Journal of the Ergonomics Society of Korea
Vol.17, No.2, 1998

진동식 촉각 자극에 대한 손의 절대 민감도 반응

Human Sensitivity Responses to Vibrotactile Stimulation on the Hand : Measurement of Absolute Thresholds

이 성 일*

ABSTRACT

The objective of this study is to investigate human operator's perceptual and psychophysical responses to vibrotactile stimulation on various parts of the hand. Using a small vibrotactile display, five different loci of the hand along with two other mechanical parameters consisting vibrotactile stimulations, which are vibration frequency and number of active contactors, were examined for the effects on absolute thresholds. All test variables were found to have significant effects on thresholds. It was observed that absolute threshold is a function of vibration frequency and number of active contactors. Tactile sensitivity was the greatest at the vibration frequency of 240 Hz, and the fingertip was found to be the most sensitive locus on the hand. The area of stimulation on the hand was also found to be significant in that the sensitivity increased with the number of active contactors. The results of the study generally supported those of other previous studies. It should also be noted, however, that the conclusions from the study should be limited to the absolute sensitivity, not to the suprathreshold intensities of normal everyday contact with the hands.

* 성균관대학교 산업공학과

1. 서 론

촉각은 사람의 감각 중에서 시각, 청각 다음으로 자주 사용되는 감각기관이다. 사람이 갓 태어났을 때에는 촉각이 지배적으로 사용되는 감각기관이나, 성장하면서 주 감각기관이 해상도가 높은 시각으로 바뀌게 됨은 이미 널리 알려져 있는 사실이다. 사람들이 촉각에 의존하려고 하는 습성은 박물관이나 전시회에 가면 흔히 볼 수 있는 "만지지 마시오"라는 경고문을 통해서 잘 나타나고 있는데, 이런 사실은 촉각이 매우 주요한 감각기관임을 나타내고 있는 것이다. 특히 인간의 중요한 감각체계의 하나인 촉각에 대한 기초적인 이해는 시각이나 청각에 비해 상대적으로 뒤져있기에 체계적인 연구의 중요성이 각별하다고 할 수 있다.

촉각에 의해 전달되는 정보로는 물체의 모양과 재질, 탄성, 점성, 온도 등이 있다. 촉각으로 전달되는 자극은 주로 피부가 물체의 접촉 표면을 문지르면서 지나갈 때에 생기는 진동에 의해 나타나는데, 이로부터 접촉으로 이루어지는 촉각적 자극을 주파수를 갖는 진동의 형태로 표현할 수 있다. 인간에게 진동에 의한 촉각적 자극을 사용하여 효과적으로 정보의 전달, 또는 통신을 이루기 위해서는, 첫째, 진동파장을 구성하고 있는 기계적 요인(parameter)이 피부 감각에 어떤 영향을 미치는지, 둘째, 사람의 신체 부위 중 어느 부분을 어떠한 크기로 자극해야 하는지, 그리고 셋째, 자극이 고통(pain)이 되는 점이 어디인지를 먼저 밝혀내야 한다. 이를 위하여 촉각의 감각을 관장하는 피부의 감각수용기관(cutaneous receptors)들과 그들의 진동에 관한 반응을 체계적으로 조사할 필요가 있다.

인간의 감각에 대한 조사방법으로는 정신물리학(psychophysics)이라는, 감각에 관한 반응을 물리적인 양으로 정량화 시키는 방법이 주로 사용된다. 이 방법으로 물리적인 자극에 대한 인간의 반응 역치(thresholds), JND (just-noticeable-differences), 그리고 주관적 감각동일점 (perceived subjective equality) 등을 정량화하여 측정할 수 있다. 또한 궁극적으로 진동촉각계(vibrotactile displays)의 효과적인 사용을 위해서는 감각의 세기에 있어서 여러 수준의 자극을 인간이 정확히 구분하여 느낄 수 있도록 조정하여 나타낼 필요가 있으므로 이러한 정신물리학(psychophysics) 방법이 매우 유용하게 사용되고 있다.

촉각 자극에 대한 민감도의 측정은 기계적이고 정적인 자극에 대해 이점분별 역치(two-point discrimination threshold)를 신체 부위에 따라 측정한 Weinstein(1968)의 연구에서 비롯되었다. 이 연구에서 인간의 신체 중에서 가장 민감한 부분이 손가락 끝과 입술임이 밝혀졌고, 이는 해당 신체부위의 피부 밑에 분포한 감각수용기관, 특히 Pacinian corpuscles의 밀도와 직접적인 관계가 있는 것으로 추정되었다. 이어 단순한 정적 자극이 아닌, 진동에 의한 자극에 대해서도 여러 신체 부위에 대한 촉각의 민감도를 측정하는 유사한 연구가 이루어졌는데, 진동이라는 자극을 구성하는 요인에 따라 더욱 많은 측면에서 분석이 이루어졌다. 진동식 자극에서는 신체의 부위뿐만 아니라 (Wilska, 1954), 시간적 요소인 진동의 주파수와 공간적 요소인 진동 접촉의 면적에 따라 민감도가 변하는 것으로 밝혀졌다(Verrillo, 1963). Verrillo는 진동주파수와 피부의 접촉면적이 절대민감도 (absolute sensitivity)에 미치는 영향을 연구했는데, 진동촉각계와 피부의 접촉면적이 0.02 cm^2 이상일 경우 손에서의 민감도는 250 Hz 부근에서 제일 민감한, U자 형태의 곡선을 그리며 변한다는 것을 밝혀냈다(Verrillo, 1963, 1968). 일반적으로 접촉면적에 관계없이 인간의 피부는 약 230 Hz의 주파수로 진동하는 자극에 대해 가장 민감하며,

100 Hz 이하나 600 Hz 이상의 진동에 대해서는 둔감하게 반응한다. Optacon과 같은 시각장애인을 위한 독서 보조장치의 진동이 모두 230 Hz에 맞추어져 있는 이유가 바로 이 때문이다(Bliss et al., 1970). 그러나 피부와의 접촉면적이 0.02 cm^2 보다 작으면 진동주파수의 영향은 없어진다. 이러한 진동주파수와 접촉면적에 의해 역치 반응이 다르게 나타나는 관계를 duplex mechanism이라고 한다(Verrillo, 1968). 이 밖에도 진동식 촉각 자극에 대한 역치 반응은 신체 부위(Sherrick and Cholewiak, 1986), 피부의 온도, 자극 시간(Cholewiak and Collins, 1991), 진동 자극을 둘러싼 보호막의 존재 여부(Gescheider et al., 1978), 그리고 피실험자의 나이(Verrillo, 1982) 등에 따라 달라지는 것으로 보고되었다.

촉각계를 사용하는 데에 있어서 또 하나의 중요한 점은 신체의 어느 부위를 이용하여 자극을 전달할 것인가 하는 점이다. 특히 손을 통하여 전달되는 정보를 다루는 입력기기들의 사용상, 손에 잡히는 물체와의 접촉이 이루어지는 부위에 대해서 진동에 대한 민감도를 정확히 파악할 필요가 있다. 즉, 진동에 대한 손의 각 위치에 따른 민감도는 진동촉각계가 부착된 장갑이나 hand master controller를 사용하여 물건을 집고 조작할 때에 진동의 강도를 접촉 부위에 따라 적절히 조절하여 정확한 정보를 제공할 수 있게 하는 점에서 매우 중요하다.

본 연구는 이러한 제반 문제점들 중에서 진동파장을 구성하고 있는 기계적 요인, 그 중에서도 특히 진동주파수와 진동하는 contactor의 숫자가 손에서의 피부의 민감도에 어떤 영향을 미치는지를 조사한 연구이다. 본 연구에서는 정신물리학(psychophysics) 방법을 사용하여 손의 민감도를 측정하였는데, 그 지수로는 반응 역치(threshold)가 사용되었다. 본 연구를 통해서 진동에 의한 촉각 자극을 피부에 전달할 수 있는 가장 효과적이고 신뢰성 있는 방법이 제시될 것으로 기대된다.

2. 방 법

2.1. 피실험자

본 연구에 참가한 피실험자는 손에 부상을 입거나 손의 감각에 문제가 있던 경험이 없는 남녀 대학생 8명을 대상으로 하였다. 피실험자들의 평균 연령은 23.6 세였으며, 자발적인 지원에 의하여 실험에 참가하였으며, 참여시간에 따른 보상이 주어졌다.

2.2. 실험장비

본 연구에 사용된 진동촉각계는 미국 ORBITEC Inc.가 제작한 실험용 모델인 OTCG이다. 이 진동촉각계는 다섯 개의 작은 진동 contactor로 이루어져 있으며, 크기는 가로 7 mm, 세로 1 cm인 직사각형이고, 각 진동 contactor의 지름은 1 mm이다. 다섯 개의 진동 contactor는 X자 형태로 배열되었으며, 각 contactor를 따로 조정할 수 있도록 설계되었다. 각각의 contactor가 최대로 진동할 경우 8 micron의 진동폭이 측정되었다. 진동촉각계는 12 volt의 power supply로 작동되었으며, 자극의 출력과 응답의 입력이 모두 PC에 의해 통제되었다.

2.3. 실험변수

본 실험에 독립변수로서 사용된 실험요인은 진동주파수, 진동 contactor의 수, 그리고 손에서의 자극 부위의 세 가지이다. 진동주파수는 24, 48, 120, 240, 400 그리고 640 Hz의 6수준이 독립적으로 변화되었다. 이 수준들은 본 실험에 사용된 진동촉각계가 기계적으로 안정된 자극을 발생시킬 수 있는 범위인 24 Hz와 800 Hz의 주파수 사이에

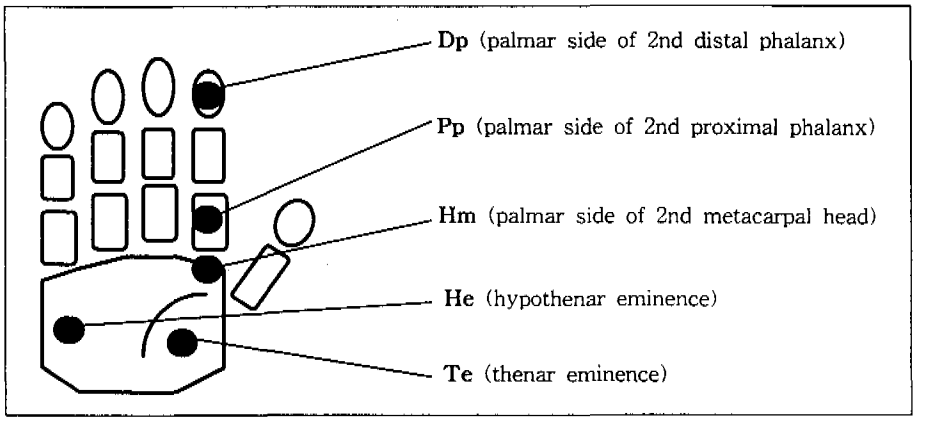

그림 1.
실험에 사용된
손의 자극 부위

서 240 Hz를 중심으로 log 스케일상에서 일정한 간격으로 떨어진 주파수를 택하였기 때문이다. 240 Hz의 주파수는 과거의 연구들에 의해 이미 인간의 피부에 가장 민감한 주파수로 밝혀졌으므로 관찰의 최우선 대상으로 설정되었다(Verrillo, 1963, 1968). 자극 면적을 결정짓는 요인인 진동 contactor의 숫자는 1개와 5개의 두 수준이 사용되었다. 마지막으로 손에서의 자극 부위로는 검지의 손가락 끝(palmar side of 2nd distal phalanx, 이하 Dp로 표기), 검지의 셋째 마디 (palmar side of 2nd proximal phalanx, 이하 Pp로 표기), 검지 바로 아래의 손바닥 끝부분(palmar side of head of 2nd metacarpal, 이하 Hm으로 표기), 그리고 손바닥의 엄지측 근육 부분(thenar eminence, 이하 Te로 표기), 손바닥의 소지측 근육 부분(hypothenar eminence, 이하 He로 표기) 등, 5개의 손 부위가 검사 대상이 되었다. 검지손가락을 선택한 이유는 검지손가락이 다른 손가락에 비해 가장 민감할 뿐만 아니라, 손가락에서의 감각수용체의 분포가 모든 손가락에서 비슷하게 나타나고 있으며, 물건을 집어드는 동작에 있어서 엄지와 함께 가장 자주, 중요하게 사용되기 때문이다. 손에서의 자극 부위는 그림 1에 나타나있다. 이 세 가지 독립변수에 의하여 모두 60개의 실험조건이 성립되었다. 실험 디자인으로 모든 실험조건들이 피실험자들 모두에게 한번씩 부과되는 repeated measure의 실험방법을 사용하였으며, 실험조건들이 제시되는 randomization 순서는 진동주파수가 하나의 randomized block이 되고 나머지 변수들이 그 안에서 일정한 순서가중치를 갖게 되는 balanced incomplete block design의 형태로 이루어졌다. 반응변수는 contactor가 진동할 때 피부를 자극하여 누른 진동의 최대진폭(peak-to-peak displacement)으로 하였으며, 이의 단위는 micron (10^{-6} m)이다.

2.4. 실험절차

정신물리함수(psychometric function)의 도출을 위하여 고정자극(constant stimuli) 방법이 사용되었으며, 각 실험조건마다 최대 진동폭(1 micron)의 0.5 %와 40 % 사이에서 일정한 간격으로 떨어진 8 수준의 진동폭이 자극으로 설정되었다. 각 수준의 진동폭에 대해서는 10번의 측정이 이루어졌으며, 각 수준의 진동은 임의의 순서로 주어졌다. 각 수준마다 10번의 측정에서 피실험자가 자극을 느낀 것으로 반응한 횟수가 확률로써 표시되어 정신물리함수의 계산에 사용된다.

피실험자는 실험이 진행되는 동안 컴퓨터 마우

스에 부착된 진동촉각계를 약 1.5 Newton(최저 1.38 N에서 최고 1.84 N)의 힘으로 약하게 누르고 있는 상태를 유지하였다. 이 힘은 마우스를 클릭하지 않을 만큼의 측정된 힘으로서, 피실험자의 접촉부위가 진동촉각계에 작용하는 힘을 일정하게 유지하게 위해서 설정되었다. 일정한 힘을 유지하지 않을 경우에는 진동촉각계가 힘에 의해 눌림으로써 떠는 진폭이 영향을 받을 수 있기 때문이다. 피실험자가 마우스를 누르고 있는 힘은 실험자에 의해 계속 확인되었다. 자극은 1초 동안의 진동으로 이루어졌으며, 피실험자는 오른손의 해당 신체부위로 진동촉각계를 누른 채로 신호음이 울린 5초 후에 자극을 느꼈는지의 여부에 대해 "yes"와 "no"로 대답하였다. 자극이 주어지는 것에 대한 피실험자의 기대를 최소화하기 위하여 실제의 자극은 신호음이 울린 후 5초 이내의 임의의 시간에 발생하도록 하였으며, 피실험자의 반응이 끝난 5초 후에 다음 자극에 대한 준비를 알리는 신호음을 발생하도록 하였다. 하나의 실험조건을 구성하는 session은 피실험자 한사람 당 80회의 측정(trials)으로 이루어졌으며, 40번의 측정 이후에 자극부위의 감각회복을 위하여 1분간의 휴식이 주어지고, 다시 40번의 측정을 마치게 되면, 한 session이 종료된다. 피실험자가 스스로 피부의 감각에 이상이 있다고 판단되면 스스로 실험을 중단시킬 수 있으며, 이 경우의 데이터는 모두 무시되고 5분의 휴식 후에 해당 실험조건의 처음부터 다시 측정되었다. 각 session 사이의 시간 간격은 2 분이었다. 실험조건의 제시 순서는 순서의 가중치가 일정하게 유지되는 balanced incomplete block에 의한 randomization 방식을 사용하였으며, 피실험자들에게 반복이나 실험조건에 대한 정보는 주어지지 않았다.

3. 결 과

각 실험 조건에서 측정된 피실험자 각각의 자료로 정신물리함수(psychometric function)를 구한 뒤, 함수의 값이 50 %가 되는 진동폭으로 개인의 역치를 계산하였다. 이들 피실험자 8명의 각 실험조건에서의 역치 자료는 그 평균값이 표 1에 정리되어 있으며, 이 자료의 통계적 검정의 결과로 얻

표 1. 각 실험조건에서의 반응 역치(단위 micron : 괄호 안은 표준 편차)

진동주파수	24 Hz		48 Hz		120 Hz		240 Hz		400 Hz		640 Hz	
Contactor수 / 자극 부위	1개	5개	1개	5개	1개	5개	1개	5개	1개	5개	1개	5개
Dp	.19 (.06)	.14 (.04)	.17 (.05)	.14 (.04)	.14 (.04)	.11 (.03)	.14 (.04)	.11 (.02)	.15 (.03)	.12 (.02)	.19 (.07)	.10 (.03)
Pp	.27 (.05)	.19 (.05)	.24 (.06)	.16 (.03)	.20 (.05)	.13 (.01)	.15 (.03)	.12 (.02)	.16 (.03)	.13 (.02)	.19 (.04)	.14 (.02)
Hm	.30 (.10)	.24 (.08)	.30 (.08)	.24 (.05)	.22 (.08)	.14 (.02)	.13 (.02)	.13 (.03)	.17 (.03)	.14 (.02)	.21 (.04)	.16 (.04)
Te	.26 (.05)	.18 (.05)	.20 (.06)	.18 (.03)	.22 (.05)	.15 (.02)	.14 (.03)	.13 (.02)	.17 (.04)	.13 (.04)	.16 (.03)	.14 (.03)
He	.25 (.03)	.19 (.03)	.22 (.05)	.18 (.03)	.18 (.04)	.15 (.02)	.14 (.03)	.11 (.02)	..15 (.03)	.14 (.02)	.17 (.04)	.14 (.03)

표 2. 반응 역치에 대한 분산분석표

	SS	df	MS	F	p<
Subjects	0.08	7	.011	2.20	.050*
진동주파수 (F)	1.14	5	.228	45.60	.001**
자극 부위 (L)	.43	4	.108	21.50	.001**
진동contactor수 (C)	.49	1	.490	104.26	.001**
F × L	.26	20	.013	2.77	.001**
F × C	.03	5	.006	1.20	.150
L × C	.05	4	.013	2.77	.050*
F × L × C	.04	20	.002	0.43	.500
Error	1.96	413	.005		
Total	4.48	479			

은 분산분석표는 표 2와 같다.

3.1. 진동주파수

진동주파수가 반응 역치에 미치는 효과는 유의한 것으로 나타났다($F = 45.60$, $p < 0.001$). 반응 역치(threshold)는 모든 조건에서 항상 240 Hz에서 가장 낮은 수치를 보였다. 부가적인 t-test는 24 Hz와 48 Hz($p>0.2$), 그리고 400 Hz와 640 Hz($p > 0.15$) 사이를 제외하고 다른 모든 주파수 사이에서 유의하게 나타났다. 진동주파수에 따른 반응 역치의 변화는 그림 2에 나타나 있다.

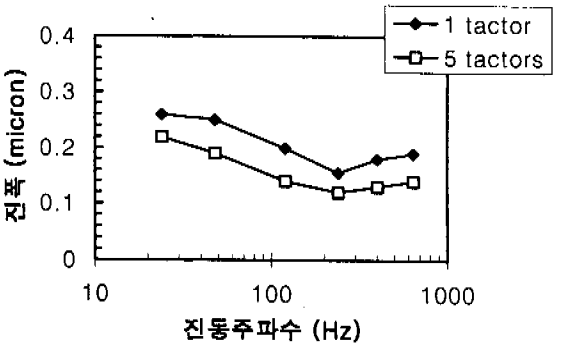

그림 2. 진동주파수에 따른 반응 역치의 변화

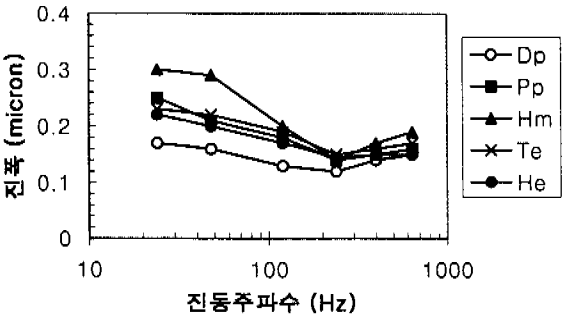

그림 3. 자극 부위에 따른 반응 역치의 변화

진동주파수와 자극부위간의 상호작용도 유의한 것으로 나타났다(진동주파수 × 자극부위, $F = 2.77$, $p < 0.001$, 그림 3). 이는 손가락 부위에 상관없이 240 Hz의 진동주파수에서는 피부의 반응 역치가 비슷하게 낮은 것으로 측정되었으나, 그 이외의 주파수, 특히 저주파수의 진동에서는 손가락의 자극 부위와 접촉 면적에 따라 반응 역치가 다르게 나타나는 것을 의미한다. 검지 손가락의 끝부분(Dp)에서 측정된 역치는 진동주파수의 변화에 대해 비교적 완만한 변화를 보여주면서 240 Hz에서 최저치를 보여주었다. 그러나 다른 부위, 특히 검지 바로 아래의 손바닥 끝부분(Hm)에서의 역치는 진동주파수의 변화에 대한 역치의 반응이 급한 변화를 보이고 있으며, 240 Hz의 진동주파수에서는 검지 손가락의 끝부분(Dp)에서 측정된 역치와도 유의한 차이가 없었으나, 24 Hz와 48 Hz에서는 0.1 micron 이상의 유의한 차이(24 Hz에서 $t = 7.40$, $p < 0.01$; 48 Hz에서 $t = 7.38$, $p < 0.01$)를 보이고 있음을 알 수 있다.

진동주파수와 진동 contactor 수의 상호작용에 의한 반응 역치는 유의하다고 할 수 없었다($p > 0.15$). 이는 진동 contactor 수로 나타나는 접촉면적의 효과가 모든 진동주파수 범위에서 동일함을 나타내고 있다.

3.2. 손에서의 자극 부위

자극 부위가 반응 역치에 미치는 효과도 유의하였다($F = 21.50$, $p < 0.001$). 각 자극 부위간의 t-test를 통한 비교 분석을 통하여 손에서 가장 민감한 부분은 검지 손가락 끝부분(Dp), 소위 fingertip으로 부르는 곳으로 나타났으며, 가장 둔감한 부분은 검지 밑 손바닥 끝부분(Hm)인 것으로 나타났다. 그러나 손바닥에 있는 다른 부위들 사이(손바닥의 엄지측 근육 부분(Te)과 손바닥의 소지측 근육 부분(He))에는 반응 역치에 대해 유의한 차이를 발견할 수 없었다. 모든 자극 부위는 주파수와 진동 contactor에 대해 유사한 U자 형태의 반응을 나타냈으며, 특히 240 Hz의 진동에 대해서는 반응 역치가 모두 비슷하여 자극의 부위가 아무런 차이를 나타내지 않았다. 또한 앞에서 설명하였듯이 검지 손가락 끝부분(Dp)은 주파수에 따른 역치의 변화가 비교적 완만하였으나, 둔감한 부분인 검지 밑 손바닥 끝부분(Hm)은 진동주파수에 따른 역치의 차이가 심했다. 자극 부위에 대한 민감도는 그림 3에 나타나 있다.

3.3. 진동 contactor의 수

진동 contactor의 수에 의한 반응 역치도 통계적으로 유의한 것으로 나타났다($F = 104.26$, $p < 0.001$). 진동 contactor의 수는 실질적으로 진동 자극이 전달되는 면적을 나타낸다. 진동 contactor가 하나일 경우보다 진동 contactor가 5개일 경우 반응 역치는 평균 0.05 micron이나 낮게 측정되었다. 이러한 진동 contactor의 수에 따른 역치의 차이는 주파수가 240 Hz일 때 가장 작았고, 저주파수인 24 Hz와 48 Hz일 때에 차이가 가장 컸으나 그 상호작용이 유의한 정도라고 할 수는 없었다($F = 1.20$, $p > 0.15$). 또한 둔감한 부분에 속하는 검지 밑 손바닥 끝부분(Hm)과 검지의 셋째 마디(Pp)에서는 진동 contactor의 수에 따른 역치 차이가 다른 부위와는 다르게 변하는 것으로 나타났다. 진동 contactor의 수가 역치에 미치는 영향은 그림 2와 그림 4에 나타나 있다.

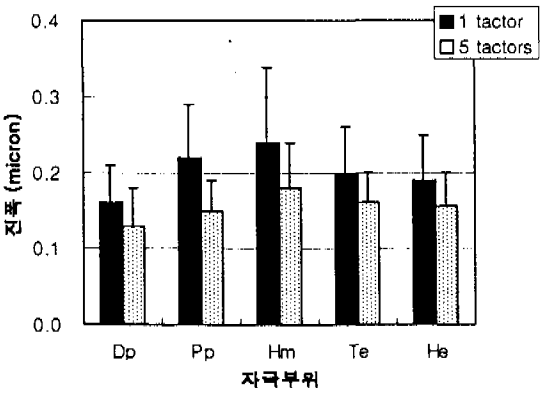

그림 4. 자극 부위와 진동 contactor의 수에 따른 반응 역치의 변화

4. 토의 및 결론

본 연구를 통하여 손에서의 진동에 대한 민감도가 어떠한 변수에 의해 영향을 받는지를 구체적으로 파악할 수 있었다. 이러한 변수들 중에서 진동의 주파수와 자극 면적, 그리고 손에서의 자극 부위에 관한 결과는 본 실험을 통하여 상세히 밝혀졌으며, 과거의 유사한 연구 결과를 뒷받침해주는 것이었다. 본 연구에서는 과거의 연구들이 다루지 않았던 손의 더욱 세부적인 여러 부분의 절대적 민감도가 진동의 주파수와 자극 면적에 대하여 어떻게 변하는지를 측정하였다.

인간의 손에서 피부가 가장 민감한 진동주파수는 자극의 접촉면적이나 손에서의 부위에 관계없이 240 Hz 전후라는 사실이 확인되었다. 이는 Verrillo(1963)가 엄지손가락 밑의 손바닥 부분(본 연구의 Te 부위)에 대해 반응 역치를 측정하였던 과거 연구에서 밝혀진 결과를 뒷받침해주는 것이며, Bolanowski et al.(1988)의 Four-Channel

Model에서 네 가지 감각수용체(Pacinian corpuscle, Meissner corpuscle, Ruffini cylinders, and Merkel disks)중 Pacinian corpuscles의 진동에 대한 역치 반응곡선과 일치하는 결과이다. 특히 100 Hz 미만의 저주파수의 진동은 손에서 아주 둔감한 것으로 나타나, 이러한 주파수의 진동으로는 효과적이고 세밀한 촉각정보의 전달이 적절치 않음을 알 수 있다. 본 연구에서 택한 손의 부위중에서 Verrillo(1963)의 연구에서와 같은 Te 부위뿐만 아니라, 검지손가락의 부위들도 Verrillo의 연구와 유사한 반응을 보인 까닭은 이러한 부위가 모두 Pacinian corpuscle이 많이 분포되어 있는 부분이기 때문인 것으로 추정된다. 특히 검지손가락은 손가락들 중에서도 가장 민감한 부분이며, 손가락들의 촉각 감각수용체가 모두 유사하게 분포되어 있으므로 연구에 적합한 부위였던 것으로 사료된다. 실제로 검지손가락은 telerobotics와 가상현실 시스템과 같은 응용분야에서 gripper의 사용에 가장 주요하게 사용되는 부분이므로, 검지손가락의 반응이 미치는 결과는 다른 손가락보다 매우 큰 의미를 지니고 있다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 그 동안 조사되지 않았던 손의 여러 부위에서의 진동 자극에 대한 민감도를 구체적으로 비교, 분석하였다는 데에 의의가 있다. 촉각의 감각수용체중의 하나인 Pacinian corpuscles이 가장 많이 분포된 검지 손가락 끝(Dp)이 손의 여러 부위 중에서 가장 민감하였고, 일상 생활에 의해 피부가 경화된 검지 손가락 아래 손바닥 끝부분(Hm)이 가장 둔감하였다. 이러한 결과는 손에서의 neuron 분포에 따른 해상도에 대한 연구결과와 일치하고 있다(Vallbo and Johansson, 1978). 그러나, 이러한 피부의 자극부위 사이의 민감도 차이도 그 자극이 240 Hz인 경우에는 그 차이가 최소로 줄어들었음을 볼 수 있었다. 또한, 민감한 부위일수록 진동주파수에 따른 역치의 변화폭이 작았으며, 가장 둔감한 부위가 가장 큰 역치의 변화폭을 나타내는 두 변수간의 상호작용이 확인되었다. 이는 촉각이라는 감각기관을 통하여 사람의 손에 정보를 전달하고자 할 경우에 사용하여야 할 진동은 그 주파수가 240 Hz가 가장 효과적이라는 결론을 재확인시켜주고 있는 것이다. 시각장애자들이 검지 손가락 끝부분을 사용하여 문자를 판독하는 기구인 Optacon의 진동핀들이 230Hz의 주파수로 진동하게끔 설정되어 있는 것은 효과적이고 적절한 설정이라 결론지을 수 있다(Bliss et al., 1970).

Contactor의 숫자로 나타난 자극 면적의 효과는 자극 면적이 넓을수록 민감하게 나타났다. 이는 진동 에너지가 contactor의 수만큼 강하게 전달된 것으로 해석된다. 이러한 자극 면적의 효과 또한 240 Hz의 진동에서는 유의할 만큼 나타나지는 않았으며, 다른 진동주파수에서 contactor의 수 1개와 5개의 역치 사이에 유의할 만한 차이가 있었던 것과는 다른 현상이었다. 이는 Verrillo(1963)의 연구에서 접촉면적이 일정한 크기(0.02 cm^2) 이상일 경우, 각 접촉 면적간의 반응 곡선이 모두 평행했던 것과는 약간의 차이가 있다. 이러한 차이는 본 실험에서 1개의 contactor가 진동하였을 경우 피부에 대한 자극면적이 0.008 cm^2 이고, 5개의 contactor들이 모두 진동할 경우 자극의 총면적이 0.04 cm^2 여서 Verrillo의 연구와는 달리 접촉면적간의 차이가 컸기 때문에 나타난 것으로 보인다.

본 연구에서는 역치반응곡선의 변화율이 자극의 면적뿐만 아니라, 피부 부위에 따라서도 달라짐이 확인되었다. 즉, 자극의 면적이 작아지면서 약하게 촉각을 자극하는 효과는 상대적으로 둔감한 곳을 자극하는 효과와 비슷하다는 것을 알 수 있다. 이렇게 피부 부위의 민감도가 다르다는 사실은 같은 강도의 자극을 손 전체에 일정하게 전달하기 위해서는 각 부위에 따라 전달함수가 각기 다르게 계

산되어야 한다는 사실을 나타낸다. 이를 위하여 각 부위별로 자극이 동일하게 느껴지는 진동에 대한 연구가 역치 뿐만 아니라 그 이상의 세기에 대해서도 보강되어야 할 필요가 있다. 손가락에서는 fingertip이라 불리우는 끝 부분이 가장 민감하였는데, 이는 Pacinian corpuscle들이 손가락의 끝 부분에 상대적으로 많이 분포되어 있음을 고려할 때에 다른 손가락에서도 비슷한 반응을 보일 것으로 추측된다.

새롭게 개발되는 많은 telerobotic system에서의 exoskeleton 형태의 master controller나 가상현실 시스템에서의 control glove를 촉각으로 제어할 필요가 급속히 대두되고 있음은 인간의 작업 특성상 촉각이 제공하는 정보의 피드백이 이러한 시스템의 성공적인 설계에 반드시 필요하기 때문이다. 예를 들어, robotic gripper로 물건을 집어드는 경우에, 이를 조종하는 controller의 엄지와 검지손가락에 물건과의 접촉정보가 전달되지 않고 시각에 의한 정보만이 전달된다면, 물건을 놓치거나 지나치게 큰 힘을 주게 되어 물건의 형태를 파손시키게 된다. 물건과의 접촉에 대한 정보는 역치와 유사한 수준의 촉각적 자극을 손에 가함으로써 충분히 전달할 수 있다. 이럴 경우에 가장 적절하고 자연스러운 촉각 정보는 물론 힘의 형태로 나타난 정보, 즉 force reflection이 되겠지만, 이를 실현시키기 위한 방법은 매우 부피가 크고 무거우므로 이의 대체정보로서 진동의 세기를 힘으로 나타내는 방법이 사용될 수 있다. 본 연구에서 사용된 것과 같은 행렬 형태의 촉각계는 단순히 힘에 대한 정보만이 아니라 더 나아가서 피부에 접촉하는 자극의 모양이나 재질의 형태에 관한 정보를 전달할 수 있다는 장점이 있다. 진동의 형태로 촉각적인 정보를 손의 각 부위에 정교하고 자연스럽게 전달하는 방법은 아직은 매우 복잡하고 어렵지만, 이러한 어려움을 극복하고 정확한 방법으로 촉각 정보를 손에 전달할 수만 있다면, 힘에 관한 정보의 전달과 더불어 보다 현실감 있고 효율적인 촉각계(tactile displays)의 응용이 가능할 것으로 사료된다. 또한, 정상적으로 오감을 사용하여 정보를 전달받을 수 없는 장애인들을 위한 통신체계와 도구의 설계에 있어서도 촉각은 매우 유용하고 귀중한 감각기관이다. 촉각을 활용할 수 있는 신체의 부위도 다른 감각기관과는 달리 매우 넓다는 것 또한 촉각의 상대적인 장점이 될 수 있으므로, 다양한 형태의 활용이 가능하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 진동식 촉각 자극을 구성하는 다른 주요 변수들에 대한 고려는 제외되었다. 이러한 변수에는 자극의 시간(duration)과 회복에 주어지는 시간(recovery time) (Hahn, 1966), 접촉면에 가해지는 힘, 접촉이 동적으로 이루어지는 상황 등을 들 수 있는데, 실제로 촉각을 사용하여 물건을 움직이는 응용을 위해서는 이러한 변수들도 반드시 고려되어야 한다. 또한, 보다 실용적이고 구체적인 촉각 정보를 활용하기 위해서는, 본 연구에서 조사한 미세한 세기의 절대민감도뿐만 아니라, 우리가 일상 생활에서 거의 언제나 사용하게 되는, 역치보다 강한 촉각 자극에 대한 상대적 민감도에 대한 조사도 추후에 이루어져야 할 필요가 있다.

참 고 문 헌

[1] Bliss J. C., Katcher, M. H., Rogers, C. H., and Shepard, R. P., "Optical-to-tactile image conversion for the blind." IEEE Transactions on Man-Machine Systems, MMS-11, 58~64, 1974.

[2] Bolanowski, S. J. Jr., Gescheider, G. A., Verrillo, R. T., and Checkosky, C. M.,

"Four channels mediated the mechanical aspects of touch." Journal of Acoustical Society of America, 84(5), 1680-1694, 1988.

[3] Cholewiak, R. W. and Collins, A., "Sensory and physiological bases of touch," In M. Heller and W. Schiff(Eds.), The psychology of touch, Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ, 1991.

[4] Gescheider G. A., Capraro, A. J., Frisina, R. D., Hammer, R. D., and Verrillo, R. T., "The effects of a surround on vibrotactile thresholds." Sensory Processes, 2(2), 99~115, 1978.

[5] Hahn, J. F., "Vibrotactile adaptation and recovery measured by two methods.", Journal of Experimental Psychology, 71, 655~658, 1966.

[6] Sherrick, C. E. and Cholewiak, R. W., "Cutaneous sensitivity," In K. Boff, L. Kaufman, and J. L. Thomas (Eds.), Handbook of perception and human performance, John Wiley & Sons, New York, 1986.

[7] Vallbo, A. B. and Johansson, R. S., "The tactile sensory innervation of the glaborous skin of the human hand." In G. Gordon(Ed.), Active Touch, Oxford University Press, New York, 1978.

[8] Verrillo, R. T., "Effect of contractor area on the vibrotactile threshold." Journal of the Acoustical Society of America, 35, 1962~1966, 1963.

[9] Verrillo, R. T., "A duplex mechanism of mechanoreception." In D. R. Kenshalo(Ed.), The skin senses, Thomas, Springfield, IL, 1968.

[10] Verrillo, R. T., "Effects of aging on the sprathreshold responses to vibration." Perception & Psychophysics, 32, 61-68, 1982.

[11] Weinstein, S., "Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex, and laterality." In D. R. Kenshalo (Ed.), The skin senses, Thomas, Springfield, IL, 1968.

[12] Wilska, A., "On the vibrational sensitivity in different regions of the body surface." Acta Physiologica Scandinavica, 31, 285~289, 1954.