

◆ 특집 ◆ 고령자 및 장애인을 위한 보조 기술

감각의 순응을 이용한 선택적 감각유발 가능성

Adaptation of Sensory Nerve Afferents for Selective Elicitation of Tactile Sensations

안보영¹, 마주형¹, 황선희², 송동진³, 강곤^{1,✉}
Boyoung An¹, Joohyung Ma¹, Sun Hee Hwang², Tongjin Song³, and Gon Khang^{1,✉}

¹ 경희대학교 생체의공학과 (Department of Biomedical Engineering, Kyung Hee University)

² 삼성서울병원 신경과 (Department of Neurology, Samsung Medical Center)

³ 중원대학교 의료공학과 (Department of Biomedical Engineering, Jungwon University)

✉ Corresponding author: gkhang@khu.ac.kr, Tel: +82-31-201-2998

Manuscript received: 2015.7.29. / Revised: 2015.8.31. / Accepted: 2015.9.2.

This study was designed to investigate the feasibility of utilizing an adaptation for selective elicitation of tactile sensations by means of transcutaneous electrical stimulation. We conducted the first experiment to investigate how the stimulation frequency affected the adaptation. Twenty healthy subjects participated in the second experiment to confirm our proposal that the perception intensity of the low-frequency vibration can be enhanced after a high-frequency adaptation, and vice versa. It was found that (1) a low-frequency stimulation did not adapt the nerve afferents responsible for the high-frequency vibration, (2) a high-frequency stimulation affected the nerve afferents responsible for the low-frequency vibration, but adapted to the pressure sensation more intensely, and (3) more than 62% of the subjects reported a more clear selective sensation after the adaptation had lessened or depressed the unwanted sensation. The observations showed that adaptation of the nerve afferent could be utilized for selective elicitation of tactile sensations.

KEYWORDS: Electrically-Elicited tactile sensation (전기자극을 이용한 촉각감각유발), Sensory feedback system (감각피드백시스템), Adaptation (순응), Selective elicitation (선택적 감각유발)

1. 서론

촉각(tactile sensation)은 외부 자극에 대해 반응하는 감각의 한 종류로 사람의 피부 및 점막에서 물체의 접촉을 느끼는 것을 말한다. 촉각은 체성 감각 중 하나로 몸으로부터 감각정보를 취합하는 신경기전이다. 접촉, 압력, 진동, 그리고 간지러움 등의 감각들이 있다. 이는 물체의 재질이나 형태

를 판단하는 것에서부터 물체를 잡는 힘을 미세하게 조절하는 등 무의식적으로 작용되며 인간의 근원적 감각으로 매우 중요한 역할을 한다.

촉각은 사람의 피부 속에 위치하고 있는 기계적감각수용체(mechanoreceptor)를 통해 느낄 수 있다. 기계적자극이 가해졌을때, 이 수용체들의 변형(deformation)이 발생하여 신경섬유의 활동전위를 유발하게 되고, 발생한 신호는 뇌로 전달되어 우

리가 촉각을 느낄 수 있게 된다.¹⁻³

전기자극을 통해서도 물리적자극을 했을 때와 비슷한 감각을 느낄 수 있다. 물리적자극을 했을 때 수용체의 변형에 의해 연결된 신경섬유의 활동전위를 유발하는 것을 대신하여 전기자극으로 수용체와 연결된 신경섬유에 직접적으로 활동전위를 발생시키는 것이다. 이렇게 발생된 신호는 뇌로 전달되며, 물리적자극을 했을 때와 유사한 감각을 느낄 수 있다. 이 때, 원하는 신경섬유만을 활성화시켜 선택적으로 감각을 유발할 수 있다면, 이는 감각피드백시스템 개발은 물론 3D환경과 접목하여 가상현실을 구축하거나 외골격로봇에 이용되는 등 군사용 혹은 산업용까지 다양하게 사용할 수 있을 것이다.

전기자극을 이용한 감각유발을 하는 방법은 크게 삽입전극을 이용한 감각유발과 표면전극을 이용한 감각유발 두 가지로 나눌 수 있다. 삽입전극을 이용하는 방법은 수술 등을 통해 각각의 신경섬유를 직접적으로 감싸준 뒤, 미세전류를 이용하여 원하는 신경만을 자극하여 감각을 유발한다. 직접 신경에 닿아 자극하기 때문에 미세전류로 각각의 신경을 개별적으로 자극할 수 있어 감각의 선택적유발이 가능하다. Carrozza 등은 실제로 감각피드백시스템을 개발하기도 하였다.^{4,5} 하지만 삽입전극의 경우 수술이 꼭 필요하다는 것과 그로 인해 의수를 제외한 다른 분야에서는 이용되기 힘들다는 단점을 가지고 있다. 표면전극을 이용해 감각유발하는 것은 피부표면에서 전류를 주입하여 감각신경을 자극하는 것을 의미한다. 삽입전극을 이용하였을 때 보다 상대적으로 안정성이 높으나 신경섬유 각각을 자극하는 것이 아니라 피부표면에서 전류를 주입하기 때문에 여러 개의 신경섬유가 동시에 활동전위를 일으킨다. 즉, 원하는 감각만을 유발하지 못하고 두개 이상의 감각이 동시에 유발된다. 동시에 유발되는 감각을 떨어트려 원하는 감각만을 유발하는 선택적 감각유발방법 또한 다양하게 Kajimoto 등에 의해 활발하게 연구 되어지고 있다.^{6,7}

본 연구진의 이전 연구들에 의하면, 표면전극을 이용하여 단일채널로 전기자극을 하면 압력 (pressure), 저주파진동감각(low-frequency vibration), 고주파진동감각(high-frequency vibration)을 유발할 수 있다. 위 감각들은 자극강도(자극펄스의 높이로 나타냄)와 자극주파수에 따라 Fig. 1과 같이 유발되며, 자극강도가 낮을 때에는 압력만 유발할 수 있으나 자극강도가 높아짐에 따라 저주파진동과 고주파진동이 압력과 동시에 나타나는 것을 확인 하였다.^{8,9}

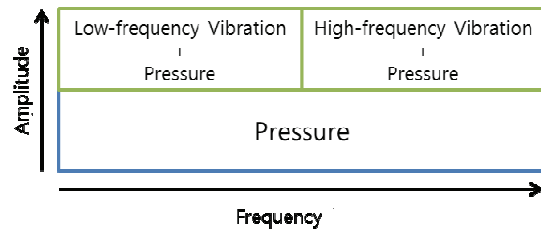


Fig. 1 Tactile sensation induced by single-channel transcutaneous electrical stimulation

또한 전기자극을 했을 때에도 감각의 순응 (adaptation)이 발생하는 것을 확인하였다. 일정한 자극이 지속적으로 가해지면 자극강도는 변함이 없으나 사람이 느끼는 감각의 크기가 점차 줄어들게 된다. 예를 들어 피부를 꼭 누르고 있으면 시간이 지날수록 누르는 감각이 줄어들거나 누르는 것 자체를 느끼지 못하게 되는 것을 의미하고 있으며, 이를 감각의 순응이라고 한다.¹⁰⁻¹² 본 연구진의 이전 연구를 통해 전기자극을 할 때에도 일정 강도로 지속적인 자극을 하면 감각이 무뎠거나 사라지는 현상을 확인할 수 있었다.¹³

본 연구에서는 자극주파수가 낮을 때, 저주파진동감각과 압력감각이 동시에 유발되며 자극주파수가 높을 때, 고주파진동감각과 압력감각이 동시에 유발된다는 사실과 감각의 순응을 이용하여, 저주파진동감각과 고주파진동감각만을 각각 선택적으로 유발할 수 있는 방법에 대하여 연구하였다.

2. 실험방법

감각신경에 병변이 없는 건강한 성인 20명 (23.9±2.9세)이 실험에 참여했다. 사전에, 실험의 구체적인 진행과정과 실험 도중에 발생할 수 있는 위험상황을 자세히 설명했다.

인체에서 가장 예민하다고 알려져 있는 검지 끝마디를 정전류 음극사각과형으로 자극하였고, 펄스너비는 200us, 저주파자극주파수는 20Hz, 고주파자극주파수는 200Hz로 고정하였다.

감각의 순응이 발생하면 더 강한 강도로 자극해야 감각을 느낄 수 있다. 즉, 감각의 순응이 발생한 뒤에는 자극강도(자극펄스의 높이[mA])가 높아져야 감각을 느낄 수 있고 이는 감각을 느끼는 순간의 자극강도(perception threshold, PT)가 증가하는 것을 의미한다. 본 연구에서는 PT의 증가 유무로 감각의 순응이 발생 유무를 판단 하였다. 예비

실험을 통해 이전자극이 전혀 없는 상태에서 압력, 저주파진동감각, 고주파진동감각의 PT를 측정하고 피실험자가 통증이나 불편한 감각을 느끼지 않는 최대강도(maximum intensity, MI)를 측정하였다.

2.1 진동감각의 순응에 주파수가 미치는 영향

이전 연구를 통해서 진동감각이 주파수에 따라 다르게 나타나는 것은 알고 있으나 감각이 유발되지 않는다고 감각을 유발하는 신경섬유의 순응이 발생하지 않는다고는 할 수 없다. 따라서 주파수가 진동을 유발하는 신경섬유에 영향을 미치는지 확인해 보는 과정을 거쳤다.

저주파자극에서 감각의 순응을 발생시키기 위하여 저주파진동감각을 충분히 느낄 수 있는 저주파진동감각의 PT와 MI의 중간값으로 2분간 자극했고, 자극 직후 고주파자극을 하여 압력감각과 고주파진동감각의 PT변화를 측정하였다. 고주파자극에서 감각의 순응을 발생시키기 위하여 고주파진동감각의 PT와 MI의 중간값으로 2분간 자극했고, 자극 직후 저주파자극을 하여 압력감각과 저주파진동감각의 PT변화를 측정하였다.

2.2 감각의 순응을 이용한 선택적 감각유발

실제로 감각의 순응을 이용하여 진동감각의 선택적으로 감각을 유발해 보았다. 압력감각과 진동감각은 동시에 유발된다. 고주파자극을 지속적으로 하여 고주파진동감각을 담당하는 신경섬유와 압력감각을 담당하는 신경섬유의 순응을 발생시키고 저주파자극을 하면 압력감각을 담당하는 신경섬유가 순응이 되어 있기 때문에 저주파진동감각만을 느낄 것이다. 반대로 저주파자극을 지속적으로 하여 저주파진동감각을 담당하는 신경섬유와 압력감각을 담당하는 신경섬유의 순응을 발생시키고 고주파자극을 하면 압력감각을 담당하는 신경섬유가 순응이 되어 있기 때문에 저주파진동감각만을 느낄 것이라 예상할 수 있다.

저주파진동감각을 선택적으로 유발할 수 있는지 확인하기 위해 이전자극이 전혀 없는 상태에서 저주파자극 했을 때와 고주파자극을 지속적으로 자극한 뒤 저주파자극을 했을 때 피실험자가 느끼는 압력감각과 저주파진동감각의 변화를 확인하였다. 저주파진동감각을 충분히 느끼도록 하기 위하여 저주파진동감각의 PT와 통증 또는 불편한 감각을 느끼기 시작하는 강도인 MI의 중간값으로 자극하되, 한번은 이전 자극이 전혀 없는 상태에서 자

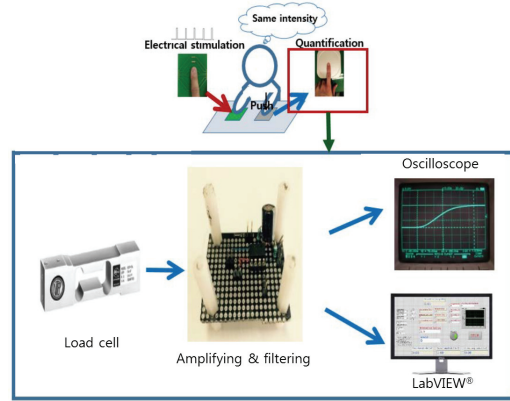


Fig. 2 Pressure quantification system

극을 하고, 한번은 고주파에서 2분간 지속적인 자극을 한 직후에 자극을 했다. 이전자극이 전혀 없이 저주파자극을 할 때와 와 고주파에서 지속적인 자극을 한 뒤 저주파자극을 할 때, 각각 압력감각을 정량화하고 피실험자가 저주파진동감각에 대해 비교하여 묘사하도록 했다. 저주파진동감각에 대한 묘사는 고주파자극으로 감각의 순응이 발생하기 전과 후에 저주파진동감각이 어떻게 변하는가에 대해 집중하여 묘사토록 하였다.

고주파진동감각을 선택적으로 유발할 수 있는지 확인하기 위해 이전자극이 전혀 없을 때 저주파진동감각과 고주파자극을 지속적으로 한 다음 저주파자극을 했을 때 압력감각과 고주파진동감각의 변화를 확인하였다. 고주파진동감각을 충분히 느끼도록 하기 위하여 고주파진동감각의 PT와 MI의 중간값으로 자극하되, 한번은 이전 자극이 전혀 없는 상태에서 자극을 하고, 한번은 저주파에서 2분간 지속적인 자극을 한 직후에 자극을 했다. 이전자극이 전혀 없이 고주파자극을 할 때와 와 저주파에서 지속적인 자극을 한 뒤 고주파자극을 할 때, 각각 압력감각을 정량화하고 피실험자가 고주파진동감각에 대해 비교하여 묘사하도록 했다. 고주파진동감각에 대한 묘사는 저주파자극으로 감각의 순응이 발생하기 전과 후에 고주파진동감각이 어떻게 변하는가에 대해 집중하여 묘사토록 하였다.

압력감각의 정량화는 본 연구진에서 자체 개발한 장비(Fig. 2)를 이용하였다. 이 장비의 원리는 피실험자가 전기자극을 받으며 압력을 느낄 때 그 느끼는 크기만큼 반대 손으로 장비를 눌러 압력을 만들어 내도록 하여 그 때 발생하는 압력을 수치화하는 것으로 그 결과의 유효성을 확인한 바 있다.¹⁴

3. 결과

3.1 진동감각의 순응에 주파수가 미치는 영향

저주파자극을 지속적으로 했을 때, 저주파진동 감각과 고주파진동감각의 PT는 각각 15.3%, 5.1% 증가했다. 감각의 순응이 있을 때와 없을 때의 PT가 변화가 없다는 가설로 t-test를 했을 때 p값이 0.13으로 압력의 PT가 증가했다고 볼 수는 없었다.

전기적으로 고주파자극을 지속적으로 했을 때, 저주파진동감각과 고주파진동감각의 PT는 각각 16.3%, 38.5% 증가 했다. 감각의 순응이 있을 때와 없을 때의 PT가 변화가 없다는 가설로 t-test를 했을 때 p값이 0.0002로 압력의 PT가 증가했다고 볼 수 있다.

Fig. 3은 압력감각의 PT를 nomalize하여 (a) 저주파자극을 지속적으로 한 뒤 고주파 자극에서 압력감각의 PT(●)와 (b) 고주파자극을 지속적으로 한 뒤 저주파자극에서 압력감각의 PT(●)를 감각의 순응이 전혀 없을 때 압력감각의 PT(X)에 대하여 나타낸 그래프이다.

3.2 감각의 순응을 이용한 선택적 감각유발

Fig. 4는 (a) 고주파 자극을 지속적으로 한 뒤, 저주파 자극을 했을 때와 (b) 저주파 자극을 지속적으로 한 뒤, 고주파 자극을 했을 때 피실험자가 느끼는 압력감각을 감각의 순응이 전혀 발생하지 않은 상태에서 저주파자극과 고주파자극을 했을 때 피실험자가 느끼는 압력감각의 크기와 비교 했을 때 감소비율을 나타낸 그래프 이다.

고주파진동감각을 선택적으로 유발할 수 있는지 확인하기 위해 이전자극이 전혀 없는 상태에서 저주파자극 했을 때와 고주파자극을 지속적으로 자극한 뒤 저주파자극을 했을 때, 피실험자가 느끼는 압력감각은 이전자극이 전혀 없을 때 보다 고주파자극을 지속적으로 한 뒤 저주파 자극을 했을 때 46.4% 감소했으며 모든 피실험자가 압력이 감소했다고 느꼈다. 또한 62.5%의 피실험자가 고주파로 지속적인 자극을 한 뒤 저주파로 자극을 했을 때 저주파진동감각을 더 선명하게 느꼈다고 서술 했다.

고주파진동감각을 선택적으로 유발할 수 있는지 확인하기 위해 이전자극이 전혀 없는 상태에서 고주파자극 했을 때와 저주파자극을 지속적으로 자극한 뒤 고주파자극을 했을 때, 피실험자가 느끼는 압력감각은 이전자극이 전혀 없을 때 보다 저주파자극을 지속적으로 한 뒤 고주파자극을 했을 때 53.2% 감소했으며 마찬가지로 모든 피실험자가 압력이 감소했

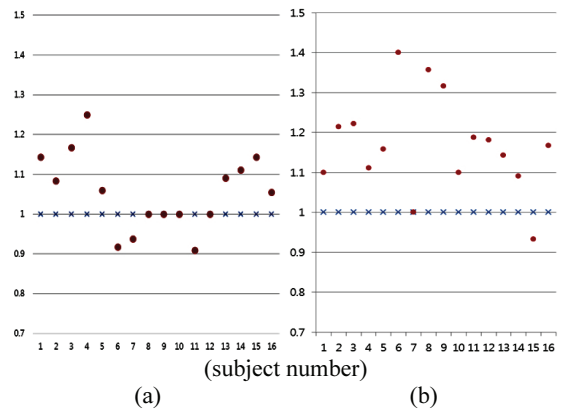


Fig. 3 Effects of stimulating frequency on the adaptation of vibration sensation

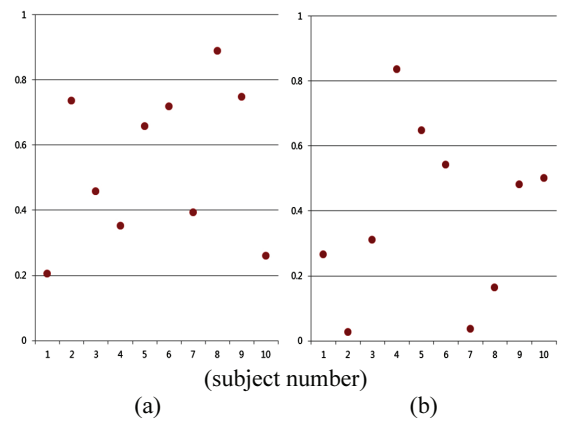


Fig. 4 Pressure perception intensity after adaptation, normalized with respect to pressure perception intensity without adaptation; (a) High-Frequency adaption (b) Low-Frequency adaption

다고 느꼈다. 또한 75%의 피실험자가 저주파로 지속적인 자극을 한 뒤 고주파로 자극을 했을 때 고주파진동감각을 더 선명하게 느꼈다고 서술했다.

4. 토의 및 고찰

4.1 진동감각의 순응에 주파수가 미치는 영향

선택적 감각유발에 감각의 순응을 이용하는 것은 진동감각을 느낄 때에 항상 압력감각을 느끼기 때문에 원하지 않는 압력감각을 순응을 시켜 진동감각만을 느끼게 하기 위함이다. 저주파로 지속적인 자극을 하여 압력감각을 느끼는 신경섬유를 순

응 시키고 그 직후에 고주파 자극을 해 줌으로써 고주파진동감각만을 느끼게 하고, 고주파로 지속적인 자극을 하여 압력감각을 느끼는 신경섬유를 각각 순응시키고 그 직후에 저주파자극을 해 줌으로써 저주파진동감각만을 느끼게 하는 것이 목표다. 따라서 감각의 순응을 이용하여 선택적 감각유발을 하기 위해서는 저주파자극을 지속적으로 했을 때 고주파진동감각을 느끼는 신경섬유는 순응이 되어서는 안되고, 고주파자극을 지속적으로 했을 때에는 저주파진동감각을 느끼는 신경섬유는 순응이 되지 않아야 한다. 하지만 실험 결과에 의하면 저주파자극을 지속적으로 했을 때에 고주파진동감각을 담당하는 신경섬유의 순응은 발생하지 않았지만, 고주파자극을 지속적으로 했을 때 저주파진동감각을 담당하는 신경섬유의 순응은 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

하지만 저주파진동감각의 PT와 압력감각의 PT를 비교해 본 결과, 고주파자극을 지속적으로 했을 때 저주파진동감각을 담당하는 신경섬유의 순응이 발생하긴 하지만 압력감각을 담당하는 신경섬유의 순응이 더 많이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 5(a)는 이전자극이 전혀 없을 때 저주파진동감각의 PT를 압력감각의 PT로 나눈 값이며, Fig. 5(b)는 고주파로 지속적인 자극을 한 뒤, 저주파진동감각의 PT를 압력감각의 PT로 나눈 값이다. 이전 자극이 전혀 없을 때에는 모든값이 1 이상으로, 모든 피실험자의 저주파진동감각의 PT가 압력의 PT보다 높았으나, 고주파자극을 지속적으로 한 뒤에는 저주파진동감각의 PT가 압력의 PT보다 높은 경우가 21.4%에 불과했다.

진동감각의 PT만 비교했을 때에는 고주파진동감각의 선택적 유발은 가능하지만, 고주파자극을 지속적으로 했을 때 저주파진동감각의 PT도 증가하기 때문에 저주파진동감각의 선택적 감각유발은 어렵다고 할 수 있다. 하지만 압력감각의 PT와 저주파진동감각의 PT를 비교해 보면 고주파로 지속적인 자극을 했을 때 압력감각이 더 많이 순응되어 저주파진동감각보다 PT가 높아지기 때문에 지속적인 고주파 자극 직후에 저주파자극을 하면 압력감각을 거의 느끼지 못하고 저주파진동감각만을 느끼는 선택적 감각유발이 가능할 것이라 판단된다.

4.2 감각의 순응을 이용한 선택적 감각유발

62.5%의 피실험자가 저주파진동감각을 더 선명

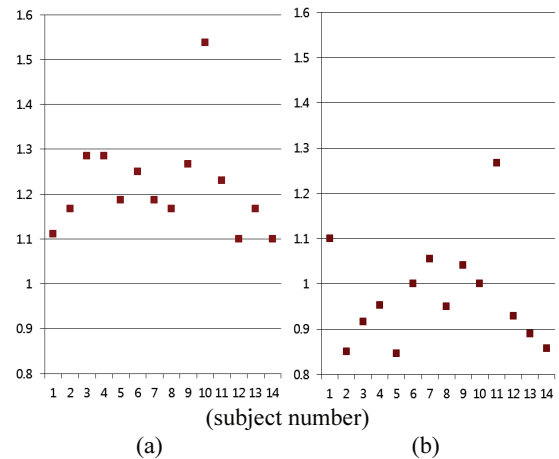


Fig. 5 Ratio of low-frequency vibration PT to pressure PT, (a) without adaptation and (b) after high-frequency adaptation

하게 느꼈다고 묘사하였으며 75%의 피실험자가 고주파진동감각을 더 선명하게 느꼈다고 묘사했다는 점에서 선택적 감각유발을 하는 한 방법으로 감각의 순응을 이용하는 것은 충분히 가능성이 높다고 판단 되어진다.

감각의 순응을 유발하기 전보다 진동감각을 더욱 선명하게 느끼긴 하지만 많이 약해진 상태의 압력감각이 동시에 유발 되었다. 압력감각이 사라진 것이 아니라 약하게나마 남아있다는 점에서 완전하게 선택적 유발을 성공했다고 할 수는 없다. 또한 감각의 순응을 이용한다는 특성상 원하는 한 가지 만의 감각을 유발하기 위해서는 준비시간이 필요하기에 연속적으로 원하는 감각을 유발할 수 없으며, 준비 후에도 신경섬유의 회복이 일어나기 이전까지만 선택적으로 감각을 유발할 수 있다는 단점을 가지고 있다. 감각의 순응을 이용하여 선택적 감각유발을 하기 위해서는 더 빠른 시간 내에 압력감각을 효과적으로 순응시키는 방법이 연구되어야 해결할 수 있을 것이다.

4.3 감각의 순응을 이용한 선택적 감각유발의 활용범위

본 연구는 신경세포가 전기자극에 민감하게 반응하는 것을 실험적으로 다시 한번 확인함으로써 전기생리학적인 재료를 제공하고 있다. 뿐만 아니라 감각을 선택적 유발할 수 있는 방법을 activation function 혹은 current density를 이용하여 이론적인

접근을 하는 것 외에 실험적으로 접근을 하는 방법이 있다는 것을 제시했으며, 유효한 결과를 보여 주고 있다는 점에서 큰 의미를 가진다.

반면 선택적으로 감각을 느낄 수 있다는 가능성은 제시하고 있지만 그것이 선택적으로 해당 신경섬유를 활성화(activation)시키는 것이 아니라 다른 신경섬유의 활동전위가 발생하는 것을 사전처리, 즉 순응시켜 막음으로써 원하는 감각을 단순히 유발(elicitation)하는 것이라는 큰 단점을 가지고 있다. 감각의 순응을 이용하는 것이 아니라 멀티채널을 이용하는 등 다른 방법을 이용하여 원하는 신경섬유만을 활성화시키는 연구가 추가적으로 이루어져야 할 것이다.

5. 결론

본 연구는 두 가지 이상의 감각을 동시에 느낄 때, 원하지 않는 감각을 순응시켜 원하는 감각만을 유발하는 선택적 감각유발에 관하여 연구하였다. 그 결과 선택적 감각유발(selective elicitation)의 가능성을 충분히 확인할 수 있었으며, 실제로 부분적인 선택적 감각유발을 구현할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단-공공복지안전사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2010-0020447)

REFERENCES

- Vallbo, B., Olsson, K., Westberg, K., and Clark, F., "Microstimulation of Single Tactile Afferents from the Human Hand," *Brain*, Vol. 107, No. 3, pp. 727-749, 1984.
- Johansson, R. S., Landstrom, U., and Lundstrom, R., "Responses of Mechanoreceptive Afferent Units in the Glabrous Skin of the Human Hand to Sinusoidal Skin Displacements," *Brain Research*, Vol. 244, No. 1, pp. 17-25, 1982.
- Ochoa, J. and Torebjörk, E., "Sensations Evoked by Intraneural Microstimulation of Single Mechanoreceptor Units Innervating the Human Hand," *The Journal of Physiology*, Vol. 342, No. 1, pp. 633-654, 1983.
- Carrozza, M. C., Cappiello, G., Micera, S., Edin, B. B., Beccai, L., et al., "Design of a Cybernetic Hand for Perception and Action," *Biological Cybernetics*, Vol. 95, No. 6, pp. 629-644, 2006.
- Tyler, D. J. and Durand, D. M., "Functionally Selective Peripheral Nerve Stimulation with a Flat Interface Nerve Electrode," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 10, No. 4, pp. 294-303, 2002.
- Kajimoto, H., Kawakami, N., Maeda, T., and Tachi, S., "Electrocutaneous Display with Receptor Selective Stimulations," *Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics)*, Vol. 85, No. 6, pp. 40-49, 2002.
- Kajimoto, H., Kawakami, N., and Tachi, S., "Optimal Design Method for Selective Nerve Stimulation and Its Application to Electrocutaneous Display," *Proc. of the Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 303-310, 2002.
- Ara, J., Hwang, S. H., Song, T., and Khang, G., "Effects of the Stimulus Parameters on the Tactile Sensations Elicited by Single-Channel Transcutaneous Electrical Stimulation," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 15, No. 2, pp. 305-313, 2014.
- Hwang, S. H., Song, T., and Khang, G., "Perception Intensity and Frequency of Pressure and Vibration Elicited by Electrical Stimulation," *Proc. of the International Conference on Life Science and Biological Engineering*, pp. 952-959, 2014.
- Crook, M. N. and Crook, H., "Adaptation to Cutaneous Pressure," *The American Journal of Psychology*, Vol. 47, No. 2, pp. 301-308, 1935.
- Zigler, M. J., "Pressure Adaptation-Time: A Function of Intensity and Extensity," *The American Journal of Psychology*, Vol. 44, No. 4, pp. 709-720, 1932.
- Bensmaïa, S. J., Leung, Y. Y., Hsiao, S. S., and Johnson, K. O., "Vibratory Adaptation of Cutaneous Mechanoreceptive Afferents," *Journal of Neurophysiology*, Vol. 94, No. 5, pp. 3023-3036, 2005.
- An, B., Khang, G., Hwang, S. H., and Song, T., "Effects of the Previous Stimulation on the Electrically-Elicited Tactile Sensation," *Proc. of KSPE Spring Conference*, p. 1195, 2014.
- Ma, J., Khang, G., An, B., Hwang, S. H., and Song, T., "Quantification of the Perception Intensity of Electrically-Elicited Pressure Sensation," *Proc. of KSPE Spring Conference*, pp. 973-974, 2015.