



# Sound Localization in Unilateral Cochlear Implant Users

Sungmin Lee

Department of Speech-Language Pathology and Audiology, Tongmyong University, Busan, Korea

**Received:** January 15, 2022

**Revised:** March 25, 2022

**Accepted:** March 28, 2022

**Correspondence:**

Sungmin Lee, PhD

Department of Speech-Language

Pathology and Audiology,

Tongmyong University, 428

Sinseon-ro, Nam-gu, Busan 48520,

Korea

**Tel:** +82-51-629-2134

**Fax:** +82-51-629-2019

**E-mail:** smlee8345@gmail.com

**Purpose:** Sound is localized by two ears. People with bilaterally severe-to-profound hearing loss may struggle to identify the direction of a sound if their hearing device delivers sound only one ear due to the loss of binaural advantage. The purpose of this study was to systematically investigate the sound localization performance of people with unilateral cochlear implant users. **Methods:** Ten unilateral cochlear implant users and 10 normal hearing adults participated in this study. Sound localization tests were conducted using five stimuli (speech, speech with noise, 500 Hz warble tone, 1 kHz warble tone, and 4 kHz warble tone) presented from eight loud-speakers. Correct responses and root-mean-square errors were obtained to investigate the localization performances and error patterns. Additional factors including the Korean-Speech Spatial and Qualities of Hearing Questionnaire were also analyzed. **Results:** Localization performance was significantly poor in the unilateral cochlear implant group showing polar patterns toward their hearing side. While the normal hearing group showed better localization for speech in quiet conditions compared to 500 Hz warble tone, the cochlear implant group did not show any statistical difference in performance across the stimuli due to their very poor performance. The Korean-Speech Spatial and Qualities of Hearing Questionnaire was associated with localization performance in limited conditions. **Conclusion:** The present study revealed that unilateral cochlear implant users correctly localize a sound at nearly chance levels. The Korean-Speech Spatial and Qualities of Hearing Questionnaire predict localization performance for unilateral cochlear implant users only for particular conditions.

**Key Words:** Sound localization, Cochlear implant, Speech perception, Korean-Speech Spatial and Qualities of Hearing Questionnaire.

## INTRODUCTION

인간은 소리 정보를 주로 수평면에서 경험하는데, 수평면에 대한 방향성 탐지에 대한 이론은 "Duplex Theory (Strutt, 1907)"로 설명된다. 이 이론은 파장이 긴 저주파수 정보는 interaural time difference (ITD)로, 파장이 짧은 고주파수 정보는 interaural level difference (ILD)로 방향성을 탐지한다는 것을 설명한다. 일반적으로 인간의 두 귀 사이 거리를 9 cm로 봤을 때 한 쪽 귀에 제시된 소리가 두 귀에 도달하는 시간차는 최대 0.6 ms까지 측정되며, 지속적인 신호일 경우에 이러한 ITD 정보는 위상차(phase difference)와 같다.  $2\pi$  이상의 위상차가 발생할 수 있을 정도로 파장이 짧은 고주파수의 ITD 정보는 탐지하기 어려워지고, 결국 이러한 고주파수 신호는 두영

효과(head shadow effect)에 의해서 감소되는 소리 정보로 방향성을 탐지하게 된다. 결국 방향성 탐지는 양이의 청각적 정보 처리에 의해서 이루어지기 때문에 양측성 난청인의 경우 소리의 정확한 탐지를 위해서는 보청기 또는 인공와우의 양이 착용이 필수적이라고 할 수 있다.

인공와우는 달팽이관에 삽입되는 이식형 청각보조기기로, 음향에너지의 변화하는 포락선(envelope) 정보를 신호처리하여 청신경을 전기자극한다. 따라서 양이 인공와우의 경우 시간적 포락선의 진폭 변화에 대한 정보는 잘 보존되어 ILD를 형성하는데 중요한 역할을 한다. 하지만 ITD 정보는 양이 인공와우 신호처리에 걸리는 시간차 또는 가청영역의 저하에 의해서 잘 보존되지 못하기 때문에 양이 인공와우 환자는 ILD 정보를 주 단서로서 방향성 탐지에 활용되는 것으로 알려져 있다(Seeber & Fastl 2008; Senn et al., 2005). 어음인지에 있어서 인공와우 양이 착용의 중요성은 여러 연구를 통해서 강조되고 있지만(Johnston et al., 2009; Sarant et al., 2014; Scherf et al.,

2007) 수술에 대한 부담감, 비용, 관리 등의 이유로 아직도 많은 고심도 난청인들이 한 쪽만 착용하는 현실이다. 방향성 측면에서 인공와우의 일측 착용은 ILD와 ITD 정보의 결핍을 초래하므로 양이 착용에 비해 방향성 탐지 능력이 저하된다(Lovett et al., 2010; Nopp et al., 2004; Seeber & Fastl, 2008). 인공와우의 양이 착용이 방향성을 크게 개선시키지 못했다는 보고도 있으나 (Grieco-Calub & Litovsky, 2010), 대부분의 관련 연구는 향상된 수행 능력을 보고하고 있다(Litovsky et al., 2006; Lovett et al., 2010). 양이 정보를 얻지 못하는 일측 착용 환자는 양이에 감지되는 주파수 정보의 차이를 분석하는 선행적 경험과 지식에 의해서 방향성 탐지가 이루어진다고 보고된다(Wightman & Kistler, 1997).

방향성 탐지 능력의 평가는 난청인의 삶의 질 향상을 위한 청

각재활을 위한 중요한 검사이지만 임상 클리닉에서 방향성검사를 위한 멀티 스피커 시스템을 갖추기는 쉽지 않다. 검사에 대한 명확한 프로토콜의 부재, 설비 시스템의 높은 비용, 청각 부스의 공간적 제약, 시스템 구축의 기술적 어려움 등으로 인하여 음장(free field)에서의 방향성검사는 청각검사 배터리로 사용이 드문 현실이다. 이러한 방향성 탐지 능력에 대한 직접 측정의 대안으로 설문지가 사용될 수 있다(Bagatto et al., 2019). 방향성에 대한 측정이 가능한 대표적인 설문지로 Auditory Behavior in Everyday Life (Purdy et al., 2002)의 한국어 버전인 '일상생활 청각행동 설문지' (Choi et al., 2017)와 Speech Spatial and Qualities of Hearing Questionnaire (SSQ) (Gatehouse & Noble, 2004)의 한국어 버전인 '언어 공간 음질 척도 평가' (Korean-Speech Spatial and Qualities of

**Table 1.** Demographics of unilateral CI participants

	Etiology	Age (yr)	Sex	CI ear	CI processor	CI implant	CI strategy	Duration of CI use (months)	PTA right (dB HL)	PTA left (dB HL)	KSA sentence score in quiet (%)	KSA sentence score at 5 dB SNR (%)
1	Otitis media	30	Male	Right	N5	Nucleus® 24 Contour™ cochlear implant: CI24R (CS)	ACE	20	78.3	120	77.5	40
2	Unknown	29	Female	Right	N6	Nucleus® 24 Contour™ cochlear implant: CI24R (CS)	ACE	19	116.7	118.3	90	2.5
3	Unknown	51	Male	Left	N6	Nucleus® Freedom™ cochlear implant with Contour Advance™ electrode: CI24RE (CA)	ACE	38	98.3	120	87.5	17.5
4	Genetic	24	Female	Right	N6	Nucleus® 24 cochlear implant: CI24M	ACE	20	115.	88.3	52.5	5
5	Unknown	27	Female	Left	N5	Nucleus® 24 Contour Advance™ cochlear implant: CI24R (CA)	ACE	17	71.7	110	47.5	45
6	Congenital	26	Male	Right	N7	Nucleus® 24 Contour™ cochlear implant: CI24R (CS)	ACE	20	120	105	100	90
7	Congenital	27	Male	Right	N6	Nucleus® CI422 cochlear implant with slim straight electrode	ACE	7.83	95	96.7	0	0
8	Unknown	45	Female	Left	N7	Nucleus® 24 Contour Advance™ cochlear implant: CI24R (CA)	ACE	11.6	103.3	120	0	0
9	Unknown	29	Male	Right	N6	Nucleus® 24 Contour Advance™ cochlear implant: CI24R (CA)	ACE	28	120	96.7	37.5	0
10	Congenital	24	Male	Right	N6	Nucleus® 24 Contour Advance™ cochlear implant: CI24R (CA)	ACE	21	120	120	45	15

CI: cochlear implant, PTA: pure-tone threshold average for hearing levels at 500, 1,000, and 2,000 Hz, KSA: Korean Speech Audiometry, SNR: signal-to-noise ratio, ACE: advanced combined encoder

Hearing Questionnaire) (K-SSQ) (Kim et al., 2017)가 있다. 이 중 K-SSQ는 일상생활 대화 시 예상되는 여러 가지 듣기 상황에서 청취 능력을 평가하는 검사로 난청인의 종합적인 청취장애 측정의 도구로 사용되어 왔다(Lee, 2018). K-SSQ는 언어 청취(speech perception) (14문항), 공간 청취(spatial hearing) (17문항), 음질 청취(qualities of hearing) (18문항), 즉 총 3개 영역의 49개 문항으로 구성되어 있다. 이 중 공간 청취 항목이 방향성 탐지 능력을 평가할 수 있는 것으로 사료되나, 실제 난청인, 특히 인공와우 사용자를 대상으로 타당도를 측정할 국내 연구는 전무하다.

인공와우의 양이 착용은 영유아를 중심으로 매년 증가하고 있으나(Dhanasingh & Hochmair, 2021), 아직도 대다수의 고심도 청각장애인들은 일측 착용에 의존하고 있다. 단순히 저하된 것으로 알려져 있는 일측 인공와우 착용자의 방향성 능력을 임상적 정량화된 데이터로 보고하고, 방향성 청력검사의 대안을 찾고자 본 연구에서는 다음의 목표를 설정하였다. 첫째, 일측성 인공와우 사용자의 방향성 탐지 능력을 음장에서 측정하여 수행 능력을 확인하고, 건청인과의 비교를 통해서 오류 패턴을 분석하고자 하였다. 둘째, 인공와우 환자의 방향성 탐지 수행 능력과 관련된 요인들과 K-SSQ 설문지의 세 가지 문항을 분석하여 K-SSQ의 효용성에 대해서 연구하고자 하였다. 이를 통해 인공와우 환자의 방향성 탐지 능력과 유의미한 관계를 갖고 있는 요인들을 확인하고, 공간적, 기술적, 비용적 한계로 대부분의 임상 환경에서 생략되고 있는 방향성 검사의 대안으로 K-SSQ 설문지의 활용 가능성을 확인하고자 하였다.

## MATERIALS AND METHODS

### 연구 대상

본 연구를 위하여 10명의 일측성 인공와우 사용자와 연령이 일치하는 정상 청력 성인 10명을 모집하였다. 독립표본 *t* 검정 결과, 인공와우 환자군의 연령(mean [M], 31.6; standard deviation [SD], 8.9)과 정상 청력군의 연령(M, 32; SD, 9.1)에는 유의미한 차이가 없었다( $t(18) = -0.09, p > 0.05$ ). 연구 대상자는 한국어를 모국어로 사용하고 인지적인 문제가 없는 만 19세 이상 65세 이하의 성인이며, 인공와우 환자는 일측 귀에 인공와우를 착용하고 있으며 착용 기간이 최소 6개월 이상인 감각신경성 난청자를 대상으로 하였다. 중이검사기(AT235; Interacoustics, Middelfart, Denmark)를 사용한 고막운동성검사를 통하여 연구 대상자들의 외이 및 중이 기능이 정상임을 확인하였으며, 순음청력검사기(AC40; Interacoustics)를 사용한 순음청력검사를 통하여 250 Hz부터 8,000 Hz까지 연구 대상자들의 순음청력역치를 확인하였다. 인공와우 환자에 대한

기본정보 및 청력검사 결과는 Table 1에 제시하였다.

### 연구 방법

인공와우 착용자의 경우 평상시에 사용하는 볼륨과 프로그램으로 설정된 인공와우 모드를 임상시험 중에 사용하도록 하였다. 모든 인공와우 대상자들의 미착용 귀의 순음청력역치는 70 dB HL 이상으로 잔존청력이 거의 없었으며(Table 1), 이를 바탕으로 임상시험에 제시되는 방향성 청각 정보가 인공와우 미착용 귀에는 입력되지 않음을 추정할 수 있었다. 인공와우 착용 후 청력역치검사를 시행하였으며 모든 환자의 aided 청력역치가 20~35 dB HL 사이에 분포함을 확인하여 장치의 이상 유무를 간접 파악하였다. 문장인지도검사를 위하여 한국어음검사(Korean Speech Audiometry)의 한국표준 일반용 문장표(Korean Standard Sentence Lists for Adults, KS-SL-A) (Jang et al., 2008)를 사용하였으며, 2가지 듣기 상황, 즉, 조용한 상황과 백색잡음이 5 dB signal-to-noise ratio (SNR)로 제시되는 소음 상황에서 검사를 시행하였다. KS-SL-A 문장검사에는 총 8개의 목록이 개발되어 있으며, 한 개의 목록당 10개의 문장과 40개의 목표단어로 구성된다. 본 연구에서는 8개의 KS-SL-A 문장 목록에서 2개의 목록을 무작위 추출하여 두 가지 소음 상황에 무작위 배열한 후 각 연구 대상자에게 실시하였다. 문장인지도검사 시 인공와우 환자는 인공와우를 착용한 상태에서 스피커를 통해 제시되는 녹음된 문장을 듣고 그대로 따라 말하도록 하였다. 정확하게 따라 말한 정반음 목표단어수를 백분율로 계산하여 어음인지 능력을 확인하였다. 전체적인 검사 순서는 고막운동성검사, 순음청력검사, 인공와우 착용 후 역치검사, 문

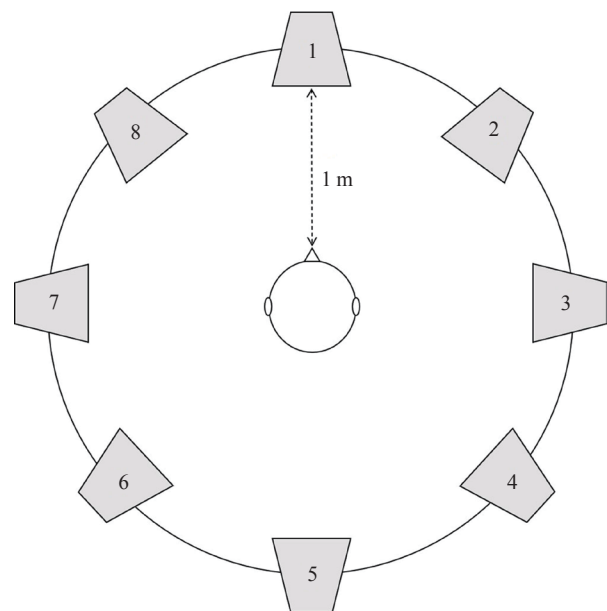


Figure 1. The speaker configuration of the sound localization test.

장인지도검사, 방향성 탐지검사, K-SSQ 설문지 작성의 순으로 시행하였다.

**방향성검사**

방향성 청각검사는 500 Hz, 1,000 Hz, 4,000 Hz warble tone과 어음을 자극음으로 사용하여 시행하였다. 자극음

에 따라 구성된 총 5개의 방향성 청각검사 세션은 360° 배열된 멀티스피커 시스템(Eurolive B208D; Behringer, Willich, Germany)을 갖춘 청각부스에서 이루어졌다. 부스 중앙에 연구 대상자가 위치하였으며, 대상자의 눈 높이에 수평하며 거리상 1 m씩 떨어진 8개의 스피커가 45° 간격으로 배치되었다(Figure 1). 검사자는 외부 컴퓨터를 통해 방향성 청각검사 프로그램

CI											NH														
Speech in quiet		Stimulus									Sum		Speech in quiet		Stimulus									Sum	
		1	2	3	4	5	6	7	8	1					2	3	4	5	6	7	8				
Response	1	4	2	4	0	2	2	2	2	18	Response	1	20	0	0	0	4	0	0	0	24				
	2	3	5	3	0	2	2	0	0	15		2	0	20	0	0	0	0	0	0	20				
	3	4	4	4	8	3	4	3	1	31		3	0	0	18	0	0	0	0	0	18				
	4	1	3	3	4	2	4	2	4	23		4	0	0	2	20	0	0	0	0	22				
	5	1	1	0	4	4	2	3	3	18		5	0	0	0	0	16	0	0	0	16				
	6	1	1	2	2	3	3	2	1	15		6	0	0	0	0	0	18	1	0	19				
	7	3	4	4	1	2	3	5	5	27		7	0	0	0	0	0	2	19	0	21				
	8	3	0	0	1	2	0	3	4	13		8	0	0	0	0	0	0	0	20	20				
	Sum	20	20	20	20	20	20	20	20	33		Sum	20	20	20	20	20	20	20	20	151				
Speech in noise		Stimulus									Sum		Speech in noise		Stimulus									Sum	
		1	2	3	4	5	6	7	8	1					2	3	4	5	6	7	8				
Response	1	3	2	2	3	1	2	1	3	17	Response	1	19	0	0	0	3	0	0	0	22				
	2	5	6	2	6	2	1	1	3	26		2	0	16	0	0	0	0	0	0	16				
	3	3	3	7	2	2	3	5	2	27		3	0	2	16	2	0	0	0	0	20				
	4	1	2	2	4	4	1	2	5	21		4	0	1	4	18	0	0	0	0	23				
	5	1	2	0	0	6	5	3	1	18		5	1	1	0	0	17	0	0	0	19				
	6	2	1	0	1	1	4	2	0	11		6	0	0	0	0	0	13	1	1	15				
	7	2	2	5	0	2	3	5	2	21		7	0	0	0	0	0	7	19	3	29				
	8	3	2	2	4	2	1	1	4	19		8	0	0	0	0	0	0	0	16	16				
	Sum	20	20	20	20	20	20	20	20	39		Sum	20	20	20	20	20	20	20	20	134				
500 Hz warble		Stimulus									Sum		500 Hz warble		Stimulus									Sum	
		1	2	3	4	5	6	7	8	1					2	3	4	5	6	7	8				
Response	1	3	2	1	2	2	3	1	0	14	Response	1	19	0	0	0	12	0	0	0	31				
	2	3	5	3	1	3	3	3	3	24		2	0	18	0	5	0	0	0	0	23				
	3	3	6	8	3	1	5	2	4	32		3	0	0	18	4	0	0	0	0	22				
	4	3	2	4	4	4	1	2	5	25		4	0	2	2	11	0	0	0	0	15				
	5	2	0	1	5	4	3	5	3	23		5	1	0	0	0	8	0	0	0	9				
	6	2	2	0	1	3	1	4	2	15		6	0	0	0	0	0	10	1	3	14				
	7	4	2	2	3	3	3	3	3	23		7	0	0	0	0	0	10	19	0	29				
	8	0	1	1	1	0	1	0	0	4		8	0	0	0	0	0	0	0	17	17				
	Sum	20	20	20	20	20	20	20	20	28		Sum	20	20	20	20	20	20	20	20	120				
1,000 Hz warble		Stimulus									Sum		1,000 Hz warble		Stimulus									Sum	
		1	2	3	4	5	6	7	8	1					2	3	4	5	6	7	8				
Response	1	1	4	1	1	5	2	2	2	18	Response	1	20	0	0	0	6	0	0	0	26				
	2	4	0	2	1	2	0	1	1	11		2	0	20	0	3	0	0	0	0	23				
	3	4	3	7	4	1	2	2	3	26		3	0	0	20	7	0	0	0	0	27				
	4	3	2	4	5	2	2	5	3	26		4	0	0	0	10	0	0	0	0	10				
	5	1	4	1	4	5	3	1	1	20		5	0	0	0	0	13	0	0	0	13				
	6	2	4	3	1	0	4	5	0	19		6	0	0	0	0	1	9	0	0	10				
	7	4	2	1	4	2	7	2	8	30		7	0	0	0	0	0	11	20	0	31				
	8	1	1	1	0	3	0	2	2	10		8	0	0	0	0	0	0	0	20	20				
	Sum	20	20	20	20	20	20	20	20	26		Sum	20	20	20	20	20	20	20	20	132				
4,000 Hz warble		Stimulus									Sum		4,000 Hz warble		Stimulus									Sum	
		1	2	3	4	5	6	7	8	1					2	3	4	5	6	7	8				
Response	1	4	1	0	1	3	2	4	3	18	Response	1	19	0	0	0	7	0	0	0	26				
	2	1	7	5	3	3	3	3	1	26		2	0	20	2	3	1	0	0	0	26				
	3	4	3	5	3	2	2	1	4	24		3	0	0	18	1	0	0	0	0	19				
	4	4	3	3	6	2	2	3	5	28		4	0	0	0	16	0	0	0	0	16				
	5	2	1	2	1	2	5	2	1	16		5	1	0	0	0	12	1	0	0	14				
	6	1	0	3	2	1	2	2	5	16		6	0	0	0	0	0	12	0	1	13				
	7	2	3	0	3	5	3	3	1	20		7	0	0	0	0	0	5	19	0	24				
	8	2	2	2	1	2	1	2	0	12		8	0	0	0	0	0	2	1	19	22				
	Sum	20	20	20	20	20	20	20	20	29		Sum	20	20	20	20	20	20	20	20	135				

**Figure 2.** Five confusion matrices according to the stimulus conditions (speech in quiet, speech in noise, 500 Hz warble tone, 1,000 Hz warble tone, and 4,000 Hz warble tone) in sound localization tests for CI users and NH listeners. CI: cochlear implant, NH: normal hearing.



(Symphonia; Inventis, Padova, Italy)을 사용하여 무작위로 8개 중 하나의 스피커를 통해서 신호음을 65 dB SPL로 2초 동안 제시하였으며, 연구 대상자는 신호음이 들리는 스피커의 번호를 말하도록 하였다. 어음 자극음은 KS-SL-A 2번 문장표에서 추출한 문장 “전화번호가 어떻게 됩니까?”를 사용하여 조용한 상황과 0 dB SNR의 백색소음 하의 소음 상황에서 검사하였다. 소음 하 검사의 경우, 특정 스피커에서 문장이 제시될 때 모든 8개의 스피커에서 소음이 동시에 제시되었다. 소리가 제시되는 동안 연구 대상자는 전방 스피커에 시선을 고정하도록 하였으며 같은 스피커에서 제시음을 총 2회 제시하여 한 세션에 총 16회의 검사가 이루어졌다. 정반응에 대한 오반응을 혼돈행렬(confusion matrix)을 통해서 확인하였으며 정반응률과 평균 제곱근오차(root mean square error, RMSE) 값을 구하여 방향성 탐지력을 계산하였다.

**K-SSQ 작성**

K-SSQ 설문지는 일측성 인공와우 사용자 그룹만을 대상으로 소음이 없는 조용한 공간에서 충분한 시간을 가지고 실시하였다. 전체 49개 문항을 신중하게 읽고 0(전혀 아니다)부터 10(완벽하게 그러하다)까지 아날로그 리커트 척도(Likert scale)로 청취 능력을 자가진단하도록 하였다. 대상자의 직접 작성을 원칙으로 하였으며, 연구자는 대상자가 문항에 대해서 질문을 하거나 설명을 요청하는 경우에만 문항에 대하여 충분히 설명을 하였다. K-SSQ의 세 가지 항목(언어 청취, 공간 청취, 음질 청취)의 총점을 백분율로 계산하여 통계에 활용하였다.

**통계 분석**

모든 통계 분석은 SPSS version 20.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA)을 사용하여 유의수준 0.05를 기준으로 실시하였다. 두 그룹 간에 연령 차이 유무를 독립표본 *t* 검정으로 확인하였다. 방향성 청각검사 결과 값인 정반응률과 RMSE 값은 각각 이원혼합분석(two-way mixed analysis of variance [ANOVA])을 통해 집단과 자극음(어음, 어음과 소음, 500 Hz, 1,000 Hz, 4,000 Hz warble tone)의 주효과 및 상호작용 효과를 확인하였다. 독립표본 *t* 검정을 사용하여 측면(lateral)에서의 방향성 탐지 반응의 편향성을 분석하였다. 피어슨 상관분석(Pearson correlation)을 통해서 RMSE와 K-SSQ 설문 항목(언어 청취, 공간 청취, 음질 청취), 문장인지도(조용한 상황과 5 dB SNR), 인공와우 착용 기간과의 상관관계를 분석하였다. 단계적 다중회귀분석(stepwise multiple regression)을 실시하여 상관 요인들의 모델이 방향성 탐지 수행능력 결과인 RMSE를 통하여 예측 가능한지를 확인하였다. K-SSQ 설문지의 언어 청취, 공간 청취, 음질 청취에 대한 비교는 반복측정분산분석

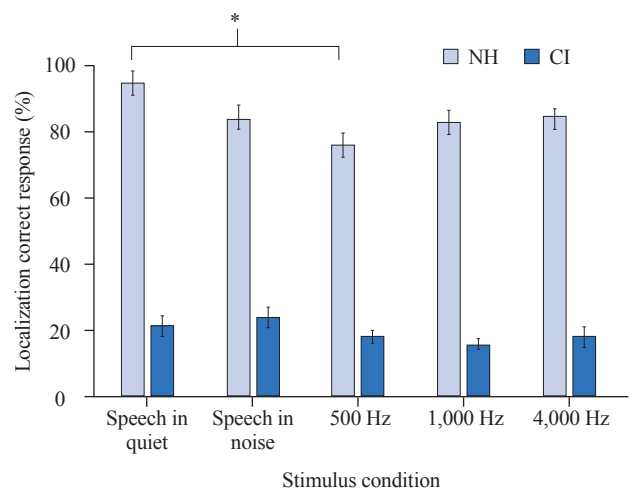
(repeated-measure ANOVA)으로 분석하였다. 모든 사후분석은 Bonferroni를 사용하여 실시하였다.

**RESULTS**

**방향성 혼돈행렬과 정반응률**

Figure 2는 일측성 인공와우 사용자와 정상 청력 대상자의 방향성 검사 결과를 제시음의 종류에 따라 혼돈행렬로 제시하였다. 혼돈행렬의 행(가로 축)은 제시된 스피커의 번호를, 열(세로 축)은 연구 대상자의 반응을 의미하며, 행렬의 전체적인 패턴에서 나타나는 대각선 안의 숫자는 정반응의 횟수를 나타낸다. 각 스피커에서 제시된 총 20번(2회 × 10명)의 반응을 분석해 볼 때, 정상 청력인의 경우 높은 정반응 횟수를 보이는 반면 인공와우 사용자의 경우 비교적 무작위로 반응하였음을 확인할 수 있다. 주목할 만한 점은 정상 청력 그룹에서 1번과 5번의 혼돈 반응이 높게 나타났다는 것이다. 다섯 가지 자극음 제시 조건에서 정후면(스피커 5)에서 제시된 자극에 대하여 정상 청력인들은 정면(스피커 1)으로 응답하는 경향이 높게 나타났으나, 일측성 인공와우 사용자 그룹에게 있어서는 이와 같은 경향성을 찾아볼 수 없었다.

Figure 3는 방향성 검사에 대한 정반응률을 나타낸 그래프이다. 인공와우 그룹은 정상 청력 그룹에 비해 저하된 방향성 탐지 능력을 보였으며, 통계 분석 결과 그룹에 따른 주효과가 유의미하게 나타났다( $F_{(1, 18)} = 498.332, p = 0.000$ ). 자극음 조건에 대한 주효과도 유의하였는데( $F_{(4, 72)} = 4.618, p = 0.002$ ),

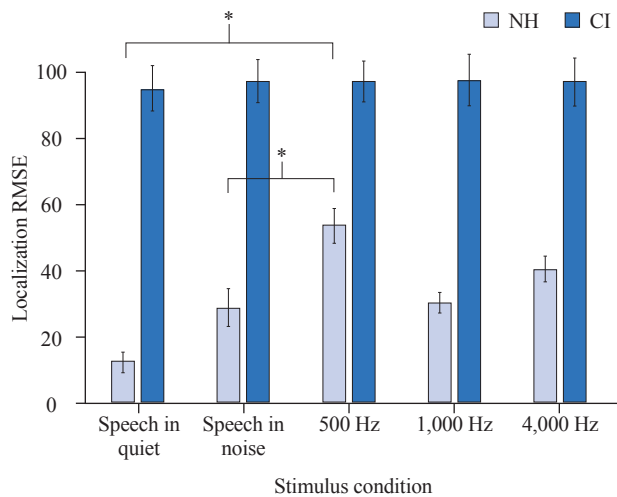


**Figure 3.** Group mean correct responses according to the stimulus conditions (speech in quiet, speech in noise, 500 Hz warble tone, 1,000 Hz warble tone, and 4,000 Hz warble tone) in sound localization tests for CI and NH groups. Error bars denote ±1 standard error of the mean. NH: normal hearing, CI: cochlear implant. \* $p < 0.05$ .

Bonferroni 사후검정 결과, 조용한 상황에서 어음제시 조건과 500 Hz warble tone에서만 유의미한 차이를 나타냈으며( $p < 0.05$ ), 다른 조건들은 차이가 없었다. 그룹과 자극 제시 조건에 따른 상호작용 효과는 유의하지 않게 나타났다( $F_{(4, 72)} = 2.438$ ,  $p = 0.055$ ).

**방향성 RMSE**

두 그룹 간의 방향성 탐지 능력 차이를 RMSE 값 비교를 통해 알아보았다. RMSE는 자극음 방향에 대한 반응 방향의 각도

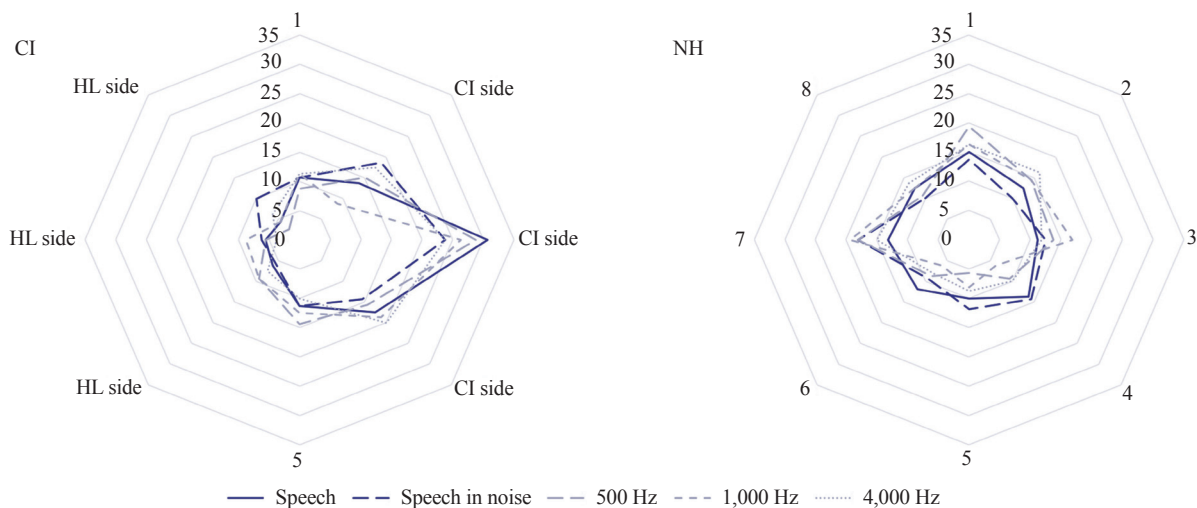


**Figure 4.** Group mean RMSEs according to the stimulus conditions (speech in quiet, speech in noise, 500 Hz warble tone, 1,000 Hz warble tone, and 4,000 Hz warble tone) in sound localization tests for CI and NH groups. Error bars denote  $\pm 1$  standard error of the mean. RMSE: root mean square error, NH: normal hearing, CI: cochlear implant. \* $p < 0.05$ .

에 대한 오차를 정량화해서 나타내는 지표로, 값이 클수록 제시 방향에서 벗어난 반응을 의미한다. Figure 4에서 볼 수 있듯이 RMSE에 대한 결과는 앞서 제시한 정반응률의 결과와 전반적으로 상이한 형태로 나타났다. 통계 분석 결과, 일측성 인공와우 사용자의 RMSE 값이 정상 청력인의 RMSE보다 유의미하게 크게 나타났다( $F_{(1, 18)} = 135.76$ ,  $p = 0.00$ ). 자극음 조건에 대한 주효과도 유의하게 나타났으며( $F_{(4, 72)} = 4.688$ ,  $p < 0.05$ ), 그룹과 자극 제시 조건에 따른 유의미한 상호작용 효과가 나타났다( $F_{(4, 72)} = 3.846$ ,  $p < 0.05$ ). 각 그룹에 대하여 Bonferroni 사후검정을 실시한 결과, 일측성 난청인 그룹에서는 유의미한 차이가 없었으며, 정상 청력인 그룹에서는 조용한 상황에서의 어음 상황과 500 Hz warble tone 간, 그리고 소음 환경에서의 어음 상황과 500 Hz warble tone 간에서 유의미한 차이를 보였다( $p < 0.05$ ).

**방향성 트렌드**

정상 청력인과 일측성 인공와우 사용자의 방향성 소리 탐지에 대한 패턴을 가시적으로 표시하기 위하여 방향지수로 나타내었다(Figure 5). 정상 청력인의 경우 스피커에 따른 반응을 보정 없이 1~8까지 표기하였으나, 일측성 인공와우 사용자의 경우 사용자마다 좌/우의 착용 방향이 다르기 때문에 난청 귀(미착용 귀)와 인공와우 착용 귀 방향으로 수집된 데이터를 보정하는 절차를 거쳤다. 예를 들면 인공와우를 좌측 귀에 착용하고 있는 사용자의 경우 사용자로부터 우측에 위치하는 2, 3, 4스피커에서 소리가 제시될 때의 결과 값을 난청 쪽(hearing loss [HL] side)으로 코딩하였으며, 좌측에 위치하는 6, 7, 8스피커에서 제시될 때의 결과 값은 인공와우 쪽(cochlear implant [CI] side)으로 코딩하여 분석하였다. 그 결과, Figure 5와 같이 정상 청력



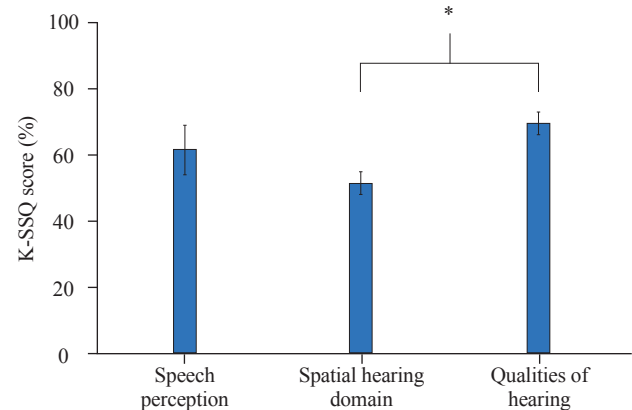
**Figure 5.** Polar pattern of response in percentage according to the stimulus conditions (speech in quiet, speech in noise, 500 Hz warble tone, 1,000 Hz warble tone, and 4,000 Hz warble tone) in sound localization tests for CI and NH groups. CI: cochlear implant, HL: hearing loss, NH: normal hearing.

인의 경우 전반적으로 균형된 반응을 보였으나 일측성 인공와우 사용자의 경우 난청 쪽(HL side)보다 인공와우를 착용하고 있는 귀 쪽(CI side)으로 편향된 방향성 패턴을 형성하였다. 인공와우 사용자들의 좌/우 방향성 반응에 대한 결과값을 통계적 비교를 하고자 인공와우 그룹의 전방(스피커 1)과 후방(스피커 8)을 제외한 나머지 6개의 방향성 데이터를 CI side와 HL side, 두 개의 변수로 재코딩하여 방향성 응답 패턴의 차이를 구하였다. 인공와우 사용자들의 데이터를 독립표본 *t* 검정으로 통계분석을 시행한 결과, 모든 다섯 가지 음 제시 조건에서 HL side보다 CI side 쪽으로 유의미하게 편향된 반응을 보이는 것으로 나타났다 (Table 2). 하지만 정상 청력인 그룹의 경우, 방향성 결과값을 우측(스피커 2, 3, 4)과 좌측(스피커 6, 7, 8)으로 이분화하여 독립 표본 *t* 검정 분석을 시행한 결과, 모든 다섯 가지 조건에 대해서 좌측과 우측 간 유의미한 차이 없이 일관되게 반응한 결과를 나타냈다(Table 3).

**K-SSQ**

K-SSQ 설문지의 언어 청취, 공간 청취, 음질 청취에 대한 평균 점수는 각각 51% (SD, 21.26), 42.5% (SD, 10.047), 57.8% (SD, 9.461)로 나타났다(Figure 6). 반복측정 ANOVA를 실시한 결과 주효과가 유의미하게 나타났으며( $F_{(2, 18)} = 5.938, p < 0.05$ ), Bonferroni 사후검정에서 음질 청취가 공간 청취보다 통계적으로 더 높은 점수를 나타냈다( $p < 0.05$ ). 본 연구에서는 일측성 인공와우 사용자의 방향 분별력을 예측할 수 있는 도구로서 K-SSQ의 타당성을 검증하고, 더불어 방향성 탐지 능력과 상

관관계를 보이는 변수들을 확인하고자 하였다. 다섯 가지 음 제시 조건의 RMSE값과 7가지 변수들, 즉, K-SSQ의 어음 청취, 공간 청취, 음질 청취 각각의 점수, K-SSQ의 총점, 조용한 상황에서 문장인지도 점수, 5 dB SNR 상황에서 문장 인지도 점수, 인공와우 사용 기간 간의 상관관계를 분석하였다. 상관분석 결과, 조용한 상황에서 어음 제시 조건에서의 방향성 RMSE 결과값은 K-SSQ의 공간 청취( $r = -0.865, p < 0.001$ ) 및 음질 청취( $r = -0.376, p < 0.05$ ), 조용한 상황에서 문장인지도 점수( $r = -0.648, p < 0.05$ )와 음의 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 다



**Figure 6.** Group average of K-SSQ scores for the speech perception, spatial hearing, and qualities of hearing in unilateral cochlear implant users. Error bars denote  $\pm 1$  standard error of the mean. K-SSQ: Korean version of the Speech, Spatial and Qualities of Hearing Scale Questionnaire. \* $p < 0.05$ .

**Table 2.** The response of directional pattern for unilateral cochlear implant group

Stimuli condition	CI side (n = 10)	HL side (n = 10)	<i>t</i>	<i>p</i> -value
Speech (%)	61.87 $\pm$ 20.71	16.25 $\pm$ 15.08	5.63	0.001**
Speech in noise (%)	56.87 $\pm$ 18.96	21.87 $\pm$ 14.80	4.60	0.001**
500 Hz warble (%)	59.37 $\pm$ 25.89	17.50 $\pm$ 15.25	4.40	0.001**
1,000 Hz warble (%)	53.75 $\pm$ 24.33	22.50 $\pm$ 22.08	3.00	0.001**
4,000 Hz warble (%)	61.25 $\pm$ 25.81	17.50 $\pm$ 20.15	4.22	0.001**

Values are presented as mean  $\pm$  standard deviation. CI: cochlear implant, HL: hearing loss. \*\* $p < 0.01$

**Table 3.** The response of directional pattern for normal hearing group

Stimuli condition	Right side (n = 10)	Left side (n = 10)	<i>t</i>	<i>p</i> -value
Speech (%)	37.5 $\pm$ 0.0	37.5 $\pm$ 0.0	-	-
Speech in noise (%)	36.87 $\pm$ 1.97	37.5 $\pm$ 0.0	-1.00	0.331
500 Hz warble (%)	37.5 $\pm$ 0.0	37.5 $\pm$ 0.0	-	-
1,000 Hz warble (%)	37.5 $\pm$ 0.0	38.12 $\pm$ 1.97	-1.00	0.331
4,000 Hz warble (%)	38.12 $\pm$ 1.97	36.87 $\pm$ 1.97	1.41	0.174

Values are presented as mean  $\pm$  standard deviation

른 음 제시 조건과 변수들 사이에서는 유의한 상관성이 나타나지 않았다. 유의미한 상관성이 나타난 3개의 변수를 독립변수로 하고 어음에 대한 방향성 청취 능력의 결과 값인 RMSE를 종속 변수로 하여 단계적 다중회귀분석을 시행하였다. 그 결과, 3개의 독립변수 중 K-SSQ의 음질 청취 및 조용한 상황에서의 문장 지도 점수를 제외한 K-SSQ의 공간 청취 변수 단독일 때의 회기 모형만이 유의미하게 나타났다( $F_{(1,9)} = 23.791, p < 0.05$ ). 본 회기 모형의 수정된 결정계수( $R^2$ )는 0.71로 방향성 탐지 능력 값인 RMSE에 대하여 약 71.7%의 설명력을 가지며, 회기 모형의 기울기(B)는 -0.779, 표준오차(stand error)는 0.16, 표준화계수  $\beta$ 는 -0.865로 나타났다.

## DISCUSSIONS

소리는 공기 입자를 매질로 파동의 형태를 띠며 전방향(omni-direction)으로 전달되는 특성을 가진다. 전방향으로 퍼지는 소리 음향학적 특성에도 불구하고 인간의 청각 시스템은 양쪽으로 입력되는 음향 정보를 분석하여 음원의 방향을 인지할 수 있다. 소리의 방향을 탐지할 수 있는 능력은 어음인지, 공간 청취, 독화 등의 활동에 중요한 역할을 하며 생활 속 위험요인에 대한 청각적 정보를 탐지하여 청자의 안전을 유지하는 데도 크게 기여한다. 하지만 양 귀에 가청영역이 확보되지 않거나 청각 기관의 ITD와 ILD 분해 능력이 떨어진 난청인의 경우 일상생활에서의 위협에 쉽게 노출될 수 있고 청각적 인지 및 정보 활동에 제약 받을 수밖에 없다. 특히, 양측 귀에 고심도난청 이상의 청력 손실을 갖고 있음에도 불구하고 일측에만 인공와우를 착용하는 경우 전체적인 가청영역의 확보는 가능해질 수 있으나 양이 청각 정보 분석의 결핍으로 소리의 방향성 탐지는 여전히 어렵다. 본 연구에서는 일측성 인공와우 사용자 그룹과 정상 청력 성인 그룹의 방향성 탐지 능력을 확인하여 반응 패턴을 분석하였으며, 일측성 인공와우 환자들의 방향성 탐지 능력을 간접적으로 예측하기 위한 도구로서 K-SSQ 설문지의 유효성을 확인하였다.

방향성 탐지 능력을 정반응률과 RMSE를 기준으로 각각 분석하였을 때, 두 가지 조건에서 모두 일측성 인공와우 사용자들의 수행 능력이 유의미하게 낮았다. 양이 정보처리의 제약으로 인해 일측성 인공와우 환자의 방향성 탐지 능력이 현저하게 저하된다는 점은 이미 많은 선행 연구들을 통해 보고된 바 있지만(Dunn et al., 2008; Tyler et al., 2007), 본 연구에서는 그 정도가 상당히 크다는 것을 밝혔다고 할 수 있다. 본 연구에서는 8개의 스피커 조건에서 하나의 스피커를 선택하도록 하여 정반응률을 구했으며, 이 때 무작위로 반응한 경우 우연적으로 얻을 수 있는 확률인 chance level은 12.5% ( $(1/8) \times 100$ )라고 할 수 있다. 본 연구에서 나타난 일측성 인공와우 환자의 정반응률은 5개의

조건에서 각각 21.87% (speech), 25% (speech in noise), 20% (500 Hz warble), 15.62% (1,000 Hz warble tone), 17.5% (4,000 Hz warble tone)에 불과하였다. RMSE 값 역시 인공와우 환자의 경우 96.30 (speech), 98.78 (speech in noise), 98.63 (500 Hz), 98.92 (1,000 Hz), 98.61 (4,000 Hz)을 보여 chance level인 90  $[(0+45+90+135+180+135+90+45)/8]$ 과 큰 차이를 보이지 않았음을 고려할 때 일측성 인공와우 환자의 정확한 소리의 방향 탐지는 거의 불가능할 정도로 낮음을 보여준다. 하지만 연구에 사용된 자극음의 크기 및 종류, 지속시간, 스피커의 배열 등의 차이에 따라 수행 능력의 결과 값은 큰 차이를 보일 수 있기 때문에 해석에 있어서 주의가 필요하겠다.

본 연구에서는 정반응률과 RMSE의 결과 값이 5개의 조건에서 서로 상이한 형태를 보였다. 이는 맞춘 개수에만 의존하는 정반응률과 모든 반응이 정반응으로부터 떨어진 정도를 정량화하는 지표인 RMSE의 특성 차이에서 기인한다고 볼 수 있다. 일부 선행 연구들에서는 방향성 검사 결과를 정반응률로만 분석하였으나(Luntz et al., 2005; Tyler et al., 2002), 정반응률에 의한 분석은 첫째, 오반응의 정량적 분석이 이루어지지 않고, 둘째, 정반응한 횟수에만 의존하게 되어 제한된 정보를 제공하며, 셋째, 방향성검사가 폐쇄형 응답으로 진행될 경우 높은 chance level을 가질 수 있는 단점을 갖고 있다. Hartman(1983)은 방향성 수행 능력을 측정할 수 있는 가장 의미 있는 지표는 RMSE라고 하였으며, 실제 다수의 방향성 연구에서 RMSE가 가장 많이 사용되고 있다(Firszt et al., 2017; Gartrell et al., 2014; Neuman et al., 2007; van Hoesel & Tyler, 2003). 분석 방법에 의한 차이는 방향성 탐지 결과 값을 다르게 해석하여 결론을 맺을 수 있으므로, 연구 특성에 맞는 적합한 방법을 잘 선택해야 하겠다. 방향성과 더불어 공간 청취에 관한 최근 선행 연구들(Litovsky et al., 2004; Litovsky et al., 2006; Perrot & Saberi, 1990)에서는 정량화된 지표로서 minimal audible angle (MAA) (Mills, 1958)을 다시금 적용하고 있다. MAA는 구별 가능한 소리 음원의 최소 변화 각도를 측정하는 정량화된 지표로서, 최신 연구에서는 음향공학적으로 머리전달함수(head related transfer function)를 이용하여 방향성을 헤드셋에 구현하여 방향성 검사를 실시하는 데 적용되기도 하였다(Alzaher et al., 2021). 이러한 헤드셋을 이용한 방향성검사는 공간적인 제약으로 인해 음장에서의 검사 시행이 어려운 보청기 센터나 이비인후과에서 유용한 검사 도구가 될 수 있으나(Bomhardt et al., 2016) 보청기 또는 인공와우가 착용된 상태에서는 헤드셋의 착용과 측정이 불가능하기 때문에 더 향상된 기술의 방향성 측정 장비가 필요하다.

본 연구에서 정반응률의 경우 인공와우군에서는 차이가 없었으나 정상군에서는 어음을 사용하였을 때 500 Hz warble tone



조건보다 높은 수행 능력을 보였다. RMSE 값을 기준으로 한 결과에서도 정상 청력 그룹의 경우 조용한 어음 상황과 소음 속 어음 상황에서의 수행력이 500 Hz warble tone에서의 수행력보다 높았다. 어음은 의사소통을 위한 매개체로 대뇌 정보회로에서 더 중요한 신호로 인식된다. 이와 함께 어음의 주파수의 범위가 본 연구에서 사용된 warble tone보다 더 넓고 그 얽힘이 더 복잡하기 때문에 ITD와 ILD의 복합적 활용으로 청각적 탐지가 더 높았을 것이라 사료된다. 이는 어음과 같이 주파수 범위가 넓은 제시음에서 더 높은 방향 분별력을 보였던 선행 연구들의 결과와도 일치한다(Ham et al., 1999; Recanzone et al. 1998; Wood & Bizley, 2015). 본 연구에서는 주파수에 따른 방향성 수행 능력이나 어음 제시 시 소음의 유무에 따른 방향성 수행 능력에는 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다. 이 역시 일측성 인공와우 환자들의 저조한 수행 능력과 관련 있으며, 스피커의 배열 또는 수를 조정하여 더 쉬운 난이도에서 방향성 검사를 실시할 경우에는 소리 종류에 따른 차이를 확인할 수 있을 것이라 생각된다.

본 연구에서는 일측성 인공와우 그룹의 반응을 측방향적으로 분석하였을 때 난청을 갖고 있는 쪽보다는 인공와우를 착용한 쪽으로 반응하는 경향을 보였다. 이는 비교적 예측 가능한 결과이지만 그 패턴의 정도를 자극음의 종류에 따라서 가시화하였다는 것에 의미가 있다. 일측성 인공와우 환자의 이러한 편향적 패턴은 짧은 인공와우 착용 기간으로 인해 자신만의 방향성 탐지 전략을 형성하지 못한 환자에게 더 크게 나타날 수 있다(Firszt et al., 2017).

또한, 본 연구에서는 정상 청력인 그룹에서 전-후 혼돈오류(front-back confusion error) (Carlile et al., 1997) 패턴을 확인할 수 있었다. 전-후 혼돈오류는 양 귀에 도달하는 ILD와 ITD 정보가 같음으로 인해서 발생하는데, 이는 결과적으로 높은 RMSE를 초래하기 때문에 별개의 척도로 분석하기도 한다(Carlile et al., 1997; Pastore et al., 2018). 전-후 혼돈오류는 저주파수에서 높게 나타나고 고주파수에서는 낮게 발생하는데, 고주파수의 경우 귓바퀴(pinnae)에 의해서 여과되는 영향을 크게 받기 때문이다(Stevens & Newman, 1936). 본 연구에서 정상 청력군의 혼돈행렬(Figure 1)에서 정면 스피커(1번)와 정후면 스피커(5번)의 혼돈 횟수를 계산하였을 때 500 Hz warble tone 12개, 1,000 Hz warble tone 6개, 4,000 Hz warble tone 8개로 저주파수에서 더 많은 전-후 혼돈오류가 확인되어 선행 연구와 일치하는 결과를 나타내었다.

일측성 인공와우 사용자의 K-SSQ의 항목 분석 결과 공간 청취 항목이 음질 청취 항목보다 낮게 나타났다. 인공와우 사용자를 포함하여 난청 환자를 대상으로 한 일부 선행 연구들에서도 K-SSQ의 세 항목 중 공간 청취 항목의 점수가 전반적으로 낮

게 나타난 바 있다(Heo & Lee, 2009; Kim et al., 2017; Lee, 2018). 방향성 탐지 능력의 간접 평가 도구로서 K-SSQ의 효용성을 알아보기 위하여 방향성 RMSE 결과와 관련 변수들 간 상관 및 회귀분석을 실시한 결과, K-SSQ의 공간 청취가 가장 높은 상관성을 나타냈을 뿐만 아니라 방향성 RMSE 결과값을 예측하는 유일한 변수인 것으로 나타났다. K-SSQ의 공간 청취 문항은 소리의 방향 및 공간 지각에 대한 문항들로 구성되어 있기 때문에 방향성 결과와 가장 높은 상관성을 나타낸 것으로 해석할 수 있다. K-SSQ는 말소리뿐만 아니라 잔디 깎는 소리, 문이 쾅 닫히는 소리, 버스나 트럭 소리, 발소리 등에 대한 질문으로 구성되어 있기 때문에, 어음제시 조건에서의 방향성 수행력과는 상관관계가 높았던 반면, 현실 세계의 환경음과 동떨어진 warble tone 조건에서의 수행력과는 통계적 상관성이 나타나지 않은 것으로 사료된다. 결론적으로 K-SSQ의 공간 청취 항목은 일측성 인공와우 사용자의 방향성 탐지 능력을 예측할 수 있는 도구로 적합할 수 있으나, 단, 방향성검사 제시음의 특성에 따라 제약을 받는 것으로 볼 수 있겠다.

본 연구에 참여한 일측성 인공와우 대상자는 모두 코클리어사의 Nucleus 5 또는 6 시스템을 사용하고 있었다. 코클리어사의 외부 어음처리기는 두개의 방향성 마이크로폰(dual-microphone)을 사용하여 적응형 방향성 마이크로폰 방식을 기본으로 사용하고 있다. Nucleus 5는 SmartSound® zoom 기술로 SNR을 높이며 Nucleus 6 (CP910) 이후로는 SmartSound®iQ 및 SCAN 기술로 자동적으로 상황을 분석하여 말소리와 같은 신호음 방향으로 polar pattern이 형성되고 소음 감소 기술이 적용된다. 본 연구에서는 일측성 인공와우 대상자의 방향성 탐지 능력이 현저하게 저하됨을 확인하였으며, 이러한 결과는 인공와우 기술의 비약적인 발전에도 양이 청취가 구현되지 않는다면 방향성 탐지에 한계를 나타낸다는 것을 보여준다. 일측성 인공와우 환자에서 선행적 경험과 방향성 탐지 능력 간 상관성이 보고된 바 있으나(Wightman & Kistler, 1997), 본 연구에서는 인공와우 사용 기간과 RMSE 간 유의미한 상관관계가 나타나지 않았다. 인공와우 그룹에서 사용자들의 개인차(individual variability)는 관련 연구들에서 지속적으로 지적되는 문제이며(Lee et al., 2019), 특히 선행적 경험과 방향성 탐지 전략은 청능 훈련의 유무를 비롯한 다양한 변수에 의해서 달라질 수 있기 때문에 이에 대해 보다 정교하게 계획된 후행 연구가 필요하다고 할 수 있겠다.

**중심 단어:** 소리 방향성, 인공와우, 어음인지, 한국어형 언어 공간 음질 청취 평가 설문지.

## Ethical Statement

All participants signed an informed consent form before conducting the experiments. The protocol of this study has been approved by the Institutional Review Board in Tongmyong University (IRB#: TUIRB-2021-005).

## Acknowledgments

Author thanks to all participants

## Declaration of Conflicting Interests

There is no conflict of interests.

## Funding

This Research was supported by the Tongmyong University Research Grants 2021 (2021A045).

## ORCID iD

Sungmin Lee <https://orcid.org/0000-0002-3848-7833>

## REFERENCES

- Alzahr, M., Serrano, P., Tardieu, J., Barone, P., Marx, M., & Nieto, P. (2021). Contribution of a method of assessing minimum audible angle in headphones. *European Annals of Otorhinolaryngology, Head and Neck Diseases*, 138(5), 333-336.
- Bagatto, M., DesGeorges, J., King, A., Kitterick, P., Lurnagaray, D., Lewis, D., et al. (2019). Consensus practice parameter: Audiological assessment and management of unilateral hearing loss in children. *International Journal of Audiology*, 58(12), 805-815.
- Bomhardt, R., de la Fuente Klein, M., & Fels, J. (2016). A high-resolution head-related transfer function and three-dimensional ear model database. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 29(1), 050002.
- Carlile, S., Leong, P., & Hyams, S. (1997). The nature and distribution of errors in sound localization by human listeners. *Hearing Research*, 114(1-2), 179-196.
- Choi, J., Yoon, K., & Jang, H. (2017). Validity and reliability of Korean version of the auditory behavior in everyday life questionnaire. *Audiology and Speech Research*, 13(1), 19-27.
- Dhanasingh, A. & Hochmair, I. (2021). Bilateral cochlear implantation. *Acta Oto-laryngologica*, 141(sup1), 1-21.
- Dunn, C. C., Tyler, R. S., Oakley, S., Gantz, B. J., & Noble, W. (2008). Comparison of speech recognition and localization performance in bilateral and unilateral cochlear implant users matched on duration of deafness and age at implantation. *Ear and Hearing*, 29(3), 352-359.
- 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.
- Gartrell, B. C., Jones, H. G., Kan, A., Buhr-Lawler, M., Gubbels, S. P., & Litovsky, R. Y. (2014). Investigating long-term effects of cochlear implantation in single-sided deafness: A best practice model for longitudinal assessment of spatial hearing abilities and tinnitus handicap. *Otology and Neurotology*, 35(9), 1525-1532.
- Gatehouse, S. & Noble, W. (2004). The speech, spatial and qualities of hearing scale (SSQ). *International Journal of Audiology*, 43(2), 85-99.
- Grieco-Calub, T. M. & Litovsky, R. Y. (2010). Sound localization skills in children who use bilateral cochlear implants and in children with normal acoustic hearing. *Ear and Hearing*, 31(5), 645-656.
- Ham, H. S., Song, S. Y., & Park, M. S. (1999). Sound localization in subjects with a unilateral hearing loss according to hearing loss. *Korean Journal of Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery*, 42(8), 961-966.
- Hartmann, W. M. (1983). Localization of sound in rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 74(5), 1380-1391.
- Heo, J. H. & Lee, J. H. (2009). Binaural benefit on K-HINT score for adults who use CI and HA. *Audiology and Speech Research*, 5(1), 60-70.
- Jang, H., Lee, J., Lim, D., Lee, K., Jeon, A., & Jung, E. (2008). Development of Korean standard sentence lists for sentence recognition tests. *Audiology and Speech Research*, 4(2), 161-177.
- Johnston, J. C., Durieux-Smith, A., Angus, D., O'Connor, A., & Fitzpatrick, E. (2009). Bilateral paediatric cochlear implants: A critical review. *International Journal of Audiology*, 48(9), 601-617.
- 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.
- Lee, Y. (2018). Functional listening performance of sequential bilateral cochlear implantation in young adults with congenital deafness. *Communication Sciences and Disorders*, 23(4), 1111-1126.
- Lee, S., Mendel, L. L., & Bidelman, G. M. (2019). Predicting speech recognition using the speech intelligibility index and other variables for cochlear implant users. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 62(5), 1517-1531.
- Litovsky, R. Y., Johnstone, P. M., Godar, S., Agrawal, S., Parkinson, A., Peters, R., et al. (2006). Bilateral cochlear implants in children: Localization acuity measured with minimum audible angle. *Ear and Hearing*, 27(1), 43-59.
- Litovsky, R. Y., Parkinson, A., Arcaroli, J., Peters, R., Lake, J., Johnstone, P., et al. (2004). Bilateral cochlear implants in adults and children. *Archives of Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, 130(5), 648-655.
- Lovett, R. E., Kitterick, P. T., Hewitt, C. E., & Summerfield, A. Q. (2010). Bilateral or unilateral cochlear implantation for deaf children: An observational study. *Archives of Disease in Childhood*, 95(2), 107-112.
- Luntz, M., Brodsky, A., Watad, W., Weiss, H., Tamir, A., & Pratt, H. (2005). Sound localization in patients with unilateral cochlear implants. *Cochlear Implants International*, 6(1), 1-9.
- Mills, A. W. (1958). On the minimum audible angle. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 30(4), 237-246.
- Neuman, A. C., Haravon, A., Sislian, N., & Waltzman, S. B. (2007). Sound-direction identification with bilateral cochlear implants. *Ear and Hearing*, 28(1), 73-82.
- Nopp, P., Schleich, P., & D'Haese, P. (2004). Sound localization in bilateral users of MED-EL COMBI 40/40+ cochlear implants. *Ear and Hearing*, 25(3), 205-214.

- Pastore, M. T., Natale, S. J., Yost, W. A., & Dorman, M. F. (2018). Head movements allow listeners bilaterally implanted with cochlear implants to resolve front-back confusions. *Ear and Hearing, 39*(6), 1224-1231.
- Perrott, D. R. & Saberi, K. (1990). Minimum audible angle thresholds for sources varying in both elevation and azimuth. *The Journal of the Acoustical Society of America, 87*(4), 1728-1731.
- Purdy, S. C., Farrington, D. R., Moran, C. A., Chard, L. L., & Hodgson, S. A. (2002). A parental questionnaire to evaluate children's auditory behavior in everyday life (ABEL). *American Journal of Audiology, 11*(2), 72-82.
- Recanzone, G. H., Makhamra, S. D., & Guard, D. C. (1998). Comparison of relative and absolute sound localization ability in humans. *The Journal of the Acoustical Society of America, 103*(2), 1085-1097.
- 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.
- Scherf, F., van Deun, L., van Wieringen, A., Wouters, J., Desloovere, C., Dhooge, I., et al. (2007). Hearing benefits of second-side cochlear implantation in two groups of children. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology, 71*(12), 1855-1863.
- Seeber, B. U. & Fastl, H. (2008). Localization cues with bilateral cochlear implants. *The Journal of the Acoustical Society of America, 123*(2), 1030-1042.
- Senn, P., Kompis, M., Vischer, M., & Haeusler, R. (2005). Minimum audible angle, just noticeable interaural differences and speech intelligibility with bilateral cochlear implants using clinical speech processors. *Audiology and Neuro-Otology, 10*(6), 342-352.
- Stevens, S. S. & Newman, E. B. (1936). On the nature of aural harmonics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 22*(11), 668-672.
- Strutt, J. W. (1907). On our perception of sound direction. *Philosophical Magazine, 13*(74), 214-232.
- Tyler, R. S., Dunn, C. C., Witt, S. A., & Noble, W. G. (2007). Speech perception and localization with adults with bilateral sequential cochlear implants. *Ear and Hearing, 28*(2 Suppl), 86S-90S.
- Tyler, R. S., Gantz, B. J., Rubinstein, J. T., Wilson, B. S., Parkinson, A. J., Wolaver, A., et al. (2002). Three-month results with bilateral cochlear implants. *Ear and Hearing, 23*(1 Suppl), 80S-89S.
- van Hoesel, R. J. & Tyler, R. S. (2003). Speech perception, localization, and lateralization with bilateral cochlear implants. *The Journal of the Acoustical Society of America, 113*(3), 1617-1630.
- Wightman, F. L. & Kistler, D. J. (1997). Monaural sound localization revisited. *The Journal of the Acoustical Society of America, 101*(2), 1050-1063.
- Wood, K. C. & Bizley, J. K. (2015). Relative sound localisation abilities in human listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America, 138*(2), 674-686.