



Objective and Subjective Measures of Spatial Hearing in Unilateral Cochlear Implant Users with Bilateral Profound Hearing Loss

Wha Weon Jung¹, Jae Ho Han¹, Jae Hee Lee^{1,2}

¹Department of Audiology and Speech-Language Pathology, Hallym University of Graduate Studies, Seoul, Korea

²HUGS Center for Hearing and Speech Research, Seoul, Korea

Received: March 21, 2024

Revised: April 13, 2024

Accepted: April 15, 2024

Correspondence:

Jae Hee Lee, PhD

Department of Audiology and Speech-Language Pathology, Hallym University of Graduate Studies, 427 Yeoksam-ro, Gangnam-gu, Seoul 06197, Korea

Tel: +82-2-2051-4952

Fax: +82-2-3451-6618

E-mail: leejaehee@hallym.ac.kr

Purpose: The ability to benefit from spatial separation between target and masker signals is important in multi-sound source listening environments. The goal of this study was to measure the spatial release from masking (SRM) in unilateral cochlear implant (CI) users with bilateral profound hearing loss. We also determined the relationships between the SRMs and the self-reported spatial hearing abilities. **Methods:** Fourteen unilateral CI users with bilateral profound hearing loss participated in this study. The target sentence was always presented to the front of the listener, and the non-fluctuating speech-shaped noise (SSN) or fluctuating speech noise was either co-located with the target (speech at 0°, noise at 0°, SON0) or spatially separated at ± 90°. The SRM was quantified as the difference between speech recognition thresholds (SRTs) in the co-located and spatially separated conditions. The self-reported spatial hearing abilities were also measured using validated subjective questionnaires. **Results:** Overall, the SRTs were lower (better) with SSN than with fluctuating speech noise. When the noise was presented to the non-CI ear (speech at 0°, noise at non-CI ear, SONnon-ci), speech-in-noise recognition was the greatest due to head shadow or better-ear listening effect, resulting in the SRMs of approximately 5~6 dB regardless of noise type. When the noise was given to the CI ear (speech at 0°, noise at CI ear, SONci), some individuals exhibited positive SRMs (3~8 dB), while others showed negative SRMs, leading to little SRMs overall. When the SSN was given, subjects with less SRMs (less spatial separation benefits on the objective test) reported greater subjective spatial hearing difficulties. **Conclusion:** The spatial hearing of unilateral CI users varied by the position of the sound source. Listeners' spatial hearing abilities, which are unpredictable from clinical routine tests, need to be assessed by either objective or subjective measures.

Key Words: Spatial release from masking, Spatial separation benefit, Spatial hearing questionnaire, Unilateral cochlear implant.

INTRODUCTION

우리는 일상적으로 서로 다른 위치에서 여러 화자가 동시에 이야기하는 다화자 의사소통 환경을 자주 접한다. 건청인은 다화자 대화 상황에서 양이청취(binaural hearing) 단서와 두영효과(head shadow effect)를 통해 여러 소리의 위치를 파악하고 분리한 후 목표 화자의 음성에 집중할 수 있다(Bronkhorst, 2000; Bronkhorst, 2015). 그러나 비대칭 청력(asymmetric

hearing)을 가진 난청인의 경우 양이 단서들을 적절히 활용하지 못하므로 소리위치분별 및 복잡한 소음 환경 속 의사소통 능력이 저하되는 등 공간청취(spatial hearing)에 어려움을 보인다(Akeroyd & Whitmer, 2011; Kitterick et al., 2016; Kumpik & King, 2019; Thornton et al., 2021).

청자의 소음하 공간청취 능력, 위치분리혜택을 평가하기 위해 객관적 혹은 주관적 평가 도구를 활용할 수 있다. 예를 들어 수평면 혹은 수직면에 설치한 여러 음장스피커를 통해 소리위치분별(sound localization)을 측정하거나 목표 어음과 소음 간 위치가 분리된(spatially separated) 소음하 어음 인지검사 등을 객관적 검사로 시행할 수 있다(Corbin et al.,

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2021; Firszt et al., 2017; Nelson et al., 2019; Oyamada et al., 2023; Rothpletz et al., 2012). 객관적 공간청취검사가 어려운 경우 신뢰도와 타당도가 검증된 자가보고 설문 도구를 통해 난청인의 공간청취 어려움을 주관적으로 평가할 수 있다(Jung et al., 2023b; Noble et al., 2008; Perreau et al., 2014; Zhang et al., 2015). 다수의 선행 연구에서 위치분리가 이루어지지 않은(spatially co-located) 조건에 비해 위치분리된 조건에서 얼마나 소음하 어음인지가 향상하는지를 통해 위치분리로 인한 차폐감소(spatial release from masking, SRM) 혹은 위치분리혜택(spatial separation benefit) 정도를 도출하였다(Hawley et al., 2004; King et al., 2020; Litovsky, 2005; Yost, 2017). SRM이 클수록 더 나은 공간청취능력을 가졌다고 간주하며, 난청인의 경우 음향차폐(energetic masker) 조건보다 의미차폐(informational masker) 조건에서 더 큰 SRM을 보였다(Arbogast et al., 2002; Rothpletz et al., 2012). 양이 간 난청의 정도와 형태가 다른 양이 비대칭(bilateral asymmetrical) 난청을 가진 경우, 저하된 공간청취 능력을 보여 여러 가지 어려움을 겪는다고 보고되었다(Kumpik & King, 2019; Reeder et al., 2015; Rothpletz et al., 2012; Vannson et al., 2015). 그러나 이를 객관적, 주관적으로 임상 평가하여 비대칭 청력 난청인의 상담 및 재활에 활용하는 경우가 제한적이다. 특히 양이 고심도 감각신경성 난청을 가졌음에도 대상자의 경제 상황, 수술에 대한 부담, 기타 병력 등을 이유로 양측이 아닌 일측 인공와우 이식(cochlear implant, CI)을 선택하기도 한다(Gordon et al., 2013). 이와 같이 일측 CI를 사용하는 성인 혹은 아동은 양측 CI 사용자에 비해 다수의 화자가 이야기하는 시끄러운 교실, 운동장, 다화자 대화 상황 등 실생활에서 많은 어려움을 겪는다(Sarant et al., 2014; Smulders et al., 2016; van Zon et al., 2017). 양이 고심도 감각신경성 난청을 가졌으나 일측 CI를 사용하는 성인의 소리위치분별능력을 측정된 결과, CI 사용 귀 쪽으로 편향된 방향성 패턴을 보였고 소리위치분별능력과 주관적 공간청취의 어려움 간 상관성이 있었다(Lee, 2022).

순음청력검사 및 조용한 상황에서의 어음청각검사 결과만으로는 비대칭 청력으로 인해 겪는 일상생활 속 공간청취의 어려움을 예측하는 데 한계가 있다. 공간청취 중 소리위치분별을 측정하기 위해서는 다수의 음장스피커 검사 환경이 필요한데, 국내에서 임상 목적으로 5개 이상의 음장스피커 환경을 구축한 경우가 비교적 제한적이다. 그러나 많은 임상 현장에서 청각보조기기 효과 검증을 위해 음향부스 내에 2~3개의 음장스피커를 설치하므로, 이를 통해 위치분리된 소음하 어음인지 측정을 시행하여 비대칭 난청인의 공간청취 능력을 평가하고 이에 맞는 재활을 계획할 수 있다. 본 연구에서는 양이 고심도 난청인 중 일측 CI 사

용자를 대상으로 위치분리된 소음하 문장인지검사를 실시하여 SRM, 즉 위치분리혜택 정도를 측정하고자 하였다. 자가보고 설문 도구를 통해 공간청취의 어려움 정도를 추가로 측정하여, 객관적, 주관적 검사 결과 간 관련성을 확인하고자 하였다.

MATERIALS AND METHODS

연구 대상

양이에 고심도 난청을 가지고 있으나 일측 CI를 사용하고 있는 성인 14명(남성 2명, 여성 12명)이 본 연구에 참여하였다. 대상자의 평균 연령은 41.86세(standard deviation [SD], 12.40; range, 21 to 61)였으며, Table 1에 각 대상자의 성별, 연령, CI 사용 귀, 난청 발생 연령, CI 사용 기간, 사용 중인 CI 기기 정보 등을 제시하였다. 순음청력검사기(AudioStar pro; Grason-Stadler, Eden Prairie, MN, USA), 헤드폰(TDH-39P; Telephonics, Farmingdale, NY, USA), 음장스피커(Activer speaker; RadioEar, Middelfart, Denmark)를 사용하여 순음청력검사와 음장청력검사를 시행하였다. 먼저 CI 사용 귀를 기준으로 CI 사용 전 500, 1,000, 2,000, 4,000 Hz에서 측정된 평균순음역치(pure tone average, PTA)는 평균 119.02 dB hearing level (HL) (SD, 1.97)이었으며, CI 사용 후 측정된(CI-aided) PTA는 평균 28.30 dB HL (SD, 8.75), CI 미사용 귀의 PTA는 평균 112.48 dB HL (SD, 8.38)이었다. 14명 대상자 모두 난청 관련 병인(etiology)은 알 수 없었고, 난청 외 이명, 어지럼, 신경학적 병력을 보이지 않았다. 대상자 모두 연구에 참여하기 전 본 연구의 목적 및 절차에 대한 설명을 듣고 연구 참여에 동의하였다.

연구 절차

소음하 문장인지 평가

본 연구에서는 국제표준에서 권고하는 소음허용수준(International Organization for Standardization, 2012)을 만족하는 방음실에서 Oldenburg Measurement Applications (OMA) 소프트웨어(HörTech g GmbH, Oldenburg, Germany)를 통해 변동형(adaptive) 한국어 Matrix 소음하 문장인지검사를 시행하였다. Jung et al.(2021, 2022)은 건청 성인과 노인을 대상으로 음장검사 환경에서 한국어 Matrix 소음하 문장인지검사 도구의 신뢰도와 타당도가 적절함을 확인하였다.

소음하 문장인지검사를 위해 한국어 Matrix 목표 문장과 소음은 대상자의 귀로부터 1미터 거리, 정면(0° azimuth) 혹은 좌우(± 90° azimuth)에 위치한 음장스피커(SC-M53; DENON,

Table 1. Subject's hearing and CI information

Subject#	Sex	Age at test (yr)	Implanted ear	Age of hearing loss onset (yr)	Length of CI use (yr)	Internal device/coding strategy	4fPTA of CI-aided ear (in dB HL)
S1	F	21	Right	1	8	CI422/ACE	12.50
S2	F	39	Right	6	17	HiRes 90k/HiRes Fidelity 120	30.00
S3	F	48	Right	27	4	CI522/ACE	35.00
S4	F	36	Right	14	17	CI24RE/ACE	26.25
S5	M	59	Right	32	17	CI24R/ACE	35.00
S6	F	42	Right	20	10	Sonata TI100/FS4	48.75
S7	F	35	Right	5	18	CI24R/ACE	27.50
S8	M	25	Right	8	5	CI522/ACE	28.75
S9	F	61	Left	48	3	CI24RE/ACE	23.75
S10	F	26	Left	2	17	CI24M/ACE	20.00
S11	F	50	Left	28	12	CI24RE/ACE	26.25
S12	F	53	Right	12	11	CI24RE/ACE	35.00
S13	F	42	Right	14	15	HiRes 90k/HiRes Fidelity 120	18.75
S14	F	49	Left	33	13	CI24RE/ACE	28.75
Mean (standard deviation)		41.86 (12.40)		17.86 (13.96)	11.92 (5.27)		28.30 (8.75)

CI: cochlear implant, 4fPTA: pure-tone average across 0.5, 1, 2, and 4 kHz, HL: hearing level, S: subject, F: female, M: male

Kawasaki, Japan)와 Fireface UCX 디지털 아날로그 변환기 (RME, Haimhausen, Germany)를 통해 전달하였다. 모든 대상자는 기존 Matrix 검사 절차대로 65 dB sound pressure level의 고정된 레벨에서 소음을 들었으며, 대상자의 응답에 따라 최대우도측정(maximum likelihood estimator)에 근거하여 문장의 강도가 변동 조절되었다(Kollmeier et al., 2015). 본 연구에서는 OMA 소프트웨어를 통해 각 대상자가 약 50%의 소음하 문장인지를 보이는 signal-to-noise ratio (SNR)를 어음 인지역치(speech reception threshold, SRT)로 도출하였다.

본 연구에서는 위치분리가 이루어지지 않은 조건과 위치분리된 조건 모두에서 두 가지 종류의 배경소음을 제시하여 소음하 문장인지를 측정하였다. 두 가지 종류의 소음 중 하나는 비변동(non-fluctuating) 어음스펙트럼 소음(speech shaped noise, SSN)이었으며, 다른 소음은 International Speech Test Signal (ISTS) (Holube et al., 2010)이었다. ISTS는 6개의 서로 다른 모국어어를 가진 여성 화자가 각자의 모국어로 “The north wind and the sun” 이야기를 읽게 한 후 100~600 msec로 분할 후 무작위 순서로 조합한 것이다. SSN은 어음의 스펙트럼을 가지나 변동 특성이 없는 반면, ISTS는 경쟁 화자(competing speech) 소음으로 어음 자체의 변동하는 특징을 가지나 한국어를 모국어로 하는 여성 화자가 포함되어 있지 않아 한국어 의미

차폐(informational masking) 요소를 제외할 수 있다.

본 연구에서는 목표 문장과 소음의 위치가 분리되지 않은 듣기 조건을 위해 목표 문장과 소음을 정면(0° azimuth) 스피커에서 함께 제시하였으며, 이를 speech at 0°, noise at 0° (SON0)이라 명명하였다. 목표 문장과 소음의 위치가 90° 분리된 조건을 위해 목표 문장은 항상 정면에서, 소음은 좌측 혹은 우측 귀(±90° azimuth) 방향에 위치한 스피커에서 제시하였으며, 소음이 제시된 방향이 CI 사용 귀인지 반대 귀인지를 기준으로 speech at 0°, noise at CI ear (SONci) 혹은 speech at 0°, noise at non-CI ear (SONnon-ci)라 명명하였다. 두 소음 하에서 위치분리가 이루어지지 않은 조건(SON0)과 위치분리가 이루어진 조건(SONci 혹은 SONnon-ci)에서의 SRT의 차이를 통해 SRM을 도출하였다(SRM = SRT from SON0 - SRT from SONci 혹은 SRT from SON0 - SRT from SONnon-ci).

실험을 시작하기 전에 대상자가 SSN, ISTS 조건에서 Matrix 문장을 인지하고 따라 말하는 데 친숙해지는 연습 과정을 가졌으며, 순서에 따른 이월 효과(carryover effect)를 고려하여 소음 종류, 듣기 조건은 무작위 순서로 제시하였다.

설문을 통한 공간청취의 어려움 평가

본 연구에서는 일측 CI 대상자의 주관적 공간청취 능력

을 측정하기 위해 Korean version of the Spatial Hearing Questionnaire (K-SHQ) (Jung et al., 2023b; Kong et al., 2017)와 Korean version of the Speech, Spatial and Qualities of Hearing Scale (K-SSQ) (Kim et al., 2017) 설문 도구를 사용하였다. 각 설문 도구에 대한 설명은 아래와 같다.

K-SHQ

K-SHQ는 양이청취를 필요로 하는 여러 듣기 상황에서의 주관적 어려움을 평가하는 영문 SHQ (Tyler et al., 2009)를 한국어로 번역한 것이다(Kong et al., 2017). Jung et al.(2023b)은 최근 CI 사용 성인을 대상으로 K-SHQ 검사 도구의 신뢰도 및 타당도가 우수함을 보고한 바 있다. K-SHQ는 총 24개의 문항을 포함하며, 대상자는 각 문항이 설명하는 듣기 상황에서 대상자가 겪는 어려움 정도를 0~100 (0: 매우 어려움, 100: 매우 쉬움) 이내 숫자로 응답한다. 24개 문항 중 12개 문항을 통해 조용한 상황에서의 어음인지 어려움(문항 #1~4), 위치분리되지 않은 상황에서의 소음하 어음인지 어려움(문항 #5~8), 위치분리된 상황에서의 소음하 어음인지 어려움(문항 #9~12)을 확인하며, 나머지 12개 문항을 통해 소리위치분별의 어려움(문항 #13~24)을 확인한다. 24개 문항의 평균 점수를 통해 K-SHQ 총점을 산출하거나, 세부 항목별로 점수를 구분하여 듣기 상황별 어려움을 확인할 수 있다.

K-SSQ

K-SSQ는 여러 듣기 상황에서의 청취 능력을 평가하기 위한 영문 SSQ (Gatehouse & Noble, 2004)를 한국어로 번역 및 표준화한 것으로(Kim et al., 2017), 언어청취("speech perception") 14개 문항, 공간청취("spatial hearing") 17개 문항, 음질청취("qualities of hearing") 18개 문항을 포함한다. 대상자는 총 49개 문항을 읽고 해당 상황에 대해 0에서 10까지 시각적 유사척도(visual analogue scale) 내에서 본인의 응답을 표시하게 되며(0: 전혀 아님~10: 완벽하게 그러함), 만약 대상자가 문항에서 설명하는 상황을 경험한 적이 없는 경우 '해당 없음'을 선택할 수 있다. 본 연구에서는 대상자의 공간청취 능력을 측정하고자 하였으므로, 검사 소요 시간 및 대상자의 피로도를 고려하여 일반적인 언어청취와 음질청취 항목은 제외하고 공간청취("spatial hearing") 17개 문항만을 설문하였다.

통계 분석

수집된 자료는 Statistical Product and Service Solution (SPSS version 25.0; IBM Corp., Armonk, NY, USA)을 이용하여 분석하였으며, 모든 통계 분석은 유의 수준 0.05 미만에서 검증하였다. 먼저 반복 측정된 이원분산분석을 통해 그룹 내 변

수(공간청취 조건: SON0, SONci, SONnon-ci, 소음 종류: SSN, ISTS)가 SRT 혹은 SRM에 미치는 영향을 확인하였다. Mauchly 구형성 검정 결과 구형성 가정에 위배되는 경우 Greenhouse-Geisser의 수정된 자유도와 F값을 보고하였으며, 주효과가 유의할 경우 Bonferroni 수정된 다중 비교를 시행하여 분석하였다. Pearson 상관분석을 통해 SRM이 K-SHQ의 소리위치분별("localization") 혹은 K-SSQ의 공간청취("spatial hearing") 항목 응답과 관련성을 가지는지 분석하였다.

RESULTS

소음하 문장인지 및 위치분리해택

Figure 1A는 SSN을 통해 세 가지 공간청취 조건(SON0, SONci, SONnon-ci)에서 구한 평균 SRT를, Figure 1B는 ISTS를 통해 동일한 조건에서 구한 평균 SRT를 보여준다. 목표 문장과 SSN을 정면에서 함께 제시한 SON0 조건에서의 평균 SRT는 -0.88 dB SNR (SD, 2.37; range, -4.00 to 5.40 dB SNR)이었다. 목표 문장은 정면에서, SSN은 CI 사용 귀에 제시하였을 때 (SONci) 평균 SRT는 -0.19 dB SNR (SD, 4.54; range, -12.20 to 6.50 dB SNR), 목표 문장은 정면에서, SSN은 CI 미사용 귀에 제시하였을 때(SONnon-ci) 평균 SRT는 -5.99 dB SNR (SD, 2.37; range, -9.10 to -3.20 dB SNR)이었다. ISTS를 목표 문장과 함께 정면에서 제시한 경우(SON0) 평균 SRT는 3.23 dB SNR (SD, 3.47; range, -2.80 to 10.40 dB SNR), SONci 조건에서의 평균 SRT는 4.59 dB SNR (SD, 6.13; range, -11.40 to 13.70 dB SNR), SONnon-ci 조건에서의 평균 SRT는 -2.71 dB SNR (SD, 4.83; range, -11.00 to 8.40 dB SNR)이었다. 반복 측정된 이원분산분석 결과, 공간청취 조건($F_{(2, 26)} = 20.14$)과 소음 종류($F_{(1, 13)} = 28.72$)에 따른 주효과 모두 유의하였고 ($p < 0.001$), 두 변수 간 상호작용은 유의하지 않았다($F_{(2, 26)} = 1.70$, $p = 0.20$). Bonferroni 수정된 다중 비교 분석 결과, 전반적으로 SSN보다 ISTS 소음 환경에서 SRT가 약 4 dB가량 높았으므로(저하되었으므로) 어음의 음성 정보와 변동 특성을 가진 ISTS가 SSN보다 난청인의 소음하 어음청취에 더 어려움을 야기하는 소음 종류임을 확인하였다. 세 가지 공간청취 조건 중 SON0와 SONci 조건 간 SRT는 유의하게 다르지 않았으나, SONnon-ci 조건의 SRT가 SON0 혹은 SONci에서 구한 SRT보다 유의하게 낮았다.

세 가지 공간청취 조건에서 측정한 SRT 차이를 통해 SRM, 즉 위치분리해택 정도를 도출하였고, Figure 1C, D에 이를 제시하였다. 위에서 기술하였듯이 SRM은 위치분리가 이루어지지 않은 조건(SON0)에 비해 위치분리가 이루어진 조건(SONci 혹은 SONnon-ci)에서 어느 정도 소음하 어음인지가 향상하였는지

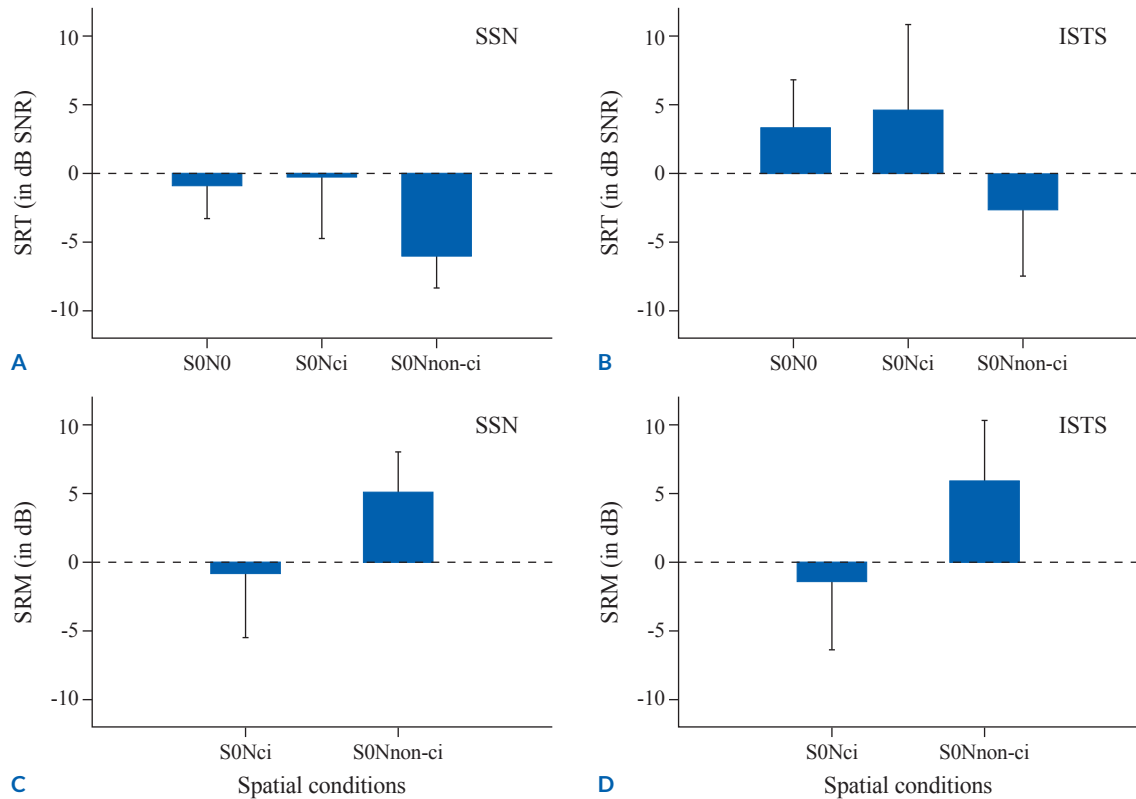


Figure 1. SRTs obtained from three spatial conditions (S0N0, S0Nci, S0Nnon-ci) for SSN and ISTS noise (A, B) and spatial release from masking (SRM; C, D). SRT: Speech recognition thresholds, SNR: signal-to-noise ratio, S0N0: speech at 0°, noise at 0°, S0Nci: speech at 0°, noise at CI ear, S0Nnon-ci: speech at 0°, noise at non-CI ear, SSN: speech-shaped noise, ISTS: International Speech Test Signal, SRM: spatial release from masking.

정도를 의미하므로, SRM 값이 클수록 항상 정도가 크을 의미한다. 먼저 SSN을 정면에서 제시할 때와 소음의 위치를 CI 사용 귀로 분리하여 제시할 때의 차이로 구한 평균 SRM은 -0.69 dB (SD, 4.70; range, -7.60 to 8.20 dB)이었고, SSN을 CI 미사용 귀에 제시할 때 평균 SRM은 5.11 dB (SD, 2.91; range, 2.00 to 11.10 dB)이었다. ISTS를 정면에서 제시할 때와 CI 사용 귀로 분리하여 제시할 때의 차이로 구한 평균 SRM은 -1.36 dB (SD, 4.91; range, -9.40 to 8.60 dB)이었고, ISTS를 CI 미사용 귀에 제시하여 산출한 평균 SRM은 5.94 dB (SD, 4.65; range, -4.10 to 14.00 dB)이었다. 반복 측정된 이원분산분석 결과 공간청취 조건($F_{(1, 13)} = 32.64$)에 따라 SRM이 유의하게 달랐으나, 소음 종류($F_{(1, 13)} = 0.01$)에 따른 주효과와 두 변수 간 상호작용 ($F_{(1, 13)} = 3.58$) 모두 유의하지 않았다($p > 0.05$). 따라서 소음 종류에 상관없이 소음을 정면에서 목표 문장과 함께 제시할 때보다 소음의 위치를 CI 미사용 귀 방향으로 분리하여 제시할 때 약 5~6 dB가량의 위치분리혜택이 있었다.

주관적 공간청취 설문 응답과 SRM과의 상관성

Table 2에 제시하였듯이 본 연구에 참여한 일측 CI 사용자의

K-SHQ 총점은 평균 63.59 (SD, 15.53; range, 37.50 to 87.08)였다. 어음인지 혹은 소음위치분별과 관련하여 항목별 결과를 살펴보면 조용한 상황에서의 어음인지 어려움(문항 #1~4)에 대한 평균 점수는 89.11 (SD, 8.44; range, 75.00 to 100.00), 위치분리되지 않은 상황에서의 소음하 어음인지의 어려움(문항 #5~8)에 대한 평균 점수는 72.00 (SD, 19.65; range, 30.00 to 100.00), 위치분리된 상황에서의 소음하 어음인지 어려움(문항 #9~12)에 대한 평균 점수는 69.14 (SD, 22.40; range, 31.25 to 100.00), 소리위치분별의 어려움(문항 #13~24)에 관한 평균 점수는 50.43 (SD, 17.89; range, 27.50 to 84.17)이었다. K-SHQ 설문문의 경우 응답이 0에 가까울수록 문항에서 묻는 듣기 상황에서 어려움이 많음을 의미하므로, K-SHQ의 여러 항목 중 일측 CI 사용자는 소리위치분별 시 가장 어려움이 크다고 응답하였음을 알 수 있다.

K-SSQ의 경우 응답이 0에 가까울수록 어려움이 많고, 10에 가까울수록 어려움이 적음을 의미하는데, 본 연구에 참여한 대상자의 경우 K-SSQ 17개 공간청취(“spatial hearing”) 항목에 대한 평균 점수가 4.63 (SD, 1.85; range, 1.13 to 8.29)이었다. 본 연구에 참여한 일측 CI 사용자의 K-SHQ “localization”

Table 2. K-SHQ subscale and total scores and K-SSQ "spatial hearing" score

	Mean	SD	Min	Max
K-SHQ				
Subscale: speech in quiet (item #1~4)	89.11	8.44	75.00	100.00
Subscale: speech in noise-front (item #5~8)	72.00	19.65	30.00	100.00
Subscale: speech in noise-separate (item #9~12)	69.14	22.40	31.25	100.00
Subscale: localization (item #13~24)	50.43	17.89	27.50	84.17
Total score	63.59	15.53	37.50	87.08
K-SSQ				
Subscale: spatial hearing	4.63	1.85	1.13	8.29

K-SHQ: Korean version of the Spatial Hearing Questionnaire, K-SSQ: Korean version of the Speech, Spatial and Qualities of Hearing Scale, SD: standard deviation, Min: minimum, Max: maximum

항목 평균 점수는 50.43(점수 100 기준), K-SSQ “spatial hearing” 항목 평균 점수는 4.63(점수 10 기준)으로 평균 값을 기준으로 할 때 공간청취 시 “보통”의 어려움을 보였으나, 점수의 범위가 커 개인차가 큼을 확인할 수 있다.

객관적 검사를 통해 측정된 SRM(위치분리혜택 정도)과 주관적 자가보고 설문에서 대상자가 응답한 공간청취의 어려움과 상관성을 가지는지 확인하였다. 분석 결과, SSN 소음을 CI 미사용 귀에 제시하고 도출한 SRM은 K-SHQ의 소리위치분별 항목, K-SSQ 공간청취 항목 응답과 모두 유의미한($p < 0.05$) 상관성을 보였으며(K-SHQ: $r = 0.66$, K-SSQ: $r = 0.69$), 그 외 조건에서 구한 SRM 결과는 주관적 공간청취 관련 응답과 유의미한 상관성을 보이지 않았다($p > 0.05$). 이는 CI를 사용하지 않는 고심도 난청 귀에 SSN을 위치분리하여 제시하였을 때, 객관적 검사 결과에서 위치분리혜택 정도가 적은 사람일수록 주관적으로 응답한 공간청취의 어려움이 많았음을 의미한다.

DISCUSSIONS

양이 간 청력이 비대칭인 경우 건청인에 비해 양이청취 단서를 적절히 활용하거나 양이진압(binaural squelch), 양이합산(binaural summation)과 같은 양이청취 혜택을 얻기 어려울 수 있다(Akeroyd & Whitmer, 2011; Kumpik & King, 2019). 특히 여러 사람이 동시에 이야기하는 다화자 대화 시 비대칭 난청으로 양이정보통합 및 공간청취가 저하되어, 다른 방향에서 제시된 소음을 무시하고 목표 화자의 말에 선택적으로 집중하는 공간집중력(spatial attention)에 부정적 영향을 미친다(Choi & Lee, 2023; Misurelli & Litovsky, 2012). 따라서 본 연구에서는 객관적 검사를 통해 공간청취 조건에 따른 SRT를 비교하고 SRM을 도출하였으며, 주관적 검사에서 확인한 일측 CI 사용자의 공간청취의 어려움과 SRM과의 상관성을 확인하였다.

Spatially co-located conditions

본 연구에서는 정면 스피커에서 목표 문장과 함께 SSN 혹은 ISTS를 제시함으로써 위치분리되지 않은(spatially co-located) 조건(S0N0)에서 소음하 문장인지 능력을 측정하였다. 측정 결과 SSN 혹은 ISTS를 통해 측정된 S0N0 조건의 평균 SRT는 각각 -0.88 dB SNR, 3.23 dB SNR로 비변동 SSN보다 변동 특성을 보이는 ISTS 소음 조건에서 소음하 어음인지가 4 dB가량 더 저하되었다. 이는 선행 연구에서 보고한 건청인의 소음하 인지 결과와 상반되었다. 본 연구와 동일하게 SSN, ISTS 조건에서 한국어 Matrix 문장인지검사를 진행한 결과(Jung et al., 2021), 건청 성인의 경우 SSN에 비해 ISTS 조건에서 소음하 어음인지가 11 dB가량 향상하였고, 건청 노인의 경우 SSN에 비해 ISTS 조건에서 소음하 어음인지가 9 dB가량 향상하였다. 이와 같이 S0N0 조건에서 SSN보다 ISTS 소음 하에서 건청 성인의 어음인지가 향상된 이유는 목표 문장과 ISTS 소음 모두 시간에 따라 소리의 크기가 변동하는 특성을 가지므로, 목표 어음의 강도가 소음 강도보다 커질 때마다 청자가 목표 어음의 정보를 접해(glimpsing) 소음하 어음인지가 용이하게 되기 때문이라 설명하였고, 이를 변동소음혜택(fluctuation masker benefit)이라 명명해 왔다(Cooke, 2006; Jensen & Bernstein, 2019; Jung et al., 2023a). SSN, ISTS 조건에서 난청 노인을 대상으로 한국어 Matrix 문장인지검사를 시행한 결과(Jung et al., 2022), SSN과 ISTS 조건에서 측정된 평균 SRT는 -3.26 dB SNR, -5.67 dB SNR로 난청 노인군 역시 ISTS 조건에서 소음하 어음인지가 약 2 dB가량 향상하는 변동소음혜택을 보였다.

본 연구에 참여한 일측 CI 사용자는 위치분리가 주어지지 않은 S0N0 조건에서 변동소음혜택을 보이지 않았으며, 이러한 결과는 Nelson et al.(2003)의 결과와 유사하다. Nelson et al.(2003)은 CI 기기 종류에 상관없이 변동소음하 문장인지검사를 시 변동소음혜택을 아예 보이지 않거나 건청인에 비해 매우 적은

정도의 혜택을 보였으며, 이는 CI 신호처리장치에 따른 주파수 해상도(spectral resolution) 저하에 의한 것이라 설명하였다 (Fu & Nogaki, 2005; Nelson et al., 2003). 본 연구에 참여한 일측 CI 대상자 모두 CI 미사용 귀에 잔존 청력이 거의 없어 편측 귀로만 신호를 처리(monaural processing)해야 하므로, CI 사용 귀의 주파수 해상 능력이 SON0 조건에서의 변동소음혜택 정도에 영향을 주었을 것으로 생각한다.

Spatially separated conditions

본 연구에서는 세 가지 공간청취 조건(SON0, SONci, SONnon-ci)에서 두 가지 소음(SSN, ISTS)을 이용하여 SRT를 측정 후 위치분리된 조건과 분리되지 않은 조건 간 SRT 차이를 통해 SRM을 구하였다. 먼저 SSN을 제시하고 SON0와 SONnonci 조건에서 구한 평균 SRT는 -0.88 dB SNR, -5.99 dB SNR로 평균 SRM은 5.11 dB (range, 2.00 to 11.10 dB)이었고, ISTS를 제시하고 SON0와 SONnonci 조건에서 구한 평균 SRT는 3.23 dB SNR, -2.71 dB SNR로 평균 SRM은 5.94 dB (range, -4.10 to 14.00 dB)이었다. 즉 소음 종류에 상관없이 배경소음이 CI 미사용 귀로 분리하여 제시되었을 때 5~6 dB가량의 SRM을 보였던 것이다. 이렇듯 소음 종류에 상관없이 유사한 SRM이 관찰된 이유는 소음이 머리에 막히는 효과(두영 효과)로 인해 CI 귀에 SNR이 향상하여(favorable SNR) 더 잘 듣게 되기 때문이다. 이러한 SNR 향상 효과는 better-ear listening effect이라고도 명명되었다(Gifford et al., 2014; Hawley et al., 2004; Misurelli & Litovsky, 2012; Park et al., 2021). Park et al.(2021)은 한쪽 귀는 건청, 반대쪽 귀는 고심도 난청으로 CI를 사용 중인 아동의 SRM을 측정하였다. 소음이 정면에서 제시되었을 때보다 CI 사용 귀로 분리되어 제시되었을 때 3.3 dB가량의 SRM을 보였으며, 이는 CI 사용 귀에 소음 제시 시 두영 효과로 인해 반대측 귀인 건청 귀의 SNR이 향상하여(better-ear listening benefit 발생) 긍정적인 SRM이 관찰되었다고 볼 수 있다. Corbin et al.(2021)은 편측성 난청 아동과 건청 아동 및 성인을 대상으로 SSN 혹은 두 화자 소음(two-talker competing noise)을 정면(0°) 혹은 좌우(± 90°)에서 제시하여 SRM을 측정하였다. 편측성 난청 아동의 난청 귀에 소음이 제시된 경우 그 반대 귀인 건청 귀에 SNR이 향상되어 소음 종류에 상관없이 4~5 dB의 SRM을 보였으므로 본 연구 결과와 유사하다고 볼 수 있다. 건청인에게 SSN을 제시한 경우 90도 위치분리에 의한 평균 SRM이 약 4 dB이었으나 두 화자 소음 조건에서는 9~11 dB가량의 SRM을 보여, 의미차폐 여부가 위치분리혜택 정도에 영향을 미친 것으로 볼 수 있겠다.

본 연구에 참여한 대상자 모두 한쪽 귀에만 CI를 사용하는 일측 CI 사용자였고, CI 미사용 귀는 잔존 청력이 거의 없었

다. SSN을 통해 SON0와 SONci 조건 간 결과 차이로 구한 평균 SRM은 -0.69 dB (range, -7.60 to 8.20 dB), ISTS를 통해 구한 평균 SRM은 -1.36 dB (range, -9.40 to 8.60 dB)로 평균값을 기준으로 하면 위치분리혜택이 미미한 것으로 해석할 수 있다. 그러나 14명 대상자의 SRM 범위를 보았을 때 개인 간 차이가 컸다. 14명 대상자 중 7명은 SSN 제시 시 -3 dB 이하의 SRM (-7.60 to -3.20 dB)을 보인 반면, 4명은 3 dB 이상의 SRM (3.80 to 8.20 dB)을 보였다. ISTS 제시 시 14명 중 6명은 -3 dB 이하의 SRM (-9.40 to -3.00 dB)을 보였으나, 4명은 ISTS 제시 시 8 dB 이상의 SRM을 보였다. Corbin et al.(2021)에서도 편측성 난청 아동의 건청 귀에 소음을 제시한 경우 평균 SRM은 -1~0 dB이었으나, 대상 아동 중 일부는 0~5 dB가량의 SRM을, 일부는 -5~-1 dB의 SRM을 보였다. 즉, 양이 중 청력이 더 좋은 귀에 소음이 제시되는 불리한 듣기 상황에도 불구하고 좋은 귀로 편이 주파수 단서(monaural spectral cue) 처리가 가능한 경우 이를 통해 긍정적인 SRM을 보일 수 있고, 이를 적절히 사용하지 못하는 경우 예상대로 미미한 SRM을 보일 수도 있겠다.

Relations between objective and subjective of spatial hearing outcomes

객관적 혹은 주관적 검사 도구를 통해 난청인의 공간청취 능력을 측정 가능하나, 국내 임상현장에서 기본청력검사 절차의 일부로 공간청취 능력을 평가하는 경우는 제한적이다. 공간청취 평가가 제한적으로 시행되는 이유는 다수의 음장스피커 환경 구축의 어려움, 협소한 공간 문제, 시간 소요, 공간청취 능력의 평가 절차 및 결과 해석에 대한 이해 부족 등일 수 있다. 본 연구에서는 임상적 활용성을 고려하여 현재 국내 임상 현장에서 보통 구축하고 있는 2~3개의 음장스피커 환경과 한국어 Matrix 소음하 문장인지검사 도구를 이용하여 일측 CI 사용자의 공간청취 능력을 객관적으로 평가하고 주관적 공간청취의 어려움과의 관련성을 확인하였다.

본 연구의 상관분석 결과, SSN 제시 시 SONnon-ci 조건에서 SRM이 적은 사람일수록, 즉 위치분리로 인한 혜택이 적은 사람일수록 주관적 공간청취의 어려움 정도가 더 컸다. 이러한 상관성은 K-SHQ 혹은 K-SSQ 설문 도구에 상관없이 유사하게 관찰되었다. Lee(2022)는 일측 CI 사용자 중 객관적 검사에서 저하된 소리위치분별 능력을 보일수록 주관적 검사 도구인 K-SSQ에서 공간적 청취의 어려움이 컸다고 하였다. Corbin et al.(2021)의 경우 공간청취 설문 도구를 사용하지는 않았으나 편측 난청 아동의 부모 보고(Parent's Abbreviated Profile of Hearing Aid Performance)를 분석한 결과, 소음이 건청 귀 쪽으로 분리되어 제시되었을 때의 SRM과 설문 점수 간 유의한 관련성을 보였다. 위의 연구 결과들을 고려해볼 때 비대칭 청력을 가진 난청

인의 위치분리혜택 혹은 소리위치분별 능력을 객관적으로 정량화하기 어려운 경우, 주관적 검사 도구를 활용하여 공간청취의 어려움을 확인할 수 있겠다.

K-SHQ 설문문의 경우 소리위치분별의 어려움에 관한 문항 12개 중 23번 문항인 “당신이 도로 옆에 서서 눈을 감고 있다면 당신은 지나가는 차가 어디로 가는지 잘 얘기할 수 있습니까?”에서 평균 점수 43.21로 가장 낮은 점수를 보여, 시각적 단서 없이 소리가 움직이는 상황에서 어려움이 큼을 확인할 수 있었다. K-SSQ 설문문의 경우 17개의 공간청취 관련 문항 중 “귀하는 소리를 들을 때 명확히 외부에서 들린다기보다 귀하의 머릿속에서 맴도는 것처럼 들립니까?”의 질문에 평균 3.21의 가장 낮은 점수를 보였다. 위 K-SSQ 문항의 경우 대상자 중 다수가 이 문항이 의미하는 내용을 이해하기 어렵다고 보고하였으므로, 점수가 낮을 경우 실제로 어려움을 가지는 것인지 혹은 설문 문항 내용을 이해하지 못한 것인지 확인하는 것이 필요하겠다.

본 연구는 여러 제한점을 가지고 있다. 첫 번째 제한점은 본 연구에 참여한 일측 CI 사용자 14명의 CI 사용 시 평균 PTA가 28 dB HL, CI 미사용 귀의 평균 PTA가 112 dB HL가량으로 청력 비대칭 정도가 상당하였다. 따라서 본 연구 결과는 CI 미사용 귀에 잔존 청력이 있는 일측 CI 사용자의 결과와 다를 수 있다. 그 외에 일측 CI 사용 기간 등이 SRM에 미치는 영향을 체계적으로 확인하기 위해서는 보다 많은 CI 사용자를 모집하여 대상자 특성에 따른 결과 비교 및 검증이 필요하다. 두 번째 제한점은 대상자의 일측 CI 사용 전후 공간청취 능력의 변화를 단계적으로 비교하지 못하였다는 점이다. 후속 연구를 통해 CI 사용 전후 혹은 CI 사용 기간에 따른 위치분리된 소음하 어음인지 및 공간청취 능력의 변화를 확인하는 것이 필요하겠다. 세 번째 제한점은 본 연구에서는 수평면에서 90° 위치분리된 검사 환경만을 이용하여 SRM을 측정하였다는 점이다. Jung et al.(2023a)은 중도, 중고도 난청 노인의 경우 0 dB SNR 조건에서 30° 위치분리에 비해 60° 위치분리 조건에서 소음하 인지도가 유의하게 높아졌으나, 건청인의 경우 -20 dB SNR과 같이 매우 듣기 어려운 소음 조건에서만 30°와 60° 위치분리 간 인지도 차이가 있었고, 비교적 듣기 쉬운 소음 조건에서는 이미 천장 효과(ceiling effect)를 보여 30° 이상의 위치분리 조건에서 추가 혜택을 보이지 않았다. 따라서 후속 연구에서 보다 다양한 위치분리 조건을 활용하여 건청인, 난청인의 위치분리혜택을 평가하는 것이 필요하겠다.

본 연구에서는 양측 고심도 난청을 가졌으나 일측 CI를 사용하는 성인을 대상으로 객관적, 주관적 검사 도구를 통해 공간청취 능력을 평가하였고, 결과를 요약하면 다음과 같다. 목표 문장은 정면에, 소음은 CI 미사용 귀(고심도 난청 귀)에 제시한 경우 두영 효과 혹은 better-ear listening effect로 인해 종류에 상관없이 약 5~6 dB가량의 SRM을 보였다. 반대로 목표 문장을

정면에, 소음을 CI 귀에 제시한 경우 대상자 중 일부는 3~8 dB의 긍정적인 SRM을 보였으나 다른 일부는 부정적인 SRM을 보여, 평균적으로는 유의미한 SRM을 보이지 않았다. 일측 CI 사용 성인은 위치분리 여부에 상관없이 SSN보다 ISTS 조건에서 전반적으로 저하된 문장인지를 보여, 건청인에게서 관찰되는 변동소음혜택을 확인할 수 없었다. SSN을 CI 미사용 귀에 제시하여 구한 SRM과 주관적 공간청취의 어려움 간 유의한 상관성을 보였으므로, 공간청취 능력을 객관적으로 측정하는 것이 어려운 경우 주관적 자가보고 설문 도구를 통해서라도 대상자의 일상생활 속 공간청취 능력을 파악하여 난청인의 상담 및 재활에 활용할 수 있겠다.

중심 단어: 위치분리로 인한 차폐감소, 위치분리혜택, 공간청취 설문, 일측 인공와우.

Ethical Statement

This study was approved by the Institutional Review Board of Hallym University of Graduate Studies (#IRB: HUGSAUD850467).

Acknowledgments

N/A

Declaration of Conflicting Interests

There is no conflict of interests.

Funding

This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of Korea (NRF-2022S1A5A2A01048596).

Author Contributions

Conceptualization: Wha Weon Jung, Jae Ho Han. Data collection: Wha Weon Jung, Jae Ho Han. Formal analysis: Wha Weon Jung, Jae Ho Han. Funding acquisition: Jae Hee Lee. Writing—original draft: Wha Weon Jung, Jae Ho Han. Writing—review & editing: all authors. Approval of final manuscript: Jae Hee Lee.

ORCID iDs

Wha Weon Jung <https://orcid.org/0009-0000-8373-0612>
 Jae Ho Han <https://orcid.org/0000-0001-8364-0780>
 Jae Hee Lee <https://orcid.org/0000-0002-4152-6434>

REFERENCES

- Akeroyd, M. A. & Whitmer, W. M. (2011). Spatial hearing and hearing aid. *ENT and Audiology News*, 20(5), 76-79.
- Arbogast, T. L., Mason, C. R., & Kidd, G. Jr. (2002). The effect of spatial separation on informational and energetic masking of speech. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 112(5 Pt 1), 2086-2098.
- Bronkhorst, A. W. (2000). The cocktail party phenomenon: A review of research on speech intelligibility in multiple-talker conditions. *Acustica*, 86, 117-128.
- Bronkhorst, A. W. (2015). The cocktail-party problem revisited: Early processing and selection of multi-talker speech. *Attention, Perception and Psychophysics*, 77(5), 1465-1487.
- Choi, E. & Lee, J. H. (2023). Efficacy of auditory spatial training with real-life environmental noise on speech-in-noise intelligibility of children with hearing loss. *Audiology and Speech Research*, 19(3), 171-178.
- Cooke, M. (2006). A glimpsing model of speech perception in noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 119(3), 1562-1573.
- Corbin, N. E., Buss, E., & Leibold, L. J. (2021). Spatial hearing and functional auditory skills in children with unilateral hearing loss. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 64(11), 4495-4512.
- Firszt, J. B., Reeder, R. M., & Holden, L. K. (2017). Unilateral hearing loss: Understanding speech recognition and localization variability-implications for cochlear implant candidacy. *Ear and Hearing*, 38(2), 159-173.
- Fu, Q. J. & Nogaki, G. (2005). Noise susceptibility of cochlear implant users: The role of spectral resolution and smearing. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, 6(1), 19-27.
- Gatehouse, S. & Noble, W. (2004). The speech, spatial and qualities of hearing scale (SSQ). *International Journal of Audiology*, 43(2), 85-99.
- Gifford, R. H., Dorman, M. F., Sheffield, S. W., Teece, K., & Olund, A. P. (2014). Availability of binaural cues for bilateral implant recipients and bimodal listeners with and without preserved hearing in the implanted ear. *Audiology and Neurotology*, 19(1), 57-71.
- Gordon, K. A., Jiwani, S., & Papsin, B. C. (2013). Benefits and detriments of unilateral cochlear implant use on bilateral auditory development in children who are deaf. *Frontiers in Psychology*, 4, 719.
- Hawley, M. L., Litovsky, R. Y., & Culling, J. F. (2004). The benefit of binaural hearing in a cocktail party: Effect of location and type of interferer. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 115(2), 833-843.
- Holube, I., Fredelake, S., Vlaming, M., & Kollmeier, B. (2010). Development and analysis of an International Speech Test Signal (ISTS). *International Journal of Audiology*, 49(12), 891-903.
- International Organization for Standardization. (2012). *Acoustics—Audiometric Test Methods—Part 3: Speech Audiometry (ISO 8253-3 2012)*. Geneva: International Organization for Standardization.
- Jensen, K. K. & Bernstein, J. G. W. (2019). The fluctuating masker benefit for normal-hearing and hearing-impaired listeners with equal audibility at a fixed signal-to-noise ratio. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 145(4), 2113.
- Jung, J., Lim, B. D., Shin, H., & Lee, J. H. (2023a). Benefits from spatial separation and fluctuating masker on sentence-in-noise recognition in normal-hearing and hearing-impaired listeners. *Audiology and Speech Research*, 19(2), 104-115.
- Jung, W. W., Yun, J. S., & Lee, J. H. (2023b). Validity and reliability of the Korean version of the Spatial Hearing Questionnaire in cochlear implant users. *Audiology and Speech Research*, 19(4), 261-273.
- Jung, Y., Han, J., Choi, S., & Lee, J. H. (2021). Test-retest reliability of the Korean matrix sentence-in-noise recognition in sound-field testing condition. *Audiology and Speech Research*, 17(4), 344-351.
- Jung, Y., Han, J. H., Choi, H. J., & Lee, J. H. (2022). Reliability and validity of the Korean matrix sentence-in-noise recognition test for older listeners with normal hearing and with hearing impairment. *Audiology and Speech Research*, 18(4), 213-221.
- Kim, B. J., An, Y. H., Choi, J. W., Park, M. K., Ahn, J. H., Lee, S. H., et al. (2017). Standardization for a Korean version of the speech, spatial and qualities of hearing scale: Study of validity and reliability. *Korean Journal of Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery*, 60(6), 279-294.
- King, G., Corbin, N. E., Leibold, L. J., & Buss, E. (2020). Spatial release from masking using clinical corpora: Sentence recognition in a colocated or spatially separated speech masker. *Journal of the American Academy of Audiology*, 31(4), 271-276.
- Kitterick, P. T., Smith, S. N., & Lucas, L. (2016). Hearing instruments for unilateral severe-to-profound sensorineural hearing loss in adults: A systematic review and meta-analysis. *Ear and Hearing*, 37(5), 495-507.
- Kollmeier, B., Warzybok, A., Hochmuth, S., Zokoll, M. A., Usilar, V., Brand, T., et al. (2015). The multilingual matrix test: Principles, applications, and comparison across languages: A review. *International Journal of Audiology*, 54 Suppl 2, 3-16.
- Kong, T. H., Park, Y. A., Bong, J. P., & Park, S. Y. (2017). Validation of the Korean version of the Spatial Hearing Questionnaire for assessing the severity and symmetry of hearing impairment. *Yonsei Medical Journal*, 58(4), 842-847.
- Kumpik, D. P. & King, A. J. (2019). A review of the effects of unilateral hearing loss in spatial hearing. *Hearing Research*, 372, 17-28.
- Lee, S. (2022). Sound localization in unilateral cochlear implant users. *Audiology and Speech Research*, 18(3), 172-182.
- Litovsky, R. Y. (2005). Speech intelligibility and spatial release from masking in young children. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117(5), 3091-3099.
- Misurelli, S. M. & Litovsky, R. Y. (2012). Spatial release from masking in children with normal hearing and with bilateral cochlear implants: Effect of interferer asymmetry. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 132(1), 380-391.
- Nelson, E., Reeder, R. M., Holden, L. K., & Firszt, J. B. (2019). Front- and rear-facing horizontal sound localization results in adults with unilateral hearing loss and normal hearing. *Hearing Research*, 372, 3-9.
- Nelson, P. B., Jin, S. H., Carney, A. E., & Nelson, D. A. (2003). Understanding speech in modulated interference: Cochlear implant users and normal-hearing listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 113(2), 961-968.
- Noble, W., Tyler, R., Dunn, C., & Bhullar, N. (2008). Unilateral and bilateral cochlear implants and the implant-plus-hearing-aid profile: Comparing self-assessed and measured abilities. *International Journal of Audiology*, 47(8), 505-514.
- Oyamada, S., Takahashi, M., Furutate, S., Oka, S., Kubota, E., Sakurai, A., et al. (2023). Speech perception in noise and sound localization for cochlear implant with single-sided deafness compared with contralateral routing of signal hearing aids. *Otology and*

- Neurotology*, 44(4), 331-338.
- Park, L. R., Dillon, M. T., Buss, E., O'Connell, B. P., & Brown, K. D. (2021). Spatial release from masking in pediatric cochlear implant recipients with single-sided deafness. *American Journal of Audiology*, 30(2), 443-451.
- Perreau, A. E., Ou, H., Tyler, R., & Dunn, C. (2014). Self-reported spatial hearing abilities across different cochlear implant profiles. *American Journal of Audiology*, 23(4), 374-384.
- Reeder, R. M., Cadieux, J., & Firszt, J. B. (2015). Quantification of speech-in-noise and sound localisation abilities in children with unilateral hearing loss and comparison to normal hearing peers. *Audiology and Neurotology*, 20(Suppl 1), 31-37.
- Rothpletz, A. M., Wightman, F. L., & Kistler, D. J. (2012). Informational masking and spatial hearing in listeners with and without unilateral hearing loss. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 55(2), 511-531.
- Sarant, J., Harris, D., Bennet, L., & Bant, S. (2014). Bilateral versus unilateral cochlear implants in children: A study of spoken language outcomes. *Ear and Hearing*, 35(4), 396-409.
- Smulders, Y. E., van Zon, A., Stegeman, I., Rinia, A. B., Van Zanten, G. A., Stokroos, R. J., et al. (2016). Comparison of bilateral and unilateral cochlear implantation in adults: A randomized clinical trial. *JAMA Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, 142(3), 249-256.
- Thornton, J. L., Anbuhl, K. L., & Tollin, D. J. (2021). Temporary unilateral hearing loss impairs spatial auditory information processing in neurons in the central auditory system. *Frontiers in Neuroscience*, 15, 721922.
- Tyler, R. S., Perreau, A. E., & Ji, H. (2009). The validation of the spatial hearing questionnaire. *Ear and Hearing*, 30(4), 466-474.
- Vannson, N., James, C., Fraysse, B., Strelnikov, K., Barone, P., Deguine, O., et al. (2015). Quality of life and auditory performance in adults with asymmetric hearing loss. *Audiology and Neurotology*, 20 Suppl 1, 38-43.
- van Zon, A., Smulders, Y. E., Stegeman, I., Ramakers, G. G., Kraaijenga, V. J., Koenraads, S. P., et al. (2017). Stable benefits of bilateral over unilateral cochlear implantation after two years: A randomized controlled trial. *The Laryngoscope*, 127(5), 1161-1168.
- Yost, W. A. (2017). Spatial release from masking based on binaural processing for up to six maskers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(3), 2093-2106.
- Zhang, J., Tyler, R., Ji, H., Dunn, C., Wang, N., Hansen, M., et al. (2015). Speech, Spatial and Qualities of Hearing Scale (SSQ) and Spatial Hearing Questionnaire (SHQ) changes over time in adults with simultaneous cochlear implants. *American Journal of Audiology*, 24(3), 384-397.