

◆ 특집 ◆ 고령자 / 장애인의 활동 보조 기계 기술

다채널 진동자극이 체성감각에 미치는 영향

Effect of Multi-Channel Vibration Stimulation on Somatosensory Sensibility

배태수^{1,✉}, 김형재^{1,2}, 김솔비¹, 장윤희¹, 김신기¹, 문무성¹
Tae Soo Bae^{1,✉}, Hyung Jae Kim^{1,2}, Sol Bi Kim¹, Yun hee Chang¹, Shin Ki Kim¹ and Mu Seong Mun¹

¹ 재활공학연구소 (Korea Orthopedics & Rehabilitation Engineering Center.)

² 경희대학교 대학원 동서의료공학과 (Biomedical Engineering, Graduate School, Kyunghee University)

✉ Corresponding author: bmebae@korec.re.kr, Tel: 032-500-0771

Manuscript received: 2011.3.30 / Accepted: 2011.4.28

Although prosthetic training was received, most of amputees mainly depend on visual feedback to use prostheses, not on cutaneous and proprioceptive sensibility. Our objective of this study was to determine if there are changes in the somatosensory sensibility of amputees compared to non-amputees using multi-channel vibration stimulation system. One transradial amputees and ten non-amputees were involved. To investigate changes of residual somatosensory sensibility at stump, we set up custom-made vibration stimulation system including eight actuators (4 medial and 4 lateral) and GUI-based acquisition system. The results showed that there was similar pattern of subjective response at most of channels among group as stimulation increases. However, amputees' subjective response at channel 8 for 238Hz vibration was more sensitive than that of healthy persons. With respect to channels, response at channel 4 (medial) corresponding region to flexor carpi ulnaris for transradial amputees was most sensitive than other channels. In addition, sensitivity of four medial channels was on average about 0.5 scale than that of four lateral channels. Somatosensory sensibility was amputee, women, and men in sensibility order.

Key Words: Multi-Channel Stimulation (다채널 자극), Somatosensory Sensibility (체성감각), Amputees (절단환자들), Vibration Frequency (진동주파수)

1. 서론

절단장애인의 경우 의지나 의족 등과 같은 재활보조기를 사용함으로써 소실된 신체 부위의 기능을 대체하고 있으며, 마비환자나 고령자의 경우에도 휠체어나 보행 보조기기 등을 이용하여 움직임과 이동의 불편함을 기능적으로 대체하고 있을 뿐이다. 지금까지 이들을 위한 Prosthesis 기반의 재활보조기구들은 장애인들의 신체나 기능을 대신하는 정도, 즉 기능적 회복에 주안점을 두고 대다

수의 연구가 수행되었다. 그러나 외부자극에 대하여 느낄 수 없으므로 인해 기능적 재활에의 관심도 저하될 수 밖에 없었고, 장애인들의 삶의 질과 삶의 만족도도 떨어질 수 밖에 없었다. 관절기능 이상이나 근력약화의 경우 외골격 구조의 wearable suit 등과 같은 의지(Prosthesis)를 착용함으로써 일상생활 동작 시 근력을 지원하고 관절부하를 경감시켜 주는 여러 기술들이 소개되고 있으나, 둔화된 피부의 잔존감각을 보장하거나 소실된 감각을 전달해 주는 기술은 찾아보기 어렵다. 따라서 잔존

감각(Residual sensibility)을 통해 외부환경의 변화에 즉각적으로 반응하고, 고령자 및 장애인의 일상생활과 재활과정에서의 효율성을 제고하기 위해서는 외부자극에 대하여 피부의 잔존감각 특성을 파악하는 것이 필요하다.

인간의 피부에는 주요한 4 종의 촉각수용기로서 마이스너 소체(Meissner corpuscle), 머켈신경(Merkel ending), 파치니 소체(Pacinian corpuscle), 루피니 신경(Ruffini ending)이 존재한다. 이 가운데 진피의 지문 봉우리 사이에 위치하는 마이스너 소체와 피하 지방에 위치하는 파치니 소체는 외부 진동에 대하여 각각 고주파 영역(60-1000Hz)과 저주파 영역(2-100Hz)의 진동자극을 감지하는 것으로 알려져 있다.¹ 또한 촉각수용기의 분포 및 밀도에 있어서는 몸통이나 사지근(extremity muscles)의 중심부보다 얼굴과 사지 말단부위가 더 조밀하며 특히 손끝과 입술에 수용기의 밀집이 가장 큰 것으로 알려져 있다. 손끝의 경우 노화에 대한 소체개수의 감소가 다른 부위에 비해 적음으로 인해 나이에 따른 영향이 적은 것으로 보고되고 있다.^{2,4} Meg Stuart 는 마이스너 소체가 활성화되는 30Hz 와 파치니 소체가 활성화되는 200Hz 에서의 손끝, 전완, 어깨, 볼 부위의 감각 인지 정도에 연령대별 차이를 연구하였고, 그 결과 손끝이 가장 예민하며 전완, 어깨 얼굴 순이었다. 주파수 별 비교에서는 저주파(30Hz)영역대보다 고주파 영역(200Hz)에서 상대적으로 인지를 잘하는 것으로 나타났다.^{4,6}

본 연구를 통해서서는 다채널 진동자극시스템을 이용하여 주파수 변화에 따른 다단계 진동자극이 정상인 및 상지절단자의 체성감각에 어떤 영향을 주는지를 분석하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 진동자극 모터 특성

본 연구에서는 진동자극시스템의 핵심요소로서 DC 전압제어가 가능한 진동소자(Vibrotactile motor)를 사용하였다. 코인 형태(∅10, 두께 3mm)로 되어 있으며, 0.6V 에서 구동 가능한 저전압 구동모터를 사용하였다. 인가전압은 0.6V~3.6V 로 설정하였으며, 1.0V 미만은 0.1V 간격으로, 1.0V 이상의 경우 0.2V 간격으로 전압을 주었다. 각 전압단계에 따른 진동주파수를 측정하였으며, 각 전압단계별 반복 측정에 따른 주파수 편차를 계산해 본 결과 동일한 주파수에서 일반 휴대폰 진동모터(평균 5.87 Hz)

에 비해 본 연구에서 사용된 진동소자가 낮은 주파수 편차(평균 1.89 Hz)를 보였다.

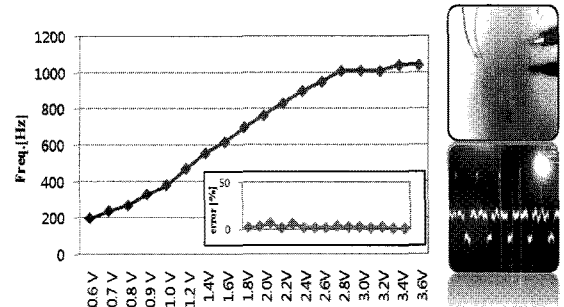


Fig. 1 Frequency of vibration system by oscilloscope and its error ratio

진동주파수는 진동소자의 고유특성에 따라 인가전압에 따라 200Hz~1000Hz 고주파 영역과 180Hz ~330Hz 중저주파 영역 등으로 각각 제어할 수 있었다.

진동소자를 이용하여 진동주파수를 제어함으로 인체 피부에 자극을 인가했을 때, 자극이 인체에 어느 정도 영향을 주는지를 파악하기 위하여 진동 자극주파수 변화에 따른 가속도 변화를 측정함으로 진동자극의 크기를 계산해 보았다. Shore 경도에 따라 30%~70%의 실리콘 블록 5 종과 금속블럭 1 종 위에 진동소자와 3 축 가속도 센서(339A30, PCB Piezotronics Inc., USA)를 직렬로 연결한 후 모니터링 장비(HVM100, Larson Davis, USA)을 이용하여 실시간으로 가속도값을 수집한 후 비교분석 하였다. 그 결과 모든 경우에서 인가전압이 높아질수록 가속도값이 증가하는 양상을 보였다. 금속블

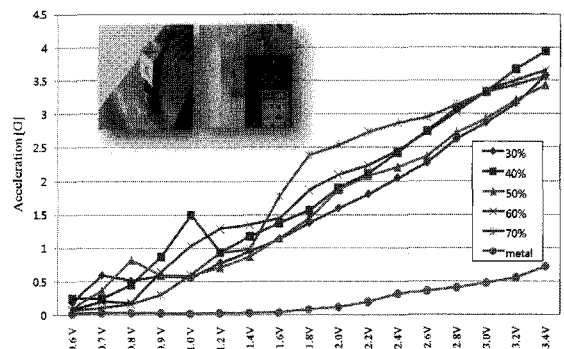


Fig. 2 Acceleration of vibrotactile motor attached on 6 different surfaces(metal and 5 polymer range from 30% to 70%) as input voltage increases

력에 비해 실리콘블럭이 보다 민감하게 반응하는 양상을 보였지만, shore 정도 차이에 의한 가속도의 유의한 차이는 확인할 수 없었다.

2.2 진동자극 시스템 구성

다채널 진동자극이 체성감각에 어떠한 영향을 주는 지를 실험적으로 파악하기 위한 장비는 현존하지 않으므로, 본 연구에서는 실험에 필요한 시스템을 맞춤형으로 구축하여 임상실험을 하였다.

구축된 진동자극시스템은 크게 진동자극부, 자극설정부, 그리고 자극반응부로 나누어서 구성하였다. 먼저 자극인가부는 탄성밴드 상에 8 개의 진동소자가 배열되어 제작된 신체고정지그와 자극제어보드로 구성되어 있다. 8 개의 진동소자는 신체의 해부학적 중심을 기준으로 내측(채널 5~8)과 외측(채널 1-4)에 각각 4 개씩 배치되도록 구성하였으며, 설치된 진동소자들은 자극제어보드를 통해 개별제어가 가능하도록 하드웨어를 구성하였다. 자극설정부에서는 임상실험 시 필요한 임상프로토콜을 설정하는 부분으로써 자극채널 설정, 자극단계 설정, 자극증가/감소량 설정, 자극시간 설정, 자극패턴 구성 등으로 구성되어 있다. 이를 통해 신체 각 부위에 대한 각각의 프로토콜을 Template 화 하여 사용할 수 있도록 하였다. 마지막으로 인가된 자극에 대한 피검자의 반응을 획득하는 자극반응부에서는 피검자의 주관적 판단을 정량화시킴으로 공학적 데이터 베이스를 구축하기 하는데 그 목적을 두고 있는 부분이다. 따라서 인가된 자극에 대하여 자극이 없을 때는 'zero'로 표현하고, 그 외의 경우에 대해서는 최소자극 '1'에서 최대자극 '10'으로 구별하여 개별적으로 반응할 수 있도록 버튼식의 반응장치를 구현하고자 하였다. 구현된 진동

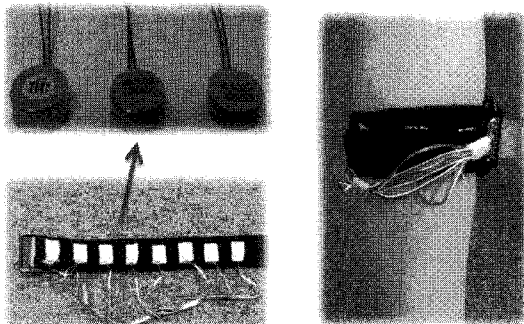


Fig. 3 Custom-made vibration system with arm band type and setup on dorsal forearm

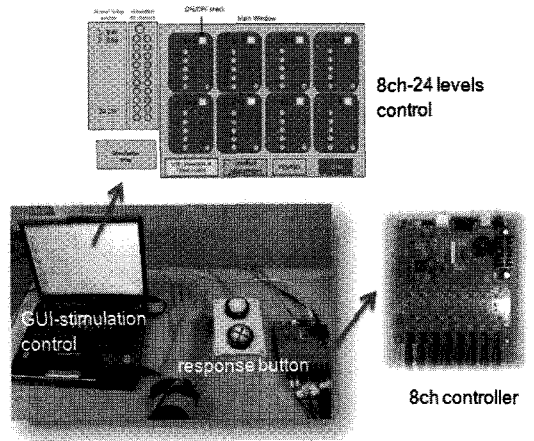


Fig. 4 Experimental system for somatosensory sensibility test using vibrotactile actuator

자극시스템을 통하여 자극에 대한 각 부위의 민감 정도와 부위를 획득하고, 감각전달의 도구로 적용하기에 적합한 자극 정도를 추가적으로 획득하고자 하였다.

2.3 임상실험

본 연구는 정상인 10 명(남 5 명, 여 5 명)과 상지 전완부(forearm) 절단자 1 명을 대상으로 실험을 실시하였으며, 측정부위는 근전전동의수 착용자의 잔존 단단부 길이가 전완부의 35%~55% 정도임을 감안하여 동일한 부위-주관절 근위부에서 원위부 방향으로 25% 지점-에서 정상인과 상지절단자를 대상으로 각각 측정하였다.

진동자극시스템의 구동전압은 0.6V~3.6V 로 변하는 중저주파 영역용 진동소자를 이용하여 실험하였으며, 인가된 주파수는 180Hz 에서 330Hz 인데 이는 사람이 진동에 가장 민감한 주파수 대역인 250Hz 부근을 포함하고 있는 범위이다.^{5,6} 따라서 본 실험 주파수 대역은 신체 피부의 진동자극에

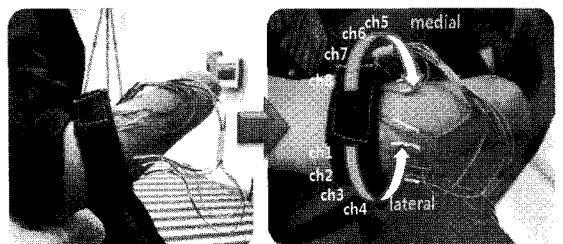


Fig. 5 Transradial amputees(down) with multi-channel actuators

대한 민감성을 고려하여 200Hz~250Hz 를 포함하는 200Hz, 227Hz, 232Hz, 238Hz 의 4 가지 주파수 대역을 대표적으로 측정하였으며, 이 때 진동자극의 크기(amplitude)는 0.03G, 0.06G, 0.19G, 그리고 0.22G 로 나타났다.

실험절차는 다음과 같다. 먼저 개발된 진동자극시스템의 구동 전압대별 주파수 변화에 따른 감각 인지반응을 알아보기 위하여 일정한 간격으로 배열된 8 개의 진동센서가 부착된 밴드를 전완 근위부 25% 지점에 착용한 후 동일 주파수에 대해 각 8 채널에 무작위로 자극을 부여하는 방식으로 순서에 대한 편향성을 배제하였다. 또한 자극 시간은 0.7sec 동안 자극을 부여하였으며, 각 자극에 대한 인지 정도를 즉각적으로 응답한 후에 다음 자극을 부여하는 방식으로 실시하였다. 자극에 대한 응답방식은 동일 주파수 대역의 8 채널 진동자극이 무작위로 부여될 때에 각 피부영역에서 인지되는 감각의 정도를 판단하여 그 다양성에 대해 10 단계의 스케일로 구분된 검사지에 해당되는 감각 인지 레벨을 기록하도록 하였다. 위와 같은 실험 과정을 4 가지 주파수 대역에서 무작위로 동일하게 실시하였다.

3. 실험결과

3.1 자극빈도 변화에 대한 자극 반응

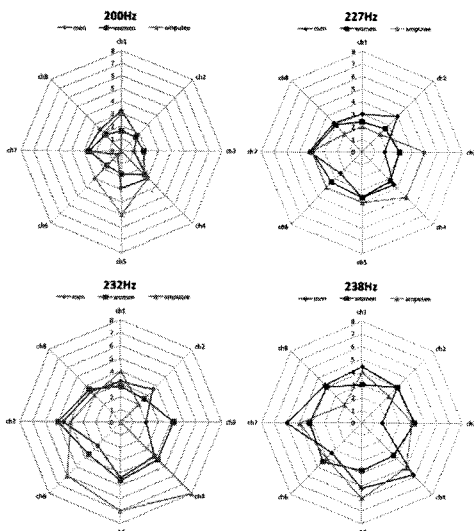


Fig. 6 Somatosensory sensibility with respect to vibration frequency for multi-channel actuators

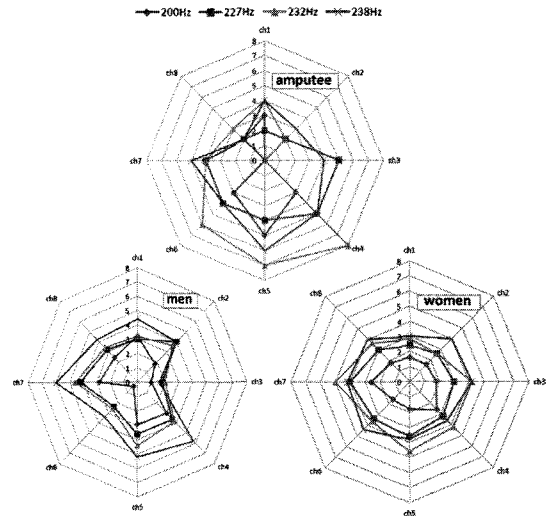


Fig. 7 Subjective response for multi-channel stimulation among groups

동일한 자극에 대하여 정상인 남, 여, 그리고 상지절단자 간의 반응 차이를 분석해 보았다. 그 결과 진동자극의 크기가 200Hz 에서 238Hz 로 증가함에 따라 모든 군에서 자극반응 정도가 전반적으로 증가하는 것으로 나타났다. (Fig. 6)

정상인 여자군에서는 전반적으로 모든 채널에서 골고루 자극반응 정도가 증가하는데 반해, 정상인 남자군과 절단자 군에서는 편중되어 반응하는 것으로 나타났다. 특히 절단자 군에서는 232Hz 와 238Hz 에서의 반응이 정상인군과는 다르게 232Hz 에서의 자극반응 정도가 238Hz 일 때보다 더 크게 나타났다. (Fig. 7)

3.2 자극 부위에 따른 반응

채널 1 에서 채널 4 는 외측부위로, 채널 5 에서 채널 8 까지는 내측부위로 분류하여 각각 내측과 외측의 자극반응 정도를 비교해 보았다. 그 결과 내측과 외측 모든 경우에 있어서 절단자군, 여자군, 그리고 남자군 순으로 자극반응 정도가 큰 것으로 나타났다. 또한 모든 군에서 외측부위보다는 내측부위에서 자극반응 정도가 보다 큰 것으로 나타났다. (Fig. 8)

4. 토론

기존의 진동자극의 접촉면적과 주파수에 관한 연구에서는 고주파에서는 접촉면적 크기에 따라

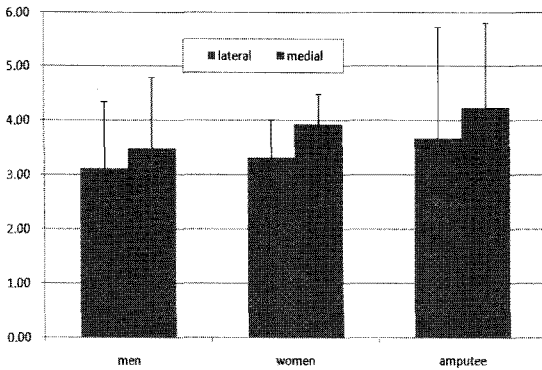


Fig. 8 Comparison of somatosensory sensibility between medial and lateral part of forearm

역치 값이 영향을 받는 반면 저주파에서는 아무리 큰 접촉면이어도 역치에는 영향을 주지 않음을 보고 하였는데, 이는 체성감각에 대하여 진동자극이 공간적 가중(spatial summation)이 있음을 보여준다.⁷

공간적 가중과 더불어 고주파 영역은 시간적 가중 작용(temporal summation)도 일어난다. 저주파와 달리 고주파는 어느 지점 이상의 시간이 주어지면 거의 일정한 역치 값을 나타낸다.⁸⁻¹⁰ 진동감각은 지속시간의 증가함에 따라 역치의 값은 점진적으로 감소하는 현상을 보이는데, 고주파에서는 자극 지속 시간이 1000ms 이상이면 역치가 일정수준으로 유지하게 된다.^{11,12} 이 역시 고주파 영역에서만 활동하는 파치니 소체에 의한 시간적 가중으로 이러한 현상이 발생하게 된다.⁸⁻¹² 따라서 공간 및 시간적 가중현상을 고려하여, 최적자극량과 자극부위, 그리고 자극시간에 대한 심도있는 연구가 필요하다.

4.1 최적 자극량

최적의 자극을 유도할 수 있는 주파수대의 선정은 시간적 가중과 더불어 공간적 가중으로부터의 영향을 최소화할 수 있는 주파수 영역을 선정해야 할 것으로 사료된다. 임상에서 치료분야에 응용되고 있는 진동자극은 근육의 근방추(muscle spindl)를 자극하여 근육 수축을 보다 효과적으로 할 수 있도록 유도하는 측면에서 다양 기구들이 개발 응용되고 있다. 이런 기구들은 대부분이 100Hz 미만의 저주파 대역의 진동자극을 사용하고 있다. 그러나 장시간 반복해서 사용하는 일상생활 동작 관련 기기들의 고주파 대역 진동자극은 근피로(muscle fatigue)를 유발할 수 있다는 문제점을 안

고 있으므로 근육의 활동성을 제한하지 않고, 근 피로를 유발하지 않으면서 감각을 효과적으로 전달할 수 있는 주파수대의 선정이 매우 중요하다고 할 수 있다.

4.2 최적 자극 부위

본 연구에서 전완부의 근위 25% 지점의 둘째 전체를 일정한 간격으로 진동 자극을 부여한 결과 요골에 조금 더 근접해 있는 요골수근신전근(extensor carpi radialis) 부근에서는 동일주파수대 진동자극에 대한 민감성이 감소해 있는 것을 알 수 있었으며, 전완부 내측 척골수근굴곡근(flexor carpi ulnaris)부근에서는 동일자극에 대한 민감성이 상대적으로 증가됨을 알 수 있었다. 이러한 결과는 선행연구에서 지방층이나 근육의 분포 상태에 따라 진동자극의 인지가 다르게 나타나며, 진동자극이 골 주변보다는 골 주변에서 멀수록 그 민감성이 증가한다는 사실을 잘 반영하는 결과라 할 수 있다.

진동감각인지와 수용기의 밀집정도가 높은 상관성을 가지고 있음을 감안할 때 본 연구에서 자극 부위에 대한 선정을 민감한 부위로 하거나 아니면 조금 덜 민감한 부위로 선정해야 할지는 연구를 통해 진동자극 부위에 대한 가이드라인을 제시할 필요가 있다.

4.3 최적 자극 시간

최적자극시간과 자극 방법, 자극 간격 등의 선정은 감각을 효과적으로 전달함에 있어 매우 중요한 요소이지만 최적 자극 시간에 대한 연구들은 매우 미흡한 실정이다. 또한 자극 간격(stimuli interval)도 진동을 인지하는데 있어 시간의 영향과 함께 배제할 수 없는 중요한 요인이라 할 수 있다. 향후 이러한 연구들을 배경으로 고주파 및 저주파 영역대의 진동자극이 시간의 변화에 따라 어떻게 변화하는지, 진동간격의 차이에 따른 감각인지 반응의 차이 등에 대한 다양한 연구들이 진행되어야 할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구를 통하여 다채널 진동자극시스템을 이용하여 주파수 변화에 따른 다단계 진동자극이 정상인 남녀와 상지절단자의 체성감각에 어떤 영향을 주는지를 분석해 보았을 때, 자극크기와 자극 반응 정도는 어느 정도 비례적 관계를 확인할 수

있었으며, 자극크기 변화에 따른 신체부위의 반응 정도 평가에서는 골 주변인 외측보다는 골에서부터 떨어져 있는 내측부위에서 보다 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

향후 체성감각 실험시 시간적 가중과 공간적 가중의 영향을 고려한 최적의 자극량과 자극부위, 그리고 최적자극시간을 이용한 자극전달모듈을 개발하여 먼저 기존의 의수 혹은 의지에 적용하고자 한다. 적용방법의 경우 Armband 를 이용한 소켓의 부 착용 방식 혹은 기존 소켓내부에 매입하는 방식 등 다양한 방법으로의 접근이 가능할 것으로 사료되며, 가장 효율적이고 보편적으로 적용할 수 있는 방법들에 대해서는 향후 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

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

참고문헌

1. Bolanowski, S. J. Jr., Gescheider, G. A., Verrillo, R. T. and Checkosky, C. M., "Four channels mediate the mechanical aspects of touch," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 84, No. 5, pp. 1680-1694, 1988.
2. Johansson, R. S., Trullsson, M., Olsson, K. A. and Westberg, K. G., "Mechanoreceptor activity from the human face and oral mucosa," *Experimental Brain Research*, Vol. 72, No. 1, pp. 204-208, 1988.
3. Johansson, R. S. and Vallbo, A. B., "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.
4. Stuart, M., Turman, A. B., Shaw, J., Walsh, N. and Nguyen, V., "Effects of aging on vibration detection thresholds at various body regions," *BMC Geriatrics*, Vol. 3, pp. 1-10, 2003.
5. Hagander, L. G., Midani, H. A., Kuskowskic, M. A. and Parrya, G. J., "Quantitative sensory testing: effect of site and pressure on vibration thresholds," *Clinical Neurophysiology*, Vol. 111, No. 6, pp. 1066-1069, 2000.
6. Bartlett G., Stewart J. D., Tamblyn R., Abrahamowicz M., "Normal distributions of thermal and vibration sensory thresholds," *Muscle and Nerve*, Vol. 21, No. 3, pp. 367-374, 1998.
7. Goble, A. K., Collins, A. A. and Cholewiak, R. W., "Vibrotactile threshold in young and old observers: The effects of spatial summation and the presence of a rigid surround," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 99, No. 4, pp. 2256-2269, 1996.
8. Gescheider, G. A., Berryhill, M. E., Verrillo, R. T. and Bolanowski, S. J., "Vibrotactile temporal summation: Probability summation or neural integration?" *Somatosensory and Motor Research*, Vol. 16, No. 3, pp. 229-242, 1999.
9. Green, B. G., "Vibrotactile temporal summation: Effect of frequency," *Sensory Processes*, Vol. 1, No. 2, pp. 138-149, 1976.
10. Verrillo, R. T., "Temporal Summation in Vibrotactile Sensitivity," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 37, No. 5, pp. 843-846, 1965.
11. Gescheider, G. A., "Evidence in support of the duplex theory of mechanoreception," *Sensory Processes*, Vol. 1, No. 1, pp. 68-76, 1976.
12. Gescheider, G. A., Bolanowski, S. J., Pope, J. V. and Verrillo, R. T., "A four-channel analysis of the tactile sensitivity of the fingertip: Frequency selectivity, spatial summation, and temporal summation," *Somatosensory and Motor Research*, Vol. 19, No. 2, pp. 114-124, 2002.