는 역할을 한다. 엘라스틴의 지름은 0.2-2  $\mu\text{m}$ 이며, 영률은 100-350 kPa이다. 엘라스틴은 탄력성을 가지며 콜라겐보다 잘 늘어나는 특성을 가지기 때문에 변형된 피부가 원래 상태로 돌아오게 하는 역할을 한다. 프로테오글리칸은 건조된 피부 질량의 20%, 부피의 80%를 차지하고 있다. 프로테오글리칸은 진피 내에서 히알루론산에 부착되어 프로테오글리탄 집합체를 이루고 있다. 이러한 프로테오글리칸 집합체는 다른 섬유상 단백질에 휘감긴 상태로 존재하며, 수분 결합 특성을 가지기 때문에 피부의 보습 역할을 한다. 진피의 콜라겐과 엘라스틴은 피부의 기계적 특성과 관련이 있다. 2001 년에 진행된 연구에서는 피부를 당길 때 필요한 힘을 측정하였다[3]. 연구 결과에 따르면 피부를

당길 때 낮은 변형에서는 엘라스틴의 영향이, 높은 변형에서는 콜라겐의 영향이 지배적이다. 이와 같은 결과가 나오는 이유는 콜라겐 섬유가 엘라스틴과는 다르게 피부에 변형이 가해지지 않은 상태에서는 구조적으로 구겨져 있기 때문이다. 따라서 피부를 당길 때 낮은 변형에서는 엘라스틴의 변형이 우세하므로 영률이 낮게 측정된다. 반면 높은 변형에서는 구겨져 있는 콜라겐 섬유를 펴는 데 힘이 들기 때문에 영률이 높게 측정된다. 프로테오글리칸과 히알루론산의 경우 피부의 점탄성에 기여를 하고 있으며, 프로테오글리칸 집합체의 농도가 진할수록 용액의 복소전단탄성계수( $G^*$ )와 점성이 증가한다는 연구가 1984년에 진행되었다[4]. 즉, 강한 점탄성을 가진 피부일수록 프로테오글리칸과 히알루론산이 많은, 보습이 뛰어난 피부라고 할 수 있다. 본 연구는 이처럼 진피 구성 물질들이 각각 피부의 기계적 특성에 미치는 영향을 고려하여 진행되었다.

## 제 2 절 피부의 노화

사람의 피부는 노화가 진행됨에 따라 구조적 변화를 겪는다. 노화된 피부일수록 피부의 두께가 감소하며, 탄력을 상실하고 건조화되어 깊은 주름과 잔주름이 나타난다. 젊은 피부의 경우 표피와 진피의 경계인 진피표피경계부 표면이 울퉁불퉁하게 되어 있어 진피와 표피를 강하게 붙여준다. 하지만 피부가 노화할수록 진피표피경계부가 편평해지므로 부착력이 약해진다. 피부는 시간이 지남에 따라 구조적으로 변화할 뿐만 아니라 구성하고 있는 물질의 함량도 변한다. 피부에 노화가 진행되면 피부 구조를 지탱하는 기본 버팀목인 콜라겐과 엘라스틴 섬유조직이 경화되고 불용성이 된다. 또한 세포 기질에 위치한 수분을 보유하는 능력이 매우 강한 히알루론산의 양이 감소한다. 따라서 피부의 탄력은

노화 진행에 따라 줄어든다.

## 제 2 장 피부 팬텀의 제작

### 제 1 절 표피와 피하지방 팬텀의 제작

피부 팬텀 제작은 세 단계로 이루어진다. 우선, 피하지방 팬텀을 제작하고, 피부의 탄력과 깊은 연관성이 있는 진피의 팬텀을 제작한 다음, 그 위에 표피 팬텀을 제작하여 결합시킨다. 따라서 제일 먼저 표피와 피하지방 팬텀을 제작하였다.

표피는 탄성, 점성, 점탄성 물질 중 탄성 물질에 해당한다[5]. 표피의 탄성 계수는 1 MPa대로 알려져 있고, 평균 두께는 0.1 mm 정도로 알려져 있으므로[6] 표피 팬텀 제작의 기준은 앞의 두 값과 같은 탄성 계수와 두께를 갖는 것이다. 탄성 계수 조건을 맞추기 위해 탄성 계수가 1 MPa대인 실리콘을 찾아 팬텀의 주재료로 선택하였다. 우선, Dragon skin과 Smooth-Sil, 그리고 그들을 각각 반씩 섞은 폴리머들로 인장 시험을 진행하였고 그 결과는 그림 1과 같다. 그 결과 영률이 각각 0.1846 MPa, 0.3149 MPa, 0.4744 MPa이었다. 이후 Ecoflex, Smooth-Sil 950, 960과 이에 희석제를 섞은 폴리머들의 탄성 계수를 측정하기 위해 폴리머들을 ASTM(American Society for Testing Materials, 미국재료시험협회) 인장 시험에 사용되는 형태로 만들었으며, 인스트론으로 인장 길이에 따른 힘을 측정하여 탄성 계수를 측정하였다. 그 결과 표 1과 같이 나왔으며, 이때 표피와 제일 비슷한 영률을 보인 폴리머는 희석제를 섞은 Smooth-Sil 960이었고, 이의 인장 시험을 한 번 더 진행하여 그림 2와 같이 영률이 1 MPa대가 나오는 것을 확인하였다.

재료를 선택한 뒤 두께 조건을 맞추기 위하여 폴리머를 균히기 전 스핀 코터로 두께를 감소시켰다. 500 rpm으로 회전하면서 시간에 따른 폴리머 두께를 측정하였고 그 결과 그림 3과 같이 120초 이상 회전시켰을 때 두께가 0.14 mm가 되었다. 따라서 표피 팬텀은 Smooth-sil 960에 실리콘 희석제를 10% 섞고, 스핀 코터로 120초 이상 500 rpm으로 돌린 후 균히면 완성된다. 이렇게 제작한 표피 팬텀은 탄성 계수와 두께가 실제 피부와 같다. 또한, 소수성을 띠어 진피의 유체로 인한 물성 변화가 없으며, 실제 피부에서의 표피와 같이 진피 팬텀 내 유체가 밖으로 나가지 않도록 방지한다.

피하지방의 경우 표피와 비슷한 이유로 탄성 물질로 볼 수 있다. 피하지방은 지방을 가지고 있는 세포들이 밀집되어있는 구조로, 알려진 탄성 계수는 대략 2 kPa이다[6]. 이를 모사하기 위해 ecoflex 폴리머를 사용하였으며, 몰드를 사용하여 2mm 정도 두께의 polymer를 제작하였다.

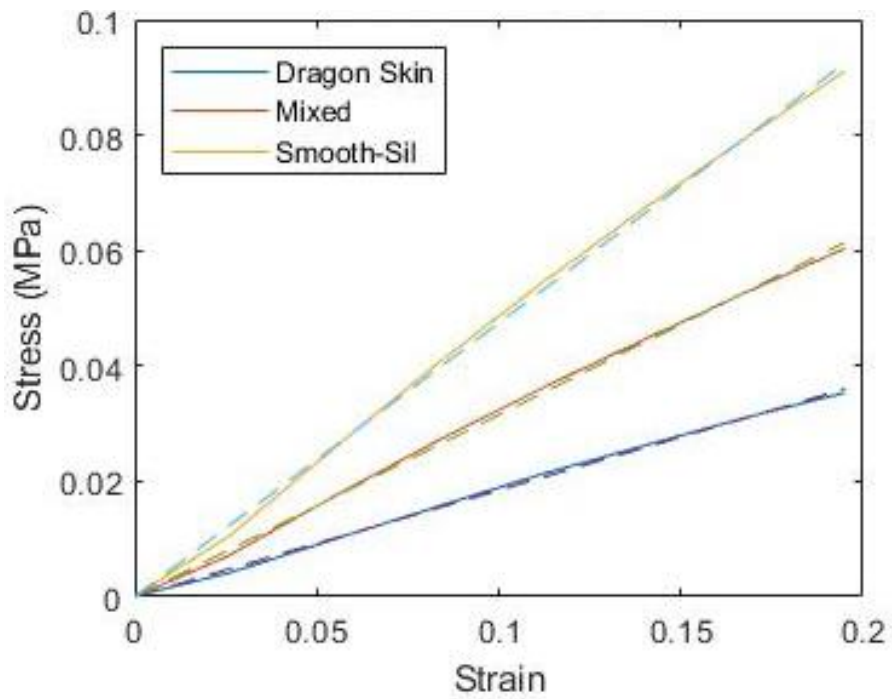


그림 1 폴리머 종류별 인장 시험 결과

<b>100% modulus [MPa]</b>	<b>Normal</b>	<b>Silicone Thinner added</b>
<b>SORTA-Clear 12</b>	0.1577	0.1013
<b>Smooth-Sil 936</b>	0.3982	0.2619
<b>Smooth-Sil 960</b>	1.572	1.017

표 1 희석제를 첨가한 폴리머와 첨가하지 않은 폴리머의 영률

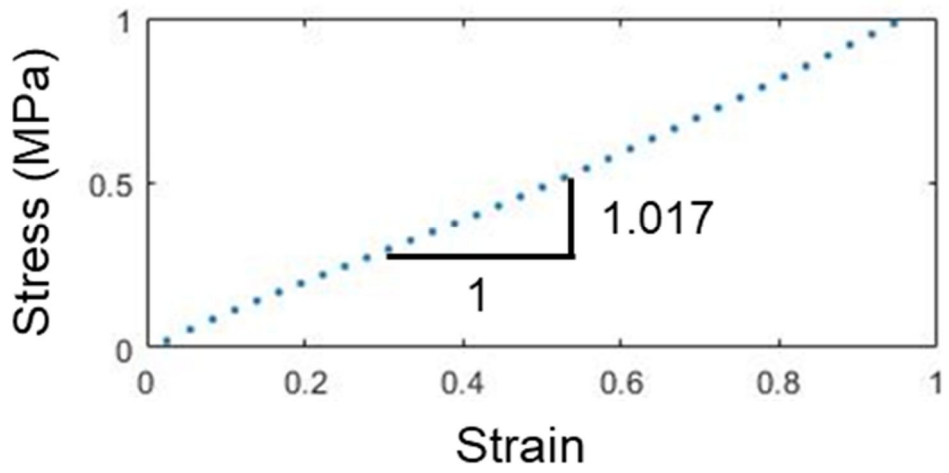


그림 2 표피 팬텀 폴리머의 인장 시험 결과

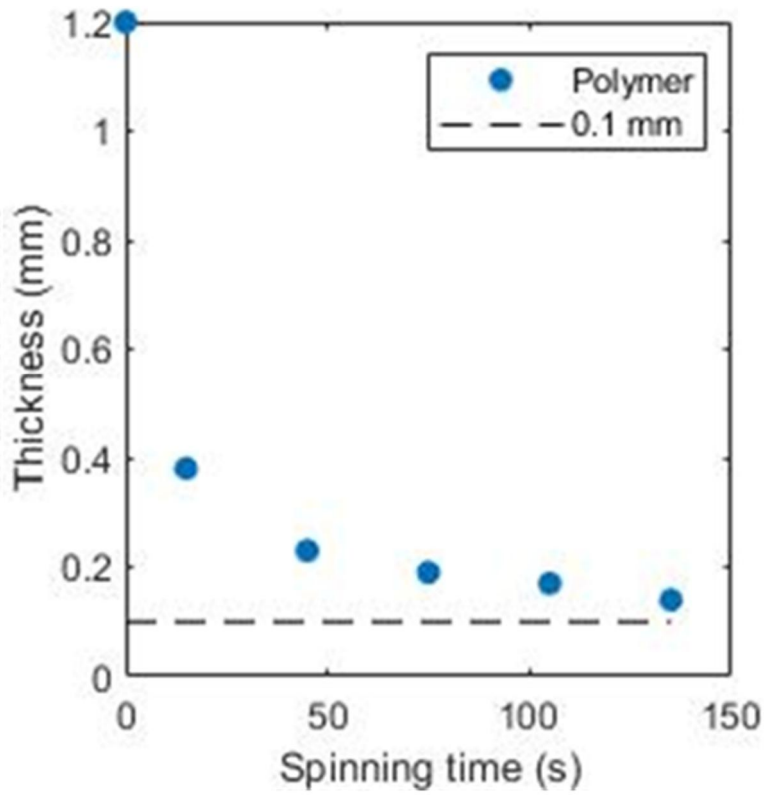


그림 3 스핀 코팅 시간에 따른 표피 팬텀 폴리머의 두께



## 제 2 절 진피 팬텀의 제작

진피는 표피와 다르게 등방성의 점탄성 물질에 해당하므로[7] 진피 팬텀은 두께 1-2 mm이어야 하고[8] 공극의 크기는 100  $\mu\text{m}$ 대이어야 하며[9] 점탄성을 가져야 한다. 피부 탄력에 영향을 주는 주된 구성 물질이 진피의 콜라겐이다. 이에 본 연구에서는 삼중 나선으로 된 콜라겐을 단일 나선으로 분해한 젤라틴으로 하이드로젤을 만들어 진피를 모사하였다. 젤라틴은 가공하기 쉽고, 높은 가격의 콜라겐을 대체할 물질로 적합하다.

젤라틴 하이드로젤은 80°C로 가열한 젤라틴 수용액을 냉각시켜 만든다. 이때, 두께 2 mm인 몰드를 사용하여 실제 진피와 두께가 같도록 제작하였다. 냉각 후에 젤이 형성된 후에는 1% glutaraldehyde 수용액에 24시간 이상 담가서 확산시켰다. 이는 물리적으로만 가교화 되어있는 젤라틴을 화학적으로 가교화하여[10] 이후 과정을 거칠 때 공극이 손상되는 것을 방지하기 위함이다. 그다음으로 맞춘 진피 팬텀의 조건은 공극의 크기이다. 젤라틴 하이드로젤은 공극의 크기가 나노미터 단위이기 때문에[11] 동결건조 과정을 거쳐 젤을 훼손하지 않고 공극의 크기를 증가시켰다. 이후 딱딱하게 언 젤에서 얼음을 제거해야 하는데, 그냥 녹이게 될 경우 공극들이 손상되기 때문에 삼중점 아래의 압력에서 얼음을 기체로 승화시켜 제거하였다. 냉동고(-10°C)에서 6시간 이상 얼린 후 진공 데시케이터 안에서 하루 이상 건조하면 공극의 크기가 100  $\mu\text{m}$ 대가 되는 것을 그림 4와 같이 확인하였다.

진피 팬텀을 제작하는 과정에서 공극의 크기를 비교하기 위해 향온향습기를 사용하여 -10°C와 -40°C로 냉각시킨 샘플을 주사전자현미경으로 관찰하였다. 관찰 결과 아래 그림 5과 같이 -40°C에서 동결시킨 샘플의 공극이 실제 피부와 유사한 크기를 갖는

것을 확인하였다.

마지막으로, 진피 팬텀이 점탄성을 갖도록 하기 위하여 동결건조 과정을 거치면서 딱딱해진 젤라틴에 물을 다시 흡수시켰다. 물이 다시 들어가면 젤라틴 공극들 사이로 물이 이동할 수 있기 때문에 진피 팬텀은 점탄성을 가지게 된다. 이와 같은 진피 팬텀 제작 과정은 그림 6에서 간단하게 확인할 수 있다.

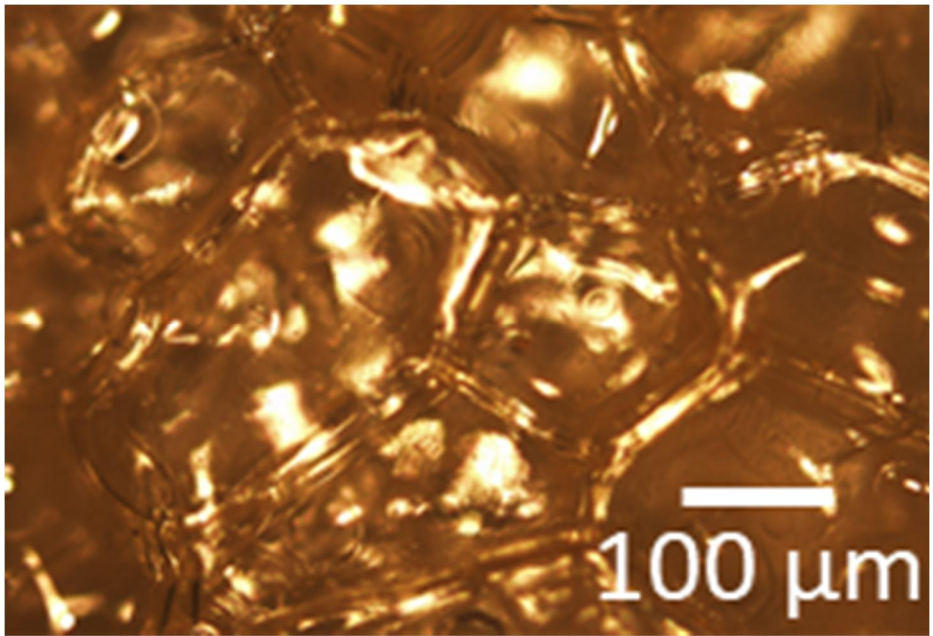


그림 4 동결건조 후 진피 팬텀의 현미경 사진

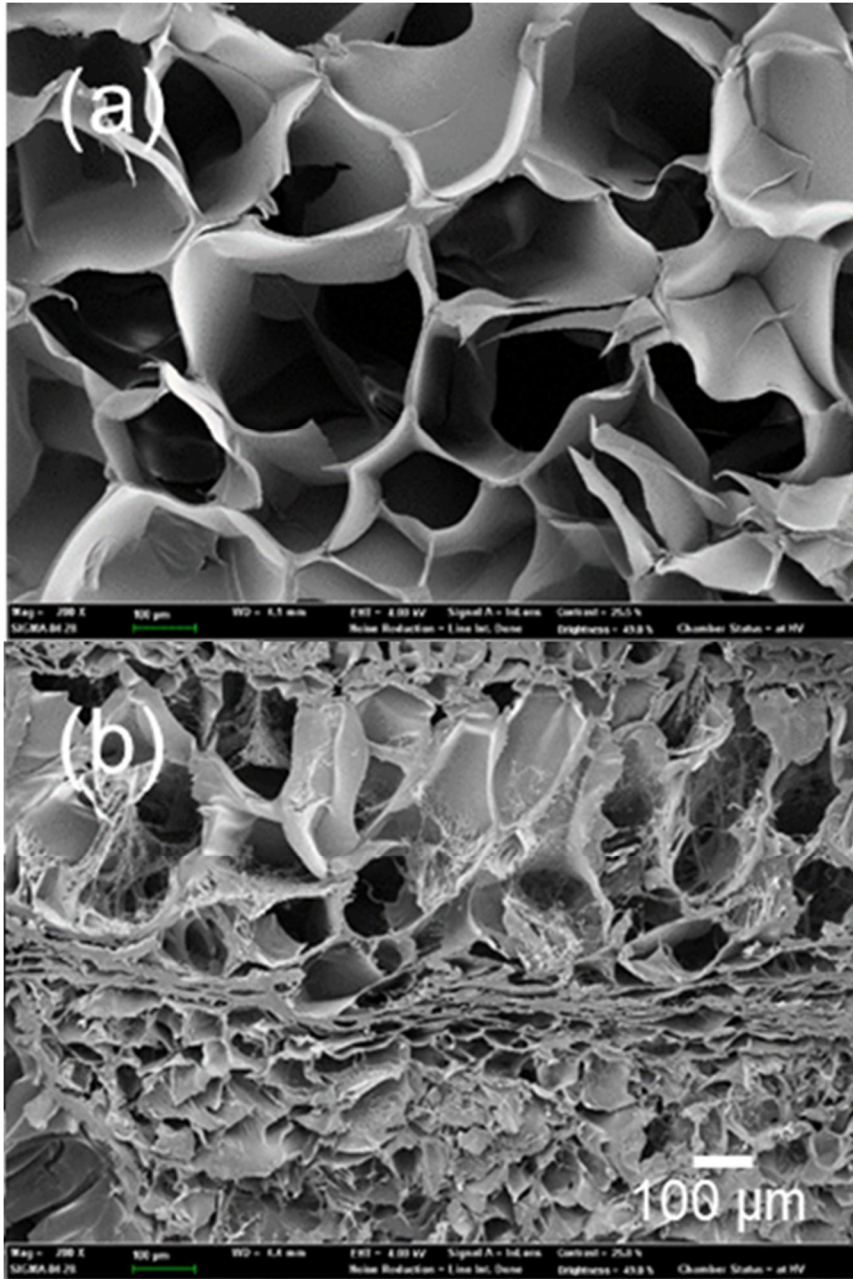
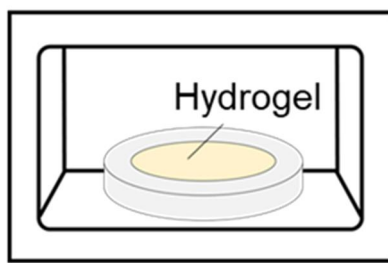
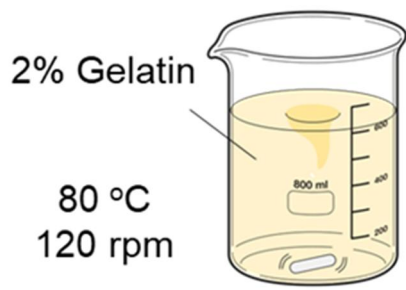


그림 5 (a)  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서 동결 (b)  $-40^{\circ}\text{C}$ 에서 동결한 젤라틴  
하이드로젤의 SEM 사진



4°C

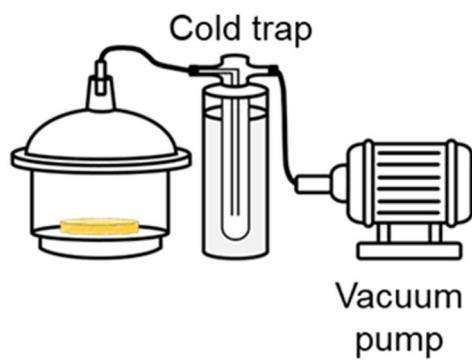
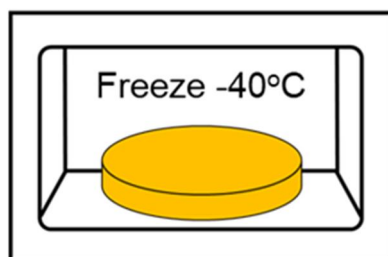


그림 6 진피 팬텀 제작 과정

### 제 3 절 피부 팬텀의 제작

본 연구의 목표는 세 개의 층으로 된 피부 팬텀을 제작하는 것이므로 제작한 표피, 진피, 피하지방 팬텀을 결합하였다. 팬텀을 각각 완성한 후 결합 시에는 결합력이 매우 약하다. 이는 젤라틴으로 만들어 내부에 물을 넣은 진피 팬텀은 친수성이고, 표피와 피하 지방 팬텀을 이루고 있는 폴리머는 소수성이기 때문이다. 따라서 이를 보완하고자 본 연구에서는 표피와 피하지방의 팬텀이 완성되기 전에 진피 팬텀과 결합하였다. 표피와 피하지방 팬텀은 폴리머가 경화되기 전에 진피 팬텀과 결합하였다. 진피 팬텀은 물을 첨가할 경우 소수성인 폴리머와의 접착력이 매우 약해지므로 물을 첨가하기 전 동결 건조된 젤라틴으로 표피 팬텀과 결합하였다. 피하지방 팬텀을 제작할 때 동결 건조된 젤라틴을 위에 올려놓고 경화하였다. 표피 팬텀의 경우 앞서 결합한 피하지방 팬텀과 액체를 첨가하기 전 진피 팬텀 위에 표피 팬텀을 이루는 폴리머를 올려놓은 뒤 스펀 코터를 작동시킨 후 굳혔다. 폴리머가 경화된 후의 샘플을 물에 넣어놓으면 진피 팬텀 부분에 물이 스며들어 제작하고자 한 피부 팬텀이 완성된다. 완성된 피부 팬텀의 사진은 이 과정을 표현한 그림 7에 포함되어 있다. 이와 같이 팬텀을 결합하면 접착제를 추가할 필요 없이 제작할 수 있다는 장점이 있다.

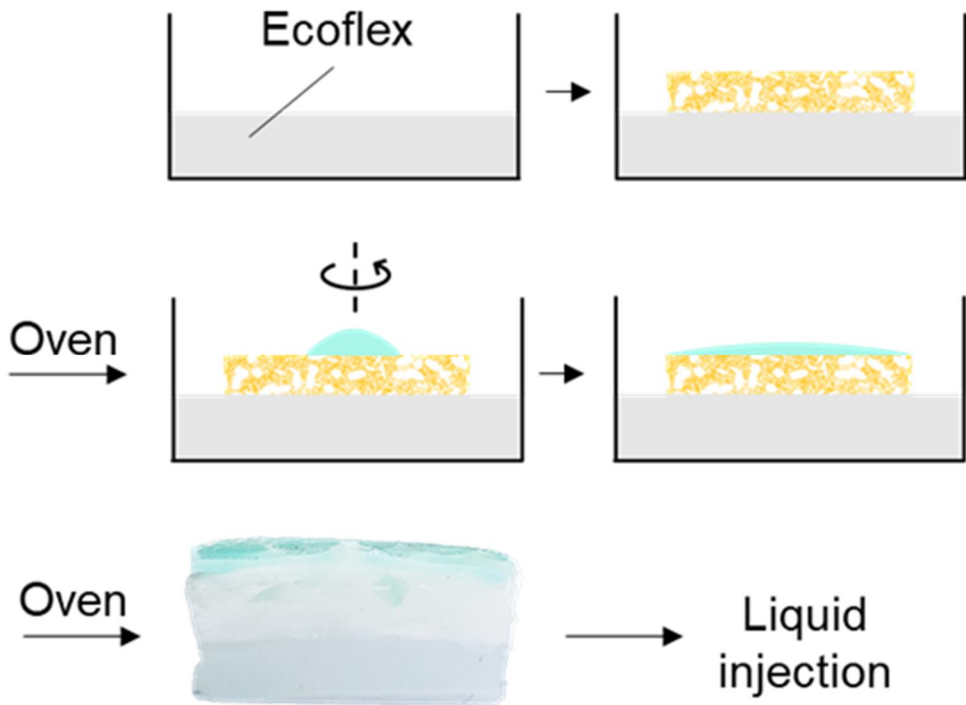


그림 7 피부 팬텀 결합 과정 및 제작한 피부 팬텀

## 제 3 장 피부의 기계적 특성의 측정

### 제 1 절 피부의 탄력 측정

피부와 같은 소프트 물질의 탄력을 측정하는 기존 기술들은 접촉형과 비접촉형으로 분류할 수 있다. 둘 중에서 비접촉형이 보편화되어 있으며 주로 카메라를 사용하여 분광학, 피부확대경검사로 피부 상태를 분석한다. 비접촉형 기기가 분석하는 항목으로는 피부 탄력, 톤, 모공, 주름, 색소 침착, 멜라닌 피지 등이 있다. 이 때 피부 탄력을 제외한 다른 항목들은 이미지를 분석하여 정확한 결과를 도출할 수 있다. 하지만 피부가 기계적 특성이 다른 3 개 이상의 층으로 구성된 점을 고려하면 표면의 이미지만으로 피부 탄력 값을 얻는 것은 신뢰도가 낮은 결과를 초래한다. 따라서 피부 탄력을 측정하려면 접촉형 기술이 필요하다.

피부 탄력을 측정하는 접촉형 기술로는 크게 네 가지가 있다. 첫 번째는 전극을 사용한 측정 방법이다. 두 개의 전극이 포함되어있는 기기를 피부와 접촉시키면 기기는 두 전극 사이에 전류를 흘려 보낸다. 이때 측정한 피부의 저항 값으로 피부의 수분 및 유분의 함량과 피부 나이를 결정한다. 하지만 이 기기가 측정하는 전류와 저항의 값이 매우 낮기 때문에 고객의 세안 여부, 화장 여부, 피부 상태 등에 따라 측정값이 달라지고 이는 탄력 측정 결과의 신뢰도를 저하시킨다. 나머지 기술들은 indentometer, reviscometer, cutometer 이다.

Indentometer 는 프로브가 피부를 누르면서 누르는 거리와 힘과의 관계를 사용하여 피부 탄력을 분석한다. 이는 셋 중에 실험적으로 가장 간단하며 이론이 가장 잘 수립되어 있다. Reviscometer는 파동 이미터와 리시버로 이루어져 있다. 이미터가 피부에 파동을 발생시키면



리시버가 피부를 통해 전달된 파동을 분석하여 탄력 측정 결과를 도출한다. 하지만 파동을 피부에 통과시키는 것은 고객들로 하여금 거부감을 일으킬 수 있다는 단점이 있다. Cutometer 는 현재 접촉형 피부 탄력 측정 기기 중 가장 보편화되어있다. Cutometer 는 관을 피부에 고정시킨 후 음압을 가하면 피부가 관 안쪽으로 늘어나는 원리를 사용한다. 늘어난 피부의 길이를 레이저로 측정하여 가해진 음압과 대응시키면 피부 탄력 값을 측정할 수 있다. 하지만 만일 측정하는 관과 피부 사이에 작은 틈이 존재한다면 걸어준 음압과 실제 피부가 느끼는 압력 사이에 차이가 생길 것이고 이는 탄력 측정 결과의 오차 발생 원인이 된다. 또한 압력을 사용하는 기기이기 때문에 측정 후에 자국이 남을 수 있다는 점은 고객이 측정을 거부하는 원인이 될 수 있다. 따라서 접촉형 피부 탄력 측정기의 기존 기술들을 분석했을 때 indentation을 탄력 측정 기기의 원리로 채택하는 것이 바람직하다.

기존 측정 기기들은 탄력 값을 하나로 규정하거나 측정한 자극과 반응에 대한 그래프를 해석하여 탄력 값을 여러 개 도출한다. 하지만 이들 모두 탄력 측정의 결과가 피부의 어떤 요소 때문에 나오는지 분석하지 않았기 때문에 피부 상태 설명은 미흡하다고 볼 수 있다. 즉, 앞서 나열한 기존 기술들은 측정값과 피부 상태의 관계에 대한 과학적 근거가 부족하며 이를 극복하는 새로운 분석 방법이 필요하다.

## 제 2 절 압흔 시험

앞서 피부 탄력을 측정하는 방법으로 indentation(압흔 방법)을 선정하였다. Indentation 방법을 적용하려면 사용할 프로브의 모양을 결정해야 한다. 프로브 모양의 대표적인 후보로는 구형(spherical), 원뿔형(conical), 원기둥꼴(disk-shaped)이 있다. 이와 같은 모양들의 프로브로 탄성 물질을 눌렀을 때 힘과 변위 사이 관계는 헤르츠의 접촉역학 이론으로 설명할 수 있다. 따라서 탄력 측정 실험을 수행하기 위한 신뢰성 높은 프로브 모양을 결정하기 위해 PDMS와 같은 탄성 계수값이 잘 알려진 엘라스토머를 활용하여 indentation 실험 결과를 이론과 비교하였고, 그 결과를 그림 8에 정리하여 나타내었다. 그 결과 구형 프로브와 콘형 프로브가 적합하였으나, 향후 사람 피부에 실험할 것을 고려하여 최종적으로 구형 프로브를 사용하는 것으로 결정하였다.

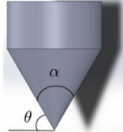
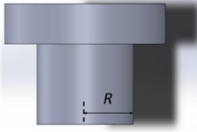
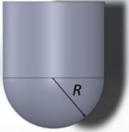
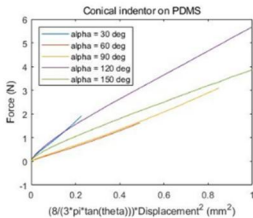
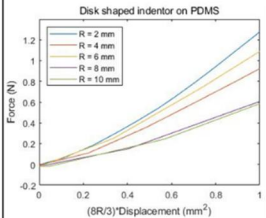
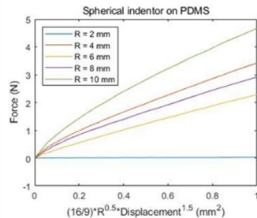
	Conical	Disk shaped	Spherical
Indenter shape			
Force-displacement	$F = \frac{2E}{\pi(1-\nu^2)} \frac{d^2}{\tan \theta}$	$F = 2RE*d$	$F = \frac{4}{3}E*R^{1/2}d^{3/2}$
Result			

그림 8 프로브 모양 별 PDMS 압흔 실험 결과와 Hertz 접촉 이론과의 비교

### 제 3 절 응력 완화 시험

피부는 점탄성 물질이기 때문에[7] 피부의 탄력을 측정하는 것은 피부의 점탄성을 측정하는 것과 같은 의미이다. 점탄성 물질의 경우 응력 완화 시험을 통해 점탄성을 측정하는 것이 적합하다고 알려져 있다[13]. 응력 완화 시험은 프로브를 빠르게 일정 깊이만큼 누른 후 가만히 있을 때 받는 힘의 변화를 측정하는 시험이다. 본 연구에서는 인스트론 3433을 사용하여 응력 완화 시험을 수행하였다. 실제 피부를 시험해보는 데 제한이 있었기 때문에 본 연구에서는 사람 피부와 가장 유사한 구조를 가지고 있는 돈피를 사용하여 시험하였다. 즉, 본 연구를 수행하기 위해서는 돈피의 응력 완화 시험 결과를 구현할 수 있는 이론식이 필요하다. 시험 결과는 그림 9와 같다.

본 연구에서는 점탄성을 가장 일반화한 generalized Maxwell 모델을 사용하였다. Generalized Maxwell 모델은 그림 10 과 같이 맥스웰 모델 여러 개를 병렬로 연결한 모델이다. 이 모델에 대한 응력과 변형의 관계는 Prony series 로 알려진 식 (1)이다.

$$\sigma(t) = (E_{\infty} + \sum_{k=1}^n E_k e^{-\frac{t}{\tau_k}}) \epsilon \quad (1)$$

본 연구에서 인스트론을 사용하여 측정하는 물리량이 변위와 힘이기 때문에 식 (1)을 힘과 변위에 대한 식으로 나타내면 식 (2)가 된다.

$$F(t) = \frac{8\sqrt{R}}{3} d^{\frac{3}{2}} \left[ E_{\infty} + \sum_{i=1}^N E_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right] \quad (2)$$

해당 변환에 사용한 가정은 구형 인덴터를 사용한다는 것이고, 이론은 Hertz 의 접촉 역학 이론이다.

돈피의 응력 완화 시험 결과는 시상수가 하나인 식으로는 표현이 되지 않지만, 시상수가 2개인 식으로 표현 가능하다. 그림 9의 구간 I에서는 시상수가 매우 작은 항이 우세하게 나타나고 구간 II의 경우 시상수가 큰 항이 우세하게 나타난다. 즉, 돈피 시험 결과는 각각의 시상수에 대한 지수적 감쇠 함수의 합으로 표현 가능하다. 따라서 본 연구에서는 식 (2)에서 시상수가 있는 항을 두 개까지 선택하였고, 수식으로는 아래 식 (3)과 같다.

$$F(t) = \frac{8\sqrt{R}}{3} d^{\frac{3}{2}} [E_{\infty} + E_1 e^{-t/\tau_1} + E_2 e^{-t/\tau_2}] \quad (3)$$

위 식으로 돈피의 응력 완화 시험 결과를 분석하면 그림 11와 같다. 구간 I에 해당하는 지수 감쇠는  $e^{-t/\tau_1}$  가 포함된 항이 우세하고, 구간 II에 해당하는 지수 감쇠는  $e^{-t/\tau_2}$  가 포함된 항이 우세하다. 두 종류의 지수 감쇠 항들을 합하면 그림 12와 같이 측정 결과와 잘 맞는 것을 확인하였다. 이와 같은 결과가 나오는 이유는 진피 내 존재하는 콜라겐과 엘라스틴의 시상수가 다르기 때문이라고 해석된다.

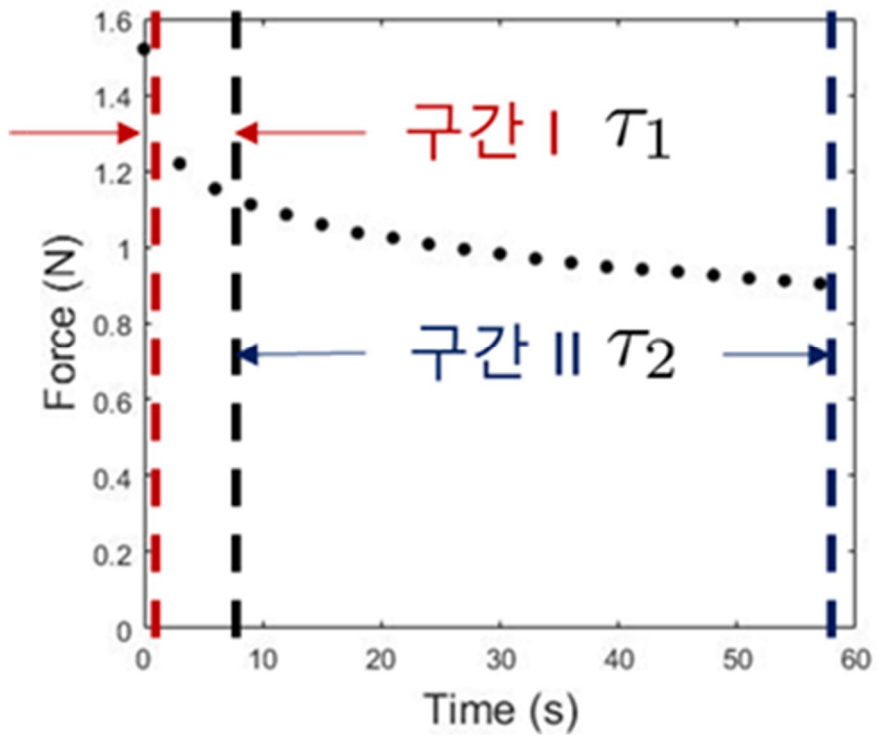


그림 9 돈피의 응력 완화 시험 결과

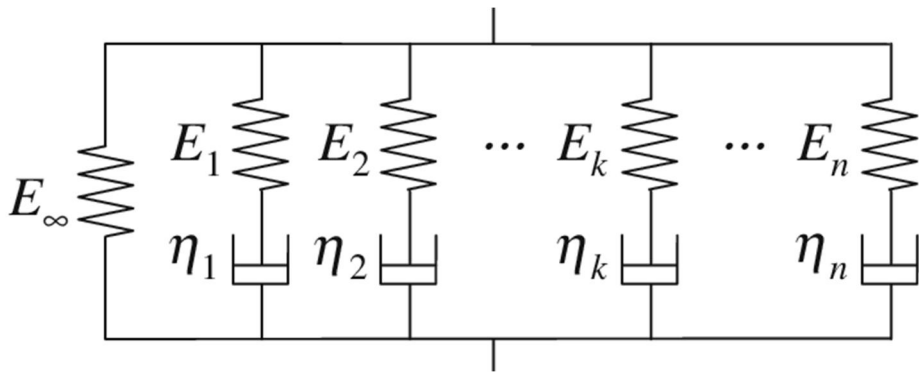


그림 10 Generalized Maxwell 모델

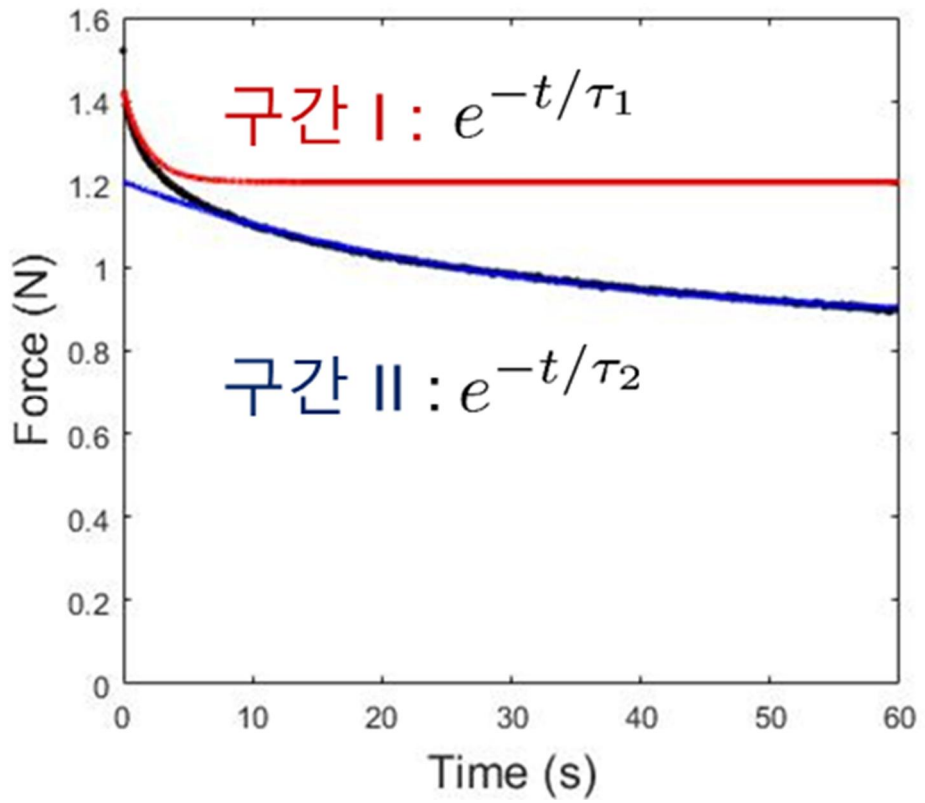


그림 11 돈피 응력 완화 시험 결과



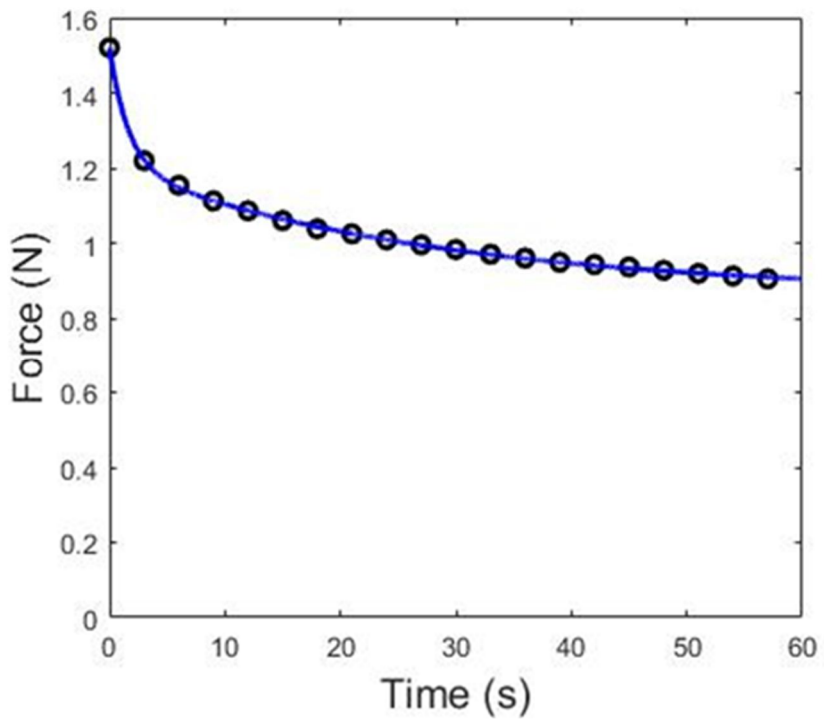


그림 12 돈피 응력 완화 시험 결과(o)와 피팅 결과(-)

## 제 4 절 피부 팬텀의 기계적 특성

본 연구에서 제작하는 피부 팬텀도 돈피와 같이 응력 완화 시험 결과가 두 개의 지수적 감쇠 함수의 합으로 나타낼 수 있어야 한다. 앞서 제작한 피부 팬텀으로 응력 완화 시험을 한 결과 그림 13과 같이 시상수 2개가 포함된 식으로 나타남을 알 수 있었다. 즉, 본 연구에서 제작한 피부 팬텀이 실제 피부의 점탄성을 잘 모사했음을 알 수 있다.

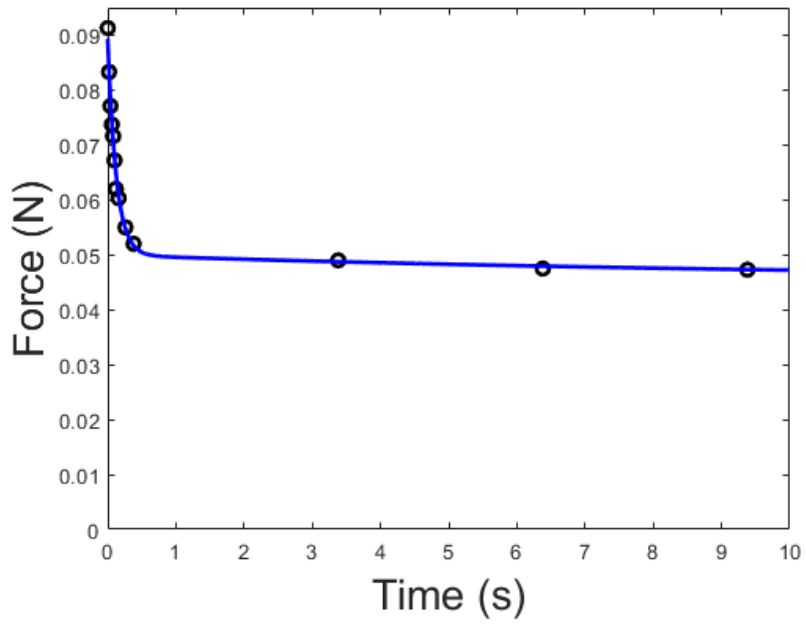


그림 13 피부 팬텀 응력 완화 시험 결과(o)와 피팅 결과(-)

## 제 4 장 피부의 탄력 요소 분석

### 제 1 절 진피 팬텀 구성 물질 함량에 따른 탄력 분석

본 연구에서는 피부 팬텀을 제작하는 과정의 단계별로 제작 조건에 따라 응력 완화 시험 결과가 어떻게 달라지는지 분석하였다. 피부 팬텀 제작 초기 단계에 해당하는 젤라틴 농도에 따라 탄력 관련 변수들을 구하였다. 결과는 그림 14과 같으며, 이로 따라 젤라틴 농도가 증가할수록 generalized Maxwell model에서  $E_{\infty}, E_1, E_2$  값이 증가하며, 두 개의 시상수는 변함이 없음을 확인하였다.

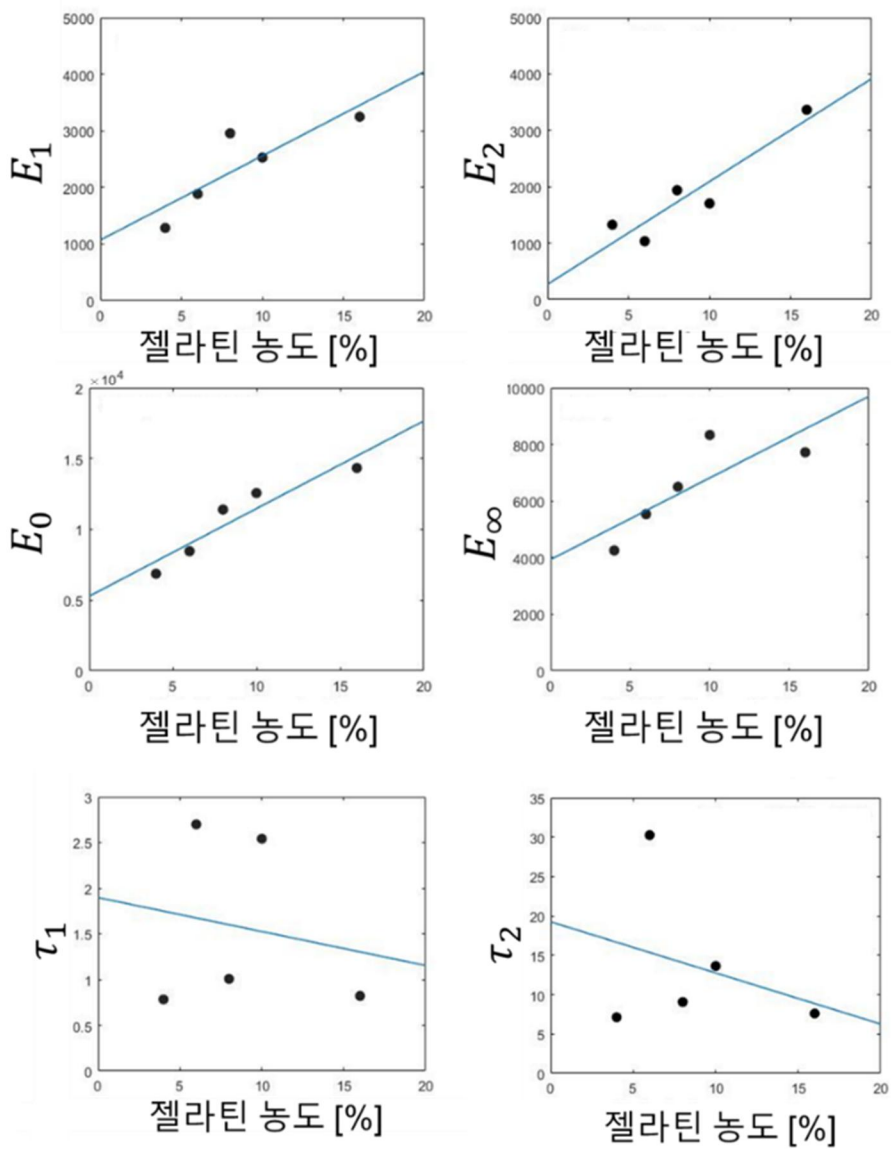


그림 14 젤라틴 농도에 따른 탄력 관련 변수들

## 제 2 절 진피 팬텀 내부 액체에 따른 탄력 분석

피부 팬텀 제작 과정에서 팬텀 내 액체의 점성에 따른 탄력 관련 변수 변화의 경우 그림 15와 같이 점성이 증가함에 따라 시상수도 증가하는 것을 확인하였다.

실제 피부 및 피부 팬텀의 구성 요소들과 탄력 관련 변수들 사이의 관계를 정리하자면 다음과 같다. 피부 팬텀 제작 과정에서 젤라틴 농도, GTA 농도, 공극 크기는 탄력 관련 변수들 중  $E_{\infty}, E_1, E_2$ 와 관련이 있고, 액체의 점성은 시상수들인  $\tau_1, \tau_2$ 와 관계가 있다. 실제 피부의 구성 요소들 중 프로테오글리칸과 히알루론산은 모든 탄력 관련 변수들과 관계가 있으며, 진피의 콜라겐과 엘라스틴은  $E_{\infty}, E_1, E_2$ 와 관련이 있다. 이 관계들을 각각 분석하면 실제 피부 구현을 위한 피부 팬텀 제작 조건을 알 수 있다.

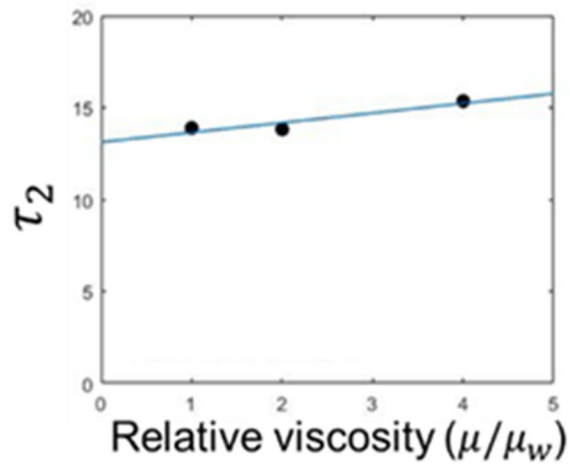
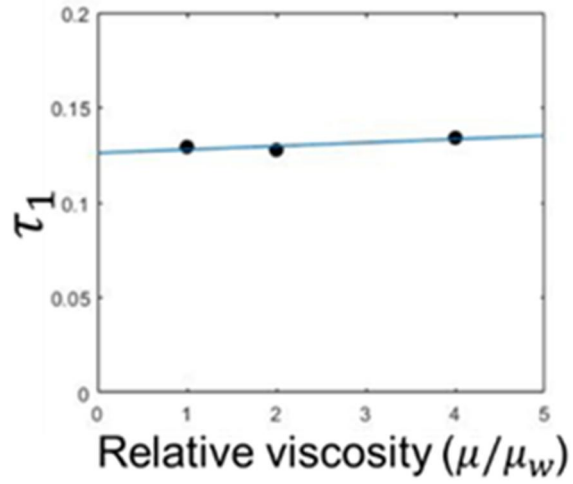


그림 15 첨가 액체의 점성에 따른 시상수 변화

## 제 5 장 결론

본 연구에서 제작한 피부 팬텀은 실제 피부의 탄력과 관련이 있는 요소들의 변화를 반영할 수 있다. 표피 팬텀 제작 과정에서 폴리머의 두께는 표피의 두께에 해당하므로 스핀 코팅하는 시간을 줄일수록 두꺼운 표피에 해당하는 팬텀이 된다. 진피 팬텀의 경우 젤라틴의 역할이 실제 피부에서 콜라겐의 역할과 같으므로 피부에서 콜라겐의 함량과 길이는 팬텀에서 젤라틴의 함량과 길이에 해당한다고 볼 수 있다. 동결 건조 과정을 통해 진피 팬텀의 공극 크기가 결정되는데, 이는 실제 피부에서 콜라겐 섬유들 사이의 공극 크기에 대응된다. 즉, 동결 온도가 낮을수록 공극의 크기가 증가하기 때문에 상대적으로 노화가 진행된 피부라고 할 수 있다. 피부는 노화가 진행될수록 표피와 진피 사이 경계면의 굴곡이 줄어들어 표피와 진피 사이의 결합력이 줄어든다. 이 현상은 본 연구에서 제작한 피부 팬텀에서 진피 팬텀을 만들 때 표면에 굴곡을 만든 후 폴리머와 결합시키는 것으로 구현할 수 있다. 마지막으로 피부 탄력에 영향을 미치는 요소는 진피 내 히알루론산의 함량이다. 피부 팬텀을 제작할 때 마지막 단계에서 액체를 젤라틴 스펀지에 추가할 때 해당 액체를 물과 다른 액체를 혼합하여 점도를 조절하면 피부 내 히알루론산 함량을 반영할 수 있다.



## 참고 문헌

- [1] Y.-S. Kim et al., Regional thickness of facial skin and superficial fat: Application to the minimally invasive procedures, *Clinical Anatomy* **32**, 1008–1018 (2019)
- [2] V. Ottani et al., Collagen structure and functional implications, *Micron* **32(3)**, 251–260 (2001)
- [3] J. Benítez and F. Montáns, The mechanical behavior of skin: Structures and models for the finite element analysis, *Computers & Structures* **190**, 75–107 (2017)
- [4] V. C. Mow et al., Viscoelastic properties of proteoglycan subunits and aggregates in varying solution concentrations, *J. Biomech.* **17(5)**, 325–338 (1984)
- [5] M. Geerlings, *Skin Layer Mechanics*, Universiteitsdrukkerij TU Eindhoven (2009)
- [6] A. I. Chen et al., Multilayered tissue mimicking skin and vessel phantoms with tunable mechanical, optical, and acoustic properties, *Medical Physics* **43**, 3117–3131 (2016)

- [7] S. J. M. Yazdi et al., Characterization of the viscoelastic model of in vivo human posterior thigh skin using ramp–relaxation indentation test, *Korea Australia Rheology Journal* **30**, 293–307 (2018)
- [8] J. van Kuilenburg et al., Contact modelling of human skin: What value to use for the modulus of elasticity?, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* **227**, 349– 361 (2013)
- [9] Y. Wang et al., Three–dimensional histological structures of the human dermis, *Tissue Engineering Part C: Methods* **21**, 922–944 (2015)
- [10] A. Bigi et al., Mechanical and thermal properties of gelatin films at different degrees of glutaraldehyde crosslinking, *Biomaterials* **22**, 763–768 (2001)
- [11] M. De Colli et al., A biomimetic porous hydrogel of gelatin and glycosaminoglycans cross–linked with transglutaminase and its application in the culture of hepatocytes, *Biomedical Materials* **7**, 055005 (2012)
- [12] C. Machirajua et al., Viscoelastic studies of human subscapularis tendon: Relaxation test and a Wiechert model, *Comput. Meth. Prog. Bio.* **83(1)**, 29–33 (2006)

## Abstract

# Development of skin phantom mimicking mechanical properties of the skin

김 현 지 (Hyun Jee Kim)

기계공학과 (Mechanical Engineering)

The Graduate School

Seoul National University

The skin consists of three layers: epidermis, dermis, and subcutaneous fat, each with different physical properties. Research about the skin phantom that reflects these skin characteristics is being conducted from various perspectives. There are skin various phantoms each stimulating properties such as acoustic properties, surface properties, optical properties, and mechanical properties of the skin. In this study, among those properties, skin phantom that mimic mechanical properties of each layer of the skin is developed. Skin phantom developed in this study has a multi-layered structure, and the dermis phantom has porous structure. In addition, it stimulates the viscoelastic properties of real skin. The development of skin phantom will become the basis for the development skin elasticity measurement device in the future. Unlike conventional elasticity measuring devices, factors that affect skin elasticity, such as collagen and elastin, can be measured separately, and this would lead a new way to measure the elasticity of the skin. In the future, this result and development of skin phantom will provide customized

solutions to skin problems to customers based on skin analysis.

**Keywords : Key Words : Skin phantom, Dermis, Viscoelasticity,  
Indentation, Relaxation test, Soft matter**

**Student Number : 2020-24145**