



Assessing the Effectiveness of a Tablet-Based Hearing Screening Device for School Hearing Screening

Chae-Yeon Yu¹ , Jin Gyun Park² , Chang Wook Kang³ , Jin Kyung Mok⁴ ,
Myung-Whan Suh¹ , Jun Ho Lee¹, and Moo Kyun Park¹

¹Department of Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery, Seoul National University Hospital, Seoul National University College of Medicine, Seoul; and

²Demant Korea Co., Ltd., Seoul; and

³Kangnam University Special Education & Rehabilitation Research Institute, Yongin; and

⁴Diatec Korea Co., Ltd., Seoul, Korea

학교 청력검사에 활용 가능한 휴대용 태블릿 기반 청각 선별기기의 효과성 평가

유채연¹ · 박진균² · 강창욱³ · 목진경⁴ · 서명환¹ · 이준호¹ · 박무균¹

¹서울대학교 의과대학 서울대학교병원 이비인후과학교실, ²디만트 코리아, ³강남대학교 특수교육재활연구소, ⁴다이어텍 코리아

Background and Objectives Hearing loss during school age can adversely impact language development, academic performance and social functioning. Early detection through accurate screening is therefore essential. However, conventional school hearing tests in Korea are limited by low sensitivity and lack of standardization. This study aimed to evaluate the validity of a tablet-based pure-tone hearing screening method implemented in real-world school settings.

Subjects and Method A total of 207 students (414 ears) from elementary and high schools participated. The screening procedure involved presenting pure-tone stimuli at 25 dB HL across four frequencies (500, 1000, 2000, and 4000 Hz) using a calibrated tablet-based device. Screening outcomes were compared to those obtained from a gold-standard clinical audiometer (Interacoustics AD629). Predictive values, Cohen's kappa, and receiver operating characteristic (ROC) curve analysis were used to assess diagnostic accuracy, agreement, and discriminative ability.

Results The tablet-based hearing screening demonstrated high diagnostic validity. At the participant level, sensitivity, specificity, positive predictive value, and negative predictive value were all 100%. Sensitivity and specificity at all tested frequencies exceeded 99.8%. Cohen's kappa coefficients indicated substantial to perfect agreement (K=0.80–1.00), with perfect agreement (K=1.00) observed at all frequencies. The area under the curve was 1.00 across all frequencies, reflecting perfect discrimination.

Conclusion The findings support the validity of the tablet-based pure-tone screening method for application in school-based hearing assessments. Its high diagnostic accuracy and strong agreement with the gold-standard audiometric test highlights its potential as a reliable and scalable alternative for enhancing current school hearing screening practices.

Korean J Otorhinolaryngol-Head Neck Surg 2026;69(2):86-94

Keywords Children; Hearing loss; Mass screening; Mobile applications; Students.

Received June 14, 2025

Revised July 3, 2025

Accepted July 7, 2025

Address for correspondence

Moo Kyun Park, MD, PhD
Department of Otorhinolaryngology-
Head and Neck Surgery,
Seoul National University Hospital,
Seoul National University
College of Medicine, 101 Daehak-ro,
Jongno-gu, Seoul 03080, Korea

Tel +82-2-2072-2446

Fax +82-2-745-2387

E-mail aseptic@snu.ac.kr

서론

난청은 학령기 아동에게 발생할 경우 전반적인 발달에 중대한 영향을 미치는 기능장애이다. 삼출성 중이염, 만성 중이염, 측두골 외상, 이독성 약물 복용, 면역 이상, 이경화증, 중양, 소음 노출 등 다양한 원인으로 발생되며¹⁾ 한국의 보건복지부에서 발표한 장애인 실태조사²⁾에 따르면 난청이 만5-9세에 발생한 경우는 난청인 전체의 9.5%를 차지하고, 만10-19세에 발생한 경우는 7.1%를 차지하여 학령기에 후천적 난청이 발생하는 경우가 16.6%를 차지한다고 한다.

학령기에 발생하는 난청은 언어 발달, 자음 정확도, 말 명료도, 학습 능력 등 아동의 전반적인 발달에 장애를 초래할 수 있다.³⁻⁷⁾ 특히 최근 연구에서는 편측 또는 경도 난청 아동의 18.3%, 중등도 이상의 난청 아동의 20.6%가 정서적 및 행동적 어려움을 경험하는 것으로 나타나, 난청이 단순한 청력 손실 이상의 심리사회적 문제를 야기할 수 있음이 밝혀졌다.⁸⁾ 이러한 어려움은 과잉행동, 불안 및 우울과 같은 정서적 문제뿐 아니라 사회적 상호작용 능력 저하, 반항적 태도, 규칙 위반과 같은 문제행동으로 나타날 수 있으며, 특히 의사소통의 어려움으로 인한 또래 관계 형성의 좌절감으로 인해 심화될 가능성이 높다. 따라서 학령기 아동의 난청을 조기에 발견하고 관리할 수 있는 신뢰도 높은 검사 체계 마련이 필요하다.

이러한 학령기 난청의 영향으로 국제 보건 기구들은 아동 청력 선별검사가 중요하다고 말한다. 세계보건기구(World Health Organization, WHO)는 학령기 아동을 대상으로 정기적인 청력 검진 프로그램을 운영할 것을 권고하였다. WHO는 모든 아동은 초등학교 입학 시점과 그 이후에 주기적으로 청력 검진을 받을 필요가 있다고 World Report on Hearing 보고서에 명시하고 있으며, 조기 발견과 개입이 아동 발달에 있어 핵심적 역할을 한다고 강조하였다.⁹⁾ 또한, 미국의 Joint Committee on Infant Hearing은 2007년 발표한 권고문에서 선별검사의 양질의 관리를 위한 핵심 지표로 민감도 95% 이상, 위양성률 15% 이하를 제시하였으며, 선별검사 프로그램은 이러한 품질 기준을 충족해야 함을 강조하였다.¹⁰⁾ 미국 청각학회(American Academy of Audiology, AAA)는 3세 이상의 아동을 대상으로 500, 1000, 2000, 4000 Hz의 주파수에서 20 dB HL 강도로 청력 선별검사를 실시할 것을 권장하고 있다.¹¹⁾ 지침에 따르면, 아동이 검사 주파수 중 하나라도 인지하지 못할 경우 'Refer'로 분류하고, 추가 평가를 통해 조기 개입을 유도해야 한다. 이러한 국제 지침들은 학령기 아동을 대상으로 청력 선별검사를 체계적으로 시행하는 것이 난청의 조기 발견과 개입에 필수적임을 뒷받침한다.

한국에서는 2018년 10월 1일부터 신생아 청각선별검사를

건강보험적용 대상에 포함시켜 태어나는 모든 신생아들에게 청각선별검사를 실시하도록 하였다. 또한, 출생 후 입원 중 시행되는 검사를 전액 건강보험으로 지원하고 있으며, 외래에서 시행되는 경우에도 본인 부담금의 일부를 지원받을 수 있도록 하였다.¹²⁾ 이를 통해 효과적인 난청 조기 발견을 이루어 내고 있으나 후천적으로 발생하는 청각장애의 경우, 신생아 선별검사를 통과하더라도 학령기에 새롭게 나타날 수 있어 지속적인 검사가 필요하다.

해외에서는 학령기 아동의 청력 문제를 조기에 발견하고 개입하기 위해 국가 또는 지역 단위의 선별검사 체계를 운영하고 있다. 스웨덴의 경우 대부분의 지방자치단체에서 초등학교 또는 중등학교 재학 중 최소 한 차례 이상 1000-4000 Hz 주파수에서 20-25 dB HL 자극 강도로 청력 선별검사를 실시하고 있다.¹³⁾ 미국은 연방 차원의 의무 규정은 없지만, 각 주에서는 AAA 권고를 기반으로 학교 청력검사를 시행하고 있으며, 조지아 주와 오클라호마 주 등은 1000, 2000, 4000 Hz에서 20 dB HL 자극음을 사용하고, 명확한 검사 절차와 판정 기준을 갖춘 체계를 운영하고 있다.^{14,15)} 그러나 현재 한국의 학교 청력검진은 1000 Hz 단일 주파수, 40 dB HL 자극 강도의 검사 방식에 의존하고 있으며, 검사 장비 또한 명확하게 규정되어 있지 않다.¹⁶⁾ 또 다른 검사 방식으로는 귓속말 검사로 주관성이 높은 비표준화된 방법이 병행되기도 하여, 경도 난청의 조기 발견에는 상당한 한계를 가진다. 이는 국제 임상 기준과 비교했을 때 현저히 완화된 기준이며, 신뢰성과 민감도가 모두 떨어지는 방법이다. 이에 따라, 신뢰할 수 있고 학교 환경에 적용할 수 있는 청각 선별검사 장비와 구체적인 난청 기준에 대한 고려가 필요하다.

본 연구에서는 태블릿 기반의 청각 선별검사 도구 MAICO® easyTone (MAICO Diagnostics GmbH)을 사용하여 태블릿 기반 난청 선별검사의 타당성을 검증하고, 학교 청력검진의 활용 가능성을 평가하고자 한다. 이를 위해 먼저 난청인에 대하여 태블릿 기반 선별검사가 적절한 선별 능력을 갖추고 있는지를 사전 점검하기 위하여 연구 설계 타당성 및 검사 장비 적용 가능성을 평가하는 파일럿 연구를 선행하였다. 본 실험에서는 실제 초등학교와 고등학교에서 기존의 진단용 청력검사 장비 Interacoustics® AD629 (Interacoustics A/S)의 검사 결과와 태블릿 기반의 청각 선별검사의 결과를 비교하여 분석하였다.

대상 및 방법

검사 도구

난청선별검사에서는 easyTone을 사용하였고, 이와 함께

동일 제조사의 DD65 v2A 차음 헤드폰(MAICO Diagnostics GmbH)을 사용하였다. easyTone은 좌우 귀 모두에 대해 500, 1000, 2000, 4000 Hz의 주파수에서 청력 선별검사를 수행할 수 있으며, 각 주파수마다 25 dB HL의 자극음을 3회씩 제시한다. 대상자는 자극음을 들었을 경우 반응 버튼을 누르도록 안내받았으며 검사자는 피험자의 반응 여부를 수동으로 기록한다. 반응 기록 버튼은 반응하지 못한 경우 우측의 빨간색 X 버튼 그리고 반응한 경우 그 아래 초록색 체크 버튼이다. 각 주파수에서 2회 이상 반응이 있으면 해당 주파수는 Pass로 판정하였고, 모든 주파수에서 Pass일 경우 최종 Pass, 하나 이상의 주파수에서 2회 이상 반응이 없을 경우 최종 Refer로 판정하였다. Fig. 1은 검사 화면의 모습이다.

파일럿 연구를 진행한 병원의 진료실과 본 연구를 진행한 교실 내 소음은 선별검사 장비를 통해 실시간으로 측정되었으며, 미국 국가표준협회(American National Standards Institute, ANSI)의 최대 허용 주변 소음 기준(ANSI S3.1-1999[R2008]¹⁷⁾)을 준수하였다. 이는 청력검사 중 소음 간섭을 최소화하기 위해 설정된 주파수별 소음 상한치로, 검사 신뢰도에 영향을 미칠 수 있는 중요한 환경 요인이다. 장비는 주변 소음 수준을 실시간으로 측정하여 세 가지 색상(초록, 노랑, 빨강)으로 시각화하였고, 검사 진행은 소음이 가장 낮

음을 나타내는 초록색 표시가 유지될 때에만 시행하였다.

Table 1에서의 maximum level은 허용가능한 최대 주변 소음을 뜻하는 maximum permissible ambient noise levels (MPANLs)을 뜻한다. 이는 검사 강도 중 가장 낮은 강도와 easyTone 감쇄값을 더하여 계산하는 것으로, 본 연구에서는 25 dB HL 강도를 사용하였기 때문에 25 dB HL에 주파수에 따른 감쇄값을 더하여 사용하였다. 예를 들어, 1000 Hz에서는 감쇄값 45.4를 더하여 최대 허용 소음 수준인 70.4 dB SPL이 설정되었다. easyTone의 각 주파수별 감쇄값과 25 dB HL 강도로 검사할 경우의 maximum level을 구한 표는 Table 2와 같다.

MPANLs는 허용 가능한 최대 주변 소음을 뜻하는 것으로, 검사 자극 강도에 주파수별 감쇄값을 더하여 산출되어 본 연구에서는 25 dB HL 자극음을 기준으로 각 주파수별 MPANLs를 계산하였다.

진단검사에는 AD629 장비와 DD65 v2 차음 헤드폰(Interacoustics® DD65 v2)이 사용되었다. AD629는 250-8000 Hz 범위의 순음 자극을 제시할 수 있다. 자극 강도는 순음청력검사에서 -10 - 100 dB HL까지 제시 가능하다.



Fig. 1. Screenshot example of the easyTone screening interface. The interface displays selectable test frequencies, real-time ambient noise indicators (green, orange, and red), and user-friendly controls.

Table 1. easyTone's color coding criteria for noise intensity levels

Color	Noise intensity level range
Green	15 dB < Noise Level < Max. Level -3 dB
Orange	Max. Level -3 dB < Noise Level < Max. Level
Red	Max. Level < Noise Level

Table 2. easyTone's maximum allowable level for 25 dB HL screening

Frequency	Intensity for screening	Attenuation value	MPANLs
500 Hz	25 dB HL	42.1	67.1 dB SPL
1000 Hz	25 dB HL	45.4	70.4 dB SPL
2000 Hz	25 dB HL	57.6	82.6 dB SPL
4000 Hz	25 dB HL	54.8	79.8 dB SPL

MPANLs, maximum permissible ambient noise levels.

연구 절차

파일럿 연구의 대상자는 서울대학교병원의 이비인후과 전문의의 진료를 통해 난청이 확진된 환자들이다. 대상자의 연령은 성인이므로 본인의 자발적인 동의 하에 연구가 진행되었다. 모든 검사는 2023년 7월에 서울대학교병원에서 진행되었고, 선별검사는 조용한 진료실에서, 진단검사는 이비인후과 청력검사실의 방음실에서 진행되었다.

본 연구에서의 모든 검사는 선별검사 장비와 진단검사 장비의 사용법을 알고 청각학에 대한 전문적인 지식이 있는 청능사가 시행하였다. 본 연구의 대상자는 초등학교생과 고등학교생으로 미성년자이므로 연구 참여를 위한 동의서는 학생 본인과 보호자 모두의 서명을 받아 수집하였다. 사전에 각 학급에 가정통신문을 배부하였는데, 상단에는 연구 목적과 절차를 설명하고 하단에는 보호자와 학생이 자발적인 참여 의사를 명시할 수 있도록 신청서를 첨부하였다. 검사 장소는 초등학교와 고등학교의 일반 교실로 지정하였으며, 검사 대상자 1명씩 순차적으로 입실시켜 검사를 진행하였다. 초등학교 4학년은 2023년 12월 22일, 5학년은 12월 21일, 고등학교 2학년은 12월 26일부터 28일까지 3일에 걸쳐 검사를 진행하였다. 연구자들은 easyTone 장비와 AD629 장비를 교실로 직접 이송하여, 한 명씩 개별적으로 검사를 시행하였다.

청력검사 시 검사 대상자는 Fig. 2와 같이 검사자를 등지고 앉아 헤드폰을 착용한 상태에서 자극음을 들었을 때 손을 들어 반응하도록 안내받았다. 진단검사는 수정상승법(modified Hughson-Westlake method)을 사용하여 역치를 측정하였다. 자극음은 1000 Hz에서 40 dB HL로 시작하여 대상자가 반응한 경우 자극 강도를 10 dB씩 감소시키고, 반응하지 않으면 5 dB씩 증가시키는 방식으로 조정하였다. 검사 순서는 우측 귀의 1000, 2000, 4000, 500 Hz 순으로, 이어서 좌측 귀에 대해 동일한 주파수 순서로 진행되었다. 각 주파수



Fig. 2. Demonstration of hearing screening using easyTone at high school in Seoul. The participant is seated in a quiet classroom and wears earphones connected to a tablet device. The screening follows a fixed sequence of frequencies (500, 1000, 2000, and 4000 Hz) for both ears. When a tone is heard, the participant raises their hand to indicate detection. The examiner monitors ambient noise levels via the device and provides instructions as needed. This setup reflects the actual procedure used in school-based hearing screenings.

에 대해 최소 2회 이상 동일한 역치 반응이 확인된 경우 해당 주파수의 청력 역치로 기록하였다. 전체 검사 소요 시간은 난청선별검사는 약 1-2분, 순음청력역치검사는 약 4-5분 정도로 측정되었으며, 모든 검사는 동일한 장비와 절차에 따라 일관되게 수행되었다.

연구 참여와 관련된 모든 절차는 서울대학교병원 연구윤리심의위원회(Institutional Review Board, IRB)의 승인을 받았다(H-2210-157-1374).

결 과

본 연구에 앞서, 태블릿 기반 검사 장비의 진단적 성능을 기초적으로 평가하기 위한 파일럿 연구를 성인 난청인 57명(114개 귀)을 대상으로 선행하였다. 남자는 25명, 여자는 32명으로 평균 연령은 56.4 ± 5.16 세이다. 해당 연구에서는 500-8000 Hz의 다양한 주파수에서 민감도 95.5%-98.5%, 특이도 84.8%-98.2%의 결과를 보이며 도구 타당성이 높은 것을 확인했으며 구체적인 수치는 Table 3에 나타내었다.

파일럿 연구를 바탕으로, 본 연구는 일반 학교 아동을 대상으로 실제 학교에서의 적용 가능성과 타당성을 평가하는 데 목적을 두고 수행하였다. 본 연구에 최종 참여한 대상자는 초등학교생 77명(154개 귀), 고등학교생 130명(260개 귀)으로, 총 207명, 414개의 귀를 검사하였다. 초등학교생의 평균 연령은 만 10.42세, 고등학교생의 연령은 만 17세로 집계되었으며, 전체 대상자 중 초등학교생은 남자 40명, 여자 37명, 고등학교생은 남자 103명, 여자 27명으로 구성되었다. 순음청력검사(AD629)를

Table 3. Sensitivity, specificity, and predictive values according to frequency and participant-level in pilot study (n=114)

	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Sensitivity	95.8%	96.4%	98.5%	98.5%	95.5%
Specificity	84.8%	98.2%	93.6%	93.6%	92.0%
Positive predictive value	82.1%	98.2%	95.6%	95.6%	97.7%
Negative predictive value	96.5%	96.5%	97.7%	97.7%	85.1%

Table 4. Participant demographics

	Elementary school students' ear (n=77, 154 ears)	High school students' ear (n=130, 260 ears)
Age (year)	10.42±0.5	17±0
Sex		
Male	40	103
Female	37	27
PTA (dB HL)		
Right	5.1±3.5	4.3±4.1
Left	4.6±3.7	4.1±4.6

PTA, pure-tone average; calculated as the average threshold at 500, 1000, 2000, and 4000 Hz.

Table 5. Sensitivity, specificity, and predictive values according to frequency and participant-level (n=141)

	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Sensitivity	-	100	100	100
Specificity	100	99.8	100	100
Positive predictive value	-	66.7	100	100
Negative predictive value	100	100	100	100

Sensitivity and positive predictive value for 500 Hz could not be calculated due to the absence of true positive and false negative cases (0/0).

통해 산출된 양측 귀의 평균 청력 역치(pure-tone average)는 초등학교의 경우 우측 귀에서 5.1±3.5 dB HL, 좌측 귀에서 4.6±3.7 dB HL이었고, 고등학교생은 각각 4.3±4.1 dB HL, 4.1±4.6 dB HL로 측정되었다(Table 4).

총 207명의 대상자(414개의 귀)를 대상으로 태블릿 기반 선별검사와 진단검사를 실시한 결과, 두 검사에서의 최종 검사 결과는 모든 대상자에 대해 완전히 일치하였다. 이에 따라 대상자 단위에서의 민감도(sensitivity), 특이도(specificity), 양성예측도(positive predictive value, PPV), 음성예측도(negative predictive value, NPV)는 모두 100%로 나타났다. 그러나 주파수별로 분석한 결과, 1000 Hz에서는 참양성(true positive)이 2건, 거짓양성(false positive)이 1건 발생하였으며, 거짓음성(false negative)은 나타나지 않았다. 이에 따라 민감도는 100%, 특이도는 99.8%, PPV는 66.7%, NPV는 100%로 나타났다. 2000 Hz와 4000 Hz에서는 각각 2건의 참양성만 확인되었으며, 거짓양성과 거짓음성은 발생하지 않아 민감도, 특이도, PPV, NPV 모두 100%로 분석되었다. 500 Hz에서는 난청 사례가 확인되지 않았으며, 모든 결과가

Table 6. Diagnostic agreement between tablet-based and standard hearing tests (Cohen's Kappa)

Frequency	Pa	Pc	K	Agreement Level
500 Hz	1.000	1.000	N/A	-
1000 Hz	0.998	0.998	0.799	Substantial agreement
2000 Hz	1.000	0.995	1.000	Almost perfect agreement
4000 Hz	1.000	0.990	1.000	Almost perfect agreement

Pa, proportion of observed agreement; Pc, proportion of agreement expected by chance; K, Cohen's Kappa coefficient; N/A, not applicable; no positive cases were observed, resulting in division by zero during calculation.

Table 7. AUC of the tablet-based hearing screening by frequency

Frequency	AUC value	95% confidence interval	p-value
500 Hz	1.00	Not applicable	N/A
1000 Hz	1.00	Not applicable	N/A
2000 Hz	1.00	Not applicable	N/A
4000 Hz	1.00	Not applicable	N/A

AUC, area under the curve; N/A, not available due to perfect discrimination.

음성(Pass)으로 확인되어 참양성과 거짓음성 모두 0으로 나타났다. 이로 인해 해당 주파수의 민감도와 양성예측도는 분모가 0 (0/0)인 구조로 계산이 불가능하였으며, 특이도와 음성예측도는 모두 100%로 산출되었다(Table 5).

진단검사와 태블릿 기반 선별검사 간의 최종 판정 일치도에 대한 Cohen's Kappa 분석 결과, 대부분의 조건에서 K값이 0.80 이상으로 나타났으며, 이는 상당히 높은 수준의 일치(Substantial to Almost Perfect Agreement)를 의미한다(Table 6). 특히 일부 주파수에서는 관찰된 일치율(Pa)과 기대 일치율(Pc)이 모두 1.0으로 완전한 일치(K=1.0)를 보였다. 다만, 난청 케이스가 전혀 없었던 500 Hz에서는 0으로 나누어야 하는 계산 오류가 발생하게 되어 해당 주파수에 대한 Kappa 분석은 불가능하였다.

또한 모든 주파수(500, 1000, 2000, 4000 Hz)에서의 receiver operating characteristic (ROC) curve 분석 결과 area under the curve (AUC) 값은 1.00으로 나타났다(Table 7). 이는 태블릿 기반 선별검사가 진단검사와 비교했을 때 난청 여부를 완벽히 구별하였음을 의미한다. 모든 AUC 값이 완벽한 분리(perfect separation)를 보였기 때문에 95% 신뢰구간(confidence interval) 및 p-value는 통계적으로 산출되지 않았다.

고찰

본 연구에서는 학교 청력검진으로 사용 가능한 태블릿 기반 선별검사와 진단용 청력검사의 결과를 비교하여 난청을 판별할 수 있는지를 검증하였다. 초등학생 및 고등학생 총 207명을 대상으로 양측 귀 414개에 대해 검사를 실시한 결과, 두 검사 간의 최종 판정(Pass/Refer) 일치율은 100%였으며, 각 주파수의 민감도, 특이도, 양성 및 음성 예측도는 1000 Hz 양성예측도를 제외하고 99.8%~100%로 나타났다. 또한 Cohen's Kappa 분석 결과, Substantial 또는 Almost Perfect 수준으로 상당히 높은 수준의 일치가 확인되었다. 특히 일부 주파수에서는 $K=1.0$ 으로 완전한 일치를 나타냈으며 이는 태블릿 기반 선별검사가 진단검사와 유사한 수준의 정확성을 보이고 있음을 의미하여 학교 기반 청력검사에서 신뢰도 높은 검사 방법으로 활용될 수 있음을 나타낸다. ROC 분석 결과, 모든 주파수에서 AUC 값이 1.00으로 나타났다. 이는 선별검사가 진단검사에 따라 난청군과 정상군을 완벽하게 분류할 수 있는 성능이 있음을 의미하며, 검사의 타당도 측면에서 매우 우수한 결과로 해석된다. 다만, 모든 AUC가 1.00이라는 점은 현실적으로 드물며, 본 연구의 표본이 장애학교가 아닌 일반 학교를 기반으로 하고 있어 난청자의 비율이 낮고, 총 표본의 수가 207명으로 적다는 특성에 의해 과도하게 높은 타당도가 나타났을 가능성도 있다.

다만 주파수 단위의 분석에서는 일부에서 예외가 나타났다. 특히 1000 Hz에서는 위양성 반응이 나타나면서 특이도가 99.8%, 양성 예측도는 66.7%로 낮게 측정되었다. 이는 개별 주파수 단위에서의 판정에서 검사 반응의 편차가 존재할 수 있음을 나타내며, 주파수 단위의 결과 해석에는 다소의 주의가 필요함을 알 수 있었다. 그럼에도 불구하고, 검사 간 최종 판정이 완전히 일치한다는 점에서, 학교 기반 청력검사 방법으로서의 타당성이 충분하다고 사료된다.

파일럿 연구는 태블릿 기반 난청 선별검사의 임상적 적용 가능성을 지지하는 보완적 근거가 된다. 동일한 검사 도구와 방법으로 성인 난청인 57명을 대상으로 진행된 파일럿 연구에서는 500~8000 Hz 전 주파수에서 민감도는 95.5%~100%, 특이도는 84.8%~100%, 양성 예측도는 82.1%~100%, 음성 예측도는 85.1%~100%로 나타났다. 특히 500 Hz에서 모든 수치가 100%로 계산되었으며, 고주파수 영역에서도 높은 정확도를 보였다. 비록 파일럿 연구와 본 연구 간의 대상자 특성(연령, 청력 상태)은 상이하지만, 이 결과는 태블릿 기반 선별검사가 난청 집단에서도 높은 수준의 진단적 타당성을 보인 사전 검토가 이루어졌다는 점에서 본 연구의 타당도를 높이는 기반이 되었다. 또한 향후 다기관 또는 대규모 연구에서의

선별검사의 높은 타당성에 대한 가능성을 제공한다는 점에서 의의가 있다.

해외 사례를 살펴보면, 스웨덴 대부분의 지방자치단체에서는 초등학교 재학 중 한 차례 이상 청력 선별검사를 실시하고 있었으며, 이 중 약 절반에 가까운 지역에서는 초등학교와 중등학교에서 각각 한 차례씩 검사를 시행하는 것으로 나타났다. 일부 지역은 초등학교에서 두 번의 선별검사를 실시하거나, 중등학교에서만 단독으로 시행하는 경우도 보고되었다. 검사에 사용된 주파수는 대체로 500, 1000, 2000, 4000, 6000 Hz의 총 5가지로 구성되었으며, 이 중에서도 1000~4000 Hz 구간은 거의 모든 지자체에서 공통적으로 사용되었다. 자극 강도의 경우, 84%의 지역에서는 20 dB HL 기준으로 검사가 수행되었으며, 10.7%의 지역은 25 dB HL 이상의 자극 강도를 적용하고 있어 검사 민감도의 일관성 측면에서 편차가 존재하였다. 또한 검사 시기, 검사 환경에서 지역 간 차이가 있었으며 이민 아동 포함 여부와 같이 검사 대상군에서도 차이가 있었다.¹³⁾

미국에서는 연방 차원의 청력 선별검사 의무 규정은 없지만, 각 주에서 자체적인 지침을 세워 학교 기반 검사를 실시하고 있다. 조지아 주 보건부는 Guidelines for Hearing Screening by Audiometer¹⁴⁾를 통해 검사 주파수를 1000, 2000, 4000 Hz로 정하고, 각 주파수마다 20 dB HL의 자극음을 두 차례씩 제시하도록 규정하고 있다. 학생은 자극음을 들었을 경우 손을 들어 반응하며, 두 번 모두 반응하면 'Pass', 한 번만 반응하거나 반응하지 못한 경우에는 'Refer'로 평가된다. 검사는 오른쪽 귀부터 시작하여 한 귀씩 독립적으로 실시되며, 검사자는 학교 간호사, 청각학자, 언어병리사 또는 관련 훈련을 이수한 자로 한정된다. 사용되는 청력계는 ANSI S3.6 기준을 충족하고, 정기적으로 보정된 순음 청력계여야 하며, 차음 헤드폰을 반드시 사용해야 한다. 검사 환경은 가능한 한 방음 부스를 사용하는 것이 권장되며, 부득이한 경우 조용한 환경에서 소음 간섭을 최소화한 상태에서 실시되어야 한다. 'Refer' 판정이 내려진 경우에는 2~4주 내 재검사를 실시하고, 재검에서도 동일한 결과가 나타날 경우 청각학자 또는 이비인후과 전문의의 평가로 연계된다.

오클라호마 주 보건부 역시 School Hearing Screening Guidelines¹⁵⁾을 통해 유사한 청력 선별검사 체계를 운영하고 있다. 검사 주파수는 조지아 주와 동일하며, 각 주파수마다 20 dB HL의 자극음을 한 차례씩 제시한다. 학생은 자극음을 인지했을 경우 버튼을 누르거나 손을 들어 반응하며, 세 주파수 모두에서 반응이 있으면 'Pass', 한 주파수라도 반응하지 못하면 'Refer'로 판정된다. 장비는 ANSI 기준을 충족하고 연 1회 이상 보정된 청력계를 사용해야 하며, TDH-39 또

는 그에 준하는 성능의 차음 헤드폰을 사용해야 한다. 검사자는 학교 간호사, 언어병리사, 특수교사, 청각학자 또는 교육구에서 지정한 훈련 이수자로 한정된다. 검사 장소는 방음 부스를 사용하는 것이 가장 이상적이지만, 일반 교실이나 보건실에서도 출입문과 창문을 닫고 주변 소음과 외부 잡음을 최소화할 수 있는 조건을 충족하면 검사가 가능하다. 'Refer' 판정이 내려진 학생은 최소 2주 후 재검사를 받고, 청력 저하가 지속되는 경우 전문 의료기관으로의 연계가 권장된다.

학교 청력 선별검사에 대한 국제적 비교는 검사 주파수, 자극 강도, 판정기준, 장비 기준 등 여러 항목에서 차이가 있음을 보여준다. 이러한 차이를 Table 8에 요약하였다. 특히 미국과 스웨덴은 대체로 20 dB HL로 낮은 강도에서 여러 주파수를 검사하고 있는 반면, 한국은 40 dB HL로 높은 강도에서 1000 Hz만을 검사하고 있다. 이는 국내 학교 청력검진의 한계를 보여주며 국가적 지침의 개정 필요성을 뒷받침한다.

또한 미국 내에서는 기존 청력검사의 제약을 보완하고 접근성을 높이기 위한 기술 기반 검사도 개발되고 있다. Mahomed-Asmail 등¹⁸⁾은 미국 내 5-12세 아동 2000명을 대상으로 스마트폰 기반 청력 선별검사 시스템인 hearScreen™의 임상 유효성을 검토하였다. 검사 주파수는 1000, 2000, 4000 Hz로 설정되었고, 각 주파수마다 20 dB HL 자극음을 한 차례씩 제시하였다. 학생은 자극음을 들었을 때 화면에 나타나는 반응 버튼을 눌러 응답하였으며, 검사 결과는 앱과 연동된 시스템을 통해 자동 기록 및 판정되었다. 검사 정확도는

민감도 75.0%, 특이도 98.5%를 기록하였고, 검사 시간은 기존 검사 대비 평균 12.3% 단축된 것으로 나타났다.

학교 청력검진을 위한 태블릿 기반 청력검사 타당도를 평가한 다른 연구에서는 태블릿 기반 청력검사 앱인 Kids Hearing Game (KHG)을 사용하여 타당성을 평가하였다.¹⁹⁾ 6-9세의 18명의 아동, 총 26개 귀를 대상으로 일반 청력검진을 시행하고 KHG를 조용한 방에서 실시하였다. 500, 1000, 2000, 4000 그리고 8000 Hz에서 역치를 확인하였고, 제시한 가장 낮은 소리 강도는 20 dB이었다. KHG는 잔잔한 강을 따라 움직이는 배에 앉은 1인칭 시점에서 소리가 들렸을 때 반딧불이를 눌러서 잡는 게임 방법으로 진행된다. 연구의 결과, 왼쪽 귀 500 Hz를 제외한 모든 구간에서 0.05 미만의 *p*-value를 나타냈다.

또다른 연구에서는 스마트폰 기반의 선별검사의 타당성을 검증하였다.²⁰⁾ 6-8세 아동 85명, 총 170개 귀를 대상으로 기존의 표준 순음 청력 검사를 시행하고, 학교 내 조용한 회의실에서 Ear Scale 앱이 설치된 스마트폰과 표준화된 이어폰을 통해 검사를 시행하였다. 스마트폰으로 검사를 시행하기 전에 앱의 내장 소음 측정 기능을 통해 검사 환경 소음 수준이 50 dBA 미만임을 확인하여 적합한 환경임을 확인하고 검사를 시행하였다. 검사 자극음은 500 Hz에서는 25 dB HL, 1000, 2000, 4000 Hz에서는 각각 20 dB HL이었고, 참가자가 자극음을 들었을 때 스마트폰 화면의 버튼을 누르는 방식으로 반응을 확인하였다. 검사의 결과는 모든 주파수에서

Table 8. Comparison of international school-based hearing screening guidelines

Authority	Target age group	Equipment standards	Frequency (Hz)	Intensity (dB HL)	Pass criteria
American Academy of Audiology ¹¹⁾	Children aged 3 years and older	Calibrated audiometer meeting ANSI S3.6; supra-aural or insert headphones recommended	500, 1000, 2000, 4000	20	1 presentation, 1 response per frequency
Georgia Department of Public Health ¹⁴⁾	Preschool and school-age children (≥ 3 years)	Calibrated audiometer meeting ANSI S3.6; supra-aural headphones required	1000, 2000, 4000	20	2 presentations, 2 responses per frequency
Oklahoma State Department of Health ¹⁵⁾	Preschool and school-age children (≥ 3 years)	Calibrated audiometer meeting ANSI S3.6; supra-aural headphones required	1000, 2000, 4000	20	1 presentation, 1 response per frequency
Sweden (local Municipalities) ¹³⁾	Varies by region (at least once in elementary or both elementary and secondary levels)	Calibrated audiometer meeting ANSI S3.6; supra-aural or insert headphones recommended	500, 1000, 2000, 4000	20 or 25	1 or 2 presentations and responses (varies)
Ministry of Health and Welfare, Republic of Korea ¹⁶⁾	1st and 4th grade (elementary), 1st grade (middle and high school)	Not specified	1000	40	Not specified

ANSI, American National Standards Institute.

자극음을 인지한 경우 '통과', 한 가지 이상의 주파수에서 자극음을 인지하지 못한 경우 '실패'로 판정하였다. 기존 순음 청력 검사 결과와 스마트폰을 통한 검사의 결과를 비교하였을 때 민감도와 특이도가 모두 100%로 두 검사 간의 높은 상관관계를 보여 스마트폰 앱을 통한 선별검사의 타당성을 입증하였다.

학교 청력검진 체계의 실질적 개선을 위해서는 해외 사례와 같이 다양한 주파수 대역과 낮은 자극 강도를 반영한 검사 기준 제정이 필요하다. 현재 한국은 검사 주파수가 1000 Hz로 제한되고 난청 기준이 40 dB HL로 설정되어 있어 정도 난청 아동의 조기 발견에 한계가 있다. 또한 귓속말 검사와 같이 비표준화된 검사 방식은 민감도는 87%~96%, 특이도는 70%~90%로 보고되었으며, 검사자 간 신뢰도(Cohen's κ)가 <0.6 수준으로 낮게 나타나 "환경 소음 수준 및 검사자에 따른 영향이 컸다"고 결론지어진 검사로 신뢰성 확보가 어려운 검사 방식이다.²¹⁾ 이러한 현실적 제약 상황에서 스마트폰이나 태블릿을 이용한 선별검사 방법은 실질적인 개선책이 될 수 있을 것이며 본 연구는 그 기반이 될 수 있을 것이다.

그럼에도 본 연구는 몇 가지 제한점을 가지고 있다. 첫째, 대상자 수는 총 207명으로, 초기 연구 설계에서 목표한 300명에 미치지 못하였다. 둘째, 연구가 대부분 정상 청력을 가진 아동을 대상으로 진행되었으며, 난청 아동의 비율이 극히 적었다. 이는 한국의 경우 청각장애 아동이 주로 특수학교에 재학하고 있어, 일반 학교 기반의 연구 설계상 난청 아동 포함이 어려웠기 때문이다. 또한 이로 인하여 일부 주파수에서는 난청 사례가 전혀 발생하지 않아 통계 분석의 제한도 있었다. 셋째, 실제 검사는 일반 교실과 같은 학교 환경에서 조용한 조건에서 시행되었으나, 완전한 소음 통제가 이루어지지 못했다. 넷째, 소리가 들릴 때 버튼을 누르는 방식으로 주관적 반응에 의존하므로, 인지 발달이 미숙하거나 협조가 어려운 아동에서는 정확도가 떨어질 가능성이 있다. 마지막으로, 검사 주파수가 500~4000 Hz로 제한되어 있어 4000 Hz 초과 고주파수 청력 손실 탐지에는 한계가 존재한다.

본 연구 대상자의 난청 아동 비율이 매우 낮았지만, 선행된 성인 난청인을 대상으로 진행한 파일럿 연구의 결과를 통해 난청 진단율이 높은 수준임을 확인하였다. 하지만 향후 연구에서는 난청 아동을 충분히 포함하고 다양한 청력 수준의 대상자를 모집하여 소아 난청 탐지율을 보다 명확히 검증할 필요가 있다. 또한 검사자 간 신뢰도, 반복 시행에 따른 재검사 신뢰도 그리고 다양한 환경에서의 일반화 가능성 등을 추가적으로 검토함으로써 태블릿 기반 청력검사의 신뢰성과 임상 적용 가능성에 대한 근거를 강화할 수 있을 것이다.

결론적으로, 본 연구는 태블릿 기반 선별검사가 학교 환경

에서 난청 선별에 효과적임을 확인하였다. 별도의 설치 과정 없이 사용할 수 있으며, 휴대가 간편하고 공간 제약 없이 일반 교실 등 다양한 환경에서 검사가 가능하다. 검사 시간은 평균 1~2분으로 매우 짧아, 다수의 학생을 대상으로 신속한 검사가 가능하며, 장비 가격 또한 진단용 검사장비에 비해 상대적으로 낮아 경제적인 부담을 줄일 수 있다. 실시간 소음 측정 기능은 방음 부스가 없는 환경에서도 주변 소음 수준을 지속적으로 확인하며 검사 시점을 조정할 수 있게 하여 소음을 완전히 차단할 수 없는 상황에서도 간접적인 환경 통제가 가능하게 하며, ANSI 기준에 따라 검사 적정성을 유지할 수 있는 점은 중요한 이점이 된다. 또한 검사 절차가 직관적이고 단순하여 최소한의 교육만으로도 비의료 인력이 검사를 수행할 수 있으며, 이는 의료 자원이 제한된 지역이나 일반 학교에서도 활용도가 높다. 향후 보다 더 많은 수와 다양한 난청 수준의 대상자로 연구가 이루어진다면 학교 청력검진의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것이다.

Acknowledgments

This research was supported and funded by SNUH Kun-hee Lee Child Cancer & Rare Disease Project, Republic of Korea (grant number: FP-2022-00004).

Author Contribution

Conceptualization: Jin Gyun Park, Chang Wook Kang, Jin Kyung Mok, Myung-Whan Suh, Jun Ho Lee, Moo Kyun Park. Data curation: Chae-Yeon Yu. Formal analysis: Chae-Yeon Yu. Funding acquisition: Moo Kyun Park. Investigation: Jin Gyun Park, Jin Kyung Mok. Methodology: Chae-Yeon Yu, Jin Gyun Park, Jin Kyung Mok, Myung-Whan Suh, Jun Ho Lee, Moo Kyun Park. Project administration: Moo Kyun Park. Resources: Jin Gyun Park, Jin Kyung Mok. Software: Chae-Yeon Yu. Supervision: Jin Gyun Park, Jin Kyung Mok, Myung-Whan Suh, Jun Ho Lee. Validation: Moo Kyun Park. Visualization: Chae-Yeon Yu. Writing—original draft: Chae-Yeon Yu. Writing—review & editing: Chae-Yeon Yu, Jin Gyun Park, Moo Kyun Park.

ORCID

Chae-Yeon Yu	https://orcid.org/0000-0001-9709-9761
Jin Gyun Park	https://orcid.org/0000-0002-3904-5850
Chang Wook Kang	https://orcid.org/0009-0006-1451-3079
Jin Kyung Mok	https://orcid.org/0009-0006-9384-027X
Myung-Whan Suh	https://orcid.org/0000-0003-1301-2249
Moo Kyun Park	https://orcid.org/0000-0002-3621-4524

REFERENCES

- 1) Baek MJ. [Sensorineural hearing loss: causes and hearing rehabilitation]. *Hanyang Med Rev* 2015;35(2):57-65. Korean
- 2) Kim SH, Lee YH, Hwang JH, Oh MA, Lee MK, Lee NH, et al. [National survey on persons with disabilities in 2014]. Sejong: Ministry of Health and Welfare, Korea Institute for Health and Social Affairs;2014. Korean
- 3) Giolas TG, Wark DJ. Communication problems associated with unilateral hearing loss. *J Speech Hear Disord* 1967;32(4):336-43.

- 4) Yoshinaga-Itano C, Sedey AL, Coulter DK, Mehl AL. Language of early- and later-identified children with hearing loss. *Pediatrics* 1998;102(5):1161-71.
- 5) Lieu JE. Speech-language and educational consequences of unilateral hearing loss in children. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg* 2004; 130(5):524-30.
- 6) Yoshinaga-Itano C, Sedey AL, Wiggin M, Mason CA. Language outcomes improved through early hearing detection and earlier cochlear implantation. *Otol Neurotol* 2018;39(10):1256-63.
- 7) American Academy of Pediatrics, Joint Committee on Infant Hearing. Year 2007 position statement: principles and guidelines for early hearing detection and intervention programs. *Pediatrics* 2007;120(4):898-921.
- 8) Ong JJ, Smith L, Shepherd DA, Xu J, Roberts G, Sung V. Emotional behavioral outcomes of children with unilateral and mild hearing loss. *Front Pediatr* 2023;11:1209736.
- 9) World Health Organization. World report on hearing. Geneva: World Health Organization;2021.
- 10) Joint Committee on Infant Hearing. Year 2007 position statement: principles and guidelines for early hearing detection and intervention programs. *Pediatrics* 2007;120(4):898-921.
- 11) American Academy of Audiology. Clinical practice guidelines: childhood hearing screening. Reston: American Academy of Audiology;2011.
- 12) Ministry of Health and Welfare. [Guidelines for newborn hearing screening implementation and insurance coverage]. Sejong: Ministry of Health and Welfare;2018. Korean
- 13) Cadena AC, Lindholm N, Stenfeldt K. School-based hearing screening in Sweden—An evaluation of current practices. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol* 2021;150:110938.
- 14) Georgia Department of Public Health. Guidelines for Georgia Public Health hearing screening by audiometer training manual. Atlanta: Georgia Department of Public Health;2013.
- 15) Oklahoma State Department of Health. Guidelines: a school hearing screening program. Oklahoma City: Oklahoma State Department of Health;1994.
- 16) Ministry of Education. [2024–2026 manual for sample schools in the student health examination program]. Sejong: Ministry of Education;2024. Korean
- 17) American National Standards Institute. ANSI/ASA S3.1-1999 (R2008): maximum permissible ambient noise levels for audiometric test rooms. New York: American National Standards Institute;1999.
- 18) Mahomed-Asmail F, Swanepoel de W, Eikelboom RH, Myburgh HC, Hall J 3rd. Clinical validity of hearScreen™ smartphone hearing screening for school children. *Ear Hear* 2016;37(1):e11-7.
- 19) Kung B, Kunda L, Groff S, Miele E, Loyd M, Carpenter DM. Validation study of kids hearing game: a self-administered pediatric audiology application. *Perm J* 2021;25:1.
- 20) Chu YC, Cheng YF, Lai YH, Tsao Y, Tu TY, Young ST, et al. A mobile phone-based approach for hearing screening of school-age children: cross-sectional validation study. *JMIR Mhealth Uhealth* 2019;7(4):e12033.
- 21) Park SN, Choung YH, Chung WH, Oh SH, Park YM, Lee JH, et al. [Validity and reliability of whispered voice test as a screening test for hearing in the elderly people]. *Korean J Otorhinolaryngol-Head Neck Surg* 2008;51(7):609-16. Korean