



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

동공팽창반응과 음성 신호의 특징을 이
용한 청취 노력도 평가 연구

The assessment of listening effort by using the
pupil dilation response and stimulus features

울 산 대 학 교 대 학 원
의 용 생 체 공 학 과
김 기 훈

동공팽창반응과 음성 신호의 특징을 이
용한 청취 노력도 평가 연구

The assessment of listening effort by using the
pupil dilation response and stimulus features

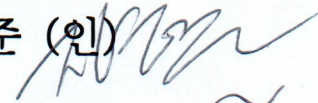
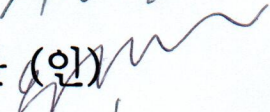
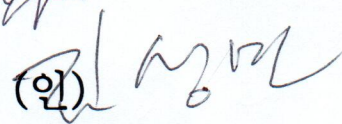
지도교수 우지환

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2020년 12월

울산대학교 대학원
의용생체공학과
김기훈

김기훈의 공학석사 학위 논문을 인준함

| | | |
|------|---------|---|
| 심사위원 | 지영준 (인) |  |
| 심사위원 | 우지환 (인) |  |
| 심사위원 | 김성민 (인) |  |

울산대학교 대학원

2020년 12월

목 차

| | |
|---|----|
| [국문 요약] | 6 |
| [그림 목록] | 8 |
| [표 목록] | 9 |
| 1. 서론 | 1 |
| 1.1. 연구 배경 및 목표 | 2 |
| 1.2. 배경 이론 | 4 |
| 1.2.1. 동공팽창반응(PUPIL DILATION RESPONSE) | 4 |
| 1.2.2. 시선추적장치(EYE TRACKING SYSTEM) | 5 |
| 2. 본론 | 7 |
| 2.1. 임상시험을 통한 동공팽창반응 측정 | 8 |
| 2.1.1. 피험자 정보 | 8 |
| 2.1.2. 임상시험 프로토콜 | 8 |
| 2.1.2.1. TASK 1 청취 노력도 평가를 위한 동공팽창반응 측정 | 8 |
| 2.1.2.2. TASK 2 노이즈 반응 검사 | 9 |
| 2.1.3. 동공팽창반응(PUPIL DILATION RESPONSE) 측정 | 10 |
| 2.2. 동공팽창반응 분석 | 11 |
| 2.3. 문장 자극의 특징 점 추출 | 12 |
| 2.4. 상호 상관 관계(CROSS-CORRELATION) | 13 |
| 2.5. 주관적 평가(SUBJECTIVE RATING) | 14 |
| 2.6. 청취 노력도 평가를 위한 동공팽창반응 결과 | 15 |
| 2.6.1. 문장 인지 점수 및 주관적 평가 결과 | 15 |
| 2.6.2. SNR 조건에 따른 동공팽창반응 | 16 |

| | |
|---|----|
| 2.6.3. 동공팽창반응과 문장 자극 특징 간의 상호상관관계 | 17 |
| 2.6.3.1. 문장 자극의 포락선의 상호상관계수 | 17 |
| 2.6.3.2. 문장 자극의 음소 IMPULSE TRAIN의 상호상관계수..... | 18 |
| 2.6.3.3. ENVPH의 상호상관계수 | 19 |
| 2.6.4. 문장 인지 점수와 각 특징의 최댓값 간의 상관관계 분석 | 19 |
| 2.6.4. 문장 인지 점수와 각 특징의 최댓값 간의 상호상관계수 | 20 |
| 2.6.5. 주관적 노력도와 각 특징의 최댓값 간의 상관관계 분석 | 21 |
| 2.6.6. 소음 반응 검사 결과..... | 23 |
| 3. 토의 및 결론..... | 24 |
| 3.1. 토의 및 결론..... | 25 |
| 참고 문헌..... | 27 |
| 감사의 글..... | 29 |
| [ABSTRACT]..... | 30 |

[국문 요약]

동공팽창반응과 음성 신호의 특징을 이 용한 청취 노력도 평가 연구

울 산 대 학 교 대 학 원
의 용 생 체 공 학 과
김 기 훈

최근 청각 보조기기를 평가하기 위한 지표로 언어 인지도 뿐만 아니라 청취 노력도(listening effort)에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 청취 노력도는 언어인지를 하기 위해 할당되는 정신적, 신체적 노력의 정도이다. 청취 노력도를 평가하는 객관적인 방법은 주로 사람의 생체신호반응을 이용하는데, 여러 생체 신호 반응 중 동공팽창반응(Pupil dilation response)을 이용하여 평가하는 연구들이 활발하게 이루어지고 있다. 동공팽창반응은 외부의 자극으로 인한 동공의 크기 변화를 나타낸 것이며, 이러한 반응은 외부의 자극으로 인한 생화학 반응 및 신경계의 반응으로써, 싸움-도주 반응(Fight-or-flight response)과 같은 반응이다. 동공팽창반응을 이용하여 청취 노력도를 평가하는 연구에서는 최대동공팽창, 평균값, 최대동공팽창이 발생하는 시간 등을 청취 노력도 평가에 사용하고 있다. 하지만 이러한 방식은 같은 청취 조건에서 개인간에 차이가 많아 정량적으로 청취 노력도를 평가하기에 한계가 있다.

기존의 언어인지평가 연구에 따르면, 음성 신호의 특성이 생체 신호에 반영되며, 또한 뇌에서 청각 정보를 처리하는 과정에 음성 신호의 특성이 영향을 미친다. 따라서 음성 신호의 특성을 이용하여 동공팽창반응을 분석하면 정량적인 청취 노력도 평가가 가능할 것이다.

본 연구에서는 청취 조건에 따른 동공팽창반응을 측정하고, 측정된 동공팽창반응과

문장 자극의 특징 점 간의 상호상관계수를 이용하여 정량적으로 청취 노력도를 분석하는 방법을 제안한다. 선행 연구와 동일하게 청취 조건에 따른 동공팽창반응은 가장 어려운 청취 조건에서 동공팽창반응의 최댓값이 가장 크게 나타났다. 동공팽창반응 과 음성 신호의 특징 간의 상호상관계수의 최댓값이 어려운 청취 조건에서 유의미하게 높았으며, 상관계수를 이용하여 청취 노력도 평가가 가능하다는 것을 증명하였다. 또한 개인차를 확인 하기 위하여 주관적 평가 점수와 각 특징의 최댓값 간의 상관 분석 및 선형 회귀 분석을 하였다. ENVPH (multiplying envelope with phoneme onset impulse train)을 특징 점으로 사용하여 계산된 PCV(peak coefficient value)를 사용하여 청취 노력도를 평가 하였을 때, 주관적 노력도와 상관계수가 가장 높았으며, RMSE (root mean square error) 및 분산이 가장 작게 나타났다.

연구에서 제안한 동공팽창반응과 소리의 특성 간의 상호상관계수를 이용한 청취 노력도 평가 방법은 이전의 평가 방법보다 정량적인 청취 노력도 평가가 가능할 것으로 예상되며, 이에 기반하여 임상에서 청각 보조 기기의 성능 평가에 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

[주제어] 청취 노력도, 동공팽창반응, 시선추적장치, 문장 자극의 특징, 상호상관관계

[그림 목록]

| | |
|---|----|
| 그림 1. 교감 신경 및 부교감 신경에 의한 동공팽창반응 예시도..... | 4 |
| 그림 2. 비디오 기반의 시선 추적 장치의 예시, 스크린 거치형 시선추적장치(왼쪽) 및 웨어러블 시선추적장치(오른쪽)..... | 5 |
| 그림 3. 스크린 거치형 시선추적장치 원리도 | 6 |
| 그림 4. 웨어러블 시선추적장치 원리도..... | 6 |
| 그림 5. 동공팽창반응 측정을 위한 실험 환경..... | 9 |
| 그림 6. 청취 노력도 측정을 위한 자극 프로토콜 | 9 |
| 그림 7. 동공팽창반응 측정 실험 환경 예시도..... | 10 |
| 그림 8. 반응 데이터 전처리 과정..... | 11 |
| 그림 9. 각 문장 자극의 특징 점 예시..... | 12 |
| 그림 10. 동공팽창반응 및 각 문장 특징 점의 예시 및 상호 상관 계수 예시 | 13 |
| 그림 11. 주관적 평가를 위한 평가 용지 예시 | 14 |
| 그림 12. SNR 조건에 따른 문장 인지 점수 및 주관적 평가 점수..... | 15 |
| 그림 13. SNR 조건에 따른 동공팽창반응 | 16 |
| 그림 14. SNR 조건에 따른 (a)동공팽창반응과 문장 자극의 포락선 간의 상호상관계수 및 (b)각 피험자의 peak coefficient value(PCV)..... | 17 |
| 그림 15. SNR SNR 조건에 따른 (a)동공팽창반응과 문장 자극의 음소 impulse train 간의 상호상관계수 및 (b)각 피험자의 peak coefficient value (PCV) | 18 |
| 그림 16. SNR 조건에 따른 (a) 동공팽창반응과 문장 자극의 ENVPH (multiplying envelope with phoneme onset impulse train) 간의 상호상관계수 및 (b) peak coefficient value(PCV)..... | 19 |
| 그림 17. 문장 인지 점수에 따른 각 특징의 최댓값 분포 및 예측된 선형 회귀 모델 | 20 |
| 그림 18. 주관적 노력 점수에 따른 각 특징의 최댓값 분포 및 예측된 선형 회귀 모델 | 21 |
| 그림 19. 주관적 노력도 점수에 따른 각 특징의 RMSE 및 표준편차 막대 그래프 | 22 |
| 그림 20. Task1의 동공팽창반응과 Task2의 동공팽창반응 결과 | 23 |

[표 목록]

| | |
|--|----|
| 표 1. SNR 조건에 따른 각 피험자 들의 최대 동공팽창반응(peak pupil dilation, PPD)의 평균 및 PPD 발생 latency의 평균..... | 16 |
| 표 2. 주관적 노력도 점수와 각 특징 간의 상호 상관계수, root-mean-square error (RMSE) 및 표준편차..... | 22 |

1. 서론

1.1. 연구 배경 및 목표

일상생활에서 대화를 할 때 우리의 뇌는 언어인지를 위해서 노력을 한다. 소음이나 방해 요소가 없는 환경에서는 언어 인지가 용이하지만, 주변 소음이 있는 환경에서는 더 많은 노력을 하도록 요구 된다. 언어인지시에 방해 요소를 극복하기 위해 할당 되는 정신적, 신체적 노력의 정도를 청취 노력도(listening effort)라고 한다[1]. 이는 같은 환경에서 언어 인지에 대한 노력 정도에 대한 평가나, 보청기 및 인공 와우와 같은 청각 보조 기기의 소음 감쇠 기능, 방향성 마이크로폰 등의 최신 기술의 사용시 언어 인지가 얼마나 더 용이한 정도를 평가 하기도 한다[2].

노화나 외부의 충격 등에 의한 고막의 손상으로 인해 듣는 능력이 저하 되는 것을 난청이라고 하는데, 이러한 난청 환자들은 간접 소음이나 언어 인지능력의 저하로 인해 일상적인 언어소통의 어려움을 겪는다[3]. 유사한 언어 인지도를 보이더라도, 일반인에 비해 청취 노력도가 더 많이 요구 되며, 이는 청취에 따른 피로도 증가를 유발하기 때문에 반드시 고려되어야 한다. 또한, 다양한 보청기의 성능 평가 및 보청기의 적합 화 평가에서 언어 인지도와 청취 노력도 또한 고려 되어야 하며, 청취 노력도에 대한 정확한 분석이 필요하다.

청취 노력도를 평가하기 위한 방법에는 주관적인 방법인 행동 반응 측정법, 객관적인 방법인 생체신호기반의 측정법 등이 있다. 객관적인 평가를 위해 심전도, 피부 전도도, 뇌 신호, 동공팽창반응 등과 같은 생체 신호를 이용하고 있다[4-6]. 동공팽창반응은 청취 노력도에 가장 민감하게 반응하며[7], 많은 연구들에서 동공팽창반응을 이용하여 청취 노력도 평가 연구를 진행 하고 있다. 이러한 연구들은 FUEL (Framework Understanding Effort of listening)에 따라 동기나 보상, 부하의 양, 피드백 유무 등을 고려하여 실험 환경을 설계하고 동공팽창반응을 통하여 청취 노력도의 변화를 확인 하였다[8-10]. 동공팽창반응을 이용하여 청취 노력도를 평가하는 연구들은 조건의 변화에 따른 동공팽창반응의 평균, 최대 동공 팽창, 최댓값 발생 시점(latency), 기준선 등을 분석 요소로 사용하였다. 하지만 이러한 청취 노력도 평가 방식은 개인마다 차이가 많이 나타나며, 청취 노력도의 정량적 평가에 한계가 있다.

기존 언어인지 평가 연구에 따르면, 음성 신호의 포락선이 생체 신호에 반영 되며[11], 문장의 음소가 소리를 이해 할 때 발생하는 생체 신호 변화에 반영이 된다[12]. 또한 뇌에서 청각 정보를 처리하는 과정에서 소리의 특징이 동반 되며, 소리의 특징과 신경 활

동이 유사한 관계를 가진다[13]. 따라서 문장 자극의 특징 점이 동공팽창반응에 영향을 미칠 것이며, 이러한 특징 점을 이용하여 더 정확한 청취 노력도 분석이 가능 할 것으로 판단 된다.

따라서 본 연구의 목적은 문장 자극에 따른 동공팽창반응을 측정하고, 측정된 동공팽창 반응과 음성 신호의 포락선(envelope) 또는 음소발화시점 정보와 같은 문장 자극의 특징 점 간의 상관관계에 기반하여 청취 노력도를 정량적으로 분석하고 평가하는 새로운 방법을 제시하고자 한다.

1.2. 배경 이론

1.2.1. 동공팽창반응(Pupil dilation response)

일반적으로 동공은 팽창 및 수축을 통하여 눈으로 들어오는 빛의 양을 조절한다. 뿐만 아니라 놀라거나, 긴장, 흥분 등 정신적으로 변화가 생겼을 때 동공의 크기가 변화하는데, 이러한 반응을 동공팽창반응이라고 한다. 동공팽창반응은 교감 신경(sympathetic nerve) 및 부교감 신경(parasympathetic nerve)의 활동에 의해 조절되며, 내외부의 요인에 의하여 교감 신경의 작용으로 발생하는 생체 변화 반응을 싸움-도주 반응(fight-flight response)이라고 한다[14].

동공팽창반응은 심리학 및 신경 과학 분야에서 주의력, 인지 과정, 기억, 인지 부하 및 인지 제어 등과 같은 작업의 처리 및 자원 할당의 신뢰할 수 있는 척도로 나타나며, 더 큰 동공 확장은 더 큰 처리 부하 또는 정신적 노력을 반영한다[15].

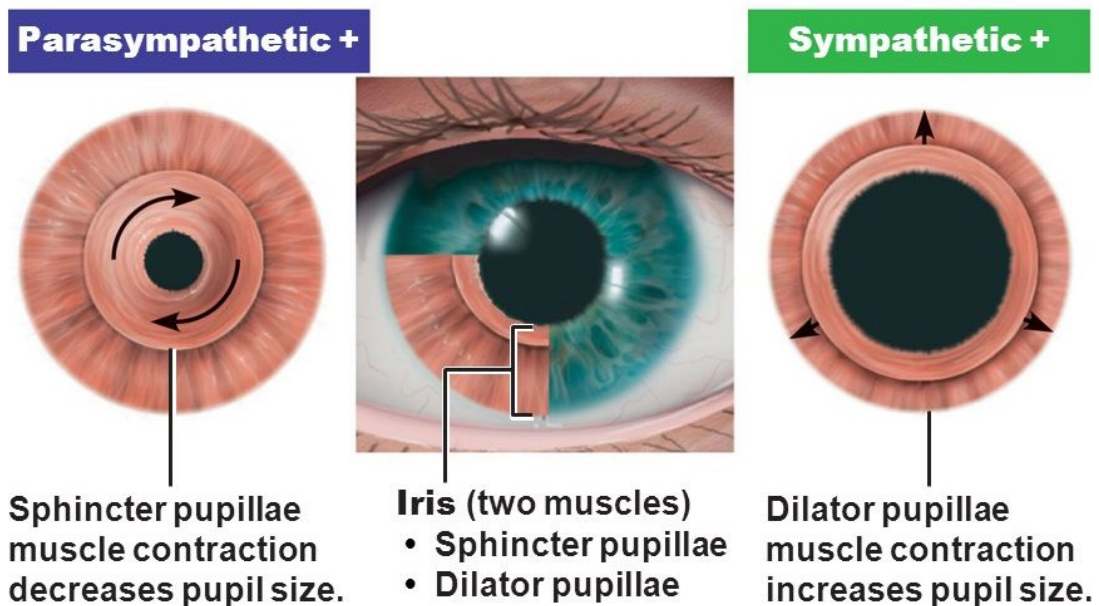


그림 1. 교감 신경 및 부교감 신경에 의한 동공팽창반응 예시도

1.2.2. 시선추적장치(Eye tracking system)

시선 추적(Eye tracking)은 시선의 위치나 눈의 움직임을 추적하는 기술이며, 시선추적장치는 응시하는 지점의 위치와 눈의 움직임을 측정하는 장치를 말한다. 시선을 추적하는 방법은 자기장 센서가 내장된 특수 콘택트렌즈와 같은 부착물을 통하여 추적하거나, 눈 주위에 전극을 배치하여 전위차를 이용하여 추적할 수 있다. 최근 비디오 기반의 시선 추적장치를 많이 사용한다. 비디오 기반의 시선 추적 장치는 장치에서 방출된 근적외선이 망막에서 반사되며 반사된 광원을 추적하여 시선을 추적하는 방식이다[16]. 비디오 기반의 시선 추적 장치의 종류는 스크린에 거치하여 사용하는 스크린거치형 시선추적장치(screen-based eye tracker)와 안경 형태로 착용할 수 있는 웨어러블 시선추적장치(wearable eye tracker)로 나뉘어진다(그림 2). 최근 시각-신경 연구 분야에서 사용되는 Orbital Eye tracking뿐만 아니라 Gaze position tracking을 통하여 마케팅 분야 연구에도 많이 사용되고 있다.



그림 2. 비디오 기반의 시선 추적 장치의 예시, 스크린 거치형 시선추적장치(왼쪽) 및 웨어러블 시선추적장치(오른쪽)

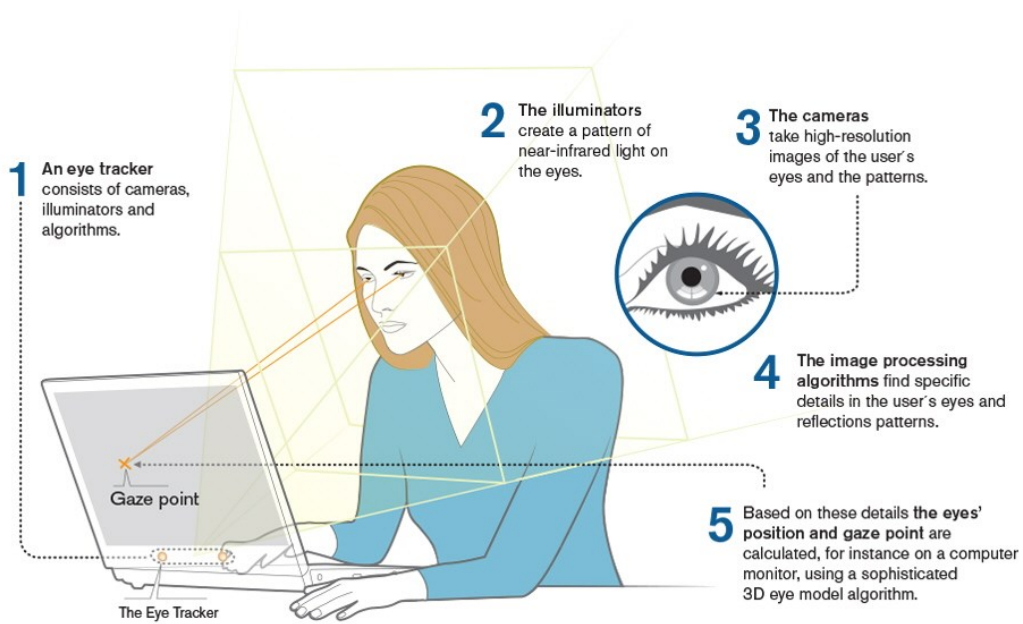


그림 3. 스크린 거치형 시선추적장치 원리도

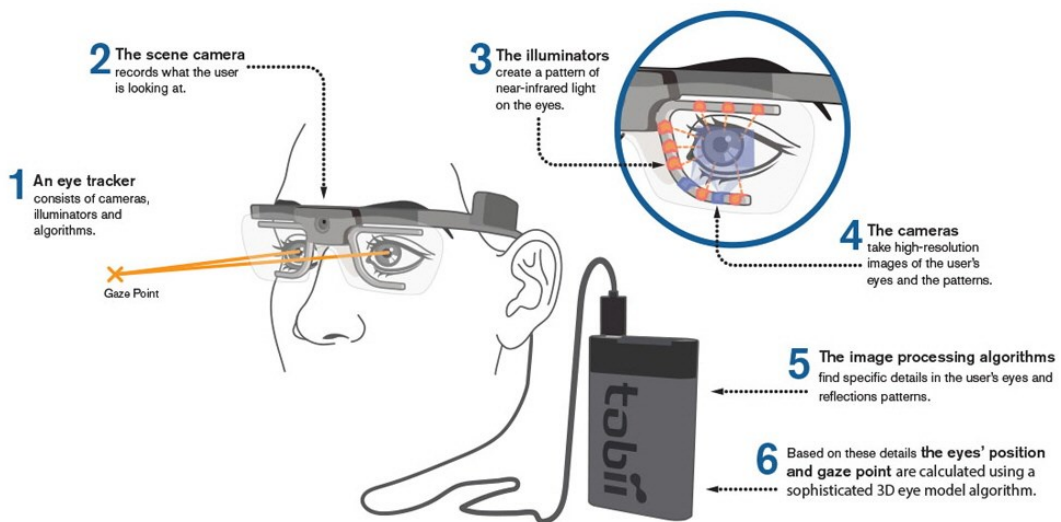


그림 4. 웨어러블 시선추적장치 원리도

2. 본 론

2.1. 임상시험을 통한 동공팽창반응 측정

2.1.1. 피험자 정보

본 연구에서 동공팽창반응은 눈과 귀에 이상이 없는 정상인 11명(남성 4명, 여성 7명)을 대상으로 측정하였다. 근적외선의 반사에 의해 동공팽창반응을 측정하는 시선추적장치 원리에 의하여 안경이나 장신구는 측정 시에 제거 하였으며, 속눈썹이 길어 동공팽창반응 측정에 어려움이 있는 피험자는 제외 하였다.

2.1.2. 임상시험 프로토콜

2.1.2.1. Task 1 청취 노력도 평가를 위한 동공팽창반응 측정

청취 노력도 측정을 위해 한국어 노이즈 환경 청각 테스트(Korean Hearing in Noise Test, K-HINT)에 사용되는 문장을 자극 문장으로 사용하였으며, 자극 문장은 남성의 목소리로 제시되었다. 청취 노력도 차이를 유발하기 위해 신호 대 잡음 비(signal to noise, SNR)를 조절하였으며, 높은 노이즈 조건(-4dB SNR), 중간 노이즈 조건(-2dB SNR), 낮은 노이즈 조건(0dB SNR)으로 설정하여 자극 문장과 노이즈가 함께 제시되었다. 실생활의 소음 환경을 구축하기 위하여 노이즈는 babble noise(웅성거리는 소리)로 제시되었다. 문장 자극은 피험자와 1m 거리에 있는 2번 스피커에서 제시 되었으며, 노이즈는 1번과 3번 스피커에서 제시 되었다(그림. 5 (a)).

문장 자극은 조건 별로 50문장이 제시되며, K-HINT의 240개 문장 중 중복되지 않도록 무작위로 제시되었다. 문장 자극을 제시할 때, 노이즈는 문장 자극 제시 시점 기준, 3초 전부터 문장 자극 종료 시점 기준 2초까지 제시되었다. 이 후 5초간 제시된 문장을 따라 말하도록 하였다. 음성은 마이크를 통해 외부 소음이 차단 되는 측정실 외부에서 피험자의 목소리를 청취 및 녹음하며 문장 단위로 정답률을 기록하여 문장인지점수(sentence recognition score)를 계산하였다. 각 조건 사이는 피험자의 피로도를 고려하여 5분간 휴식을 취하도록 하였다(그림 6).

2.1.2.2. Task 2 노이즈 반응 검사

노이즈에 의한 반응을 확인하기 위하여 노이즈 반응 검사를 실시하였다. 피험자에게 문장 자극이 없이 노이즈만 제시되었으며, 노이즈는 스피커 1번, 2번에서 제시되었다(그림 5 (b)). Task1과 동일하게 babble noise가 제시 되었으며, 30번 반복하여 제시 되었다(그림 6).

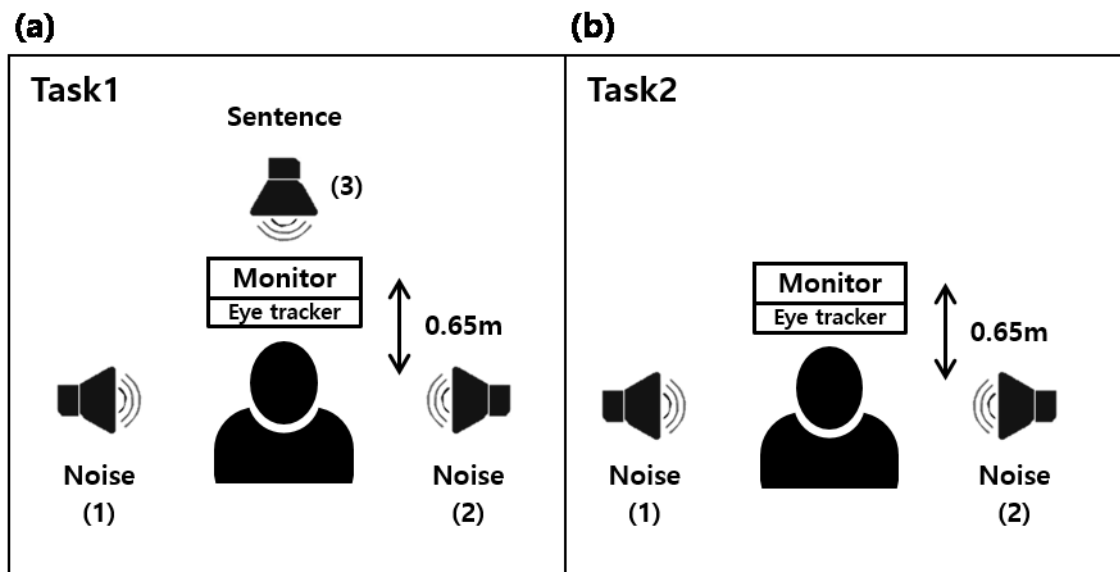


그림 3. 동공팽창반응 측정을 위한 실험 환경

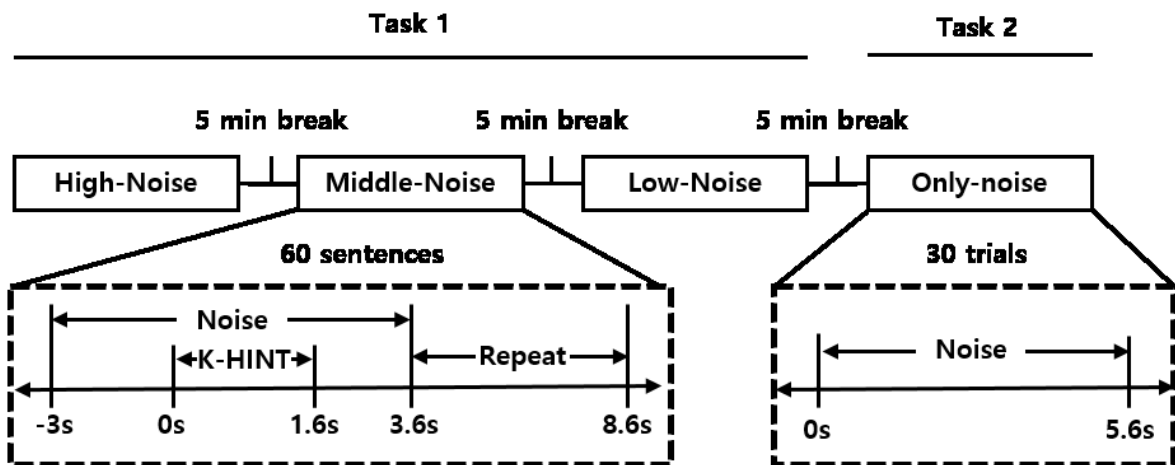


그림 4. 청취 노력도 측정을 위한 자극 프로토콜

2.1.3. 동공팽창반응(pupil dilation response) 측정

문장 자극이 제시 되는 동안, 근적외선 비디오 추적을 적용한 시선추적장치(Tobii Pro Nano, Tobii Technology, Sweden)를 사용 하여 동공팽창반응을 측정 하였다. 이 장치의 샘플링 주파수는 60Hz이다. 시선추적장치가 부착되어 있는 모니터와 피험자 간의 거리는 65cm를 유지 하도록 하였다. 시선추적장치의 원리에 의해 눈 깜빡임(blinking)동안에 데이터가 수집되지 않으므로 피험자는 가능한 눈을 감지 말라 달라는 요구를 받았다.



그림 5. 동공팽창반응 측정 실험 환경 예시도

2.2. 동공팽창반응 분석

측정된 동공팽창반응 중 처음 4회는 임상시험에 대한 적응과정으로 사용 되어 분석에서 제외되었으며, 눈 깜박임에 의해 데이터 손실이 15%이상인 경우 또한 분석에서 제외되었다. 눈 깜박임에 손실된 데이터는 눈 깜박임 시점 기준, -0.15s 부터 0.3s 의 데이터를 제거하여 de-blinking하였다. interpolation함수를 사용 하여 데이터를 보간 하였다. De-blinking 후, 6-moving average smoothing filtering 하였으며, baseline은 문장 소리 자극 시점 기준 0.5초 전부터 문장 소리 자극시점까지의 데이터의 평균으로 계산 되었다. Baseline은 각 데이터 마다 계산 되었으며, baseline collection을 통해 동공의 팽창 정도인 동공팽창반응(pupil dilation)을 계산 하였다. Peak pupil dilation(PPD)는 문장 소리 자극 시점 이후 발생하는 가장 큰 동공팽창반응으로 설정하였으며, latency는 PPD가 발생하는 시점으로 설정하였다.

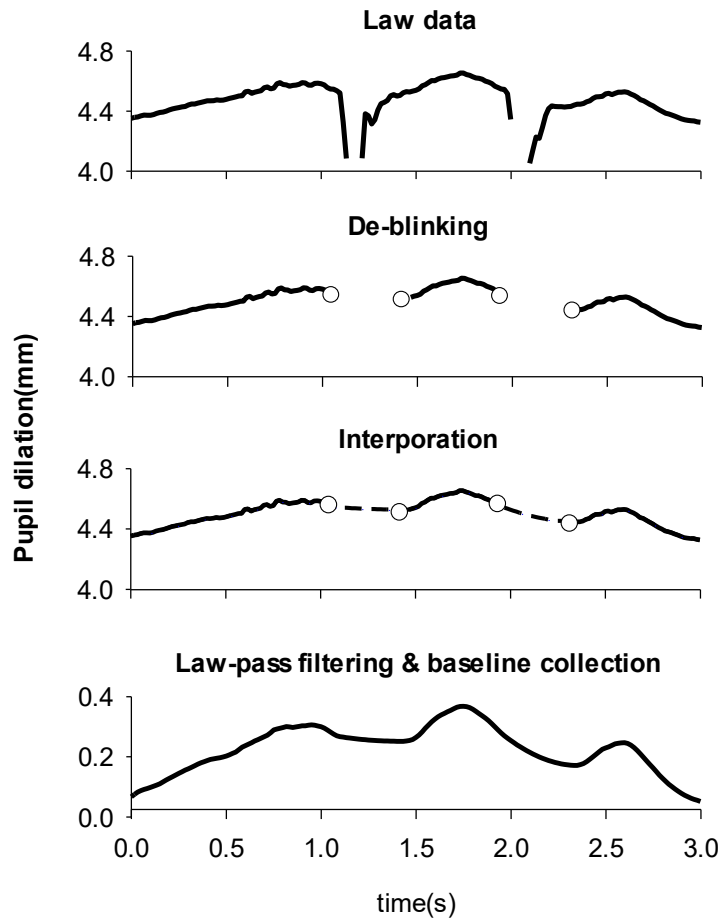


그림 6. 반응 데이터 전처리 과정

2.3. 문장 자극의 특징 점 추출

동공팽창반응과 문장 자극의 특징 점 간의 상관관계를 구하기 위한 특징으로 문장 자극의 포락선(Envelope, ENV) 과 문장의 음소 정보를 이용하였으며, 음소 기반의 impulse onset train (phoneme onset impulse train, PH)을 생성하였다. 또한 음성 신호의 포락선과 음소 발화 시점 정보를 곱한 특징(multiplying envelope with phoneme onset impulse train, ENVPH)을 계산하여 문장 자극의 특징 점으로 사용 하였다

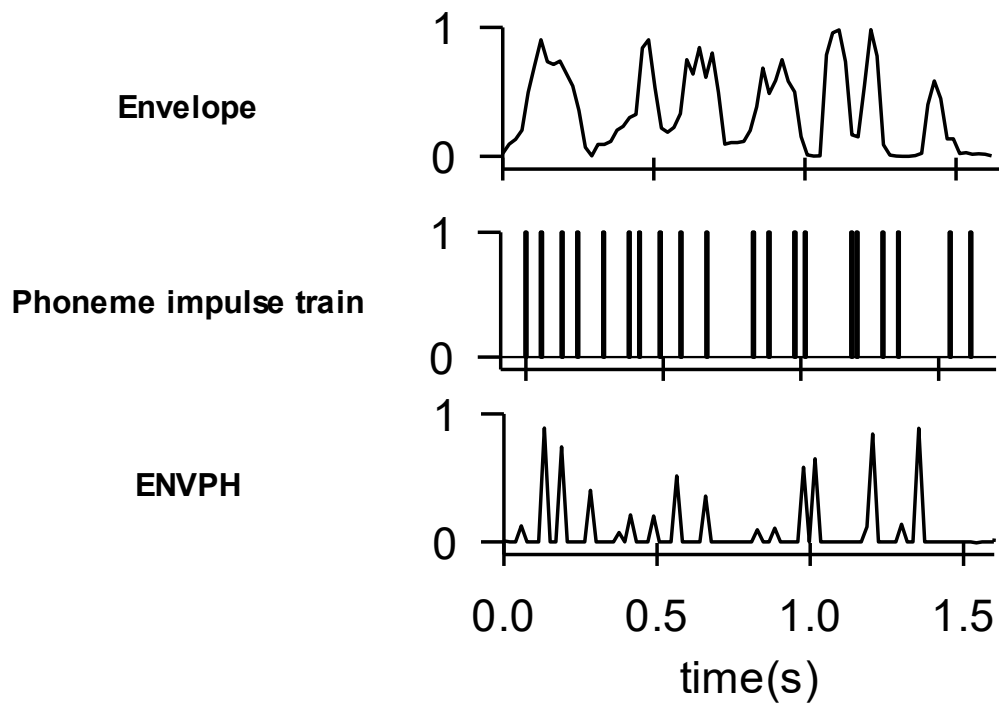


그림 7. 각 문장 자극의 특징 점 예시

2.4. 상호 상관 관계(Cross-correlation)

로그 변환(log transformation)을 통하여 동공팽창반응을 정규화(normalization)하고, 상호 상관(cross-correlation)함수를 사용하여, 정규화 된 동공팽창반응과 ENV, PH, ENVPH간의 상호상관계수(cross-correlation coefficient)를 계산하였다 (식 1).

$$R_{fg}(\tau) \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t + \tau)dt \quad (1)$$

상호상관계수를 계산하기 위해 동공팽창반응은 문장 자극 시점부터 문장 자극 종료시점 기준 1s 후의 데이터를 사용하였다. 계산된 상호상관계수의 최댓값을 Peak-coefficient value (PCV)로 설정 하여 ENV-PCV, PH-PCV 및 ENVPH-PCV를 계산 하였으며, 각 PCV가 발생하는 시점의 time lag을 계산하였다.

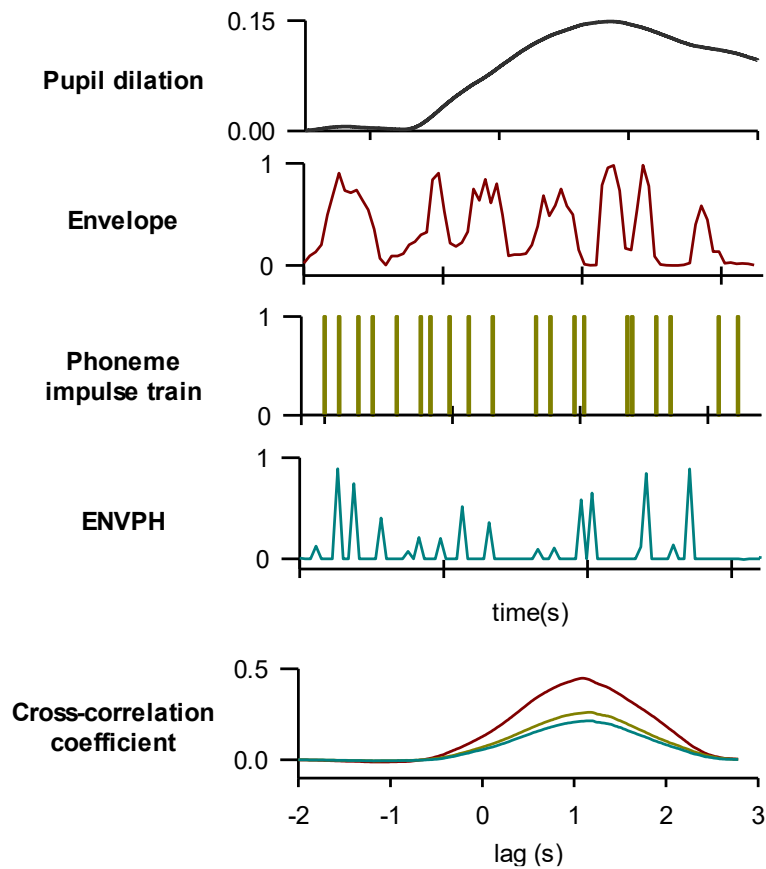


그림 8. 동공팽창반응 및 각 문장 특징 점의 예시 및 상호 상관 계수 예시

2.5. 주관적 평가(Subjective rating)

Task1이 진행되는 동안 각 조건 후에 주관적인 평가를 진행하였다. 평가 항목은 노력의 정도(level of effort), 수행 정도(performance), 포기 경향(giving up tendency)이다. 피험자들은 모든 평가 항목에 대해서 0에서 10의 점수를 매기도록 요구 받았다. 노력의 정도는 “문장을 듣기 위하여 얼마나 노력하였는가”에 대한 주관적인 평가 항목으로, “노력 하지 않음”은 0점, “매우 노력함”은 10점으로 표기 하였다. 수행정도에서는 “문장을 얼마나 많이 이해하였는가”에 대한 주관적인 평가 항목으로, “어떤 문장도 이해할 수 없음”은 0점, “모든 문장 이해”은 10점으로 표기 하였다. 포기 경향 항목에서는 “문장 청취 시 얼마나 자주 듣기를 포기하였는가”에 대한 주관적인 평가 항목으로, “포기하지 않음”은 0점, “항상 포기”은 10점으로 표기 하였다.

Subjective rating

Subject number: _____.

*give 0 to 10 point

Condition 1.

- | | |
|-----------------------|-------|
| 1. Level of effort | _____ |
| 2. Performance | _____ |
| 3. Giving up tendency | _____ |

Condition 2.

- | | |
|-----------------------|-------|
| 1. Level of effort | _____ |
| 2. Performance | _____ |
| 3. Giving up tendency | _____ |

Condition 3.

- | | |
|-----------------------|-------|
| 1. Level of effort | _____ |
| 2. Performance | _____ |
| 3. Giving up tendency | _____ |

그림 9. 주관적 평가를 위한 평가 용지 예시

2.6. 청취 노력도 평가를 위한 동공팽창반응 결과

2.6.1. 문장 인지 점수 및 주관적 평가 결과

각 SNR 조건에 대하여 문장 인지 점수 및 주관적 평가 요소들을 도식화 하였다(그림 12). 노이즈 수준이 낮을 수록 문장 인지 점수가 증가 하였으며, 노이즈 수준이 낮아 질수록 노력의 정도가 낮아지는 경향을 보였다. 또한 노이즈 수준이 낮아 질수록 수행 정도가 증가 하였으며, 포기 경향의 경우 SNR 조건에 따른 상관관계가 뚜렷하지 않았다

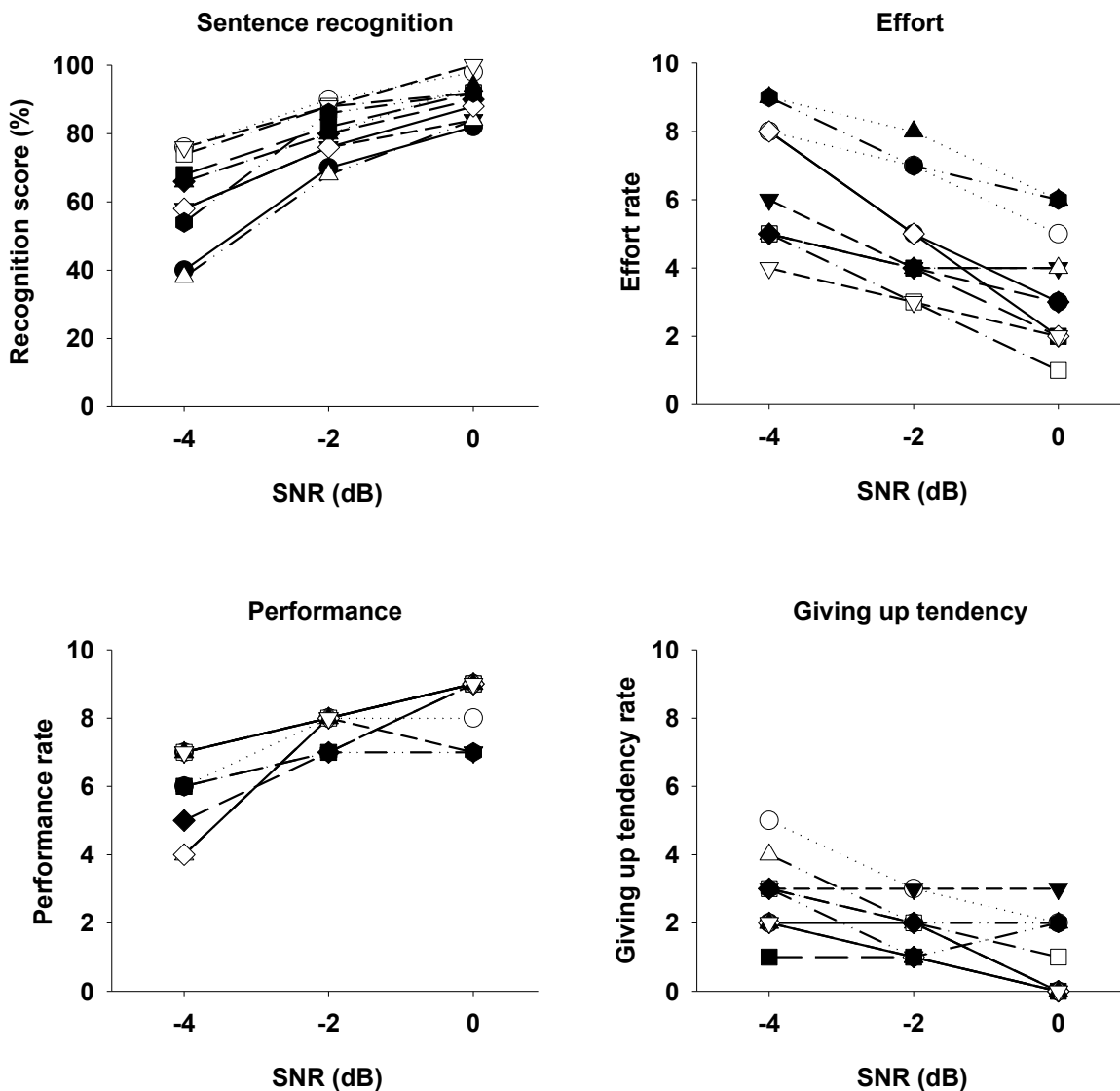


그림 10. SNR 조건에 따른 문장 인지 점수 및 주관적 평가 점수

2.6.2. SNR 조건에 따른 동공팽창반응

측정된 동공팽창반응은 청취 하는 단계와 따라 말하는 단계로 구분 된다. 그림. 13 은 각 SNR 조건에 대한 동공팽창반응과 SNR 조건에 대한 피험자들의 PPD값의 변화를 보여준다. 각 SNR 조건에서 동공팽창반응이 다르게 나타나며, 어려운 조건일수록 피험자들의 평균 PPD가 높게 나타났고, 피험자들의 PPD가 증가하는 경향을 보였다. 하지만 PPD가 나타나는 latency에서는 경향성을 확인하기 어려웠다(표 1). 또한 따라 말하는 단계에서 동공팽창반응은 나타나지만 각 SNR 조건에 따른 상관관계가 뚜렷하지 않았다.

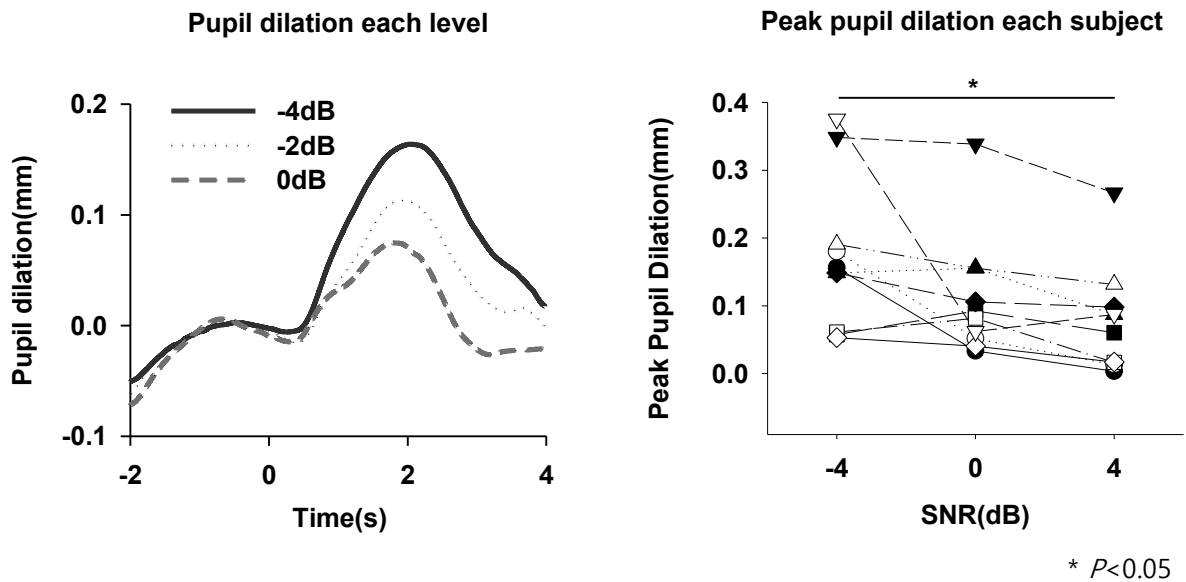


그림 11. SNR 조건에 따른 동공팽창반응

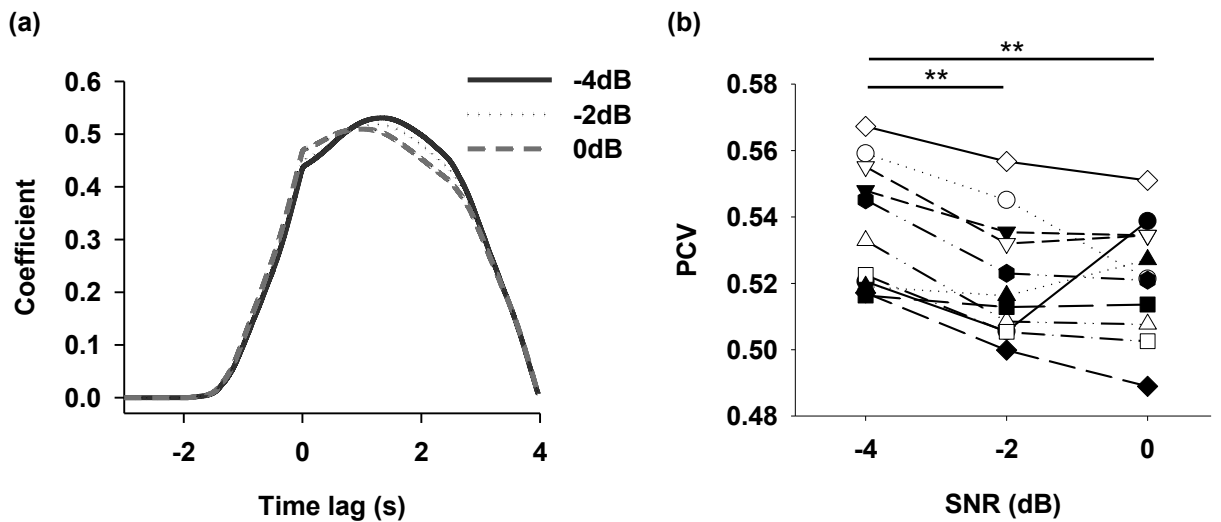
표 1. SNR 조건에 따른 각 피험자 들의 최대 동공팽창반응(peak pupil dilation, PPD)의 평균 및 PPD 발생 latency의 평균

| SNR(dB) | SI(%) | Pupil dilation | |
|---------|-------|----------------|------------|
| | | PPD(mm) | Latency(s) |
| -4 | 61.3 | 0.173 | 1.954 |
| -2 | 80.4 | 0.122 | 1.944 |
| 0 | 90.5 | 0.091 | 1.754 |

2.6.3. 동공팽창반응과 문장 자극 특징 간의 상호상관관계

2.6.3.1. 문장 자극의 포락선의 상호상관계수

그림. 14 (a)는 각 SNR 조건에 대한 동공팽창반응과 문장 자극의 포락선 간의 상호 상 관 계수를 보여주며, 그림. 14 (b)는 SNR 조건에 대한 피험자들의 ENV-PCV값의 변화를 보여준다. 어려운 조건일수록 피험자들의 평균 ENV-PCV가 높게 나타났으며($F=9.22$, $p=0.001$), 피험자들의 ENV-PCV가 증가하는 경향을 보였다. 하지만 PCV가 발생하는 time lag에서는 경향성을 확인하기 어려웠다.



* $P < 0.05$, ** $P < 0.05$

그림 12. SNR 조건에 따른 (a)동공팽창반응과 문장 자극의 포락선 간의 상호상관계수 및 (b)각 피험자의 peak coefficient value(PCV)

2.6.3.2. 문장 자극의 음소 impulse train의 상호상관계수

그림. 15 (a)는 각 SNR 조건에 대한 동공팽창반응과 문장 자극의 phoneme impulse train 간의 상호 상관 계수를 보여주며, 그림. 15 (b)는 SNR 조건에 대한 피험자들의 PH-PCV값의 변화를 보여준다. 어려운 조건일수록 피험자들의 평균 PH-PCV가 높게 나타났고, 피험자들의 PH-PCV가 증가하는 경향을 보였다($F=8.78$, $p=0.002$). 하지만 PCV가 발생하는 time lag은 SNR조건에 따른 차이를 확인하기 어려웠다.

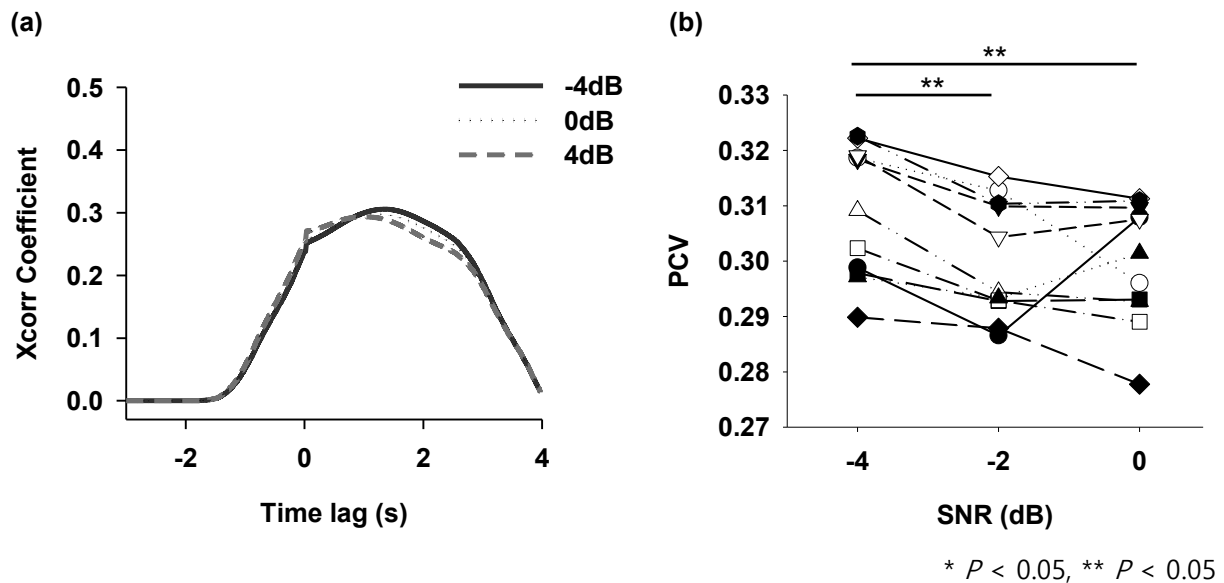


그림 13. SNR 조건에 따른 (a)동공팽창반응과 문장 자극의 음소 impulse train 간의 상호상관계수 및 (b)각 피험자의 peak coefficient value (PCV)

2.6.3.3. ENVPH의 상호상관계수

그림. 16 (a)는 각 SNR 조건에 대한 동공팽창반응과 ENVPH 간의 상호 상관 계수를 보여주며, 그림. 16 (b)는 SNR 조건에 대한 피험자들의 ENVPH-PCV값의 변화를 보여 준다. 어려운 조건일수록 피험자들의 평균 ENVPH-PCV가 높게 나타났으며, 피험자들의 ENVPH-PCV가 증가하는 경향을 보였다($F=8.94$, $p=0.002$). 하지만 PCV가 발생하는 time lag은 SNR조건에 따른 차이를 확인하기 어려웠다.

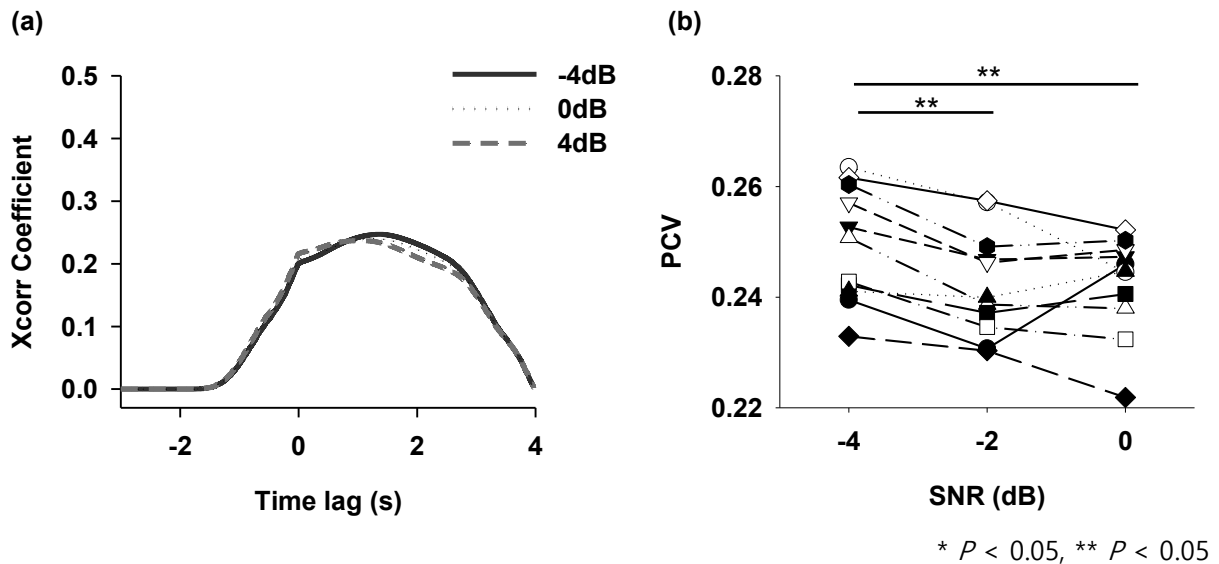


그림 14. SNR 조건에 따른 (a) 동공팽창반응과 문장 자극의 ENVPH (multiplying envelope with phoneme onset impulse train) 간의 상호상관계수 및 (b) peak coefficient value(PCV)

2.6.4. 문장 인지 점수와 각 특징의 최댓값 간의 상호상관계수

그림 17은 문장 인지 점수에 따른 PPD 및 각 문장 자극 특징 점의 PCV를 보여 준다. 선형 회귀 분석 시 문장 인지 점수에 따른 영향은 PPD ($F=8.04$, $p=0.008$)에서 볼 수 있지만, 문장 자극의 각 특징 점의 PCV에 대해 유의미한 영향이 나타나지 않았다($p > 0.05$).

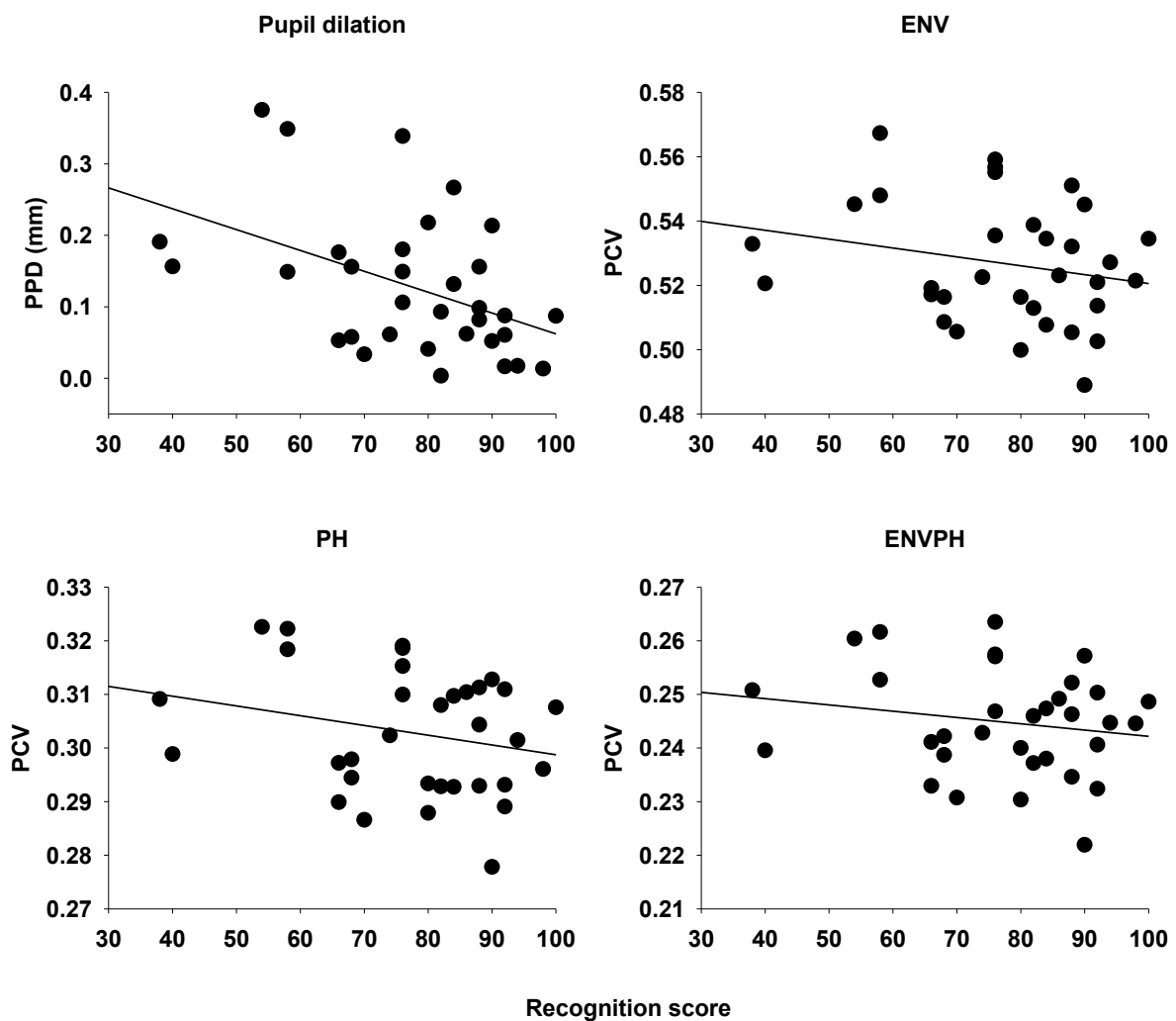


그림 15. 문장 인지 점수에 따른 각 특징의 최댓값 분포 및 예측된 선형 회귀 모델

2.6.5. 주관적 노력도와 각 특징의 최댓값 간의 상관관계 분석

그림. 20은 주관적 노력도에 따른 PPD 및 각 문장 자극 특징 점의 PCV간의 선형 회귀 분석 결과를 보여 준다. PH-PCV ($F=4.97$, $p=0.033$), ENVPH-PCV($F = 6.39$, $p=0.017$)에서 주관적 노력도의 영향을 보여 주었지만, PPD와 ENV-PCV에서 주관적 노력도에 의한 영향을 볼 수 없었다($p<0.05$). 주관적 노력도와 모든 문장 자극 특징 점의 PCV 간의 상관 계수는 주관적 노력도와 PPD간의 상관계수 보다 높았으며, 문장 자극 특징 점 중 ENVPH-PCV에서 상관계수가 가장 높았다. 또한 주관적 노력도에 따른 각 최댓값의 RMSE(root mean square error)와 분산 값이 ENVPH-PCV에서 가장 낮았다(표 3).

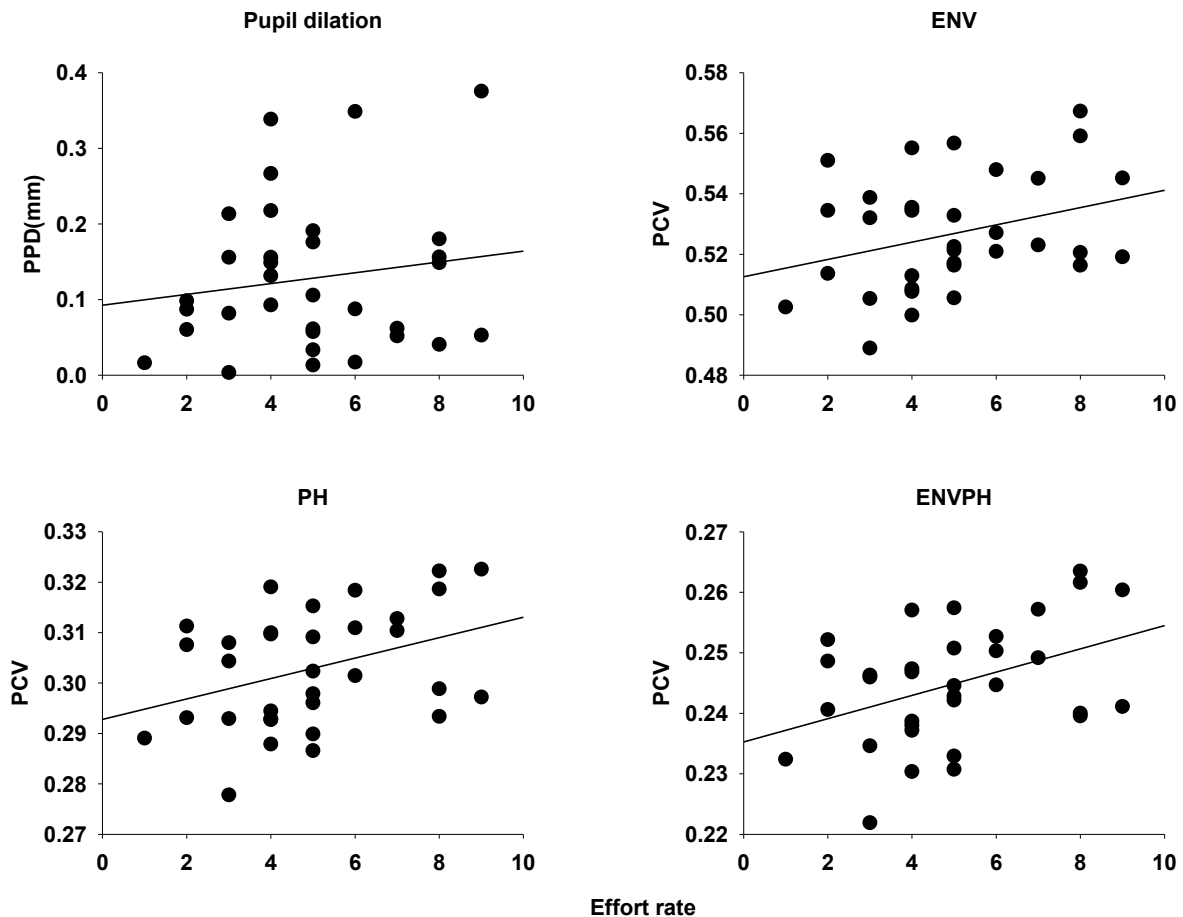


그림 16. 주관적 노력 점수에 따른 각 특징의 최댓값 분포 및 예측된 선형 회귀 모델

RMSE & standard deviation in each feature

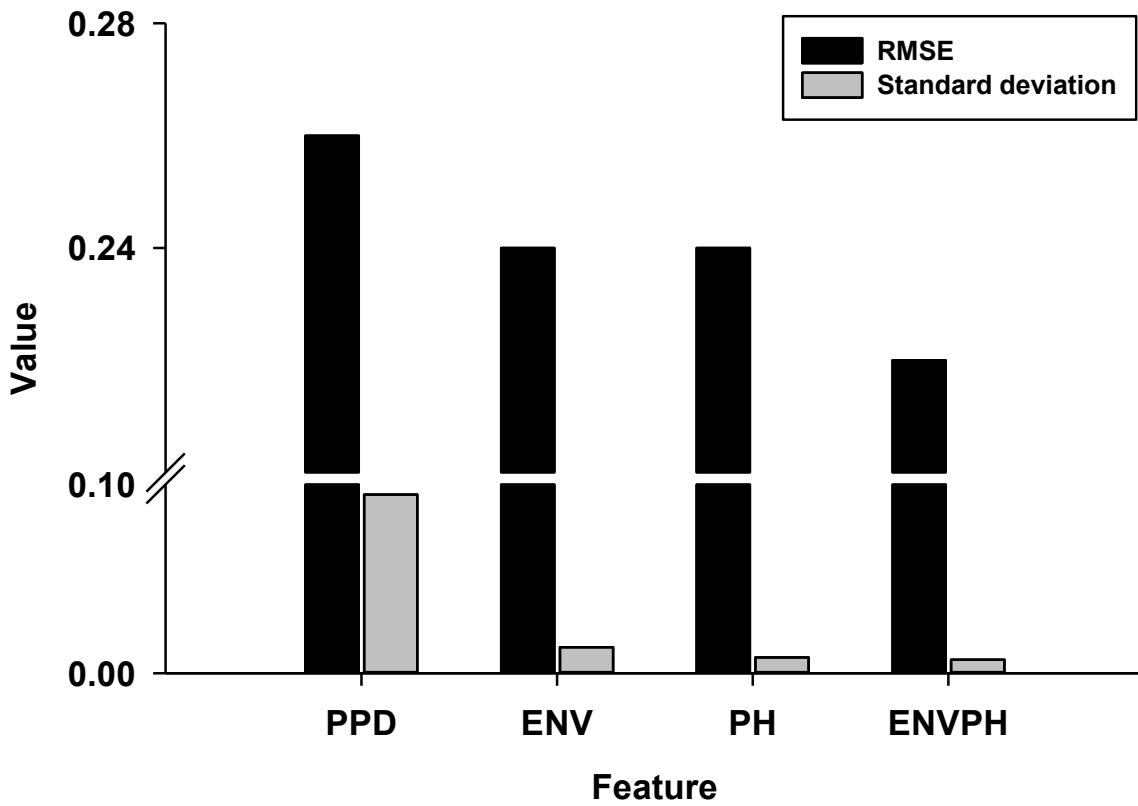


그림 17. 주관적 노력도 점수에 따른 각 특징의 RMSE 및 표준편차 막대 그래프

표 2. 주관적 노력도 점수와 각 특징 간의 상호 상관계수, root-mean-square error (RMSE) 및 표준편차

| | PPD | Envelope | Phoneme | ENVPH |
|-------------------------|-------|----------|---------|-------|
| Correlation coefficient | 0.155 | 0.318 | 0.372 | 0.413 |
| RMSE | 0.260 | 0.240 | 0.240 | 0.220 |
| Standard deviation | 0.095 | 0.014 | 0.008 | 0.007 |

2.6.6. 소음 반응 검사 결과

그림. 20은 소음 반응 검사인 Task2와 Task1간의 반응 비교에 대한 결과를 보여준다. Task2에서 소음이 제시된 시점 기준 약 2.5초간 동공팽창반응이 증가 하지만 이 후 동공팽창반응이 감소 하는 경향을 보이며, Task1에서 문장 자극 시점 이후 동공팽창반응이 증가 하는 것을 보여 준다. 또한 PPD가 나타나는 지점에서 동공팽창반응이 유의미한 차이를 보였다($p < 0.05$).

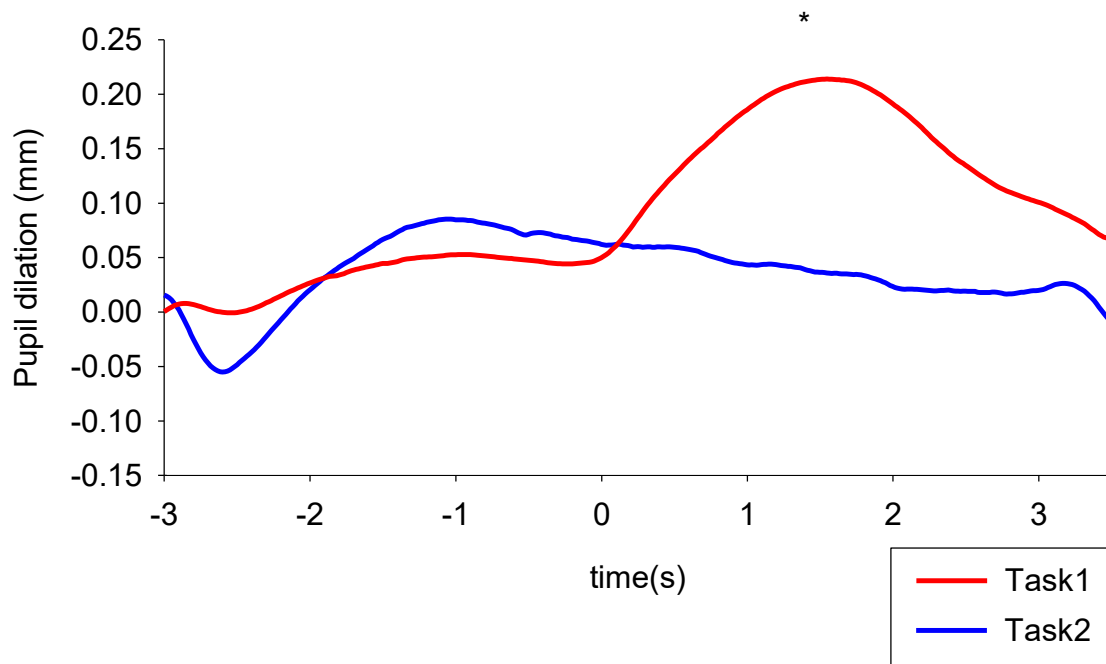


그림 18. Task1의 동공팽창반응과 Task2의 동공팽창반응 결과

3. 토의 및 결론

3.1. 토의 및 결론

본 연구에서는 동공팽창반응과 문장 자극의 특징 점 간의 상관관계에 기반하여 청취 노력도를 평가하는 방법을 제안 한다. 본 연구에서 측정된 동공팽창반응으로 계산된 PPD는 이전의 연구들과 동일하게 소음의 정도가 높아질 수록 증가 하였다. 이와 같이 PPD의 증가는 소음이 증가 할 수록 문장을 인지를 위해 더 많은 노력을 할당하기 때문에 동공팽창반응이 더 크게 나타나는 것이다[17]. 또한 PPD가 발생하는 latency가 조건에 따라 유의미한 차이가 나타나지 않았으며, 따라 말하는 부분 또한 조건에 따른 차이는 나타나지 않았다. 따라 말하는 부분에서 발생하는 동공팽창반응은 문장 자극 회상에 관련된 반응이며, 이러한 회상은 동공팽창반응에 관여 하지만 처리 부하와 관련이 없다는 것을 의미 한다[18].

본 연구에서 청취 노력도의 수준을 조절 하기 위해 배경 소음을 조절 하였다. 배경 소음이 스트레스로 작용하여 동공팽창반응에 영향을 미칠 수 있기 때문에 소음 반응 검사를 실시 하였다. 소음 제시 시 동공팽창반응이 증가 하였지만, 소음 제시 시점 기준 약 2.5s 이후 동공팽창반응이 감소 하는 것을 확인 하였다. 또한 동공팽창반응을 이용하여 청취 노력도를 평가하는 연구에서 소음의 영향을 고려하여 제시되는 소음의 길이는 2 - 3초로 제시 되었으며[19], 본 연구에서 자극 전 소음은 3초간 제시 되었다. 따라서 본 연구에서 제시 되는 소음은 동공팽창반응에 영향을 미치지 않았을 것이라고 판단 된다.

동공팽창반응과 문장 자극의 각 특징 점 간의 상관계수를 구하여 PCV를 계산 하였다. 동공팽창반응과 동일하게 소음의 정도가 높아질수록 PCV가 증가 하였으며 time lag의 유의미한 차이가 나타나지 않았다. 이러한 결과는 동공팽창반응과 각 문장 자극의 특징 점 간의 최대 상호상관계수인 PCV를 청취 노력도를 평가하는 지표로 사용 할 수 있음을 보여 준다.

청취 노력도 평가 방식의 개인차를 검증 하기 위하여 주관적인 평가를 실시 하였으며, 문장 인지도를 평가 하기 위하여 문장 인지 검사를 실시 하였다. 문장 인지 점수는 소음의 정도가 낮아 질수록 증가 하였으며, 노력도는 감소 하였다. 포기 경향은 조건에 따른 유의미한 차이를 확인 하기 힘들었다. 제시되는 문장 조건에 너무 어려운 경우 듣기를 포기하여 청취 노력도에 의한 동공팽창 반응이 나타나지 않을 수 있으나[20], 본 연구에서 포기 경향 점수는 5점 이하이므로 본 연구에서 사용된 동공팽창반응은 포기에 의한 영향을 받지 않음을 확인 할 수 있었다.

같은 수준의 소음을 제시하더라도 여러 요인에 의해 개인마다 노력의 정도가 다르게 나타난다. 따라서 각 지표에 따른 개인차를 확인 하기 위하여 수행 정도를 제외한 네 가지의 항목과 각 특징의 최댓값 간의 선형 회귀 분석 및 상관관계 분석을 하였다. 문장 인지 점수와 PPD간의 상관 계수는 유의미한 영향을 보이지만, 문장 자극의 각 특징들의 최댓값 간의 상관 계수가 낮다. 주관적 노력도는 PPD와 상관관계가 작지만, 문장 자극의 각 특징의 최댓값과 유의미한 상관관계를 보였다. 이는 문장 자극의 각 특징이 PPD에 비해 청취노력도에 영향을 더 많이 받는 것을 의미한다. ENVPH-PCV와 주관적 노력도 간의 상호상관계수가 가장 높게 나타났다. 또한 선형 회귀 분석을 통하여 주관적 노력도 및 포기 경향 점수와 각 특징의 최댓값 사이에 계산된 RMSE가 ENVPH-PCV에서 가장 낮게 나타났으며, 각 주관적 노력도에 따른 분산이 가장 낮게 나타났다. 이러한 결과는 측정된 동공팽창반응 과 ENVPH간의 최대 상호상관계수가 청취 노력도를 평가하는 지표로 사용 가능함을 의미하며, 정량적으로 청취 노력도를 평가 할 수 있음을 의미한다.

문장 인지에 할당 되는 노력의 정도인 청취 노력도에 대한 동공팽창반응은 동기, 작업 처리, 피로 등 여러 요소들의 상호 작용으로 이루어진다[21-23]. 하지만 본 연구에서 노력도나 포기 경향 점수와 같이 대한 단일 지표를 이용하여 청취 노력도를 평가 하였다. 따라서 청취 노력도와 상관 관계를 가지고 있는 요소들을 복합적으로 사용 하여 분석한다면 보다 정확한 분석이 가능 할 것으로 판단 된다.

본 연구에서 제안 된 방법은 기존에 방법에 비해 보다 정량적으로 청취 노력도를 평가 할 수 있으리라 판단 되며, 이에 기반하여 임상에서 보청기나 인공 와우와 같은 청각보조기기 성능 평가 방식 발전에 큰 기여를 할 수 있으리라 기대 한다.

참고 문헌

- [1] Pichora-Fuller, M.K., et al., *Hearing Impairment and Cognitive Energy: The Framework for Understanding Effortful Listening (FUEL)*. *Ear and Hearing*, 2016. 37: p. 5s-27s.
- [2] Desjardins, J.L., *The Effects of Hearing Aid Directional Microphone and Noise Reduction Processing on Listening Effort in Older Adults with Hearing Loss*. *Journal of the American Academy of Audiology*, 2016. 27(1): p. 29-41.
- [3] Arlinger, S., *Negative consequences of uncorrected hearing loss - a review*. *International Journal of Audiology*, 2003. 42: p. S17-S20.
- [4] Mackersie, C.L. and H. Cones, *Subjective and Psychophysiological Indexes of Listening Effort in a Competing-Talker Task*. *Journal of the American Academy of Audiology*, 2011. 22(2): p. 113-122.
- [5] Corinna Bernarding, F.I.C.-S., Ronny Hannemann, Daniel J. Strauss, *Objective Assessment of Listening Effort: Effects of an Increased Task Demand*. *Conference Proceedings of IEEE Engineering in Medicine Biological Society*, 2016. 2016(1): p. 3684-3867.
- [6] Miles, K., et al., *Objective Assessment of Listening Effort: Coregistration of Pupillometry and EEG*. *Trends in Hearing*, 2017. 21.
- [7] Zekveld, A.A., T. Koelewijn, and S.E. Kramer, *The Pupil Dilation Response to Auditory Stimuli: Current State of Knowledge*. *Trends in Hearing*, 2018. 22.
- [8] Ohlenforst, B., et al., *Impact of SNR, masker type and noise reduction processing on sentence recognition performance and listening effort as indicated by the pupil dilation response*. *Hearing Research*, 2018. 365: p. 90-99.
- [9] Koelewijn, T., et al., *The effect of reward on listening effort as reflected by the pupil dilation response*. *Hearing Research*, 2018. 367: p. 106-112.
- [10] Zekveld, A.A., et al., *Please try harder! The influence of hearing status and evaluative feedback during listening on the pupil dilation response, saliva-cortisol and saliva alpha-amylase levels*. *Hearing Research*, 2019. 381.
- [11] Gross, J., et al., *Speech Rhythms and Multiplexed Oscillatory Sensory Coding in the Human Brain*. *Plos Biology*, 2013. 11(12).
- [12] Di Liberto, G.M., J.A. O'Sullivan, and E.C. Lalor, *Low-Frequency Cortical Entrainment to Speech Reflects Phoneme-Level Processing*. *Current Biology*, 2015. 25(19): p.

- 2457-2465.
- [13] Peelle, J.E., J. Gross, and M.H. Davis, *Phase-Locked Responses to Speech in Human Auditory Cortex are Enhanced During Comprehension*. *Cerebral Cortex*, 2013. 23(6): p. 1378-1387.
 - [14] Zele, A.J. and P.D. Gamlin, *Editorial: The Pupil: Behavior, Anatomy, Physiology and Clinical Biomarkers*. *Frontiers in Neurology*, 2020. 11.
 - [15] Strand, J.F., et al., *Measuring Listening Effort: Convergent Validity, Sensitivity, and Links With Cognitive and Personality Measures*. *Journal of Speech Language and Hearing Research*, 2018. 61(6): p. 1463-1486.
 - [16] Adhikari, S. and D.E. Stark, *Video-based eye tracking for neuropsychiatric assessment*. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2017. 1387(1): p. 145-152.
 - [17] Zekveld, A.A., S.E. Kramer, and J.M. Festen, *Pupil Response as an Indication of Effortful Listening: The Influence of Sentence Intelligibility*. *Ear and Hearing*, 2010. 31(4): p. 480-490.
 - [18] Zekveld, A.A., J.M. Festen, and S.E. Kramer, *Task Difficulty Differentially Affects Two Measures of Processing Load: The Pupil Response During Sentence Processing and Delayed Cued Recall of the Sentences*. *Journal of Speech Language and Hearing Research*, 2013. 56(4): p. 1156-1165.
 - [19] Koelewijn, T., et al., *The pupil response reveals increased listening effort when it is difficult to focus attention*. *Hearing Research*, 2015. 323: p. 81-90.
 - [20] Ohlenforst, B., et al., *Impact of stimulus-related factors and hearing impairment on listening effort as indicated by pupil dilation*. *Hearing Research*, 2017. 351: p. 68-79.
 - [21] Heitz, R.P., et al., *Effects of incentive on working memory capacity: Behavioral and pupillometric data*. *Psychophysiology*, 2008. 45(1): p. 119-129.
 - [22] Hyona, J., J. Tommola, and A.M. Alaja, *Pupil-Dilation as a Measure of Processing Load in Simultaneous Interpretation and Other Language Tasks*. *Quarterly Journal of Experimental Psychology Section a-Human Experimental Psychology*, 1995. 48(3): p. 598-612.
 - [23] Wang, Y., et al., *Pupil light reflex evoked by light-emitting diode and computer screen: Methodology and association with need for recovery in daily life*. *Plos One*, 2018. 13(6).

감사의 글

대학원 석사과정을 마치며 본 논문이 있기까지 가르침을 주시고 도와주신 모든 분들께 감사의 말을 전하고자 합니다.

학부생 3학년에 처음 연구실에 들어와 학부 연구생으로 공부를 시작하게 되었습니다. 그 당시 학생회 활동으로 방황하던 저를 믿어 주시고, 올바른 길을 갈 수 있도록 이끌어 주신 우지환 교수님께 감사의 인사를 드립니다. 한때는 제가 학문적으로 상대적 박탈감을 느끼며, 자격지심을 느껴 모든 것을 내려놓고 포기를 하려고 한적이 있습니다. 그때 교수님께서 해주셨던 말씀은 저를 다시 일으켜 세우셨고, 이렇게 석사과정을 무사히 마칠 수 있게 했습니다. 저는 그 말을 절 때 잊지 않을 것이며, 비슷한 상황이 오면 다시 일어설 수 있는 원동력이 될 수 있을 것 같습니다. 교수님 정말 감사합니다.

의공학과는 울산대학교 공과대학에서 학생수가 가장 적고, 가장 최근에 개설된 학과입니다. 하지만 그 어느 과에 견주어도 부족한 점이 없으며, 교내에서 개최하는 경진대회에서 우수한 성적을 거두고 있습니다. 의공학과가 이렇게 성장하고, 학생들이 좋은 성적을 얻는 이유는 최고의 교수님들이 있기 때문입니다. 저는 이렇게 최고의 교수님들을 만나 배움을 얻을 수 있었음에 행운이었으며, 의공학과 교수님들께 감사의 인사를 드립니다. 제가 처음 아이디어 공모전에 도전 할 때 많은 조언을 아끼지 않으셨으며, 제가 멋있는 사람임을 되낼 수 있도록 해주신 지영준 교수님, 표현은 무뎛뎛 하시지만 학생들의 입장에서 생각하시고, 격려하고 응원해주신 구교인 교수님, 비록 같이 지낸 시간은 짧지만 친근하게 다가와주시며, 격려를 아끼지 않으신 김성민 교수님께 감사의 말씀을 드립니다.

집에서 말도 안 듣고 악동인 저를 석사학위를 취득 하기까지 물심양면으로 아끼지 않고 지원해주신, 도와주신, 키워주신 부모님께 감사의 인사를 드리고, 비록 많이 다투지만 뒤에서 응원해주는 우리 누나에게 감사의 인사 드립니다.

그리고 연구실 동료이자 친구인 CNE 구성원 모두에게 감사의 인사를 드리며, 양혜진 선배님, 나영민 선배님, 주효성 선배님, 전민재 후배님, 김동석 후배님, nafiz, trang, quan 모두에게 감사 드립니다.

저는 이 글을 마지막으로 사회로 나가려 합니다. 제가 지금이 있기 까지 도와주신 모든 분들께 다시 한번 감사의 인사를 드리며 이 글을 마무리 하고자 합니다. 감사합니다.

[Abstract]

The assessment of listening effort by using the pupil dilation response and stimulus features

Kim Ki-Hun

Supervisor: Woo Ji-Hwan

Department of Biomedical Engineering

University of Ulsan

Recently, listening effort becomes a potential issue in the hearing research field. The previous analysis methods based on the peak pupil dilation (PPD) introduce significant differences in the listening effort between individuals in the same experimental condition. To overcome this defect, we propose a novel method for quantitative analysis of listening effort using stimulus features (i.e., temporal envelope or phoneme information). The different listening effort was induced using sentences in the different signal-to-noise (SNR) condition to validate the proposed method. Even though the differences between conditions show consistency with previous researches using the PPD, correlation with subjective effort is higher than the previous method. And the individual difference in the proposed method has been reduced for all effort rate.

Keyword: listening effort, pupil dilation, eye tracker, stimulus features, cross-correlation