



# A Literature Review of Bimodal Fitting

Junghwa Bahng<sup>1,2</sup>, Soo Hee Oh<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>HUGS Center for Hearing and Speech Research, Hallym University of Graduate Studies, Seoul, Korea

**Received:** June 27, 2020

**Revised:** July 28, 2020

**Accepted:** August 7, 2020

**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:** +82-70-8680-6901

**Fax:** +82-2-3453-6618

**E-mail:** osh503@naver.com

Although there are quite a few bimodal cochlear implant users, bimodal fitting guidelines were not fully developed. Bimodal fitting optimization is one of the factors that contribute to successful bimodal outcomes. The purpose of this study is to investigate recent literatures related to bimodal fitting to establish evidence based bimodal fitting guidelines. Three databases including Google Scholar, PubMed publisher, and PLOS One were searched to review bimodal fitting literatures. A total of 599,604 articles were identified by using ten bimodal relevant keywords at the initial stage. Then, we included 192 articles with abstract review, inclusion and exclusion criteria and removals of duplicates. Lastly, two authors reviewed full texts and identified a total of 19 bimodal fitting articles. Results were categorized into type of bimodal intervention, procedures, and outcomes. Bimodal fitting procedures, test materials, and questionnaires were also summarized. A total of 18 articles consist of bimodal hearing aid fitting covering hearing aid fitting formula, gain adjustment, loudness balance, frequency band, frequency lowering technology, and overall bimodal fitting guidelines. Only one article includes bimodal cochlear implant fitting with low frequency band adjustment. Several factors including real-ear measurement, loudness balance test, frequency band selection considering cochlear dead region, and subjective questionnaires are considered to optimize bimodal hearing aid fitting. Bimodal fitting guidelines considering several relevant factors will optimize bimodal fitting and improve bimodal benefits.

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

## INTRODUCTION

인공와우는 난청인의 와우 기능을 대신하는 청각기기로 와우에 이식된 전극의 활성을 통해 나선신경절세포(spiral ganglion cell) 또는 청신경에 직접 전기자극을 전달하여 청각각을 회복시키는 장치이다. 보청기가 음향자극의 증폭을 통해 외이에서 내이를 거쳐 증폭된 소리를 전달하고 대뇌청각피질에서 소리를 인지하도록 한다면 인공와우는 음향자극을 전기자극으로 바꾸어 이를 직접 내이에 전달하여 소리를 인지하도록 한다. 인공와우는 지금까지 말지각 측면에서 상당한 효과가 보고되었으나(Gifford et al., 2010; Spahr et al., 2012) 소음 상황과 음악지각 등에서의 어려움(Gfeller et al., 2012; Müller et al., 2012)은 여전히 남아 있으며, 이는 인공와우의 전기적 신호처리 한계(Kong et al., 2004; Shannon et al., 1995)와 밀접한 연관성이 있는 것으로 알려져 있다.

최근 저주파수 잔존 청력이 어느 정도 남아 있는 경우에도 인공와우 수술을 받을 수 있도록 인공와우 대상자 기준이 확대되었고(Gifford et al., 2010; UK Cochlear Implant Study Group, 2004) 인공와우와 보청기를 동시에 착용하는 청각기의 활용 사례가 증가하는 추세이다. 이 중 바이모달 청각(bimodal hearing)은 잔존 청력을 활용하기 위하여 인공와우를 착용한 반대편 귀에 보청기를 착용하는 형태이다. 선행연구에서는 조용한 상황과 소음 환경에서의 말지각과 음악지각 등 여러 측면에서 바이모달 청각의 긍정적 효과(Dorman et al., 2008; McDermott, 2011)를 보고하였고 이는 기본 주파수(fundamental frequency)와 제1 포먼트(formant 1)와 같은 말소리 단서의 보완과 밀접한 관련이 있는 것으로 설명하였다(Kong & Carlyon, 2007). 바이모달 청각의 효과는 연구에 따라 다양한 차이를 보이는데 음조위상의 불일치(tonotopic mismatch), 잔존 청력 정도, 양이 융합(binaural fusion), 최적화되지 않은 바이모달 적합, 소리 크기의 불균형 등이 이러한 결과에 영향을 미치는 요인으로 추측된다(Veugen et al., 2016b). 특히 바이모달 적합 지침의 필요성과 관련하여 Vroegop et al.(2018)은 인

© 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.

공와우 착용 성인의 절반 이상이 바이모달 사용자로 바이모달 착용 효과를 향상시킬 수 있는 바이모달 적합 지침의 필요성을 강조하였다.

현재 주요 인공와우 제조사에서 바이모달 적합 지침을 제공하고 있으나(Advanced Bionics, 2014; Cochlear™, 2012; Oticon, 2016) 바이모달 적합의 최적화를 위한 증거기반의 연구와 지침은 아직까지 부족하고 실제 임상에서는 센터마다 각각의 방법으로 바이모달 적합을 시행하고 있다(Siburt & Holmes, 2015). 바이모달 적합의 최적화를 위해서는 먼저 적절한 적합 지침과 평가 프로토콜이 확립되어야 하며, 최적화된 바이모달 프로그램의 사용은 바이모달 착용 효과 및 만족도 향상에 기여할 뿐 아니라 양이 인공와우 대상자 결정에 필요한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

바이모달 적합은 일반적으로 인공와우 적합, 보청기 적합, 인공와우와 보청기 두 개 청각기기 간 적합을 포함한다. 기존 바이모달 적합 연구에서는 인공와우 적합보다는 보청기 적합과 관련된 내용을 주로 다루었고, 두 개 청각기기 간 적합과 관련하여 양 귀 간 소리 크기의 균형을 확립하기 위한 적합 방법을 보고하였다(Ching et al., 2004). 최근 바이모달 보청기 적합에 대한 체계적 문헌 고찰(Vroegop et al., 2018)에서 보청기 적합 시 광대역 주파수의 적용, 보청기 주파수 변이 또는 압축 방식의 활용 효과, 보청기와 인공와우의 양 귀 간 역동압축의 일치, 음량평형을 고려한 보청기 이득조절과 양귀 간 소리 크기 균형 효과와 관련된 내용을 보고한 바 있다. 그러나 바이모달 인공와우 적합에 대한 내용은 제외하였고 실제 활용할 수 있는 바이모달 적합 및 바이모달 평가 방법에 대한 세부적인 내용은 포함하지 않았다. 증거기반의 바이모달 적합 체계를 확립하고 활용하기 위해서 기존에 보고된 인공와우와 보청기를 포함하는 바이모달 적합의 내용과 방법, 평가 방법과 도구에 대한 분석이 선행되어야 하며 이를 근거로 활용 가능한 바이모달 적합

연구가 진행되어야 할 것이다.

본 연구의 목적은 2019년 9월까지 보고된 바이모달 적합 문헌에 대한 체계적인 고찰을 시행하여 기존 연구에서 제시한 보청기와 인공와우를 포함하는 바이모달 적합 방법, 평가 내용 및 도구를 분석하는 것이다. 이를 근거로 바이모달 적합의 최적화를 위한 적합 및 평가 방법을 파악하고 바이모달 적합 지침과 바이모달 평가 프로토콜 확립의 기초 자료를 확보하고자 한다.

## MATERIALS AND METHODS

본 연구에서는 PubMed publisher, Google Scholar, PLOS One 3개의 데이터 베이스를 활용하여 바이모달 적합 문헌을 검색하고 2019년 9월까지 보고된 문헌을 분석하였다. 문헌 검색의 방법과 절차는 Preferred Reporting Items for Systematic Review (Moher et al., 2015) 지침을 참고하였고 연구에서 시행한 전반적인 문헌 검색 절차는 Figure 1과 같다. 1단계 문헌 검토에서는 10개의 중심단어(bimodal hearing, bimodal hearing aid, bimodal cochlear implant, bimodal benefit, bimodal programming, bimodal fitting, bimodal mapping, electric-acoustic hearing, fitting, contralateral fitting)로 검색하여 3개의 데이터 베이스에서 총 599,604개의 문헌을 추출하였다. 2단계에서는 바이모달 적합 관련 문헌 선정을 위해 실제 바이모달 사용자 대상의 바이모달 적합과 적합 효과에 관한 연구만을 본 연구에 포함하도록 하였다(Table 1). 한 명의 검토자가 Table 1의 문헌 포함 기준과 제외 기준을 적용하여 논문 제목과 초록을 검토한 뒤 중복 문헌을 제외하고 최종 192개의 문헌을 선정하였다. 3단계에서는 본 연구의 저자 2명이 2단계에서 정리된 192개 문헌을 각각 검토하였고, 바이모달 적합과 그 효과에 대한 내용 여부를 확인하여 1차로 37개의 논문을 결정한 뒤, 두 저자 간 일치하지 않았던 논문의 내용을 2차 검토하여

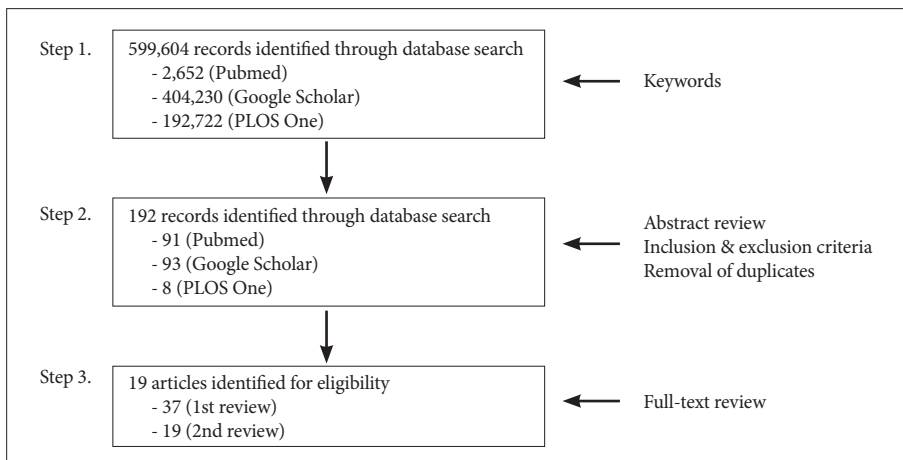


Figure 1. Flowchart of the systematic review of bimodal fitting literature.

**Table 1.** Inclusion and exclusion criteria of this study

Inclusion criteria	Exclusion criteria
Studies of bimodal fitting & fitting outcomes	Studies of not bimodal fitting & fitting outcomes
Real bimodal users	Bimodal simulation studies
English articles	Review papers, abstracts, theses Non English articles

최종 19개의 바이모달 적합 관련 논문을 결정하였다(Figure 1). 최종 선정된 19개 논문을 검토하고 바이모달 적합 지침 확립을 위해 본 연구의 관심 항목인 적합 주제, 적합 방법, 평가 도구, 평가 항목, 결과 등으로 구분하여 정리하였다.

## RESULTS

Table 2는 총 19개 바이모달 적합 관련 논문의 내용을 적합 중재, 적합 내용, 검사 방법 및 도구, 결과, 설문지 항목으로 정리한 결과이다. 19개 문헌 중 바이모달 인공와우 적합 논문은 1개였고 나머지 18개 논문 모두 바이모달 보청기 적합에 대한 내용을 포함하여, 바이모달 적합 관련 연구가 대부분 보청기 적합 주제로 진행되고 있음을 확인하였다. 바이모달 보청기 적합과 관련된 18개 연구의 주요 중재 내용은 1) 보청기 적합공식, 2) 보청기 이득조절, 3) 양 귀 간 음량평형, 4) 보청기 주파수 범위, 5) 보청기 주파수 변이 시스템, 6) 바이모달 적합 프로토콜에 대한 6개의 카테고리로 구분되었다. 한편 바이모달 인공와우 적합에 대한 1개 논문에서는 인공와우 저주파수 대역의 조절에 따른 바이모달 효과를 포함하고 있었다. 다음에서는 바이모달 적합과 관련된 19개 문헌의 대략적 내용을 설명하였고 Table 2에서 각 연구의 구체적인 내용을 확인할 수 있다.

### 바이모달 적합에서의 보청기 적합공식

바이모달 적합에서 각각 다른 보청기 적합공식의 적용에 따른 결과를 비교한 연구(Cuda et al., 2019; English et al., 2016; Vroegop et al., 2019)에서는 바이모달 보청기 적합공식인 Adaptive Phonak Digital Bimodal (APDB)과 일반적인 보청기 적합공식인 Desired Sensation Level version 5, National Acoustics Laboratories Non-Linear version 2(NAL-NL2)를 비교하였다. 결과적으로 각 보청기 적합공식에 따른 말지각 측면에서 의미 있는 차이는 보이지 않았다. NAL-NL2와 보청기 자체의 적합공식을 사용한 결과를 비교했을 때에도 말지각에서 차이를 보이지 않아 보청기 적합공식의 차이가 바이모달 말지각 결과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 다만, 적합공식의 선호도를 조사한 결과 APDB와 NAL-NL2를 다른 적합공식보다 좀 더 선호하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는

사용자는 말지각의 측면보다는 주관적인 소리의 질 등으로 보청기 적합공식을 선호함을 보여주었다.

### 바이모달 적합에서의 보청기 이득조절

보청기 이득조절 및 음량평형과 관련된 연구(Ching et al., 2004; Harris & Hay-McCutcheon, 2010; Veugen et al., 2016a, 2016b; Yehudai et al., 2013)를 살펴보면, 압축 채널의 수와 시간 측면에서 보청기의 자동이득조절(automatic gain control) 조건을 인공와우의 자동이득조절 조건과 매치했을 때 매치하지 않았을 때보다 말지각에서 향상된 결과를 보여, 보청기와 인공와우 두 개 청각기기 간 자동이득조절 조건을 동일하게 했을 때 바이모달 결과 향상에 영향을 미칠 수 있음을 보여주었다(Veugen et al., 2016b). 또한 바이모달 보청기 적합에서 보청기의 이득은 실이측정의 목표 이득에 미치지 못하는 것으로 나타났다(Ching et al., 2004; Harris & Hay-McCutcheon, 2010; Yehudai et al., 2013). 기능이득 결과에서는 보청기 착용 후 저주파수 대역에서 다른 주파수 대역보다 이득이 많음을 보였다. 또한 보청기 착용 후 역치 평가가 바이모달 결과가 좋은 사용자와 그렇지 못한 사용자 간의 차이를 보이지 않아(Harris & Hay-McCutcheon, 2010) 기능이득만으로 바이모달 보청기 적합의 최적화를 확인하는 데에는 한계가 있을 것으로 보여진다.

### 바이모달 적합에서의 양 귀 간 음량평형

양 귀 간 음량평형 연구와 관련하여 Veugen et al.(2016a)은 광대역 주파수 대역에 근거한 음량평형 방법과 3개 주파수 밴드로 구분한 주파수 의존적 음량평형 방법을 적용하여 보청기 이득을 조절하고 바이모달 효과를 비교했을 때, 광대역 또는 주파수 의존적 음량평형에 따른 말지각 결과에 차이가 없었다(Veugen et al., 2016a). Table 2에 보고된 대부분의 연구에서 바이모달 적합 시 인공와우와 보청기의 음량평형을 적용하였으며, 예를 들어 Ching et al.(2004)의 연구에서는 처음에는 인공와우만 착용한 상태에서 녹음된 이야기를 들도록 하고 인공와우와 비교하여 보청기가 동일한 소리 크기로 들릴 수 있도록 보청기의 이득을 조절하는 음량평형 방법을 제시하였다

### 바이모달 적합에서의 주파수 범위

바이모달 보청기 적합의 주파수 대역 설정에 따른 효과를 비교했을 때(Messersmith et al., 2015; Neuman & Svirsky, 2013; Neuman et al., 2019) 대부분의 연구에서 보청기 주파수 대역 설정에 따른 결과의 차이가 없었으며, 바이모달 보청기 적합에서 광대역 주파수의 우선적 적용이 가능함을 보여주었다. Messersmith et al.(2015)의 연구에서는 전기와 음향 자극 주파수 대역의 중복을 제한하고 와우 사영역(dead region)을 고려하여

Table 2. A research summary of bimodal fitting

Publications	Participants	Intervention	HA fitting	CI	Tool	Procedures	Outcomes	Questionnaire
Cuda et al., 2019	9 bimodal adults	HA fitting formula: APDB formula	1) APDB fitting formula 2) Reduced gain in dead regions 3) Loudness growth is aligned to CI	Everyday program	Italian matrix sentence & IFFM, subjective preference	1) Speech test 2) Subjective formula preference	No differences SRTs in IFFM noise between APDB & DSLv5, APDB fine tuning (bandwidth limitation, overall gain adjustment), 78% of participants preferred APDB	Formula preference
Vroegop et al., 2019	19 bimodal adults	HA fitting formula: APDB formula	1) REM 2) Broadband balancing	Everyday program	PB monosyllabic in quiet, sentence in noise, SSQ	1) Speech test 2) SSQ questionnaire	1) Differences in REAR of two fitting formula 2) No differences of speech perception in quiet, noise, & SSQ between 2 formula	SSQ
English et al., 2016	16 bimodal adults	HA fitting formula: NAL-NL2 formula	REIG based fitting	Everyday program	Open-set monosyllabic words, preferred frequency response, preferred gain deviation from NAL-NL2, SSQ	1) Speech test 2) REM 3) Loudness balance with NAL-NL2 2 cc coupler target default	1) Speech perception: no differences of fitting 2 formulas in bimodal 2) Preferred frequency response: 69% NAL-NL2 default preferred 3) Preferred gain deviation from NAL-NL2: 56% within 5 dB gain for the target 4) No differences of SSQ between two formulas	SSQ, formula preference
Veugen et al., 2016a	15 bimodal adults	Loudness balancing: three-band fitting	1) Broadband fitting 2) 3 band fitting 3) Loudness balance	Everyday program	Nonsense natural running speech adapted from the IFFM, 3 talker signal (IFFM3), speech weighted noise & IFFM signal	1) Speech test 2) SSQ & 7 basic questions concerning everyday situations	No improvements in speech perception using frequency dependent loudness balancing compared to using broadband balancing	SSQ, 7 basic questions
Veugen et al., 2016b	15 bimodal adults	HA gain: AGC matched HA	1) In situ pure-tone audiometry fitting 2) Loudness balance	Everyday program	Monosyllabic words (in quiet), sentences (in noise), single competing talker, questionnaire, quick subjective preference, speech shaped noise for loudness balancing	1) Compare standard AGC HA vs. AGC-matched HA 2) Speech in noise & quiet 3) Questionnaire	Bimodal improvements in the matched condition	Quick subjective question, SSQ, questions about bimodal hearing

**Table 2.** A research summary of bimodal fitting (continued)

Publications	Participants	Intervention	HA fitting	CI	Tool	Procedures	Outcomes	Questionnaire
Yehudai et al., 2013	31 bimodal adults	HA gain/bimodal fitting procedure: target matched NAL-NLI	1) HA meet the required target if not meet, fitting modification (flowchart)	Stable map	Monosyllabic word discrimination, CID sentence recognition in noise (SNR 10 dB)	Flowchart developed	1) 1 step: 19% matched with target gain 2) 2 step (refitting): 61% matched with speechmap target & 39% did not match 3) No differences in unaided & aided thresholds for poor & good bimodal users	-
Harris & Hay-McCutcheon, 2010	14 bimodal adults	HA gain: target gain based on REM	Target & actual gain	Everyday program	Target gain, real gain, functional gain	1) Aided & unaided audiometric testing 2) REM: DSL target	1) Less actual gain than target gain: no bimodal fitting optimization 2) Low frequency gain in functional gain	-
Ching et al., 2004	21 CI users, 12 bimodal adults	HA gain/loudness balance: NAL-NLI, fine tuning, loudness balance	NAL-NLI, REM, single channel, wide-dynamic range compression at fixed compression ratio (2:1): subject checking, fine tuning (to identify preferred frequency & balance loudness)	Everyday program	Recorded story, BKB sentences, 8 talker babble noise, structured interview, questionnaire	1) HA fitting: to choose a frequency response for easy understanding 2) Loudness balancing 3) HA fine-tuning	4 dB less gain for NAL-NLI target, fine tuning for HA response slops & gain	Questionnaire
Neuman et al., 2019	33 bimodal adults	HA bandwidth (WB, 2, 1, 0.5 kHz)	REM: NAL-RP target, 4 HA bandwidths: bimodal wideband, bimodal 2 k, bimodal 1 k, bimodal 500 Hz matching loudness with HA volume adjustment	Everyday program	Monosyllabic words, AzBio sentence, multitalker competing noise	Speech test	BMW did not differ significantly from the restricted bandwidth	-



Table 2. A research summary of bimodal fitting (continued)

Publications	Participants	Intervention	HA fitting	CI	Tool	Procedures	Outcomes	Questionnaire
Davidson et al., 2015	14 bimodal children	HA bandwidth: restricted high-frequency response & NLFC activated	DSL targets, RECD, REM, high frequency restriction & NLFC setting	Everyday program	CNC words in quiet, BKB sentences in 4 talker noises	1) Perform speech & localization test, 2I 2AFC 2) Aided threshold in sound fields 3) SII calculated wideband, BM restricted	No significant frequency band effects (wideband, NLFC, restricted band) except localization test	-
Messersmith et al., 2015	6 bimodal adults	HA bandwidth: modified restricted high frequency fitting (gain adjustments)	1) Modification of frequency response of the HA by decreasing the gain of the HA above 2,000 Hz 2) Rolling off above 2,000 Hz considering cochlear dead region	Everyday program	1) AzBio sentence 2) Minimum speech test battery for adult CI	Chart review study: 1) Open set sentence perception test 2) HA fitting: wide frequency vs. restricted frequency fitting	Speech perception improvements after gain adjustments with restricted HA bandwidth	-
Neuman & Svirsky, 2013	14 adults bimodal users	HA bandwidth: modified bandwidths (below 0.5, 1, 1-2 kHz, above 2 kHz)	4 frequency response bandwidth (NAL-RP, 2 kHz cut off, 1 kHz cut off, 0.5 kHz cut off), gain was matched to the prescribed target (within 5 dB of target through 2 kHz)	Everyday program	AzBio sentence in quiet & noise	Speech test	Bimodal with 2 kHz & wideband speech benefits for sentence in quiet & noise	-
Perreau et al., 2013	10 adults bimodal users, 17 bimodal users	HA compression	REM (+-3 dB acceptable at 0.5, 1, 2 kHz), SII	Everyday program	1) 16 everyday sounds 2) Multiple jammer spondee in noise test 3) 2 self reports (SSQ, sound quality), IOWA consonant recognition test (iCi), IOWA vowel recognition test (hVd) formant	1) Localization test 2) 2 self reports 3) Speech recognition	No differences between compression & conventional HA (localization, quiet)	-

**Table 2.** A research summary of bimodal fitting (continued)

Publications	Participants	Intervention	HA fitting	CI	Tool	Procedures	Outcomes	Questionnaire
Hua et al., 2012	9 bimodal users	HA LFT: bimodal new HA LFT-on	Measure audiometric thresholds (sensogram) to calculate gain & compression of HA, measure insertion gain, NAL-RP target in the LFT-off program, REM, loudness balance, judge overall loudness	Everyday program	1) Monosyllabic words in quiet 2) HINT, IEEE, Indian multi-talker speech database 3) SSQ	Speech test, SSQ	No differences between LFT-on & off; best improvements with LFT-on	SSQ
Park et al., 2012	11 unilateral CI children	HA NLF: bimodal with NLF	Target match within 2 dB octave & interoctave frequencies, frequency compression start value manipulated if needed	Everyday program	Adaptive HINT, continuous speech shaped noise, 2 talker maskers, consonant-words-consonant, consonant identification, high frequency consonant, picture display	1) Sound field thresholds 2) Masked sentence recognition 3) Open set word recognition 4) Consonant identification	No benefits of NLF	-
McDermott & Henshall, 2010	8 adults bimodal users	HA frequency compression: bimodal frequency compression HA on vs. off	Compression ratio change, fitting & fine tuning & insertion gain & NAL-RP; 3 program setting (frequency compression disabled), frequency compression at default (3 kHz, 2:1), frequency compression at the maximum possible setting (1.5 kHz, 4:1)	Everyday program	Recorded book, female speaker, 4 talker babble noises, music sound, Consonant (aCa), CUNY sentence, sound quality	7 sessions, speech test	No bimodal improvements of using Phonak Naida HA with frequency compression on vs. off	Sound quality

Table 2. A research summary of bimodal fitting (continued)

Publications	Participants	Intervention	HA fitting	CI	Tool	Procedures	Outcomes	Questionnaire
Keilmann et al., 2009	12 children, 8 adults bimodal users	Bimodal protocol: loudness balancing protocol, WHF loudness scaling	Bimodal fitting: loudness scaling- HA programming: 1) DSL method 2) Fitting verification in target 3) Loudness scaling & HA fitting optimization, refitting based on subjective satisfaction questionnaire	CI fitting optimization	Pediatric speech discrimination tests, numbers, monosyllable, loudness scaling (WHF)	1) Speech tests in quiet & noise 2) Questionnaire 3) Speech discrimination tests 4) Loudness scaling tests	Bimodal speech benefits based on bimodal fitting	Questionnaire
Ullauri et al., 2007	7 children bimodal users	Bimodal HA fitting protocol	Flowchart	Everyday program	LIFE questionnaire, LSQ for parents, COSI-C, CUNY, BKB in quiet & noise	Flowchart	Bimodal benefits & fitting optimization	LIFE questionnaire, LSQ for parents, COSI-C
Fowler et al., 2016	9 adults CI users, 26 adults bimodal users	CI low cut off frequency	REM, NAL-NLI formula, RECD	4 LFCs: LFCs were raised by deactivating electrodes, loudness balanced with HA	CNC words in quiet, AzBio sentence, 10 talker babbles, spondee words in 4 talker babbles	1) Speech test including low frequency in CI); decreasing speech perception in quiet & noise, above 60 dB thresholds at 0.25 & 0.5 kHz bimodal users: improve speech perception in quiet & noise with raising LFC indicating less overlap between HA & CI is better for speech perception	Raising LFC condition (not including low frequency in CI): decreasing speech perception in quiet & noise, above 60 dB thresholds at 0.25 & 0.5 kHz bimodal users: improve speech perception in quiet & noise with raising LFC indicating less overlap between HA & CI is better for speech perception	

AGC: automatic gain control, APDB: Adaptive Phonak Digital Bimodal, AzBio: Arizona Biomedical Institute, BKB: Bamford-Kowal-Bench, BM: bimodal, BMWB: bimodal wideband, CI: cochlear implant, CID: Central Institute for the Deaf, CNC: consonant nucleus vowel consonant, COSI-C: client orientated scale of improvement for children, CUNY: City University of New York, DSL: desired sensation level, HA: hearing aid, HINT: hearing in noise test, IEEB: Institute of Electrical and Electronics Engineers, IFFM: international female fluctuating masker, LFC: low frequency cut off, LFT: linear frequency transposing, LIFE: listening inventory for education, LSQ: life situation questionnaire, NAL-NL: National Acoustics Laboratories Non-Linear, NAL-RP: National Acoustics Laboratories Revised Profound, NLFC: non-linear frequency compression, PB: phonetically balanced, REAR: real-ear aided response, RECD: real-ear to coupler difference, REIG: real-ear insertion gain, REM: real-ear measurement, SII: speech intelligibility index, SRT: speech reception threshold, SSQ: speech, spatial & qualities of hearing scale, WB: wideband, WHF: Wurzbürger Horfeld, 2I 2AFC: two-interval, two alternative forced choice



2,000 Hz 이상 주파수의 보청기 이득을 옥타브당 12 dB의 비율로 감소시켰을 때 바이모달 말지각의 향상을 보고하였고, Neuman & Svirsky(2013)의 연구에서도 광대역 주파수의 적용과 2,000 Hz 이상 주파수 대역을 제한한 경우 모두 소음과 조용한 상황의 문장 검사에서 향상을 보였다.

바이모달 인공와우 적합 연구(Fowler et al., 2016)에서는 인공와우의 저주파수 대역과 보청기 저주파수 대역이 서로 중복되지 않도록 청력 역치를 고려하여 인공와우 저주파수 대역을 상향 조정했을 때 소음과 조용한 상황에서 말지각이 향상됨을 보여주었고, 이는 반대편 귀의 청력 역치에 따른 인공와우의 저주파수 대역 조절의 가능성을 보여주었다.

### 바이모달 적합에서의 보청기 주파수 변이 시스템

Davidson et al.(2015)은 비선형 주파수 압축(non-linear frequency compression, NLFC), 광대역 주파수 또는 제한된 주파수 대역을 적용한 효과를 비교했을 때 소음하 조건과 조용한 상황 조건에서의 말지각 검사 결과에는 영향이 없음을 보고하였다. 그러나 방향성 검사에서는 바이모달의 광대역 주파수와 NLFC 조건에서 인공와우만 착용했을 때보다 의미 있는 향상을 보였다. 보청기의 주파수 압축을 포함하는 주파수 변이 시스템의 적용 효과를 연구한 다른 연구(Davidson et al., 2015; Hua et al., 2012; McDermott & Henshall, 2010; Park et al., 2012; Perreau et al., 2013)에서도 보청기의 주파수 압축 시스템의 적용이 바이모달 결과 향상에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

### 바이모달 적합에서의 보청기 적합 프로토콜

바이모달 적합 절차와 방법에 대한 연구(Keilmann et al., 2009; Ullauri et al., 2007; Yehudai et al., 2013)에서는 바이모달 적합을 위한 전반적인 지침과 방법을 기술하고 그 효과를 보여주었다. 연구에서 제시한 바이모달 프로토콜의 내용은 적절한 보청기 이득의 설정, 양 기기 간 음량평형, 실이측정에 근거한 적합과 적합 확인 및 전반적인 바이모달 평가 프로토콜의 도식을 포함하고 있으며 이러한 바이모달 적합 지침의 적용이 적합의 최적화와 결과 향상에 기여함을 보고하였다.

## DISCUSSIONS

본 연구에서는 바이모달 적합 문헌에 대한 체계적인 고찰을 시행하여 증거기반의 바이모달 적합 지침 확립을 위한 기초 자료로 활용하고자 하였다. 총 19개 바이모달 적합 관련 연구를 검토한 결과 바이모달 보청기 적합공식, 보청기 이득조절, 음량평형, 보청기 주파수 범위, 주파수 변이 시스템, 바이모달 적합

프로토콜에 대한 연구 및 바이모달 인공와우 적합에 대한 내용을 확인하였다. 또한 여러 문헌에서 제시한 바이모달 적합, 평가 방법과 도구 및 결과에 대한 내용을 요약하였다.

바이모달 보청기 적합과 관련하여 몇 가지 주요 내용을 정리하면 기존의 다양한 보청기 적합공식의 적용이 가능하고(Cuda et al., 2019; English et al., 2016; Vroegop et al., 2019), 실이측정에 근거한 보청기 이득조절, 예를 들어 보청기의 목표 이득과 실제 조절 이득은 5 dB 이내의 편차로 조절하여야 하는 등의 적합확인(Neuman & Svirsky, 2013; Neuman et al., 2019)이 병행되어야 한다. 보청기 주파수 범위는 광대역 주파수를 우선적으로 적용할 수 있으나 청력 또는 와우 사영역 존재 여부에 따라 고주파수 대역, 예를 들어 2,000 Hz 이상의 이득을 감소시킬 수 있다(Messersmith et al., 2015). 또한 대부분의 연구에서 보청기 이득조절을 통한 양 귀 간 음량의 평형을 고려하였으며 보청기 미세 조정이 결과 향상에 좀 더 기여할 수 있는 것으로 나타났다(Ching et al., 2004). 바이모달 적합에서 인공와우는 일상에서 사용하는 프로그램을 주로 활용하였고 안정적인 매핑 상태에서 보청기 적합을 시행한 것으로 나타났다(Keilmann et al., 2009; Yehudai et al., 2013). 바이모달 결과 측정을 위한 평가 도구는 소음과 조용한 상황에서의 다양한 말지각 검사(음소, 일음절, 단어, 문장)를 시행하였고 방향성 검사와 주관적 선호 및 설문 검사(Keilmann et al., 2009; Veugen et al., 2016a, 2016b)를 추가적으로 수행하였다. 주관적 설문 검사는 언어 공간 음질 청취 평가(speech, spatial & qualities of hearing scale) (Gatehouse & Noble, 2004), 보청기 적합 선호도 검사, 일상 생활과 관련된 질문, 청취 음질과 편안함에 대한 질문, 바이모달 사용 및 효과 관련 질문 등 여러 설문 내용을 포함하였다. 결과 측정 방법은 연구마다 차이가 있으나 음장에서 약 1 m 거리 정면에 위치한 스피커를 통해 신호(예를 들어 55~65 dB SPL 강도의 말소리)를 제시하는 방식(English et al., 2016; Neuman & Svirsky, 2013)으로 측정하였으며, 검사의 목적에 따라 스피커의 개수와 위치 등의 조건을 조정하였고 소음의 종류 및 제시 방향도 연구에 따라 차이가 있었다(Table 2).

본 연구의 결과를 토대로 바이모달 적합 과정 및 평가 요소를 정리하면 다음과 같다. 먼저 바이모달 사용자를 대상으로 순음과 어음 청력 검사 및 말지각 검사를 시행한다. 인공와우 매핑의 안정성 확보, 주파수 범위 확인 및 인공와우 착용 후 청력검사를 통해 인공와우의 적절한 적합 상태를 확인한다. 또한 보청기 적합의 경우 보청기 적합공식의 선택, 실이측정과 음량평형에 근거한 이득조절 및 미세 조정을 시행하고 와우 사영역 검사를 근거로 보청기 증폭의 주파수 대역을 결정한다. 인공와우와 보청기를 착용한 양 귀 간 음량의 평형을 맞추기 위한 검사를 시행하고, 일반적으로 인공와우를 기준으로 보청기의 전

반적인 음량이나 이득을 조절하는 방법을 적용한다. 바이모달 적합 효과 측정을 위해 말지각 검사, 기능이득 검사, 실이측정, 방향성 검사와 주관적 설문 검사를 수행하여 바이모달 적합을 확인하고 그 이득을 측정한다. 바이모달 이득의 정도에 따라 사용자의 만족도 및 그 효과를 확인할 수 있으며 바이모달로 인한 이득이 부재하거나 만족도가 낮은 경우 양이 인공와우 대안자로 고려할 수 있다. 이러한 방법은 바이모달 적합 지침 확립에 활용 가능하고 바이모달 적합의 최적화와 만족도 및 결과 향상에 기여할 수 있을 뿐 아니라 양이 인공와우 대상자 선별에 도움이 될 수 있을 것으로 생각한다.

바이모달 적합의 최적화와 관련하여 Gifford(2019)는 와우 사영역 검사 결과와 보청기 주파수 대역과의 관계를 좀 더 뒷받침할 수 있는 바이모달 적합 연구와 음량평형에 근거한 보청기의 이득조절이 바이모달 말지각 향상에 미치는 영향에 대한 추가적 연구가 필요함을 언급하였다. 본 문헌 고찰에서는 바이모달 적합에서 와우 사영역 검사를 근거로 한 주파수 대역 설정과 이득조절(Messersmith et al., 2015)의 효과를 확인하였다. Zhang et al.(2014)의 연구에서는 바이모달 사용자의 보청기 적합에서 와우 사영역 검사 결과를 반영하여 보청기 주파수 대역을 결정했을 때, 바이모달 이득이 향상되었고 바이모달 적합에서 와우 사영역 검사의 필요성을 보고한 바 있다. 바이모달 사용자의 경우 고주파수 청력이 저주파수 잔존 청력에 비해 많이 떨어지는 경우가 많은데 이때 주파수별 와우 사영역 검사를 시행하여 보청기의 주파수 대역 조절에 참고할 수 있다. 이는 보청기 착용귀의 사영역 주파수를 증폭하지 않도록 하여 보청기와 인공와우 주파수 대역의 중복을 감소시키는 효과도 있을 것이다(Fowler et al., 2016). 또한 Gifford(2019)가 제시한 음량평형에 근거하여 보청기 이득을 조절한 경우 말지각에 어떤 영향을 미치는지에 대한 연구와 함께, 현재 일반적으로 실행되는 보청기 중심의 음량평형 검사 방법에 대한 연구뿐만 아니라 인공와우의 음량평형을 맞추기 위한 방법적 연구도 필요할 것이다.

기존 바이모달 적합 연구 결과에서 각기 다른 보청기 적합공식의 적용이나 주파수 변이 시스템의 적용 효과는 없었으나, 실이측정과 미세 조절을 통한 목표 이득에 근접한 적절한 주파수 이득의 설정은 바이모달 이득 향상에 효과가 있었다. 또한 인공와우와 보청기의 자동이득조절(automatic gain control) 압축 특징이 서로 다르기 때문에 이를 매치할 수 있는 바이모달 시스템의 개발도 바이모달 결과 향상에 긍정적 영향을 미칠 수 있을 것으로 생각된다. 마지막으로 바이모달 적합 시 주관적인 선호와 이득을 측정할 수 있는 적절한 주관적 평가 도구에 대한 검토가 필요할 것이다.

바이모달 적합과 평가 프로토콜을 위한 기초 구성 요인을 파악하기 위하여, 본 연구에서는 연구의 주요 관심 영역인 바이모

달 적합과 평가 방법 및 결과를 분석하였고 검토 문헌의 질에 대한 평가는 시행하지 않았으며 이는 본 연구의 한계점이라 할 수 있다. 그러나 기존 연구를 근거로 실제 적용 가능한 바이모달 적합과 평가 방법을 보고했다는 측면에서 긍정적 의미가 있으며 향후 바이모달 적합의 각 구성 요소와 관련된 후속연구를 진행하여 증거기반의 바이모달 적합 지침과 평가 프로토콜이 확립될 수 있기를 기대한다.

**중심 단어** : 바이모달 적합·바이모달 청각·보청기 적합.

**Ethical Statement**

N/A

**Acknowledgments**

The authors thanks to Myounghwa Lee who supported data search. Also, thanks to the National Research Foundation of Korea sponsored the research project.

**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 (2019S1A5A8038153).

**Author Contributions**

S.O. designed and performed experiments, analyzed data, and wrote the paper; J.B. designed, analyzed data, and wrote the paper; S.O. and J.B. provided statistical analysis and critical revision. Also, the authors discussed the results together and implications and commented on the manuscript at each stage.

**ORCID iDs**

Junghwa Bahng <https://orcid.org/0000-0002-5265-3586>  
 Soo Hee Oh <https://orcid.org/0000-0002-3745-1484>

**REFERENCES**

Advanced Bionics. (2014). *Bimodal Fitting Quick Guide*. Retrieved from [http://www.onici.be/userfiles/files/028-M384-02\\_Global%20A4%20Bimodal%20Fitting%20Guidelines%20for%20Professionals%20JUN09\\_FINAL.pdf](http://www.onici.be/userfiles/files/028-M384-02_Global%20A4%20Bimodal%20Fitting%20Guidelines%20for%20Professionals%20JUN09_FINAL.pdf).

Ching, T. Y. C., 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.

Cochlear™. (2012). *Bimodal Hearing: A Guide to Fitting*. Retrieved from <https://www.onici.be/userfiles/files/Bimodal-Hearing-A-Guide-to-Fitting.pdf>.

Cuda, D., Murri, A., Mainardi, A., & Chalupper, J. (2019). Effectiveness and efficiency of a dedicated bimodal fitting formula. *Audiology Research, 9*(1), 219.

Davidson, L. S., Firszt, J. B., Brenner, C., & Cadieux, J. H. (2015). Evaluation of hearing aid frequency response fittings in pediatric and young adult bimodal recipients. *Journal of the American Academy of Audiology, 26*(4), 393-407.

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.
- 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.
- Fowler, J. R., Eggleston, J. L., Reavis, K. M., McMillan, G. P., & Reiss, L. A. (2016). Effects of removing low-frequency electric information on speech perception with bimodal hearing. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 59(1), 99-109.
- Gatehouse, S. & Noble, W. (2004). The speech, spatial and qualities of hearing scale (SSQ). *International Journal of Audiology*, 43(2), 85-99.
- Gfeller, K., Jiang, D., Oleson, J. J., Driscoll, V., Olszewski, C., Knutson, J. F., et al. (2012). The effects of musical and linguistic components in recognition of real-world musical excerpts by cochlear implant recipients and normal-hearing adults. *Journal of Music Therapy*, 49(1), 68-101.
- Gifford, R. H. (2019). Bimodal hearing: How to optimize bimodal fitting. *The Hearing Journal*, 72(2), 10, 12, 13.
- 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.
- Hua, H., Johansson, B., Jönsson, R., & Magnusson, L. (2012). Cochlear implant combined with a linear frequency transposing hearing aid. *Journal of the American Academy of Audiology*, 23(9), 722-732.
- 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., Cruz, R., Jones, J. A., & Zeng, F. G. (2004). Music perception with temporal cues in acoustic and electric hearing. *Ear and Hearing*, 25(2), 173-185.
- McDermott, H. (2011). Benefits of combined acoustic and electric hearing for music and pitch perception. *Seminars in Hearing*, 32(1), 103-114.
- McDermott, H. & Henshall, K. (2010). The use of frequency compression by cochlear implant recipients with postoperative acoustic hearing. *Journal of the American Academy of Audiology*, 21(6), 380-389.
- Messersmith, J. J., Jorgensen, L. E., & Hagg, J. A. (2015). Reduction in high-frequency hearing aid gain can improve performance in patients with contralateral cochlear implant: A pilot study. *American Journal of Audiology*, 24(4), 462-468.
- Moher, D., Shamseer, L., Clarke, M., Ghersi, D., Liberati, A., Petticrew, M., et al. (2015). Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. *Systematic Reviews*, 4(1), 1.
- Müller, J., Brill, S., Hagen, R., Moeltner, A., Brockmeier, S. J., Stark, T., et al. (2012). Clinical trial results with the MED-EL fine structure processing coding strategy in experienced cochlear implant users. *ORL; Journal for Oto-rhino-laryngology and its Related Specialties*, 74(4), 185-198.
- Neuman, A. C. & Svirsky, M. A. (2013). Effect of hearing aid bandwidth on speech recognition performance of listeners using a cochlear implant and contralateral hearing aid (bimodal hearing). *Ear and Hearing*, 34(5), 553-561.
- Neuman, A. C., Zeman, A., Neukam, J., Wang, B., & Svirsky, M. A. (2019). The effect of hearing aid bandwidth and configuration of hearing loss on bimodal speech recognition in cochlear implant users. *Ear and Hearing*, 40(3), 621-635.
- Oticon. (2016). *Bimodal Hearing Aid Fitting Guidelines*. Retrieved from [https://www.oticon.nl/-/media/oticon/main/pdf/master/bimodal/22596\\_uk\\_wp\\_bimodal\\_fitting\\_h2\\_2016.pdf?la=nl-nl](https://www.oticon.nl/-/media/oticon/main/pdf/master/bimodal/22596_uk_wp_bimodal_fitting_h2_2016.pdf?la=nl-nl).
- Park, L. R., Teagle, H. F. B., Buss, E., Roush, P. A., & Buchman, C. A. (2012). Effects of frequency compression hearing aids for unilaterally implanted children with acoustically amplified residual hearing in the nonimplanted ear. *Ear and Hearing*, 33(4), e1-e12.
- Perreau, A. E., Bentler, R. A., & Tyler, R. S. (2013). The contribution of a frequency-compression hearing aid to contralateral cochlear implant performance. *Journal of the American Academy of Audiology*, 24(2), 105-120.
- Shannon, R. V., Zeng, F. G., Kamath, V., Wygonski, J., & Ekelid, M. (1995). Speech recognition with primarily temporal cues. *Science*, 270(5234), 303-304.
- Siburt, H. W. & Holmes, A. E. (2015). Bimodal programming: A survey of current clinical practice. *American Journal of Audiology*, 24(2), 243-249.
- Spahr, A. J., Dorman, M. F., Litvak, L. M., Van Wie, S., Gifford, R. H., Loizou, P. C., et al. (2012). Development and validation of the AzBio sentence lists. *Ear and Hearing*, 33(1), 112-117.
- UK Cochlear Implant Study Group. (2004). Criteria of candidacy for unilateral cochlear implantation in postlingually deafened adults II: Cost-effectiveness analysis. *Ear and Hearing*, 25(4), 336-360.
- Ullauri, A., Crofts, H., Wilson, K., & Tittle, S. (2007). Bimodal benefits of cochlear implant and hearing aid (on the non-implanted ear): A pilot study to develop a protocol and a test battery. *Cochlear Implants International*, 8(1), 29-37.
- Veugen, L. C. E., Chalupper, J., Snik, A. F. M., van Opstal, A. J., & Mens, L. H. M. (2016a). Frequency-dependent loudness balancing in bimodal cochlear implant users. *Acta Oto-Laryngologica*, 136(8), 775-781.
- Veugen, L. C. E., Chalupper, J., Snik, A. F. M., van Opstal, A. J., & Mens, L. H. M. (2016b). Matching automatic gain control across devices in bimodal cochlear implant users. *Ear and Hearing*, 37(3), 260-270.
- Vroegop, J. L., Goedegeure, 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., & Goedegeure, A. (2019). Comparing two hearing aid fitting algorithms for bimodal cochlear implant users. *Ear and Hearing*, 40(1), 98-106.
- 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.
- Zhang, T., Dorman, M. F., Gifford, R., & Moore, B. C. J. (2014). Cochlear dead regions constrain the benefit of combining acoustic stimulation with electric stimulation. *Ear and Hearing*, 35(4), 410-417.