

# 손끝 부착 형 공기촉감 제시장치의 개발 및 심리 물리학적 실험

김영미, Ian Oakley, 류제하  
광주과학기술원 인간-기계-컴퓨터 인터페이스 연구실  
{kym, ryu}@gist.ac.kr, ian@whereveriam.org

## Finger Mounted Pneumatic Tactile Display and Psychophysical Experiments

Yeongmi Kim, Ian Oakley, Jeha Ryu  
Human-Machine-Computer Interface Lab (HuManCom Lab)  
Department of Mechatronics,  
Gwang-Ju Institute of Science and Technology  
{kym, ryu}@gist.ac.kr, ian@whereveriam.org

### 요약

가상환경 또는 실제환경에서 정보를 제공하는 햅틱 인터페이스의 필요성이 점점 증가함에 따라 촉감을 제공하기 위한 다양한 햅틱 장치가 개발되었고 각 장치의 특성과 성능 평가를 위해 기초적인 정신(심리) 물리학적 연구가 수행되고 있다. 본 논문에서는 여러 가지 햅틱 인터페이스 중 손가락 끝에 부착하는 형태의 새로운 공기 촉감 제시장치(PTI: Pneumatic Tactile Interface)를 제시하고 이 장치의 유용성을 입증하기 위해 localization rate, 시간 분해능, 길이 분해능, 강도의 세기 등의 심리 물리학적 실험(Psychophysical Experiment) 수행 결과를 제시한다. 공기촉감 시스템은 50 개의 출력까지 확장 가능한 공기촉감 하드웨어로 구성 되어있고 손가락 끝에 부착하는 형태로 구성하기 위해 5\*5의 배열의 디스플레이를 제작하였다. 16 명의 피실험자가 A, B 두 그룹으로 나뉘어 각각 2 가지의 심리물리학 실험을 수행하였다. localization rate의 경우 9 개의 다른 자극의 위치를 구별하기 위해 3\*3 배열로 구성된 밀집된 디스플레이와 확장된 디스플레이로 측정을 수행하여 각각 58.13%, 85.9%의 localization rate를 얻을 수 있었다. 그리고 100 번의 반복 실험을 통해 약 2.6mm의 길이 분해능을 얻을 수 있었고 자극 강도 실험의 경우, 실제의 강도가 세짐에 따라 피 실험자들이 느끼는 강도의 척도도 증가하며, 강도가 약해 질수록 피 실험자들이 느끼는 강도 역시 거의 선형적으로 감소함을 알 수 있었다. 그러나 시간 분해능의 경우에는 시스템을 구성하는 밸브의 성능으로 인해 20ms 이하의 시간 분해능 측정은 제한되었다. 이러한 심리 물리학 실험을 통하여 개발된 공기촉감 제시장치가 다양한 정보를 전달하는데 충분하다는 결론을 내릴 수 있으며, 제안된 시스템을 사용하는 여러 가지 어플리케이션을 제시하였다.

Keyword : Pneumatic tactile interface, Psychophysical experiments

## 1. 서론

우리는 가끔씩 실 생활에서 촉각 정보에 의존하여 어떤 행동을 하거나 판단을 내릴 때가 있다. 깜깜한 방의 진동 스위치를 더듬어 찾는다거나 극장에서 시각적 의존 없이 팝콘을 먹는 것이 그 대표적인 예가 된다. 그 밖에도 옷을 구입할 때 질감을 만져보거나 아기분유를 탈 때에도 손으로 만

져서 온도를 측정하기도 한다. 이처럼 촉각 정보는 이미 우리 생활에 중요한 부분을 차지하고 있으며 이러한 촉각에 관한 연구는 역감 제시 및 촉감 제시 등 여러 분야에 걸쳐 이루어졌다.

현재 가장 널리 쓰이고 있는 역감 제시장치(예: PHANTOM [2])는 다양한 역감과 촉감, 그리고 역감 큐를 제공한다. 또한 외골격(exo-skeletal) 같은 기계적 구조나 모터를 이용한 장치들을 통해

가상 객체의 표면 질감이나 마찰력, 모양 등을 느낄 수 있다. 그러나 피부 표면에 직접적으로 정보를 제시하지 못하는 약점이 있고, 전형적으로 이러한 장치의 end-effect 는 힘을 느끼기 위해 쥐어지는 형태의 펜 타입[2] 또는 구 모양[6] 또는 thimble[2] 같은 형태로 이루어져 있다.

기존의 촉감제시장치 들은 대부분 가상환경과 상호작용을 하기 위해 연구 되었는데 가상 객체의 무게를 느끼기 위한 시스템(Gurocak et al., 2002) [11], 원격 수술 시 가상객체의 텍스처나, 모양, 컴플라이언스 등을 느낄 수 있게 하는 텔레택션 (teletaction) (G. Moy 2000)[10]을 들 수 있다. 그리고 손가락 끝에 연결되어 point force 를 제공하는 display 에 관한 연구도 많은 관심의 대상이 되어 왔는데 그 중에서 pneumatic air-jet display 는 본 연구와 흡사한 점이 있다. Amemiya and Tanaka [4]는 손가락 끝을 두르는 air-jet display 를 설명 하였는데 이러한 display 가 역감제시장치와 통합이 용이한 이유는 아마도 사용자의 손가락 끝에 접촉하는 기계적인 조립이 필요 없으며, 특히 공기촉감 장치는 유연하고 가벼운 튜브를 사용하는 이점이 있고 힘이 나오는 곳에서 공기 촉감을 제시하여 복합적인 햅틱 디바이스가 될 수 있기 때문이다.

진동자나 전류를 이용한 연구에 비해 air-jet 을 통해 피부에 자극을 주는 연구는 많이 진행 되지 않았다. Amemiya and Tanaka 이 엄지와 집게 손가락의 변수들과 공기촉감 장치의 two point different threshold 를 결정하려고 시도하였으나 각각의 독립적인 변수가 미치는 영향으로 인해 실험으로부터 얻은 데이터로는 구체적인 결론을 지을 수가 없었다. 그리하여 우리는 피부에 핀으로 압력을 주는 연구를 바탕으로 air-jet 자극에 관한 집게 손가락의 길이 분해능 (two-point different threshold), localization rate, 시간 분해능(temporal resolution), 강도(intensity) 등의 심리 물리학적 실험을 수행하였다.

본 논문에서는 새로운 공기촉감 제시장치를 설명하고 기존의 연구를 바탕으로 우리가 제시한 공기촉감 제시장치의 유용성을 입증하기 위해 심리 물리학적 실험을 제시하고 분석 할 것이다. 그

리고 유용한 응용분야를 제시하여 결론 지을 것이다.

## 2. 공기 촉감 제시장치

### 2-1 전체 시스템 구성

전체적인 시스템 구성을 살펴보면 사용자는 공기촉감제시장치의 display 부분을 몸에 부착하고 있으며 공기촉감 제시장치는 PC로부터 입력값을 시리얼 통신을 통해 실시간으로 받게 된다 [그림 2-1].



그림 2-1

그림 2-2 a)는 공기촉감 제시장치 전체 시스템을 보여주며 박스 안에 모든 시스템을 구성하고 편리한 이동을 위해 바퀴를 장착한 프레임에 구성하였다. 2-2 b)는 박스 안에 장착 된 제어 부 하드웨어를 보여준다. 50 개의 출력을 가진 공압 밸브는 마이크로 컨트롤러에 의해 독립적으로 제어가 되며, 밸브를 구동시키는 전원은 24V 의 충전 가능한 배터리를 사용하고 DCDC converter 로 5V 의 마이크로 컨트롤러의 전원을 인가할 수 있다.

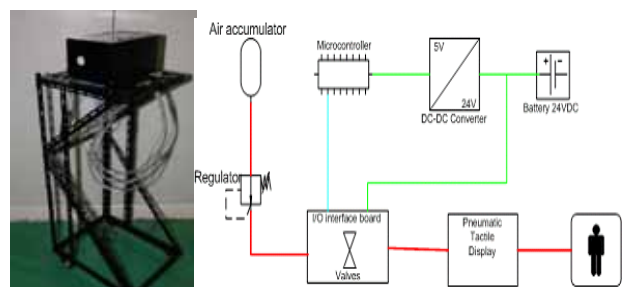


그림 2-2 a)전체 시스템 b) 시스템 구성도

## 2-2 Display 디자인

지금까지의 연구 결과를 보면 손가락 끝부분은 신체 중에서 상당히 민감한 부분이다. 그리하여 우리는 사용자에게 더 많은 정보를 주고 또한 향후에 PHANTOM 과 같은 역감제시 장치와 연동하는 시스템을 만들기 위하여 손가락에 끼우는 형태의 촉감 제시장치 display 를 5\*5 형태의 배열로 구성하였다. Display 구성에 사용된 튜브의 크기는 내경 1.5mm, 외경 2.4mm 인데, 손가락 끝의 크기의 제한으로 인해 가로로 배치된 튜브 사이에는 공백이 없으나 세로로 배치된 튜브 사이에 0.8mm의 공백을 두었다. 그리하여 실질적으로 손가락 끝에 자극을 주는 display 의 총 면적은 가로 12mm, 세로 15.6mm 가 된다[그림 2-3 a)].

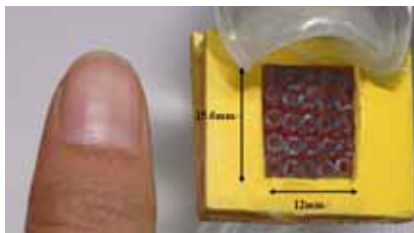
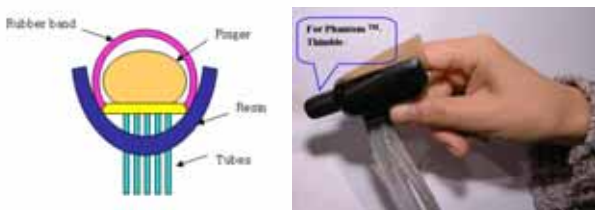


그림 2-3 a)display 의 실제크기



b) display 구성    c) Phantom 에 끼우기 위한 end-effector

그림 2-3 b)는 구현된 display의 단면을 보여주는 그림이다. 5\*5 배열의 튜브 끝이 손가락의 평평한 면에 접촉을 하게하고, 사용자가 display에 손가락을 끼웠을 때 잘 맞게 하기 위해 고무 밴드로 손가락 형태를 만들었으며 향후 Phantom™ thimble에 끼우기 위해 레진으로 손가락 크기만한 end-effector 부분을 디자인 하였다 [그림 2-3 c)].

## 3. 심리물리학적 실험 (Psychophysical Experiments)

### 3-1 실험 환경

16 명의 피 실험 자를 A, B 두 그룹으로 나누고 각각의 그룹은 8 명으로 구성하였다. 8 명은 3 명의 여성과 5 명의 남성으로 이루어져 있으며 나이는 22 세부터 29 세 이고 모두 오른쪽 손을 사용한다. 그룹 A 는 localization 수행과 거리 분해능에 관한 실험을 수행 하였고, 그룹 B 는 자극의 강도 (stimuli intensity) 와 시간 분해능 실험을 수행하였다.

네 가지의 심리 물리학적 실험 모두 연습세션과 실제 실험으로 이루어졌다. 실험 전 피 실험 자들은 실험 설명서를 읽고, 컴퓨터 스크린 앞에 앉는다. 그리고 왼쪽 검지에 촉감제시장치를 부착하고 연습 세션을 시작한다. 연습 세션이 끝나면 다른 소음의 영향을 줄이기 위해 헤드폰을 쓰고 실제 실험을 수행한다. 신뢰성 있는 데이터를 얻기 위해 연습 세션의 데이터는 실험 분석에 사용되지 않는다. 그리고 네 가지의 실험에서 사용된 압력의 세기는 15psi 이다.

### 3-2 Localization Performance 실험

#### 3-2.1 과제 (Task)

이 실험은 손가락 끝의 localization performance 를 측정하기 위한 실험이다. 9 군데의 다른 위치를 테스트하기 위해 3\*3 배열을 밀집된 형태와 확장된 형태로 나누어 두 가지 경우에 관한 localization performance 를 측정하였다. 그림 3-1 은 밀집된 3\*3 display [그림 3-1 a)]와 확장된 3\*3 display [그림 3-1 b)]를 보여준다. 그리고, 그림 3-1 c)는 9 개의 출력부분과 키보드의 숫자 패드의 번호가 매치됨을 보여준다.

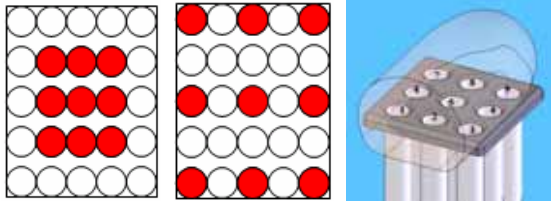
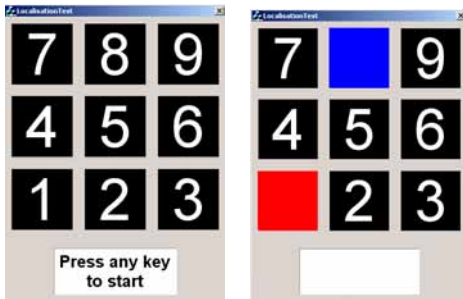


그림 3-1 a)밀집된 배열 b)확장된 배열 c)display

그림 3-2 a)는 실험 인터페이스를 보여주는데, 이것은 손가락 끝에 부착된 display 의 3\*3 배열에 부합한다. 두 가지의 실험 모두 각각의 시도 동안 시작을 하기 위한 키를 누르고 1000ms 이후에 500ms 동안 air-jet 으로부터 자극을 받게 된다. 만약 왼쪽 가장 아래의 air-jet 에서 자극이 발생하면 피 실험 자는 키보드에 있는 숫자 1 을 입력하게 된다. 입력된 숫자는 기록이 되면 붉은색으로 변하고 500ms 후 정답이 파란색으로 표시되게 된다 [그림 3-2 b)]. 90 번 시도의 연습 후 180 번의 실험 데이터가 저장이 되고 이때 각 air-jet 은 20 번씩 랜덤 한 순서로 디스플레이 된다.

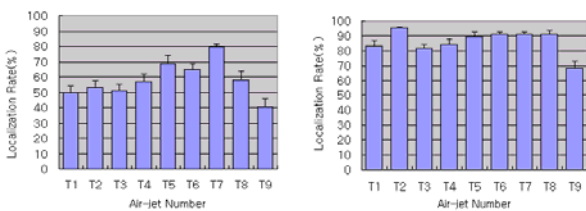


a)localization 인터페이스 b)사용자 응답 인터페이스

그림 3-2

### 3-2.2 결과 및 고찰

그림 3-3 은 각각의 실험에서 개별 air-jet 의 localization rate 를 보여준다.



a)밀집된 3\*3 배열 b) 확장된 3\*3 배열

그림 3-3 localization rate (막대는 표준편차 나타냄)

두 실험의 localization 수행을 비교하는 T-test 를 통해 유의 차이(significant differences )가 있음을 알 수 있었고( $p < 0.001$ ), 실험 결과로부터 밀집된 배열의 display 인 경우 58.13 %, 확장된 배열의 경우는 85.9%의 localization rate 을 얻을 수 있었다 [그림 3-4].

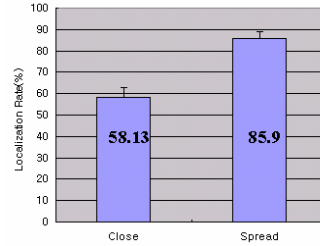


그림 3-4 localization rate 평균 (막대는 표준편차 나타냄)

Localization performance 실험 결과로부터 air-jet 자극에 대한 인식이 상대적으로 손가락 끝에 균등하다는 것을 알 수 있다. 이것은 우리의 단순한 하드웨어 디자인의 유용성을 입증하는 것이 새로운 심리물리학(psychophysics) 적인 통찰을 제공함을 알 수 있다. 그러나 확장된 배열의 경우 배열의 맨 끝 단에 위치한 air-jet 은 인식률이 현저히 떨어지기 때문에 한가지 유의 해야 할 것이 있다. Air-jet 이 충분히 손가락 끝의 곡선부분아래 위치해 있으면 손가락의 접촉 부위와 공기의 방출구 사이의 길이가 인식의 결함을 줄 만큼 커져 버릴 수도 있기 때문에 이와 같은 결함을 보완 하기 위해서 더 작은 치수의 array 을 사용하거나 손가락의 윤곽에 잘 맞도록 디스플레이를 손가락 끝에 잘 밀착 시키는 형태의 display 의 디자인을 해야 할 것이다.

### 3-3 길이 분해능(Two point threshold) 실험

#### 3-3.1 과제 (Task)

이 실험의 목표는 공기 촉감 자극에 대한 손가락 끝의 길이 분해능(two point different threshold) 을 찾는 것이다. 첫 번째 실험은 그림 3-5 와 같이 두 air-jet 사이의 거리에 따라 5 가지로 자극이 주

어지고 피 실험 자는 그 자극이 하나의 점에서 주어졌는지 아니면 두 점인지를 인지하고 대답을 해야 한다. 이때 두 점 사이의 거리는 0, 1.7, 4.9, 8.1, 11.3mm 이다.

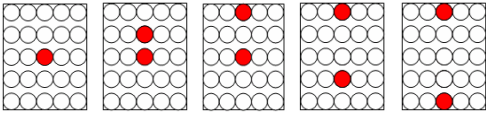


그림 3-5 길이 분해능 display(길이: 0,1.7,4.9,8.1,11.3 mm)

각각의 자극은 10 번씩 연습 세션 동안 수행이 되고 20 번씩, 총 100 번의 시도를 통해 실험 데이터가 저장되며 이때 실험에 이용된 인터페이스는 아래 그림과 같다 [그림 3-6]. Localization performance 실험에서와 마찬가지로 하나 또는 두 점에서의 자극이 동시에 주어지면 피 실험자가 입력한 반응은 빨간색으로 변하고, 이때는 정답을 말해주지 않고 다음 번의 시도로 넘어가게 된다.

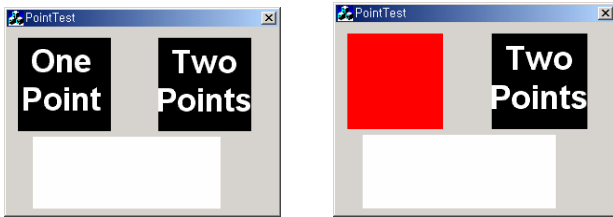


그림 3-6 길이 분해능 인터페이스

그러나 첫 번째 실험을 수행하고 두 air-jet 사이의 거리가 넓기 때문에 정확한 분해능을 찾을 수 없다고 결론이 내려졌다. 그리하여 그림 3-7 과 같이 두 air-jet 사이의 거리를 좁혀 다시 동일한 조건에서 실험을 수행 하였다. 이때 각각 두 air-jet 사이의 거리는 0, 0.9, 1.7, 2.6mm 이다. 한 점에서의 자극 90 번과 다른 3 가지의 두 점 자극은 각각 30 번씩 랜덤 한 순서로 수행되어 총 180 번의 시도가 데이터로 저장되었다.

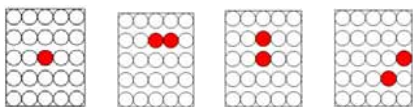


그림 3-7 수정된 길이 분해능 display(길이:0,0.9,1.7,2.6 mm)

### 3-3.2 결과 및 고찰

Factor	Average	Variance	Percentage
Gap 1	14.875	89.26785714	49.58333333
Gap 2	18.875	40.98214286	62.91666667
Gap 3	26.625	3.125	88.75

표 1 길이 분해능 결과

그림 3-8 과 표 1 은 하나 또는 두 개 점의 자극을 피실험자가 얼마나 정확히 인식하는지를 보여준다. 데이터로부터 ANOVA 는 멀리 떨어진 경우의 실험과 ( $F=128.751$ ,  $p<0.001$ ), 작은 사이즈의 경우 ( $F=11.052$ ,  $p<0.001$ ) 에서도 유의차이 (significant effects)를 보였다. 3 번째 요소인 경우 거의 90% 정도 피 실험 자들이 두 점으로 판단할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 2.6mm 에 근접하는 거리를 길이 분해능으로 선정 할 수 있다.

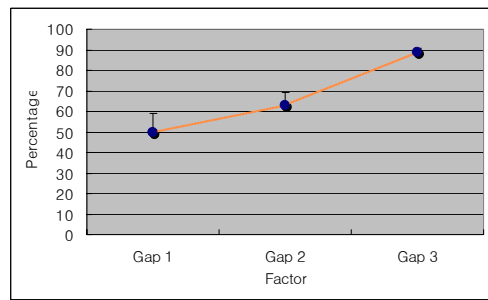


그림 3-8 길이 분해능 결과(막대는 표준편차 나타냄)

### 3-4 시간 분해능 실험

#### 3-4.1 과제 (Task)

시간 분해능 또한 인간의 인식 체계의 중요한 하나의 요소이다. 짧은 시간차를 두고 두 개의 자극이 주어질 때 피 실험 자들이 두 개의 자극을 하나로 느끼지 않고 두 개로 느낄 수 있는 최소한의 시간을 시간 분해능이라고 부르는데, 이러한 분해능을 찾기 위해 다음과 같은 실험이 수행 되었다. 인터페이스는 그림 3-9 a)와 같이 주어지고 25 개의 air-jet 중 랜덤 하게 위치한 한 곳에서 한 번 또는 두 번의 자극이 주어지면 [그림 3-9 b)], 피 실험 자는 자극이 한번인지 두 번인지를 결정하여 적절한 응답을 한다. 두 자극간의 시간은 0, 10, 20, 30, 40 msec 로 두었으며 각각 10 번씩 랜덤 한 순서로 자극이 주어졌다.



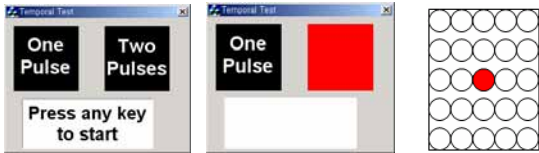


그림 3-9 a) 시간 분해능 인터페이스 b) 시간 분해능 display

### 3-4.2 결과 및 고찰

쉽게 인식하고 구별할 수 있는 속도에서 air-jet 의 자극을 display 하는 것은 매우 중요한 과제 일 것이다. 인간의 촉감시스템에서 시간 분해능은 상당히 복잡한 이슈이다. 다른 종류의 기계적 수용기(mechanoreceptor) 때문에 공기촉감의 큐에 관한 적합한 시간 분해능은 찾는 것은 매우 어려운 일이기 때문이다. 그리고 우리가 사용한 밸브의 성능 규격에 의하면 응답 속도가 20ms 이므로 그 이하의 시간 분해능에 대해서는 제한적이다. 실험 으로부터 얻은 결과를 살펴보면 최소시간인 10ms 인 경우에도 95% 이상의 인식률을 얻었으나 하드 웨어의 성능 부족으로 20ms 이하의 시간 분해능 은 측정하기가 힘들다고 결론 지을 수 있다.

## 3-5 자극의 강도(Intensity) 실험

### 3-5.1 과제 (Task)

자극의 강도는 주어진 강도의 세기에 따라 사용자들이 세기의 강약을 느낄 수 있는지 보기 위 한 중요한 척도가 될 수 있다. 이 실험은 손가락 끝에 display 된 air-jet 의 크기와 강도에 비례하여 사용자가 느끼는 공기 촉감의 양의 변화를 조사하 기 위해 수행 되었다. 그림 3-10 에서 보는 바와 같이 1 개부터 9 개의 air-jet 모두 동작하는 9 가지 의 다른 강도를 설정해 두었고 81 의 연습세션 후 에 162 번 시도의 실험을 수행 하였다.

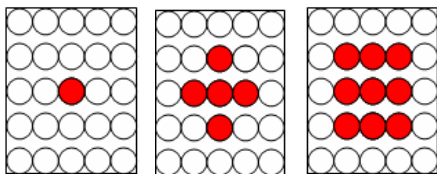


그림3-10 강도 display: 1부터 9개의 air-jet이 작동함에 따라 강도의 세기가 달라진다.

500ms 동안의 첫 번째의 자극이 display 되고

1000ms 후에 두 번째 자극이 500ms 동안 주어지 는데 피 실험 자는 두 개의 자극의 세기를 아래 그림 3-11 과 같은 인터페이스를 통해 비교를 하였 다.



그림 3-11 자극의 강도 인터페이스

### 3-5.2 결과 및 고찰

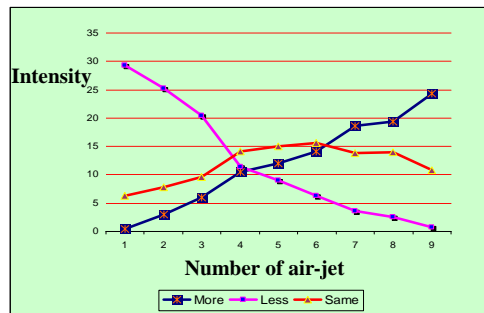


그림 3-12 자극의 강도 실험 결과

기록된 데이터는 두 개의 다른 강도의 자극을 비교 할 수 있게 하는 척도가 되는데, 이러한 데 이터를 간단히 표현하기 위해서 각각의 강도의 감 소 및 증가 또는 등가의 그래프로 이를 비교할 수 있다. 그림 3-12 에서와 같이 실제의 강도가 세짐 에 따라 피 실험 자들이 느끼는 강도의 척도도 증 가 하며, 강도가 약해 질수록 피 실험 자들이 느 끼는 강도 역시 거의 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 그리고 같은 세기의 강도인 경우 대체로 완 만하지만 강도의 세기가 너무 약하거나 셀 경우 인식률이 조금 떨어 지는 경향이 있음을 알 수 있 다.

## 4. 결론 및 향후 계획

본 논문에서는 손가락 끝에 부착하는 형태의 공기 촉감 제시장치를 설계하였다. 그리고 이 장 치를 사용하여 얼마나 다양한 정보를 표시할 수 있는지를 알기 위해 검지 손가락의 localization rate, 시간 분해능, 길이 분해능, 강도의 세기 등의 심리 물리학적 실험을 수행 하였다. 이와 같은 기초적

인 연구는 향후 응용 시스템을 구성 하여 더욱 효과적인 촉감 정보를 사용자에게 제공 할 때 기초 지식으로 사용될 수 있다.

향후에는 제안된 시스템을 바탕으로 복잡한 가상의 물체, 예를 들어 휴대폰이나 PDA 같은 가전기기의 버튼을 누르는 느낌 등을 제공하고 두더지 게임 등에 적용하여 가상환경과 상호 작용 시 공기촉감 정보를 주는 시스템에 관한 연구와, 몰입 감 있는 TV 시청을 위해 공기 촉감 제시장치를 사용하는 새로운 촉감 콘텐츠에 관한 연구도 진행 될 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 정보통신 선도기반 기술개발사업 ITRC 실감방송 개발사업 및 실감 모델링 개발 사업에 의해 지원되었습니다.

### 참고문헌

1. Grigore C. B., Philippe C.: Virtual Reality Technology. Second Edition, by John Wiley & Sons, (2003)
2. Sensible Technologies, Inc. programming the PHANToM Haptic Device with the OpenHaptics™ Toolkit, VR2005, March 13<sup>th</sup>, 2005
3. Stone, R.J. “Haptic feedback: A brief history from telepresence to virtual reality”, Haptic Human-Computer Interaction: Proceedings, Lecture Notes in Computer Science, 2058, 1-16 (2001).
4. Amemiya, K. and Tanaka, Y. : “Portable Tactile Display Using Air Jet”, ICAT, 1999
5. Tanaka, Y. and Kanamori, T. “Dynamic Force Display Device by Pneumatic Pressure Feedback,” FLUCOME, Vol.2, pp.719-723, 1997
6. Sebastien Grange, Francois Conti, Patrice Rouiller, Patrick Helmer, Dr. Charles Baur, “Overviwe of the Delta Haptic Device”, Proceeding of 1th International Conference Eurohaptics, July, 2001 www.forcedimension.com

7. Yeongmi Kim, Jeha Ryu, “Information Display by Wearable Pneumatic Tactile Display”, HCI international 2005, 22-27 July 2005 Las Vegas, pp.459, Navada USA
8. Goldstein “The Somatic Senses”, in Sensation & Perception, 4<sup>th</sup> ed: Brooks/Cole, 1996
9. K.B. Shimoga “A Survey of Perceptual Feedback Issues in Dexterous Telemanipulation: Part II Touch Feedback”, Proceedings of IEEE International Symposium on Virtual Reality, Seattle WA, 1993
10. G. Moy, C. Wagner, R.S. Fearing “A Compliant Tactile Display for Teletaction,” ICRA, 2000
11. Hakan G., Benjamin P., Sankar J., Uma J., “Design of a Haptic Device for Weight Sensation in Virtual environments.,” ASME, pp 1-9, 2002
12. D.G. Caldwell, N. Tsagarakis, and C. Giesler, “An Integrated Tactile/Shear Feedback Array for Stimulation of Finger Mechanoreceptor”, IEEE Int Conf. Rob. and Auto., vol 1, pp. 287-292, 1999
13. Grigore C. B., Philippe C.: Force and Touch Feedback for Virtual Reality, by John Wiley & Sons
14. 김영미, 류제하, “웨어러블한 뉴메틱 텍타일 인터페이스를 이용한 정보의 표현”, HCI/VR/CG/DESIGN 학회 학술대회, 2005.1.31-2.3, 대구, 2005