

# Perceptual Loudness Growth in Cochlear Implant Users

Sungmin Lee, Soo Jung Lee

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

**Received:** February 18, 2022

**Revised:** March 18, 2022

**Accepted:** March 30, 2022

**Correspondence:**

Soo Jung Lee, PhD

Department of Speech-Language Pathology and Audiology, Tongmyong University, 428 Sinseon-ro, Nam-gu, Busan 48520, Korea

**Tel:** +82-51-629-2138

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

**E-mail:** sjslp@tu.ac.kr

**Purpose:** Despite a growing number of cochlear implant (CI) studies, little attention has been given to loudness perception. The overall purpose of this study is to obtain the perceptual loudness growth from CI users and systematically investigate it with other relevant variables. **Methods:** Fourteen CI users and 14 normal hearing (NH) adults participated in this study. Loudness growth functions were obtained using three warble tones presented at 500 Hz, 1 kHz, and 4 kHz. Sentence recognition tests were implemented under favorable and adverse noise conditions. Mapping parameters including T-level, C-level, and electrical dynamic range were analyzed in conjunction with outcomes from the loudness growth. **Results:** The loudness growth curves for CI group were sharper than those for NH group. CI group showed a narrower acoustic dynamic range than NH group. There was no significant relationship between acoustic dynamic range and electrical dynamic range for CI users. Sentence recognition scores in adverse noise conditions were associated with electrical dynamic range in CI users. In NH group, a significant positive relationship was found between sentence recognition scores in adverse condition and acoustic dynamic range. **Conclusion:** This study showed that the perceptual loudness growth of CI users is not identical to that of NH adults, due to the unique way of signal processing mechanisms. Acoustic dynamic range for CI users seems affected by gain control algorithms. The adjusting mapping parameters associated with loudness may improve speech perception performance regardless of the dynamic range of CIs.

**Key Words:** Cochlear implant, Dynamic range, Loudness growth perception, Speech perception.

## INTRODUCTION

인공와우는 외이, 중이를 거치지 않고 내이의 와우내 청신경을 전기적 펄스를 이용하여 직접 자극하는 전기 청각(electrical hearing) 시스템이다. 이러한 전기적 메커니즘은 부호화된 신호처리 방식에 따라서 아날로그 음향신호의 시간적 진폭 변화(temporal envelope)를 추출한 후 이를 전기적 펄스자극의 캐리어(carrier)로 사용하여 정보를 전달한다. 전기 청각 신호전달 방식은 제한된 정보를 제공하기 때문에 청각과 인지적인 측면에 있어서 건청인의 음향청각(acoustic hearing) 메커니즘과는 다르다. 인공와우 사용자의 저하된 주파수분해 능력(spectral resolution)과 시간적분해 능력(temporal resolution)은 많은 선행 연구(Lee et al., 2019; Macherey & Carlyon, 2014; Shannon et al., 2011)에서 보고되고 있다. 음향에너지의 강도에 대한 인공와우 사용자의 음량지각 패턴 역시 비선형적이고 건

청인과 비교하여 이질적인 특성을 보일 수 있는데, 이는 인공와우 장치 내의 자동이득 조절(automatic gain control), 로그형식의 매핑(logarithmic mapping), 전기자극 단위로의 변환 등에 기인한다(Kordus & Jan, 2017).

소리의 심리음향학적 강도인 음량지각은 제시되는 레벨의 변화에 대한 지각 반응을 범주화시켜서 도출하는 음량증가지각(loudness growth perception)으로 측정한다. 인공와우 사용자의 음량증가지각 연구의 필요성은 인공와우 시스템에서 처리되는 좁아진 입력역동범위(input dynamic range, IDR)로 설명될 수 있다. 일반적으로 정상 청력 역치를 나타내는 건청인의 음향역동범위(acoustic dynamic range, ADR)는 약 0~90 dB HL에 해당한다. 하지만 인공와우에서는 음향 신호를 전기적 신호로 바꾸는 과정에서 입력 정보에 대하여 비선형적 압축을 적용하는 자동이득 조절 기능과 마이크이득 조절을 하는 민감도 조절(sensitivity control)을 통해서 인공와우의 IDR은 대략 30~80 dB sound pressure level (SPL)로 좁아지게 된다(신호처리 방식과 모델에 따라 상이). 이렇게 좁아진 DR을 전기역동범위(electrical dynamic range, EDR)로 변환하면 약 6~15 dB

© 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.

에 해당한다(Fu & Shannon, 2000). 이는 일반적으로 30 dB의 DR을 갖는 어음스펙트럼(Dunn & White, 1940)을 포함할 말소리지각에는 큰 문제가 없을 수 있으나 정상인과 비교하여 음량에 대한 지각 패턴은 다를 수 있다. 실제로 인공와우 사용자와 건청인을 대상으로 두 가지 대화음 소리 강도인 65 dB SPL과 75 dB SPL의 어음 음질을 비교한 연구에서 정상 청력 대조군 그룹은 75 dB SPL의 음질을 선호한 반면 인공와우 사용자 그룹은 65 dB SPL의 소리를 선호하는 이질성을 보였다(Akbarzadeh et al., 2018). 요컨대 정상 청력인에게서 편안한 소리가 인공와우 사용자에게는 불편함을 초래하거나 음질의 저하를 초래할 수 있는 것이다. 특히 보청기 적합 주요 지표 등으로 사용되는 쾌적레벨(most comfortable level)과 불편레벨(uncomfortable level)이 건청인과 인공와우 사용자가 다를 수 있음을 의미함에 따라 인공와우 사용자의 음량지각에 대한 심도 있는 연구가 요구된다고 할 수 있다.

전기자극 크기( $\mu\text{A}$ )에 따른 인공와우 사용자의 음량지각에 대해서는 상당한 연구가 진행되었다. 전통적인 음향적 입력 음압 레벨(SPL)에 대한 음량증가모델인 멱법칙(power law) (Stevens, 1955)에 따르면, 건청인의 지수는 0.6인 것에 비해 인공와우 사용자의 전기자극에 대한 멱법칙의 지수는 2.72 (Fu & Shannon, 1998)와 3.5 (Müller, 1981)로 보고된 바 있다. 이는 인공와우의 전기자극 음량증가지각 곡선이 정상인보다 더 가파른 패턴을 보인다는 것을 의미한다. 이러한 전기자극 음량증가지각은 고주파수에 대해서는 지수함수(exponential function)를 따르지만 저주파수에서는 멱법칙이 음량증가지각을 더 잘 반영하는 것으로 보고되었다(Zeng & Shannon, 1994). 전기자극에 대한 인공와우 사용자의 음량지각은 전류(electric current), 자극속도(stimulation rate), 자극모드(mode of stimulation)를 비롯한 다양한 어음처리기의 파라미터 값에 따라서 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Fu, 2005; Gallégo et al., 1999; McKay & McDermott, 1998; Zeng & Shannon, 1994). 이와 같이 인공와우의 전기자극에 따른 음량증가지각에 대해서는 상당수의 연구가 진행되었지만, 음장(free-field)에서 음향자극에 따른 음량증가지각에 대한 심도 있는 연구는 아직 많지 않은 실정이다. Kordus and Jan(2017)은 250 Hz, 1 kHz, 4 kHz의 중심 주파수를 갖는 소음을 제시하여 15명의 인공와우 환자로부터 음량증가지각 곡선을 구하였다. 연구자들은 실제 임상에서 많이 쓰이는 '너무 작다'부터 '불편할 정도로 크다'까지 범주형으로 음량증가지각을 찾는 것이 아닌 0~100의 점수화(rating)된 반응을 얻는 방법을 사용하였다. 연구 결과, 일측 착용과 양이 착용에 따라서 음량증가지각 곡선의 기울기와 양이합산효과(binaural summation effect)가 인공와우 사용자마다 큰 개인차를 보인다고 보고하였으며, 양이 착용 인공와우 사용자가

특정 귀에 의존할 경우 양이 합산효과가 크지 않음을 보고하였다. 2014년 Luo et al.(2014)은 인공와우 사용자의 음색지각 관련 연구에서 음향 음압에 따른 음량증가지각 곡선을 도출하여 인공와우 사용자의 경우 건청인과 다른 증가 패턴을 보인다고 보고한 바 있다. 그러나 해당 연구는 첫째, 주파수 특이성을 갖지 않는 광대역잡음을 사용하였으며, 둘째, 오직 10명의 인공와우 사용자로부터 결과를 도출함으로써 대표성이 부족하며, 셋째, 음량지각 결과와 어음인지 및 맵 특성과 관련한 심도 있는 분석이 시행되지 않았다는 점 등에서 제한점이 있다.

즉, 인공와우 사용자의 전기 청각 시스템을 통한 지각과 정상인의 음향지각 메커니즘 차이로 인해 두 집단 간 지각적 이질성이 분명함에도 불구하고, 국내뿐만 아니라 국외에도 인공와우 환자의 음량지각 특성에 대한 광범위하고 심도 깊은 연구는 진행되지 않았다. 본 연구는 인공와우 사용자의 음량지각 특성에 대하여 DR 등을 포함한 기초 자료를 획득하고 이를 건청인의 음량지각 특성과 비교하고자 하였다. 더불어, 인공와우 사용자의 음량증가지각 곡선을 통해 도출된 DR을 인공와우 사용자의 맵 정보를 분석하여 획득한 EDR과 비교하여 매핑에 따른 음량지각 특성을 확인하고자 하였다. 마지막으로 음량증가지각 패턴과 말소리 인지의 상관관계를 분석하여 두 변수 간에 심리음향학적 지각 관계를 확인하고자 하였다.

## MATERIALS AND METHODS

### 연구 대상

본 연구는 한국어를 모국어로 사용하고 인지적인 문제가 없는 만 19세 이상 65세 이하의 성인을 대상으로 하였다. 14명(남 8명, 여 6명)의 인공와우 사용자를 실험군으로 모집하였고, 일대일 매칭을 통해서 인공와우 사용자 그룹과 나이 및 성별이 최대한 일치하는 건청인 14명(남 8명, 여 6명)을 대조군으로 모집하였다. 독립표본  $t$  검정 결과, 인공와우 사용자군의 연령(mean  $\pm$  standard deviation [SD],  $30.92 \pm 8.15$ )과 정상 청력군의 연령( $30.78 \pm 8.67$ ) 간에는 유의미한 차이가 없었다( $t(26) = -0.05, p > 0.05$ ). 인공와우 사용자는 인공와우 사용 경험이 6개월 이상이어야 하며 인공와우 착용 귀 특성(잔존청력, 양측 또는 일측 착용, 반대측 보청기 착용 여부)에는 제한을 두지 않았다. 중이검사기(AT235, Interacoustics, Middelfart, Denmark)를 통해 고막운동성검사(tympanometry)를 실시하여 외이 및 중이의 이상 여부를 확인하였으며 모두 A type의 고막운동도(tympanogram)를 보였다. 순수청력검사(pure-tone audiometry)를 0.25~8 kHz까지 옥타브 간격으로 실시하여 인공와우 사용자의 잔존청력 정도 및 대조군의 정상 청력 여부를 확인하였다. 정상 청력 대상자들은 모든 검사 주파수에서 20 dB

HL 이하의 청력 역치를 나타냈으며 3분법으로 구한 순음평균역치(pure-tone average)는 우측 3.93 dB HL (SD, 3.84), 좌측 4.16 dB HL (SD, 4.56)으로 나타났다. 인공와우 사용자의 경우 장치 착용 후 전방 1 m 거리에 위치한 스피커를 통해 인공와우 착용 후 역치(aided threshold)를 주파수별로 측정하여 인공와우의 기능적 이상 유무와 가청범위를 확인하였다. 인공와우 사용자의 기본정보 및 청력검사 결과를 Table 1에 제시하였다.

**연구 방법**

음량증가지각검사와 어음인지도검사는 이중 소음 처리된 청각부스 안에서 연구 대상자를 부스 중앙에 위치시키고 실시하였다. 순음청력검사기(AC40; Interacoustics)를 사용하여 부스 안의 연구 대상자로부터 전방 1 m 떨어진 스피커를 통해서 소리를 제시하였다. 인공와우 사용자는 평상 시에 사용하는 볼륨과 프로그램으로 설정된 본인의 인공와우 장치로 실험에 참여하였다. 인공와우 착용 반대 쪽 귀의 좋은 청력으로 인해서 스피커에서 제시되는 소리의 음향에너지가 인공와우를 착용하지 않은 귀로의 전달이 의심되는 대상자에게는 귀마개(ear plug)를 착용하도록 하여 반대 쪽 귀에 제공되는 음향 에너지를 차단하였다. 하지만 건청인의 경우 전방 스피커에서 제시되는 소리에 대하여 양이에 대한 음량지각과 어음인지의 측정이 이루어졌다. 모든 연구 방법 및 절차는 동명대학교 생명윤리연구회로부터 승인을 받았다(IRB 승인번호: TUIRB-2021-005).

**음량증가지각검사**

음량증가지각검사는 Cox et al.(1997)의 연구 방법에 기반하여 7개의 음량지각 범주(① 너무 작다[very soft], ② 작다[soft], ③ 편하지만 약간 작다[comfortable, but slightly soft], ④ 편하다[comfortable], ⑤ 편하지만 약간 크다[comfortable, but slightly loud], ⑥ 크지만 괜찮다[loud but OK], ⑦ 불편할 정도로 크다[uncomfortably loud])로 나누어 시행하였으며, 연구 대상자는 제시된 소리의 음량에 대하여 7개의 범주 중 하나로 반응하였다. 각 제시음을 듣고 대상자는 즉각적으로 대답을 하였으며, 검사자는 부스밖에서 헤드셋을 통해서 반응을 기록하였다. 음량증가지각검사는 검사 수행에 대한 설명 내용과 방법에 따라 영향을 받을 가능성이 있다(Beattie et al., 1980). 이에 따라, 본 연구에서는 검사자의 구두 설명과 더불어 검사 설명지를 제시하여 모든 연구 대상자들에게 일관된 검사 지시를 제공함으로써 이에 따른 영향을 최소화하였다. 검사 자극음으로는 500 Hz, 1 kHz, 4 kHz를 각 중심주파수(center frequency)로 갖는 와블톤(warble tone with 1~10 Hz sine ± 5% modulation)을 사용하였다. 숙련된 검사자가 자극음을 무작위로 제시하였으며, 자극 제시시간은 2초로 하였다. 연구 대상자의 검사 이해를 돕기 위하여 본 검사 전 2 kHz 와블톤을 이용하여 연습을 시행하였다. 본 검사 시, 세 가지 자극음의 종류(500 Hz, 1 kHz, 4 kHz 와블톤)에 따라 세션을 나누어 시행하였으며, 자극음이 제시되는 순서는 연구 대상자마다 무작위로 하였다. 건청

**Table 1.** Demographic data of CI participants

No.	Age (yr)	Etiology	Gender	Uni/bilateral CI	CI model (ear)	CI Strategy	Duration of amplification (yr)	PTA right (dB HL)	PTA left (dB HL)	Aided PTA (dB HL)
1	39	Congenital	Female	Bilateral	Nucleus 5 (left)/ Freedom (right)	ACE	13	103.3	116.7	30.00
2	30	Otitis media	Male	Unilateral	Nucleus 6 (left)	ACE	20	78.3	120.0	33.33
3	29	Unknown	Female	Unilateral	Nucleus 6 (right)	ACE	19	116.7	118.3	31.67
4	51	Unknown	Male	Unilateral	Nucleus 6 (left)	ACE	38	98.3	120.0	28.33
5	24	Genetic	Female	Unilateral	Nucleus 6 (right)	ACE	20	115.0	88.3	23.33
6	27	Fever	Female	Bilateral	Nucleus 6 (both)	ACE	20	120.0	118.3	28.33
7	27	Unknown	Female	Unilateral	Nucleus 6 (left)	ACE	17	71.7	110.0	33.33
8	26	Congenital	Male	Unilateral	Nucleus 7 (right)	ACE	20	120.0	105.0	23.33
9	27	Fever	Male	Bilateral	Nucleus 6 (both)	ACE	18	116.7	111.7	20.00
10	27	Congenital	Male	Unilateral	Nucleus 5 (right)	ACE	7.83	95.0	96.7	26.67
11	45	Unknown	Female	Unilateral	Nucleus 7 (left)	ACE	11.6	103.3	120.0	21.67
12	29	Unknown	Male	Unilateral	Nucleus 6 (right)	ACE	28	120.0	96.7	28.33
13	24	Congenital	Male	Bilateral	Nucleus 6 (both)	ACE	18.54	120.0	120.0	23.33
14	24	Congenital	Male	Unilateral	Sprint (right)	ACE	21	96.7	90.0	26.67

CI: cochlear implant, PTA: pure-tone threshold average for hearing levels at 500, 1,000, and 2,000 Hz, ACE: advanced combined encoder

인의 경우 0 dB HL에서 검사를 시작하였고, 인공와우 사용자의 경우 인공와우 착용 역치에서부터 검사를 시작하였다. 검사 자극음의 음량을 3 dB씩 점차 상승시키며 대상자의 음량지각 범주가 변하는 지점을 찾았으며, 범주가 변하는 경우 1 dB 간격의 수 정상승법을 적용하여 정확한 음량지각 범주를 확인하였다. 같은 자극음에서 2회씩 실시한 평균값을 최종 음량증가지각 값으로 확정하였으며, 1번 지각(너무 작다)에서 시작하여 7번 지각(불편할 정도로 크다)이 확인되는 시점에서 검사를 종료하였다.

**어음인지도검사**

한국어음검사(Korean Speech Audiometry, KSA) (Lee

et al., 2010)의 한국표준 문장표 일반용(Korean standard-sentence lists) (Jang et al., 2008)을 사용하여 문장인지도 검사를 실시하였다. 문장인지도검사는 배경소음의 여부와 정도에 따라서 쉬운 조건과 어려운 조건으로 구성하였다. 본 연구에 선행된 파일럿 연구를 통해서 천장효과(ceiling effect)와 바닥효과(bottom effect)를 배제한 쉬운 조건과 어려운 조건을 찾았다. 인공와우 그룹은 조용한 상황과 +5 dB signal-to-noise ratio (SNR), 건청인 그룹은 0 dB SNR과 -5 dB SNR의 상황에서 문장인지도검사를 각각 실시하였다. 소음은 어음잡음(speech-shaped noise)을 사용하였고 소음의 길이는 각 문장 제시 전 200 msec에 시작하여 문장이 끝난 후 100 msec까지

**Table 2.** T-level, C-level and EDR found in each CI participant's map

No.	CI ear	Electrode in charge of 500 Hz			Electrode in charge of 1 kHz			Electrode in charge of 4 kHz			Average of all electrodes		
		T-level	C-level	EDR	T-level	C-level	EDR	T-level	C-level	EDR	T-level	C-level	EDR
1	Both	118	146	28	122.5	151	28.5	140	166	26	130.5	158	27.5
2	Left	120	184	64	118	182	64	109	173	64	115	179	64
3	Right	142	212	70	145	215	70	115	185	70	133	203	70
4	Left	111	162	51	115	166	51	105	149	44	109	157	48
5	Right	130	210	80	135	215	80	124	204	80	128	208	80
6	Both	116.5	170	53.5	127.5	183	55.5	148	199.5	51.5	133.5	186	52.5
7	Left	151	186	35	151	186	35	141	176	35	145	180	35
8	Right	144	232	88	143	233	90	145	228	83	144	231	87
9	Both	80	146	28	86.5	173	86.5	74	159	85	79.5	166	86.5
10	Right	116	193	77	116	192	76	105	182	77	109	186	77
11	Left	156	196	40	163	197	34	157	190	33	159	194	35
12	Right	111	151	40	110	150	40	131	171	40	120	160	40
13	Both	106	167.5	61.5	111.5	173	61.5	115.5	177	61.5	113.5	174.5	61
14	Right	99	203	104	109	211	102	125	220	95	114	210	96

T-level, C-level and EDRs are shown in current unit (CU). The average of parameters for both ears are represented in the case of bilateral CI users. EDR: electrical dynamic range, CI: cochlear implant

**Table 3.** Mean loudness category levels in dB HL for each warble tone stimulus in CI and NH groups

Warble tone frequency (Hz)	Loudness category						
	1	2	3	4	5	6	7
CI							
500	27.54 ± 5.13	35.11 ± 7.18	40.29 ± 8.07	47.25 ± 8.92	53.75 ± 9.98	59.50 ± 10.88	65.32 ± 10.43
1,000	26.54 ± 4.47	36.18 ± 7.65	41.00 ± 8.23	47.21 ± 7.60	53.79 ± 10.21	59.82 ± 13.00	66.54 ± 12.85
4,000	26.00 ± 6.25	34.57 ± 8.60	40.29 ± 11.40	44.14 ± 13.09	48.21 ± 13.13	52.64 ± 14.06	59.43 ± 17.88
NH							
500	6.43 ± 5.23	25.21 ± 11.35	36.43 ± 10.10	43.86 ± 9.57	54.43 ± 10.62	60.64 ± 10.34	70.93 ± 11.77
1,000	7.50 ± 4.00	29.86 ± 11.32	42.29 ± 8.69	49.79 ± 9.09	60.39 ± 15.01	68.93 ± 12.16	76.00 ± 10.83
4,000	6.93 ± 5.38	31.64 ± 11.39	43.36 ± 11.34	50.11 ± 12.08	62.07 ± 11.74	68.36 ± 12.24	76.29 ± 11.80

Values are presented as mean ± standard deviation. Loudness category: 1, very soft; 2, soft; 3, comfort, but slightly soft; 4, comfortable; 5, comfortable, but slightly loud; 6, loud, but OK; 7, uncomfortably loud. CI: cochlear implant, NH: normal hearing

제시되도록 설계하였다. 문장의 강도는 40 dB HL로 고정하였으며 함께 제시되는 소음의 강도를 변화시켜 SNR을 조절하였다. 각 연구 대상자에게 8개의 KSA 문장 목록 중 2개의 문장 목록을 무작위로 선택하여 두 가지 소음 조건에 무작위 순서로 배열하여 하나의 목록 결과가 하나의 소음 조건에 대한 결과를 산출하도록 시행하였다. 각 문장 목록은 10개의 문장, 40개의 목표단어로 구성되어 있으며 40개의 목표단어를 정확하게 따라서 말한 개수를 백분율로 산출하여 점수화하였다.

### 인공와우 맵 분석

본 연구에서는 음량증가지각검사에서 측정한 인공와우 사용자의 ADR과 인공와우 장치에 매핑되어 있는 전류량의 범위인 EDR의 관계를 확인하고자 인공와우 사용자의 맵을 분석하였다. 인공와우 사용자의 동의를 받은 후 매핑을 담당하는 청각 전문가로부터 사용자의 맵을 전달받았다. 코클리어사(Cochlear Ltd., Sydney, Australia)의 매핑 프로그램Custom sound 6.1을 사용하여 인공와우 사용자가 본 연구 참여시 사용한 맵을 열어 어음처리전략, 자극모드, 활성화되고 있는 전극의 수, 주파수 할당, 전극별 T-level, C-level 등의 관련 파라미터를 파악하였다. 본 실험에서 사용한 자극음의 주파수 500 Hz, 1 kHz, 4 kHz와 대응하는 주파수 대역을 가지는 인공와우 전극의 C-level과 T-level의 차이를 구하여 EDR을 전류레벨(current level, CL) 단위로 산출하였다(Table 2).

### 통계 분석

모든 통계 분석은 SPSS version 20.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA)을 사용하여 0.05의 유의수준에서 분석하였다. 독립

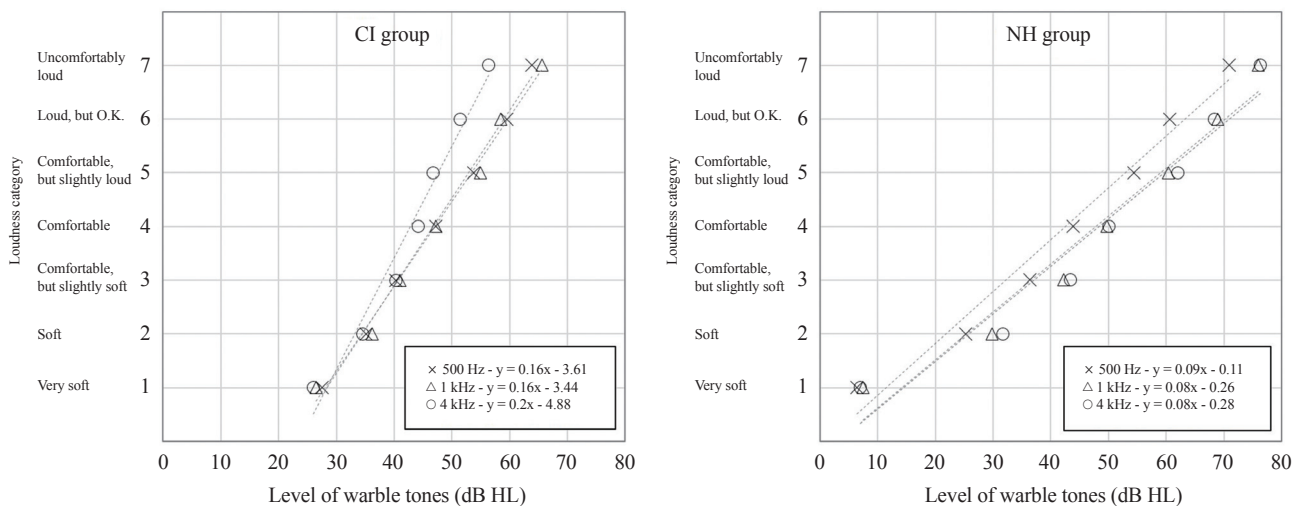
표본 *t* 검정을 사용하여 두 그룹 간의 연령 차이를 확인하였다. 반복측정분산분석(repeated measure analysis of variance)을 사용하여 집단 간 요인(between-subject factor)인 그룹, 집단 내 요인(within-subject factor)인 주파수 및 지각 범주의 주 효과와 상호작용효과를 확인하였으며, 두 그룹 간의 ADR의 차이, 주파수에 따른 ADR의 차이, 두 변수의 상호작용효과를 확인하였다. 다중 대응비교는 Bonferroni 보정을 사용하여 시행하였다. 대응표본 *t* 검정을 사용하여 쉬운 조건과 어려운 조건에서의 문장인지도 점수를 비교하였다. 피어슨 상관분석(Pearson correlation)을 통해서 인공와우 사용자 그룹의 ADR과 EDR의 상관관계, 그리고 문장인지도 점수와 음량증가지각 관련된 변수들의 상관관계를 분석하였다.

## RESULTS

### 건강인과 인공와우 사용자의 음량증가지각 비교

건강인과 인공와우 사용자의 주파수에 따른 음량지각의 평균과 표준편차는 Table 3과 같다. 제시음의 강도가 커질수록 음량지각 범주의 번호도 증가하였다. 두 그룹 간의 주파수에 따른 표준편차는 고주파수인 4 kHz에서 2번 지각을 제외한 모든 지각 범주에서 인공와우 그룹이 높았으나, 저주파수에서는 6번 지각을 제외한 모든 지각에서 정상인 그룹이 높게 나타났다. 중간 주파수인 1 kHz에서는 1, 6, 7번 지각은 인공와우 그룹이 높게 나타났으며 2, 3, 4, 5번 지각은 정상인 그룹이 높게 나타났다.

Figure 1은 두 그룹의 음량증가지각 곡선을 보여준다. 선형회기방정식(linear regression equation)으로 구한 곡선의 기울기는 인공와우 그룹의 경우 500 Hz에서 0.16, 1 kHz에서 0.16,



**Figure 1.** Mean loudness growth curves for cochlear implant (CI) (left) and normal hearing (NH) (right) listeners. Different symbols are used for representing warble-tone frequencies. Linear regression equations for each test frequency are shown in the legends.

4 kHz에서 0.2로 나타났으며, 건청인 그룹의 경우 500 Hz에서 0.09, 1 kHz에서 0.08, 4 kHz에서 0.08로 나타나 인공와우 사용자 그룹의 기울기가 더 크게 나타났다. 인공와우 사용자 그룹의 경우 장치를 착용한 후의 청력 역치가 건청인의 청력 역치보다 높았기 때문에 음량증가지각의 시작점(1번 지각)이 높게 형성되는 결과를 보였으나 최종점(7번 지각)의 레벨은 건청인 그룹보다 더 낮게 나타나는 경향성을 보였다. 결론적으로 인공와우 사용자의 ADR이 건청인에 비해 좁은 것을 확인하였다.

건청인과 인공와우 사용자 집단을 집단 간 요인으로, 제시 주파수와 음량지각 범주를 집단 내 요인으로 설정하여 반복측정분산분석을 실시하였다. 분석 결과, 두 그룹 간에 주 효과에서 유의미한 차이가 발견되지 않았으나( $F[1, 26] = 0.002, p = 0.966$ ), 집단 내 변수인 제시음의 주파수( $F[2, 52] = 3.994, p < 0.05$ )와 지각 범주( $F[6, 156] = 336.593, p < 0.001$ )에서는 유의미한 주효과를 확인하였다. 주파수와 그룹( $F[2, 52] = 9.008, p < 0.001$ ), 지각 범주와 그룹( $F[6, 156] = 27.964, p < 0.001$ ), 주파수와 지각 범주( $F[12, 312] = 2.038, p < 0.05$ ) 그리고 세 변수 모두( $F[12, 312] = 2.093, p < 0.05$ )에서 유의미한 상호작용효과를 확인하였다. 각 주파수에서 그룹 간의 차이를 Bonferroni 대응별 비교(pairwise comparison)를 통해 확인한 결과, 500 Hz에서는 1번과 2번 지각, 1 kHz에서는 1번 지각, 4 kHz에서는 1, 5, 6, 7번 지각에서 두 그룹 간에 유의미한 차이를 보였다( $p < 0.05$ ). 구체적으로 서술하면, 500 Hz의 경우 인공와우 사용자의 1번과 2번 지각이 더 높은 음 제시 레벨에서 형성되었으며, 1 kHz의 경우에는 1번 지각만이 건청인의 1번 지각보다 더 높은 음 제시 레벨에서 형성되었다. 4 kHz에서는 인공와우 사용자의 1번 지각이 건청인보다 높게 형성되었으나 5, 6, 7번 지각은 건청인의 5, 6, 7번 지각보다 낮게 형성되는 모양을 나타냈다.

### 건청인과 인공와우 사용자의 ADR 비교

건청인과 인공와우 사용자의 음량증가지각 1과 7의 차이를 ADR로 산출하였다. 건청인 그룹의 ADR 평균은 500 Hz에서 64.5 dB (SD, 13.25), 1 kHz에서 68.5 dB (SD, 10.65), 4 kHz에서 69.35 dB (SD, 15.15)로 나타났으며, 인공와우 환자의 ADR 평균은 500 Hz에서 37.78 (SD, 10.97), 1 kHz에서 40 dB (SD, 11.66), 4 kHz에서 33.42 dB (SD, 17.90)로 나타났다. 반복측정분산분석을 사용하여 건청인과 인공와우 사용자의 ADR을 비교한 결과, 집단 내 요인으로 설정된 제시음의 주파수 간에는 유의미한 차이가 없었으나( $F[2, 52] = 1.253, p > 0.05$ ), 두 그룹 간의 비교에 있어서 인공와우 사용자의 ADR이 건청인의 ADR보다 유의미하게 좁은 것으로 나타났다( $F[1, 26] = 52.937, p < 0.001$ ). 그룹과 주파수 간의 상호작용효과는 관찰되지 않았다( $F[2, 52] = 2.510, p > 0.05$ ).

### 인공와우 사용자에서 ADR과 EDR 간 상관관계

인공와우 장치내 EDR에서 결정된 전류량의 범위는 음량지각으로 구해지는 ADR을 결정하는 주요 요소이다. 따라서 인공와우 사용자 맵 분석을 통해서 본 연구에 사용된 세 개의 주파수별 C-level과 T-level의 차이를 산출하여 ADR과 비교하고자 하였다. 인공와우를 양이 착용하는 4명의 참여자의 경우는 양쪽 인공와우 EDR의 평균값을 계산하여 통계에 사용하였다. 인공와우 환자의 EDR 평균은 500 Hz에서 62 CL (SD, 22.01), 1 kHz에서 62.43 CL (SD, 22.96), 4 kHz에서 60.36 CL (SD, 22.23)으로 나타났다. 인공와우 사용자의 T-level과 C-level로 산출한 EDR은 들을 수 있는 역치부터 편안하지만 조금 큰 정도로 설정된 전류 범위를 의미하기 때문에, 본 비교에서는 ADR 역시 1번 지각(‘너무 작다’)과 5번 지각(‘편하지만 약간 크다’)의 차이를 새로운 ADR로 산출하여 두 변인을 비교하였다. 새로 산출된 ADR 평균은 500 Hz에서 26.21 dB (SD, 9.44), 1 kHz에서 27.25 dB (SD, 8.5), 4 kHz에서 22.21 dB (SD, 10.8)로 나타났다. Pearson correlation을 통해서 상관관계를 분석한 결과, 모든 주파수에서 각 주파수에 대응하는 ADR과 EDR 간에 유의미한 상관성을 보이지 않았다( $p > 0.05$ ).

### 어음인지도 점수와 음량지각 요소 간 상관관계

문장인지도검사 결과 인공와우 그룹의 평균 점수는 조용한 상황에서 46.07% (SD, 32.4), +5 dB SNR 상황에서 24.64% (SD, 26.47)로 쉬운 조건에서의 점수가 더 높게 나타났으며( $t[13] = -5.97, p < 0.01$ ), 건청인 그룹 역시 0 dB SNR 상황에서 95.89% (SD, 2.87), -5 dB SNR 상황에서 67.85% (SD, 17.94)로 쉬운 조건에서 더 높은 문장인지도 점수를 보였다( $t[13] = 3.42, p < 0.01$ ) (Table 4). 검사 조건은 다르지만 건청인 그룹의 문장인지도 점수는 인공와우 사용자에 비해 모두 높게 나타났으며, 표준 편차는 인공와우 사용자 그룹에서 높은 수치를 보였다. 두 그룹의 문장인지력의 차이로 서로 다른 듣기 조건에서 검사가 진행되었기 때문에 그룹 간 차이에 대한 통계 분석은 시행하지 않았다.

말소리 인지는 인공와우를 비롯한 청력보조기기를 착용하고 있는 청각장애인들의 궁극적 목표이다. 건청인 그룹과 인공와우 사용자 그룹의 음량증가지각에서 구한 ADR, 1번 지각, 7번 지각과 인공와우 그룹에서 구한 EDR이 말소리 인지와 상관관계가 있는지 확인하기 위하여 Pearson correlation을 확인하였다 (Table 5). 인공와우 사용자 그룹의 경우 EDR과 어려운 상황(+5 dB SNR)에서의 문장인지 점수 간에 유의미한 상관관계를 나타냈다( $p < 0.05$ ). 건청인 그룹의 경우는 어려운 상황(-5 dB SNR)에서의 문장인지 점수와 ADR에서 유의미한 양의 상관관계를 나타냈다( $p < 0.05$ ). 음량지각 관련 요소로 분석한 1번 지각과 7번 지각은 두 그룹 모두에서 문장인지 점수와 유의한 상관성이

나타나지 않았다( $p > 0.05$ ).

## DISCUSSIONS

인공와우는 30여 년의 짧은 역사에도 불구하고 보청기로 혜택을 받을 수 없는 고심도 난청인 또는 농인을 위한 혁신적인 이식형 의료기기로 주목을 받아왔다. 의료계 및 관련 학계의 높은 관심과 함께 2015년 기준 800여 개의 인공와우 관련 연구 논문이 게재되었다(Zeng, 2017). 이렇게 증가하는 연구의 양적 지표에도 불구하고 인공와우 사용자의 청각적 지각 능력에 대해 아직 충분히 설명되지 않은 의문점들이 많이 남아 있다. 본 연구에서는 첫째, 인공와우 사용자의 음량증가지각 곡선을 도출한 후 건청인의 음량증가지각 곡선과의 통계적인 비교를 통해 그 특징을 파악하고자 하였고, 둘째, 인공와우 사용자에서 ADR과 EDR과의 관계를 분석하고자 하였으며, 마지막으로 음량증가지각 요소들과 어음인지 능력의 상관관계를 확인하고자 하였다.

본 연구에서 인공와우 사용자의 음량증가지각 곡선은 건청인의 음량증가지각 곡선보다 더 가파르게 나타났으며, 인공와우 사용자의 ADR (30~40 dB)은 건청인의 ADR (60~70 dB)보다 좁게 나타났다. 이는 인공와우 환자의 1번 지각('너무 작다')은 건청인에 비해 높은 레벨에서 형성되고, 7번 지각('불편할 정도로 크다')은 건청인에 비해 낮게 형성되기 때문이다. 인공와우 사

용자의 1번 지각은 장치 착용 후 역치로 간주될 수 있으며, 본 연구에서는 500 Hz, 1 kHz, 4 kHz에서 26~28 dB HL에 해당하였다. 이는 모든 주파수에서 25~30 dB HL의 인공와우 착용 후 역치를 보고한 선행 연구(Davidson et al., 2011; Skinner et al., 1999)와 일치하며 이 정도의 역치 레벨은 작은 대화음을 들을 수 있을 정도의 충분한 레벨로 설명될 수 있다. 본 연구에서 인공와우 사용자의 7번 지각이 건청인보다 낮게 형성된 것은 인공와우 매핑 시 크기만 편안한 정도로 조절하는 C-level로 인해 큰소리에 대한 출력 제한에 기인한 결과이다. 실제 본 연구에 참여한 대상자 중 일부는 90 dB HL 이상의 매우 큰 소리에도 6번 '크지만 괜찮다'로 반응한 바 있다.

본 연구에서는 인공와우 사용자의 ADR과 EDR 간에 유의미한 상관관계가 관찰되지 않았다. 이는 인공와우 신호 처리에서 발생하는 다양한 레벨 조절 파라미터와 알고리즘의 영향으로 설명된다. 본 연구에 참여한 인공와우 대상자는 모두 코클리어사의 기기를 사용하고 있었으며 1명을 제외한 모든 사용자들은 뉴클리어스 인공와우(Nucleus cochlear implant) 모델을 사용하고 있었다. 코클리어사는 민감도 기본 설정 레벨을 12로 하여 40 dB의 순간입력역동범위(instantaneous IDR, IIDR)를 갖도록 설계되어 있으며, 이는 25 dB SPL에 T-level이 활성화되고 65 dB SPL 이상의 레벨에서는 자동이득 조절 기능이 작동하여 C-level이 활성화됨을 의미한다. 민감도는 기기에 탑재된 또 다른 알고리즘인 자동민감도 조절(automatic sensitivity control, ASC) 또는 스캔(automatic scene classifier system, SCAN)과 같이 입력되는 음향의 민감도를 외부 배경소음의 정도에 따라서 자동으로 조절하여 어음인지력을 향상시키는 알고리즘의 영향을 받는다. 또한, 소리 레벨에 따라 DR을 최적화로 조정하는 적응역동범위최적화(adaptive dynamic range optimization, ADRO), 먼 곳에서의 작은 소리를 잘 듣게 해주는 위스퍼(whisper), 전체 주파수의 소리 크기를 조절할 수 있는 볼륨의 설정도 음량지각에 크게 영향을 미치는 요소이다. 본 연구에 참여한 인공와우 사용자들의 맵을 확인해본 결과 민감도와 볼륨은 기본값인 12%와 20%로 각각 설정되어 있었으며, 민

**Table 4.** Means and SDs of sentence recognition scores for CI and NH participants

Condition	Mean sentence recognition score (%)	SD (%)
CI		
Quiet	46.07	32.41
+5 dB SNR	24.64	26.47
NH		
0 dB SNR	95.89	2.87
-5 dB SNR	67.85	17.94

SD: standard deviation, CI: cochlear implant, NH: normal hearing, SNR: signal-to-noise ratio

**Table 5.** Pearson correlations between speech recognition scores and variables associated with loudness growth

Pearson correlation	Loudness category 1	Loudness category 7	ADR	EDR
CI				
Sentence recognition scores in quiet	-0.440 (0.115)	-0.053 (0.858)	0.136 (0.636)	0.528 (0.052)
Sentence recognition scores at +5 dB SNR	-0.263 (0.364)	0.025 (0.933)	0.012 (0.967)	0.560 (0.037)*
NH				
Sentence recognition scores at 0 dB SNR	-0.215 (0.461)	-0.274 (0.344)	0.217 (0.456)	-
Sentence recognition scores at -5 dB SNR	-0.431 (0.124)	0.017 (0.564)	0.603 (0.022)*	-

\* $p < 0.05$ ,  $p$ -value in parentheses. ADR: acoustic dynamic range, EDR: electrical dynamic range, CI: cochlear implant, SNR: signal-to-noise ratio, NH: normal hearing

감도는 사용자가 조절하지 못하도록 매핑 전문가에 의해서 비활성화되어 있었다. 음량지각에 영향을 미치는 또 다른 알고리즘인 ADRO는 1명을 제외한 모든 대상자에게, ASC는 모든 대상자의 장치에서 활성화 상태로 되어 있음을 확인하였다. SCAN의 경우에는 3명의 사용자를 제외한 모든 대상자의 장치에서 활성화되어 있었다. 볼륨은 각 개인이 모두 조절 가능하도록 되어 있었고 각자 일상생활에 주로 사용하는 개인 고유의 값으로 모두 다양하게 조정되어 있었다. 본 연구에서 인공와우 사용자의 ADR과 EDR의 상관성이 나타나지 않은 것은 이렇듯 음량지각에 영향을 미칠 수 있는 다양한 알고리즘의 영향 때문인 것으로 사료된다. 다시 말해, 단지 T-level과 C-level의 차이로 산출되는 EDR이 최종적으로 인공와우 사용자의 음량지각을 결정짓는 것이 아니라 기기 내 다양한 알고리즘의 작동으로 인한 장치 내적 변수들에 의하여 음량지각은 영향을 받는다고 할 수 있다. 추후 음량지각변수들 간의 상호작용에 대한 연구가 더 필요할 것으로 보이며, 본 연구에서 확인한 두 DR의 상관관계의 부재가 전기음향적 자극에 대한 심리음향적 반응의 비선형성을 설명하는 것인지에 대한 연구도 필요할 것으로 보인다.

본 연구에서는 소음의 레벨을 조절하여 듣기 쉬운 상황과 듣기 어려운 상황 각각에서 어음인지도와 음량증가지각 요소들 간의 상관관계를 확인하였다. 인공와우 그룹은 듣기 어려운 상황에서 EDR의 범위와 어음인지 능력 간의 유의한 상관을 보였으며, 건청인 그룹 역시 듣기 어려운 상황에서 ADR의 범위와 어음인지 능력 간의 유의한 상관을 나타냈다. IDR이 넓을수록 높은 어음인지를 보인다는 선행 연구는 많이 보고된 바 있으나(Dawson et al., 2007; Holden et al., 2011; Khater et al., 2015), EDR과 관련해서는 연구자들마다 상이한 결과를 보고하였다. EDR이 작게 형성되면 큰 압축으로 인한 어음의 왜곡으로 어음인지도가 유의미하게 떨어질 수 있는데, Loizou et al.(2002)은 좁은 EDR이 자음보다 모음의 인지에 있어서 부정적 영향을 준다는 것을 보고하였다. 반면, EDR이 어음인지 수행 능력에 크게 영향을 주지 않는 것으로 보고하는 연구도 있다(Kim et al., 2018). 본 연구에서는 소음이 있는 상황에서만 EDR과 어음인지 간에 유의미한 상관관계가 있었으며 조용한 상황에서는 상관성이 확인되지 않았는데( $p = 0.052$ ), 이는 Zeng and Galvin(1999)의 연구 결과와도 일맥상통하며 EDR과 어음인지 간 상관성이 듣기 난이도에 따라 달라질 수 있음을 시사한다. 하지만 EDR이 어음인지에 주는 영향은 다양한 음량과 상관성이 높은 매핑 파라미터들의 상호작용에 의하여 달라질 수 있기 때문에 해석에 주의가 필요하다 하겠다.

본 연구에서는 어려운 청취 환경에서 건청인의 ADR과 어음인지 간의 유의미한 상관관계가 확인되었다. 이러한 결과는 낮은 청력 역치와 더불어 큰 소리에 더 잘 견딜 수 있는 저항력을 갖고

있는 건청인의 청각기관이 소음이 많은 어음상황에서 말소리지각에 유리할 수 있음을 보여준다. 하지만 인공와우 그룹의 경우, 어려운 듣기(청취) 상황에서도 ADR과 어음인지 간 상관성이 나타나지 않았다는 점에 대해서는 후속 연구를 통한 재확인 이 필요한 부분이라고 하겠다.

일상생활에서 발생하는 다양한 강도의 환경음 및 어음에 대하여 코클리어사의 인공와우는 40 dB의 IIDR을 갖도록 설정하여 T-level과 C-level의 전기자극량을 결정한다. 본 연구에서 음량증가지각을 통해 얻은 ADR은 지각 범주 7과 1의 차이로 산출하였을 경우 약 33~40 dB, 5와 1의 차이로 계산하였을 경우 약 22~28 dB로 나타나 음량지각이 IIDR 내에서 이루어지는 것을 관찰하였다. 인공와우 사용자 그룹에서 주파수별로 ADR과 EDR 간 유의한 상관성이 관찰되지 않은 것은 인공와우 기기의 볼륨 설정이나 음량지각과 관련된 알고리즘의 영향 때문인 것으로 사료된다. 이를 통해 유추해 볼 때, 좁은 EDR을 갖도록 맵이 설정된 인공와우 사용자라 하더라도 다양한 음량 관련 기능의 사용 여부에 따라 ADR이 달라질 가능성이 있으므로 다양한 맵 설정 및 이에 대한 지속적인 관찰이 필요하다고 하겠다.

본 연구는 건청인과의 비교를 통해 인공와우 사용자의 음량증가지각 특성을 분석한 국내 첫 번째 연구라는 점에서 의의를 가진다. 하지만 인공와우 환자의 음량지각은 다양한 장치 내외적 변수들로 인해 큰 개인차를 갖기 때문에(Lee et al., 2019) 작은 표본만으로 명확한 결론을 도출하는 것에는 한계가 있다. 추후 더 많은 인공와우 사용자를 대상으로 정교하게 계획된 음량증가지각 연구를 통해서 인공와우 맵의 최적화 및 새로운 어음처리 장치의 개발에 기여할 수 있는 조사와 연구가 이루어지기를 기대한다.

**중심 단어:** 인공와우, 역동범위, 음량증가지각, 어음인지.

### Ethical Statement

This study was approved by the Institutional Review Board of Tongmyong University (IRB#: TUIRB-2021-005).

### Acknowledgments

Authors thank to all participants.

### Declaration of Conflicting Interests

There are no conflict interests.

### Funding

This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of



Korea (NRF-2021S1A5A8064558).

### Author Contributions

Conceptualization: Sungmin Lee, Soo Jung Lee. Data collection: Sungmin Lee, Soo Jung Lee. Funding acquisition: Sungmin Lee. Investigation: Sungmin Lee. Methodology: Sungmin Lee. Project administration: Sungmin Lee. Resources: Sungmin Lee, Soo Jung Lee. Software: Sungmin Lee. Supervision: Sungmin Lee. Validation: Sungmin Lee, Soo Jung Lee. Visualization: Sungmin Lee. Writing—original draft: Sungmin Lee. Writing—review & editing: Sungmin Lee, Soo Jung Lee. Approval of final manuscript: All authors.

### ORCID iD

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

Soo Jung Lee <https://orcid.org/0000-0003-0954-5181>

### REFERENCES

- Akbarzadeh, S., Lee, S., Singh, S., & Tan, C. (2018). Proceedings from Asia-Pacific Signal and Information Processing Association AP-SIPA ASC: *Implication of Speech Level Control in Noise to Sound Quality Judgement*. Honolulu: IEEE.
- Beattie, R. C., Svihovec, D. A., Carmen, R. E., & Kunkel, H. A. (1980). Loudness discomfort level for speech: comparison of two instructional sets for saturation sound pressure level selection. *Ear and Hearing, 1*(4), 197-205.
- Cox, R. M., Alexander, G. C., Taylor, I. M., & Gray, G. A. (1997). The contour test of loudness perception. *Ear and Hearing, 18*(5), 388-400.
- Davidson, L. S., Geers, A. E., Blamey, P. J., Tobey, E. A., & Brenner, C. A. (2011). Factors contributing to speech perception scores in long-term pediatric cochlear implant users. *Ear and Hearing, 32*(1 Suppl), 19S-26S.
- Dawson, P. W., Vandali, A. E., Knight, M. R., & Heasman, J. M. (2007). Clinical evaluation of expanded input dynamic range in nucleus cochlear implants. *Ear and Hearing, 28*(2), 163-176.
- Dunn, H. K. & White, S. D. (1940). Statistical measurements on conversational speech. *The Journal of the Acoustical Society of America, 11*(3), 278-288.
- Fu, Q. J. (2005). Loudness growth in cochlear implants: effect of stimulation rate and electrode configuration. *Hearing Research, 202*(1-2), 55-62.
- Fu, Q. J. & Shannon, R. V. (1998). Effects of amplitude nonlinearity on phoneme recognition by cochlear implant users and normal-hearing listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America, 104*(5), 2570-2577.
- Fu, Q. J. & Shannon, R. V. (2000). Effects of dynamic range and amplitude mapping on phoneme recognition in nucleus-22 cochlear implant users. *Ear and Hearing, 21*(3), 227-235.
- Gallégo, S., Garnier, S., Michéyl, C., Truy, E., Morgon, A., & Collet, L. (1999). Loudness growth functions and EABR characteristics in digonic cochlear implantees. *Acta Oto-laryngologica, 119*(2), 234-238.
- Holden, L. K., Reeder, R. M., Firszt, J. B., & Finley, C. C. (2011). Optimizing the perception of soft speech and speech in noise with the advanced bionics cochlear implant system. *International Journal of Audiology, 50*(4), 255-269.
- Jang, H., Lee, J., Lim, D., Lee, K., Jeon, A., & Jung, E. (2008). Development of Korean standard sentence lists for sentence recognition tests. *Audiology, 4*(2), 161-177.
- Khater, A., El Shennaway, A., & Anany, A. (2015). Improvement of cochlear implant performance: changes in dynamic range. *The Egyptian Journal of Otolaryngology, 31*(1), 36-41.
- Kim, S. Y., Jeon, S. K., Oh, S. H., Lee, J. H., Suh, M. W., Lee, S. Y., et al. (2018). Electrical dynamic range is only weakly associated with auditory performance and speech recognition in long-term users of cochlear implants. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology, 111*, 170-173.
- Kordus, M. N. & Jan, Z. E. R. A. (2017). Loudness functions and binaural loudness summation in bilateral cochlear implant users. *Archives of Acoustics, 42*(3), 351-364.
- Lee, J. H., Cho, S. J., Kim, J. S., Jang, H. S., Lim, D. H., Lee, K. W., et al. (2010). *Korean Speech Audiometry (KSA)*. Seoul: Hakjisa.
- 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.
- Loizou, P. C., Dorman, M., & Fitzke, J. (2000). The effect of reduced dynamic range on speech understanding: implications for patients with cochlear implants. *Ear and Hearing, 21*(1), 25-31.
- Luo, X., Masterson, M. E., & Wu, C. C. (2014). Contour identification with pitch and loudness cues using cochlear implants. *The Journal of the Acoustical Society of America, 135*(1), EL8-EL14.
- Macherey, O. & Carlyon, R. P. (2014). Cochlear implants. *Current Biology, 24*(18), R878-R884.
- Müller, C. G. (1981). Survey of cochlear implant work. *The Journal of the Acoustical Society of America, 70*(S1), S52.
- McKay, C. M. & McDermott, H. J. (1998). Loudness perception with pulsatile electrical stimulation: the effect of interpulse intervals. *The Journal of the Acoustical Society of America, 104*(2 Pt 1), 1061-1074.
- Shannon, R. V., Cruz, R. J., & Galvin, J. J., 3rd. (2011). Effect of stimulation rate on cochlear implant users' phoneme, word and sentence recognition in quiet and in noise. *Audiology and Neurotology, 16*(2), 113-123.
- Skinner, M. W., Fourakis, M. S., Holden, T. A., Holden, L. K., & Demorest, M. E. (1999). Identification of speech by cochlear implant recipients with the multiplex (MPEAK) and spectral peak (SPEAK) speech coding strategies II. Consonants. *Ear and Hearing, 20*(6), 443-460.
- Stevens, S. S. (1955). The measurement of loudness. *The Journal of the Acoustical Society of America, 27*(5), 815-829.
- Zeng, F. G. (2017). Challenges in improving cochlear implant performance and accessibility. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 64*(8), 1662-1664.
- Zeng, F. G. & Shannon, R. V. (1994). Loudness-coding mechanisms inferred from electric stimulation of the human auditory system. *Science, 264*(5158), 564-566.
- Zeng, F. G. & Galvin, J. J., 3rd. (1999). Amplitude mapping and phoneme recognition in cochlear implant listeners. *Ear and Hearing, 20*(1), 60-74.