

사실적인 햅틱 표현을 위한 질감지각 감성 평가 (An Evaluation of Human Sensibility on Perceived Texture for Real Haptic Representation)

김 승 찬 [†] 경 기 옥 ^{**} 손 진 훈 ^{***} 권 동 수 ^{****}
(Seung-Chan Kim) (Ki-Uk Kyung) (Jin-Hun Sohn) (Dong-Soo Kwon)

요 약 본 논문에서는 질감제시장치의 주파수와 진폭의 변화를 이용하여 실시한 예비 실험과 본 실험으로 이루어진 감성평가의 실험에 대해 서술한다. 먼저 예비 실험은 관련 형용사 수집, 적합성 평가, 유사성 평가의 세 단계로 구성되어 있으며, 질감 인식과 관련된 유효한 형용사들을 찾는 데 목적을 둔다. 예비 실험의 첫 단계인 수집 단계에서 33개의 질감인식과 관련된 형용사를 얻을 수 있었으며, 이들은 형용사의 적합성 평가와 유사성 평가를 통해 최종적인 유효한 10개의 질감 요소로 정리되었다. 이렇게 예비실험 결과 얻어진 10개의 형용사는 본 실험에서의 기초 감각을 기술하는 중요한 요소로서 사용이 된다. 본 실험에서는 10개의 감각의 요소를 규격을 갖춘 7종류의 사포와 질감제시장치의 일정 기준에 의해 선정된 15개의 주파수와 진폭의 조합으로 평가가 된다. 실험 결과 사람에게 인지되는 추상적인 거칠기의 감각요소는 표면의 공간정보(spatial information)에 의해 결정되는 울퉁불퉁함(ruggedness)과 표면의 공간정보 뿐 아니라 시간정보(spatio-temporal information)에 의해 결정되는 까끌까끌함(prickliness)의 두 감각의 요소로 구성되어 있음을 확인할 수 있었다. 또한 개발된 질감제시 장치의 정량적인 제어를 통해 두 가지 감각의 요소를 다양하게 유도시킬 수 있음을 확인하였다.

키워드 : 질감제시장치, 마우스, 진동자극, 거칠기, 인터페이스

Abstract This paper describes an experiment on the evaluation of human sensibility by monitoring responses to changes in the frequency and amplitude of a tactile display system. Preliminary tasks were performed to obtain effective adjectives concerning texture perception. The number of collected adjectives was originally 33. This number of adjectives was reduced to 14 by a suitability survey that asked whether an adjective is suitable for expressing a texture feeling. Finally, after performing a semantic similarity evaluation, the number of adjectives was further reduced to ten and these ten were used in the main experiment. In the main experiment, selected sandpaper types and 15 selected combinations of frequencies and amplitudes of a tactile display were utilized to quantitatively evaluate the ten adjectives using a bipolar seven-point scale. The data show that a relationship exists between the independent variables(frequency, amplitude, and grit size) and the dependent variable(perceived texture). That is, the change of frequency and amplitude is directly related to perceived roughness or essential elements of human tactile sensitivity found in the preliminary experiment.

Key words : texture, tactile display, mouse, vibrotactile, roughness, virtual reality, human computer interface

1. 서론

가상현실 또는 원격제어 환경의 작업의 효율을 높이기 위하여 촉감을 전달하기 위한 연구가 오랫동안 수행되어왔으며, 이와 함께 질감을 능동적으로 전달하기 위한 질감 제시장치들이 제안되고 개발되어왔다. 그러나 현재의 질감 제시장치들은 단순한 강약 변화의 자극을 가하는 수준에 머물고 있는 형편으로, 사용자에게 보다 사실적인 질감을 전달하기 위해서는 사람이 촉감을 느

[†] 비 회 원 : 한국과학기술원 기계공학과 연구원
kimsc@robot.kaist.ac.kr
^{**} 비 회 원 : 전자통신연구원(ETRI) 디지털 홈 연구단 차세대 PC그룹 선임연구원
kyungku@etri.re.kr
^{***} 비 회 원 : 충남대학교 심리학과/뇌과학연구소 교수
jhsohn@cnu.ac.kr
^{****} 정 회 원 : 한국과학기술원 기계공학과 교수
kwonds@kaist.ac.kr
논문접수 : 2006년 7월 21일
심사완료 : 2007년 7월 3일

끼는 메커니즘에 관한 생리학적, 정신 물리학적 연구를 요구하고 있다. Weber가 사람의 촉각의 민감도(human tactile sensitivity)[15]에 관한 연구를 시작한 이래로 지각되는 재질(perceived texture)과 자극의 물리적 양에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. Katz는 표면질감의 인식에 진동자극이 필요하다는 것을 정량적으로 질감과 관련된 연구를 수행했다[9]. Lederman과 Taylor는 홈이 있는(grooved) 표면에서의 지각되는 거칠기를 측정하는 방법을 연구하였다[14]. Lederman 등은 촉각 인식(tactual perception)에서의 진동의 기능에 큰 관심을 두고, Katz의 기존 이론을 정신물리학적 근거를 바탕으로 다시 한 번 증명한 바 있다[13]. 최근에는 이중 이론(duplex theory)[6,8,9]에 근거를 바탕으로 한 지각되는 거칠기와 진동접촉(vibrotaction)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 Cascio등이 시간적인 신호(temporal cue)가 거칠기의 촉각 인식(tactile perception)에 큰 영향을 끼친다는 사실을 신경과학적(neuroscientific)인 관점에서 연구를 수행한 바 있으며[2], 진동 자극이 표면의 패턴인식을 돕는다는 사실이 Kyung 등의 연구에 의해 발견되었다[12]. 이러한 최근의 관련 연구의 동향에 따라, 질감 제시 장치 시스템(tactile display system)의 진동자극의 주파수와 진폭의 변화가 질감 인식에 어떻게 영향을 미치는지를 평가하는데 목적을 두고 정량적인 수치 자극이 가능한 68의 핀 배열과 압전 바이모프(piezoelectric bimorph)로 구성된 질감 제시 장치 유닛(tactile display unit)을 개발하였다[11,12]. 개발된 장치는 각각의 핀에 대해 0-500Hz의 주파수와 2mm까지의 진폭이 μm 단위로 정량적 구현이 가능한 장점이 있으며, 이를 활용하여 주어진 범위 내의 주파수와 진폭의 다양한 조합을 만들고 그에 따라 지각되는 질감에 대한 감성평가를 수행하였다. 실험의 첫 단계인 예비실험은 사포와 질감 제시 장치(tactile display)를 사용하여 적절한 형용사를 얻고 그들 중 유효한 것들을 적절한 질차를 거쳐 선별하는데 목적을 두고 실시되었으며, 두 번째 단계인 본 실험은 선별된 형용사들을 바탕으로 정량적인 감성의 변화가 물리적으로 가하는 자극과 관련하여 어떻게 얻어질 수 있는지에 중점을 두고 있다.

2. 예비실험

사람의 촉감에 의해 유발되는 직물의 주관적 감성을 객관화/정량화하기 위해 의미미분에 근거한 심리척도가 개발되어, 이 척도에 근거하여 대상 재질이 변별된 바 있다[17]. 또한 피부감각에 대한 심리적/주관적 반응 측정을 위한 연구[18]에서는, 형용사 사전에서 피부 감각 및 감성과 관련된 형용사들을 선별한 후, 피험자들로 하

여 이들 형용사간의 유사성 및 의미미분 평정하도록 하여 군집 분석과 다차원 척도 분석을 위한 자료로서 활용하였다. 즉, 이와 같은 감성평가 방법은 주관적인 감각을 정량화하는데 있어 유용하여 본 연구에서도 질감 지각과 관련된 요소를 형용사의 형태로 얻기 위해 감성평가의 형태의 예비실험을 수행하였다. 이 단계는 다음의 세부 3단계를 포함한다; 1) 사포와 질감제시장치(tactile display)를 사용한 피험자의 응답, 웹기반의 설문 시스템을 사용한 응답, 그리고 사전을 통한 어휘 추가의 방식으로 형용사를 수집하고, 2) 수집된 형용사의 적합성을 판단 후에 3) 최종적으로 유사성 평가를 통해 유효한 독립적인 의미의 형용사를 얻어내는 과정

2.1 실험방법

2.1.1 형용사 수집(Adjective Collection)

사포를 사용한 실험에서는 피험자들은 그들의 느낌을 사포를 능동적으로 접촉(active touch) 한 후에 형용사의 형태로 자유롭게 말하게 된다. 거칠다, 오돌토돌한, 울퉁불퉁한, 울룩불룩한, 부드럽다의 5개를 얻을 수 있었고, 같은 방법으로 질감제시장치를 이용한 실험에서는 거칠다, 오돌토돌한, 울퉁불퉁한, 떨린다, 뾰족하다는 5개 형용사를 얻을 수 있었다. 부분적으로 결과를 종합하면 형용사 수집의 1단계 실험에서 거칠다, 오돌토돌한, 울퉁불퉁한, 울룩불룩한, 매끄러운, 뾰족한의 6개의 형용사를 얻게 되었다. 본 실험에서 필요한 더 많은 감각의 요소를 찾기 위해 웹 기반의 설문 시스템을 개발하여 20~38의 나이 분포를 갖는 평균연령 25세의 분포를 갖는 세 그룹의 15명의 피실험자들(5명의 여성, 10명의 남성)로 부터 형용사를 수집하는 과정을 수행했다. 제시된 웹페이지에서는 3개의 다른 질감과 관련된 사진을 제시하며 피실험자들은 자유연상에 의해 사진으로 부터 얻을 수 있는 느낌을 형용사로 답을 하게 된다. 이 과정에서 25개의 형용사를 얻을 수 있었으며, 차가움, 울룩불룩한, 끈적끈적한, 부드러운, 팽팽한, 안전한, 딱딱한, 가려운 등이 포함되어 있다. 마지막으로 사전을 이용하여 단위면적당의 집적도를 표현하기에 적합한 형용사를 첨가하였다. 이 과정은 집적도의 정도가 재질의 느낌을 지각하는데 직접적으로 연관되어있다는 이전의 연구결과에 근거한다[16]. 이와 같은 세 단계의 수집을 통해 총 33개의 형용사가 확보되었다.

2.1.2 형용사 적합성 평가(Suitability Test)

수집된 형용사 33개 중에는 촉각 지각(tactile sensation)의 기초적인 느낌을 묘사하기에 부적절한 어휘들이 다수 포함되는데 이는 피험자들이 실험의 목적을 모르기 때문에 발생한 현상이다. 평정자는 자극의 속성이나 강도의 변화로 인해 나타나는 일차적인 감각의 질이나 상태를 기술하는 어휘로 물리적으로 조작이나 측정이

가능하다고 판단되는 특징을 기술하는 형용사인 감각형용사로 명백하게 포함이 되지 않는 안전한, 가려운과 같은 형용사를 본 실험을 위한 형용사의 목록에서 제거하였다. 또한 온도의 감각과 점성(viscosity)과 관계된 따뜻한, 끈끈한 등의 감각은 1차적인 감각형용사에는 포함이 되나 실험의 목적에 맞지 않는 어휘이므로 제거하였다. 이 단계를 거치면서 33개의 형용사는 18개로 줄었으나, 보다 정확하고 신뢰성 있는 형용사를 확보하기 위해 23~35세의 분포를 갖는 평균나이 26세의 피험자(4명의 여성과 7명의 남성)로 하여 의미 미분(Semantic differential method)에 의한 리커트 스케일의 7점 척도(Likert scale-based questionnaire; 7-point bipolar rating scale)를 사용하여 질감표현에 적합한 형용사를 선택하는 설문조사를 실시하였다. 응답결과를 바탕으로 평균값이 4 미만인 되는 형용사를 제거하여, 14개의 정리된 형용사를 얻을 수 있었다.

2.1.3 유사성 평정(Semantic Similarity Evaluation)

유사성 평정과정은 중복성을 갖는 어휘를 제거하기 위해 수행된다. 14개의 형용사들을 가능한 모든 쌍의 조합으로 묶고 형용사들 사이의 유사성 정도를 7점 척도에 평정하도록 하였다. 감각형용사 91(14P2)개의 쌍으로 묶였으며 형용사 쌍 안에서의 제시순서 효과를 역균형(counterbalancing)하기 위해 각 쌍들을 이루는 두 형용사의 순서를 임의로 바꾸었다. 이 과정을 통해 최종적으로 본 실험에서 사용될 10개의 형용사가 선정할 수 있었다; 울퉁불퉁하다(rugged), 울퉁불퉁하다(bumpy), 가깝하다(prickly), 오돌토돌(lumpy), 거칠다(rough), 매끄럽다(smooth), 뾰족하다(acute), 듬성듬성하다(tender), 부드럽다(sparse), 뽕뽕하다(dense).

3. 본 실험 I

Hollins등은 텍스처 기반의 표면의 tactile이 지각공간(perceptual space)과 어떻게 연관이 있는지 연구하였다 [7]. 거칠기-부드러움(Roughness-smoothness)와 단단함과 부드러움(hardness-softness)이 재질 인식에서 유효한 차원으로 발견이 되었다. 본 연구는 재질 인식의 여러 차원 중 거칠기와 관련된 촉감의 차원에 대한 연장선상의 연구로 볼 수 있을 것이다. 본 실험I의 목적은 피험자가 다른 Grit Size의 사포에 능동적인 접촉(active touch)을 하였을 때 인지되는 질감의 변화를 분석하는 데 있다.

3.1 실험방법

3.1.1 피실험자

피실험자는(4명의 여성과 7명의 남성) 23~35세의 분포를 갖고 있는 평균 나이 26세의 사람들로 구성되어 있으며, 모두 오른손잡이이고, 피부 감각에 문제점이 없

어 실험에 적합한 상태이다.

3.1.2 장치 및 자극의 방법

일반적으로 연마제(abrasive)의 평균 크기는 그리트(grit)의 크기로 나타내며, 사포를 포함한 그리트 특성을 갖는 물질(grit material)에 있어 'grit'은 단위 길이당 연마용 입자의 갯수를 의미한다. 즉 grit 숫자(크기)가 작아질수록 연마를 위한 입자의 크기는 커지게 되고, 반대로 grit 숫자(크기)가 커지면 연마제 입자의 평균크기는 작아지게 된다. 그리고 연마제의 크기의 범위는 보통 40(아주 거침) - 400(매우 고옴)의 영역에 분포하고 있다. 사포의 연마제의 크기와 그에 따른 등급의 관계를 정리하면 다음과 같다.

표 1 사포의 연마제 크기(grit size)와 등급

연마제 크기(Grit Size)	등급
40-60	거침(Coarse)
80-100	중간 거침(Medium Coarse)
120-150	보통(Medium)
180-220	고옴(Fine)
240 이상	매우 고옴(Very fine)

베버 분수(Weber Fraction)[15]에 근거하여 본 실험에서 사용하게 될 사포는 연마제 입자 크기의 로그값이 선형적인 분포를 이루도록 하는 다음과 같은 7개로 선택되었다; 24, 32, 60, 100, 220, 600, 2000. 각각의 사포 시편은 촉감 제시 장치 유닛(tactile display unit)의 접촉면적과 동일한 11mm×9mm의 크기를 갖고 있다.

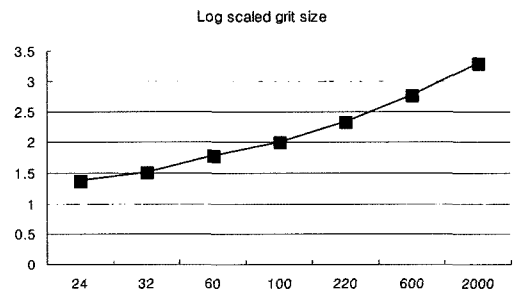


그림 1 로그 스케일 된 연마제 크기(Log scaled grit size)

3.1.3 실험의 과정

7종류의 사포시편은 피험자에게 임의로 4번씩 주어지며 따라서 각 피험자들은 28(=4×7)개의 설문지에 답을 하는 형식으로 본 실험이 진행된다. 피험자들은 능동적인 접촉(active touch)의 경우에는 시편을 문지르도록, 수동적인 접촉(passive touch)에서는 시편에 검지 손가락을 올려놓도록 유도된다. 또한 각 피험자 들은 사포시편으로부터 자극을 느끼는 6~7초간의 시간을 포함하여 10초 이내 답을 하게 된다.

3.2 결과 및 토의

표 2는 사포의 Grit Size가 24에서 2000까지 변할 때의 능동적인 접촉(active touch) 조건 하의 응답에 대한 평균값과 표준편차를 보여주고 있다.

표 2-1 능동적 접촉(active touch) 일 때의 응답 (연마제 크기(grit size): 24, 32, 60, 100)

형용사	Grit 24		Grit 32		Grit 60		Grit 100	
	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
울퉁불퉁	6.57	0.62	6	1.65	3.57	1.55	2.79	1.78
울룩불룩	4.07	1.58	4.21	2.01	2.93	1.44	2.46	1.65
까끌까끌	5.64	1.04	5.57	1.29	6.29	0.70	6.36	0.61
오돌토돌	4.86	1.12	4.86	1.51	4.14	1.51	3.07	1.58
거칠다	6.64	0.48	6.5	0.73	6.50	0.82	6.14	0.91
매끄럽다	1.00	0.00	1.00	0.00	1.14	0.35	1.14	0.35
빠속하다	3.86	1.41	3.71	1.28	1.86	0.83	1.50	0.76
듬성듬성	4.21	1.47	3.43	1.59	1.85	1.51	1.31	0.61
부드럽다	1.00	0.00	1.00	0.00	1.07	0.26	1.07	0.26
뽁뽁하다	3.08	2.20	3.00	2.04	3.71	1.91	3.71	1.94

표 2-2. 능동적 접촉(active touch) 일 때의 응답 (연마제 크기(grit size): 220, 600, 2000)

형용사	Grit 220		Grit 600		Grit 2000	
	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
울퉁불퉁	1.57	1.12	1.64	1.54	1.00	0.00
울룩불룩	1.93	1.39	1.36	0.81	1.00	0.00
까끌까끌	5.07	0.59	3.07	2.02	1.50	1.05
오돌토돌	2.43	1.50	1.36	0.61	1.00	0.00
거칠다	5.07	1.22	2.93	1.91	1.29	0.45
매끄럽다	1.50	0.63	4.14	1.6	6.21	0.77
빠속하다	1.50	0.65	1.54	1.34	1.08	0.28
듬성듬성	1.15	0.36	1.54	1.34	1.17	0.55
부드럽다	1.50	0.73	4.71	1.79	6.08	0.83
뽁뽁하다	3.00	1.88	2.43	1.84	1.00	0.00

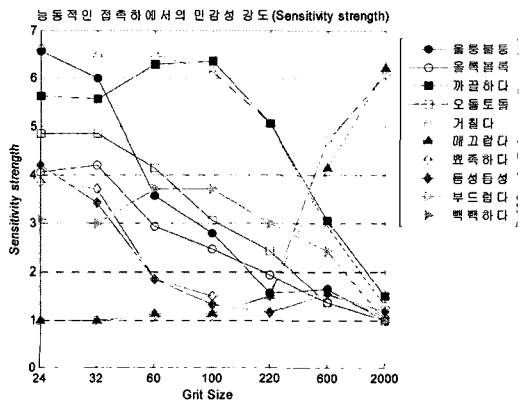


그림 2 능동적 접촉(active touch) 조건에서 grit size의 변화에 따른 민감성 강도

그림 2는 능동적 접촉(active touch)하에서 사포의 연마제 크기(Grit Size)가 증가함에 따라 발생하는 민감성 강도(sensitivity strength)의 변화 경향을 보여준다.

그림 2의 관찰로부터 표면의 입자 크기의 변화와 민감성 강도(sensitivity strength)와의 몇 가지 관계를 찾아낼 수 있었다.

- 표면 입자 크기가 증가할수록 사람은 거칠기가 덜 거칠어진다고 느낀다.
 - 표면 입자 크기가 증가할수록 사포의 표면이 부드러워지고 매끄러워진다고 느낀다.
 - 사포의 표면의 입자들의 뽁뽁함은 표면 입자 크기가 커질수록 더 뽁뽁하다고 느낀다.
- 위의 세 가지 성질은 직관적으로 이해할 수 있는 명백한 사실이다. 그렇지만 여기서 발견할 수 있는 흥미로운 사실 몇 가지를 더 살펴보면 다음과 같다.

• 까끌까끌한 정도는 24번이 아닌 100번 정도의 사포에서 가장 활성화 되는 감각 요소이다. 즉 이 연마제 크기 사포의 입자 크기가 사람이 까끌까끌하게 느끼는 감각을 가장 잘 자극한다고 할 수 있으며, 까끌까끌하게 느끼는 감각은 피부와 표면사이의 스틱 슬립(stick slip)현상과 연관이 깊다는 점을 생각해 볼 때, 이 particle의 크기가 피부와 표면 사이의 스틱 슬립을 잘 일으킨다고 생각할 수 있다. 참고로 손가락을 하나의 빔 스프링(beam spring)으로 고려했을 때, 그 손가락이 일반적인 표면 위를 미끄러질 때의 동적 특성(sliding dynamics of the finger)은 스틱 슬립 현상 중 무질서 움직임(chaotic motion)[1]에 근거한 아래 그림 3과 같은 형태로 모델링 될 수 있다.

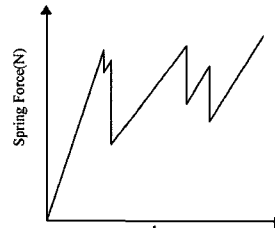


그림 3 Chaotic motion에 근거한 미끄러짐 시의 동적특성

“까끌까끌”과 연마제 크기의 로그 값(log grit)사이의 선형 회귀(linear regression)를 연마제 크기가 100 번 이상의 경우에 맞추어 수행을 하면 높은 상관관계(correlation)를 갖는 값을 얻을 수 있었는데, 이를 통해 까끌까끌한 정도는 특정 영역에서 자극의 입자의 크기와 관계가 있음을 생각해 볼 수 있다. 이는 본 실험 II에서 까끌까끌한 정도와 자극의 주파수와의 관계의 고찰에서 다시 한 번 논의된다.

- 사람에게 아무런 기준을 제시하지 않았을 때, 연마제의 크기가 100번 정도인 사포를 충분히 거칠다고 판단하는 것을 알 수 있다. 즉, 연마제 크기의 증가로 사포가 연속적으로 거칠기를 구현한다는 전제하에, 사람은 실제 일상생활에서 100번 정도의 사포의 거칠기를 가지는 물체로부터 가장 거친 표면으로 지각한다고 판단할 수 있다.
- 거칠다는 지각에는 100번 이상의 사포에서는 까끌까끌하다는 감각이 가장 우세하게 작용하지만, 100번 이하의 사포에서는 표면의 울퉁불퉁한 정도가 거칠기 지각에 가장 우세한 감각으로 작용을 한다. 그리고 표면 입자의 크기가 작아지게 되어 연마제의 크기가 증가하면 매끄럽다(부드럽다)의 반응도 매우 민감하게 증가를 한다. 이 사실은 Katz와 Hollins의 이중이론(duplex theory)에 의해 설명이 가능하다. 그들은 입자의 크기에 따라 거칠기를 지각하는 정신물리학적 채널이 달라진다는 사실을 설명한 바 있다[6,8,9]. 사포를 이용한 본 실험에서 이와 같은 Katz와 Hollins의 이론을 확인할 수 있었다.

표 3-1 수동 접촉(passive touch) 일 때의 응답
(연마제 크기(grit size): 24, 32, 60, 100)

형용사	Grit size 24		Grit size 32		Grit size 60		Grit size 100	
	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
울퉁불퉁	6.92	0.00	6.50	0.82	4.50	0.75	3.17	1.05
울룩불룩	6.25	0.82	5.75	0.82	4.00	1.17	2.50	0.55
까끌까끌	5.17	1.17	5.25	1.33	4.75	1.03	3.42	1.60
오돌토돌	6.33	0.55	6.00	0.52	4.75	0.75	2.92	1.10
거칠다	5.42	1.63	5.25	2.07	4.83	0.75	3.50	1.21
매끄럽다	1.00	0.00	1.17	0.41	1.25	0.41	2.50	1.76
뾰족하다	4.08	1.72	4.00	1.47	2.50	1.38	1.50	1.21
듬성듬성	4.92	1.1	4.67	1.37	2.83	1.03	2.08	0.82
부드럽다	1.00	0.00	1.17	0.52	1.42	0.84	2.75	1.83
뽁뽁하다	1.75	0.52	1.83	0.75	3.25	0.84	3.42	1.79

표 3-2 수동 접촉(passive touch) 일 때의 응답
(연마제 크기(grit size): 220, 600, 2000)

형용사	Grit size 220		Grit size 600		Grit size 2000	
	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
울퉁불퉁	1.67	0.75	1.17	0.41	1.00	0.00
울룩불룩	1.50	0.82	1.00	0.00	1.00	0.00
까끌까끌	2.83	1.47	1.33	0.41	1.17	0.41
오돌토돌	1.42	1.6	1.08	0.41	1.00	0
거칠다	2.92	1.33	1.42	0.84	1.17	0.41
매끄럽다	3.25	2.56	5.00	1.83	5.33	1.37
뾰족하다	1.08	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
듬성듬성	1.42	1.21	1.00	0.00	1.00	0.00
부드럽다	3.58	2.25	5.17	1.17	5.25	1.21
뽁뽁하다	4.08	1.75	3.00	1.38	3.33	1.83

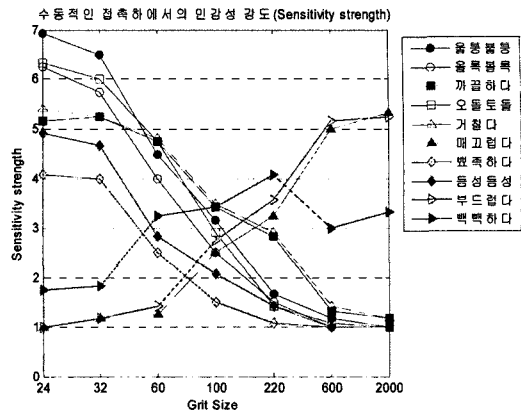


그림 4 수동 접촉(passive touch) 조건에서 연마제 크기의 변화에 따른 민감성 강도

표 3은 사포의 연마제의 크기가 24에서 2000까지 변할 때의 수동 접촉(passive touch) 조건 하의 응답에 대한 평균값과 표준편차를 보여주고 있다.

그림 4는 수동 접촉(passive touch)하에서 사포의 연마제의 크기가 증가함에 따라 발생하는 민감성 강도(sensitivity strength)의 변화 경향을 보여주고 있다.

그림 2와 4에서 연마제 크기의 변화에 따른 “울퉁불퉁”과 “까끌까끌”하의 경향을 비교해 볼 필요가 있다. 울퉁불퉁한 정도는 능동 접촉(active touch)와 수동 접촉(passive touch)에 대해 유사한 경향을 보이고 있다. 이는 두 경우 모두 선형 회귀(linear regression)를 수행하여 나온 “울퉁불퉁”과 연마제 크기의 로그값(log grit) 사이의 높은 상관관계(correlation) 값을 통해 확인할 수 있었다. 이를 통해 “울퉁불퉁”의 감각 요소는 표면의 입자 크기와 직접적인 연관이 있다는 결론을 얻을 수 있었다. 반면 “까끌까끌”의 감각 요소는 수동 접촉(passive touch)의 경우 능동 접촉(active touch)에서의 결과와 달리 활성화되는 정도가 떨어짐을 확인할 수 있다. 이는 사람이 표면의 접선(tangential) 방향으로 손가락을 문지를 때 작은 표면의 거칠기를 느끼는 현상을 입증하는 결과로 생각할 수 있다. 손가락의 표면이 표면의 접선 방향으로 문지르면서 움직일 때 받는 자극의 영향은 이미 많은 연구에서 입증되었다[5]. 이 결과는 거칠고 세밀한(coarse and fine) 표면의 거칠기를 느끼는데 사람의 체성 감각 시스템(somatosensory system)이 다른 촉각 채널(tactile channel)을 사용함을 의미하기도 한다[6,8,9].

4. 본 실험 II

표면의 질감을 지각하는데 있어서 자극의 주파수와 진폭이 지각되는 질감에 영향을 미친다는 사실은 오랫동안

동안 연구되어 왔다[6,8,13,16]. 실험 II에서는 설문 조사와 심리학적인 실험 계획법에 기초하여 실험방법의 신뢰성과 효율성을 높이도록 노력을 하였다. 이러한 접근법의 하나로 실험의 결과는 예비실험에서 최종 선정된 10개의 형용사를 토대로 측정되었다. 표면의 작은 패턴과 격자무늬(grating) 뿐 아니라 거칠기도 표면의 속성을 결정짓는 중요한 요소라는 전제 아래, 지각되는 거칠기가 질감제시 장치(tactile display)의 주파수와 진폭의 변화에 의해 어떻게 영향을 받는지에 대한 연구를 수행하였다. 질감제시장치를 활용하여 질감을 표현하려는 궁극적인 목표를 이루기 위한 기초적이면서도 중요한 실험이라는 데에서 본 실험 II의 의의를 찾을 수 있을 것이다.

4.1 실험방법

4.1.1 피실험자

피실험자는(4명의 여성과 7명의 남성) 23~35세의 분포를 갖고 있는 평균 나이 26세의 사람들로 구성되어 있으며, 모두 오른손 잡이이고, 피부 감각에 문제점이 없는 실험에 적합한 상태이다.

4.1.2 장치 및 자극의 방법

질감제시장치 유닛(Tactile display unit)은 68의 핀 배열과 수직 진동(vibrotactile) 자극을 위한 8개의 압전 바이모프(piezoelectric bimorph)로 구성되어 있다. (그림 5). 압전 바이모프는 1mm 간격으로 고정되어(clamped) 있으며 61의 핀 배열은 각각의 바이모프(bimorph)의 끝에 붙어 있다. 핀 간격은 1-2mm의 범위 내에서 조정이 가능하며 각각의 핀은 0.5 or 0.7 mm의 직경을 가지고 있다. 각각의 압전 바이모프는 저전압 입력전압(60V)의 미판에서 1mm의 수직 변위를 일으킬 수 있는 특징이 있다. 변위 대 입력 전압의 비는 저주파수대역에서는 27.36 μ m/V, 500Hz의 고주파수 대역에서는 11.22 μ m/V의 특성을 보이고 있으며 바이모프는 0.5N의 힘을 밀리세컨드 단위로 응답할 수 있다. 기존의 생체 역학(biomechanics)연구에서 사람 손가락(finger pad)의 임피던스가 0.08-0.25N/mm 범위에 있다는 것을 확인할 수 있다[3,10]. 따라서 압전 바이모프를 포함한 촉감 제시장치의 특성은 이러한 피부를 변형하는데 필요한 요건을 만족하고 있다. 이러한 내용을 토대로 촉감 시뮬레이터(tactile simulator)는 적절한 주파수 범위와 자극의 세기를 만족시키면서 수직 진동을 만들어 내는 데에 적합한 장치라는 결론을 내릴 수 있다. 추가적으로 액츄에이터는 표면을 느끼기 위해 자연스럽게 가하는 문지르는 행동으로 발생하는 힘에 의해 변형되지 않는다는 사실은 실험적으로 확인이 되었다. 그림 7은 본 실험 II에서 사용되었던 촉감 제시 장치 유닛을 보여주고 있다.

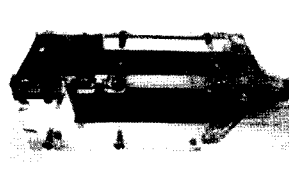


그림 5-1 촉감제시 장치 유닛의 옆면

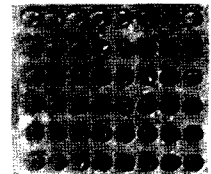


그림 5-2 촉감제시 장치 유닛의 윗면

실험 II를 하는 동안 48(=6 \times 8)개의 핀은 하나의 결합체처럼 동기화 되어 진동을 일으킨다. 핀의 이러한 움직임은 피험자의 피부에 정량적인 자극을 가하게 된다.

4.1.3 실험의 과정

실험이 시작되면 피험자는 촉감 제시 장치가 놓여있는 테이블 앞에 편히 앉는다. 피험자가 촉감 제시 장치의 핀 어레이(pin array)에 짐게 손가락을 얹은 채로 가벼운 정도의 압력(gentle pressure)을 가하도록 안내한다. 이 과정을 수차례 반복하여 피험자가 가장 편한 자세를 취할 수 있도록 한다. 촉감 제시 장치는 다섯 종류의 주파수와(2Hz, 5Hz, 25Hz, 100Hz, 250Hz)의 세 종류의 진폭(20 μ m, 50 μ m, 200 μ m)을 갖는 15가지 조합의 자극을 생성하도록 프로그램되었고, 같은 자극이 4번 반복될 수 있도록 총 60 번의 자극이 무선화되어 피험자에게 전달되었다. 하나의 자극에 대해서 피험자는 예비실험에서 최종 선정된 10개의 형용사에 대한 강도형태의 응답을 7점 척도에 7점을 적합함으로 하여 자극 하나당 7초의 자극시간을 포함하여 10초 이내에 답을 기록하도록 유도되었다.

4.2 결과 및 토의

그림 6에서는 7점 척도에 기록된 점수와 주파수에 관해, 그림 7에서는 7점 척도에 기록된 점수와 진폭에 관한 그래프를 나타내고 있다.

그림 6은 일정한 진폭의 자극에 대해서 주파수가 변할 때 형용사 평가 결과를 보여준다. 10가지의 감각 요소 중 거칠다, 부드럽다, 매끄럽다, 까끌까끌하다, 듬성 듬성하다, 울퉁불퉁하다는 6개의 요소가 주목할 만한 결과를 가진다.

• 자극의 주파수가 증가할수록 사람들은 표면을 더 거칠게 그리고 더 까끌까끌하게 느낀다. 까끌까끌 하다는 감각요소는 주파수의 로그값에 상당히 높은 상관관계(correlation) 값을 갖는 통계적 분석의 결과로부터 확인 가능하다. 이러한 현상은 진폭이 50 μ m이상일 때 더 분명하게 나타난다. 3.2 절에서 까끌까끌한 감각 요소는 스틱 슬립(stick slip) 현상과 연관되어 있어 물체의 특성을 찾아내기 위한 손가락의 움직임(exploration movement)이 필요하다는 점을 고찰한 바 있다. 그런데 이번 실험의 결과로부터 질감제시 장

표 4-1 2Hz 주파수에 대한 응답

주파수	2Hz					
	20 μ m		50 μ m		200 μ m	
형용사	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
울퉁불퉁	1.17	0.55	1.88	1.05	4.38	1.44
울룩불룩	1.17	0.55	2.25	1.35	3.85	0.66
까끌까끌	1.25	0.43	2.00	1.32	3.62	1.78
오돌토돌	1.17	0.37	2.50	1.50	4.08	1.44
거칠다	1.25	0.60	2.13	1.49	4.54	1.34
매끄럽다	4.67	2.46	3.44	2.15	1.00	0.00
뾰족하다	1.00	0.00	1.88	1.80	2.69	1.77
듬성듬성	1.75	1.69	3.81	2.27	4.92	0.92
부드럽다	3.83	2.19	3.13	2.06	1.08	0.27
뾰뾰하다	1.00	0.00	1.07	0.25	1.69	0.82

표 4-2 5Hz 주파수에 대한 응답

주파수	5Hz					
	20 μ m		50 μ m		200 μ m	
형용사	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
울퉁불퉁	1.00	0.00	1.79	1.01	4.13	1.59
울룩불룩	1.18	0.57	1.93	1.16	3.33	1.30
까끌까끌	1.00	0.00	2.43	1.40	4.40	1.50
오돌토돌	1.08	0.28	2.43	1.59	4.80	1.17
거칠다	1.09	0.29	2.57	1.64	4.53	1.31
매끄럽다	4.50	2.29	2.86	2.03	1.13	0.50
뾰족하다	1.00	0.00	1.71	1.58	2.20	1.22
듬성듬성	1.55	1.72	2.29	1.79	2.73	1.61
부드럽다	3.92	2.25	3.00	2.07	1.27	0.77
뾰뾰하다	1.00	0.00	2.00	1.69	2.80	1.60

표 4-3 25Hz 주파수에 대한 응답

주파수	25Hz					
	20 μ m		50 μ m		200 μ m	
형용사	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
울퉁불퉁	1.25	0.60	1.92	0.92	4.64	1.39
울룩불룩	1.23	0.58	1.77	0.89	3.57	0.98
까끌까끌	2.00	1.71	3.69	2.01	5.93	1.16
오돌토돌	1.85	1.29	3.23	1.72	5.43	1.24
거칠다	1.46	0.75	3.23	1.97	6.14	1.25
매끄럽다	4.00	2.48	3.31	2.09	1.14	0.35
뾰족하다	1.15	0.36	1.54	0.75	3.93	2.05
듬성듬성	1.62	1.64	1.85	1.35	1.64	0.81
부드럽다	3.54	2.24	3.23	1.72	1.36	1.04
뾰뾰하다	2.00	1.76	2.15	1.41	5.00	1.69

표 4-4 100Hz 주파수에 대한 응답

주파수	100Hz					
	20 μ m		50 μ m		200 μ m	
형용사	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
울퉁불퉁	1.50	1.35	1.36	0.61	4.57	1.88
울룩불룩	1.50	1.24	1.79	0.86	3.57	1.29
까끌까끌	1.86	1.41	3.21	2.21	6.29	0.80
오돌토돌	1.79	1.78	2.93	2.28	5.29	1.48
거칠다	1.86	1.41	3.57	2.38	6.21	1.08
매끄럽다	4.00	2.39	3.86	2.17	1.29	0.80
뾰족하다	1.07	0.26	1.64	1.29	4.14	2.10
듬성듬성	1.36	1.04	1.21	0.56	1.07	0.26
부드럽다	3.79	2.04	3.57	2.09	1.79	1.15
뾰뾰하다	1.92	1.69	3.50	2.29	4.93	2.19

표 4-5 250Hz 주파수에 대한 응답

주파수	250Hz					
	20 μ m		50 μ m		200 μ m	
형용사	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
울퉁불퉁	1.75	0.83	1.58	0.64	4.75	1.23
울룩불룩	1.83	1.21	1.58	0.76	3.83	1.28
까끌까끌	3.42	1.8	4.25	1.79	6.67	0.47
오돌토돌	3.42	1.89	4.17	1.57	6.83	0.37
거칠다	2.75	2.01	4.42	2.47	6.75	0.6
매끄럽다	2.67	1.89	2.75	1.88	1.17	0.37
뾰족하다	1.58	0.86	1.42	0.86	3.92	1.98
듬성듬성	1.33	0.75	1.08	0.28	1.33	0.62
부드럽다	2.6	2.01	2.64	1.72	1.08	0.28
뾰뾰하다	4.25	2.17	4.33	2.05	6.73	0.45

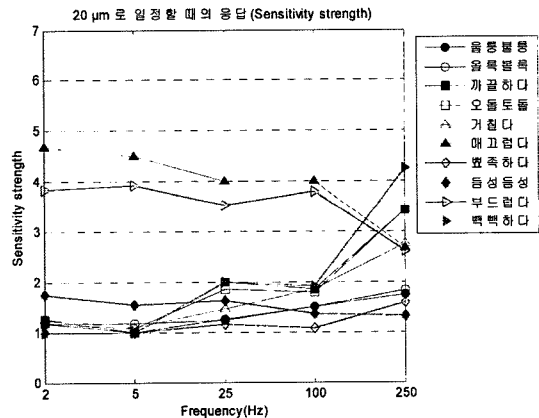


그림 6-1 진폭이 20 μ m으로 일정할 때의 응답

치의 주파수의 조절로 스틱 슬립현상을 일으키는데 필요한 손끝의 움직임에 대체할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 까끌까끌한 감각이 주파수와 밀접한 관계를 갖는 점은 일반적인 피부조직(biological tissue)이 자극의 시간과 경로에 의존적인(time- and history dependent) 응력-변형률(stress-strain)의 관

계를 갖는 점탄성(viscoelastic) 물체의 특성을 갖고 있다는 연구를 통해 고찰될 수 있다[4].

• 자극의 주파수가 증가할수록 사람들은 표면의 밀도가 더 높아진다고 느낀다. 이 사실은 기존의 연구 결과에서도 확인한 바 있다[16]. 이번 실험을 통해 같은 사

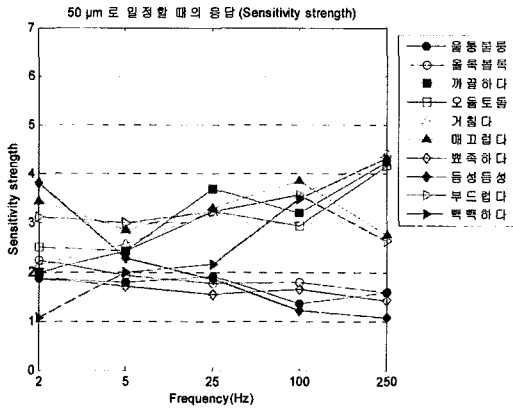


그림 6-2 진폭이 50 μ m으로 일정할 때의 응답

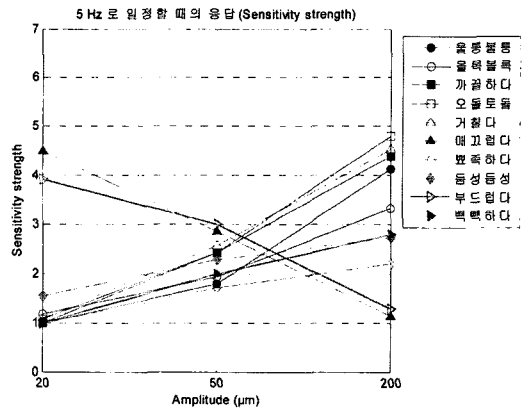


그림 7-2 주파수가 5Hz로 일정할 때의 응답

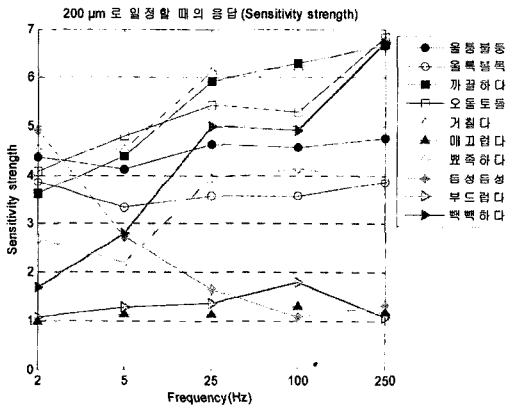


그림 6-3 진폭이 200 μ m으로 일정할 때의 응답

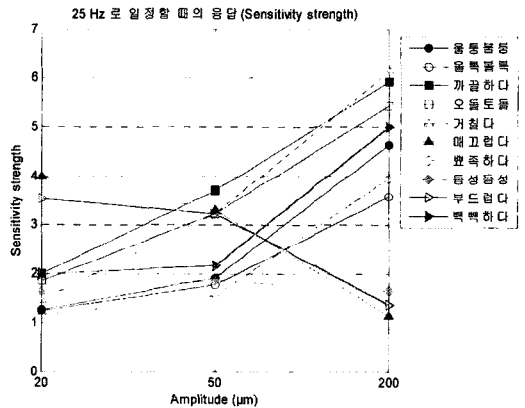


그림 7-3 주파수가 25Hz로 일정할 때의 응답

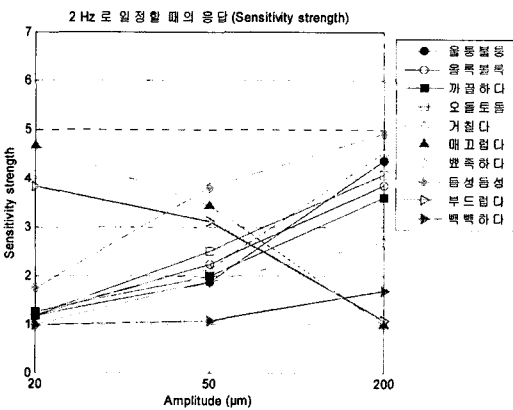


그림 7-1 주파수가 2Hz로 일정할 때의 응답

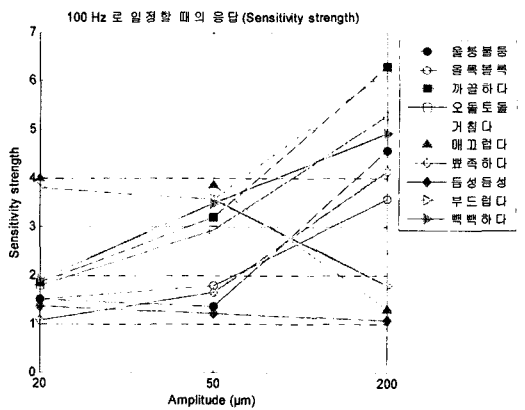


그림 7-4 주파수가 100Hz로 일정할 때의 응답

실을 재확인할 수 있게 되었다.

- 거칠다와 까끌까끌하다, 부드러우다와 매끄러움의 감각의 요소는 각각 매우 유사한 경향성을 보인다.
- 흥미로운 사실은 주파수가 변화하는 조건하에서 자극

의 진폭 즉 표면의 돌출이 높은 경우(200 μ m)에는 거칠다(까끌까끌하다)와 부드럽다(매끄럽다)가 상반된 속성을 나타내지 않으나 자극의 진폭(표면의 돌출)이 낮아질수록 두 형용사가 상반된 속성을 나타낸다는

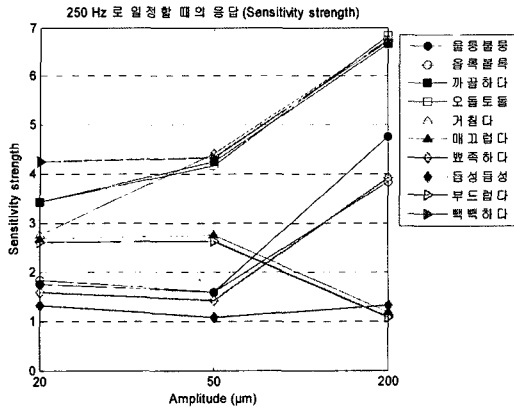


그림 7-5 주파수가 250Hz로 일정할 때의 응답

것이다. 이와 같은 사실은 사포의 표면이 고울 때(연마제 크기가 600, 2000일 때) 거칠기와 부드러움의 상반성이 명확하게 드러났던 3.2절의 결과에서도 발견할 수 있었다. Katz와 Hollins는 사람이 지각하는 거칠기는 표면의 입자의 크기에 영향을 받는다는 사실을 밝힌 바 있다[8,9]. 우리의 연구에서는 사람이 거칠기를 지각하는 중요한 구성 요소 중 하나인 부드러움의 느낌은 표면의 입자가 매우 작을 경우 아주 민감하게 반응함을 알 수 있다. 사람이 지각하는 표면의 울퉁불퉁한 정도는 주파수의 로그값과 0에 가까운(=0.065) 상관관계 값을 가지는 데 이를 통해 이 둘의 상관성이 거의 없음을 확인할 수 있다.

아래의 그림은 일정한 주파수의 자극에 대해서 진폭이 변할 때 형용사 평과 결과를 보여준다.

앞의 결과들로부터 다음과 같은 흥미로운 사실을 발견할 수 있었다.

- 사람은 주파수가 올라갈수록 표면의 밀도를 점점 더 높게 느낀다. 이를 통해 핀배열(pin array) 타입의 질감제시장치의 밀도보다 더 높은 밀도를 가상으로 재현해 낼 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.
- 자극의 진폭(표면의 돌출)이 증가 할수록 사람들이 지각하는 표면의 울퉁불퉁함은 증가한다. “울퉁불퉁함”과 “진폭” 사이의 선형 회귀(linear regression)의 결과는 0.98으로 상당히 높은 상관 관계성을 보인다.
- 자극의 진폭이(표면의 돌출)이 증가할수록 사람들이 지각하는 표면의 까끌까끌함은 증가한다. “까끌까끌함”과 “진폭” 사이의 선형 회귀의 결과는 “울퉁불퉁함”의 그것보다는 작지만 까끌까끌함 역시 진폭에 영향을 받을 수 있다. 이는 3.2절에서처럼 까끌까끌하다는 감각 요소는 자극의 입자의 크기, 즉 진폭과 관계가 있음을 다시 한 번 입증하는 결과이다. 즉 까끌까끌함의 정도를 나타내는 감각요소는 자극의 주파수와

동시에 진폭에도 영향을 받는 복합적 감각요소임을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 능동적으로 진동자극을 구현할 수 있는 질감제시장치를 활용함에 있어 진동의 주요 요소인 주파수와 진폭의 변화가 사용자의 질감지각에 미치는 영향을 살펴보는 것을 목적으로 하였다. 이를 위하여 다음의 두 가지 연구를 수행하였다.

첫째, 거칠기를 유발하는 대표적인 시료인 사포를 이용하여 사포 표면의 형태가 거칠기와 관련된 감각의 요소에 어떻게 영향을 우세하게 미치고 있는지 확인하였으며, 두 번째로, 본 연구진에서 개발한 질감제시장치(tactile display)를 이용하여 생성한 진동 자극의 주파수와 진폭이 거칠기 지각에 미치는 영향을 파악하였다.

사포를 시편으로 사용한 연구 1의 결과, 거칠기를 지각하게 하는 요소 사이의 관계를 분석할 수 있었는데, 거칠기라는 감각은 공간 정보에 의해 결정되는 감각(ruggedness)과 공간정보 뿐 아니라 시간정보(spatio-temporal information)에 의해 결정되는 감각(prickliness)의 조합으로 결정됨을 확인할 수 있었다. 이들 주요 감각 요소간의 관계를 수식화하면 다음과 같다.

$$R = k_1 + k_2 \cdot S_1 + k_3 \cdot S_2$$

$$k_1 = -0.331, k_2 = 0.257, k_3 = 0.938$$

R = Roughness, S₁ = Ruggedness, S₂ = Prickliness

질감제시장치를 이용한 연구 2에서는 진동 자극의 주파수와 진폭이 울퉁불퉁한 감각과 까끌까끌한 감각에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 즉, 질감제시장치의 주파수와 진폭의 변화 역시 피험자들의 거칠기라는 형용사적 반응을 이끌어 낼 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구결과는 질감제시 장치를 활용하여 가상의 표면성질을 구현하는데 있어서 주파수와 진폭의 조합을 활용하여 표면의 무늬 뿐 아니라 거칠기 정도 등 직관적으로 구현하기 어려웠던 구체적인 표면의 질감을 구현하는데 중요한 방법론을 제시하는데 활용될 수 있을 것이다.

참고 문헌

[1] Persson, Bo NJ, 2000. Sliding Friction: Physical Principles and Applications, Springer.
 [2] Cascio, C.J. and Sathian, K., "Temporal Cues Contributes to Tactile perception of Roughness," The Journal of Neuroscience, Vol.21, No.14, pp. 5289-5296, 2001.
 [3] Diller, T., Schloerb, D. and Srinivasan, M.A., "Frequency response of Human Skin in vivo to

mechanical stimulation," RLE Technical Report No. 648. MIT, 2001.

[4] Fung, Y.C., 1993. Biomechanics : Mechanical Properties of Living Tissue, 2nd ed., Springer-Verlag, Newyork.

[5] Gamzu E., Ahissar E., "Importance of Temporal Cues for Tactile Spatial-Frequency Discrimination," The Journal of Neuroscience, September 15, 2001, 21(18):7416-7427.

[6] Hollins, M., Bensmaia, S.J., and Roy, E.A., "Vibrotactile and texture perception," Behavioral Brain Research, Vol.135, pp.51-56, 2002.

[7] Hollins, M., Faldowski, R., Rao, S., and Young, F., "Perceptual dimensions of tactile surface texture: a multidimensional scaling analysis," Perception and Psychophysics, vol. 54, pp.697-705, 1993.

[8] Hollins, M. and Risner, S.R., "Evidence for the duplex theory of tactile texture perception," Perception & Psychophysics, Vol.62(4), pp.695-705, 2000.

[9] Katz, D., The World of Touch, In: Krueger, L.E. (Trans.), Hillsdale, NJ, Erlbaum, 1989.

[10] Kyung, K.U., Ahn, M., Kwon, D.S., Srinivasan, M.A., "Perceptual and biomechanical frequency response of human skin: implication for design of tactile displays," Proceedings of World Haptics 2005, pp.96-101, 2005.

[11] Kyung, K.U., Choi, H.J., Kwon, D.S., Son S.W., "Interactive Mouse Systems Providing Haptic Feedback During the Exploration in Virtual Environment", LNCS, Vol.3280, pp.136-146, October, 2004.

[12] Kyung, K.U., Ahn, M., Kwon, D.S., Srinivasan, M.A., "A Compact Planar Distributed Tactile Display and Effects of Frequency on Texture Judgment," Advanced Robotics, Vol.20, No.5, June, 2006.

[13] Lederman, S.J., Loomis, J.M. and Williams, D.A., "The Role of Vibration in the Tactual Perception of Roughness," Perception & Psychophysics, Vol.30, pp.82-89, 1982.

[14] Lederman, S.J. and Taolor, M.M., "Fingertip force, surface geometry, and the perception of roughness by active touch," Perception & Psychophysics, Vol.12(5), pp.401-408, 1972.

[15] Weber, E.H., E.H. Weber on the Tactile Sense (2nd Edition), In: Ross, H.E. and Murray D.J., (Edit. and Trans.), Erlbaum(UK) Taylor & Francis, 1996.

[16] Yang, G.H., Kyung, K.U., Jeong, Y.J. and Kwon, D.S., "Novel Haptic Mouse System for Holistic Haptic Display and Potential of Vibrotactile Stimulation," Proceedings of IEEE IROS 2005, 2005.

[17] 서창원, 이임갑, 최상섭, 박현영, 문성실, 직물의 물리적 차원과 감성의 관계에 관한 연구, 한국표준과학연구원, 1997.

[18] 손진훈, "피부감각의 감성측정 기술 및 DB개발, Deve-

lopment of measurement technology and database for emotion and sensation caused by tactile stimulation," 과학기술부, 1998.



김 승 찬

2005년 연세대학교 기계공학부 졸업(학사). 2007년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 2007년~현재 한국과학기술원 기계공학과 박사과정. 관심분야는 햅틱스(Haptics), Human-Computer Interface



김 기 욱

1999년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(학사). 2001년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 2006년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(박사). 현재 전자통신연구원(ETRI) 디지털 홈 연구단 차세대 PC그룹 선임연구원으로 재직 중. 관심분

야는 햅틱스(Haptics), Human-Computer Interface, 의료용 시뮬레이터



손 진 훈

1988년 고려대학교 심리학과 실험심리학 박사. 1982년~1987년 효성카톨릭대학교 심리학과 조교수. 1986년~1988년 미국 UCLA 심리학과 연구교수. 1991년~1992년 미국 Miami 대학교 의대 신경외과 초빙교수. 2001년~2002년 미국 Cincinnati 대학교 아동병원 방사선과 객원교수. 2004년~2007년 현재 일본 규슈대학교 USI, COE 객원교수. 2005년 한국 감성과학회 회장. 1989년 3월~2007년 현재 충남대학교 심리학과 교수. 2006년 5월~2007년 현재 공공기술연구회(과학기술부 혁신본부) 이사. 관심분야는 생체계측을 통한 뇌과학, 인지과학, 감성과학 및 신경생리학



권 동 수

1980년 서울대학교 기계공학과 졸업(석사). 1982년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 1991년 Georgia Institute of Technology 기계공학과 졸업(박사). 1991년~1995년 Oak Ridge National Laboratory research staff. 1995년~현재 한국과학기술원 기계공학과 교수. 관심분야는 원격 조정 로봇 시스템, Human-robot haptic interface, 의료용 로봇, 강인 제어 등