

Master's Thesis

Perceived Hardness as a Function of Stiffness,
Damping, and Contact Transient

Hyejin Choi (최혜진)

Department of Computer Science and Engineering

Pohang University of Science and Technology

2019

인지적 단단함의 함수 도출:
강성, 댐핑, Contact Transient와의 관계

Perceived Hardness as a Function of Stiffness,
Damping, and Contact Transient

Perceived Hardness as a Function of Stiffness, Damping, and Contact Transient

by

Hyejin Choi

Department of Computer Science and Engineering

Pohang University of Science and Technology

A thesis submitted to the faculty of the Pohang University of
Science and Technology in partial fulfillment of the
requirements for the degree of Master of Science in the
Computer Science and Engineering

Pohang, Korea

12. 21. 2018

Approved by

Seungmoon Choi (Signature)

Academic advisor

Perceived Hardness as a Function of Stiffness, Damping, and Contact Transient

Hyejin Choi

The undersigned have examined this thesis and hereby certify
that it is worthy of acceptance for a master's degree from
POSTECH

12. 21. 2018

Committee Chair Seungmoon Choi

(Seal)

Member Seungyong Lee

(Seal)

Member Minsu Cho

(Seal)

MCSE
20172122

최혜진. Hyejin Choi
Perceived Hardness as a Function of Stiffness, Damping,
and Contact Transient,
인지적 단단함의 함수 도출: 강성, 댐핑, Contact Transient
와의 관계
Department of Computer Science and Engineering , 2019,
55p, Advisor : Seungmoon Choi.

ABSTRACT

We investigated the effect of stiffness, damping, and contact transient(amplitude, frequency, decay rate) on perceived hardness. To investigate whether each factor has an effect on perceived hardness, we conducted an experiment 1 to report the hardness magnitude of virtual surfaces that had different values of stiffness, damping, and contact transient. Using the data of experiment 1, we conducted 5-way ANOVA and the result showed that stiffness, damping, amplitude and frequency of contact transient significantly affected perceived hardness; decay rate was not significant.

To verify the effect of decay rate, we conducted an experiment 2 that used various decay rate values. Although we used various values of decay rate, the experiment result showed the same statistical result with the result of experiment 1.

Based on the results of experiment 1 and 2, we excluded decay rate and focused stiffness, damping, amplitude and frequency of contact transient. We collected hardness magnitude data of different virtual surfaces that had different values of stiffness, damping, amplitude, and frequency but had the same value of decay rate. After then, we constructed a psychophysical magnitude function using those data. This fitted function will guide the design of methods to render virtual surfaces specific perceived hardness they want.

목 차

I.	서론	1
1.1	연구 동기	1
1.2	연구 기여	2
II.	관련 연구	4
2.1	가상 표면 렌더링 방법	4
2.1.1	스프링 댐퍼 모델	4
2.1.2	Contact Transient	5
2.2	인지적 단단함에 관한 연구	6
2.2.1	힘의 영향	6
2.2.2	댐핑의 영향	7
2.2.3	Contact Transient의 영향	8
2.2.4	그 외	9
III.	가상 표면의 인지적 단단함에 영향을 주는 요소 선정	11
3.1	연구배경	11
3.2	실험방법	11
3.2.1	가상 표면 렌더링 방법	11
3.2.2	사용 장비	14
3.2.3	피실험자 정보	16
3.2.4	가상 표면의 종류	16

3.2.5	실험 절차	16
3.3	결과 및 토의	18
3.3.1	결과	18
3.3.2	토의	20
IV.	감쇠율의 영향력에 관한 추가 실험	22
4.1	연구배경	22
4.2	실험방법	22
4.2.1	피실험자 정보	22
4.2.2	가상 표면의 종류	23
4.2.3	실험 절차	23
4.3	결과 및 토의	24
4.3.1	결과	24
4.3.2	토의	26
V.	가상 표면의 인지적 단단함 함수 도출	28
5.1	연구배경	28
5.2	사용자 데이터 수집	28
5.2.1	피실험자 정보	28
5.2.2	가상 표면의 종류	29
5.2.3	실험 절차	29
5.3	모델 수립	31
5.4	결과 및 토의	44
VI.	결론	49

표 목 차

3.1 사용자 실험 1에서 가상 표면을 렌더링할 때 사용된 값	16
3.2 사용자 실험 1에 대한 5-way ANOVA 결과	21
4.1 사용자 실험 2에서 가상 표면을 렌더링할 때 사용된 값	23
4.2 사용자 실험 2에 대한 5-way ANOVA 결과	26
5.1 함수 추정을 위한 데이터 수집 실험에서 가상 표면 렌더링에 사용된 값	29
5.2 가상 표면의 인지적 단단함 추정식 5.7과 식 5.8의 계수	35
5.3 강성의 증가에 따른 인지적 단단함의 증가 비율	45
5.4 댐핑의 증가에 따른 인지적 단단함의 증가 비율	46
5.5 진폭의 증가에 따른 인지적 단단함의 증가 비율	47
5.6 주파수의 증가에 따른 인지적 단단함의 증가 비율	48
5.7 각 요소의 증가에 따른 인지적 단단함의 증가 계수 및 강성의 계수에 대한 댐핑, 진폭, 주파수 계수의 상대 비율	48

그림 목 차

2.1	스프링-댐퍼 모델	4
2.2	본 연구의 개요	10
3.1	강성이 $300(N/m)$ 에서 $600(N/m)$ 로 증가할 때 출력되는 힘의 변화 .	12
3.2	댐핑이 $0.9(N \cdot s/m)$ 에서 $1.8(N \cdot s/m)$ 로 증가할 때 출력되는 힘의 변화	13
3.3	진폭이 $0.8(N)$ 에서 $1.2(N)$ 으로 증가할 때 출력되는 힘의 변화	13
3.4	주파수가 $100(Hz)$ 에서 $180(Hz)$ 로 증가할 때 출력되는 힘의 변화 . .	13
3.5	감쇠율이 $90(s^{-1})$ 에서 $120(s^{-1})$ 으로 증가할 때 출력되는 힘의 변화 .	14
3.6	Omega.3의 출력 힘 측정을 위해 힘 센서를 부착한 모습	15
3.7	Omega.3에서 명령했던 힘과 실제 출력된 힘 비교	15
3.8	실험 진행 모습	17
3.9	강성에 따른 상자 플롯	19
3.10	댐핑에 따른 상자 플롯	19
3.11	진폭에 따른 상자 플롯	19
3.12	주파수에 따른 상자 플롯	19
3.13	감쇠율에 따른 상자 플롯	20
4.1	감쇠율에 따른 상자 플롯	25

5.1	주파수가 50(Hz)일때 각 조건별 가상표면의 인지적 단단함 평균 및 표준편차	32
5.2	주파수가 100(Hz)일때 각 조건별 가상표면의 인지적 단단함 평균 및 표준편차	33
5.3	주파수가 180(Hz)일때 각 조건별 가상표면의 인지적 단단함 평균 및 표준편차	34
5.4	가상 표면의 인지적 단단함 추정 함수를 통한 주파수가 50(Hz)일때 진폭별 강성과 댐핑에 따른 인지적 단단함	37
5.5	가상 표면의 인지적 단단함 추정 함수를 통한 주파수가 100(Hz)일때 진폭별 강성과 댐핑에 따른 인지적 단단함	38
5.6	가상 표면의 인지적 단단함 추정 함수를 통한 주파수가 180(Hz)일때 진폭별 강성과 댐핑에 따른 인지적 단단함	39
5.7	가상 표면의 인지적 단단함 추정 함수를 통한 댐핑이 0.45 (N·s/m) 일때 강성별 진폭과 주파수에 따른 인지적 단단함	40
5.8	가상 표면의 인지적 단단함 추정 함수를 통한 댐핑이 0.9 (N·s/m) 일때 강성별 진폭과 주파수에 따른 인지적 단단함	41
5.9	가상 표면의 인지적 단단함 추정 함수를 통한 댐핑이 1.35 (N·s/m) 일때 강성별 진폭과 주파수에 따른 인지적 단단함	42
5.10	가상 표면의 인지적 단단함 추정 함수를 통한 댐핑이 1.8 (N·s/m) 일때 강성별 진폭과 주파수에 따른 인지적 단단함	43

I. 서론

1.1 연구 동기

물체와 접촉할 때, 사람은 손을 통해 전달되는 물리적 성질과 감촉 등을 기반으로 하여 다양한 햅틱 정보들을 인지하게 된다. Okamoto 등의 연구에 따르면 사람의 손을 통해 전달되는 촉각 질감은 세 종류의 두드러진 정신 물리학적 차원으로 구분되며, 각 차원은 거칠기 (Roughness/Smoothness), 단단함 (Hardness/Softness), 온감 (Coldness/Warmness) 으로 표현된다 [1].

가상 현실에서 사람의 손을 통해 전달되는 촉각 질감의 정신 물리학적 차원을 원하는 강도로 렌더링하는 것은 사실적인 촉감 재현을 위해 필요한 기술 중 하나이다. 그러므로 가상 현실에서 가상의 물체를 렌더링할 때, 어떤 요소들이 어떤 인지적 차원에 어떻게 영향을 주는지에 관한 연구를 진행하고, 이를 통해 원하는 강도로 렌더링할 수 있는 가이드라인이 제시될 필요가 있다.

본 연구에서는 인지적으로 주요한 세 종류의 정신 물리학적 차원 중 단단함에 주목하였으며, 가상 환경에서 가상 표면의 인지적 단단함을 요소별 함수로 나타내어, 가상 표면을 원하는 강도로 렌더링할 수 있는 가이드라인을 제시하고자 하였다. 가상 환경에서 가상 표면의 인지적 단단함을 각 요소별 함수로 나타내는 연구를 하기 위해 다음과 같은 과정으로 연구를 진행하였다.

첫째, 상용 햅틱 장비인 Force Dimension 사의 Omega.3를 이용하여 가상의 표면을 스프링-댐퍼 모델(Spring-Damper)을 사용하여 렌더링하였으며, 동시에 가상 표면과 접촉 시 일시적으로 발생하는 진동(Contact Transient)을 사용자가 표면과

접촉할 때 발생시켰다.

둘째, 스프링-댐퍼 모델과 Contact Transient의 파라미터인 강성(Stiffness), 댐핑(Damping), 진폭(Amplitude), 주파수(Frequency), 감쇠율(Decay Rate) 중 어떠한 요소들이 인지적 단단함에 영향을 주는지를 알기 위해 사용자 실험 1을 진행하였다. 오원분산분석 (5-way ANOVA) 결과 감쇠율을 제외한 강성, 댐핑, 진폭, 주파수가 인지적 단단함에 유의미한 영향을 준다는 것을 알 수 있었다.

셋째, 사용자 실험 1의 결과가 실험에서 사용된 감쇠율 조건의 범위 때문인지 아니면 정말로 유의미한 영향을 주지 않는 것인지 검증하기 위해 감쇠율의 범위를 넓혀 사용자 실험 2를 진행하였다. 오원분산분석을 수행하였을 때 사용자 실험 1과 동일하게 감쇠율을 제외한 강성, 댐핑, 진폭, 주파수가 인지적 단단함에 유의미한 영향을 준다는 결과가 도출되었다.

넷째, 앞선 실험의 결과를 기반으로 감쇠율의 값을 고정한 후, 인지적 단단함에 영향을 주는 강성, 댐핑, 진폭, 주파수의 값을 다양하게 변화시켜 서로 다른 가상 표면의 인지적 단단함 점수 수집 실험을 진행하였다. 이를 통해 수집된 강성, 댐핑, 진폭, 주파수에 따른 인지적 단단함 데이터를 사용하여 인지적 단단함을 강성, 댐핑, 진폭, 주파수의 함수로 표현하였다.

1.2 연구 기여

본 논문의 학문적 기여는 다음과 같다.

- 상용 햅틱 장비를 사용하였으며, 강성, 댐핑, 진폭, 주파수, 감쇠율을 모두 고려하여 가상 표면을 렌더링하였기 때문에 보편성을 확보하였다.
- 인지 실험을 통해 단단함 인지에 영향을 주는 요소를 도출하여 원하는 강도의 단단한 표면을 렌더링할 때 고려해야 할 요소의 수를 줄였다.

- 가상 표면의 단단함을 강성, 댐핑, 진폭, 주파수의 함수로 표현하여 가상 환경에서 원하는 강도의 단단한 표면을 렌더링할 때 도움이 될 수 있는 가이드라인을 제시하였다.

II. 관련 연구

2.1 가상 표면 렌더링 방법

2.1.1 스프링 댐퍼 모델

가상 환경에서 가상 표면을 렌더링하기 위해 보편적이고 관습적인 방법으로 스프링-댐퍼 모델을 사용한다 [2], [3]. Figure 2.1은 스프링-댐퍼 모델을 도식화한 것이다.

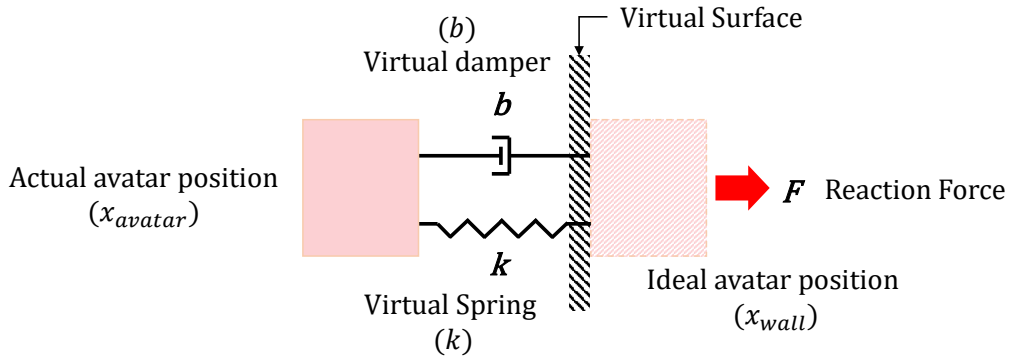


Figure 2.1: 스프링-댐퍼 모델

사용자가 가상 표면과 접촉하였을 경우, 햅틱 장비는 사용자의 투과 깊이($x_{wall} - x_{avatar}$), 물체의 강성(Stiffness, k), 사용자의 속도(\dot{x}_{wall}), 물체의 댐핑(damping, b)에 따라 식 2.1을 통해 햅틱 장치에서 출력할 반발력을 계산하게 된다.

$$F = \begin{cases} 0 & \text{if } x_{avatar} \geq x_{wall} \\ k(x_{wall} - x_{avatar}) + b(\dot{x}_{wall}) & \text{if } x_{avatar} < x_{wall} \end{cases} \quad (2.1)$$

식 2.1에 따라 계산된 반발력을 햅틱 장비를 통해 렌더링하여 사용자에게 제공하면, 사용자는 햅틱 장비를 통해 렌더링 되는 힘의 존재로 인하여 가상 표면의 존재를 인지할 수 있게 된다.

2.1.2 Contact Transient

가상 환경에서 물체와 접촉 할 때, 사실성을 향상시키기 위하여 Wellman과 Howe는 실제 물체를 두드릴 때 발생하는 진동에 주목하였다 [4]. 그들은 실제 물체와의 접촉 시 발생하는 일시적인 진동에 존재하는 햅틱 정보가 가상 물체와의 접촉 시에도 보존되기를 원하였으며, 그 결과 지수적 감쇠 사인 함수(Exponentially damped sinusoidal model)로 진동을 모델링하였다. 지수적 감쇠 사인 함수는 2.2과 같이 표현된다. A 는 초기 진폭을, λ 는 감쇠 비율을, ω 는 주파수를 의미한다.

$$y(t) = A \cdot e^{-\lambda t} \cdot \sin(\omega t) \quad (2.2)$$

Okamura 등은 추가적인 진동자의 부착 혹은 햅틱 장비의 변형 없이, 상용 햅틱 장비를 사용하여 Contact Transient를 재현하고자 하였다 [5]. 이를 위해, 실제 물체를 두드릴 때 발생하는 진동 데이터를 수집 한 후 감쇠 사인 함수를 사용하여 모델링하였으며, 모델링한 진동을 햅틱 장비의 대역폭(bandwidths)과 사람의 촉각적 민감도를 고려하여 다시 축척한 후, 인지 실험을 통하여 진동의 파형을 개선시켜 사실성을 높였다.

Kuchenbecker 등은 이벤트 기반 고주파의 일시적인 힘(High-frequency transient forces)이 기존의 햅틱 피드백 방식과 더불어 제공될 때, 가상 환경과의 상호작용의 사실감이 향상됨을 알아냈으며, 고정 폭 펄스(Fixed-Width Pulse)와 감쇠 사인 함수 두 방식으로 모델링 하였다 [6]. 이때, 감쇠 사인 함수는 식 2.3과 같이 모델링 되었다. A 는 진동의 진폭을, f, d 는 물체 고유의 주파수와 지속 시간을 의미하며, v_{in} 은 접촉시 속도(incoming velocity)를 의미한다.

$$F_{sine} = A|v_{in}|e^{\ln(0.01)t/d}\sin(2\pi ft) \quad \text{for } 0 < t \leq d \quad (2.3)$$

이 외에도 촉각 접촉(Tactile contact) 시, 접촉 시 속도와 일시적 진동의 효과에 관한 연구가 진행되고 있다.[7].

2.2 인지적 단단함에 관한 연구

2.2.1 힘의 영향

Lawrence 등은 Rate-Hardness라는 개념을 도입하여 사람이 인지하는 물체의 단단함을 객관적인 형식으로 표현하는 연구를 진행하였다[8]. Rate-Hardness는 식 2.4와 같이 물체와 접촉 시 발생하는 초기 힘의 변화를 초기 투과 속도로 나눈 값으로 표현된다.

$$\text{Rate-Hardness} = \frac{\text{Initial force rate of change}(N/s)}{\text{Initial penetration velocity (m/s)}} \quad (2.4)$$

그러나, Rate-Hardness는 강성 이동 (Stiffness Shifting) 알고리즘[9]과 같이 물체와의 접촉 시 발생하는 순간적인 변화(Transient Effect)는 다루지 못한다는 한계를 가지고 있다.

그리하여 Han과 Choi는 Extended Rate-Hardness의 개념을 도입하였다 [10]. Extended Rate-Hardness는 식 2.5로 나타내며, 접촉 시 발생하는 초기 힘의 변화율을 접촉 시 발생하는 최대 힘의 변화율로 대체하여 Stiffness Shifting 알고리즘이 적용된 가상 표면의 인지적 단단함과 연관성을 보여주었다. 그러나, 물체의 주요 성질인 댐핑과 사실적 재현을 위한 Contact Transient를 고려하지 못한 한계가 존재한다.

$$\text{Extended Rate-Hardness} = \frac{\text{Maximum rate of change of force}(N/s)}{\text{Initial penetration velocity (m/s)}} \quad (2.5)$$

Higashi 등은 물체를 두드릴 때 사람이 단단함을 판단할 때 기여하는 물리적 특성들을 조사하였다[11]. 짧은 시간동안 발생하는 힘을 정점에서의 힘(Peak force value), 정점까지의 시간(Peak time), 기간(Duration), 최대 증가 비율(Maximum increase rate), 힘의 진폭(Impulse of the reaction force)의 다섯가지 물리적 특성을 기준으로 사람이 인지하는 단단함을 분석하였다. 정점에서의 힘과 최대 증가 비율은 단단함과 양의 상관관계를 지녔으며, 기간, 정점까지의 시간, 힘의 진폭은 단단함과 음의 상관관계를 지니는 보였다. 정점까지의 시간, 기간, 최대 증가 비율은 정점에서의 힘과 높은 상관관계를 보여 대체 가능하였기 때문에 인지된 단단함은 정점에서의 힘과 힘의 진폭의 함수로 표현이 되었다.

2.2.2 댐핑의 영향

가상 물체를 렌더링할 때, 가상 물체의 주요한 성질 중 하나인 댐핑의 인지적 단단함에 대한 영향력에 관한 연구도 진행되고 있다. Beek 등은 원격 통신에서 시스템의 안정성을 보존하기 위해 댐핑 성질이 추가되었을 때 사람의 인지적 단단함에 주목하였다 [12]. 그리하여 댐핑이 전체적으로(Globally) 삽입되었을 때와 국부적

으로(Locally) 삽입되었을 때, 사람의 단단함 인지에 어떠한 영향을 주는지에 관한 연구를 진행하였다.

전체적인 댐핑 삽입은 접촉한 상태에서 누르기 시작할 때(in-contact task)에는 인지적 단단함을 상승시키고, 비접촉 상태에서 시작하여 가상 물체를 접촉할 때(contact transition task)에는 인지적 단단함을 낮추는 효과를 가지고 있음을 보였다. 또한 국부적으로 댐핑을 삽입하였을 경우 전체적인 댐핑 삽입보다 인지적 단단함이 상승되는 효과를 지녔음도 보였다.

그러나 해당 연구의 실험에서 피실험자는 오직 앞으로 누르는 행위만 허락되어 두드리는 행위를 하였을 때 댐핑의 영향을 보지 못하였고, 사실적 재현을 위한 Contact Transient를 고려하지 않았기 때문에 진동과 댐핑의 상호작용을 알지 못한다는 한계가 존재한다.

2.2.3 Contact Transient의 영향

Higashi 등은 스프링-질량-댐퍼 모델(spring-mass-damper)에서 사람이 표면을 두드릴 때 발생하는 진동(Damped Natural Vibration)이 인지에 주는 영향에 대한 연구를 진행하였다 [13]. 스프링-질량-댐퍼 모델을 통해 렌더링된 물체를 두드릴 때 발생하는 진동 $x(t)$ 을 식 2.6 - 2.9와 같이 모델링하였다. 이때, M, m', k, c 는 손의 질량, 가상 물체와 손의 질량의 합, 물체의 강성, 물체의 점성을 의미하며 A, A', τ, ω, f 는 진폭, 접촉 속도당 진폭, 시간 상수, 각진동수, 주파수를 의미한다.

$$x(t) = A \exp \frac{-t}{\tau} \sin(\omega t) \quad (2.6)$$

$$A = A'v = \frac{2Mv}{\sqrt{k(4m'k - c^2)}} \quad (2.7)$$

$$\tau = \frac{2m'}{c} \quad (2.8)$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{\sqrt{4m'k - c^2}}{2m'} \quad (2.9)$$

인지 실험을 통해 가상 물체 질량(m)의 감소, 강성(k)의 증가, 진동의 진폭(A) 및 주파수(f)의 증가는 가상 물체의 단단함을 증가시킨다는 것을 보였다. 그러나 진동의 진폭(A), 주파수(f), 시간 상수(τ)는 물체의 질량(m), 강성(k), 점성(c)과 독립적이지 않기 때문에 가상 물체의 강성(k)과 점성(c), 진동 변수들(A, f, τ)을 독립적으로 설정 하였을 때 각 요소들의 개별적인 영향력을 알 수 없다는 한계가 존재한다.

2.2.4 그 외

이 외에도 사람이 물체의 단단함을 판단하는데 많은 요소들이 기여한다. Hauser와 Gerling는 접촉시 면적의 영향력[14]에 대해 조사하였으며, Fujita와 Ohmori는 접촉 면적의 영향력을 기반으로 접촉 면적을 조절하는 새로운 부드러움 제시 장치(Softness Display Interface)를 고안하였다[15].

Friedman 등은 접촉할 때의 상태에 따른 부드러움 인지에 관한 연구[16]를 진행하였으며, Bicchi 등은 접촉 면적이 퍼지는 속도[17]의 영향력에 관해 조사하였다. 또한 물체와 접촉할 때 피부를 통해서 전달되는 정보(Cutaneous feedback)의 영향력에 관한 연구들도 진행되었다 [18], [19].

사람이 손을 통해 느끼는 햅틱 정보 외에도, 사람이 가지고 있는 사전 지식이 단단함 판단에 미치는 영향에 관한 연구 [20]와 물체를 두드릴때 발생하는 소리의 영향력에 관한 연구[21]도 진행되고 있다.

이렇게 사람이 단단함을 인지함에 있어서 매우 많은 요소들이 영향을 미치지만 본 실험에서는 이러한 다른 요소들은 배제한 채, 연구자가 상용 햅틱 장비를 통해 제어할 수 있는 요소인 스프링-댐퍼 모델의 강성, 댐핑과 Contact Transient의 진폭,

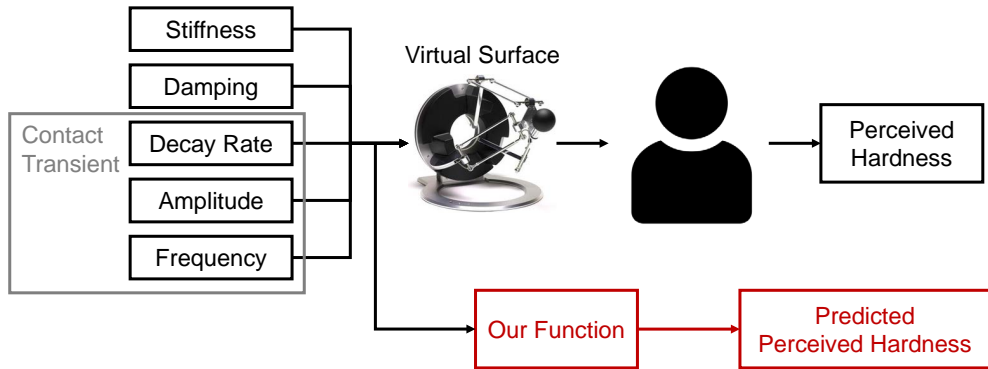


Figure 2.2: 본 연구의 개요

주파수, 감쇠율에 주목하여, 강성과 댐핑, Contact Transient에 따른 인지적 단단함 추정 함수를 도출하고자 한다. 본 연구의 전체 시스템 개요는 Figure 2.2와 같다.

III. 가상 표면의 인지적 단단함에 영향을 주는 요소 선정

3.1 연구배경

인지적 단단함을 스프링-댐퍼 모델의 강성과 댐핑, Contact Transient의 진폭, 주파수, 감쇠율의 함수로 표현하기에 앞서, 서로 다른 가상 표면을 렌더링하기 위해 사용되는 강성, 댐핑, 진폭, 주파수, 감쇠율 중 어떤 요소가 사용자가 가상 표면의 단단함을 인지하는데 있어 유의미한 영향을 주는지 알아보기 위한 사용자 실험 1을 진행하였다. 본 실험은 포항공과대학교 기관 감사 위원회의 승인을 받아 진행되었다 (PIRB-2018-E096).

3.2 실험방법

3.2.1 가상 표면 렌더링 방법

본 실험에서는 가상 표면을 렌더링하기 위하여, 햅틱 렌더링을 할 때 자주 사용되는 CHAI3D Library [22]를 사용하였다. 스프링-댐퍼 모델을 구현하기 위해 createEffectSurface 파일의 computeForce 함수를 식 3.1과 같이 변형하였다. k 는 강성을, b 는 댐핑을 의미한다.

$$F = \begin{cases} 0 & \text{if } x_{avatar} \geq x_{wall} \\ k(x_{wall} - x_{avatar}) + b(\dot{x}_{wall}) & \text{if } x_{avatar} < x_{wall} \end{cases} \quad (3.1)$$

또한, 사실적인 가상 표면을 위한 필수 요건인 Contact Transient을 식 3.2와 같이 렌더링하였다. a 는 Contact Transient의 진폭을, f 는 주파수, τ 는 감쇠율을, v_{in} 은 접촉시 속도를 의미하며, createEffectVibration 파일의 computeForce 함수를 변형하여 구현하였다.

$$F = a \cdot |v_{in}| \cdot \exp^{-\tau t} \cdot \sin(2\pi ft) \quad (3.2)$$

강성이 $300(N/m)$, 댐핑이 $0.9(N \cdot s/m)$, 진폭이 $0.8(N)$, 주파수가 $100(Hz)$, 감쇠율이 $90(s^{-1})$ 일 때, 식 3.1와 식 3.2을 통해 계산되는 힘이 Figure 3.1의 왼쪽 차트의 노란색 Spring-Damper와 하늘색 Contact Transient 로 표현되었으며, 최종 힘은 파란색인 Total Force로 나타내었다. 이 때, 강성이 2배로 증가할 경우 힘의 변화를 Figure 3.1의 오른쪽 차트에 나타내었다. 또한 댐핑이 2배로 증가할 경우 힘의 변화를 Figure 3.2의 오른쪽 차트에 나타내었으며, 진폭이 1.5배 증가한 경우의 힘의 변화는 Figure 3.3의 오른쪽 차트에, 주파수가 1.8배 증가할 때 힘의 변화는 Figure 3.4의 오른쪽 차트에, 감쇠율이 1.33배 증가할 때 힘의 변화는 Figure 3.5의 오른쪽 차트에 나타내었다.

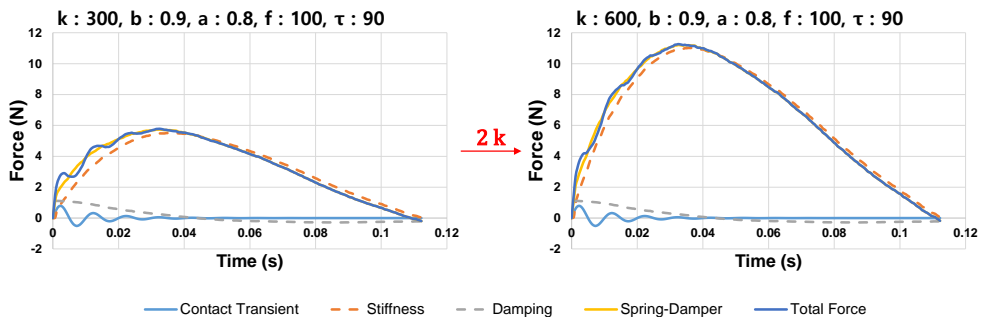


Figure 3.1: 강성이 $300(N/m)$ 에서 $600(N/m)$ 로 증가할 때 출력되는 힘의 변화

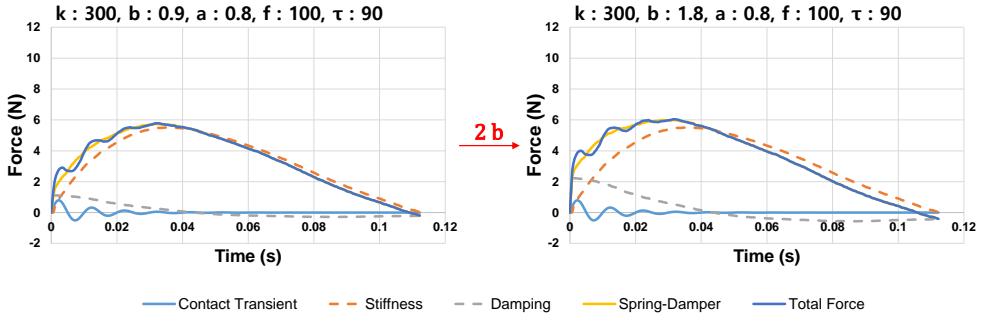


Figure 3.2: 댐핑이 $0.9(N \cdot s/m)$ 에서 $1.8(N \cdot s/m)$ 로 증가할 때 출력되는 힘의 변화

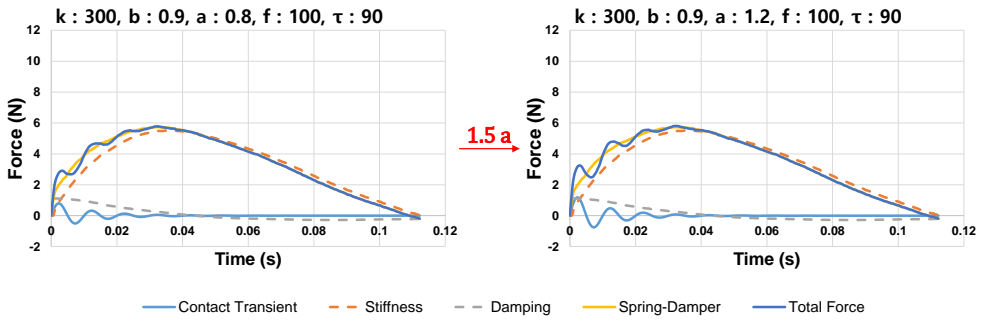


Figure 3.3: 진폭이 $0.8(N)$ 에서 $1.2(N)$ 으로 증가할 때 출력되는 힘의 변화

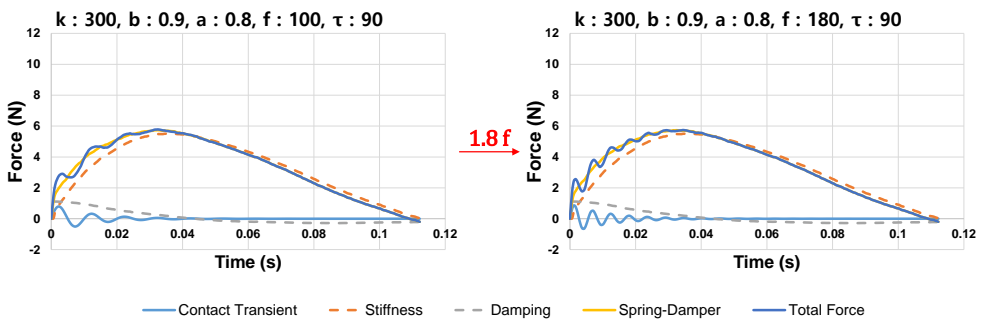


Figure 3.4: 주파수가 $100(Hz)$ 에서 $180(Hz)$ 로 증가할 때 출력되는 힘의 변화

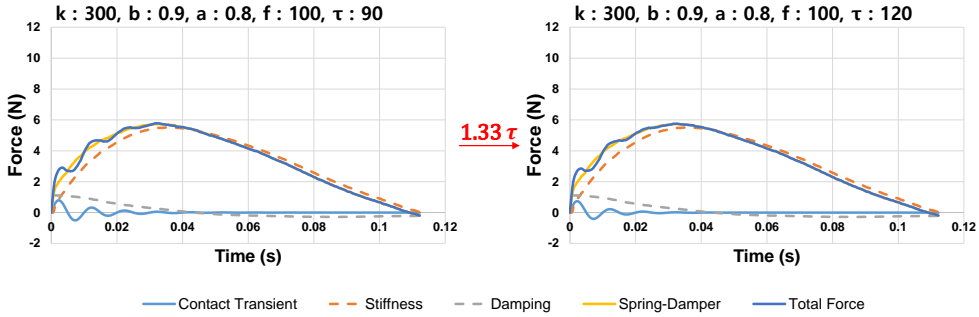


Figure 3.5: 감쇠율이 $90(s^{-1})$ 에서 $120(s^{-1})$ 으로 증가할 때 출력되는 힘의 변화

3.2.2 사용 장비

본 연구에서는 상용 햅틱 장비인 Force Dimension사의 Omega.3를 사용하여 가상 표면을 렌더링하였다. 소프트웨어를 통해 계산된 가상 표면을 두드릴 때 발생하는 힘과 실제 출력되는 힘을 비교하기 위하여 Figure 3.6과 같이 Omega.3와 손잡이 사이에 힘 센서를 부착하였다. 우정하이텍의 4선식 Full Bridge 로드셀 5kg을 사용하였으며, 힘 센서의 값을 증폭시키기 위하여 (주)아이투에이시스템즈의 스트레인 게이지 앰프를 사용하였다. 증폭된 신호를 National Instruments의 NI PCIe-6341 DAQ를 통해 읽었다.

강성이 $300(N/m)$, 댐핑이 $0.45(N \cdot s/m)$, 진폭 $1.2(N)$, 주파수 $180(Hz)$, 감쇠율 $60(s^{-1})$ 인 가상 표면을 두드릴 때, 식 3.1와 식 3.2을 통해 계산되어 Omega.3에서 출력하는 힘을 파란 실선으로, 실제 힘 센서를 통해 측정된 힘을 검은 실선으로 Figure 3.7에 나타내었다. Omega.3와 사용자가 잡는 손잡이 사이에 힘 센서를 부착하였기 때문에, Omega.3에서 힘을 출력하지 않아도 손잡이를 움직이는 사용자의 힘에 의해 약 $\pm 0.5N$ 의 힘이 힘센서를 통해 입력된다. 이러한 원인 때문에 실제 힘 센서에서 읽어지는 값과 Omega.3에 명령되는 힘 사이에 오차가 존재하나, 사용자가 표면을 두

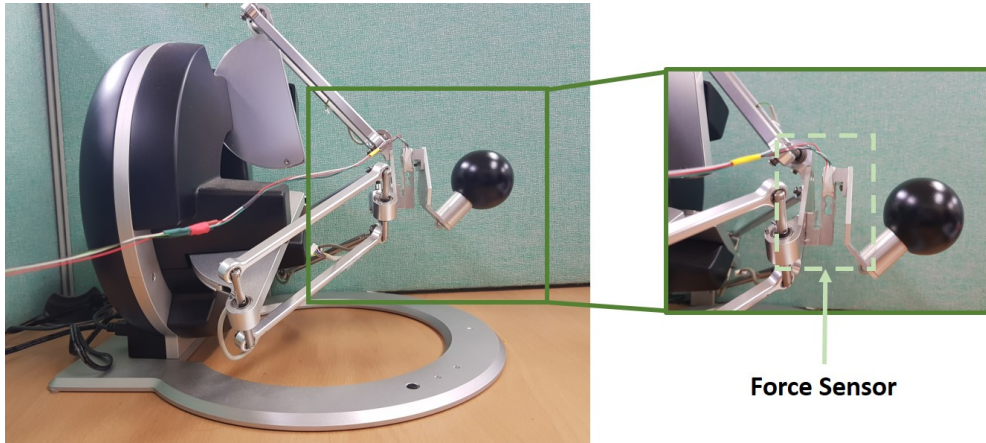


Figure 3.6: Omega.3의 출력 힘 측정을 위해 힘 센서를 부착한 모습

드릴때 계산되는 힘을 Omega.3가 거의 정확하게 출력한다고 볼 수 있다. 본 실험을 진행할 때에는 Omega.3와 손잡이 사이의 힘 센서를 제거한 채 진행하였다.

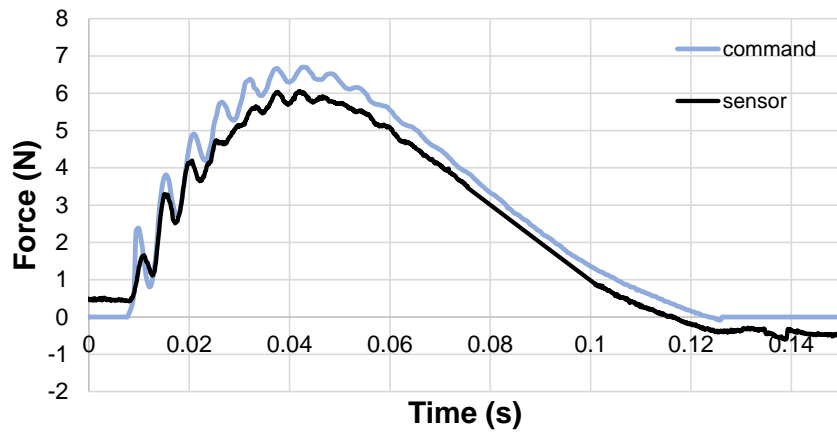


Figure 3.7: Omega.3에서 명령했던 힘과 실제 출력된 힘 비교

3.2.3 피실험자 정보

만 18세에서 23세(평균 만 20.39세, 표준편차 1.39, 남자 9명 여자 9명)의 감각 기관에 문제가 없는 총 18명의 피실험자가 참여하였다. 피실험자에게 실험 시작 전 실험 방법에 대한 설명을 충분히 이해시킨 후 실험을 진행하였으며, 실험이 끝난 후 15,000원이 피실험비로 지급하였다.

3.2.4 가상 표면의 종류

본 실험에서 사용한 상용 햅틱 장비인 Omega.3의 사양을 고려하여, 가상 표면의 강성(Stiffness, k), 댐핑(Damping, b), 진폭(Amplitude, a), 주파수(Frequency, f), 감쇠율(Decay Rate, τ)의 값을 Table 3.1와 같이 설정하여 렌더링하였다.

Stiffness (N/m)	Damping ($N \cdot s/m$)	Amplitude (N)	Frequency (Hz)	Decay Rate (s^{-1})
225, 450	0.675, 1.35	0.36, 0.78, 1.2	50, 100, 180	30, 45, 60

Table 3.1: 사용자 실험 1에서 가상 표면을 렌더링할 때 사용된 값

따라서 2조건의 강성과 댐핑, 3조건의 진폭, 주파수, 감쇠율이 존재하여 총 108 ($2 \times 2 \times 3 \times 3 \times 3$)개의 서로 다른 가상표면이 피실험자에게 제공되었다.

3.2.5 실험 절차

매 트라이얼마다 피실험자는 서로 다른 성질을 가지는 가상 표면을 두드린 후, 해당 표면의 단단함을 0보다 큰 양의 실수로 표현하는 절대 강도 추정 (Absolute Magnitude Estimation) 평가를 진행하였다.

피실험자는 햅틱 디바이스의 손잡이를 잡은 채 팔과 손목을 움직여 가상 표면을 두드리는 행위를 행하였으며, 두드림(Tapping)에 의한 효과만 보기 위하여 두드림



Figure 3.8: 실험 진행 모습

을 제외한 누르는 행동(Pushing)과 같은 다른 행위는 자제하도록 요청하였다. 또한, 단단함에 영향을 미칠 수 있는 다른 요소들을 배제하기 위하여 최대한 같은 속도로 표면을 두드리도록 요청하였으며, 햅틱 디바이스에서 발생하는 소음이나 다른 정보들을 제어하기 위하여 피실험자는 핑크노이즈[23]가 발생하는 노이즈캔슬링 헤드폰 (WH-H900N, Sony)을 착용한 채로 실험을 진행하였다.

108개의 전체 가상 표면을 두 세션으로 나누어 제공하여 한 세션은 54개의 트라이얼로 구성되었으며, 트레이닝 세션 한 번과 하나의 전체 가상 표면 집합을 이루는 두 세션을 두 번 반복하여 한 실험자당 다섯번의 세션을 진행하였다. 가상 표면 제시 순서에 영향을 받지 않기 위하여 피실험자별 108개의 가상 표면의 순서를 랜덤하게 설정한 뒤 제공하였으며, 트레이닝 세션의 가상 표면으로 108개의 가상 표면 중 뒤 순서인 54개의 가상 표면을 제공하였다. 매 트라이얼마다 피실험자는 화면 속 가상 표면을 햅틱 디바이스를 사용하여 충분히 두드린 후, 인지되는 표면의 단단함을

키보드를 통해 0보다 큰 실수로 응답하였다.

각 세션 사이에서 피실험자는 3분의 휴식 시간을 가졌으며, 피실험자가 원하면 언제든지 실험을 중단할 수 있도록 하였다. 실험은 평균 1시간 10분동안 진행되었으며, 전체 실험이 끝난 후 단단하다고 판단하게 된 근거를 응답받았다.

3.3 결과 및 토의

3.3.1 결과

각 피실험자의 가상 표면별 인지적 단단함 응답을 사용하여 통계 분석을 하기 위해, Han의 통계 분석을 위한 데이터 표준화 방법 [24]에 따라 피실험자의 응답을 변환하였다.

$$M_i = \frac{\sum_{j=1}^{108} \sum_{k=1}^2 \log_{10} X_{ijk}}{2 \times 108} \quad (3.3)$$

$$SV_{ijk} = \frac{X_{ijk}}{10^{M_i}} \quad (3.4)$$

피실험자 i 의 j 번째 가상표면에 대한 k 번째 반복의 응답을 X_{ijk} 라 할 때, 본 실험에서 피실험자별 평균 M_i 는 식 3.3과 같이 표현된다. 피실험자별 M_i 를 구한 후, 식 3.4를 통해 각 데이터를 표준화된 값으로 변환하였다. 같은 가상 표면에 대해 총 두 번 반복하였으므로 동일 표면에 대해 피실험자별 응답은 두 개의 값이 존재하며, 이 두 값의 기하 평균(Geometric mean) 값을 사용하여 통계 분석을 수행하였다. Figures 3.9 - 3.13에 표준화된 인지적 단단함 점수에 대한 각 요소별 상자 플롯을 나타내었다.

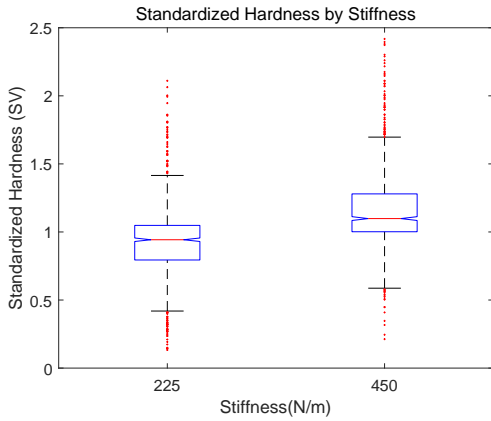


Figure 3.9: 강성에 따른 상자 플롯

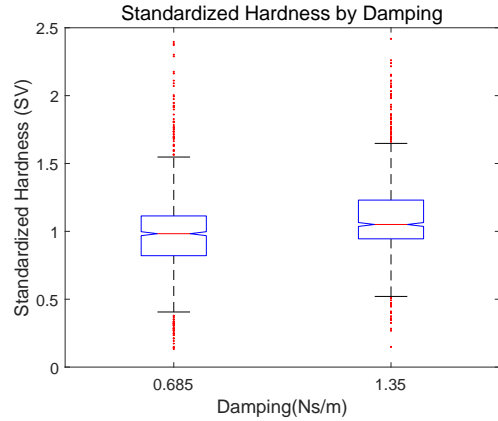


Figure 3.10: 댐핑에 따른 상자 플롯

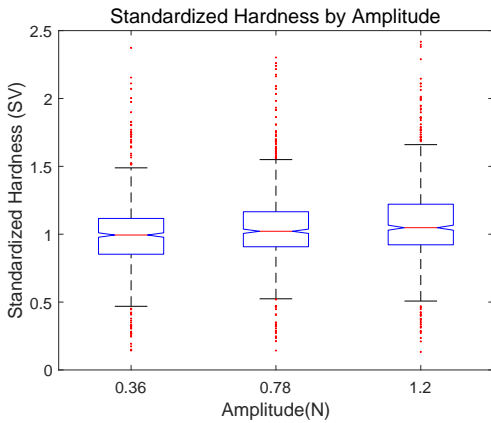


Figure 3.11: 진폭에 따른 상자 플롯

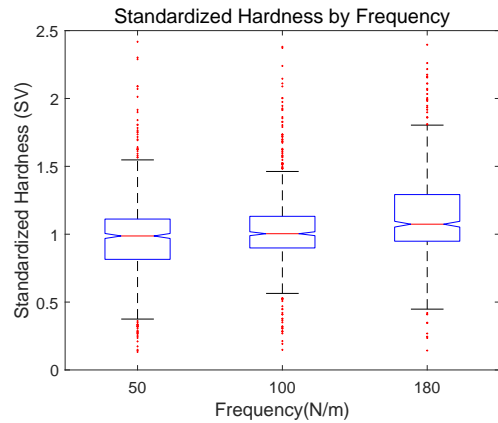


Figure 3.12: 주파수에 따른 상자 플롯

표준화된 피실험자들의 가상 표면별 응답 횟수에 대해 오원분산분석(5-way ANOVA)을 수행한 결과는 Table 3.2와 같다. 통계 분석 결과 강성(Stiffness, k), 댐핑(Damping, b), 진폭(Amplitude, a), 주파수(Frequency, f)는 주요인으로써 $p < 0.001$ 의 결과를 보임을 확인할 수 있었으며, 감쇠율(Decay Rate, τ)은 주요인으

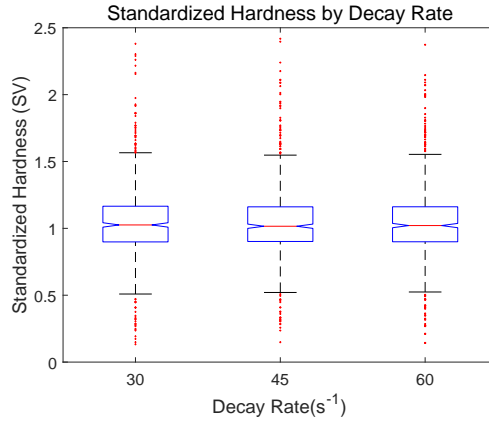


Figure 3.13: 감쇠율에 따른 상자 플롯

로써 $p = 0.883$ 의 결과를 보였다.

3.3.2 토의

사용자 실험1의 통계 분석 결과에 의하면 물체의 강성(Stiffness, k), 댐핑(Damping, b), Contact Transient의 진폭(Amplitude, a), 주파수(Frequency, f)는 0.05 수준의 유의미한 p 값을 가져, 사람이 인지하는 단단함에 주된 요인으로 유의미한 영향을 준다고 할 수 있다. 이에 반해 Contact Transient의 감쇠율(Decay Rate, τ)은 0.883의 p 값을 가져 인지적 단단함에 유의미한 영향을 주지 않는다고 볼 수 있다.

이는 앞선 연구 [13]와 일맥상통한 결과를 보여준다. 비록 [13]에서는 Contact Transient의 진폭(a), 주파수(f), 시간 상수(τ)는 물체의 질량(m), 강성(k), 점성(c)과 독립적이지 않아 본 연구와 차이가 존재하지만, Contact Transient의 진폭(Amplitude, a), 주파수(Frequency, f)의 증가가 인지적 단단함을 증가시킨다는 동일한 실험 결과를 보인다.

하지만, 본 실험에서 사용한 감쇠율(Decay Rate, τ)의 조건이 최소한 역치 차

Source	F(d.f.1, d.f.2)	p	Source	F(d.f.1, d.f.2)	p
<i>k</i>	F(1,17) = 293.22	< 0.001*	<i>k : b : a</i>	F(2,34) = 0.36	0.695
<i>b</i>	F(1,17) = 74.70	< 0.001*	<i>k : b : f</i>	F(2,34) = 0.65	0.525
<i>a</i>	F(2,34) = 24.88	< 0.001*	<i>k : a : f</i>	F(4,68) = 0.78	0.535
<i>f</i>	F(2,34) = 58.26	< 0.001*	<i>b : a : f</i>	F(4,68) = 0.14	0.967
τ	F(2,34) = 0.12	0.883	<i>k : b : \tau</i>	F(2,34) = 0.85	0.430
<i>k : b</i>	F(1,17) = 0.23	0.630	<i>k : a : \tau</i>	F(4,68) = 0.79	0.530
<i>k : a</i>	F(2,34) = 0.21	0.807	<i>b : a : \tau</i>	F(4,68) = 0.04	0.997
<i>b : a</i>	F(2,34) = 1.27	0.282	<i>k : f : \tau</i>	F(4,68) = 0.31	0.873
<i>k : f</i>	F(2,34) = 1.27	0.281	<i>b : f : \tau</i>	F(4,68) = 1.56	0.181
<i>b : f</i>	F(2,34) = 1.06	0.346	<i>a : f : \tau</i>	F(8,136) = 0.33	0.954
<i>a : f</i>	F(4,68) = 6.44	< 0.001*	<i>k : b : a : f</i>	F(4,68) = 0.65	0.624
<i>k : \tau</i>	F(2,34) = 0.26	0.771	<i>k : b : a : \tau</i>	F(4,68) = 1.06	0.376
<i>b : \tau</i>	F(2,34) = 1.21	0.298	<i>k : b : f : \tau</i>	F(4,68) = 0.40	0.807
<i>a : \tau</i>	F(4,68) = 0.40	0.808	<i>k : a : f : \tau</i>	F(8,136) = 0.22	0.988
<i>f : \tau</i>	F(4,68) = 0.65	0.625	<i>b : a : f : \tau</i>	F(8,136) = 0.24	0.983
			<i>k : b : a : f : \tau</i>	F(8,136) = 0.40	0.922

Table 3.2: 사용자 실험 1에 대한 5-way ANOVA 결과

이(Difference Threshold)인 JND(Just Noticeable Difference)보다 작은 값을 가져 0.05 수준의 유의 수준을 못 가지는 것인지 아니면 정말로 유의미한 영향을 주지 않는 것인지 검증하기 위해 추가적인 실험을 진행하기로 하였다.

IV. 감쇠율의 영향력에 관한 추가 실험

4.1 연구배경

앞서 진행한 사용자 실험 1의 결과에 따르면 감쇠율(Decay Rate)은 인지적 단단함에 유의미한 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있었다. 하지만 해당 결과가 정말로 감쇠율이 인지적 단단함에 유의미한 영향을 주지 않는 것인지, 아니면 실험에서 사용된 값의 조건이 최소한의 차이 역치(Difference Threshold)인 JND(Just Noticeable Difference)보다 작은 범위여서 인지적 단단함에 유의미한 영향을 주지 못한 것인지 확인할 필요가 있었다. 그리하여 감쇠율의 범위를 넓혀 단단함 인지에 대한 영향력을 검증하기 위한 사용자 실험 2를 진행하였다. 본 실험은 포항공과대학교 기관 감사 위원회의 승인을 받아 진행되었다(PIRB-2018-E096).

4.2 실험방법

4.2.1 피실험자 정보

만 20세에서 29세(평균 만 22.85세, 표준 편차 3.28, 남자 10명 여자 10명)의 감각 기관에 문제가 없는 총 20명의 피실험자가 참여하였다. 피실험자에게 실험 시작 전 실험 방법에 대한 설명을 충분히 이해시킨 후 실험을 진행하였으며, 실험이 끝난 후 10,000원이 피실험비로 지급하였다.

4.2.2 가상 표면의 종류

본 실험에서는 감쇠율의 영향력을 주로 확인하기 위하여 강성, 댐핑, 진폭, 주파수는 사용자 실험 1의 양 끝값을 사용하였으며, 감쇠율은 범위를 넓히고, 더 많은 수의 값을 사용하였다. 각 요소의 값은 Table 4.1 와 같다.

Stiffness (N/m)	Damping ($N \cdot s/m$)	Amplitude (N)	Frequency (Hz)	Decay Rate (s^{-1})
225, 450	0.675, 1.35	0.36, 1.2	50, 180	30, 60, 90, 120, 150

Table 4.1: 사용자 실험 2에서 가상 표면을 렌더링할 때 사용된 값

따라서 강성과 댐핑, 진폭, 주파수는 2조건, 감쇠율은 5조건으로 총 80개의 서로 다른 가상표면이 피실험자에게 제공되었다.

4.2.3 실험 절차

본 실험은 앞선 사용자 실험1과 동일한 방식으로 진행되었다. 매 트라이얼마다 피실험자는 서로 다른 성질을 가지는 가상 표면을 두드린 후, 해당 표면의 인지적 단단함을 0보다 큰 양의 실수로 표현하는 절대 강도 추정 (Absolute Magnitude Estimation) 평가를 진행하였다.

사용자 실험 1에서와 마찬가지로 피실험자는 햅틱 디바이스의 손잡이를 잡은 채 팔과 손목을 움직여 가상 표면을 두드리는 행위를 행하였으며, 두드림(Tapping)에 의한 효과만 보기 위하여 두드림을 제외한 누르는 행동(Pushing)과 같은 다른 행위는 자제하도록 요청하였다. 또한, 인지적 단단함에 영향을 미칠 수 있는 다른 요소들을 배제하기 위하여 최대한 같은 속도로 표면을 두드리도록 요청하였으며, 햅틱 디바이스에서 발생하는 소음이나 다른 정보들을 제어하기 위하여 피실험자는 핑크노이즈가 발생하는 노이즈캔슬링 헤드폰을 착용한 채로 실험을 진행하였다.

총 80개의 전체 가상 표면을 두 세션으로 나누어 제공하여, 한 세션은 40개의 트라이얼로 구성되었다. 전체 가상 표면 집합을 이루는 두 세션을 세 번 반복을 하여 총 여섯 세션으로 구성되었다. 하나의 전체 가상 표면을 구성하는 첫번째와 두번째 세션은 트레이닝세션으로써 실험결과에서 제외되었다.

가상 표면 제시 순서에 영향을 받지 않기 위하여 피실험자별 80개의 가상 표면의 순서를 랜덤하게 설정한 뒤 제공하였다. 매 트라이얼 마다 피실험자는 화면 속 가상 표면을 햅틱 디바이스 사용하여 충분히 두드린 후 인지되는 표면의 인지적 단단함을 키보드를 통해 0보다 큰 실수로 응답하였다.

각 세션 사이에서 피실험자는 2분의 휴식시간을 가졌으며 피실험자가 원할 경우 언제든지 쉴 수 있도록 하였다. 실험은 평균 50분동안 진행되었으며, 전체 실험이 끝난 후 단단하다고 판단하게 된 근거를 응답받았다.

4.3 결과 및 토의

4.3.1 결과

각 피실험자의 응답을 사용하여 통계 분석을 하기 위해, 앞선 사용자 실험 1과 동일하게 Han의 통계 분석을 위한 데이터 표준화 방법 [24]에 따라 피실험자의 응답을 변환시켰다.

$$M_i = \frac{\sum_{j=1}^{80} \sum_{k=1}^2 \log_{10} X_{ijk}}{2 \times 80} \quad (4.1)$$

$$SV_{ijk} = \frac{X_{ijk}}{10^{M_i}} \quad (4.2)$$

피실험자 i 의 j 번째 가상표면에 대한 k 번째 반복의 응답을 X_{ijk} 라 할 때, 본 실험에서 각 피실험자별 평균 M_i 는 식 4.1과 같이 표현된다. 피실험자별 M_i 를 구한 후, 식 4.2를 통해 각 데이터를 표준화된 값으로 변형시켰다. 같은 가상 표면에 대해 총 두 번 반복하였으므로, 동일 표면에 대해 피실험자별 응답은 두 개의 값이 존재하며 이 두 값의 기하 평균(Geometric mean) 값을 사용하여 통계 분석을 수행하였다. Figure 4.1에 감쇠율에 따른 표준화된 인지적 단단함 점수에 대한 상자 플롯을 나타내었다.

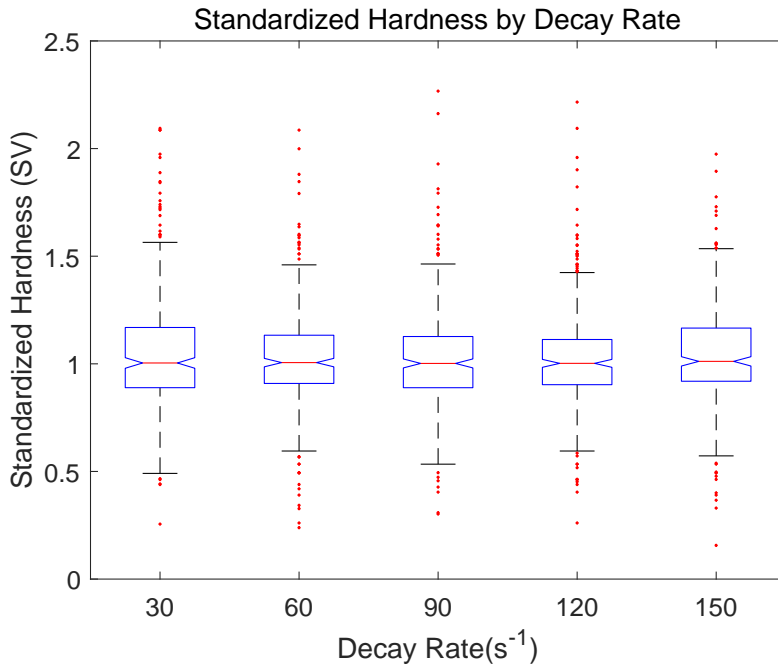


Figure 4.1: 감쇠율에 따른 상자 플롯

앞선 과정을 통해 표준화된 피실험자들의 가상 표면별 응답 횟수에 대해 오원 분산분석(5-way ANOVA)을 수행한 결과는 Table 4.2와 같다. 통계 분석 결과 강성 (Stiffness, k), 댐핑(Damping, b), 진폭(Amplitude, a), 주파수(Frequency, f)는 주

Source	F(d.f.1, d.f.2)	p	Source	F(d.f.1, d.f.2)	p
<i>k</i>	F(1,19) = 284.58	< 0.001*	<i>k : b : a</i>	F(1,19) = 0.84	0.360
<i>b</i>	F(1,19) = 16.64	< 0.001*	<i>k : b : f</i>	F(1,19) = 0.13	0.720
<i>a</i>	F(1,19) = 30.89	< 0.001*	<i>k : a : f</i>	F(1,19) = 2.62	0.106
<i>f</i>	F(1,19) = 103.74	< 0.001*	<i>b : a : f</i>	F(1,19) = 0.00	0.954
τ	F(4,76) = 0.63	0.644	<i>k : b : \tau</i>	F(4,76) = 0.16	0.957
<i>k : b</i>	F(1,19) = 0.38	0.536	<i>k : a : \tau</i>	F(4,76) = 0.58	0.679
<i>k : a</i>	F(1,19) = 0.27	0.602	<i>b : a : \tau</i>	F(4,76) = 0.28	0.893
<i>b : a</i>	F(1,19) = 1.85	0.174	<i>k : f : \tau</i>	F(4,76) = 0.55	0.696
<i>k : f</i>	F(1,19) = 1.12	0.290	<i>b : f : \tau</i>	F(4,76) = 0.33	0.856
<i>b : f</i>	F(1,19) = 0.25	0.615	<i>a : f : \tau</i>	F(4,76) = 0.73	0.568
<i>a : f</i>	F(1,19) = 31.59	< 0.001*	<i>k : b : a : f</i>	F(1,19) = 0.08	0.779
<i>k : \tau</i>	F(4,76) = 0.24	0.914	<i>k : b : a : \tau</i>	F(4,76) = 1.19	0.315
<i>b : \tau</i>	F(4,76) = 0.84	0.498	<i>k : b : f : \tau</i>	F(4,76) = 0.16	0.961
<i>a : \tau</i>	F(4,76) = 0.65	0.628	<i>k : a : f : \tau</i>	F(4,76) = 0.09	0.985
<i>f : \tau</i>	F(4,76) = 0.92	0.450	<i>b : a : f : \tau</i>	F(4,76) = 0.51	0.728
			<i>k : b : a : f : \tau</i>	F(4,76) = 0.50	0.734

Table 4.2: 사용자 실험 2에 대한 5-way ANOVA 결과

요인으로써 $p < 0.05$ 의 결과를 보임을 확인할 수 있었으며, 감쇠율(Decay Rate, τ)은 주요인으로써 $p = 0.644$ 의 결과를 보였다.

4.3.2 토의

사용자 실험 2를 통해 얻은 인지적 단단함 응답 데이터를 사용하여 통계 분석하였을 때, 사용자 실험 1과 같은 결과를 보였다. 사용자 실험 1과 비교하여 감쇠율의 범위를 넓히고 다양한 값을 사용하였음에도 불구하고, 감쇠율의 p 값은 0.644로 유의미한 영향을 주지 못한다고 할 수 있다. 이는 사용자 실험 1에서 언급했던 바와 같이

[13]의 결과와 일맥상통한다고 볼 수 있다. 따라서 사용자 실험 1과 사용자 실험 2의 결과를 바탕으로, 감쇠율을 배제한 채 가상 표면의 인지적 단단함을 강성, 댐핑, Contact Transient의 진폭, 주파수의 함수로 표현하려 한다.

V. 가상 표면의 인지적 단단함 함수 도출

5.1 연구배경

앞서 진행한 사용자 실험 1과 2의 결과를 통해 감쇠율은 인지적 단단함에 유의미한 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있었다. 이를 바탕으로 강성, 댐핑, Contact Transient의 진폭과 주파수에 주목하여 사람이 느끼는 가상표면의 인지적 단단함을 강성, 댐핑, Contact Transient의 진폭과 주파수에 대한 함수로 나타내려 한다.

이를 위해 서로 다른 강성과 댐핑, Contact Transient의 진폭과 주파수 값을 가지는 가상 표면을 렌더링한 후, 피실험자로부터 서로 다른 표면들의 단단함 점수 데이터를 수집하였으며, 수집된 데이터를 사용하여 함수 추정을 진행하였다.

5.2 사용자 데이터 수집

5.2.1 피실험자 정보

만 18세에서 35세(평균 만 23.62세, 표준 편차 3.74, 남자 15명 여자 14명)의 감각 기관에 문제가 없는 29명의 피실험자와 한 명의 아웃라이어를 포함하여 총 30명의 피실험자가 참여하였다. 피실험자에게 실험 시작 전 실험 방법에 대한 설명을 충분히 이해시킨 후 실험을 진행하였으며, 실험이 끝난 후 15,000원 피실험비가 지급되었다.

5.2.2 가상 표면의 종류

사람이 느끼는 가상표면의 단단함을 강성과 댐핑, Contact Transient의 진폭과 주파수에 대한 함수로 내기 위해 감쇠율은 고정된 채 서로 다른 가상 표면들을 피실험자에게 제시하였다. 각 요소의 값은 Table 5.1 와 같다. 4조건의 강성과 댐핑, 3조건의 진폭과 주파수의 값을 사용하여 총 144개의 서로 다른 가상 표면이 제시되었다.

Stiffness (N/m)	Damping ($N \cdot s/m$)	Amplitude (N)	Frequency (Hz)	Decay Rate (s^{-1})
150, 300, 450, 600	0.45, 0.9, 1.35, 1.8	0.4, 0.8, 1.2	50, 100, 180	90

Table 5.1: 함수 추정을 위한 데이터 수집 실험에서 가상 표면 렌더링에 사용된 값

5.2.3 실험 절차

실험 방법은 사용자 실험1, 2와 동일한 방식으로 진행되었다. 매 트라이얼마다 피실험자는 서로 다른 성질을 가지는 가상 표면을 두드린 후, 해당 표면의 단단함을 0보다 큰 양의 실수로 표현하는 절대 강도 추정 (Absolute Magnitude Estimation) 평가를 진행하였다.

사용자 실험1, 2와 동일한 실험 조건을 위해, 피실험자는 햅틱 디바이스의 손잡이를 잡은 채 팔과 손목을 움직여 가상 표면을 두드리는 행위를 행하였으며, 두드림 (Tapping)에 의한 효과만 보기 위하여 두드림을 제외한 누르는 행동(Pushing)과 같은 다른 행위는 자제하도록 요청하였다. 또한, 단단함에 영향을 미칠 수 있는 다른 요소들을 배제하기 위하여 최대한 같은 속도로 표면을 두드리도록 요청하였으며, 햅틱 디바이스에서 발생하는 소음이나 다른 정보들을 제어하기 위하여 피실험자는

핑크노이즈가 발생하는 노이즈캔슬링 헤드폰을 착용한 채로 실험을 진행하였다.

총 144개의 전체 가상 표면을 세 세션으로 나누어 제공하였으므로, 각 세션은 48개의 트라이얼로 구성되었다. 처음 두 세션을 트레이닝 세션으로 사용하였으며, 전체 가상 표면을 구성하는 세 세션을 두 번 반복하여, 총 여덟 세션으로 구성되었다.

가상 표면 제시 순서에 영향을 받지 않기 위하여 피실험자별 144개의 가상 표면의 순서를 랜덤하게 설정한 뒤 제공하였다. 트레이닝 세션의 가상표면으로, 강성과 댐핑, Contact Transient의 진폭과 주파수의 양 끝값을 사용하여 렌더링한 16개의 가상 표면과 나머지 128개의 가상 표면 중 랜덤으로 선택한 80개의 가상 표면이 랜덤한 순서로 제시되었다.

매 트라이얼 마다 피실험자는 화면 속 가상 표면을 햅틱 디바이스를 사용하여 충분히 두드린 후 인지되는 표면의 단단함을 키보드를 통해 0보다 큰 실수로 응답하였다. 각 세션 사이에서 피실험자는 3분의 휴식 시간을 가졌으며 피실험자가 원할 경우 언제든지 쉴 수 있도록 하였다. 실험은 평균 1시간 20분 동안 진행되었으며, 전체 실험이 끝난 후 단단하다고 판단하게 된 근거를 응답받았다.

각 피실험자의 응답을 사용하여 인지적 단단함에 대한 척도를 만들기 위해, Han의 척도 개발을 위한 데이터 표준화 방법 [24]에 따라 피실험자의 응답을 변환시켰다.

$$M_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^2 \log_{10} X_{ijk}}{2} \quad (5.1)$$

$$M_i = \frac{\sum_{j=1}^{144} \sum_{k=1}^2 \log_{10} X_{ijk}}{2 \times 144} \quad (5.2)$$

$$GM = \frac{\sum_{i=1}^{29} \sum_{j=1}^{144} \sum_{k=1}^2 \log_{10} X_{ijk}}{2 \times 144 \times 29} \quad (5.3)$$

$$MD_i = M_i - GM \quad (5.4)$$

$$SV_{ij} = 10^{M_{ij} - MD_i} \quad (5.5)$$

피실험자 i 의 j 번째 가상표면에 대한 k 번째 반복의 응답을 X_{ijk} 라 할 때, 본 실험에서 i 번째 피실험자의 j 번째 가상 표면의 인지적 단단함 응답의 평균 M_{ij} 는 식 5.1과 같이 표현되며, i 번째 피실험자의 전체 가상 표면의 인지적 단단함 응답의 평균 M_i 는 식 5.2로 표현된다. 또한, 모든 응답 데이터의 평균 GM 은 식 5.3로 계산할 수 있다. M_i 와 GM 을 이용하여 피실험자별로 개인 평균과 전체 평균의 차이인 MD_i 를 식 5.4로 구한 후, MD_i 를 사용하여 표준화된 가상 표면의 단단한 정도인 SV_{ij} 를 식 5.5을 통해 구하였다.

이를 통해 피실험자별 144개의 표준화된 응답 SV_{ij} 데이터가 생겼으며, 144개의 응답 중, 40개 이상이 중앙값에서 스케일링된 3 중앙값 절대 편차(MAD)를 초과하여 떨어져 있는 아웃라이어 한 명을 제외하여 총 29×144 인 4,176개의 데이터가 생성되었다.

Figures 5.1, 5.2, 5.3에 주파수별 진폭과 댐핑, 강성에 따른 피실험자별 가상표면의 표준화된 인지적 단단함 응답 점수의 평균 및 표준 편차를 나타내었다.

5.3 모델 수립

인지 강도 추정 연구에서 스티븐의 멱 법칙 (Steven's power law)을 기반으로 한 연구가 많이 존재한다[25], [26]. 따라서 본 연구에서도 스티븐의 멱 법칙 식 5.6에 기반하여 가상표면별 피실험자의 인지적 단단함 응답의 평균값을 이용해 함수

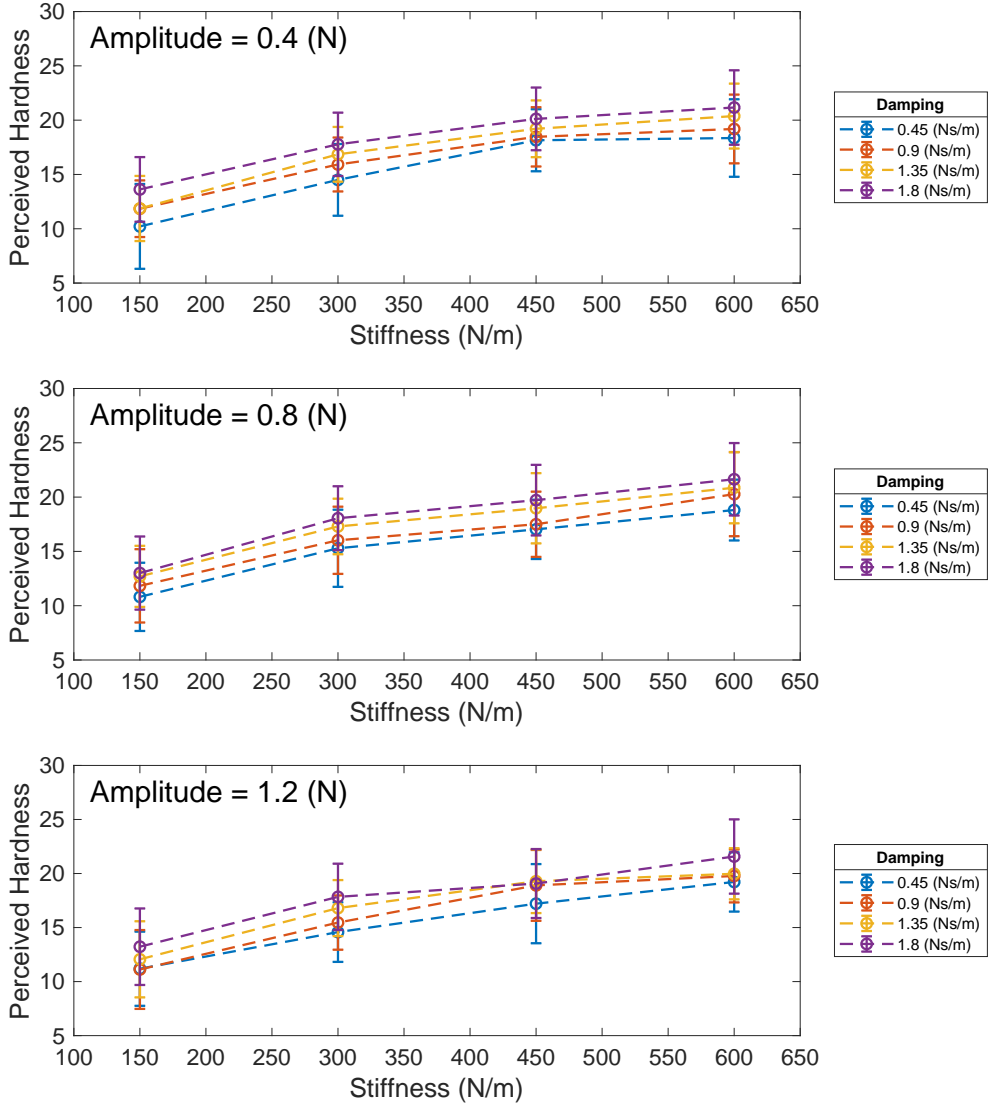


Figure 5.1: 주파수가 50(Hz)일때 각 조건별 가상표면의 인지적 단단함 평균 및 표준편차

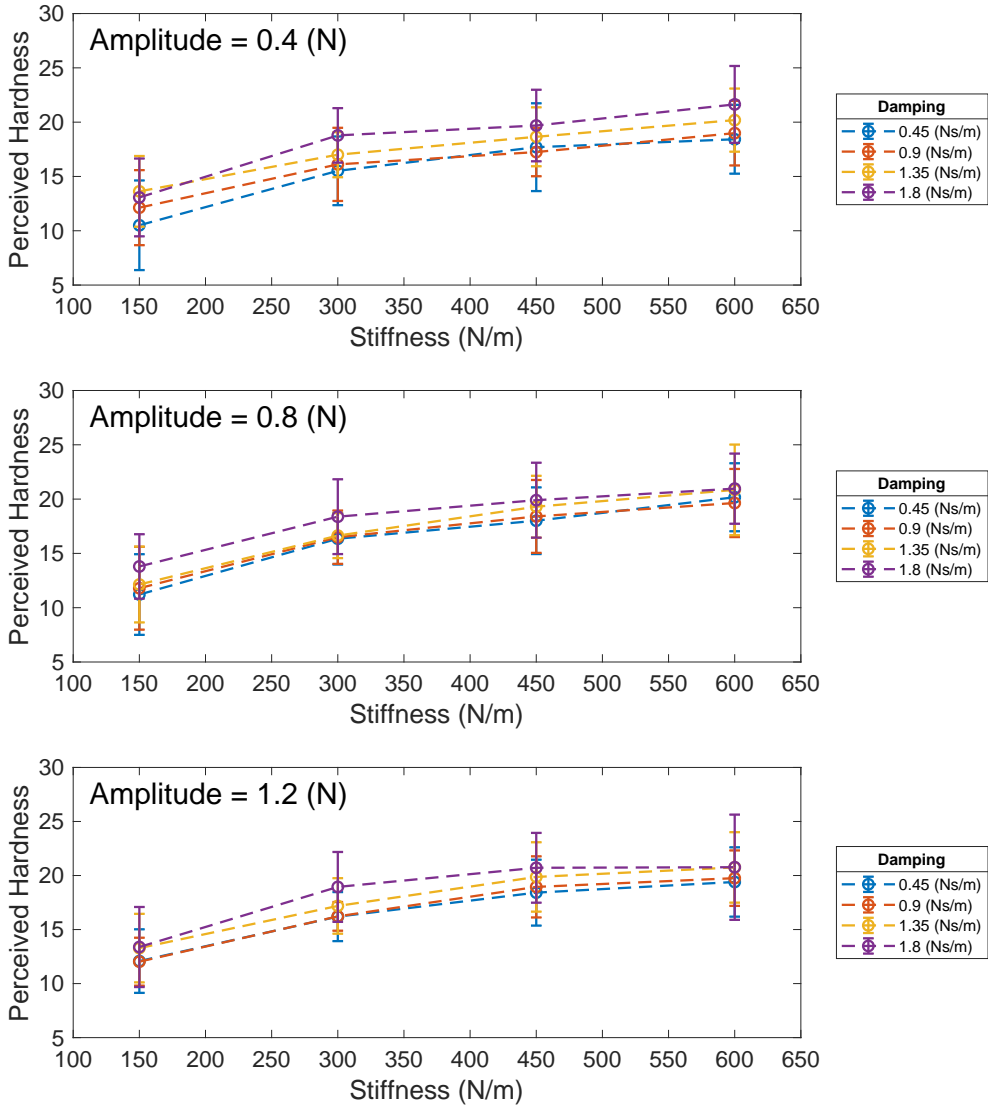


Figure 5.2: 주파수가 100(Hz)일때 각 조건별 가상표면의 인지적 단단함 평균 및 표준편차

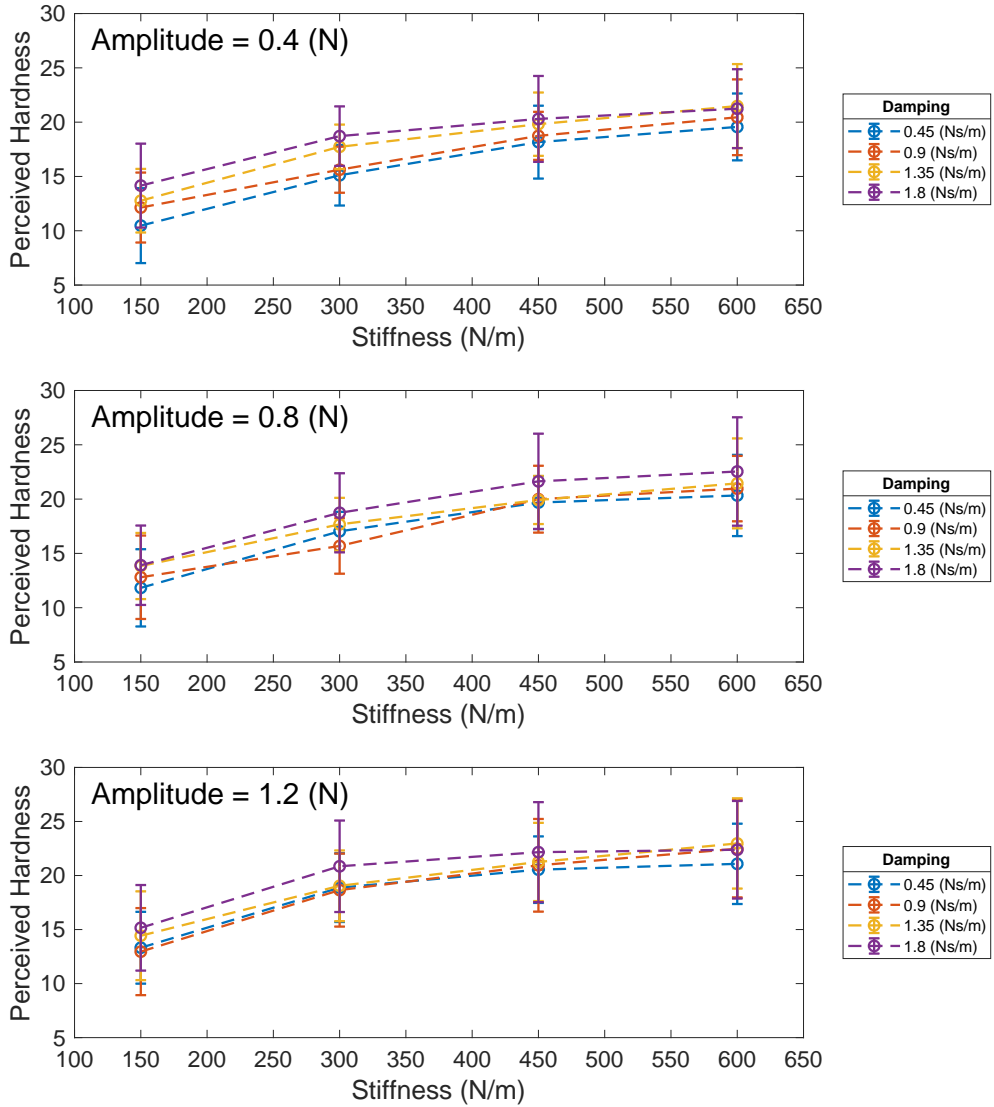


Figure 5.3: 주파수가 180(Hz)일때 각 조건별 가상표면의 인지적 단단함 평균 및 표준편차

추정을 진행하였다. $\Psi(I)$ 는 자극에 따른 사람의 인지 강도를 의미하며, I 는 자극의 세기를 의미한다. 본 연구에서는 상수 m 와 n 를 함수 추정을 통해 구하는 것을 목표로 하였다.

$$\Psi(I) = mI^n \quad (5.6)$$

가상 표면의 인지적 단단함(h)을 강성(k), 댐핑(b), 진폭(a), 주파수(f)의 함수로 표현하기 위한 함수 추정을 진행하였다. 인지적 단단함의 함수 추정을 위해 상용 프로그램인 MathWorks사의 공학용 소프트웨어인 MATLAB의 fitnlm 함수를 사용하였다. 다양한 함수의 형태를 사용하여 함수 추정을 진행하였으며, 그중 높은 $R^2 = 0.957$ 의 값을 보여준 식 5.7의 형식을 최종적으로 채택하였다.

$$h = mk^{\beta_4} \quad (5.7)$$

$$m = \alpha_1 b^{\beta_1} + \alpha_2 a^{\beta_2} f^{\beta_3} + \alpha_3 \quad (5.8)$$

i	1	2	3	4
α_i	0.1489	1.5174×10^{-6}	2.0263	
β_i	1.4332	1.4126	2.3103	0.34569

Table 5.2: 가상 표면의 인지적 단단함 추정식 5.7과 식 5.8의 계수

인지적 단단함을 결정하는 주된 자극으로 강성에 대한 스티븐의 멱 법칙 형식의 식 5.7 사용하고, 이에 따른 계수인 m 은 식 5.8로 댐핑, Contact Transient의 진폭과 주파수와의 곱 그리고 강성 고유의 계수를 통해 구할 수 있다. 식 5.7와 식 5.8의 계수는 Table 5.2에 나타내었다.

가상 표면의 인지적 단단함 강도를 예측 할 수 있는 추정식 5.7을 통해 예측된 인지적 단단함은 Figures 5.4 - 5.10에 묘사되었다. Figures 5.4 - 5.6은 가상 표면의 인지적 단단함 강도를 진폭과 주파수별 강성과 댐핑에 따른 결과 값으로 표현하였으며, Figures 5.7 - 5.10은 가상 표면의 인지적 단단함 강도를 강성과 댐핑별 진폭과 주파수에 따른 결과 값으로 표현하였다. 이때, 검은 원은 함수 추정에 사용된 조건별 가상 표면에 대한 피실험자들의 평균값을 의미하며, 회색 표면은 각 조건에서 예측된 가상 표면의 인지적 단단함 강도를 나타낸다.

Figures 5.4 - 5.10을 통해 알 수 있듯이, 가상 표면의 인지적 단단함 강도는 강성과 댐핑, 진폭과 주파수가 증가할수록 증가한다는 것을 알 수 있다. 또한 진폭과 주파수의 경우 주파수가 클수록 진폭의 변화가 인지적 단단함에 큰 영향을 주었으며, 마찬가지로 진폭이 클수록 주파수의 변화가 인지적 단단함의 큰 차이를 일으킨다는 것을 알 수 있다.

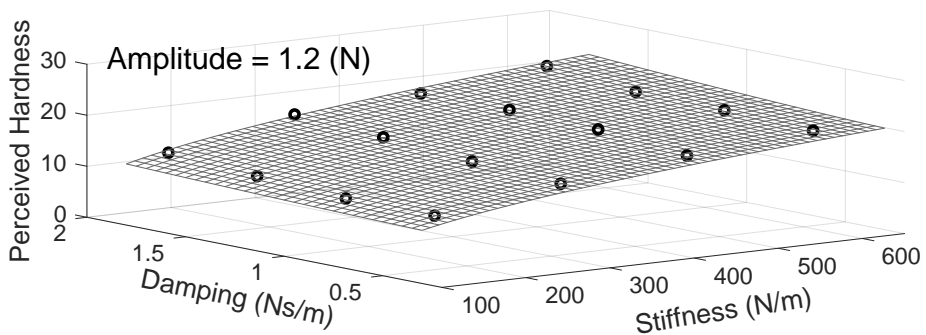
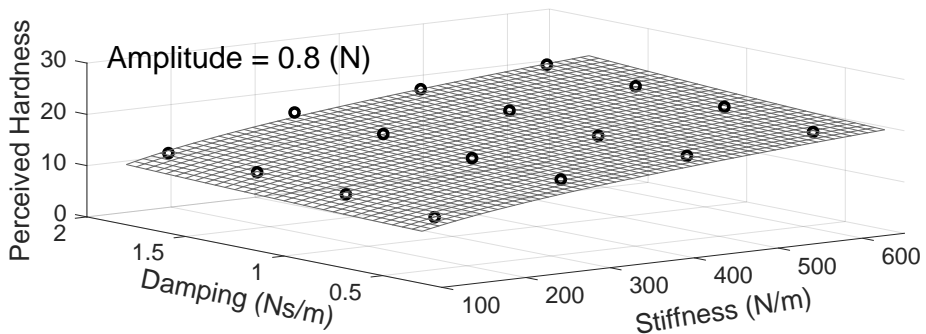
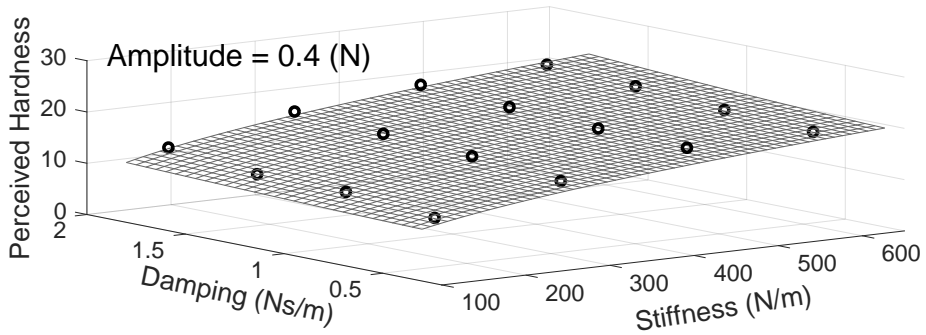


Figure 5.4: 가상 표면의 인지적 단단함 추정 함수를 통한 주파수가 50(Hz)일때 진폭별 강성과 댐핑에 따른 인지적 단단함

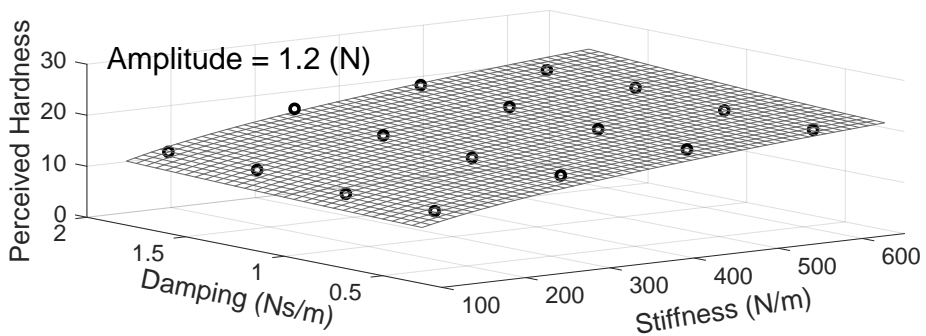
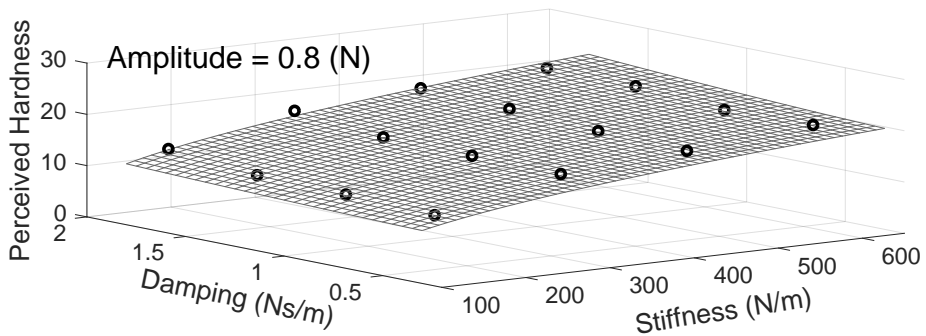
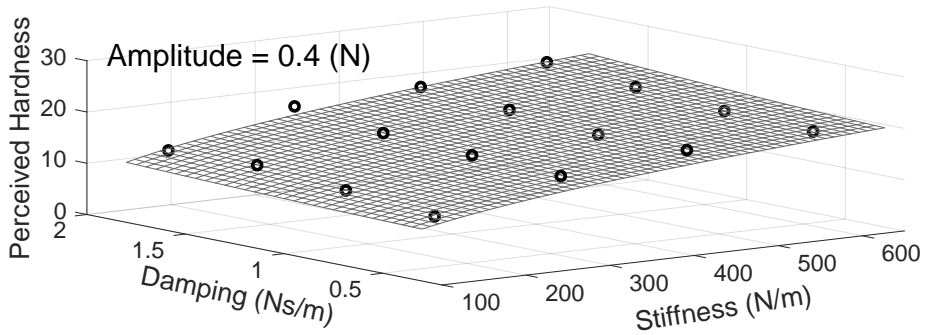


Figure 5.5: 가상 표면의 인지적 단단함 추정 함수를 통한 주파수가 100(Hz)일때 진폭별 강성과 댐핑에 따른 인지적 단단함

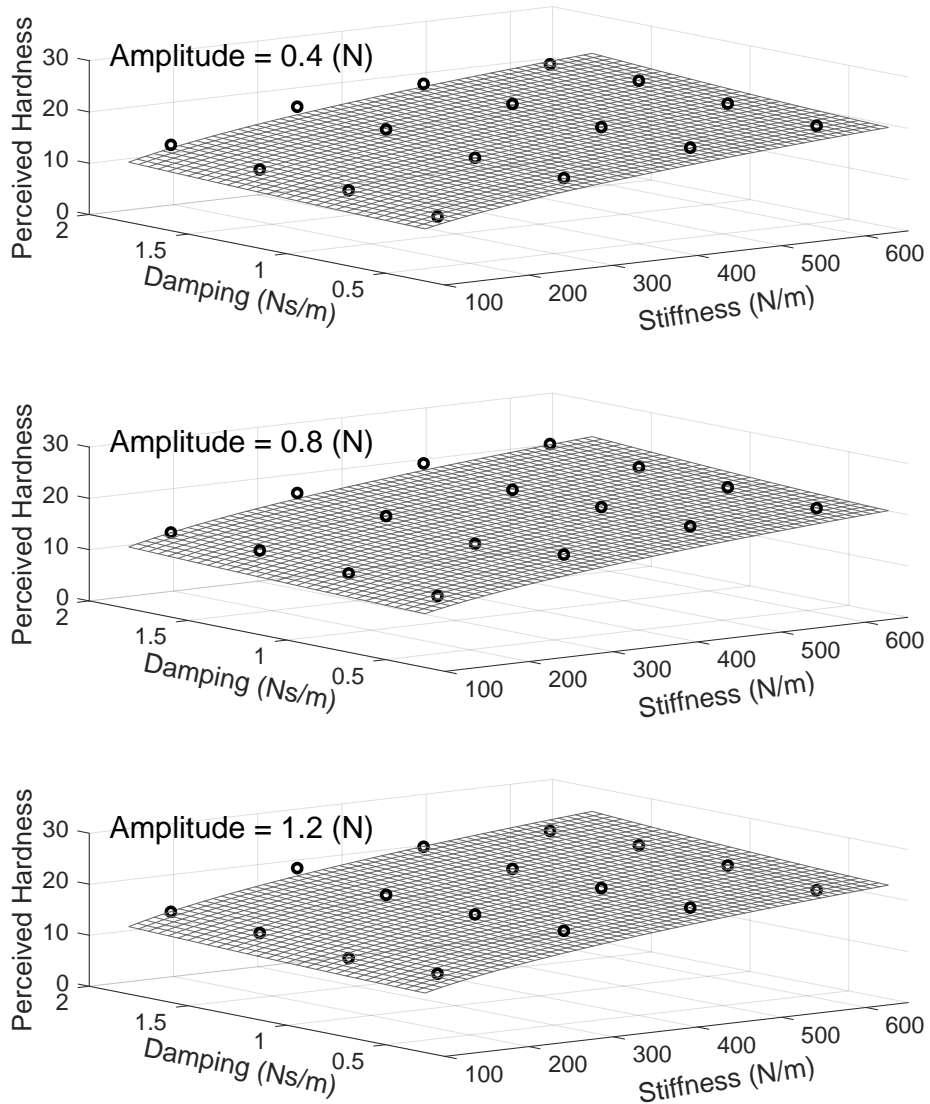


Figure 5.6: 가상 표면의 인지적 단단함 추정 함수를 통한 주파수가 180(Hz)일때 진폭별 강성과 댐핑에 따른 인지적 단단함

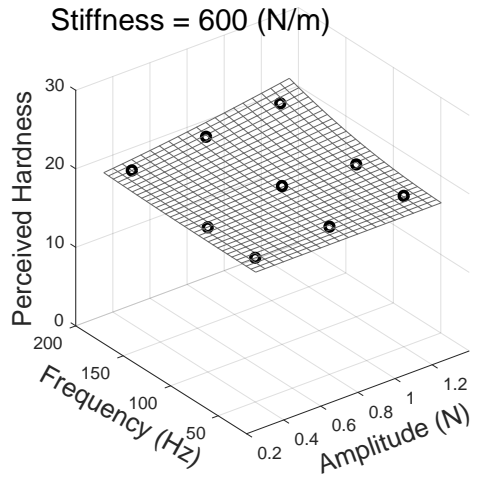
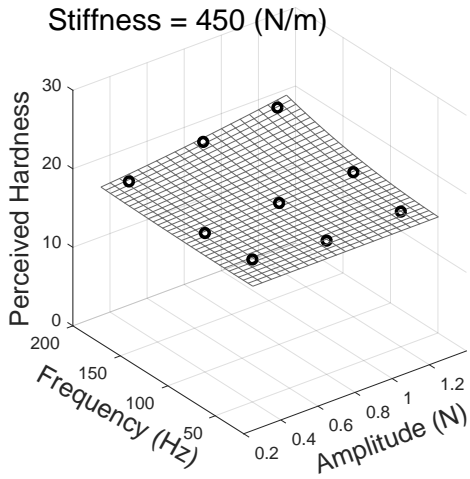
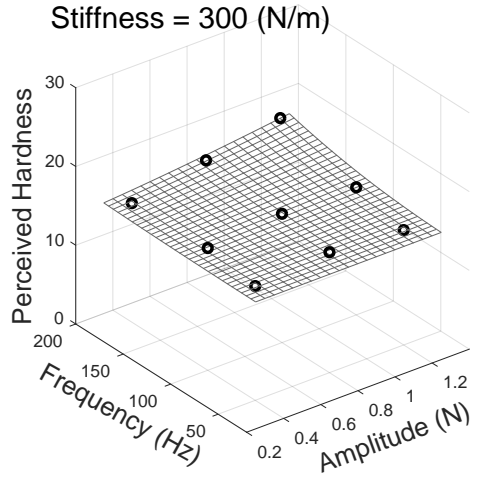
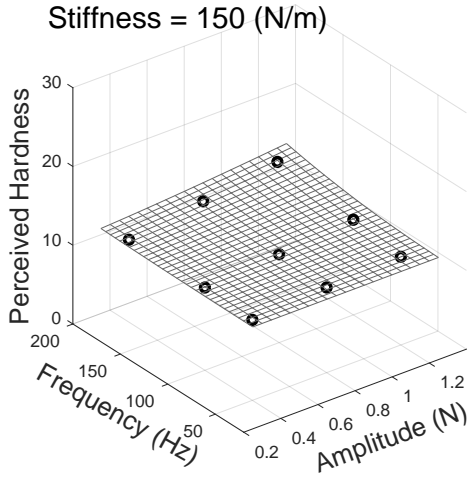


Figure 5.7: 가상 표면의 인지적 단단함 추정 함수를 통한 댐핑이 0.45 (N·s/m)일때 강성별 진폭과 주파수에 따른 인지적 단단함

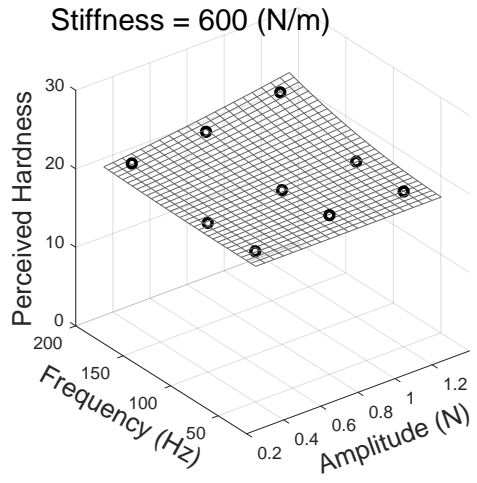
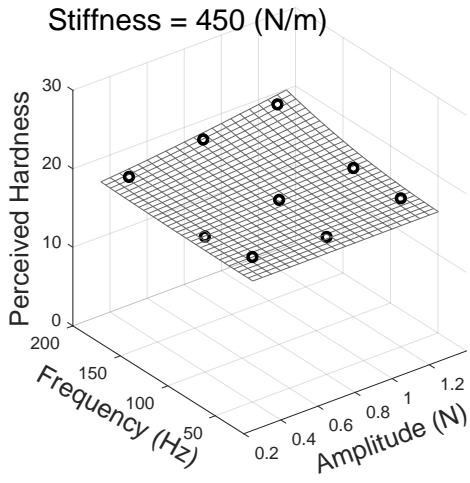
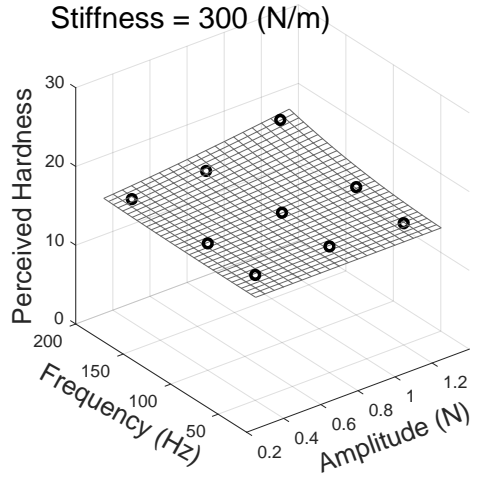
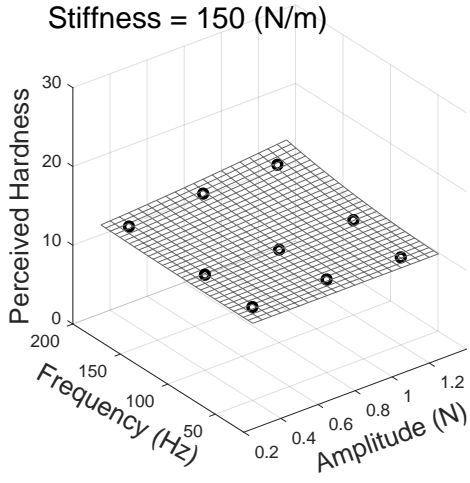


Figure 5.8: 가상 표면의 인지적 단단함 추정 함수를 통한 댐핑이 0.9 (N·s/m)일때 강성별 진폭과 주파수에 따른 인지적 단단함

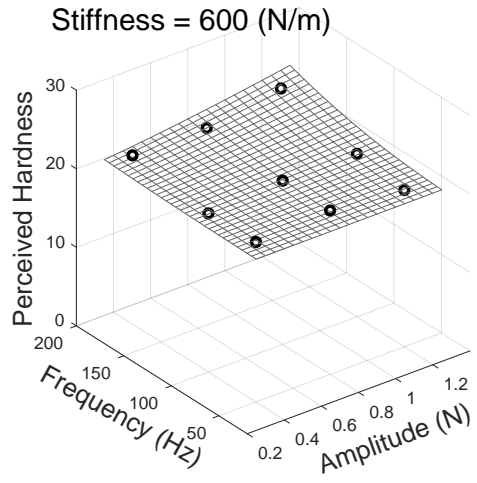
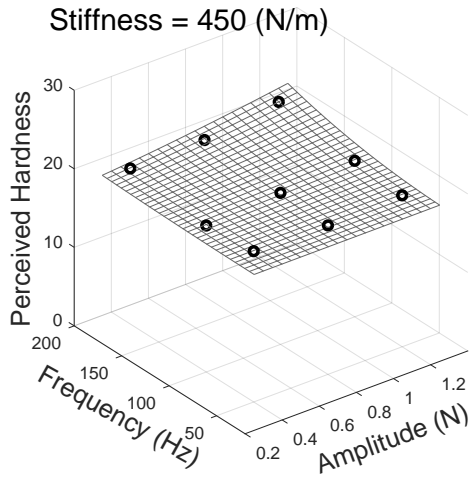
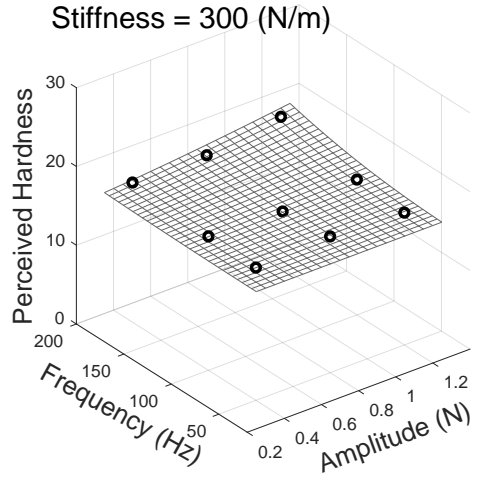
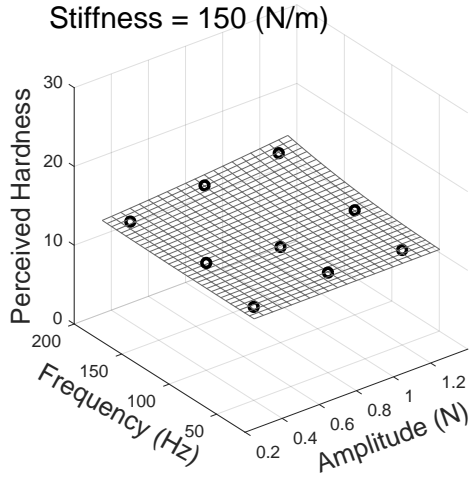


Figure 5.9: 가상 표면의 인지적 단단함 추정 함수를 통한 댐핑이 1.35 (N·s/m)일때 강성별 진폭과 주파수에 따른 인지적 단단함

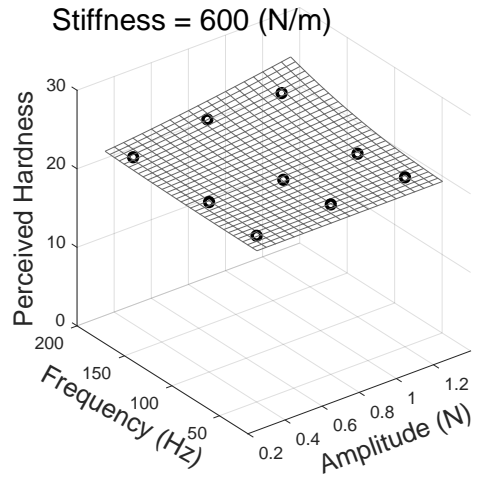
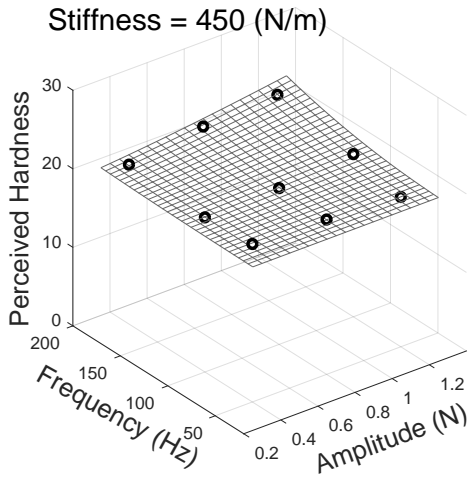
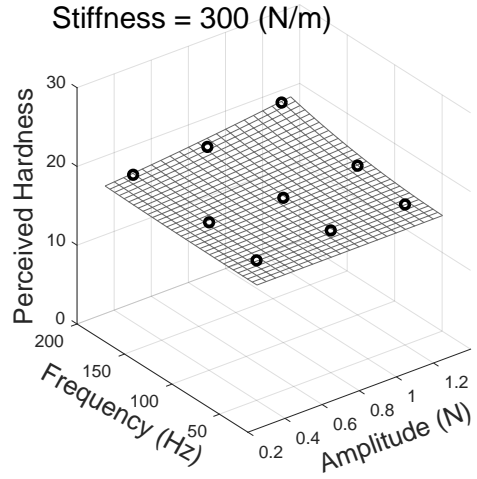
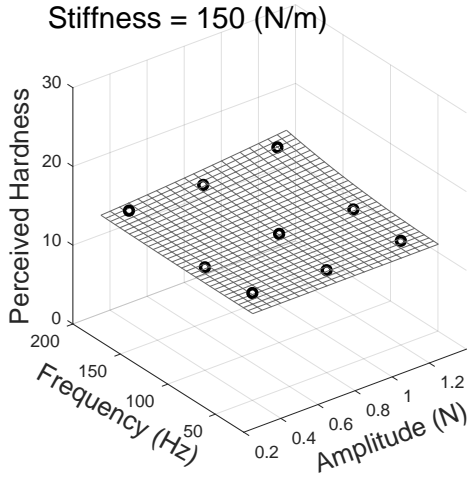


Figure 5.10: 가상 표면의 인지적 단단함 추정 함수를 통한 댐핑이 1.8 (N·s/m)일때 강성별 진폭과 주파수에 따른 인지적 단단함

5.4 결과 및 토의

데이터 수집 실험을 통해 수집된 서로 다른 가상 표면의 인지적 단단함 점수 데이터를 바탕으로 가상 표면의 인지적 단단함 강도를 강성, 댐핑, Contact Transient의 진폭과 주파수의 함수로 나타내었다. 이를 통해 앞으로 Contact Transient이 첨가된 스프링-댐퍼 모델로 렌더링 된 가상 표면의 인지적 단단함 강도의 예측이 가능해졌다. 이는 가상 환경에서 개발자가 원하는 강도의 표면 혹은 물체를 렌더링할 때 참고할 수 있는 가이드라인으로써 사용될 수 있다.

Tables 5.3 - 5.6은 다른 요소들의 값이 일정하고 하나의 요소가 데이터 수집 (Table 5.1)에 사용된 최솟값에서 최댓값으로 증가할 때, 식 5.7에 따라 계산된 인지적 단단함이 증가하는 비율을 나타낸다. 인지적 단단함의 증가 비율은 다른 요소들이 최솟값 혹은 최댓값으로 일정할 때마다 구하였으므로 각 Table마다 총 8가지의 증가 비율이 계산된다.

강성이 $150(N/m)$ 에서 $600(N/m)$ 로 4배 증가할 때 인지적 단단함은 1.6148배 증가하였으며, 댐핑이 $0.45(N \cdot s/m)$ 에서 $1.8(N \cdot s/m)$ 로 4배 증가할 때 인지적 단단함은 최소 1.1247배에서 최대 1.436배 증가하였다. 또한, 진폭이 $0.4(N)$ 에서 $1.2(N)$ 으로 3배 증가할 때 인지적 단단함은 최소 1.0055배에서 최대 1.1173배 증가하였고, 주파수가 $50(Hz)$ 에서 $180(Hz)$ 로 3.6배 증가할 때 인지적 단단함은 최소 1.0269배에서 최대 1.445배 증가하였다.

강성, 댐핑, 진폭, 주파수의 증가 비율에 따른 인지적 단단함의 증가 비율 계수의 최솟값과 최댓값을 Table 5.7에 나타내었다. 또한, 요소별 증가 비율 계수를 강성의 증가 비율 계수의 비로 나타내어 요소별 계수의 상대성을 나타내었다. 이를 통해 강성이 가장 큰 계수를 지니며, 인지적 단단함에 가장 큰 영향을 주는 주된 요인임을 알 수 있었다. 그러나, 댐핑, 진폭, 주파수 또한 강성의 계수에 대한 최대 계수의

Stiffness (N/m)	Damping ($N \cdot s/m$)	Amplitude (N)	Frequency (Hz)	Perceived Hardness	Increasing Rate
150 600	0.45	0.4	50	11.7417 18.961	1.6148
150 600	0.45	0.4	180	12.1035 19.5452	1.6148
150 600	0.45	1.2	50	11.8153 19.0798	1.6148
150 600	0.45	1.2	180	13.5231 21.8376	1.6148
150 600	1.8	0.4	50	13.4281 21.6842	1.6148
150 600	1.8	0.4	180	13.7899 22.2684	1.6148
150 600	1.8	1.2	50	13.5017 21.803	1.6148
150 600	1.8	1.2	180	15.2094 24.5608	1.6148

Table 5.3: 강성의 증가에 따른 인지적 단단함의 증가 비율

비율이 0.88에서 0.99로써 강성 못지않게 중요한 요소로써 작용한다는 것을 알 수 있었다.

하지만 Figures 5.1 - 5.3을 통해 알 수 있듯이, 조건별 가상 표면의 인지적 단단함 강도에 대한 피실험자별 점수의 표준 편차가 크다는 것을 알 수 있다. 이는 실험 후 설문 조사 결과를 분석해 본 결과, 피실험자의 일부는 댐핑이 높을 때 ‘뭉툭하다’라고 느껴 높은 인지적 단단함 점수를 주었으며, 또 다른 피실험자의 일부는 댐핑이 낮을 때 ‘잘 튕겨져 나온다’라고 느껴 높은 인지적 단단함 점수를 주었다는 것을 알

Stiffness (N/m)	Damping ($N \cdot s/m$)	Amplitude (N)	Frequency (Hz)	Perceived Hardness	Increasing Rate
150	0.45	0.4	50	11.7417	1.1436
	1.8			13.4281	
150	0.45	0.4	180	12.1035	1.1393
	1.8			13.7899	
150	0.45	1.2	50	11.8153	1.1427
	1.8			13.5017	
150	0.45	1.2	180	13.5231	1.1247
	1.8			15.2094	
600	0.45	0.4	50	18.961	1.1436
	1.8			21.6842	
600	0.45	0.4	180	19.5452	1.1393
	1.8			22.2684	
600	0.45	1.2	50	19.0798	1.1427
	1.8			21.803	
600	0.45	1.2	180	21.8376	1.1247
	1.8			24.5608	

Table 5.4: 댐핑의 증가에 따른 인지적 단단함의 증가 비율

수 있었다. 다시 말해 피실험자마다 가상 표면의 인지적 단단함을 판단함에 있어 각 요소에 대해 서로 다른 전략을 취하는 경우가 있었으며, 이러한 판단 근거의 차이가 큰 표준 편차를 야기한 것으로 보인다.

또한, 본 연구에서는 가상 표면을 렌더링할 때 사용되는 스프링-댐퍼 모델의 강성, 댐핑, Contact Transient의 진폭, 주파수, 감쇠율만 고려하였으나, 본 연구에서 고려하지 못한 사용자에게 의해 야기되는 다른 물리적 특성들이 존재한다. 가상 표면 접촉 시 속도, 가상 표면 투과 깊이, 가상 표면을 두드리는 사용자의 힘의 세기

Stiffness (N/m)	Damping ($N \cdot s/m$)	Amplitude (N)	Frequency (Hz)	Perceived Hardness	Increasing Rate
150	0.45	0.4	50	11.7417	1.0063
		1.2		13.4281	
150	0.45	0.4	180	12.1035	1.1173
		1.2		13.7899	
150	1.8	0.4	50	13.4281	1.0055
		1.2		13.5017	
150	1.8	0.4	180	13.7899	1.1029
		1.2		15.2094	
600	0.45	0.4	50	18.961	1.0063
		1.2		21.6842	
600	0.45	0.4	180	19.5452	1.1173
		1.2		22.2684	
600	1.8	0.4	50	21.6842	1.0055
		1.2		21.803	
600	1.8	0.4	180	22.2684	1.1029
		1.2		24.5608	

Table 5.5: 진폭의 증가에 따른 인지적 단단함의 증가 비율

등과 같은 다른 요소 중 가상 표면의 인지적 단단함에 영향을 끼치는 요소가 많이 존재하며, 이러한 요소들이 조건별 가상 표면의 인지적 단단함 강도의 표준 편차의 다른 원인이 되었을 가능성이 크다.

따라서, 가상 표면의 인지적 단단함에 대한 척도로써 가상 표면 접촉 시 속도와 가상 표면을 두드리는 사용자의 힘의 세기 등과 같은 다른 요인들을 고려하거나, 같은 값을 가지도록 통제한다면 더욱 더 높은 정확도로 가상 표면의 인지적 단단함을 예측할 수 있을 것이다.

Stiffness (N/m)	Damping ($N \cdot s/m$)	Amplitude (N)	Frequency (Hz)	Perceived Hardness	Increasing Rate
150	0.45	0.4	50	11.7417	1.0308
			180	12.1035	
150	0.45	1.2	50	11.8153	1.1445
			180	13.5231	
150	1.8	0.4	50	13.4281	1.0269
			180	13.7899	
150	1.8	1.2	50	13.5017	1.1265
			180	15.2094	
600	0.45	0.4	50	18.961	1.0308
			180	19.5452	
600	0.45	1.2	50	19.0798	1.1445
			180	21.8376	
600	1.8	0.4	50	21.6842	1.0269
			180	22.2684	
600	1.8	1.2	50	21.803	1.1265
			180	24.5608	

Table 5.6: 주파수의 증가에 따른 인지적 단단함의 증가 비율

	Min Coefficient	Relative Ratio	Max Coefficient	Relative Ratio
Stiffness	0.4037	1	0.4037	1
Damping	0.2812	0.6966	0.3590	0.8893
Amplitude	0.3352	0.8303	0.3724	0.9225
Frequency	0.2853	0.7067	0.4014	0.9943

Table 5.7: 각 요소의 증가에 따른 인지적 단단함의 증가 계수 및 강성의 계수에 대한 댐핑, 진폭, 주파수 계수의 상대 비율

VI. 결론

본 학위 논문에서는 가상 표면을 렌더링하는 방법 중 하나인 스프링-댐퍼 모델에 사실감을 높여주는 접촉 시 진동을 더하여 렌더링한 가상표면의 인지적 단단함 강도 예측을 위한 사용자 실험과 함수 추정을 진행하였다. 이를 통해 가상 환경에서 원하는 인지적 단단함 강도를 지닌 가상 표면을 렌더링할 수 있는 가이드 라인을 제시하고자 하였으며, 다음과 같은 연구를 수행하였다.

첫째, 상용 햅틱 장비인 Omega.3를 사용하여 스프링-댐퍼 모델로 가상 표면을 구현하였으며, 동시에 가상 표면과 접촉 시 일시적으로 발생하는 진동을 사용자가 표면과 접촉할 때 렌더링 되게 하였다.

둘째, 스프링-댐퍼 모델과 접촉 시 일시적 진동의 파라미터인 강성, 댐핑, 진폭, 주파수, 감쇠율 중 어떠한 요소들이 인지적 단단함에 영향을 주는지를 알기 위해 서로 다른 가상 표면의 인지적 단단함을 묻는 사용자 실험 1을 진행하였다. 사용자 실험 1의 인지적 단단함 점수를 오원분산분석한 결과 감쇠율을 제외한 강성, 댐핑, 진폭, 주파수가 $P < 0.001$ 의 값을 가져, 인지적 단단함에 유의미한 영향을 준다는 것을 알 수 있었다.

셋째, 사용자 실험 1의 결과가 실험에 사용된 감쇠율 조건의 범위 때문인지 아니면 정말로 유의미한 영향을 주지 않는 것인지 검증하기 위해 감쇠율의 범위를 넓히고, 더 많은 조건을 사용한 사용자 실험 2를 진행하였다. 오원분산분석을 수행하였을 때 사용자 실험 1과 동일하게 감쇠율을 제외한 강성, 댐핑, 진폭, 주파수가 인지적 단단함에 유의미한 영향을 준다는 결과가 도출되었다.

넷째, 사용자 실험 1과 사용자 실험2의 결과를 기반으로 감쇠율의 값을 고정한

후 인지적 단단함에 영향을 주는 강성, 댐핑, 진폭, 주파수의 값을 다양하게 변화시켜, 사용자에게 서로 다른 가상 표면의 인지적 단단함을 묻는 절대 강도 추정 실험을 진행하였다. 이를 통해 수집된 강성, 댐핑, 진폭, 주파수에 따른 인지적 단단함 점수 데이터를 사용하여 인지적 단단함을 강성, 댐핑, 진폭, 주파수의 함수로 추정하였다.

본 논문에서는 가상 표면을 렌더링할 때 고려할 수 있는 조건들을 고려하였다. 따라서 향후 가상 환경에서 원하는 강도의 인지적 단단함을 지닌 가상 표면을 렌더링할 때 참조 할 수 있는 가이드라인으로 활용될 수 있다.

향후 연구로써 본 실험에서 고려하지 못하였던 요소들을 고려하여 사람이 인지하는 단단함을 예측한다면 더욱더 높은 정확도를 가질 수 있을 것이라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Shogo Okamoto, Hikaru Nagano, and Yoji Yamada. Psychophysical dimensions of tactile perception of textures. *IEEE Transactions on Haptics*, 6(1):81–93, 2013.
- [2] Margaret Minsky, Ouh-young Ming, Oliver Steele, Frederick P Brooks Jr, and Max Behensky. Feeling and seeing: issues in force display. In *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, volume 24, pages 235–241. ACM, 1990.
- [3] J Edward Colgate and J Michael Brown. Factors affecting the z-width of a haptic display. In *Robotics and Automation, 1994. Proceedings., 1994 IEEE International Conference on*, pages 3205–3210. IEEE, 1994.
- [4] Parris Wellman and Robert D Howe. Towards realistic vibrotactile display in virtual environments. In *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division*, volume 57, pages 713–718, 1995.
- [5] Allison M Okamura, Mark R Cutkosky, and Jack T Dennerlein. Reality-based models for vibration feedback in virtual environments. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 6(3):245–252, 2001.
- [6] Katherine J Kuchenbecker, Jonathan Fiene, and Günter Niemeyer. Improving contact realism through event-based haptic feedback. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 12(2):219–230, 2006.

- [7] Brian T Gleeson and William R Provancher. Exploration of tactile contact in a haptic display: Effects of contact velocity and transient vibrations. *IEEE transactions on haptics*, 4(2):88–99, 2011.
- [8] Dale A Lawrence, Lucy Y Pao, Anne M Dougherty, Mark A Salada, and Yiannis Pavlou. Rate-hardness: A new performance metric for haptic interfaces. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16(4):357–371, 2000.
- [9] Gabjong Han, Seokhee Jeon, and Seungmoon Choi. Improving perceived hardness of haptic rendering via stiffness shifting: an initial study. In *Proceedings of the 16th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pages 87–90. ACM, 2009.
- [10] Gabjong Han and Seungmoon Choi. Extended rate-hardness: a measure for perceived hardness. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pages 117–124. Springer, 2010.
- [11] Kosuke Higashi, Shogo Okamoto, Yoji Yamada, Hikaru Nagano, and Masashi Konyo. Hardness perception through tapping: Peak and impulse of the reaction force reflect the subjective hardness. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pages 366–375. Springer, 2018.
- [12] Femke Elise van Beek, Dennis JF Heck, Henk Nijmeijer, Wouter M Bergmann Tiest, and Astrid ML Kappers. The effect of global and lo-

- cal damping on the perception of hardness. *IEEE transactions on haptics*, (3):409–420, 2016.
- [13] Kosuke Higashi, Shogo Okamoto, and Yoji Yamada. Perceived hardness through actual and virtual damped natural vibrations. *IEEE Transactions on Haptics*, 2018.
- [14] Steven C Hauser and Gregory J Gerling. Measuring tactile cues at the fingerpad for object compliances harder and softer than the skin. In *IEEE Haptics Symposium:[proceedings]. IEEE Haptics Symposium*, volume 2016, page 247. NIH Public Access, 2016.
- [15] Kinya Fujita and Hisayuki Ohmori. A new softness display interface by dynamic fingertip contact area control. In *5th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics*, pages 78–82, 2001.
- [16] Robert M Friedman, Kim D Hester, Barry G Green, and Robert H LaMotte. Magnitude estimation of softness. *Experimental brain research*, 191(2):133–142, 2008.
- [17] Antonio Bicchi, Enzo Pasquale Scilingo, and Danilo De Rossi. Haptic discrimination of softness in teleoperation: the role of the contact area spread rate. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16(5):496–504, 2000.
- [18] Wouter M Bergmann Tiest and Astrid ML Kappers. Kinaesthetic and cutaneous contributions to the perception of compressibility. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pages 255–264. Springer, 2008.

- [19] Jaeyoung Park, Yonghwan Oh, and Hong Z Tan. Effect of cutaneous feedback on the perceived hardness of a virtual object. *IEEE transactions on haptics*, 2018.
- [20] Aaron Cedric Zöllner, Alexandra Lezkan, Vivian C Paulun, Roland W Fleming, and Knut Drewing. Influence of different types of prior knowledge on haptic exploration of soft objects. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pages 413–424. Springer, 2018.
- [21] Kiyohiko Nunokawa, Y Seki, Shuichi Ino, and K Doi. Judging hardness of an object from the sounds of tapping created by a white cane. In *2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pages 5876–5879. IEEE, 2014.
- [22] CHAI3D. <http://www.chai3d.org/>.
- [23] myNoise. <https://mynoise.net/NoiseMachines/whiteNoiseGenerator.php>.
- [24] Sung H Han, Maengkee Song, and Jiyoun Kwahk. A systematic method for analyzing magnitude estimation data. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 23(5-6):513–524, 1999.
- [25] Jonghyun Ryu, Jaehoon Jung, Gunhyuk Park, and Seungmoon Choi. Psychophysical model for vibrotactile rendering in mobile devices. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 19(4):364–387, 2010.

- [26] Inwook Hwang, Jongman Seo, Myongchan Kim, and Seungmoon Choi. Vibrotactile perceived intensity for mobile devices as a function of direction, amplitude, and frequency. *IEEE Transactions on Haptics*, 6(3):352–362, 2013.

Acknowledgements

길다면 길고 짧다면 짧은 포항 생활이 많은 분들의 도움을 받아 무사히 마칠 수 있었습니다. 우선 제가 어떤 선택을 하든 항상 존중해주고 믿어주신 부모님 감사드립니다. 언제나 든든하였으며, 덕분에 자신감있게 포항 생활을 할 수 있었습니다. 또한, 힘들때 언제나 제 편이 되어주고 진지하게 제 얘기를 들어준 언니에게도 고맙다는 말을 남기고 싶습니다.

다음으로 지도 교수님이신 최승문 교수님께 감사드립니다. 저의 선택을 존중해 주시고 많은 신경써주셔서 감사합니다. 교수님 덕분에 논문도 써보고, 학회에 가서 많은 경험을 할 수 있었습니다. 지도해주시는 동안 많이 부족하고 모자랐을텐데, 잘 가르쳐주셔서 정말 감사합니다.

2년동안 함께했던 연구실 사람들에게도 감사드립니다. 친동생처럼 대해주시고 재미있고 수평적인 랩 생활을 할 수 있게 해주신 호진 선배, 성환 선배, 용재 선배, 승재 선배 감사드립니다. 랩 생활을 같이 하진 못했지만 미국에서 잘 챙겨주신 건혁선배 감사합니다. 처음 랩에 들어올때 지하에서 잘 챙겨주신 성호 선배, 인석 선배, 호준 선배 덕분에 랩에 잘 적응할 수 있어 고마웠습니다. 즐거운 랩생활을 할 수 있게 언제나 유쾌한 분위기를 만들어준 트리오 겨레 선배, 상운 선배, 선웅 선배 감사합니다. 언제나 친근하게 대해주신 종호 선배, 한슬이 감사했습니다. 늘 나의 부탁을 흔쾌히 들어준 성원이, 언제나 잘 챙겨주던 채용이, 같이 패턴들으면서 고생했던 효승이, 마지막 학기에 들어와 친해진 지완이 모두 감사드립니다.

마지막으로 석사 논문 심사를 흔쾌히 맡아주신 이승용 교수님, 조민수 교수님께 감사드립니다.

Curriculum Vitae

Name : Hyejin Choi

Education

- 2013. 3. – 2017. 2. Department of Computer Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology (B.S.)
- 2015. 7. – 2015. 8. Summer Session, University of California Berkeley
- 2017. 3. – 2019. 2. Department of Computer Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology (M.S.)

Experience

- 2016. 1. – 2016. 2. Intern, SK Hynix Inc.

Affiliation

- 1. Haptics and Virtual Reality Lab., Department of Computer Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology