

질감 제시 장치를 이용한 촉감 인지 특성 연구

Study of Human Tactile Sensing Characteristics Using Tactile Display System

손승우, 경기욱, 양기훈, 권동수*
(Seung-Woo Son, Ki-Uk Kyung, Gi-Hun Yang, and Dong-Soo Kwon)

Abstract : This paper describes three kinds of experiments and analysis of their results related to human tactile sensitivity using an integrated tactile display system. The device can provide vibration, normal pressure and lateral slip/stretch which are important physical quantities to sense texture. We have tried to find out the efficient method of stimulating, limitation of surface discrimination by kinesthetic force feedback and the effectiveness of the combination of kinesthetic force and tactile feedback. Seven kinds of different stimulating methods were carried out and they are single or combination of the kinesthetic force, normal static pressure, vibration, active/passive shear and moving wave. Both prototype specimen and stimulus using tactile display were provided to all examinees and they were allowed to answer the most similar sample. The experimental results show that static pressure is proper stimulus for the display of micro shape of the surface and vibrating stimulus is more effective for the display of fine surface. And the sensitivities of active touch and passive touch are compared. Since kinesthetic force feedback is appropriate to display shape and stiffness of an object, but roughness display has a limitation of resolution, the concurrent providing methods of kinesthetic and tactile feedback are applied to simulate physical properties during touching an object.

Keywords : tactile sensation, tactile display, kinesthetic force feedback, vibration, static pressure, shear

I. 서론

사람은 손가락이나 팔의 관절을 이용하여 물체를 만지면서 반력(kinesthetic force)을 느끼고, 표면의 피부 자극으로부터 질감(tactile force)을 인지하게 된다. 반력으로부터 물체의 굳기(stiffness)와 모양(shape)을 느낄 수 있고 질감으로부터 표면의 거칠기(roughness)와 미세 모양(micro-shape), 재질감(texture)을 구별할 수 있게 된다. 물체의 굵기나 모양에 따라 반력을 생성하는 기법은 기존의 촉감 구현 장치개발과 함께 많은 연구가 수행되어 왔다. 하지만 질감 제시 장치에 관한 연구는 아직 초보적인 수준으로, 장치 개발과 맞물려있는 질감을 효과적으로 구현하는 기법에 관한 연구 또한 아직 미비한 실정이다[1]. 최근 들어 질감인식에 대해서 분석하고 질감 구현장치에 적용하고자 한 연구가 시도되고 있다. Essick은 손가락으로 문지르면서 재질을 느낄 경우에 문지르는 방법과 재질의 성질이 미치는 영향에 관한 인지생리학적 연구를 수행하였으며[2], Shimoho 등은 특정 물체를 삽입하면 똑같은 형상을 구현할 수 있는 장치를 활용하여 핀간격과 모양이 촉감 인지에 미치는 영향을 연구하였다[3]. 또한 Asamura 등은 촉감을 인식하는 기계적 수용기(mechanoreceptor)의 특성을 활용하여 진동자극과 압력을 구분하여 자극하는 방법을 사용하였다[4]. Lederman은 능동터치와 수동 터치에 관한 연구를 수행하였다[1]. 그러나 언급된 연구들은 장치 개발의 한계로 인하여 매우 제한된 범위에서 연구가 수행되었다.

본 연구팀은 피부 감각에 관한 신경 전달 메커니즘에 관한 문헌연구를 통하여 질감의 요소를 분석하고 각 요소를 충분히 구현할 수 있는 질감 제시장치를 제안하였다[5]. 본 논문에서는 제안된 질감 제시장치를 활용하여 사람에게 촉감을 효과적으로 전달하기 위한 효과적인 자극 방법, 질감과 반력의 인식 한계 및 반력 구현과 질감 제시를 동시에 구현하였을 경우의 효과에 관하여 서술한다. 특히 본 연구에서는 실험을 실제 시편을 제작하여 인위적으로 구현된 촉감과 비교할 수 있게 하였으며, 실험 대상자에게 사전 경험과 학습을 배제 함으로써 순수하게 촉감에 의존할 수 있는 실험 환경을 갖추고자 하였다.

본 논문의 2장에서는 피부 감각 수용기의 특성에 관하여 서술하고 본 특성을 반영할 수 있는 통합 질감 제시 장치에 관하여 서술한다. 3장에서는 질감 제시 장치를 활용하여 자극 방법이 질감 인지에 미치는 영향에 관하여 서술하고, 4장에서는 반력(kinesthetic force)만을 이용할 경우의 질감 인지의 한계를 측정된 실험에 관하여 서술하며, 5장에서는 반력과 질감 제시를 동시에 구현할 경우 물체 표면의 인식 효과에 관한 실험 검증을 서술한다. 6장에서는 본 논문의 결론으로 향후 촉감 제시 장치가 갖추어야 할 조건에 관하여 서술하며 개발된 장치의 활용분야에 관하여 토의한다.

II. 피부감각의 수용기의 특성

질감 제시 장치의 개발 및 자극 방법에 관한 연구를위해서는 사람이 촉감을 받아들이는 방법에 관한 정신물리학적 연구(psychophysics of tactile perception)와 인지 생리학적 연구(cognitive physiology)가 필수적이다. 따라서 이번 장에서는 피부 감각 수용기의 특성에 관하여 알아보고 이러한 특성을 반영할 수 있는 통합 질감 제시 장치의 스펙을 소개한다.

Vallbo, Johanson 등은 손바닥이나 손가락과 같은 평활 피부(glabrous skin, 털이 없는 피부)의 해부학적 구조를 연구하면

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 3. 16., 채택확정 : 2004. 7. 2.

손승우, 경기욱, 양기훈, 권동수 : 한국과학기술원 기계공학과

(sons@robot.kaist.ac.kr/kyungku@robot.kaist.ac.kr/yanggh@robot.kaist.ac.kr/wonds@kaist.ac.kr)

※ 본 연구는 KIST(미래원천 산업의 Tangible Interface 기술 사업)와 정보통신부(2004-S-30, 스마트 햅틱인터페이스 디바이스)의 지원을 받아 수행되었음.

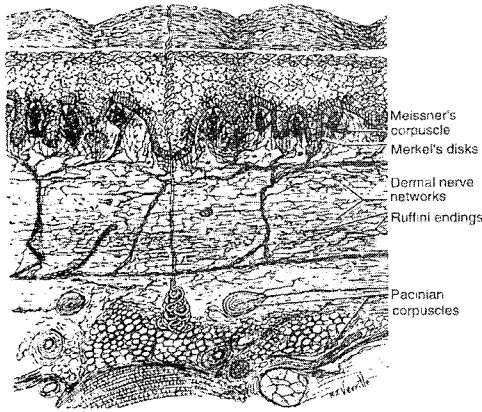


그림 1. 피부감각 수용기의 위치와 구조[8].

Fig. 1. Anatomical sketch of glabrous skin.

서 촉감과 관련이 있는 기계적 수용기(mechanoreceptor)들을 연구하였다[6,7].

그림 1은 피부감각 수용기의 위치와 구조를 보여준다. 피부의 외피에는 meissner corpuscles와 merkel's disks가 위치해 있고 진피에는 ruffini endings와 pacinian corpuscles이 존재한다. 각 수용기는 자극의 순응(adaptation) 특성으로부터 크게 두 가지 수용기 섬유로 분류된다. 느리게 순응하는 수용기(slowly adapting fiber, SA)로는 meissner corpuscles(SA I)과 ruffini endings(SA II)이 포함되며, 빠르게 순응하는 수용기(rapidly adapting fiber, RA)로는 merkel's disks(RA I)과 pacinian corpuscles(RA II)로 구분된다. 각 수용기 섬유는 정신물리학적 으로 각각 다른 느낌에 반응하는 것으로 알려져 있다. 또한 각 수용기 섬유의 인지 기능에 따라 다른 주파수 응답 특성을 가지고 있다[8]. pacinian corpuscle은 손가락을 문지르면서 거칠기를 감지할 때 느끼는 40~500Hz범위의 진동을 감지한다. 또한 meissner corpuscle과 RA 섬유는 피부의 떨림(flutter)을 감지하며 2~40Hz 범위에 민감하다. 그리고 ruffini 말단은 SA II 섬유와 관계되어있으며 접촉 면적이 매우 좁은 경우의 진동을 감지하는 것으로 알려져 있고 100~500Hz에 민감하다. Merkel 수용기는 SA I 섬유와 관계되어있으며 피부의 압력을 감지하고 0.3~10Hz 범위에 민감하다[9].

Hollins 등은 질감 인지에서 거친 재질에서는 피부의 공간적 신경 신호(spatial encoding)가 지배적으로 작용하며, 고운 재질에서는 피부의 시간적 신경 신호(temporal encoding)가 지배적으로 작용함을 밝혔다[10]. 이 사실은 거친 재질은 그 모양을 그대로 구현하는 것이 좋지만 매우 고운 재질은 진동수 변화 등을 이용하는 자극으로 모사할 수 있는 가능성이 있음을 보여준다.

이상에서 언급한 피부 감각 수용기의 특성을 바탕으로 하여 다음과 같은 작동 범위를 갖는 통합형 질감 제시장치를 개발하였다[5].

- 6x8의 핀배열의 개별적 구동 및 피부에 대해 수직방향으로 0~500Hz이상의 진동수로 자극 가능
- 저주파에서는 60dB/μm(약 1 mm), 500 Hz에서도 최소35dB/μm(약 56.2μm)의 수직방향 동작 범위
- 고정된 형상을 유지 가능
- 피부를 수직방향으로 1mm 이상 변형 시킬 수 있는 충분

한 힘을 가할 수 있음

- 역감과 질감을 동시에 제시할 수 있는 장치
 - 능동 접촉(active touch)과 수동접촉(passive touch)모드 제공
- 위와 같은 사양을 갖는 통합 질감 제시장치를 이용하여 자극 방법이 질감 인지에 미치는 영향, 반력(kinesthetic force)만을 이용할 경우의 질감 인지의 한계, 반력과 질감 제시를 동시에 구현할 경우 물체 표면의 인식 효과에 관한 연구를 수행하였다.

III. 자극 방법이 질감 인지에 미치는 영향

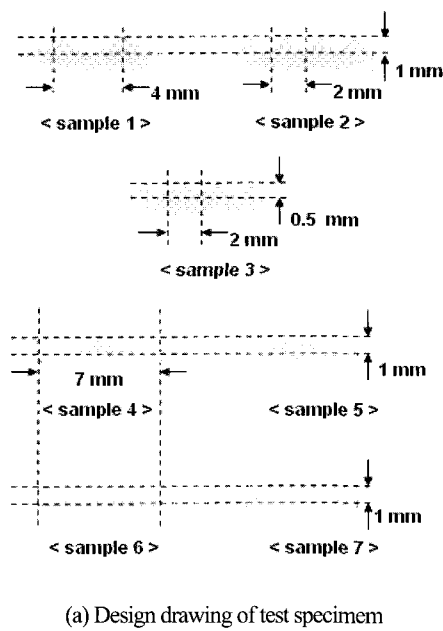
1. 실험 방법

본 실험에서 사용한 질감 제시 장치는 여러 가지 방법으로 피부 자극이 가능하다. 피부 수직 방향 자극부의 수평 방향 1 자유도 움직임이 가능하기 때문에 사람이 직접 손가락을 움직이는 능동적 터치(active touch) 뿐 아니라 자극부가 정지된 손가락의 접촉면을 스치는 수동적 터치(passive touch) 방법으로도 피부 수평 방향 자극을 구현할 수 있다. 지금까지 연구, 제안되어 온 대부분의 질감 제시 장치와는 달리 다양한 피부 자극이 가능하기 때문에 본 장에서는 개발된 질감 제시 장치로부터 질감 제시 방법의 변화에 따른 사람의 질감 인지를 정신 물리학적 실험으로부터 구한다.

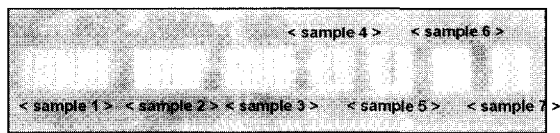
질감 제시 방법의 변화에 따른 사람의 질감 인지 변화를 알아보기 위해 질감 제시 장치를 통하여 다양한 시편을 각기 다른 방법으로 구현하고 이 때 피실험자의 대담을 기록하였다. 피실험자는 각 자극 방법에 따라 질감 제시 장치와 실제 주어진 표본을 비교하여 표본의 번호를 맞춘다. 또한 각 자극 방법에서 무작위로 시편을 제시함으로써 상대적인 비교로 답을 하지 않고 피실험자가 최대한 촉감에 의지하여 정한 답을 기록할 수 있게 하였다.

그림 2는 피실험자에게 주어진 표본의 실제 모습과 단면 모양이다. 시편은 온도 전달에 의한 영향을 배제하기 위하여 질감 제시 장치의 핀 배열과 같은 재질로 제작하였다. 1번 표본은 4mm의 파장(wave length)과 1mm의 변위(amplitude)를 갖는 삼각파이고 2번 표본은 2mm의 파장과 1mm의 변위를 갖는 삼각파이다. 3번 표본도 삼각파이지만 파장은 2mm이고 변위는 0.5mm이다. 4번 표본은 길이 7mm, 높이 1mm의 삼각형 단면을 갖는 시편이다. 5번 표본은 4번 표본과 유사한 곡률 0.2mm-1, 길이 7mm의 원호 단면을 갖는 시편이다. 6번과 7번 표본은 각각 4번과 5번 표본의 음각 모양이다.

각 표본은 무작위로 2번씩 각 구현 방법에 따라 제시되며 피실험자는 한 번 대답한 후에는 반복할 수 없도록 하였다. 즉, 상대적인 차이로부터 시편을 구별하는 피실험자의 대담을 배제하기 위함이다. 피실험자는 직접 근 감각만으로 시편을 느끼는 방법과 질감 제시 장치의 피부 자극을 통해 7 가지 방법으로 시편을 느끼게 된다. 직접 근 감각으로 느끼는 방법은 피실험자가 탐침을 쥐고 탐침 끝을 통해 점 접촉으로만 시편을 구별하는 것이다(이 방법은 반력 장치만을 이용한 재질의 인식 방법과 같다). 질감 제시 장치의 피부 자극을 통해 느끼는 방법은 static pressure(정적인 압력 자극), static pressure & active touch(정적인 압력 자극 하에 피실험자의 능동 터치), static pressure & passive touch(정적인 압력 자극 하에 수평 방향의 상대적 움직임이 있는 수동 터치), normal



(a) Design drawing of test specimen



(b) Real prototype of test specimen

그림 2. 실험용 모델과 시편 제작 결과.

Fig. 2. Design of experimental specimen.

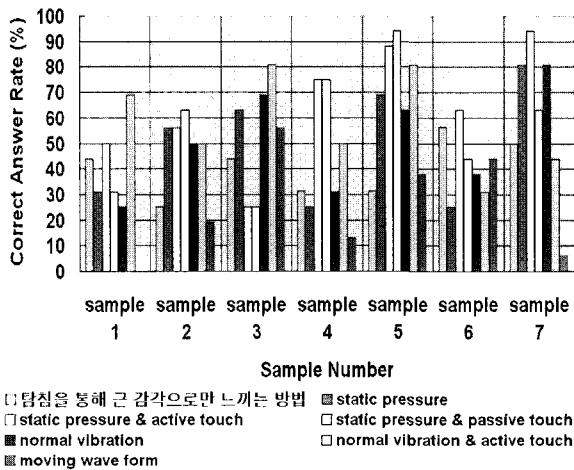


그림 3. 실험 결과 그래프.

Fig. 3. Experimental results by stimulating methods.

vibration(표본의 모양과 같은 변위의 10Hz 진동 자극), normal vibration & active touch(표본의 모양과 같은 변위의 10Hz 진동 자극 하에 피실험자의 능동 터치), moving wave form(각 편 배열에 위상차와 변위차를 주어 파형이 시간에 따라 움직이는 것을 구현)의 7 가지 방법이다. 각 방법으로 시편을 느끼고 구별하면서 피실험자의 대답이 점수화된다. 실험에 참여한 피실험자는 8명(남자: 6, 여자: 2)이고 피실험자 모두 질감 제시 장치에 대한 전문지식이 없는 사람들로 구성하였을 뿐 아

니라, 사용한 질감 제시 장치에 관한 사전 교육을 제공하지 않았으므로 학습과 개인적 적응에 의한 영향이 최대한 대대에 포함되지 않도록 하였다.

2. 실험 결과

그림 3은 실험 결과 그래프이다. Y축은 피실험자의 정답률이고 X축은 각 시편을 나타낸다. 실험 결과로부터 다양한 자극 모드에 따른 질감 인지의 변화를 살펴볼 수 있다. 7가지 모든 시편에서 근 감각으로만 느끼는 방법보다 피부 자극을 주는 특정 방법이 인지율이 더 높다. 관절을 통한 근 감각만으로는 구별하기 힘든 영역이 있다는 것을 알 수 있다. 모든 피부 자극 방법이 근 감각으로만 느끼는 방법 보다 인지율이 높은 것은 아니지만, 각 시편에 대해서 특정 피부 자극으로 인지율을 보다 높일 수 있다. 하지만 6번 시편과 같이 음각의 요철이 있는 경우에는 근 감각만으로도 비교적 높은 인지를 할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

Static pressure와 static pressure & active touch를 비교해보면 가장 작은 모양인 3번 시편을 제외한 모든 경우에서 static pressure & active touch가 더 높은 인지율을 보이는 것을 알 수 있다. 즉, 질감 제시 방법에서 피부 수평 방향 자극이 인지율을 높이는데 중요한 역할을 하는 것을 알 수 있다. 또한 static pressure & passive touch의 결과는 static pressure & active touch의 결과 보다는 인지율이 낮지만 static pressure 경우보다는 인지율이 높은 것으로부터 사용자가 직접 움직이지 않고 자극부의 상대적인 움직임으로도 피부 수평 방향 자극의 구현이 가능함을 알 수 있다. 즉 active touch와 passive touch는 손가락을 통한 질감 인식에서는 큰 차이가 나지 않는데 이 사실을 통해 질감 제시장치가 신체와 분리되어 있는 것이 아니라 passive touch 기능을 가진 착용형 질감 제시 장치로 개발될 수 있음을 알 수 있다.

Static pressure & active touch의 질감 제시 방법이 실제 사람이 질감을 인지하는 방법과 가장 유사하기 때문에, 거의 모든 시편에서 가장 높은 인지율을 보이고 있으나 작은 모양의 시편 일수록 normal vibration과 normal vibration & active touch 자극 방법이 더 높은 인지율을 보이고 있다. 이로부터 작은 모양 혹은 거칠기의 구현을 위한 질감 제시 방법으로 피부 수직 방향의 진동 자극이 실제 인지 상황과는 다를지라도 보다 효율적인 제시 방법일 수 있다는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 2장에서 언급했듯이 고운 재질(fine texture)의 인지에서는 시간적 변화를 갖는 피부 자극이 중요한 요소라는 주장과 일치하는 실험 결과이다[10]. 또한 normal vibration과 normal vibration & active touch 자극 방법에서도 피부 수평 자극을 포함하는 normal vibration & active touch가 인지율이 높은 결과로부터, 질감 제시에 있어 피부 수평 자극의 중요성을 다시 확인할 수 있다. 본 연구에서는 진동 주파수를 10Hz로 제한하여 실험하였으며, 향후 연구에서는 진동수의 변화가 고운 질감의 인식에 미치는 영향에 관하여 연구를 수행할 계획이다.

Moving wave form 자극 방법은 실험 결과로부터 모든 시편에서 인지율이 가장 낮은 것을 알 수 있다. Moving wave form의 자극 방법은 피부 수평 방향 자극의 구현을 할 수 없는 기존의 질감 제시 장치에서 접촉 표면의 피부에 대한 상대적인 움직임을 구현하기 위해 사용되는 질감 제시 방법이다.

즉, 실제 피부 수평 방향의 자극 없이 수직 자극의 시간차를 이용하여 자극 표면의 피부 수평 방향 움직임이 있는 듯 구현하는 방법이다. 하지만 실험 결과로부터 moving wave form의 자극 방법은 질감 제시 방법으로 부적합하다는 것을 알 수 있다. 피부 수직 방향만으로는 실제에 가까운 질감 제시에 한계가 있음을 실험 결과로부터 알 수 있었다. 이 결과는 촉감의 인식에 있어서 접촉면에서 일어나는 Stick-Slip현상의 중요성을 보여주는 예라고 할 수 있으며, 이 결과로부터 우리는 질감 제시 장치는 피부 수직 방향 자극뿐 아니라 피부 수평 방향의 자극도 구현할 수 있게 개발되어야 함을 결론 내릴 수 있다.

본 장의 연구결과를 요약하자면 탐침을 이용하여 실제 시편을 긁으면서 표면 성질을 구분한 결과와 질감 제시 장치를 사용하여 손가락 피부를 접촉하면서 구분한 결과를 비교해 본 결과 큰 감각만으로 느끼고 구별하는 것이 한계가 있으며 피부 자극으로부터 인지율을 높일 수 있다는 것을 알 수 있었다. 또한 모양과 크기에 따라 특정한 피부 자극 방법이 질감 제시의 효과를 높이는데 중요한 역할을 할 수 있다는 것을 알 수 있다. 피부 수평 방향의 자극은 실제와 같이 active touch에서 인지율이 높지만 passive touch로도 active touch와 가까운 수평 방향 자극을 구현 할 수 있다는 것을 알 수 있었으며 또한 고운 재질의 질감 제시를 위해 주기적 자극인 진동이 중요한 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

IV. 반력을 통한 질감 인지의 한계

1. 실험 방법

통합 질감 제시 시스템에서 사용자에게 큰 감각을 전달하기 위해 2 자유도 평면 힘 반향 장치가 이용된다. 사용자는 힘 반향으로부터 가상현실이나 원격지의 물체 혹은 상황과 상호작용이 가능해지고 작업의 효율을 시각 정보만 이용할 때보다 극대화 할 수 있으며, 근감각을 통한 촉감 전달 장치(kinesthetic force feedback device)가 개발되어 다양한 촉감 시뮬레이터에 활용되고 있다. 그러나 장치를 손에 쥔 채 손가락이나 팔로 전해지는 반력으로부터 얻는 근 감각만으로는 물체의 작은 모양(micro-shape)이나 재질감(texture)를 느끼기에 한계가 있다. 본 절에서는 통합 질감 제시 시스템에서 힘 반향과 질감 제시의 표현 영역 구분 결정을 위한 실험을 수행한다. 실험으로부터 근감각을 통한 촉감 구분 능력의 한계를 측정하며, 실험 결과는 힘과 질감을 동시에 구현할 때 표현 영역을 구분하여 표현하는데 적용된다.

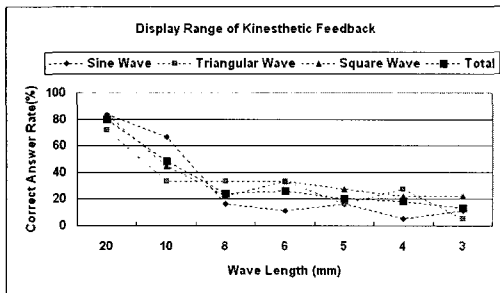


그림 4. 반력 정보를 이용한 인지율 측정.
Fig. 4. Cognition rate by kinesthetic force feedback.

실험을 위해서 피실험자에게는 거칠기가 다른 시편이 주어진다. 다른 거칠기의 표현을 위해 시편의 표면의 형상은 각 세 종류의 주기적 파형(sine wave, saw wave, square wave)으로 나뉘며, 각 파형은 동일한 진폭(1mm)에 대하여 20, 10, 8, 6, 5, 4, 3mm의 파장을 가지며 총 21개인 각각의 시편의 폭은 20mm이다. 사용자는 동일한 파형 내에서 개발된 반력 생성 장치를 이용해서 무작위로 주어지는 표면을 느낀 후에, 근감각에만 의존하도록 손에 탐침을 쥐고 실제 시편의 표면을 느끼는 방법을 번갈아 가면서 비교하여 같다고 판단되는 시편을 찾아내도록 하였다. 이전에 언급된 실험들과 마찬가지로 사전에 연습이나 촉감을 인지할 수 있는 어떤 교육도 실시하지 않았으며 또한 대답은 반복할 수 없도록 하여, 실험 결과에 상대적 비교나 학습에 의한 영향을 최소화 하도록 노력하였다.

2. 실험 결과

그림 4의 Y축은 피실험자의 정답률이고 X축은 각 파형의 파장을 나타낸다. 실험 결과를 보면 각 세 가지 파형 모두 파장의 길이가 짧아지면서 피실험자의 구별 능력이 떨어지는 것을 알 수 있다. 특히 20, 10, 8mm에서 급격한 하락을 볼 수 있으며, 8mm 이하의 영역에서는 큰 차이를 보이고 있지 않다. 즉 8 mm보다 파장이 짧아지는 표현 영역에서는 근감각 정보만으로 사용자에게 정확한 질감 정보를 전달할 수 없다는 것을 알 수 있다.

실험 결과로부터 질감 제시 장치와 2 자유도 평면 힘 반향 장치의 연동을 위해서 반력을 이용해서 성질을 표현할 수 있는 물체의 최소 크기를 8mm로 두어 그 이하의 표현 영역은 질감 제시 장치를 이용할 경우 보다 다양한 가상의 물체를 더 정확하게 표현할 수 있게 된다.

V. 반력과 질감의 동시구현

4장의 결과로부터 반력 제시 시스템에서 8 mm 이하의 파형은 반력을 통해 표현하기에 한계가 있음을 알 수 있었다.

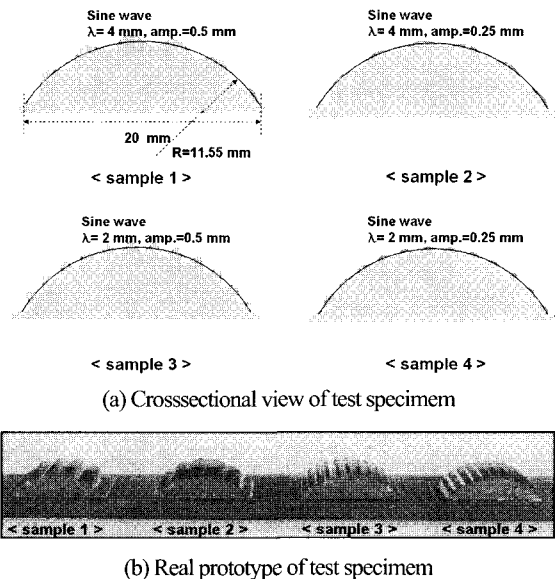


그림 5. 통합질감 구현 실험용 시편.
Fig. 5. Experimental specimen.

표 1. 구현 방법에 따른 인지율의 confusion matrix.

Table 1. Confusion matrix of correction rate.

answer specimen	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
Sample 1	43.75	37.5	12.5	6.25
Sample 2	43.75	56.25	0	0
Sample 3	12.5	6.25	50	31.25
Sample 4	0	6.25	18.75	75

(a) Kinesthetic feedback

answer specimen	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
Sample 1	31.25	0	31.25	37.5
Sample 2	6.25	56.25	12.5	25
Sample 3	6.25	0	81.25	12.5
Sample 4	0	12.5	25	62.5

(b) Kinesthetic feedback + static pressure

answer specimen	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
Sample 1	50	25	12.5	12.5
Sample 2	6.25	81.25	6.25	6.25
Sample 3	12.5	0	87.5	0
Sample 4	0	12.5	25	62.5

(c) Kinesthetic feedback + static pressure & active touch

answer specimen	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
Sample 1	37.5	0	56.25	6.25
Sample 2	6.25	50	12.5	31.25
Sample 3	12.5	0	87.5	0
Sample 4	6.25	31.25	12.5	50

(d) Kinesthetic feedback + normal vibration

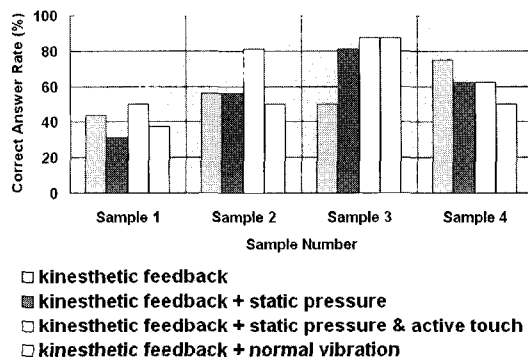


그림 6. 구현 방법에 따른 인지율 측정.

Fig. 6. Correction rate by stimulating methods.

본 장에서는 반력 생성장치와 질감 제시 장치가 통합된 통합 질감 제시장치를 이용하여[5], 일정한 형상과 표면 거칠기를 갖는 물체의 인지율에 관한 실험을 수행하였다.

실험을 위하여 4가지 시편을 실제로 제작하여 실제와 가상의 물체를 비교하여 같다고 생각되는 것을 찾아내는 방법으로, 반력만으로 표현한 경우와 반력과 질감 제시를 동시에 구현한 경우의 인지율을 측정하였다. 그림 5(a)는 시편이 단면 모양을, 그림 5(b)는 제작된 실제 시편의 모습을 보여준다. 모든 표본은 그림 5(a)와 같이 11.55mm 반지름을 갖는 원호의 형상을 가지며 표면 거칠기가 파장과 진폭이 다른 사인파

로 표현되어있다. 파장은 4mm, 2mm이고 변위는 0.5mm, 0.25mm로 질감제시장치를 이용하여 구현하였고, 원호 형상은 반력을 이용하여 사용자에게 정보를 전달한다.

피실험자는 4 가지 시편을 통합 질감 제시 시스템을 통해 4가지 방법으로 느끼게 된다. 한가지는 반력만(kinesthetic feedback)으로 원호와 표면성질을 모두 구현하는 방법이고, 나머지 세가지는 원호는 반력으로 구현하고 표면성질은 서로 다른 피부 자극으로 구현하는 방법이다. 피부 자극 방법은 3장에서 언급한 static pressure, static pressure & active touch, normal vibration이다. 시편은 편 배열과 같은 재질로 제작하여 재질의 이질감에 의한 실험의 부정확도를 배제하고자 하였다. 실험에 참여한 피실험자는 8명(남자: 6, 여자: 2)이고 피실험자 이전에 언급된 실험들과 마찬가지로 사전에 연습이나 촉감을 인지할 수 있는 어떤 교육도 실시하지 않았으며 또한 대답은 반복할 수 없도록 하여, 실험 결과에 상대적 비교나 학습에 의한 영향을 최소화 하도록 노력하였다.

그림 6은 실험 결과 그래프이다. Y축은 피실험자의 정답률이고 X축은 각 시편을 나타낸다. 표 2는 각 구현 방법에서 피실험자 대답의 confusion matrix이다. Confusion matrix의 행(row)은 제시된 시편이고 열(column)은 피실험자의 대답을 나타낸다. 실험 결과를 통해 4번 시편을 제외한 나머지 시편에서는 반력과 질감을 동시에 구현한 방법이 인지율이 높은 것을 알 수 있다. 4번 시편에서 반력만으로 원호와 표면거칠기를 모두 구현한 방법이 인지율이 큰 이유는 표 1(a)에서 볼 수 있듯이, 시편 3번의 대답이 시편 4에 편향되었기 때문이다. 시편 3, 4번을 반력만으로 느낄 때 피실험자는 4번으로 대답하는 경향이 다른 시편에 비해 크기때문으로, 4번 시편에서 피부 자극을 수반한 구현 방법에 비해 반력만으로 구현한 방법이 보다 효과적이라고 결론짓기는 어렵다.

이번 장에서의 결과처럼 피부 수직 방향의 자극만 있는 ‘반력과 동시 정적인 피부 자극 방법’과 ‘반력과 동시 수직 진동 자극’보다 피부 수평 방향의 자극을 수반한 ‘반력 및 능동 터치’인 경우가 인지율이 가장 높게 나타난다. 또한 표 1(c)에서 보듯 다른 구현 방법에 비해 편향된 대답이 없음을 알 수 있다. 실험 결과로부터 피부 자극과 반력을 동시에 구현한 방법으로 반력만으로 구현하는 방법보다 인지율을 높일 수 있는 것을 알 수 있었다.

VI. 결론

본 논문에서는 피부감각에 필수적인 질감의 요소를 충분히 구현할 수 있는 통합 질감 제시장치를 활용하여, 질감제시 장치의 성능 평가와 동시에 사람의 질감 인지 특성을 연구하였다. 연구 결과 개발된 질감제시 장치는 다양한 자극 방법으로 넓은 범위의 표면 거칠기를 충분히 표현할 수 있으며 반력과 피부 자극을 동시에 제시할 경우의 효과를 확인하였다. 자극방법에 관해서는 형상이 클수록 반력이나 정적인 피부 자극전달 방법이 효과적이다. 그리고 형상이 작을수록 질감 제시 장치를 이용해야 하며 진동이 표면의 거칠기가 고와질수록 효과적일 수 있음을 발견하였다. 또한 피부의 접촉면에서의 수평방향 자극이 질감 제시 장치 개발시에 매우 중요함을 확인하였다.

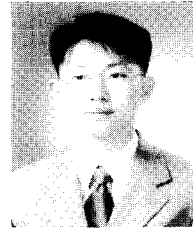
참고문헌

- [1] G. C. Burdea. "Haptic issues in virtual environment", *Proceeding of Computer Graphics International*, pp. 295-302, 2000.
- [2] G. K. Essick, "Factors affecting direction discrimination of moving tactile stimuli", *Neural Aspect of Tactile Sensation* (Editor: J.W. Morley), pp. 1-54, Elsevier Science B.V., 1998.
- [3] Makoto Shimojo, Masami Shinohara, Yukio Fukui. "Human shape recognition performance for 3-D tactile display", *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics-PART A: Systems and Humans*, vol. 29, no. 6, pp. 637-644, 1999.
- [4] N. Asamura, N. Yokomu, H. Shinoda. "Selectively stimulating skin receptors for tactile display", *IEEE Computer Graphics and Applications*, pp. 32-37, 1998.
- [5] K. U. Kyung, S. W. Son., D. S. Kwon, M. S. Kim. "Design of an integrated tactile display system", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 776-781, 2004.
- [6] R. S. Johansson, A. B. Vallbo, "Tactile sensibility in the human hand: relative and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin", *Journal of Physiology*, vol. 286, pp. 283-300, 1979.
- [7] K. O. Johnson, "The roles and functions of cutaneous mechanoreceptors", *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 11, pp. 455-461, 2001.
- [8] J. W. Morley, *Neural Aspects in Tactile Sensation*, Amsterdam, Elsevier Science B.V., 1998
- [9] J. D. Greenspan, S. J. Bolanowski, "The psychophysics of tactile perception and its peripheral physiological basis", *Pain and Touch* (Editor: Lawrence Kruger), pp. 25-104, Academic Press, 1996.
- [10] M. Hollins, S. J. Bensmaia, and E. A. Roy, "Vibrotacton and texture perception", *Behavioural Brain Research*, vol. 135, pp. 51-56, 2002.
- [11] S. J. Lederman, "The perception of surface roughness by active and passive touch", *Bulletin of the Psychonomic Society*, vol. 18, pp. 253-255, 1981.



손 승 우

2002년 KAIST 기계공학과 졸업. 2004년 KAIST 기계공학과 석사 졸업. 2005년~현재 현대중공업 기계전기연구소 기초기반연구실. 관심분야는 Robot Motion Control.



경 기 욱

1999 KAIST 기계공학과 졸업. 2001년 KAIST 기계공학과 석사 졸업. 2005년~현재 KAIST 기계공학과 박사과정 재학 중. 관심분야는 햅틱스(Haptics), Human-Computer Interface, 의료용 시뮬레이터.



양 기 훈

2000년 KAIST 기계공학과 졸업. 2002년 KAIST 기계공학과 석사 졸업. 2005년~현재 KAIST 기계공학과 박사과정 재학 중. 관심분야는 햅틱스(Haptics), Human-Comuter Interaction, 체감형 시뮬레이터.

권 동 수

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 8 권 제 9 호 참조.