

JND를 이용한 휴대폰의 최적 진동 주파수 설계

이봉왕 · 박현호 · 명노해[†]

고려대학교 공과대학 산업시스템정보공학과

JND-based Mobile Phone Optimal Vibration Frequency

Bongwang Lee · Hyunho Park · Rohae Myung

Department of Industrial Systems and Information Engineering, Korea University, Seoul, 136-701

A study was conducted to investigate an optimal vibration frequency for mobile phones with just noticeable difference(JND). The just noticeable difference, Weber's law, is the minimum amount by which stimulus intensity must be changed in order to produce a noticeable variation in sensory experience. In order to find the optimal vibration frequency, sixteen frequencies ranged from 24Hz to 603Hz were selected. Subjects then were asked to differentiate a pair of vibration frequencies. For the analysis, the psychometric function to determine the optimal vibration frequency and the logistic regression to validate the determined frequency were used. The results show that the 2nd order polynomial equations were best fitted for the JND psychometric function and the optimal mobile phone vibrations were determined at 140Hz, 151Hz, and 160Hz. With the ogive-shaped psychometric function developed by the logistic regression, the results of this study was validated that the determined vibration frequencies (140Hz, 151Hz, and 160Hz) were optimal mobile phone vibration frequencies.

Keywords: just noticeable difference(JND), vibration frequency, psychometric function, logistic regression.

1. 서론

휴대폰의 수신을 알리는 방식은 인간의 청각을 이용한 벨 소리와 촉각을 이용한 진동으로 구분된다. 진동은 개인의 사생활 보호, 벨 소리로 인한 소음을 자제해야 할 경우 그리고 옷 안에 넣을 경우 촉각 신호를 효과적으로 전달할 수 있을 뿐만 아니라 청각 장애인에게 있어 무엇보다 중요한 요소(Jones, 1989; ISO/IEC9241-11, 1993)이다. 그럼에도 불구하고 진동에 대한 연구는 휴대폰 벨 소리에 관한 연구에 비하여 상대적으로 미흡한 실정이다(Lee, 1998). 최근 청각 장애인들이 "On or Off"방식의 진동을 통해 신호를 전달할 수 있다는 연구를 토대로 진동은 인간에게 중요한 감각 자극으로 인식되며(Pupius, 2002), 앞으로 이에 대한 연구는 중요성을 더할 것으로 기대된다.

촉각 신호는 어떤 공간에 있는 한 물체에 손이 가까이 가까워졌을 때, 접촉하는 순간 피부의 감각 수용체에 의해 전달되는 것이며, 물체의 겉모양, 형태, 질감 등과 관련된 인간 감각

체계 가운데 하나이다. 지금까지 촉각은 물체를 구별하고 조작하는 데 중요한 감각으로서 시각적 혹은 청각적으로 문제가 있는 사람들에게 대해 감각 대체 시스템으로써 발전되었다(Hong, 2000). 촉각은 tactile이나 haptic으로 표현되며, tactile은 만지는 감각에 의한 것이고, haptic은 tactile의 개념에 힘이나 운동 감각을 포함하는 넓은 의미의 촉각이라 정의할 수 있다(Pupius, 2002). Haptic 감각은 환경에 반응하고 감지하는 것이기 때문에 인간 활동에 있어서 없어서는 안 될 중요한 부분임에도 불구하고 지금까지의 연구들은 촉각에 대한 연구가 아닌 인지적인 측면과 감성적인 측면에 초점을 두어 진행되어져 왔다(Pupius, 2002).

국제표준협회(International Standards Organization; ISO)는 휴대폰의 사용성에 관한 것으로 사용자의 직무 수행 완수, 정확성, 효율성 그리고 만족감 등을 포함하여 시각, 청각과 마찬가지로 촉각 또한 중요한 요소로 인정하고 있다(ISO/IEC9241-11, 1993). 앞서 말했듯이 촉각은 인간의 감각 중에서 시각, 청각 다음으로 자주 사용되는 감각기관으로서 인간의 중요한 감

[†] 연락저자 : 명노해 교수, 136-701 서울시 성북구 안암동 5-1 고려대학교 공과대학 산업시스템정보공학과, Fax : 02-929-5888, E-mail : rmyung@korea.ac.kr

각 체계이다. 이미 생활필수품으로 자리 잡은 휴대폰에 있어서 진동을 통한 촉각 자극은 정보 전달을 위한 효율적인 매개체가 될 것이다.

촉각에 있어서 지금까지의 연구는 부분 자극과 성별에 따른 민감도 차이에 대한 연구가 대부분이었다. 따라서 본 연구에서는 휴대폰 최적 진동 세기를 결정하기 위하여 최소가지차이(Just noticeable difference; JND) 개념을 적용하였다. 또한 Method of Constant Stimuli 방법에 따라 전체 자극에 대한 민감도를 분석하여 실제 핸드폰 제품에 적용할 수 있는 최적 진동 주파수를 분석하려고 한다.

2. 자극 탐지

2.1 JND를 통한 자극 변별

JND는 두 자극의 차이를 변별할 수 있는 최소한의 차이를 말한다. JND 개념은 오늘날 무게, 밝기 등 인간의 감각과 지각의 연구에서 매우 중요한 측정 방법으로 활용되고 있으며 신경망 이론, 퍼지 이론 등 많은 분야에서 응용되고 있다. 또한 JND는 정신 물리학을 이용하여 측정할 수 있다. 정신 물리학은 인간의 감각에 대한 반응을 물리적인 양으로 정량화하는 방법으로 물리적 자극에 대한 JND뿐만 아니라 인간의 반응 역치 그리고 주관적 감각동일점(perceived subjective equality)등을 정량화하여 측정할 수 있다. 진동 자극의 효과적인 사용을 위해서는 자극 세기의 여러 수준을 인간이 정확히 구분하여 느끼도록 해야 할 필요가 있는데 정신물리학 방법이 매우 유용하게 사용된다(Lee, 1998). JND를 사용한 기존 연구 문헌을 살펴보면, Weber(1834)는 손과 팔을 사용하여 32 Oz.의 무게를 드는 실험에 있어서 대략 10%에 해당되는 JND를 알아냈다. 그리고 Brown(1910)은 강제선택적차를 사용하여 무게의 변화에 따른 차이를 보고하게 한 후, 반응의 50%를 기준으로 더 무겁다고 보고한 무게(g)는 75%에 해당하고 더 가볍다고 보고한 무게(g)는 25%에 해당하여 반응 비율의 차이를 구하였다

(George, 1985). 이렇게 구하여진 JND를 <Figure 1>과 같이 수량화하였기 때문에 두 자극 쌍에 대한 직접적인 비교가 가능하게 되었다.

JND란 자극의 변화 수준이 50% 정도 느껴지는 값이다. <Figure 1>을 보면 A는 8과 10을, B는 6과 14의 차이를 변별했다는 것을 의미하므로 A가 더 좋은 변별을 하였다고 볼 수 있다. 즉, JND가 클수록 빈약한 변별을 하였다고 할 수 있다. 시각과 관련하여 Galanter(1962)는 촛불 10개가 있는 방에서 1개, 100개가 있는 방에서는 10개의 촛불을 더 증가시켜야 밝기의 변화를 인식한다고 보고하였다. Brodie와 Ross(1984)는 2 Oz.에 해당하는 무게를 드는 작업에서 비슷한 JND값을 측정하였고, Jones(1989)는 팔꿈치에 대한 Force Matching 실험에서 5%에서 9% 사이 범위의 JND를 보고하였다. Pang *et al.*(1991)은 엄지를 포함한 손가락으로 일정한 힘을 지지하는 Pinching Motion에서 JND가 5%에서 10% 사이에 위치한다는 것을 보고하였다.

JND를 측정하기 위해선 표준 자극과 비교 자극을 함께 제시해야 한다. 비교 자극을 변화시키는 방법으로는 세 가지가 있다. 우선 Method of Limits는 자극을 시간에 따라 크기 순으로 변화시키는 것이다. 자극이 시간에 따라 점점 커지거나 작아지기 때문에 피실험자들은 이것을 인식하여 예상으로 인한 오류를 범할 수 있다. 두 번째 Method of Staircase는 피실험자가 자극을 인식하지 못하면 자극의 크기를 높이고 자극을 감지하면 자극의 크기를 줄여서 좀더 세밀하게 접근하는 방법이다. 마지막으로 Method of Constant Stimuli는 자극을 랜덤하게 제시하는 방법이다(Coren *et al.*, 1979; Sung, 1998). 본 논문에서는 Method of Constant Stimuli를 사용하여 실험을 실시하였다.

2.2 역치를 통한 자극 탐지

JND를 사용함에 있어서 중요한 개념은 역치(threshold value)로 신경이나 근육 등에 반응을 일으키는 최소 자극 값이다. 차이 역치는 감각에서 최소가지차이(最小可知差異)를 일으키는 데 요구되는 자극의 변화량으로 정의된다. 자극의 강도가 20

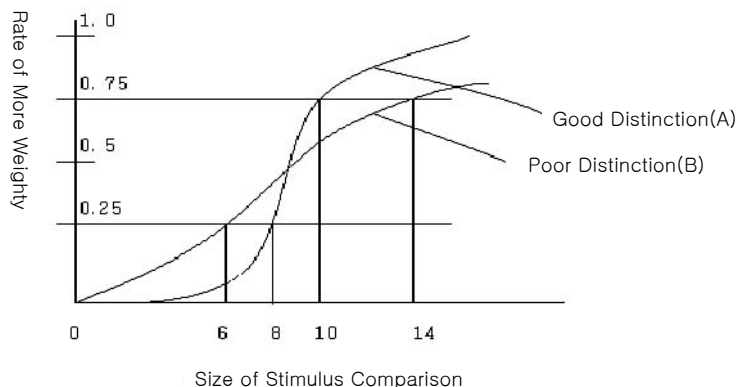


Figure 1. Just noticeable difference(JND) (George, 1985).

단위이고 그 자극이 감각상에서 최소가지증가를 일으키기 위해 24단위로 증가되어야 한다면 차이 역치는 4가 된다. 이것이 Weber의 비이다. 이것은 다른 자극의 조건들과 감각 양상들에 따라 다르다. 중요한 점은 자극이 눈, 귀, 피부, 코, 혀 또는 다른 감각에 적용되더라도 차이 역치와 자극 강도 수준 사이에는 타당한 관계성이 있다는 것이다. Weber의 비는 식 (1)과 같다.

$$Df = cf(Df: \text{ 자극 강도에서의 변화량}, f: \text{ 시작 강도}, c: \text{ 일정한 비}) \quad (1)$$

Engen(1971)의 실험에 의하면 Weber의 비와 강도 사이의 관계성을 증명하기 위하여 종 들기 실험을 실시하였다. 실험 결과 c(Weber의 법칙에서의 일정한 비)가 가장 가벼운 종들을 제외하고는 거의 모든 종들에 대해 일정하다는 것을 보여 주었다(Teghtsoonian, 1971). 그리고 이러한 역치는 몸의 여러 부분에서 여성이 남성보다 더 민감하다고 보고하였다(Weinstein, 1968; Fucci *et al.*, 1990; Petrosino *et al.* 1988).

2.3 주파수와 면적에 따른 촉각의 민감도

촉각의 민감도를 측정하는 하나의 방법은 대상자에 의해 감지될 수 있는 가장 작은 진동 폭을 결정하는 것이다. 진동에 의한 촉각의 반응 점은 자극 받은 피부의 위치와 면적, 자극의 지속 정도 그리고 진동 주파수 등의 여러 요소들에 의해 결정된다(George, 1985). Verrillo(1963)는 진동 자극의 주파수와 반응 점의 관계를 보고하였다. <Figure 2>는 진동 자극 면적의 크기를 0.005cm²에서 5.1cm²으로 바뀌어가며 실험한 그래프이다. 진동 자극 면적이 0.02cm²보다 클 때 진동 촉각의 민감도는 주파수의 변화에 따라 U자형 함수를 보이고 있다. 진동 자극에 따른 민감도는 신체 특정 부위뿐만 아니라 진동 주파수 그리고 접촉 면적에 따라 민감도가 변하는 것으로 밝혀졌다(Verrillo, 1963; Wilska, 1954).

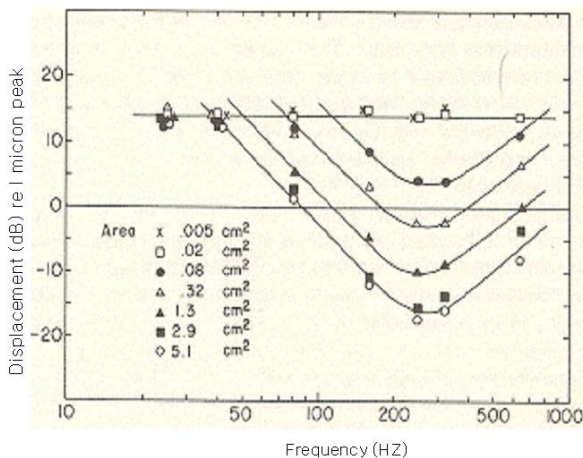


Figure 2. Vibrotactile threshold according to frequency and contact surface(Verrillo, 1963).

가장 큰 자극기를 기준으로 볼 때(5.1cm²) 역치를 초과하는 진동의 폭이 약 0.1μm인 250Hz 주파수 영역에서 민감도가 가장 컸다. 그러나 Bliss *et al.*(1974)는 접촉 면적에 관계없이 인간의 피부는 약 230Hz의 주파수로 진동하는 자극에 대해 가장 민감하며, 100Hz 이하나 600Hz 이상의 진동에 대해서는 둔감하게 반응한다고 하였다.

진동식 촉각 자극에 대한 손의 절대 민감도 반응에 대한 연구를 살펴보면, Lee(1998)는 일정 간격으로 떨어진 6수준의 진동 주파수(24Hz~640Hz)와 진동 contactor 그리고 손에서의 다섯 자극 부위에 대한 실험을 하였다. 이 실험을 통해 손에서 가장 민감한 진동 주파수는 자극의 접촉 면적이나 손에서의 부위에 관계없이 240Hz 전후라는 사실을 확인하였다. 또한 Lee(1999)는 손에서의 상대적 민감도는 손에서의 부위에 관계없이 진동 주파수와 자극면적에 의해서만 영향을 받는 것이며, 촉각을 통해 사람의 손에 정보를 전달하고자 할 경우에 사용하여야 할 진동은 120Hz 또는 240Hz가 가장 효과적이라고 보고하고 있다.

3. 실험방법

3.1 피실험자

피실험자는 모두 오른 손잡이로 1차 실험은 16명(남자 8명, 여자 8명), 2차 실험은 18명(남자 9명, 여자 9명)이 참가하였다. 1차 피실험자의 평균 연령은 26세(SD=3.03년)이고, 2차 피실험자의 평균 연령은 26.7세(SD=2.75)였다. 이들 피실험자들의 휴대폰 사용 경력은 평균 4.3년(SD=1.05년)으로 나타났다.

3.2 실험 장치

휴대폰의 진동에 대한 실험을 위하여 진동 주파수를 달리 할 수 있는 실험용 휴대폰을 제작하였다. 실험용 휴대폰은 일반적으로 사용되는 folder형 모델이며 피실험자가 실험 시 손으로 잡았을 경우에 불편함을 느끼지 않도록 휴대폰 뒷면에 구멍을 뚫어 진동을 발생시키는 가진기와 연결하였다. 진동 시험기는 가진기(vibrator or shaker), 전력 증폭기(power amplifier), 제어기(controller) 그리고 가속도계(accelerometer)로 구성되어 있다. 그리고 가진기는 함수 발생기(function generator)가 연결되어 있어 주파수에 따라 다른 진동을 발생시킬 수 있도록 하였다.

또 함수 발생기에 따른 가진기 진동을 생성시키는 전력을 공급하는 전력 증폭기와 연결되어 있다. 이렇게 연결된 휴대폰은 랜덤하게 진동을 발생시키게 되고 피실험자는 이에 대한 주관적 대답을 설문지에 작성하게 된다. 제작된 실험용 장치는 <Figure 3>과 같다.

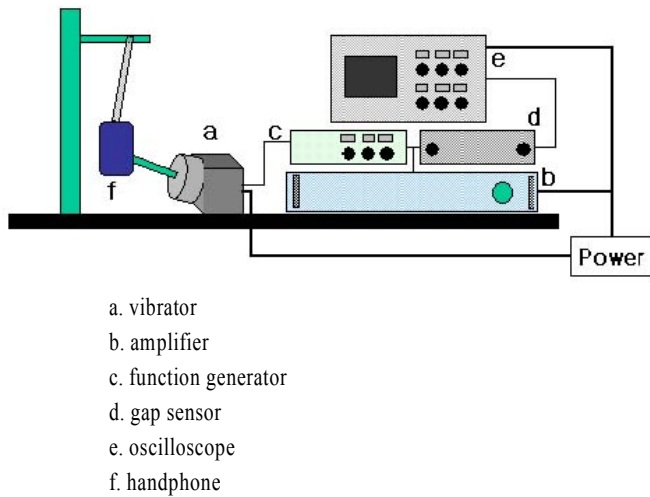


Figure 3. Apparatus.

하였고 총 10회에 걸친 실험을 실시하였다. <Figure 4>는 실제 실험 장면을 보여 준다.



Figure 4. Experiment view.

3.3 실험 설계

1차 실험에 사용된 독립변수로는 남녀의 성별 그리고 손에서 가장 민감한 주파수로 설정하였다. 주파수는 240Hz를 중심으로 같은 Log 스케일로 나눈 24Hz, 38Hz, 96Hz, 151Hz, 240Hz, 380Hz, 603Hz의 7개로 설정하였다. 종속변수로는 JND 값을 설정하였다. JND를 구하기 위하여 비교자극을 최대 진동폭의 0.5%에서 35% 사이에서 일정한 간격으로 떨어진 7 수준의 진동 폭을 자극으로 정하고, 그 7 수준의 중앙값을 기준 자극으로 정하였다. 7개의 진동 수준을 정한 이유는 보통 5에서 9까지 수의 자극을 선택해도 적당한 값을 도출할 수 있기 때문이다(Lee, 1997). 2차 실험에서 사용된 독립변수로는 1차 실험과 마찬가지로 남녀의 성별과 주파수 그리고 종속변수로는 JND 값을 설정하였다. 2차 실험에 사용된 주파수는 1차 실험에서 얻어진 가장 민감한 JND 값을 바탕으로 더 세분화된 JND 값을 구하기 위하여 구간을 세분화해서 사용하였다.

3.4 실험 절차

최적의 JND 범위 선정을 위하여 1차 실험을 실시한 후 1차 실험 결과로 선정된 주파수를 포함한 더 세분화된 주파수를 가지고, 새로운 피실험자들을 대상으로 2차 실험을 실시하였다. 1차, 2차 실험은 같은 방법으로 진행되었다. 우선 실험에 앞서 피실험자를 대상으로 실험 내용과 다른 주파수 범위 내에서 약 5분간 예비 실험을 수행하였고 충분한 휴식을 취한 후 본 실험을 하도록 하였다. 본 실험에서는 측정할 비교 자극을 랜덤하게 제시하였으며 측각에 대한 Bias를 최소화하기 위하여 한 실험이 끝나면 약 10분 간 휴식을 취한 후 다음 실험을 진행하였다. 표준자극과 비교자극으로 나누어 각각 약 1초간 피실험자에게 제시하였다. 자극 제시가 끝난 직후 비교자극이 표준자극보다 큰지 작은지에 대한 답을 질문지에 표기하도록

4. 실험 결과

4.1 1차 실험 결과

1차 실험에서 주파수 세기와 성별이 JND에 미치는 영향을 분석하기 위하여 <Table 1>과 같이 ANOVA 분석을 하였다. 주파수 세기×성별에 대한 교호작용은 없었다(p-value=0.2902). 성별이 JND에 미치는 영향은 유의하지 않았고(p-value=0.9531), 주파수 세기가 JND에 유의한 영향을 미치는 것으로(p-value=0.0031) 나타났다.

Table 1. ANOVA table

Source	DF	F-Value	Pro > F
Frequency intensity (A)	6	3.87	0.0031
Sex (B)	1	0.00	0.9531
A*B	6	1.26	0.2902

주파수의 세기가 JND에 유의한 영향을 미치므로 7개의 주파수 중 어떤 특정한 주파수가 JND에 가장 큰 영향을 미치는지를 알아보기 위하여 JND 역치 값을 구하였다. 7개의 주파수별 JND 역치 값은 <Figure 5>와 같다. <Figure 5>를 보면 JND 역치 값이 감소하다가 주파수가 151Hz에서 최소 값을 가진 후 다시 증가하는 것을 볼 수 있다. 다시 말해서 주파수가 151Hz 일 경우 최소의 JND 역치 값이 신경이나 근육의 반응을 일으키는 데 필요하다는 것을 보여 준다. 핸드폰의 경우에서 볼 때 최적의 JND 역치 값을 가지는 주파수가 손으로 진동 감각을 가장 잘 구별하는 주파수라고 말할 수 있다.

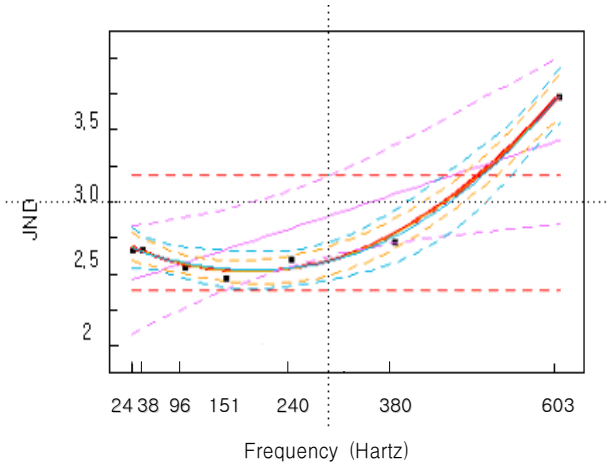


Figure 5. Vibrotactile threshold according to frequency.

JND 역치 값이 151Hz에서 최소 값을 가지고 이 최소 값이 주변 주파수(96Hz, 240Hz)의 역치 값과 유의한 차이가 존재하는지 알아보기 위하여 사후 검정으로 Fisher의 LSD(Least Significant Difference)를 수행하였다. <Table 2>의 결과로 볼 때 151Hz는 주변 주파수들(96Hz, 240Hz)과 유의한 차이를 보이므로 그 외의 모든 주파수들(24Hz, 38Hz, 380Hz, 603Hz)과 유의한 차이를 보인다고 볼 수 있다.

Table 2. Fisher's LSD for frequency

Frequency	p-value
96Hz, 151Hz	0.03*
151Hz, 240Hz	0.01*
96Hz, 240Hz	0.193

4.2 2차 실험 결과

1차 실험에서 151Hz가 최소 값을 가진다고 할지라도 주파수 사이의 간격이 크기 때문에 주변, 즉 96Hz와 240Hz 사이에서 유일한 최소 값이라는 것을 증명하기 위하여, 주파수 범위를 세분하여 2차 실험을 하였다. 실험에서는 151Hz를 포함하여 20Hz~300Hz까지 20Hz씩 나눈 16개의 주파수들(20Hz, 40Hz, 60Hz, 80Hz, 100Hz, 120Hz, 140Hz, 151Hz, 160Hz, 180Hz, 200Hz, 220Hz, 240Hz, 260Hz, 280Hz, 300Hz)을 사용하였다.

Table 3. ANOVA table

Source	DF	F-Value	Pr >
Frequency intensity (A)	15	22.10	0.0001
Sex (B)	1	3.08	0.0818
A*B	15	0.54	0.9140

<Table 3>은 2차 실험의 분산 분석표이다. 분산 분석 결과 1차 실험 결과와 마찬가지로 유의한 교호작용은 없었다. JND에 대한 남녀 간의 차이는 없으며(p-value=0.0818), 주파수 세기가 JND에 유의한 영향을 미쳤다(p-value=0.0001).

2차 실험에 대한 JND 역치 값은 <Figure 6>과 같다. <Figure 6>에 따르면 JND 값이 가장 낮은 주파수는 151Hz이며, 이것은 손으로 진동 감각을 가장 잘 구별하는 주파수라고 말할 수 있다.

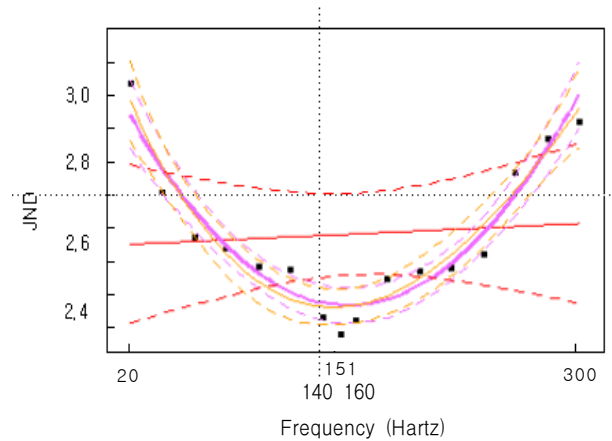


Figure 6. Vibrotactile threshold according to frequency.

하지만 다른 주파수들과는 다르게 151Hz 주변의 140Hz와 160Hz가 한 Group을 이루고 있어서 이들 주파수 간의 유의한 차를 알아보기 위하여 사후 검정으로 LSD를 실시하여 <Table 4>와 같은 결과를 얻었다. <Table 4>를 보면 140Hz와 151Hz 사이에는 유의한 차이를 보이지 않았고(P-value=0.118), 151Hz와 160Hz 사이에도 유의한 차이를 보이지 않았고(P-value=0.317). 그러므로 이들 세 주파수(140Hz, 151Hz, 160Hz) 사이에는 통계적으로 유의한 차이가 없으므로 2차 실험 결과 140Hz, 151Hz, 그리고 160Hz가 진동 감각을 가장 잘 구별하는 주파수라 할 수 있다.

Table 4. Fisher's LSD for frequency

Frequency	p-value	Frequency	p-value
120Hz, 140Hz	0.000	140Hz, 160Hz	0.823
120Hz, 151Hz	0.000	140Hz, 180Hz	0.002
120Hz, 160Hz	0.001	151Hz, 160Hz	0.317
120Hz, 180Hz	0.402	151Hz, 180Hz	0.000
140Hz, 151Hz	0.118	160Hz, 180Hz	0.007

140Hz~160Hz가 다른 주파수 세기와 유의한 차이를 나타낸다는 것은 140Hz~160Hz가 최적의 JND라 할 수 있다. 이러한 주파수 세기와 JND와의 관계를 나타내는 최적의 함수 관계를 알아보기 위하여 회귀 분석을 사용하였다. <Table 5>에서

보이는 것과 같이 3개의 함수를 사용하여 최적의 함수를 fitting해 본 결과 이차 함수나 삼차 함수의 R² 값이 거의 비슷하게 나왔다. 차수가 낮은 이차 함수로도 JND와 Hz의 관계를 삼차 함수와 비슷하게 설명할 수 있으므로 본 논문에서는 이차 함수를 사용하여 관계식을 설명하였다. 다시 말해서 주파수의 이차함수로 JND 역치 값의 91.7%를 설명할 수 있다. 그러므로 정신물리함수는 U자 형의 이차 곡선으로 회귀 분석해보면, 식 (2)와 같은 회귀 분석식을 얻는다.

$$JND = 3.1254 - 0.0093Hz + 0.00003Hz^2 \quad (2)$$

2차 실험에 대하여 각 Hz에 대한 정신물리함수의 타당성을 분석하였다. 아래 <Figure 7>은 2차 실험 중 가장 최적으로 나온 151Hz 주파수에서의 JND 값을 구하기 위한 정신물리함수이다. 표준자극과 이것보다 세거나 작은 비교자극의 진폭 값을 임의로 10번씩 주어 피실험자가 표준자극보다 크다고 답할 확률을 구한 후 확률 값(Y축)과 주어진 진폭의 크기(X축)를 축으로 하는 S자 형태의 곡선을 그리는 그래프를 도출한 것이다. 기본적인 원리는 표준자극보다 비교자극이 더 작으면 피실험자는 더 크다고 반응하게 한 실험에서 “No”를 대답할 확률이 높을 것이고, 표준자극보다 비교자극이 더 크면 피실험자는 표준자극보다 더 크다고 반응하게 한 실험에서 “Yes”를 대답할 확률이 높을 것이다. 따라서 비교자극의 진폭 값이 더 커질수록 피실험자가 실험에서 더 크다고 반응할 확률이 높은 것이다. 따라서 일반적으로 더 큰 비교자극을 탐지하는 가능성은 체계적으로 증가하므로 만일 충분한 측정이 행해지면 정신물리함수는 종종 오자이브(Ogive)라고 부르는 특정한 S형의 그래프를 그리게 된다.

여기서 JND는 정신물리함수의 75%의 확률 지점(Upper Limen)의 X값과 25% 지점의 확률 지점(Lower Limen) X값의 차이를 이등분한 값으로 구한다. 그런데 모든 비교자극에 대한 ‘더 크다’의 반응들의 비율이 높게 평가되는 경향이 있는데 그 까닭은 앞서 제시된 표준자극의 감각적 크기를 과소 평가하는 경향 때문이다. 그러므로 정신물리함수에서 ‘더 크다’의 확률이 50%되는 지점인 PSE는 표준자극인 20μm보다 낮은 값을 가졌기 때문에 잘 설명이 되고 있지만, 그림에서 2차 실험에서 151Hz에서의 점으로만 연결된 정신물리함수는 약간 굴곡이 있는 S자 형태의 그래프를 보여주고 있다. 그 이유는 피실험자

들이 진폭 23.3μm에서의 비교자극이 표준자극보다 더 크냐는 반응에 그 전의 진폭(20μm)보다 좀 낮게 “Yes”를 했기 때문이라고 보여진다.

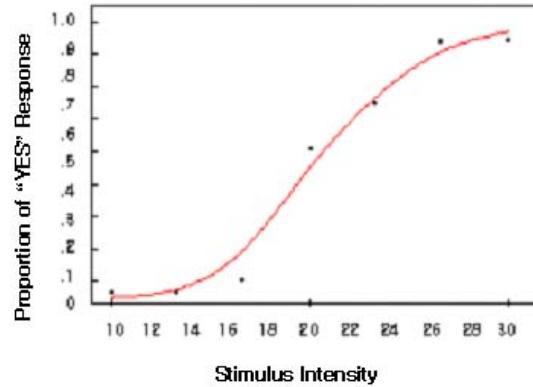


Figure 7. Logistic regression graph for psychometric function at 151Hz.

실험 결과를 바탕으로 반응 비율과 자극과의 관계 그래프를 정신물리함수로 표현한 후 로지스틱 모델 검정을 통해 타당성 검정을 실시하였다. 로지스틱 회귀 모형은 회귀 분석에서 종속변수가 연속형 변수가 아니고 두 가지 값을 갖는 범주형 변수일 때, 그리고 중요 변수를 결정하는 데 있어 유용하게 사용된다(Myung, 2003). 정신물리함수를 로지스틱 회귀 모형에 의하여 구한 것 중 가장 낮은 값으로 나온 151Hz에서 추정된 로지스틱 반응함수는 식 (3)과 같다.

$$\hat{\pi} = \exp(-7.357664 + 0.371407X) / 1 + \exp(-7.357664 + 0.371407X) \quad (3)$$

추정된 로지스틱 반응함수를 이용하여 어떤 X의 값에서 특정 사건이 발생할 확률을 추정할 수 있다. 예를 들면, 진폭이 X = 20μm일 때 비교자극이 표준자극보다 더 크다고 반응할 확률은 다음의 식(4)와 같다.

$$\hat{\pi} = \exp(-7.357664 + 0.371407 \times 20) / 1 + \exp(-7.357664 + 0.371407 \times 20) = 0.52 \quad (4)$$

Table 5. Parametric regression fit

Degree(Polynomial)	Model		Error		R-Square	F Stat	Prob > F
	DF	MS	DF	MS			
Linear	1	0.0052	14	0.0491	0.0075	0.1062	0.7494
Quadratic	2	0.3178	13	0.0044	0.9173	72.1268	0.0001**
Cubic	3	0.2144	12	0.0042	0.9281	51.6402	0.0001**

5. 토 의

<Table 6>은 손에서의 자극 부위에 따른 기존 연구와 본 연구의 최적 진동을 비교한 분석표이다. <Table 6>에 사용된 용어는 기존 연구에서 사용된 자극 부위를 말하며 각각 검지 끝(Palmar Side of 2nd Distal Phalanx, DP), 검지 셋째 마디(Palmar Side of 2nd Proximal Phalanx, PP), 검지 바로 아래의 손바닥 끝부분(Palmar Side of Head of 2nd Metacarpal, HM), 손바닥의 근육 부분(Thenar Eminence, Ee), 그리고 손바닥의 소지측 근육 부분(Hypothenar Eminence, HE)이다.

<Table 6>을 보면 절대 민감도에 대한 선행 연구에서 Verrillo(1963)는 7가지 크기의 다른 접촉기와 진동 주파수에 따른 절대 민감도에 관한 연구를 하였는데 5.1cm² 정도 크기의 접촉기에 기준해서 볼 때 250Hz 정도가 가장 좋은 것으로 결론 내리고 있으며, Lee(1998)는 진동식 촉각 자극에 대해서 주파수와 자극 부위, 그리고 Contactor의 수가 반응 역치와 유의한 차를 보였으며 240Hz가 가장 민감하다고 확인하였다. 위의 두 실험에서의 결론은 인간의 손에서 피부가 가장 민감한 진동 주파수는 자극의 접촉 면적이거나 손의 부위에 관계없이 240Hz 전후라는 사실이 확인되었다.

그리고 손의 상대 민감도 반응에 대한 연구를 살펴보면 Lee(1999)는 진동 주파수와 진동 Contactor 수는 통계적으로 JND와 유의하지만, 자극 변환 주기와 손에서의 자극 부위는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다. 또한 120Hz가 가장 민감하다고 하였다.

하지만 본 연구에서는 기존의 진동식 촉각 자극에 대한 손의 상대 민감도 반응에 대한 연구에서 사용되었던 진동 주파수 24Hz, 120Hz, 240Hz, 400Hz의 범위를 더 세분화해서 16개의 주파수를 선정하여 보다 넓은 구간에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과, 본 연구에서는 Lee(1999)의 실험에서 보여진 120Hz보다 더욱 민감한 140Hz~160Hz에서 가장 좋은 JND를 보이고 있다.

본 연구에서 가장 민감한 주파수가 예전의 연구와는 달리 140Hz~160Hz으로 나온 가장 큰 이유는 실험 방법의 차이에서 기인한다. Lee(1999)의 연구는 손의 부위에 따라 측정하였

으나 본 연구에서는 Handphone이라는 매개체를 중심으로 JND를 측정하였기 때문에 Handgrip으로 측정하였다. 이러한 JND의 차이는 Lee의 연구에서 언급되어졌듯이 더욱 큰 자극면적을 요구하고, 자극 면적이 넓을수록 민감한 반응을 보인다는 결과와 상통한다. 그러므로 핸드폰의 진동을 설명하는 데 있어서는 Lee의 일반적인 최적 JND 값인 120Hz보다는 본 연구의 결과, 즉 140Hz~160Hz의 값이 적당하다고 할 수 있다.



Figure 8. Contact surfaces on the hand.

<Figure 7>을 보면 본 실험에서 사용된 주파수의 JND 측정 결과가 완만한 곡선을 보인다. 이러한 이유 중의 하나는 충분치 못한 피실험자를 사용하였기 때문이라 생각된다. 또 다른 이유로는 본 실험에서 사용된 주파수의 크기가 너무 세분화되어 실질적으로 최소 값의 차이가 적으므로 완만한 곡선을 그렸다고 할 수 있다. 즉, 핸드폰의 최적 진동 세기를 측정하는데 있어 특정 주파수를 결정하는 데에는 무리가 있고, 대신에 주파수 영역을 결정하는 것이 인간의 감각에 현실적으로 맞는 것을 의미한다. 다시 말해서 최적의 주파수 영역은 140Hz~160Hz로서 이 영역 내에서 인간이 진동의 차이를 감지할 수 없다는 것을 의미한다.

또한 본 논문에서는 정신물리함수의 타당성을 분석하기 위해서 로지스틱 회귀 모형을 사용하였다. 그리고 지금껏 로지스틱 회귀 모형의 적용 분야는 의료에서의 Data Mining(Chae et al., 2001), 사람의 라이프 스타일과 같은 사회 현상을 설명하기

Table 6. Comparison of optimal vibrations on the hand's contact surfaces

Researcher, Year	Locations	Frequency	Note
Verrillo, 1963	Thenar eminence (TE)	250Hz	Absolute Thresholds
Lee, 1998	DP, PP, HM, HE, TE	240Hz	Absolute Thresholds
Lee, 1999	DP, PP, HM, HE, TE	120Hz	Differential Thresholds
Conclusion of this Experiment	DP, PP, HM, HE, TE; palmar side of thumb distal phalanx; palmar side of 2nd media phalanx; palmar side of 3, 4, 5th distal, media phalanx	140Hz, 151Hz, 160Hz	Differential Thresholds

위한 모형(Eisenberg and Wechsler, 2003), 고객 만족도와 같은 제품 판매와 관련된 변수를 설명하기 위한 모형(Sung, 2001) 그리고 Fault Analysis와 같은 제조 환경과 생산성과의 함수 관계를 통한 이들 사이의 관계 연구(Sutanto *et al.*, 1992) 등 많은 분야에서 전반적으로 사용되었다. 이번 연구를 통하여 로지스틱 회귀 모형의 적용 분야를 휴대폰의 최적 진동의 JND를 결정하는 데 있어서 정신물리함수의 타당성을 검증하는 데 사용함으로써 로지스틱 회귀 모형 적용 분야를 넓혔다는 점에서 또 다른 의미를 찾을 수 있을 것이다.

6. 결론 및 추후 연구

본 논문에서는 휴대폰의 진동을 가장 인지하기 좋은 주파수를 도출할 목적으로 연구를 수행하였다. 주파수를 1, 2차로 나누어 점차 세분화하여 실험을 실시하였고, 그에 따른 JND를 구하였다. 기존의 연구들은 주파수의 범위가 넓어 좀더 세분화된 실험이 필요했으며, 본 논문에서는 이들 선행 연구들을 기반으로 Hz를 세분화하여 주파수에 따른 JND의 값을 구하였다. 이를 위하여 1차 실험에서 주파수를 7구간으로 나누어 실험하고 2차 실험에서는 더욱 세분화하여 16구간으로 나누어 실험을 하였다.

본 실험 결과 주파수에 따른 상대 민감도는 U자 형 Shape를 따랐으며, 정신물리함수는 S자 형을 따랐다. 1차 실험 결과 JND가 가장 낮은 값은 151Hertz이었으며 2차 실험에서는 140Hz, 151Hz, 그리고 160Hz가 가장 낮은 JND 값을 보였다. 따라서 정신물리학적으로 사람이 휴대폰 진동을 인지하기에 가장 좋은 주파수는 140Hz~160Hz라고 말할 수 있다.

본 논문의 결과로 휴대폰 뿐만 아니라 손으로 Feedback을 느낄 수 있는 시스템 설계시 본 연구 결과를 활용할 수 있을 것으로 보인다. 향후 연구로는 휴대폰을 휴대하는 위치와 장소에 따른 진동 감각에 대한 실험이 필요할 것으로 보인다. 그리고 휴대폰의 진동 시 발생하는 소음은 차단하기 어려운 과제이다. 따라서 소음을 차단한 진동에 대한 정밀 실험이 필요하겠다.

참고문헌

- Bliss, J. C., Katcher, M. H., Rogers, C. H. and Shepard, R. P. (1974), Optical-to-Tactile Image Conversion for the Blind. *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, MMS-11: 58-64.
- Brodie, E. and Ross, H. (1984), Sensorimotor Mechanisms in Weight Discrimination, *Perception and Psychophysics*, **36**, 477-481.
- Brown, W. (1910), *The judgment of difference with special reference to the doctrine of the threshold in the case of lifted weights*, Berkeley, The University press, University of California publications in psychology, 71.
- Chae, Y. M., Ho, S. H., Cho, K. W., Lee, D. H. and Ji, S. H. (2001), Data Mining Approach to Policy Analysis in a Health Insurance Domain, *International Journal of Medical Informatics*, **62**, 103-111.
- Coren, S., Porac, C. and Lawrence, M. W. (1979), *Sensation and Perception*, New York, 493.
- Eisenberg, M. E., and Wechsler, H. (2003), Social influences on substance-use behaviors of Gay, Lesbian, and Bisexual College Students: Findings from a National Study, *Social Science & Medicine*, **57**, 1913-1923.
- Fucci, D., Petrosino, L., Schuster, S. B. and Wagner, S. (1990), Comparison of lingual Vibrotactile Suprathreshold Numerical Responses in Men and Women: Effects of threshold shift During Magnitude-Estimation Scaling, *Perceptual and Motor Skills*, **70**, 483-492.
- Galanter, W. H. (1962), *Contemporary Psychophysics*, New Direction in Psychology, Rinehart & Winston, New York, 87-157.
- George, A. G. (1985), *Psychophysics: Method, Theory, and Application*, Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey, 295.
- Hong, Z. T. (2000), Perceptual User Interfaces: Haptic Interfaces, *Communications of the ACM* **43**(3), 40-41.
- ISO/IEC9241-11, (1993), *Software Product Evaluation: General Overview*
- Jones, L. A. (1989), Matching force: Constant Errors and Differential Thresholds, *Perception*, **18**(5), 681-687.
- Lee H. M. (1997), Study of Design for Cooling Control Procedure Using JND of Thermal Sensation, *Unpublished Master's thesis in Seoul National University*.
- Lee, S. I. (1998), Human Sensitivity Responses to Vibrotactile Stimulation on the Hand : Measurement of Absolute Thresholds, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, **17**(2), 1-10.
- Lee, S. I. (1999), Human Sensitivity Responses to Vibrotactile Stimulation on the Hand: Measurement of Differential Thresholds, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, **18**(3), 1-12.
- Myung, R. H. (2003), Use of backward slip to predict falls in friction test protocols, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Article in press.
- Pang, X., Tan, H. Z. and Durlach, N. (1991), Manual Discrimination of Force Using Active finger motion, *Perception & Psychophysics*, **49**(6), 531-540.
- Petrosino, L., Fucci, D., Harris, D. and Randolph Tyler, E. (1988), Lingual vibrotactile/auditory magnitude estimation and cross-modal matching: Comparison of suprathreshold responses in men and women, *Perceptual and Motor Skills*, **67**, 291-300.
- Pupius, D. (2002), Tactile Feedback, Ma Design Strategy and Innovation - *Research Report*, 4-6.
- Sung C. H. (1998), Comparison and Evaluation for the Change of Level in the Color Temperature of Standard Illuminant, *Unpublished Master's thesis in Kumoh National Institute of Technology*.
- Sung U. H. (2001), *Analysis of Econometrics Using SAS for Window*, Mu Youk Kyungyoung Sa, Seoul, Korea, 389-402.
- Sutanto, E., Warwick, K. and Griffin, M. (1992), Application of Logistic Regression For Fault Analysis in an Industrial Printing Process, *Proc. IEEE Instrumentation/Masurement Technology Conference*, New York, 675-680.
- Teghtsoonian, R. (1971), *On the exponents in Stevens' Law and the Constant in Ekman's Law*, *Psychological Review*, **78**, 71-80.
- Verrillo, R. T. (1963), Effect of contractor area on the vibrotactile threshold, *Journal of the Acoustical Society of America*, **35**, 1962-1966.

- Wilks, A. (1954), On the Vibrational Sensitivity in Different Regions of the Body Surface, *Acta Physiological Scandinavica*, **31**, 285-289.
- Weinstein, S. (1968). *Intensive and Extensive aspects of Tactile Sensitivity as a Function of Body Part, Sex, and Laterality*, In D. R. Kenshalo(Ed.) *The Skin Senses*, Springfield, 195-218.