

# 요 방향 회전에 대한 전정 역치와 심리 측정 함수

## Vestibular Threshold and Psychometric Function for Yaw Rotation

**이지완**  
**Jiwan Lee**  
 포항공과대학교  
 POSTECH  
 jiwan95@postech.ac.kr

**유용재**  
**Yongjae Yoo**  
 포항공과대학교  
 POSTECH  
 dreamseed@postech.ac.kr

**최승문**  
**Seungmoon Choi**  
 포항공과대학교  
 POSTECH  
 choism@postech.ac.kr

### 요약문

4D 는 시청각 영상에 모션(motion), 진동, 바람 등 물리적인 효과를 가미하는 기술을 의미한다. 본 논문에서는 주요 4D 효과 중 하나인 모션 효과에 필요한 전정 기초 연구를 수행하고자 요(yaw) 방향 회전 모션에 대한 절대 역치(absolute threshold)와 심리 측정 함수(psychometric function)를 구하였다. 모션 자극 생성에는 주파수가 0.5 Hz 인 사인파 각속도 개형을 이용하였으며, 인지 세기를 달리하기 위해 최대 각속도(peak velocity)를 조절하였다. 실험 방법은 항상 자극법(method of constant stimuli)을 이용하였으며, 각 시도마다 피험자는 제시되는 모션 자극을 받고 지각한 회전 방향으로 응답하였다. 심리 측정 함수는 프로빗 회귀 분석(probit analysis)을 이용하여 누적 정규 분포로 피팅하였다. 추정된 함수를 통해 구한 결과, 평균에 대한 절대 역치는  $1.01^\circ/s$ , 표준 편차는  $0.69^\circ/s$ 으로 측정되었다. 본 심리 측정 함수로부터 요 방향 자극에 대한 모든 지각 확률의 자극 세기를 구할 수 있다.

### 주제어

정신 물리학(psychophysics), 전정 지각(vestibular perception), 요(yaw), 절대 역치(absolute threshold), 심리 측정 함수(psychometric function), 모션(motion)

### 1. 서론

4D 는 시청각 영상에 모션(motion), 진동, 바람 등 물리적인 효과를 가미하는 기술을 의미한다. 시청각 이외의 다감각 효과 제공은 영상 속 사건들을 실감나게 함으로써 관객의 몰입감을 향상시킬 수 있으며, 4D 효과들 중 모션이 주로 사용된다[6]. 모션 효과는 해당 영상을 촬영하는 카메라나 영상 속 인물의 위치 변화로부터 자동 생성이 가능하다. 또는 예술적 감각을 바탕으로 효과 디자이너에 의해 생성 가능하나, 이들 모두 목표 대상인 인간의 지각 능력(perceptual ability)이 고려되어야 한다. 본 논문에서는 모션과

관련된 전정 감각(vestibular sense)에 대한 기초 연구를 하고자 한다.

3 차원 공간에서의 모션 효과는 가로축(lateral axis), 세로축(longitudinal axis), 수직축(vertical axis)에 대한 회전 모션과 선형 모션으로 나타낼 수 있다. 본 논문은 수직축에 대한 회전인 요(yaw) 방향 모션을 대상으로 한다(그림 1). 회전 모션의 경우 전정 신호는 각속도 단위로 입력되나, 반고리관의 특성으로 인해 적분되어 각속도 단위로 지각된다는 특징이 있다[7]. 이로 인해 모션 자극들의 인지 세기(perceived intensity)는 각속도 단위로 조절되어야 한다. 본 논문은 적절한 모션 자극의 생성을 위해 각속도 영역에서 불연속적인 부분이 없는 사인파 각속도 개형[1]을 사용한다. 한 주기의 사인파를 적분 시 코사인 종형(cosine bell)을 보이며, 해당 개형의 최대값인 최대 각속도(peak velocity)를 조절하여 인지 세기를 변화할 수 있다.

사람의 지각 능력은 자극에 대한 역치로부터 알아볼 수 있다. 자극의 세기가 커짐에 따라 사람이 지각할 확률이 커지기 시작하는데, 절대 역치(absolute threshold)는 일반적으로 0.5 이상의 확률로 인지될 수 있는 자극 세기로 정의된다. 역치의 여러 측정 방법 중 하나인 항상 자극법(method of constant stimuli)은 모든 실험 조건에 대해 여러 번 반복하여 측정하는 실험으로, 심리 측정 함수(psychometric function)를 구할 수 있다는 것이 특징이다[3]. 심리 측정 함수로부터 자극 세기에 따른 모든 지각 확률을 알 수 있으며, 사전에 정의된 특정 지각 확률의 자극 세기만 구할 수 있는 다른 방법들과는 차이가 있다. 또한 함수 개형을 이용하여 자극 세기에 따른 민감도를 예상할 수 있다.

본 논문은 항상 자극법을 이용하여 모션 자극에 대한 절대 역치와 심리 측정 함수를 구한다. 모션 자극은 수직축에 대한 회전 모션인 요 방향 모션을 대상으로 하며, 사인파 각속도 개형을 이용하여 생성한다.



그림 1 이노시물레이션 6 자유도 모션 플랫폼(IMP6-M150)

이때 피험자가 두 개의 회전 방향 중 하나를 선택하도록 하는 2AFC로 실험한다. 기존 연구들 중요 방향 모션에 대한 심리 측정 곡선은 이미 측정된 적 있으나 곡선 피팅에 네 점의 데이터가 사용되었다[8]. 또한 사인파 개형이 아닌 일정하게 지속되는 개형을 이용하였다. 이러한 개형은 사인파와 달리 각속도 영역에서 마루 굴절(cupula deflection)과 다른 개형을 보인다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 실험 방법에 대해서 기술하며, 3 장은 실험 결과를 설명하며 토의한다. 4 장을 마지막으로 결론을 맺는다.

## 2. 실험 방법

이 장에서는 역치 측정의 실험 방법에 대하여 설명한다. 실험 방법은 네 절로 나누어 피험자 및 실험 장비, 모션 자극, 실험 절차, 결과 분석 방법 순으로 기술한다.

### 2.1 피험자 및 실험 장비

실험에는 남성 피험자 다섯 명이 참여하였다. 피험자 모집은 40 세 미만[2]인 20-30 대로 제한되었으며, 전정 장애 관련 병력이 없는지 확인 후 실험에 참여하였다. 또한 모든 피험자들로부터 본 연구의 사전동의를 시행하였다. 모션은 이노시물레이션 6 자유도 모션 플랫폼(IMP6-M150)으로 재생하였다(그림 1). 피험자는 모션 플랫폼 위의 의자에 앉아 모션을 받는다. 이때 머리 고정 밴드와 목 고정대를

이용하여 전정계가 위치한 내이의 위치를 일정하게 고정하였다. 이외에 안대와 귀마개 착용으로 타 감각기에서 받을 수 있는 정보를 차단하였다.

### 2.2 모션 자극

모션 자극은 진폭이 다른 사인파 각가속도 한 주기로 생성하였다[1]. 각 모션 자극은 주파수가  $f$  일 때 각속도 영역에서의 최대값은  $A/\pi f$ , 변위 영역에서의 전체 누적 값은  $A/(2\pi f^2)$ 으로 계산된다.  $f$ 가 0.5 인 경우 한 주기의 최대 각속도와 누적 변위 값이  $2A/\pi$ 로 동일하다는 특징이 있다. 본 논문에서는  $f$ 가 0.5 이상일 경우 역치 값이 일정하게 나타난다는 결과[4]와 실험의 전체 소요 시간을 고려하여 주파수 값을 0.5 로 고정하였다. 식 1-2 는 각가속도 신호  $a(t)$ 와 각속도 신호  $v(t)$ 를 나타낸다.

$$a(t) = \pm [A \sin(2\pi ft)]_0^{\frac{1}{f}} \quad (1)$$

$$v(t) = \pm \left[ \frac{A}{2\pi f} (1 - \cos(2\pi ft)) \right]_0^{\frac{1}{f}} \quad (2)$$

거의 지각하지 못하는 자극부터 충분히 지각 가능한 자극을 생성하기 위해, 요 방향의 측정치[4]를 참고하여 0.1°/s과 2°/s 이내인 자극들이 선택되었다. 피험자에게 제시된 모션 자극들은 총 7 개로 최대 각속도 값은 0.10, 0.42, 0.73, 1.05, 1.37, 1.68, 2.00°/s이다. 모든 자극들은 2 초 동안 제시된다. 그림 2 는 2°/s 의 최대 각속도를 갖는 모션 자극 예시이다.

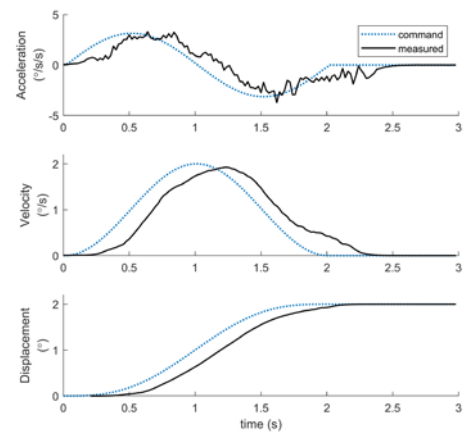


그림 2 주파수 0.5 Hz, 최대 각속도 2° /s 인 모션 자극의 각가속도(상), 각속도(중), 변위(하) 그래프. 점선: 모션 플랫폼에 전달된 명령, 실선: 실제 모션 플랫폼의 움직임

### 2.3 실험 절차

실험은 항상 자극법을 이용하여 진행하였다. 피험자는 피험자 내 설계(within-subject design)로 모든 실험 조건에 대해서 응답한다. 실험 요인은 모션 자극의

회전 방향(좌 또는 우 방향)과 각속도의 최대값으로 설정하였다. 항상 자극법에 따라 각 실험 조건에 대한 지각 확률을 얻기 위해 동일한 실험 조건을 20 번씩 총 280 회 반복 측정하였으며, 자극들은 무작위 순서로 제시되었다. 전체 실험은 일곱 개의 블록으로 구성하였다. 각 블록은 피험자에게 40 개의 모션 자극들을 제시하며 약 10 분 동안 소요된다. 네 개의 블록이 끝난 이후 5 분 이상의 휴식을 갖도록 하였다.

매 시도마다 피험자는 2 초 동안 재생되는 단방향 회전 자극을 받는다. 모션 자극의 제시가 끝난 이후 지각한 회전 방향의 버튼을 눌러 피험자의 지각 반응을 보고한다. 이때 모션 자극의 시작과 끝은 서로 다른 경고음으로 피험자에게 전달된다. 피험자는 두 경고음의 의미를 사전에 인지하고 있도록 안내받으며 모션의 끝을 알리는 경고음 이후에 응답하도록 지시받는다. 응답은 좌 또는 우로만 가능하며, 방향을 지각하지 못한 경우에도 두 응답들 중 하나를 선택해야 한다(2AFC).

모든 모션 자극은 모션 플랫폼의 정위치에서 수행된다. 모션 플랫폼은 피험자 응답을 받은 이후 정위치로 복귀된다. 이 경우 피험자에게 정답이 누출될 수 있으나 시각을 차단한 상태에서의 전정 자극 학습은 역치 값에 영향을 미치지 않는다[5].

### 2.4 결과 분석 방법

피험자들의 자극 반응이 실제 회전 자극의 방향과 동일한 경우에 대해 평균 심리 측정 함수를 구하였다. 심리 측정 함수는 0.5 에서 1 사이 값을 갖는 누적 정규 분포로 피팅하였으며, 프로빗 회귀 분석(probit analysis)을 이용하였다. 적합한 모수 추정을 위해 우도가 최대가 되는 모수를 찾도록 반복 수행되었다.

### 3. 결과 및 토의

그림 3 은 피험자 5 명에 대한 평균 심리 측정 함수 결과이다. 2AFC 실험의 경우 임의로 회전 방향을 맞추어 확률이 0.5 이므로, 절대 역치는 75 백분위수를 사용한다. 평균에 대한 절대 역치는 1.01°/s, 표준 편차는 0.69 °/s 으로 측정되었다. 최대 각속도가 0.42 °/s 과 같이 느린 경우 입력된 전정 신호가 반고리관의 마루 굴절에 영향을 미치기에 충분하지 않아 인지가 어렵다고 볼 수 있다. 또한 지각 확률이 1 에 가까운 경우인 2.00 °/s 는 충분하다고 해석 가능하다. 그림 4 는 피험자들의 개인별 심리 측정 함수를 보인다. 피험자 1 의 경우를 제외하면 역치 값과 자극 세기 변화에 따른 민감도 사이에 양의 관계가

예상된다. 이후 추가적인 피험자 모집으로 실험 결과의 신뢰성을 높일 필요가 있다.

이와 관련하여 사인파 개형으로 요 방향 역치를 측정하는 연구는 [4, 9]가 있다. 두 연구 모두 적응형 방법(adaptive method)인 1U3D 으로 역치를 측정하여 79.4 백분위수로 정의된 값만을 보고하였다. [4]은 0.5 Hz 일 때 0.73°/s, [9]의 경우 1 Hz 일 때 1.06°/s 으로 보고하였다. 이때 [9]의 주파수가 0.5 Hz 보다 크나, 0.5 Hz 이상부터는 역치 변화가 유의미하지 않으므로[4] 동일선상에서 비교 가능하다. 본 심리 측정 함수의 79.4 백분위수 지점은 1.16°/s 으로 두 역치 값들에 비해 높게 측정되었다.

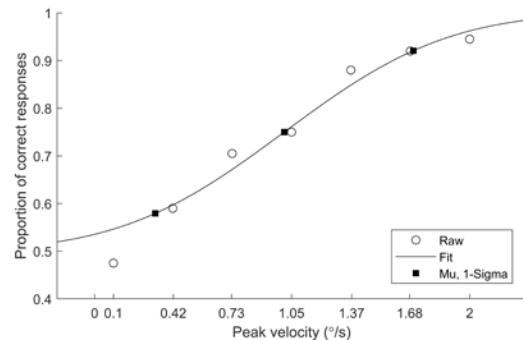


그림 3 평균 심리 측정 곡선

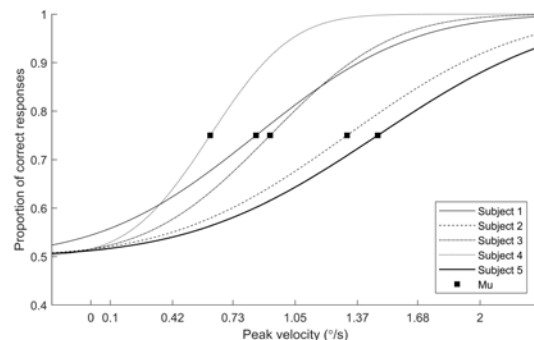


그림 4 개인별 심리 측정 곡선

그림 5 는 회전 자극의 좌/우 방향에 대한 평균 심리 측정 함수를 나타낸다. 좌 방향의 역치는 1.16°/s, 표준 편차는 0.71°/s 이다. 우 방향의 역치는 0.87°/s, 표준 편차는 0.64°/s 이다. [9]에 따르면 회전 방향에 따른 역치 차이는 유의미하지 않다고 보고되었으나, 본 실험 결과에서는 우 방향에 대해 역치가 낮게 측정되었다.

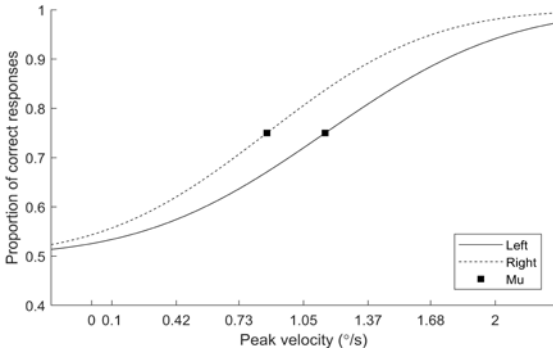


그림 5 회전 자극의 좌/우 방향에 대한 평균 심리 측정 함수

#### 4. 결론

본 논문은 항상 자극법을 이용하여 요 방향 회전 역치 실험하였다. 이로부터 모든 지각 확률에 해당하는 자극 세기를 알 수 있는 심리 측정 함수를 구하였다. 실험 결과 피험자들의 평균 역치는  $1.01^\circ/s$ , 표준 편차는  $0.69^\circ/s$ 으로 측정되었다. 이러한 전정 지각에 대한 연구 결과는 향후 4D의 모션 효과 생성에 기초 연구 결과로 이용되길 기대한다.

#### 사사의 글

이 논문은 2018년도 삼성전자 미래기술육성센터의 재원으로 ICT 창의 과제 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(SRFC-IT1802-05)

#### 참고 문헌

1. Benson, A. J., E. C. Hutt, and S. F. Brown. "Thresholds for the perception of whole body angular movement about a vertical axis." *Aviation, space, and environmental medicine* (1989).
2. Bermúdez Rey, María Carolina, et al. "Vestibular perceptual thresholds increase above the age of 40." *Frontiers in neurology* 7 (2016): 162.
3. Goldstein, E. B. (2009). *Sensation and perception*. Cengage Learning.
4. Grabherr, Luzia, et al. "Vestibular thresholds for yaw rotation about an earth-vertical axis as a function of frequency." *Experimental brain research* 186.4 (2008): 677-681.
5. Hartmann, M., Furrer, S., Herzog, M. H., Merfeld, D. M., & Mast, F. W. (2013). Self-motion perception training: thresholds improve in the light but not in the dark. *Experimental brain research*, 226(2), 231-240.

6. Lee, J., Han, B., and Choi, S. (2015). Motion effects synthesis for 4D films. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 22(10), 2300-2314.
7. Mulder, Willem. *Quantitatieve betrekking tusschen prikkel en effect bij het statisch orgaan*. den Boer, 1908.
8. Rodenburg, M., A. J. J. Maas, and H. P. W. Stassen. "Thresholds for the perception of rotation: Variability, psychometric curves, and comparison with hearing thresholds." *Biological cybernetics* 42.1 (1981): 23-28.
9. Roditi, Rachel E., and Benjamin T. Crane. "Directional asymmetries and age effects in human self-motion perception." *Journal of the Association for Research in Otolaryngology* 13.3 (2012): 381-401.