

◆ 특집 ◆ 고령자 / 장애인의 활동 보조 기계 기술

진동자극에 대한 상지 절단자의 전완부 감각 인지 크기와 불쾌감 측정

The Measurement of the Magnitude of Sensory Perception and Displeasure to the Vibration Stimuli applied on Forearm in upper Limb Amputees

김솔비¹, 장윤희^{1,✉}, 김신기¹, 김규석¹, 문무성¹, 배태수²
Sol Bi Kim¹, Yun Hee Chang^{1,✉}, Shin Ki Kim¹, Gyoo Suk Kim¹, Mu Sung Mun¹, and Tae Soo Bae²

¹ 근로복지공단 재활공학연구소 (Korea Orthopedics and Rehabilitation Engineering center)

² 중원대학교 의용공학과 (Department of Medical Engineering Jungwon Univ.)

✉ Corresponding author: yhchang@korec.re.kr, Tel: 032-500-0773

Manuscript received: 2012.4.27 / Accepted: 2012.5.23

Research involving discomfort or pain related to haptic vibratory stimulation the for prosthesis users of myoelectrical hand is very lacking. Our objective of this study was to evaluate the displeasure and sensitivity of areas in forearm using vibration stimulation system between upper limb amputees and non-amputees. Twenty transradial amputees and forty non-amputees (20 youth, 20 elderly) were involved. We set up custom-made vibration stimulation system including eight actuators (4 medial parts and 4 lateral parts) and GUI-based acquisition system, to investigate changes of residual somatosensory sensibility and displeasure at proximal 25% of forearm. Eight vibration actuators were attached to the circumference of proximal 25% point of forearm at regular intervals. Sensitivity tests were used to stimulate the 120Hz and discomfort experiment was used to 37 ~ 223Hz. The subjective responses were evaluated by 10 point scale. The results showed that both groups were similar in sensitive areas. Response at around of radius was most sensitive than other areas in all subjects. Elderly group do not appear discomfort of vibrotactile; however, youth group and amputee presented discomfort of vibrotactile. Prosthesis with a vibrotactile feedback system should be developed considering the sensitivity. Furthermore, Future studies should investigate the scope of application of that principle.

Key Words: Vibration Sensory Perception (진동 감각 인지), Sensory Feedback System (감각 되먹임 시스템), Upper Limb Amputees (상지 절단자), Magnitude estimation (크기 추정), Displeasure (불쾌감)

1. 서론

근전동 의수(myoelectrical hand prosthesis)의 개발은 상지 절단자의 손 기능 회복과 일상 생활 활동을 촉진시켜 사회 복귀 및 삶의 질을 향상시켰다.¹ 그러나 근전동 의수는 시각이 차단될 경우 의수

조절에 어려움이 따르며, 시각 피드백 외에 다른 감각으로 쥐기(grip) 능력과 고유수용감각 정보를 피드백 받을 수 없다는 제한점이 있다.¹⁻³

근전동 의수의 단점을 보완하기 위해 다양한 감각 전달 시스템 관련 연구들이 진행되어 왔으며, 소실 감각을 대체하기 위하여 피부 표면에 전기적

자극이나 기계적 자극(압력 또는 진동)을 이용하여 자극을 전달하는 방법을 사용하였다.⁴ 전기적 자극을 이용하여 감각을 전달할 때에는 자극에 대한 피부 순응(skin adaptation)⁵ 과 진동 의수 조절 시스템과의 간섭 작용으로 인한 오작동을 고려해야 하며,⁶ 특히 전기 자극은 신체 통증 역치가 낮아 가용범위가 좁고 사용성이 저하되는 단점이 있다.^{5,6} 이러한 이유로 선행 연구자들은 진동을 이용한 감각 되먹임 방법을 주로 제안하였다.^{7,8}

최근 이와 관련하여 햅틱(haptic) 소자를 이용한 연구들이 활발하게 진행되고 있으며,^{1,3} 이는 인체 비삽입형으로 간편하여 안전성 측면에서 사용자들에게 각광 받고 있다. 진동자극을 인체에 적용하여 감각 피드백을 받을 경우 인체에 안전하고 스트레스를 유발하지 않는 범위 내에서 자극의 세기를 결정하는 것은 매우 중요하다. Pylatiuk¹ 등에 의하면 진동 자극 피드백 시스템이 불쾌감과 통증을 유발하지 않는다고 하였지만, 실제 근진동 의수 시스템 적용과 관련하여 절단자의 불쾌감과 통증 유발 정도에 대한 임상 연구는 매우 미흡한 실정이다.

진동 감각을 측정하는 방법으로는 역치(threshold) 측정⁹ 방법과 강도 추정(magnitude estimation) 방법¹⁰ 이 있다. 역치 측정 방법은 임상적 진단과 통증 관련 연구에 많이 사용되고 있으며, 감각의 불쾌감 인지 정도에 관련해서는 크기 추정 방법이 주로 사용된다.

따라서 본 연구는 햅틱 소자를 이용한 진동 자극 시스템을 개발하여 상지 절단자, 청년과 고령자를 대상으로 동일 진동 자극에 대한 전완부 부위별 민감도의 차이와 불쾌감을 측정하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 진동 자극 시스템

본 연구에서는 DC 전압제어가 가능한 진동 소자(DMJBK 10 series, $\phi 10$, 두께 3mm, Samsung)를 사용하였다. 본 연구에 사용된 진동소자의 고유특성은 Fig. 1 과 같으며 구동 전압이 0.6V~ 4V 로 변함에 따라 주파수는 32Hz ~257Hz, 진동 변위는 0.5 μ m~7.8 μ m, 가속도는 0.04G~5.02G 로 변화하였다(Fig. 1). 자극의 강도는 구동전압으로 조절하였으며, 구동 전압에 따른 가속도, 주파수, 진동변위의 변화 측정은 배¹¹ 등의 연구 방법을 따라 측정하

였다. 진동 자극 시스템은 선행연구 방법과 동일하게 제작 실행하였다.¹¹ 탄력 밴드에 8 개의 진동 소자를 배열하여 자극 인가부를 제작하였다. 8 개의 진동 소자는 해부학적 중심을 기준으로 외측

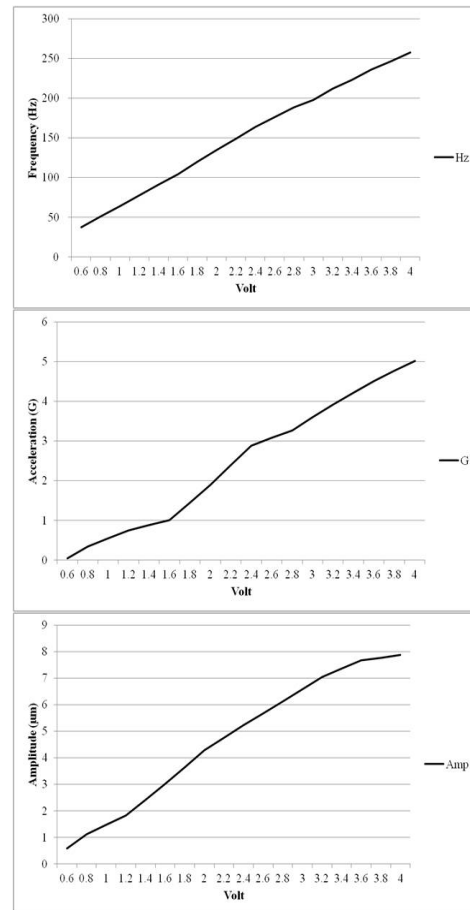


Fig. 1 Frequency(top), acceleration(middle) and amplitude (bottom) of vibrotactile motor



Fig. 2 Attached area of vibrotactile motor (left), experimental position (middle) and experimental system for sensory perception test using vibrotactile actuator (right)

(채널 2-5)과 내측(채널 1,6-8)에 각각 4 개씩 일정한 간격으로 배치하였다. 자극 설정부는 실험 방법을 설정할 수 있도록 하드웨어를 구성하였으며, 자극 반응부는 부위별 민감도를 측정하기 위해 1 에서 10 까지의 반응 버튼과 불편감 또는 통증을 측정하고자 O, X 버튼을 제작하였다(Fig. 2).

2.2 임상실험

본 연구는 청년층 정상인 남성 10 명(연령 33.0±4.5 세), 여성 10 명(연령 32.2±4.2 세), 고령층 정상인 남 10 명(연령 71.3±2.5 세), 여성 10 명(연령 69.3±3.6 세), 상지 전완부 절단자 남성 10 명(연령 48.5±9.3 세), 여성 10 명(연령 52.4±4.8 세)을 대상으로 실험을 실시하였다.

모든 피검자는 의자에 앉아 편안한 상태로 실험하였으며 정상인은 주관절을 구부린 상태에서 손목부위를 실험대 위에 올려놓고, 절단자는 단단 부를 쿠션 위에 올려놓고 단, 자극 밴드가 쿠션에 닿지 않도록 한 후 실험하였다(Fig. 2). 측정부위는 주관절에서 수근관절 방향의 근위부 25% 지점에 8 개의 진동센서가 부착된 탄력밴드를 착용하였다.

부위별 민감도 실험은 강도 추정 방법¹⁰ 을 사용하였다. 기준 자극은 진동소자에서 구동할 수 있는 최대 자극으로 하였으며 실험 자극을 부여한 뒤 최대 자극에 대비하여 상대적 인지 정도를 1(느낌이 없을 시)에서 10(기준 자극과 동일한 느낌일 시) 사이의 숫자로 표현하도록 하였다. 이때 기준자극은 4V(Amplitude 5.02G, 257Hz)을 사용하였고, 실험자극은 2.2V(Amplitude 2.39G, 149Hz)을 사용하였다. 자극 적용 시간은 0.7sec 이며, 각 자극에 대한 인지 정도를 즉각적으로 응답 후 다음 자극을 부여하였으며, 자극 부위는 무작위로 실험하였다.

불편도 실험은 정량적 감각 측정 방법 중 하나인 단계별 인가 방법(method of level)을 사용하였다.¹² 부위별 민감도에서 가장 예민한 부분에 0.6V 의 자극부터 시작하여 불편하거나 통증이 느껴지지 않으면 O 버튼, 느껴지면 X 버튼을 누르게 하였다. 단계를 올리는 수준은 단계별 인가 방법으로 하였으며 강도 단계는 0.1V, 자극시간은 0.7sec 로 하였다.

분석은 통계 프로그램(SPSS ver.12.0, SPSS Inc., USA)을 사용하였으며, 세 집단 간 차이는 일원분산분석(One way-ANOVA), 집단 내 최솟값과 최저값의 차이는 짝 비교(paired t-test)를 실시하였다. 통계적 유의수준은 p<0.05 로 설정하였다.

3. 실험 결과

3.1 자극 부위에 따른 집단 내 비교

전완의 25% 지점의 둘레를 총 8 지점으로 나눠 부위별 자극 인지 정도를 측정하였다. 채널 2 에서 5 는 외측부위로, 채널 1 과 6,7,8 은 내측부위로 분류 하여 각 집단 내 내·외측의 감각 인지 정도를 비교하였다. 세 그룹 모두 외측 부위에서 동일 자극에 대해 크게 인지하는 경향을 보였지만 통계적으로 유의하지는 않았다(Fig. 3).

본 연구 결과 집단 내 부위별 감각 인지 크기는 청년층 집단에서 채널 3 번이 가장 민감한 부위로 나타났으며 이는 가장 낮은 8 번 채널보다 유의하게 컸다(Mean ± SD, 5.45±2.25 versus 4.45 ±2.16; p=0.007; t value, 3.008; df, 19). 또한 절단자 그룹에서도 채널 2 번 부위가 가장 크게 나왔고 이는 가장 둔감했던 채널 6 번 부위보다 유의하게 민감하였으며(mean ± SD, 6.15±2.56 versus 4.80±2.19; p=0.001; t value, 3.943; df, 19), 고령자 그룹에서는 가장 낮게 나온 채널 1 번 부위보다 채널 4 번 부위에서 유의하게 크게 인지함을 알 수 있었다(Mean ± SD, 6.30±2.36 versus 5.00±2.53; p=0.002; t value, -3.650; df, 19) (Fig. 4).

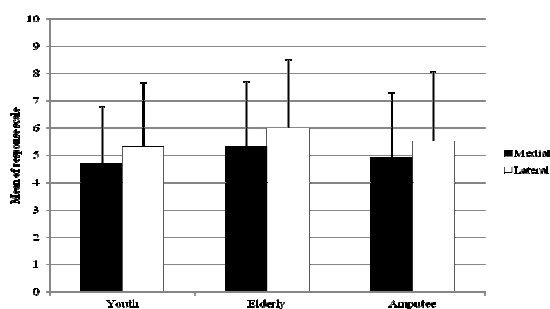


Fig. 3 Comparison of sensory perception between medial and lateral part of forearm

3.2 자극 부위에 따른 집단 간 비교

본 연구 결과 내측부위와 외측부위 집단 간 비교는 고령자, 절단자, 청년 순으로 감각 크기가 낮게 나타나는 경향을 보였으나 유의한 차이는 없었다(Fig. 4). 또한 각 채널 별로 집단간의 차이는 없으나 전반적으로 청년층이 다른 집단에 비하여 감각 인지 강도 추정 값이 낮게 측정됨을 알 수 있었다(Table 1).

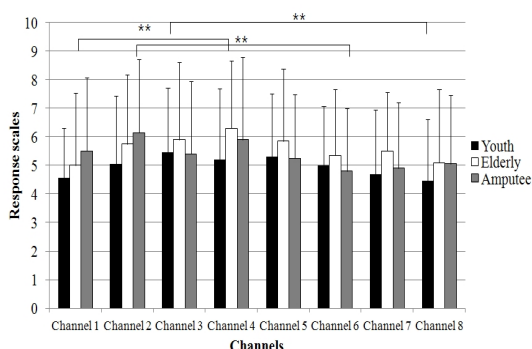


Fig. 4 Comparison of segmental sensory perception within group

Table 1 Comparison of sensory perception between groups

Area	Group	Mean ± SD	F value
Channel 1	Youth	4.55±1.76	.836
	Elderly	5.00±2.53	
	Amputee	5.50±2.58	
Channel 2	Youth	5.05±2.39	1.024
	Elderly	5.75±2.42	
	Amputee	6.15±2.56	
Channel 3	Youth	5.45±2.25	.204
	Elderly	5.90±2.71	
	Amputee	5.40±2.54	
Channel 4	Youth	5.20±2.48	.927
	Elderly	6.30±2.36	
	Amputee	5.90±2.88	
Channel 5	Youth	5.30±2.20	.407
	Elderly	5.85±2.53	
	Amputee	5.25±2.24	
Channel 6	Youth	5.00±2.07	.320
	Elderly	5.35±2.32	
	Amputee	4.80±2.19	
Channel 7	Youth	4.70±2.25	.713
	Elderly	5.50±2.06	
	Amputee	4.90±2.29	
Channel 8	Youth	4.45±2.16	.458
	Elderly	5.10±2.57	
	Amputee	5.05±2.41	

p<0.05*

3.3 진동 자극에 따른 불쾌감

진동 자극의 불쾌감 측정 결과 총 60 명 중

10%에서 불쾌감이 측정 되었다. 고령자 집단에서는 불쾌감이 나타나지 않았으며 청년 집단에서 남성 2 명과 여성 3 명이 불쾌감을 호소하였다. 또한 남성 절단자 1 명에게서 불쾌감이 나타났다(Fig. 5).

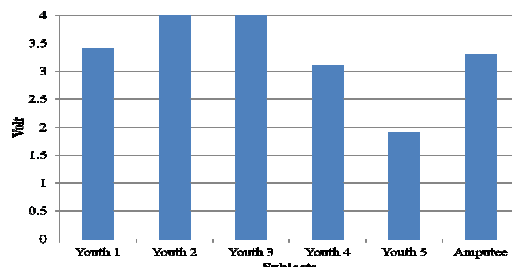


Fig. 5 Block diagram of vibratory stimulation intensity of discomfort level

4. 토론

본 연구는 동일 진동 자극에 대한 절단자와 정상인, 고령자의 감각 인지 차이와 불쾌감 차이를 알아보고자 하였다.

4.1 자극 부위에 따른 집단 내 비교

본 연구 결과 수근 신전근(wrist extensor)이 많이 분포하는 전완의 외측이 동일주파수대 진동 자극에 대한 민감도가 상대적으로 더 큰 것을 알 수 있었다. 청년군에서는 채널 3 번(전완의 외측), 고령자군에서는 채널 4 번(전완의 후외측), 절단자군에서는 채널 2 번(전완의 전외측)이 민감하게 나타났다으며 이는 모두 요골(radius) 주변부이다. 이러한 결과는 진동 감각 수용기의 밀집 정도와 밀접한 관련이 있다. 진동감각은 파치니 소체 (Pacinian corpuscle)가 주로 작용하여 감지하게 되는데, 파치니 소체는 힘줄(건)과 골 주변 연부조직에 많이 밀집해 있어 진동 자극에 가장 민감한 반응을 보이게 된다. 임상에서 진동감각 검사 시 주로 뼈 돌출부나 힘줄(건)이 있는 부위에 실시하는 것도 이러한 이유 때문이다.¹³ 또한 전완 근위부의 단면적을 보면 요골 주변은 힘줄(건)이 많이 분포한 반면 척골 주위로는 근육이 많이 분포되어 있어 이러한 해부학적 특성이 반영된 것으로 보인다.¹⁴ 특히 피하지방은 감각 인지에 영향을 주는 요인으로써 Renold and Cahill¹⁵의 연구에 의하면 지방층이 많이 분포될 수록 둔감하게 느낀다고 보고한 바 있다.¹⁶ 전완의 근육 분포를 보면 수근 신전근은 골조직

(요골)과 근접해 있고 상대적으로 수근 굴곡근보다 피하지방이 적게 분포되어 있어 내측(척골 주변)에 비하여 민감하게 반응한 것으로 사료된다.

4.2 자극 부위에 따른 집단 간 비교

진동 감각 역치 측정에 관한 선행연구를 보면 노화가 진행될수록 역치 값은 증가하고 감각은 둔화된다 보고되어 왔지만,¹⁷ 본 연구 결과 집단 간 비교에서는 유의한 차이가 없었다. 이러한 결과는 기존의 연구가 역치 측정 방법인 반면 본 연구에서는 강도 추정 방법을 사용함으로써 집단간 유의한 차이가 나타나지 않은 것으로 사료된다. 강도 추정 값은 절대 감각 인지 능력보다는 상대적 감각 크기의 구별 인지 능력 측정에 더 의미를 가지고 있다. 본 연구에서는 기존 감각 연구에서 사용되는 절대적 감각 인지 능력을 측정하지 않고 가장 큰 자극 대비 실험 자극의 값을 측정하였기에 집단 간의 유의한 차이를 발견하기 어려웠지만 고령군에서 다른 집단보다 크기 추정 값이 컸으며 청년군은 세 집단에서 가장 낮은 감각 인지 강도 추정 경향을 나타냈다. 이는 가장 큰 자극과 실험 자극의 차이 구별을 의미하는데 고령자군은 다른 집단보다 두 자극의 차이를 크게 인지 못하는 반면에 청년군은 두 자극의 차를 상대적으로 분명히 인지함을 나타낸다. 따라서 추후 연구에서는 대상자 수를 증가하여 보다 심도 있는 연구가 필요하다.

4.3 진동 자극에 따른 불쾌감

선행 연구에 의하면 진동자극 피드백 시스템은 불쾌하지 않으며 통증이 발생하지 않아 효율적이라 했지만¹ 본 연구 결과에서는 전체 대상자 60명 중 10%가 진동자극에 대한 불쾌감이 나타났다. 고령자군에서는 불쾌감이 나타나지 않았으나 청년군이 5명, 절단자 1명에서 불쾌감이 측정되었다. 이는 노화와 관련이 있는 것으로 보이며, 노화가 진행될수록 감각 수용기의 수적 감소에 따른 진동 감각의 둔화가 야기되기 때문이다.¹⁷ 또한 근육의 크기와 피하지방 분포도 감각 인지 정도에 영향을 주는데 근육이 잘 발달되고 피하지방이 적을수록 진동자극에 민감하게 반응하게 된다.^{13,15} 따라서 본 연구 결과에서 노화로 인해 근육의 크기가 감소한 고령자군이 진동소자의 가장 큰 자극에서도 다른 집단에 비해 상대적으로 둔감하게 느낀 것으로 사료된다. 또한 불쾌감이 나타난 청년군에서는

다른 피검자에 비해 체지방율이 상대적으로 낮았던 것을 알 수 있었으며 절단자군에서도 불쾌감을 보인 절단자가 가장 연령이 낮은 것을 볼 때 근육의 상태가 가장 양호했을 것으로 예측된다. 본 연구 결과 전체적으로 불쾌감 유발 비율은 10%에 지나지 않았지만 신체조직의 상태에 따라 미세진동자극에 대해서도 불쾌감이 유발될 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

선행 연구에 의하면 고주파의 경우 접촉면적 크기에 따라 역치 값이 영향을 받으며¹⁸ 저주파의 경우 진동 자극 지속 시간이 길어질수록 민감성이 증가하는 경향을 보인다.¹⁹ 따라서 향후 이러한 공간적·시간적 가중현상을 고려한 다양한 조건의 연구들이 진행되어야 할 것이다.

5. 결론

본 연구는 진동자극시스템을 이용하여 동일 자극에 대한 청년군, 고령자군, 절단자군의 전완부의 감각 인지 차이와 불쾌감 정도를 알아보았다. 연구결과 세 집단 모두 전완 근위부 25% 지점에서 동일 진동자극에 대해 요골 주위부(외측)가 척골 주위부(내측)보다 유의하게 민감하였으며, 세 집단 간 차이는 보이지 않았다. 또한 전체 대상자의 10%에서 진동자극에 대해 불쾌감을 나타내었다. 결론적으로 진동 감각 인지와 수용기의 밀집 정도가 높은 상관성을 가지고 있음을 감안할 때 진동 피드백 시스템 개발에 있어 진동 자극의 민감도와 불쾌감을 고려해야 할 것이다.

본 연구는 성별 간의 차이, 다양한 연령대와 주파수 대역의 연구가 진행되지 않은 제한점이 있으며, 사후 이를 수정 보완한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단-공공복지안전사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0020932).

참고문헌

1. Pylatiuk, C., Kargov, A., and Schulz, S., "Design and evaluation of a low-cost force feedback system for myoelectric prosthetic hands," *Journal of Prosthetics*

- and Orthotics, Vol. 18, No. 2, pp. 57-61, 2006.
2. Lundborg, G. and Rosén, B., "Sensory substitution in prosthetics," *Hand Clinics*, Vol. 17, No. 3, pp. 481-488, 2001.
 3. Chatterjee, A., Chaubey, P., Martin, J., and Thakor, N., "Testing a Prosthetic Haptic Feedback Simulator With an Interactive Force Matching Task," *Journal of Prosthetics and Orthotics*, Vol. 20, No. 2, pp. 27-34, 2008.
 4. Scott, R. N., "Feedback in myoelectric prostheses," *Clinical Orthopaedics and Related Research*, Vol. 256, pp. 58-63, 1990.
 5. Kaczmarek, K. A., Webster, J. G., Bach-y-Rita, P., and Tompkins, W. J., "Electrotactile and vibrotactile displays for sensory substitution systems," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 38, No. 1, pp. 1-16, 1991.
 6. Shannon, G. F., "A comparison of alternative means of providing sensory feedback on upper limb prostheses," *Med. Biol. Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 289-294, 1976.
 7. Shannon, G. F., "Characteristics of a transducer for tactile displays," *Bio-Medical Engineering* Vol. 9, No. 6, pp. 247-249, 1974.
 8. Sueda, O. and Tamura, H., "Sensory device for the artificial arm," 8th International Conference on Medical and Biological Engineering, 1969.
 9. Stuart, M., Turman, A. B., Shaw, J., Walsh, N., and Aguyen, V., "Effects of aging on vibration detection thresholds at various body regions," *BMC Geriatrics*, Vol. 3, Art. No. 1, pp. 1-10, 2003.
 10. Fucci, D., Petrosino, L., Schuster, S., and Belch, M., "Lingual vibrotactile threshold shift differences between stutterers and normal speakers during magnitude-estimation scaling," *Perceptual and Motor Skills*, Vol. 73, No. 1, pp. 55-62, 1991.
 11. Bae, T. S., Kim, H. J., Kim, S. B., Chang, Y. H., Kim, S. K., and Mun, M. S., "Effect of Multi-Channel Vibration Stimulation on Somatosensory Sensibility," *J. of KSPE*, Vol. 28, No. 6, pp. 651-656, 2011.
 12. Yarnitsky, D. and Sprecher, E., "Thermal testing: Normative data and repeatability for various test algorithms," *Journal of the Neurological Sciences*, Vol. 125, No. 1, pp. 39-45, 1994.
 13. Savic, G., Bergström, E. M. K., Davey, N. J., Ellaway, P. H., Frankel, H. L., Jamous, A., and Nicotra, A., "Quantitative sensory tests (perceptual thresholds) in patients with spinal cord injury," *Journal of Rehabilitation Research and Development*, Vol. 44, No. 1, pp. 77-82, 2007.
 14. IMAIOS, cross-section-anatomy-wrist-forearm-antoine-micheau-illustration-en[<http://www.imaios.com/en/Media/Images/e-anatomy/Upper-limb-diagrams/cross-section-anatomy-wrist-forearm-antoine-micheau-illustration-en>], 2010.
 15. Renold, A. E. and Cahill, G. F., "Section 5, Adipose tissue," *Handbook of Physiology*, Vol. 64, No. 2, p. 480, 1965.
 16. Bikah, M., Hallbeck, M. S., and Flowers, J. H., "Suprascutaneous vibrotactile perception threshold at various non-glabrous body loci," *Ergonomics*, Vol. 51, No. 6, pp. 920-934, 2008.
 17. Lin, Y. H., Hsieh, S. C., Chao, C. C., Chag, Y. H., and Hsieh, S. T., "Influence of aging on thermal and vibratory thresholds of quantitative sensory testing," *Journal of the Peripheral Nervous System*, Vol. 10, No. 3, pp. 269-281, 2005.
 18. 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.
 19. 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.