A Retrospective Study of Bimodal Benefits of Cochlear Implant Children

Hyekyoung Hwang¹, Timothy Kim¹, Leehwa Park^{2,3}, Soo Hee Oh^{2,3}

¹H.H.K Hearing and Speech Care Center, Seoul, Korea

²Department of Audiology and Speech Language Pathology, Hallym University of Graduate Studies, Seoul, Korea

³Center for Hearing and Speech Research, Hallym University of Graduate Studies, Seoul, Korea

Received: August 9, 2021

Revised: November 25, 2021

Accepted: December 1, 2021

Correspondence:

Soo Hee Oh, PhD
Department of Audiology and
Speech Language Pathology, Hallym
University of Graduate Studies, 427
Yeoksam-ro, Gangnam-gu, Seoul
06197, Korea
Tel: +82-70-8680-6933
Fax: +82-2-3453-6618
E-mail: osh503@naver.com

Purpose: Bimodal children showed various improvements in speech, language, and music perception. The purpose of this study is to investigate bimodal benefits and bimodal hearing aid fitting of cochlear implant children with a retrospective chart review. **Methods:** A total of 44 charts of cochlear implant children were retrospectively reviewed in this study. Hearing thresholds, word recognition scores, and hearing aid fitting procedures were reviewed and summarized. **Results:** Bimodal children showed 4%points improvements in word recognition scores and 30~40 gains across frequencies with hearing aids. For bimodal hearing aid fitting, all children used desired sensation level v5 fitting formula with wide frequency bands. Real ear measurements were performed to match with targets and loudness balancing across ears was also conducted. Hearing thresholds with and without hearing aids were not correlated with word recognition scores in bimodal condition. **Conclusion:** Bimodal children showed improved hearing thresholds with hearing aids and little bimodal benefits in word recognition tests. Additional protocols including speech in noise tests, subjective questionnaires are recommended to evaluate bimodal benefits.

Key Words: Bimodal fitting, Bimodal hearing, Hearing aid fitting, Bimodal children.

INTRODUCTION

양이청각은 두영(head shadow)효과, 양이진압(binaural squelch)효과, 양이합산(binaural summation)효과(Brown & Balkany, 2007)를 통해 소음하 말지각 및 방향분별 측면에서 효과가 있는 것으로 알려져 있다(Akeroyd, 2006; Byrne & Noble, 1998; Dawes et al., 2013). 인공와우와 보청기를 양 귀에 각각 착용하는 바이모달은 이러한 양이청각의 혜택 이외에도 음향과 전기의 서로 다른 자극을 보완적으로 활용하여 소음하 말지각과 음악지각 등을 향상시킨다(Ching et al., 2004; Dorman et al., 2008; Kong et al., 2005; Warren & Dunbar, 2018). 한 예로 선행 연구(Brown & Bacon 2009; Crew et al., 2015; Dorman et al., 2008; Kong & Carlyon, 2007)에서 저주파수 음향자극인 기본주파수(fundamental frequency, F0)가 바이모달 사용자의 소음하 말지각과 음악지

각 향상에 기여함을 보고하였다.

인공와우 대상자의 청력 기준이 성인(Gifford et al., 2010)과 아동(Carlson et al., 2015) 모두 확대되는 추세에서, Scherf and Arnold(2014)는 인공와우 착용 아동의 약 26%가 반대편 귀에 보청기를 착용하는 바이모달 사용자임을 보고하였다. 바이모달 착용 아동도 성인과 마찬가지로 조용한 상황과 소음 상황의 말지각, 언어발달, 방향성, 음악지각 등 다양한 측면에서 바이모달 혜택을 보였다(Carlson et al., 2015; Lotfi et al., 2019; Moberly et al., 2016; Nilakantan et al., 2018; Shirvani et al., 2015). Lotfi et al.(2019)의 연구에서는 바이모달 착용 아동이 소음하검사에서 검사 조건에 따라 약 2~3 dB의 향상을 보였고, 또 다른 연구(Moberly et al., 2016)에서는 아동의 발달 시기에 바이모달 착용은 편측 인공와우만 착용했을 때보다 음운인식(phonetic awareness)의 향상을 초래하여, 아동의 어휘, 작업기억 및 독해 능력의 향상으로 이어진다고 보고한 바 있다.

바이모달 결과에 영향을 미칠 수 있는 요인으로는 양 귀 간 주파수 불일치, 보청기 착용 귀의 잔존청력, 바이모달 적합, 소리 크기의 균형 등이 있다(Veugen et al., 2016a). 이외에도 Yoon

Table 1. Participants' description

Subject	Sex	Age	CI ear	Age of initial HA fit	Age of implantation	CI
1	M	10 y 1 m	R	> 1 y	1 y 4 m	Nucleus5/Cochlear
2	F	8 y 6 m	R	> 1 y	3 y 6 m	Sonet II/Medel
3	M	13 y 1 m	R	> 1 y	5 y 2 m	Clarion/Advanced Bionics (AB)
4	M	16 y 1 m	R	> 1 y	5 y 10 m	Freedom/Cochlear
5	M	11 y 8 m	R	> 1 y	7 y 1 m	Nucleus6/Cochlear
6	M	9 y 11 m	L	> 1 y	6 y	Rondo/Medel
7	F	8 y	R	> 1 y	1 y	Nucleus5/Cochlear
8	M	11 y 4 m	L	> 1 y	1 y 9 m	Nucleus5/Cochlear
9	F	14 y 4 m	L	> 1 y	4 y 11 m	Freedom/Cochlear
10	F	13 y 2 m	R	> 1 y	2 y 11 m	Nucleus6/Cochlear
11	M	10 y 3 m	R	> 1 y	3 y 10 m	Nucleus6/Cochlear
12	F	14 y 8 m	L	> 1 y	2 y 5 m	Freedom/Cochlear
13	M	8 y 1 m	R	> 1 y	3 y 11 m	Kanso/Cochlear
14	M	15 y 3 m	R	> 1 y	3 y 11 m	Freedom/Cochlear
15	M	16 y 8 m	L	> 1 y	6 y 3 m	Freedom/Cochlear
16	M	14 y 1 m	R	> 1 y	2 y 3 m	Nucleus6/Cochlear
17	M	9 y 1 m	R	> 1 y	1 y 7 m	Nucleus6/Cochlear
18	F	10 y 1 m	R	> 1 y	5 y	Nucleus6/Cochlear
19	M	15 y 8 m	R	> 1 y	3 y 2 m	Freedom/Cochlear
20	F	13 y 1 m	R	> 1 y	2 y 4 m	Nucleus7/Cochlear
21	M	14 y	R	> 1 y	4 m	Freedom/Cochlear
22	M	8 y 11 m	L	> 1 y	2 y 2 m	No information
23	F	9 y 11 m	L	> 1 y	5 y	Nucleus6/Cochlear
24	M	10 y 3 m	R	> 1 y	4 y 4 m	Opus/Medel
25	M	6 y 8 m	L	> 1 y	5 y 3 m	Nucleus5/Cochlear
26	F	11 y 7 m	R	> 1 y	3 y	Nucleus6/Cochlear
27	M	18 y 3 m	L	> 1 y	2 y 11 m	ESPr3G/Cochlear
28	F	15 y 4 m	L	> 1 y	5 y	Freedom/Cochlear
29	M	12 y 9 m	L	> 1 y	6 y	No information
30	F	11 y 8 m	R	> 1 y	2 y 8 m	Kanso/Cochlear
31	M	7 y 6 m	L	> 1 y	2 y 8 m	Nucleus7/Cochlear
32	F	22 y 4 m	L	> 1 y	13 y	Nucleus5/Cochlear
33	M	9 y	R	> 1 y	3 y 3 m	Nucleus6/Cochlear
34	M	11 y 1 m	R	> 1 y	3 y 5 m	Nucleus5/Cochlear
35	M	14 y 1 m	R	> 1 y	3 y 4 m	Freedom/Cochlear
36	F	6 y 6 m	L	> 1 y	2 y 11 m	Medel
37	M	17 y	R	> 1 y	2 y 2 m	Nucleus5/Cochlear
38	F	9 y 2 m	L	> 1 y	5 y 3 m	Rondo/Medel
39	M	10 y 3 m	R	> 1 y	3 y	Nucleus5/Cochlear
40	F	9 y	R	> 1 y	-	Medel
41	F	12 y	R	> 1 y	3 y	Cochlear
42	F	14 y 11 m	R	> 1 y	3 y 10 m	Freedom/Cochlear
43	M	12 y 1 m	R	> 1 y	5 y 9 m	Nucleus5/Cochlear
44	M	11 y 1 m	L	> 3 y	1 y 5 m	Freedom/Cochlear

CI: cochlear implant, HA: hearing aid, M: male, y: years, m: months, R: right, F: female, L: left

et al.(2015)은 양 귀 이형기기를 통해 입력된 정보의 효율적인 통합 능력이 바이모달 결과 향상에 영향을 미칠 수 있음을 언급하였다. 바이모달 적합은 바이모달 결과 향상에 영향을 미칠 수 있는 중요한 요인이며(Vroegop et al., 2019), 최근 문헌 연구(Vroegop et al., 2018)에서는 보청기적합공식, 이형기기 간 음량평형, 자동이득제어 조건, 주파수 밴드, 주파수하강시스템의 적용 등 바이모달 보청기적합 관련 연구를 정리하였다. 바이모달 보청기적합에서는 이렇듯 여러 사항에 대한 고려가 필요하나, 실제 임상에서 바이모달 적합은 주로 인공와우 조절과 관리에 중점을 두기 쉽고 보청기적합을 위한 노력과 전문적 관리가 제대로 제공되지 않을 수 있다(Park & Oh, 2021; Siburt & Holmes, 2015).

특히 아동의 바이모달 착용 결과는 바이모달 또는 양이 인공와우 중 가장 효과적인 증재를 결정하는 중요한 근거가 될 수 있다. 때문에 최적의 바이모달 적합과 관리 및 평가가 선행되어야 하며 이를 근거로 아동의 증재 방법을 결정하는 것이 바람직할 것이다. 아직까지 바이모달 착용 아동의 보청기적합에 대한 연구는 많이 보고되지 않았으며, 바이모달 아동의 결과 향상에 도움이 될 수 있는 바이모달 보청기적합 관련 연구가 좀 더 이루어져야 할 것으로 본다.

Figure 1. Aided and unaided hearing thresholds for the non-implanted ear of bimodal children.

본 연구는 후향적 차트분석을 통해 아동의 바이모달 착용 효과를 파악하는 데 목적이 있다. 청력정도, 기능이득, 보청기적합, 단어인지도 결과를 바탕으로 바이모달 착용 아동의 청력 및 말지각 결과와 보청기적합의 전반적 내용을 분석해 보고자 한다. 연구 결과를 통해 바이모달 착용 아동의 보청기 착용 효과와 보청기 적합에 대한 이해를 높이고 아동을 위한 바이모달 적합과 평가 프로토콜 기반 마련에 도움이 되고자 한다.

MATERIALS AND METHODS

연구 방법

2013년부터 2020년까지 HHK 청각언어센터를 방문한 44명 바이모달 착용 아동의 기록을 후향 분석하였다. 아동의 평균 나이는 약 12.4세(약 8~22세)였으며 남자 27명, 여자 17명이었다. Table 1은 연구 대상자 정보를 요약한 내용이다. 인공와우 이식 연령은 평균 약 3.8세(4개월~7세)로 대상자의 80% (35명)는 Cochlear® (Cochlear Limited, Sydney, Australia)사의 기기를 착용하고 있었다. 대상자 아동 모두 언어습득 이전에 난청을 진단받았으며 난청을 늦게 발견하여 30개월에 보청기를 처음 착용한 한 명을 제외하고 처음 보청기 착용은 1세 이전에 이루어졌다.

센터에서 시행한 바이모달 아동의 순음청력평가, 기능이득평가, 단어인지도평가 및 보청기적합 결과를 분석하였고 모든 검사는 방음실에서 진행하였다. 순음청력평가는 GSI Audiostar pro (Grason-Stadler INC., Eden Prairie, MN, USA)를 사용하였다. 250 Hz에서 6,000 Hz의 주파수 범위에서 ER3A insert earphone (3M™ E-A-RTONE™, Saint Paul, MN, USA)을 착용한 상태에서 청력검사를 시행하여 각 주파수별 역치를 측정하였다. 기능이득평가는 1 m 거리 정면에 위치한 JBL Control 1Xtreme 스피커(Harman International Industries, Inc., Stamford, CT, USA)를 통해 와블톤을 제시한 뒤 보청기와 인공와우를 착용한 조건에서 역치를 측정하였다. 단어인지도검사는 보청기만 착용한 경우, 인공와우만 착용한 경우, 바이모달의 세 가지 조건에서 각각 시행하였고, 1 m 정면 음장에서 약 65 dB SPL의 강도로 검사자가 일반, 학령기, 학령전기의 한국표준단음절어(Korean Standard - Monosyllabic

Table 2. Mean functional gains for the non-implanted ear of bimodal children

Frequencies	250 Hz	500 Hz	1,000 Hz	2,000 Hz	4,000 Hz
Unaided mean thresholds (dB HL)	73 ± 15	81 ± 15	89 ± 15	96 ± 15	94 ± 20
Aided mean thresholds (dB HL)	37 ± 11	42 ± 10	42 ± 12	51 ± 14	61 ± 22
Mean functional gains (dB)	36 ± 15	40 ± 13	46 ± 11	45 ± 13	32 ± 14

Values are presented as mean ± standard deviation

Word Lists)를 육성으로 불러준 뒤 대상자가 따라 말하도록 하였다. 보청기적합과 확인은 대상 아동의 청력을 근거로 각 보청기 제조사의 보청기적합 소프트웨어와 Verifit2® (Audioscan, Dorchester, Canada) 시스템을 활용하였다. 본 연구는 한림국 제대학원대학교 생명윤리심의위원회의 승인을 받아 시행하였다 (HUGSAUD509467).

통계 분석

각 조건별 단어인지도 값에 대한 정규성 검정(Shapiro-Wilk's)을 시행하였고 정규 분포되어 있지 않아($p < 0.05$) Friedman과 Wilcoxon Signed-Rank 검정을 시행하였다. 상관관계 분석은 Spearman Rank-Order Correlation을 시행하였다. SPSS (version 12.0; IBM Corp., Armonk, NY, USA)를 사용하여 유의수준 0.05 이하를 기준으로 분석하였다.

Figure 2. Word recognition scores of bimodal children across three test conditions. HA: hearing aid, CI: cochlear implant.

RESULTS

보청기 착용 귀의 청력역치와 기능이득

44명 바이모달 착용 아동의 보청기 착용 전과 후의 역치를 분석한 결과 보청기 착용 전 평균 청력역치는 250 Hz에서 4,000 Hz까지 73 dB HL에서 94 dB HL를, 보청기 착용 후 역치는 37 dB HL에서 61 dB HL의 평균 역치를 나타냈다(Figure 1). 보청기 착용 전 청력과 비교하였을 때 250 Hz에서 4,000 Hz까지 전 주파수에서 보청기 착용 후 역치가 향상되었다($p < 0.05$, Wilcoxon Signed-Rank test). 주파수별 기능이득은 250 Hz에서 4,000 Hz 사이에 33 dB에서 46 dB를 보였다(Table 2).

바이모달 착용 아동의 단어인지도

바이모달 착용 아동의 단어인지도 평균은 보청기만 착용하였을 때 36.7%, 인공와우만 착용하였을 때 74.7%, 바이모달 조건에서는 79.2%로 각 검사 조건에서 의미 있는 차이를 보였고($p < 0.01$, Friedman test), 인공와우만 착용하였을 때보다 바이모달 착용시 약 4%points의 향상을 보였다($p < 0.01$, Wilcoxon Signed-Rank test) (Figure 2).

보청기 착용 귀의 청력 정도와 바이모달 단어인지도 결과와의 상관성을 파악하기 위하여, 보청기를 착용한 상태와 착용하지 않은 상태의 주파수별 청력 각각에 대해 보청기 또는 바이모달 착용 상태에서의 단어인지도와의 상관관계를 분석하였다. 보청기 착용 전과 후의 주파수별 청력 역치는 보청기만 착용하였을 때의 단어인지도와 음의 상관관계를 보였으나(Spearman Rank-Order correlation coefficient, $p < 0.05$) (Table 3), 바이모달 단어인지도와는 의미 있는 상관관계를 보이지 않았다(Spearman Rank-Order correlation coefficient, $p > 0.05$) (Table 3). 다시 말해, 보청기 착용 전과 후의 청력역치가 낮을수록 보청기만 착용하였을 때 단어인지도의 향상과 상관관계가 있으나 바이모달 단어인지도의 향상과는 관계가 없음을 알 수 있었다.

Table 3. Correlation between unaided and aided thresholds and WRS scores

Frequencies	250 Hz	500 Hz	1,000 Hz	2,000 Hz	4,000 Hz
Correlation between unaided thresholds and WRS scores across frequencies					
HA WRS scores	-5.12*	-6.03*	-6.65*	-5.86*	-4.67*
Bimodal WRS scores	0.11	0.05	-0.06	-0.07	-0.08
Correlation between aided thresholds and WRS scores across frequencies					
HA WRS scores	-3.97*	-3.96*	-4.95*	-4.25*	-3.76*
Bimodal WRS scores	0.04	0.01	-0.05	0.02	0.11

* $p < 0.05$. WRS: word recognition score, HA: hearing aid

Table 4. Hearing aid information of the non-implanted ear of bimodal children

Subject	Lower frequency (Hz)	Upper frequency (Hz)	HFA OSPL90 (dB SPL)	HA model
1	200	2,800	122	Naida V BTE
2	200	7,100	106	Naida Q90 BTE
3	200	4,240	109	Naida Q50 BTE
4	235	6,300	116	Boost17 BTE
5	200	3,775	112	Legend9 ITC
6	375	6,725	112	Legend9 ITC
7	200	2,500	119	Boost9 BTE
8	200	7,550	111	Legend17 CIC
9	200	4,500	116	Ups7 BTE
10	200	7,100	113	Trust9 ITE
11	200	4,500	125	UPS9 BTE
12	200	2,800	116	UPS9 BTE
13	200	6,300	110	Aquaris3 mi BTE
14	300	2,670	122	Nauda S III BTE
15	200	7,100	109	Legend9 CIC
16	200	7,100	105	Legend9 CIC
17	200	5,000	133	Sky B50 BTE
18	200	4,500	109	Legend9 ITC
19	200	3,550	121	Naida S V BTE
20	200	4,500	110	Ambra CIC
21	280	4,240	125	Sky Q50 BTE
22	200	5,600	122	Naida Q50 BTE
23	200	6,725	107	Legend9 ITC
24	355	5,340	113	Naida Q50 BTE
25	200	3,775	116	Naida Q570 BTE
26	200	4,500	118	Legend17 ITC
27	200	4,000	117	Sky V90 BTE
28	200	4,760	107	Virto Q70 ITC
29	200	2,800	110	Naida III BTE
30	200	3,775	117	Legend9 ITC
31	500	5,000	118	Legend9 ITC
32	200	7,100	114	Legend17 CIC
33	200	7,550	110	Legend9 ITC
34	200	4,760	117	Legend9 ITC
35	200	4,760	111	Naida Q50 BTE
36	200	3,550	109	Naida S IX BTE
37	200	6,000	115	Naida III BTE
38	200	4,000	106	Legend9 ITC
39	200	3,775	127	Ups7 BTE
40	200	7,550	109	LND6 ITC
41	225	3,365	118	Xceed III BTE
42	200	4,500	117	Legend6 ITC
43	200	5,000	107	Sky B50 BTE
44	200	4,500	110	PSE9 ITC

HFA OSPL90: high frequency average output sound pressure level 90, HA: hearing aid, BTE: behind the ear, ITC: in the ear, CIC: complete in the canal

바이모달 아동의 보청기적합 내용 분석

Table 4는 44명 바이모달 착용 아동이 착용하고 있는 보청기 모델과 관련 정보를 보여준다. 아동의 55%는 귀걸이형 보청기(behind the ear)를 착용하고 있었고, 34%는 귓속보청기(in the ear), 11%는 고막보청기(completely in the canal)를 착용하고 있었다. 보청기 주파수 범위(frequency range)는 평균 $220 (\pm 58.2) \sim 4,944 (\pm 1,497)$ Hz였으며, 최저 주파수와 최고 주파수 범위는 200~7,550 Hz였다. 고주파수 평균 OSPL90 (high frequency average output sound pressure level 90, HFA OSPL90)값의 평균은 $114 (\pm 6.3)$ dB SPL로 나타났다. 44명 아동 모두 desired sensation level v5 (DSL v5) 보청기적합공식으로 적합하였다(Bagatto et al., 2005).

보청기적합은 Noahlink를 활용하여 각 제조사의 보청기적합 소프트웨어를 통해 조절하면서 Verifit2[®] (Audioscan)에서 제시한 연령별 목표이득에 매치하도록 하였다. Verifit2[®] (Audioscan)의 speechmap을 활용하여 작은 소리(50 dB SPL), 보통 소리(65 dB SPL), 큰 소리(80 dB SPL)의 입력 말소리(International Speech Test Signal) (Holube et al., 2010)를 제시한 상태에서 주파수 실이증폭반응(real-ear aided response)과 최대출력(maximum power output) 및 Speech Intelligibility Index (SII)를 확인하면서 목표이득 값에 매치하도록 보청기 이득을 조절하였다. 또한 대상자에게 말소리를 들려주고 보청기 착용 귀의 소리크기를 반대편 인공와우 착용 귀의 소리크기와 비교하도록 하였다. 이때 인공와우 착용 귀에서 들리는 소리보다 보청기를 착용한 귀의 소리가 약간 작으면서도 편안하면서도 균형을 이루는 소리크기 범위 내에서 보청기를 조절하였다.

DISCUSSIONS

본 연구에서는 후향적 차트 분석을 통해 바이모달 아동의 보청기 착용 후 청력역치 및 기능이득, 단어인지도검사 결과와 바이모달 보청기적합의 내용을 확인하였다. 먼저 연구 결과에서 보여준 바이모달 혜택은 평균 약 4%points로 다소 작았다($p < 0.05$). Cheng et al.(2018)의 연구에서는 바이모달 사용자를 대상으로 조용한 상황의 모음, 자음, 문장 검사를 시행한 결과 각각 평균 2%points, 7%points, 3%points의 통계적으로 유의하지 않은($p > 0.05$) 향상을 보고한 바 있으며 이를 천장효과(ceiling effect)로 설명하였다. 본 연구에서도 인공와우만 착용하였을 때 단어인지도검사 결과는 평균 75%, 바이모달 조건에서는 79%를 보여 상당히 높은 점수를 보였다. 이러한 천장효과의 한계를 극복하고 바이모달 효과를 측정하기 위해서는 다른 선행 연구(Brown & Bacon, 2009; Crew et al., 2015)처럼 소음하

말지각검사의 시행이 필요할 것으로 생각된다.

바이모달 착용효과는 인공와우 신호처리에서 주로 전달되는 말소리의 포락선(envelope) 단서 외에 인공와우의 전기적 자극에 포함되지 않은 기본주파수(F0), 말소리 미세정보(fine structure) 등의 저주파수 음향 자극을 보완 단서로 활용하는 것과 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Ching et al., 2004). 양 귀 각각의 보완적 음향 단서와 인공와우의 전기적 단서는 통합, 해석되어 말지각 향상에 도움이 된다.

바이모달 보청기적합 관련 선행 연구에서는 실이측정과 목표이득에 부합하는 보청기적합의 중요성을 언급하였다(Harris & Hay-McCutcheon, 2010; Yehudai et al., 2013). 본 연구에서도 실이측정을 시행하여 목표이득에 부합하는 바이모달 보청기적합을 시행하였고 이는 바이모달 아동의 결과 향상에 영향을 미치는 요인으로 작용하였을 것으로 생각된다. 또한 아동 모두 DSL v5 적합공식을 적용하였는데 선행 연구(Cuda et al., 2019; English et al., 2016)에서는 보청기적합공식에 따른 결과의 차이는 크게 보고되지 않아 DSL v5 공식의 적용이 바이모달 혜택에 부정적 영향을 미쳤을 것으로 생각되지는 않는다.

보청기 주파수 밴드의 설정에서 와우사 영역(Moore & Malicka, 2013)을 고려하지는 않았으며 대부분 아동의 잔존 청력을 근거로 4,000 Hz까지 보청기적합을 시행하였다. 최근 D'Onofrio and Gifford(2021)의 보고에서도 보청기 주파수 밴드를 확장한 경우 말지각과 음악지각이 향상되었음을 보고하였다. 와우사 영역 등 다른 이유가 없다면 주파수 밴드의 확장을 기본 보청기적합으로 적용하여 보청기를 조절하는 것이 적절할 것으로 생각된다. 와우사 영역을 고려한 주파수 설정이 결과 향상에 기여할 수 있기 때문에 바이모달 착용 아동의 경우에도 와우사 영역을 고려한 주파수 설정이 적용될 수 있다면 좀 더 최적화된 바이모달 보청기적합에 근접할 수 있을 것이다(Zhang et al., 2014). 또한 아동의 주파수별 잔존청력 또는 보청기 착용 후 청력이 바이모달 말지각검사 결과와 의미 있는 상관관계는 보이지 않는 것으로 나타났다. Yoon et al.(2015)의 연구에서도 이와 비슷한 결과를 보였으며 바이모달 말지각 향상에 영향을 미치는 요인으로 이행기기 간 자극을 효과적으로 통합하는 능력과 관계가 있을 수 있음을 설명하였다.

마지막으로 여러 선행 연구에서 양이 간 소리크기의 균형을 평가하고 적절한 균형을 유지하는 것의 중요성을 보고하였다(Ching et al., 2004; Keilmann et al., 2009; Veugen et al., 2016b). 임상에서 양 귀 간 소리크기의 균형을 평가하고 조절하기 위한 지침은 아직까지 미비하며, 주관적 판단에 의해 소리크기를 평가하는 것이기 때문에 실제 검사를 수행하는 데 어려움이 따를 수 있다. 또한 소리크기에 대한 판단 근거가 대부분 인공와우 소리크기를 기준으로 하고 있으며 소리크기의 균형을 맞추

기 위한 방법이 좀 더 보완되어야 할 것으로 생각된다. 본 연구에서는 인공와우를 기준으로 하였을 때 인공와우 음량보다는 다소 작지만 적당하게 균형을 이루는 소리크기를 기준으로 보청기를 조절하였으며, 이러한 방법은 바이모달 착용자의 일반적인 소리 크기 균형을 맞추기 위한 방법 중 하나로 적용 가능할 것으로 생각된다. 그러나 어느 정도가 적당한 균형을 이루는 것인지에 대한 근거는 주관적 판단에 의존하기 때문에 주관적 판단을 가이드할 지침이 마련되어야 할 것이다.

바이모달 결과 혜택 측정과 관련하여 주관적 설문지와 소음하 평가가 향후 보완되어야 한다. 본 연구 결과와 Cheng et al.(2018)의 연구처럼 천장효과의 제약을 보완하기 위한 소음하 말지각 평가가 시행되어야 한다. 또한 주관적 설문검사를 통해 바이모달 혜택의 측정이 필요한데, 다른 여러 선행 연구(Ching et al., 2004; Cuda et al., 2019; English et al., 2016; Keilmann et al., 2009; Veugen et al., 2016a; Veugen et al., 2016b; Vroegop et al., 2019)에서도 주관적 설문지를 시행하고 있다. 설문평가는 바이모달 보청기적합이나 추후 재활 중재 결정에 중요한 단서를 제공할 수 있을 것이다.

본 연구를 통해 바이모달 착용 아동의 청력, 단어인지도 결과, 보청기적합에 대한 내용을 검토하였고 바이모달 아동은 청력과 단어인지도에서 향상을 보였고 보청기적합에서 실이측정을 활용하고 있음을 확인하였다. 소음하검사, 사영역검사, 소리크기 균형검사, 바이모달 혜택을 파악하는 설문지와 배경정보 파악을 위한 설문지가 추가된다면 바이모달 아동의 보청기적합 향상과 결과 측정에 좀 더 도움이 될 수 있을 것이다. 향후 이러한 사항을 고려하여 좀 더 체계적인 바이모달 적합이 이루어지기를 기대한다.

중심 단어: 바이모달적합, 바이모달청각, 보청기적합, 바이모달 아동.

Ethical Statement

N/A

Acknowledgments

N/A

Declaration of Conflicting Interests

There are 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 (2019S1A5A 8038153).

Author Contributions

Conceptualization: Hyekyoung Hwang, Soo Hee Oh. Data curation: Soo Hee Oh. Investigation: Hyekyoung Hwang, Timothy Kim, Leehwa Park, Soo Hee Oh. Validation: Hyekyoung Hwang, Timothy Kim, Leehwa Park, Soo Hee Oh. Writing—original draft: Hyekyoung Hwang, Soo Hee Oh. Writing—review & editing: Hyekyoung Hwang, Soo Hee Oh. Approval of final manuscript: Hyekyoung Hwang, Soo Hee Oh.

ORCID iD

Hyekyoung Hwang <https://orcid.org/0000-0001-5506-2311>
 Timothy Kim <https://orcid.org/0000-0002-9947-2344>
 Leehwa Park <https://orcid.org/0000-0002-1147-6333>
 Soo Hee Oh <https://orcid.org/0000-0002-3745-1484>

REFERENCES

- Akeroyd, M. A. (2006). The psychoacoustics of binaural hearing. *International Journal of Audiology*, 45 Suppl 1, S25-S33.
- Bagatto, M., Moodie, S., Scollie, S., Seewald, R., Moodie, S., Pumford, J., et al. (2005). Clinical protocols for hearing instrument fitting in the desired sensation level method. *Trends in Amplification*, 9(4), 199-226.
- Brown, C. A. & Bacon, S. P. (2009). Achieving electric-acoustic benefit with a modulated tone. *Ear and Hearing*, 30(5), 489-493.
- Brown, K. D. & Balkany, T. J. (2007). Benefits of bilateral cochlear implantation: a review. *Current Opinion in Otolaryngology & Head and Neck Surgery*, 15(5), 315-318.
- Byrne, D. & Noble, W. (1998). Optimizing sound localization with hearing aids. *Trends in Amplification*, 3(2), 51-73.
- Carlson, M. L., Sladen, D. P., Haynes, D. S., Driscoll, C. L., DeJong, M. D., Erickson, H. C., et al. (2015). Evidence for the expansion of pediatric cochlear implant candidacy. *Otology and Neurotology*, 36(1), 43-50.
- Cheng, X., Liu, Y., Wang, B., Yuan, Y., Galvin, J. J., 3rd, Fu, Q. J., et al. (2018). The benefits of residual hair cell function for speech and music perception in pediatric bimodal cochlear implant listeners. *Neural Plasticity*, 2018, 4610592.
- Ching, T. Y., Incerti, P., & Hill, M. (2004). Binaural benefits for adults who use hearing aids and cochlear implants in opposite ears. *Ear and Hearing*, 25(1), 9-21.
- Crew, J. D., Galvin, J. J., 3rd, Landsberger, D. M., & Fu, Q. J. (2015). Contributions of electric and acoustic hearing to bimodal speech and music perception. *PLoS One*, 10(3), e0120279.
- Cuda, D., Murri, A., Mainardi, A., & Chalupper, J. (2019). Effectiveness and efficiency of a dedicated bimodal fitting formula. *Audiology Research*, 9(1), 219.
- Dawes, P., Munro, K. J., Kalluri, S., & Edwards, B. (2013). Unilateral and bilateral hearing aids, spatial release from masking and auditory

- acclimatization. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(1), 596-606.
- Dorman, M. F., Gifford, R. H., Spahr, A. J., & McKarns, S. A. (2008). The benefits of combining acoustic and electric stimulation for the recognition of speech, voice and melodies. *Audiology and Neurotology*, 13(2), 105-112.
- D'Onofrio, K. L. & Gifford, R. H. (2021). Bimodal benefit for music perception: effect of acoustic bandwidth. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 64(4), 1341-1353.
- English, R., Plant, K., Maciejczyk, M., & Cowan, R. (2016). Fitting recommendations and clinical benefit associated with use of the NAL-NL2 hearing-aid prescription in nucleus cochlear implant recipients. *International Journal of Audiology*, 55 Suppl 2, S45-S50.
- Gifford, R. H., Dorman, M. F., Shallop, J. K., & Sydlowski, S. A. (2010). Evidence for the expansion of adult cochlear implant candidacy. *Ear and Hearing*, 31(2), 186-194.
- Harris, M. S. & Hay-McCutcheon, M. (2010). An analysis of hearing aid fittings in adults using cochlear implants and contralateral hearing aids. *The Laryngoscope*, 120(12), 2484-2488.
- 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.
- Keilmann, A. M., Bohnert, A. M., Gosepath, J., & Mann, W. J. (2009). Cochlear implant and hearing aid: a new approach to optimizing the fitting in this bimodal situation. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 266(12), 1879-1884.
- Kong, Y. Y. & Carlyon, R. P. (2007). Improved speech recognition in noise in simulated binaurally combined acoustic and electric stimulation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(6), 3717-3727.
- Kong, Y. Y., Stickney, G. S., & Zeng, F. G. (2005). Speech and melody recognition in binaurally combined acoustic and electric hearing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117(3 Pt 1), 1351-1361.
- Lotfi, Y., Hasanlifar, M., Moossavi, A., Bakhshi, E., & Ajaloueyan, M. (2019). Binaural hearing advantages for children with bimodal fitting. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 121, 58-63.
- Moberly, A. C., Lowenstein, J. H., & Nittrouer, S. (2016). Early bimodal stimulation benefits language acquisition for children with cochlear implants. *Otology and Neurotology*, 37(1), 24-30.
- Moore, B. C. & Malicka, A. N. (2013). Cochlear dead regions in adults and children: diagnosis and clinical implications. *Seminars in Hearing*, 34(1), 037-050.
- Nilakantan, A., Raj, P., Saini, S., & Mittal, R. (2018). Early speech perception test outcome in children with severe sensorineural hearing loss with unilateral cochlear implants alone versus bimodal stimulation. *Indian Journal of Otolaryngology and Head and Neck Surgery*, 70(3), 398-404.
- Park, L. & Oh, S. H. (2021). Speech and sound quality recognition in adults bimodal cochlear implant listeners. *Audiology and Speech Research*, 17(2), 198-205.
- Scherf, F. W. & Arnold, L. P. (2014). Exploring the clinical approach to the bimodal fitting of hearing aids and cochlear implants: results of an international survey. *Acta Oto-laryngologica*, 134(11), 1151-1157.
- Shirvani, S., Jafari, Z., Motasaddi Zarandi, M., Jalaie, S., Mohagheghi, H., & Tale, M. R. (2015). Emotional perception of music in children with bimodal fitting and unilateral cochlear implant. *The Annals of Otology, Rhinology, and Laryngology*, 125(6), 470-477.
- Sibert, H. W. & Holmes, A. E. (2015). Bimodal programming: a survey of current clinical practice. *American Journal of Audiology*, 24(2), 243-249.
- Veugen, L. C., Chalupper, J., Snik, A. F., Opstal, A. J., & Mens, L. H. (2016a). Matching automatic gain control across devices in bimodal cochlear implant users. *Ear and Hearing*, 37(3), 260-270.
- Veugen, L. C., Chalupper, J., Snik, A. F., van Opstal, A. J., & Mens, L. H. (2016b). Frequency-dependent loudness balancing in bimodal cochlear implant users. *Acta Oto-laryngologica*, 136(8), 775-781.
- Vroegop, J. L., Goedegebure, A., & van der Schroeff, M. P. (2018). How to optimally fit a hearing aid for bimodal cochlear implant users: a systematic review. *Ear and Hearing*, 39(6), 1039-1045.
- Vroegop, J. L., Homans, N. C., van der Schroeff, M. P., & Goedegebure, A. (2019). Comparing two hearing aid fitting algorithms for bimodal cochlear implant users. *Ear and Hearing*, 40(1), 98-106.
- Warren, S. E. & Dunbar, M. N. (2018). Bimodal hearing in individuals with severe-to-profound hearing loss: benefits, challenges, and management. *Seminars in Hearing*, 39(4), 405-413.
- Yehudai, N., Shpak, T., Most, T., & Luntz, M. (2013). Functional status of hearing aids in bilateral-bimodal users. *Otology and Neurotology*, 34(4), 675-681.
- Yoon, Y. S., Shin, Y. R., Gho, J. S., & Fu, Q. J. (2015). Bimodal benefit depends on the performance difference between a cochlear implant and a hearing aid. *Cochlear Implants International*, 16(3), 159-167.
- Zhang, T., Dorman, M. F., Gifford, R., & Moore, B. C. (2014). Cochlear dead regions constrain the benefit of combining acoustic stimulation with electric stimulation. *Ear and Hearing*, 35(4), 410-417.