

순음청력검사기를 위한 리눅스 기반 실시간 스펙트럼 분석기 개발

강덕훈¹, 신범주^{1*}, 전계록², 왕수건³

¹부산대학교 생명자원과학대학 바이오메디컬공학과,

²부산대학교 의학전문대학교 의공학교실,

³부산대학교 의학전문대학원 이비인후과학교실

Development of Linux based Real-Time Spectrum Analyzer for Puretone Audiometer

Deok-Hun Kang¹, Bum-Joo Shin^{1*}, Gye-Rok Jeon² and Soo-Geun Wang³

¹Department of Biomedical Engineering, College of Natural Resource and Life Science, Pusan National University

²Department of Biomedical Engineering, School of Medicine, Pusan National University

³Department of Otolaryngology, School of Medicine, Pusan National University

요약 순음청력검사기는 청력의 손실 여부를 측정하기 위해 사용되는 중요한 의료기기이기 때문에 IEC와 ANSI에서는 순음청력검사기와 관련된 표준을 제시하고 있다. 본 논문은 순음청력검사기가 표준을 준수하는지 검사하기 위해 개발한 리눅스 기반 실시간 스펙트럼 분석기에 대해 기술한다. 본 논문의 실시간 스펙트럼 분석기는 청력 레벨 측정뿐 아니라 IEC에서 규정하고 있는 주파수 정확도, 청력 레벨 선형성, 고조파 왜곡, 단속음, 협대역 잡음에 대한 규정 준수 여부를 판단할 수 있는 기능을 제공한다. 개발한 실시간 스펙트럼 분석기를 상용 보정 시스템과 비교하여 검증한다.

Abstract Because the puretone audiometer is an important medical instrument used to diagnose hearing loss, the IEC and ANSI has been published a specification with which audiometer should comply. This paper describes development of Linux based real-time spectrum analyzer which is dedicated to puretone audiometer. It can measure not only hearing level but also compliance of IEC standard for puretone audiometer such as frequency accuracy, harmonic distortion, pulsed tone, narrow band noise and linearity. We have verified our real-time spectrum analyzer through comparing to commercial product.

Key Words : Audiometer Calibration, Linux based real-time spectrum analyzer, Sound Level Meter

1. 서론

순음청력검사기(puretone audiometer, PTA)는 주파수 별 청력 손실의 정도와 유형을 평가하기 위해 가장 널리 사용되는 중요한 검사기기이다.

순음청력검사기의 청력 측정 결과에 대한 신뢰성을 보장하기 위해 한국산업안전보건공단에서는 순음청력 검사에 관한 지침(H-13-2006)[1]을 규정하고 있다. 이 지침에

서는 순음청력검사기에 대한 보정점검을 기능보정점검, 음향보정점검, 정밀보정점검으로 분류한다.

기능보정점검은 청력역치 수준이 안정적인 사람을 대상으로 1000 Hz와 4000 Hz의 순음에 대한 역치를 매일 점검하는 것이다. 만약 청력검사기의 역치 결과가 피검자의 역치 수준과 10 dB 이상 차이가 나면 음향보정점검을 실시해야 한다. 음향보정점검은 한국산업규격 KSC-1502 또는 ANSI S1.4-1983[2] Type 2을 만족하는 소음계

*이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2010-0027658)

*교신저자 : 신범주(bjshin@pusan.ac.kr)

접수일 11년 04월 29일

수정일 11년 06월 08일

계재확정일 11년 06월 09일

(Sound Level Meter)를 사용하여 보정점검을 시행하는 것이다.

청력검사기와 관련된 국제 표준에는 ANSI S3.6-2004[3], ISO 389[4], IEC 60645-1[5]가 있고, 국내 표준에는 IEC 60645-1을 인용하는 KS C IEC 60645-1:2005[6]가 있다. 표준에서는 청력검사기의 검사음과 관련하여 청력 레벨(hearing level), 주파수 정확도(frequency accuracy), 청력 레벨 선형성(hearing level linearity), 고조파 왜곡(harmonic distortion), 단속음(pulsed tone), 협대역 잡음 레벨(narrow-band noise level) 등을 규정하고 있다. 만약 음향보정점검 결과가 15 dB 이상 차이가 나면 청력검사기 검사기관에 의뢰하여 정밀보정점검을 실시해야 한다. 정밀보정점검은 청력검사기의 검사음이 표준 규정들을 준수하는지 점검하는 것이다. 그리고 모든 보정점검의 기록은 청력검사기가 폐기될 때까지 보존해야 한다[1].

청력검사기관에서 청력검사기의 기능보정점검을 매일 실행하기 위해서는 검사자와 청력 역치 수준이 안정적인 피검자가 필요하고 음향보정점검을 실행하기 위해서는 성능이 뛰어난 소음계가 필요하다. 하지만 청력검사기관에서 보정점검 환경을 모두 갖추는 것은 쉽지 않다. 실제로 김규상 등[7]은 국내 특수건강진단기관의 순음청력검사기에서 보정점검이 체계적으로 실행되지 않고 있다는 연구 결과를 발표하였다. 따라서 청력검사기관의 순음청력검사기에 대한 체계적인 보정점검 대책이 필요하다.

본 논문에서는 보정점검 문제에 대한 해결책으로 PC를 이용하는 리눅스 기반의 실시간 스펙트럼 분석기를 개발한다. 본 논문의 실시간 스펙트럼 분석기는 순음청력검사기의 검사음에 대해 검사 주파수별 음압 레벨 측정 기능을 제공한다. 이 기능을 이용하면 생물학적인 기능보정점검 뿐만 아니라 음향보정점검 수준의 보정점검을 시행하는 효과를 가진다. 또한 청력검사기 국제 표준에서 규정하는 검사음 특성들에 대한 측정 기능도 함께 제공하여 정밀보정점검 수준의 보정점검이 가능하도록 한다.

PC 기반의 실시간 스펙트럼 분석기에는 Jaaa[8], BPR-PACU[9], Jack Meter[10] 등이 있다. Jaaa 및 BPR-PACU는 음향을 분석할 수 있는 기능을 그래픽을 기반으로 제공하며, Jack Meter는 digital peak meter를 제공한다. 그러나 이들은 순음청력검사기의 주파수별 음압 레벨 측정을 위한 기능을 제공하지 않기 때문에 청력검사기의 음향보정점검을 위한 정확한 주파수별 음압 레벨을 측정 할 수가 없다. 따라서 실시간 스펙트럼 분석 결과를 순음청력검사기의 음향보정점검을 위해 사용하기에는 부적절하다.

Larson Davis사의 Audiometer Calibration System[11]과 AUSSCO사의 ACS100 Calibrator[12]는 청력검사기

보정을 위한 전문기기로 음향보정점검과 정밀보정점검을 위한 기능들을 제공한다. 또한 청력검사기 표준 규정을 준수하고 점검 결과의 정밀성이 뛰어난 장점이 있다. 그러나 이 기기들은 고가의 전문기기로 청력검사기관에서 보정점검을 위해 구입하기에는 가격 경쟁력이 떨어지는 단점이 있다. 게다가 다양한 점검 기능과 정밀한 점검 결과를 제공하기 때문에 청력검사기 점검에 대한 전문 지식이 필요하다. 따라서 매일 수행하는 기능보정점검과 필요에 의해 수행하는 음향보정점검 대신 이 시스템을 사용하기에는 부적절하다.

반면 본 논문의 실시간 스펙트럼 분석기는 순음청력검사기의 보정점검을 위해 개발되었기 때문에 음압 레벨 측정 기능을 기본으로 제공하고 측정된 음압 레벨의 정확성 여부 판단도 가능하다. 그리고 전문기기에서 제공하는 검사음 특성 분석 기능을 제공하므로 순음청력검사기가 표준 규정을 준수하는지 검증 가능하다. 또한 PC를 기반으로 개발되었기 때문에 상용 보정 시스템에 비해 가격 경쟁력을 가진다. 따라서 본 논문에서 구현한 실시간 스펙트럼 분석기는 보정점검을 위한 시스템으로 청력검사기관에서 사용하면 많은 장점을 가진다.

본 논문에서는 청력검사기의 기도 및 골도 검사음을 측정하기 위해 실시간 스펙트럼 분석기의 설계 및 구현에 대해 기술하고, 구현한 실시간 스펙트럼 분석기의 성능을 검증하기 위해 상용 보정 시스템[11]과 비교한다.

2. 실험 방법

본 논문의 실시간 스펙트럼 분석기는 2가지 기능을 제공한다. 첫 번째는 순음청력검사기의 기본적인 보정점검을 위한 주파수별 음압 레벨 측정 기능이다. 두 번째는 정밀보정점검을 위한 검사음 특성 측정 기능이다.

본 장에서는 이 기능들을 구현하기 위해 필요한 하드웨어 및 소프트웨어 구성에 대해 기술하고, 각 기능 설계 및 개발 방법에 대해 기술한다.

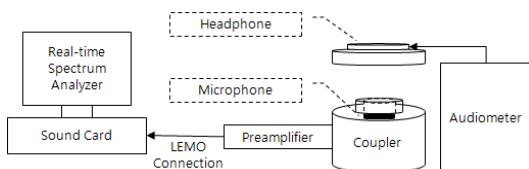
2.1 하드웨어 구성

본 논문의 실시간 스펙트럼 분석기는 기도(air conduction) 검사음 측정, 골도(bone conduction) 검사음 측정, 실시간 스펙트럼 분석기 보정(calibration)에 따른 다른 하드웨어로 구성된다.

2.1.1 기도 검사음 측정

순음청력검사기의 기도 검사음 측정을 위한 하드웨어

구성은 그림 1과 같다.

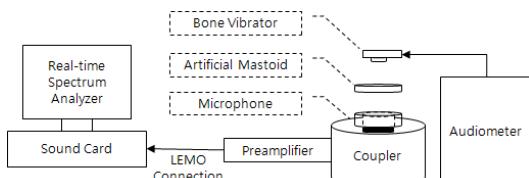


[그림 1] 기도 검사음 측정 H/W 구성
[Fig. 1] H/W Configuration of Air Pure-tone Measurement

순음청력검사기의 헤드폰을 통해 출력되는 검사음이 인공 귀(*artificial ear*)를 통해 마이크로폰에 전달되고 전기적 신호로 변환된다. 전기적 신호로 변환된 검사음은 프리앰프(*preamplifier*)를 통해 증폭된다. 프리앰프에서 증폭된 신호는 본 논문의 실시간 스펙트럼 분석기가 설치된 PC의 사운드카드 라인 입력 단자로 입력되고 검사음 신호 분석이 진행된다.

2.1.2 골도 검사음 측정

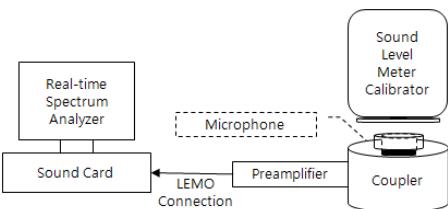
순음청력검사기의 골도 검사음 측정을 위한 하드웨어 구성은 그림 2와 같다. 순음청력검사기에서 골도 검사음은 골진동 헤드폰으로 출력된다. 그러므로 골진동 헤드폰에서 출력되는 검사음은 인공 귀(*artificial ear*) 대신 인공 유양돌기(*artificial mastoid*)를 통해 마이크로폰에서 전기적 신호로 변환된다. 변환된 전기적 신호는 기도 검사의 하드웨어 구성과 마찬가지로 프리앰프를 통해 사운드카드로 입력된다.



[그림 2] 기도 검사음 측정 H/W 구성
[Fig. 2] H/W Configuration of Bone Pure-tone Measurement

2.1.3 보정

본 논문에서 개발한 실시간 스펙트럼 분석기는 정확한 음압 레벨을 측정하기 위해 음압 레벨에 대한 보정이 필요하다. 그림 3은 소음계교정기(*sound level meter calibrator*)를 이용하여 실시간 스펙트럼 분석기를 보정하기 위한 하드웨어 구성을 나타낸다.



[그림 3] 보정 H/W 구성
[Fig. 3] H/W Configuration of Calibration

2.2 소프트웨어 구성

사운드카드로 입력되는 검사음 신호 데이터를 분석하기 위해 본 논문의 실시간 스펙트럼 분석기는 오픈 소스들을 이용한다.

2.2.1 Jack Audio Connection Kit

Jack Audio Connection Kit[13]은 사운드카드를 통해 입·출력 되는 데이터를 실시간에 짧은 지연시간으로 제공할 수 있는 GNU GPL의 오픈 소스 사운드서버이다. Linux, Mac OS, Windows 등 다양한 운영체제에서 사용 가능한 Jack API는 사실상의 표준(defacto standard)으로 인정되고 있다. 본 논문에서는 사운드카드로 입력되는 검사음 신호 데이터를 실시간으로 얻기 위해 Jack API를 사용한다.

본 논문의 실시간 스펙트럼 분석기는 Jack Client를 이용하여 Jack Server의 메모리에 저장되는 검사음 신호 데이터를 실시간으로 획득하였고, 이 데이터를 분석하여 음압 레벨 및 검사음 특성을 측정한다.

2.2.2 FFTW

MIT에서 개발한 FFTW API는 실수 데이터 및 복소수 데이터에 대한 이산 푸리에 변환(Discrete Fourier Transform, DFT)을 지원하는 오픈 소스용 C 라이브러리이다. 본 논문에서는 사운드카드로 입력되는 시간 영역의 검사음 신호 데이터를 분석하기 위해 FFTW API를 이용한다.

본 논문의 실시간 스펙트럼 분석기는 FFTW API를 이용하여 Jack Client에서 얻은 시간 영역의 검사음 신호 데이터를 주파수 영역으로 변환하였다. 그리고 주파수 영역으로 변환된 스펙트럼 데이터를 분석하여 음압 레벨 및 검사음 특성을 측정한다.

2.2.3 Pthread

일명 Pthread라고 불리는 POSIX 1003.1-2004[14] 표준은 멀티 쓰레드를 사용하는 응용 프로그램을 위한 표준

API이다.

본 논문의 실시간 스펙트럼 분석기는 사운드카드로 입력되는 검사음 신호 데이터를 얻기 위한 Jack Client 쓰레드와 이 검사음 신호 데이터를 분석하기 위한 분석 쓰레드로 구성된다. 따라서 본 논문에서는 멀티 쓰레드를 위해 Pthread API를 사용한다.

2.3 실시간 스펙트럼 분석기의 보정

사운드카드로 입력되는 검사음 신호의 음압 레벨을 측정하기 위해서는 기준 음압 레벨(0 dB SPL)이 필요하다. 본 절에서는 이 기준 음압 레벨을 구하기 위한 실시간 스펙트럼 분석기의 보정 과정에 대해 기술한다.

2.3.1 검사음 신호 데이터

Jack Server 프로그램은 사운드 입력단자로 입력되는 신호를 PCM 방식의 데이터 값으로 메모리에 저장한다. 본 논문의 실시간 스펙트럼 분석기는 Jack Client를 시스템 내부에 구현하였다. 사운드카드로 검사음 신호가 입력되는 경우 Jack Client에서 설정한 Callback 함수가 호출된다. Callback 함수는 표준에서 규정하는 사운드 입력 시간인 Fast(250ms) 또는 Slow(1sec) 동안 데이터가 입력되면 이 데이터를 다른 메모리에 복사한다. 본 논문의 실시간 스펙트럼 분석기는 이 데이터를 분석하여 음압 레벨 및 검사음 특성을 측정한다.

2.3.2 쓰레드 구성

본 논문의 실시간 스펙트럼 분석기는 Jack Client의 Callback 함수 호출을 위한 쓰레드와 입력된 검사음 신호 데이터를 분석하기 위한 쓰레드로 구성된다. 그리고 검사음 신호 데이터가 저장되는 메모리에는 두 쓰레드 모두 접근 가능하도록 설계되었다. 따라서 이 데이터 영역에 대한 상호배제 기능을 지원한다.

2.3.3 기준 음압 레벨 측정

음압 레벨은 식 (1)과 같이 기준 음압($20\mu Pa$)에 대한 비율을 로그 값으로 나타내며, dB SPL 단위를 사용한다.

$$L_{spl}(dB) = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{P_1}{P_0} \right] = 20 \cdot \log_{10} \left[\frac{P_1}{P_0} \right] \quad (1)$$

헤드폰 및 골전도 헤드폰으로 출력되는 음압(P_1)은 마이크로폰과 프리앰프를 통해 전기적 신호로 변환되어 본 논문의 실시간 스펙트럼 분석기가 설치된 시스템의 사운드카드로 입력된다. 본 논문의 시스템은 입력받은 검사음 신호의 전압 값(V_1)을 측정한 후, 식 (2)를 이용하여 음압

레벨을 계산한다.

$$L_{spl}(dB) = 20 \cdot \log_{10} \left[\frac{V_1}{V_0} \right] \quad (2)$$

식 (2)의 기준전압(V_0)을 구하기 위해 본 논문에서는 소음계교정기를 이용하였다. 소음계교정기는 고정된 주파수 및 음압 레벨로 교정음을 발생하는 기기이다.

본 논문의 실시간 스펙트럼 분석기는 소음계교정기의 교정음을 측정하고, 측정된 교정음 전압(V_c)과 소음계교정기의 음압 레벨(L_c)을 식 (3)에 적용하여 기준 전압(V_0)을 계산한다.

$$V_0 = \frac{V_c}{10^{0.05 \cdot L_c}} \quad (3)$$

본 논문은 입력 전압 값을 측정하는 방법으로 equivalent continuous sound level을 사용한다. 즉, 식 (4)와 같이 주어진 시간 내의 사운드 입력 전압 값에 대한 RMS(Root Mean Square) 값을 사용하여 음압 레벨을 계산한다. 또한 청력검사기의 검사음은 측정 주파수의 1/3 octave 대역만을 측정한다. 따라서 본 논문에서는 입력받은 검사음 데이터를 검사음 주파수를 기준으로 1/3 octave 대역통과필터(band pass filter)를 항상 적용한다.

$$L_{A_{eq}T} = 20 \cdot \log_{10} \left[\frac{\sqrt{(1/N) \sum_{k=1}^N v_k^2}}{v_0} \right] \quad (4)$$

2.3.4 Weighting Filter

인간의 귀는 주파수에 따라 인지하는 음의 강도가 달라진다. 이 같은 인간 귀의 특성을 반영하여 IEC60651, ANSI S1.4는 주파수별 음의 강도를 달리 나타내는 weighting filter를 규정하고 있다. 식 5, 6은 각각 A-weighting과 C-weighting 필터에 대한 s-domain transfer 함수를 나타낸다.

$$H_a(s) = \frac{4\pi f_2^2 s^4}{(s+2\pi f_1)^2 (s+2\pi f_2)^2 (s+2\pi f_3)(s+2\pi f_4)} \quad (5)$$

$$H_c(s) = \frac{4\pi f_2^2 s^2}{(s+2\pi f_1)^2 (s+2\pi f_2)^2} \quad (6)$$

$$f_1 = 20.5990, f_2 = 12200, f_3 = 737.862, f_4 = 107.652$$

본 논문은 A-weighting, C-weighting 필터를 제공하기 위해 시간 영역에서 적용할 수 있도록 IIR 필터를 구현한 LADSPA의 공개 소프트웨어를 사용하였다. LADSPA에

서 제공하는 필터는 네 가지 샘플 주파수(44100, 48000, 88200, 96000)에 대해 정확도 0.1dB 정도의 오차 범위를 가지는 정확도를 제공한다. 단지 샘플 주파수의 1/2 주파수에서 다소 오차가 큰 단점이 있으나 본 논문의 분석기는 125 ~ 8000Hz 사이의 음에 대한 분석이 필요하므로 문제가 되지 않는다. Weighting 필터의 적용 여부도 환경 메뉴에서 설정할 수 있다.

2.4 검사음 특성 분석

ANSI S3.6-2004[3], ANSI S1.40-2006[15], IEC 60942-2003[16]은 청력검사기의 Type에 따라 검사음 특성을 규정하고 있다. 본 논문 실시간 스펙트럼 분석기는 순음청력검사기 검사음 특성 검사 기능을 제공한다.

2.4.1 청력 레벨 정확도

청력 레벨(dB HL)은 청력이 정상인 사람들의 주파수별 최소가청력레벨(dB SPL)을 평균한 후, 이 평균값을 기준청력레벨(0 dB HL)로 변환한 것이다. 따라서 본 논문에서는 측정한 음압 레벨(dB SPL)을 기준등가역치음압수준(RETSPS)을 사용하여 청력 레벨로 변환한다[3].

표준에서는 순음청력검사기의 허용 레벨 오차를 ± 2.5 dB 이내로 규정하고 있다. 본 논문에서는 125 ~ 8000 Hz 범위의 각 주파수에 해당하는 검사음을 측정한 후, 순음청력검사기의 청력레벨과 본 논문의 실시간 스펙트럼 분석기에서 측정한 청력레벨을 비교하여 표준 준수 여부를 검사한다.

기준등가역치음압수준은 헤드폰 모델 및 커플러(coupler)에 따라 다른 값을 가진다. 따라서 본 논문에서는 기준등가역치음압수준을 헤드폰 모델 및 커플러에 따라 선택 가능하도록 인터페이스를 제공하고, 각 주파수별로 검사 청력레벨 또한 설정 가능하도록 인터페이스를 제공한다.

2.4.2 주파수 정확도

표준에서는 순음청력검사기의 출력 주파수의 정확도를 $\pm 1\%$ 이내로 규정하고 있다. 이를 검증하기 위해 본 논문에서는 검사음의 주파수 측정 기능을 제공하고, 측정된 주파수가 기준 주파수의 $\pm 1\%$ 이내에 있는지 검사하는 기능을 제공한다.

검사음의 주파수를 구하는 과정은 여러 요소에 의해 영향을 받는다. 샘플링율, 샘플링 시간 그리고 spectral leakage를 줄이기 위해 적용되는 윈도우의 종류 그리고 보간법이 이에 속한다. 샘플링율 및 샘플링 시간은 고정된 요소이기 때문에 윈도우 및 보간법이 선택 가능한 요

소이다.

본 논문에서는 Hamming 윈도우를 포함한 15종의 윈도우를 적용 가능하며, Quinn's 2nd Estimator를 포함하는 5종의 보간법을 적용 가능하다. 윈도우 및 보간법은 환경 설정 메뉴에서 결정 할 수 있다.

$$F_{amp} = \frac{\sqrt{[real[FFT(A)]]^2 + [imag[FFT(A)]]^2}}{N} \quad (7)$$

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{1}{N \cdot \Delta t} \quad (8)$$

f_s : Sampling Rate, *Δt* : Sampling Period

본 논문은 입력받은 검사음 데이터에 대해 윈도우를 적용하고, FFT를 수행한 후 식 (7)을 통해 최대 값을 갖는 빈(bean)을 찾는다. 각 빈이 표현하는 주파수의 범위가 식 (8)과 같기 때문에 보간법을 적용하여 주파수를 결정하였다. 식 (7), (8)에서 N은 샘플링된 신호의 수를 나타낸다.

2.4.3 청력 레벨의 선형성

표준에서는 출력 강도의 선형성을 5 dB 단계로 측정할 때 ± 1.0 dB 이내로 규정하고 있다. 본 논문의 실시간 스펙트럼 분석기는 청력레벨의 선형성 검사 기능을 제공한다. 청력레벨의 선형성을 검증하기 위해 검사 주파수, 검사 시작 청력레벨, 청력레벨 단계(Step) 설정이 가능하도록 인터페이스를 제공하고, 각 단계별로 청력레벨 측정 결과를 제공한다.

2.4.4 고조파 왜곡

표준에서는 검사음 주파수를 기준으로 Second Harmonic과 Third Harmonic은 기준 주파수 출력 레벨의 2% 이내로 규정하고, Fourth harmonic 이상은 0.3% 이내, THD(Total Harmonic Distortion)는 2.5% 이내로 규정하고 있다.

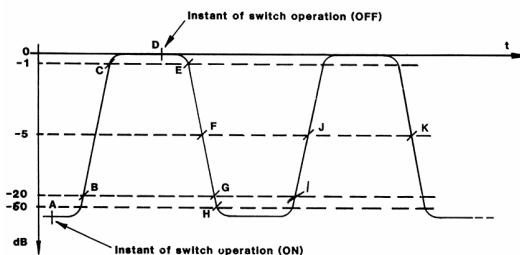
본 논문의 실시간 스펙트럼 분석기는 고조파 왜곡 검사 기능을 제공한다. 각 Harmonic에 해당하는 주파수의 출력 레벨들을 구하였고, 이 출력 레벨들이 표준 규정을 준수하는지 검사한다. 그리고 식 (9)를 이용하여 THD를 계산하였고 이 값이 표준 규정을 준수하는지 검사한다.

$$THD(\text{percent}) = 100 \sqrt{\left(\frac{L_{f_2}}{L_{f_1}} \right)^2 + \left(\frac{L_{f_3}}{L_{f_1}} \right)^2 + \dots} \quad (9)$$

L_{f₁} : Test Frequency, *L_{f₂}* : Second Harmonic,
L_{f₃} : Third Harmonic

2.4.5 단속음

순음청력검사기는 연속음(Continuous Tone) 및 단속음(Pulsed Tone)을 이용하여 피검자를 검사한다. 표준에서는 단속음에 대한 표준을 규정하고 있다. 그림 4는 단속음의 각 구간별 레벨 변화를 나타낸 그림이다. 수평축은 시간을 나타내고 수직축은 청력레벨을 나타낸다.



[그림 4] 단속음의 각 구간별 레벨 변화
[Fig. 4] Level Changes of Pulsed Tone at Each Time Interval

ANSI S3.6-2004[3]에서는 그림 4의 B-C 구간 및 E-G 구간을 20 ~ 50ms 범위로 규정하고 C-E 구간은 150ms 이상으로 규정하고 있다. 그리고 On/Off 구간인 F-J와 J-K 구간은 190 ~ 250ms 범위로 규정하고 있다.

본 논문의 실시간 스펙트럼 분석기는 단속음의 표준 준수 여부 검사 기능을 제공하고 각 구간별로 측정한 시간을 화면에 출력한다.

2.4.6 협대역 잡음

표준에서는 협대역 잡음의 청력 레벨을 -3 ~ 5 dB 범위 이내로 규정하고 있다. 그리고 협대역 잡음의 기준 주파수에서 1 octave마다 -12 dB 이하의 청력 레벨을 가져야 하고, 3 octave 까지 -36 dB 이하의 청력 레벨을 가져야 한다고 규정하고 있다.

본 논문의 실시간스펙트럼 분석기는 협대역 잡음에 대한 표준 규정을 검사하는 기능을 제공한다. 따라서 협대역 잡음의 출력 레벨 측정 및 표준 준수에 대한 검사 기능을 제공한다. 그리고 협대역 잡음의 기준 주파수에서 1 octave 간격으로 해당 주파수의 출력 레벨들을 측정한 후, 이 레벨들이 표준 규정을 준수하는지 검사하는 기능을 제공한다. 만약 1 octave 간격의 청력레벨이 표준 규정을 준수하지 않을 경우, 1 octave 간격의 주파수에 대한 청력 레벨 측정 결과를 출력한다.

3. 실험 결과

3.1 실험 환경

본 논문의 실시간 스펙트럼 분석기는 Intel Core2 Duo E7400 2.8 GHz 프로세서, 2 GB 메모리, Audiophile 2496 사운드카드로 구성된 PC 기반에서 Ubuntu 10.10 OS에서 동작한다.

구현된 실시간 스펙트럼 분석기를 검증하기 위해 정밀 음압측정기인 Larson Davis사의 Audiometer Calibrator System과 측정치를 비교하였다. 순음청력검사기는 Interacoustics사의 AC40을 이용하였다. 기도 검사음 출력은 TDH-39 헤드폰을 사용하였고, 골도 검사음 출력은 Brüel & Kjaer 사의 4930을 사용하였다. 모든 음향적인 측정은 ANSI S3.1-1999 (R2008)[17]을 준수하는 방음실 (ECKEL C24)에서 수행하였다.

3.1.1 커플러

순음청력검사기의 출력 음을 측정하기 위하여 IEC 60318-3:1998-08[18]와 ANSI S3.7-1995 (R2008)[19] 표준 규격을 준수하는 LARSON DAVIS 사의 AEC101 커플러(Coupler)를 사용하였다.

3.1.2 마이크로폰 및 프리앰프

마이크로폰은 IEC 60651[20] Type 1과 ANSI S1.4-1983 (R2006)[2] Type 1의 표준 규격을 준수하는 Larson Davis사의 2575 1인치 마이크로폰을 사용하였다. 이 마이크로폰의 Sensitivity는 45 mV/Pa이다.

프리앰프는 IEC 61094-4[21]의 표준 규격을 준수하는 Larson Davis 사의 PRM902를 사용하였다. 본 시험에서는 2575 마이크로폰과 같이 사용하기 때문에 최대 155 dB(14 V_{peak})의 출력을 제공한다.

3.1.3 소음계교정기

본 논문의 실시간 스펙트럼 분석기의 기준 음압 레벨을 측정하기 위해 소음계교정기는 ANSI S1.40-2006[22]과 IEC 60942-2003[23] CLASS 1 표준 규격을 준수하는 Larson Davis사의 CAL250을 사용하였다. CAL250은 251.2 Hz의 주파수와 114 dB SPL의 음압 레벨로 순음을 발생시킨다.

3.2 측정 결과

이 절에서는 본 논문의 실시간 스펙트럼 분석기와 Larson Davis사의 Audiometer Calibrator System을 이용하여 Interacoustics사 AC40의 순음 측정 결과를 비교 분석한다.

3.2.1 청력 레벨 정확도

청력 레벨의 정확도를 비교하기 위해서 순음청력검사기는 70 dB HL을 기준으로 검사음을 출력하였다. 표 1은 주파수별로 70 dB HL의 순음을 측정한 후, 청력 레벨을 분석한 결과를 나타낸다.

[표 1] 청력 레벨 측정 결과

[Table 1] Measurement Result of Hearing Level

Frequency (Hz)	Larson's Measured HL	Linux's Measured HL	Deviation
125	70.4	70.1	-0.3
250	70.5	70.3	-0.2
500	70.4	70.2	-0.2
750	70.0	69.8	-0.2
1000	70.6	70.5	-0.1
1500	70.4	70.2	-0.2
2000	70.7	70.6	-0.1
3000	70.2	70.1	-0.1
4000	70.6	70.4	-0.2
6000	68.9	68.7	-0.2
8000	73.4	73.2	-0.2

3.2.2 주파수 정확도

주파수의 정확도를 측정하기 위해서 순음 청력검사기는 70 dB HL을 기준으로 검사음을 출력하였다. 표 2는 주파수별로 순음을 측정 한 후, 주파수를 분석한 결과를 나타낸다.

[표 2] 주파수 정확도 측정 결과

[Table 2] Measurement Result of Frequency Accuracy

Frequency (Hz)	Larson's Measured Frequency	Linux's Measured Frequency	Deviation
125	125.0	125.0	0.0
250	250.0	250.0	0.0
500	500.0	500.0	0.0
750	749.9	749.9	0.0
1000	999.9	999.9	0.0
1500	1499.9	1499.9	0.0
2000	2000.0	1999.8	-0.2
3000	3000.0	2999.8	-0.2
4000	4000.0	3999.7	-0.3
6000	6000.0	5999.5	-0.5
8000	8004.0	8003.4	-0.6

3.2.3 선형성

본 논문은 1000 Hz의 주파수에서 청력 레벨의 선형성을 시험하였고, 100 dB HL부터 -5 dB 단위로 청력 레벨을 측정하였다. 표 3은 1000 Hz에서 측정한 청력 레벨의

선형성 결과를 나타낸다.

[표 3] 선형성 측정 결과

[Table 3] Measurement Result of Linearity

HL Step	Larson's Measured SPL	Linux's Measured SPL	Deviation
100	107.8	107.8	0.0
95	102.7	102.8	0.1
90	97.7	97.8	0.1
85	92.7	92.8	0.1
80	87.7	87.8	0.1
75	82.7	82.8	0.1
70	77.6	77.8	0.2
65	72.6	72.8	0.2
60	67.6	67.8	0.2
55	62.6	62.8	0.2
50	57.6	57.8	0.2
45	52.6	52.8	0.2
40	47.6	47.8	0.2
35	42.6	42.9	0.3
30	37.5	38.1	0.6
25	32.6	33.4	0.8
20	27.6	29.5	1.9
15	22.6	27.1	4.5
10	17.5	25.0	7.5
5	12.7	24.6	11.9

3.2.4 고조파 왜곡

고조파 왜곡을 비교하기 위해서 순음 청력검사기는 90 dB HL을 기준으로 검사음을 출력하였다. 표 4는 주파수별 90 dB HL 검사음을 측정한 후, 고조파 왜곡을 분석한 결과를 나타낸다.

[표 4] 고조파 왜곡 측정 결과

[Table 4] Measurement Result of Total Harmonic Distortion

Frequency (Hz)	Larson's Measured THD	Linux's Measured THD	Deviation
125	0.1	0.5	0.4
250	0.1	0.3	0.2
500	0.1	0.0	-0.1
750	0.1	0.0	-0.1
1000	0.1	0.0	-0.1
1500	0.1	0.0	-0.1
2000	0.2	0.0	-0.2
3000	0.1	0.0	-0.1
4000	0.1	0.0	-0.1
6000	0.1	0.0	-0.1
8000	0.0	0.0	0.0

3.2.5 단속음

단속음 측정 결과를 비교하기 위해서 순음 청력검사기는 1000 Hz에서 70 dB HL로 검사음을 출력하였다. 표 5는 단속음을 측정한 후, 단속음의 각 구간별 지속 시간을 측정한 결과를 나타낸다.

[표 5] 단속음 측정 결과

[Table 5] Measurement Result of Pulsed Tone

	Larson's Measured Pulsed Tone	Linux's Measured Pulsed Tone	Deviation
Rise Time	28.5	28.0	0.5
Fall Time	32.0	32.0	0.0
On Time	513.5	517.0	4.5
Off Time	483.5	483.0	0.5

3.2.6 협대역 잡음

협대역 잡음 측정 결과를 비교하기 위해서 순음 청력검사기는 70 dB HL로 협대역 잡음을 출력하였다. 표 6은 협대역 잡음 측정한 후 협대역 잡음의 청력 레벨 측정 결과를 나타낸다.

[표 6] 협대역 잡음 측정 결과

[Table 6] Measurement Result of Narrow Band Noise

Frequency (Hz)	Larson's Measured HL	Linux's Measured HL	Deviation
1000	72.5	71.3	-0.2
1500	71.2	70.9	-0.3
2000	71.9	71.6	-0.3
3000	71.7	71.5	-0.2
4000	72.1	71.9	-0.2
6000	68.8	68.5	-0.3
8000	70.6	70.1	-0.5

3.3 평가

본 논문에서 구현한 실시간 스펙트럼 분석기와 Larson Davis사의 Audiometer Calibrator System을 이용하여 순음청력검사기의 순음 및 협대역 잡음을 측정하였다.

청력 레벨 측정 결과는 최대 -0.3 dB의 오차가 발생하였고, 주파수의 정확도 또한 8000 Hz에서 -0.6 dB로 가장 큰 오차가 발생하였다. 하지만 청력 레벨과 주파수 모두 아주 작은 오차가 발생하였기 때문에, 본 논문에서 구현한 실시간 스펙트럼 분석기의 청력 레벨 및 주파수 측정 결과는 충분히 신뢰할 수 있다.

본 논문의 실시간 스펙트럼 분석기의 청력레벨 선형성 측정 결과는 30 dB HL 이하에서 상당히 큰 오차가 발생하였다. 이는 사운드카드 하드웨어 성능의 한계로, 신호 대잡음비(SNR)의 영향을 가장 크게 받는다고 판단된다. 따라서 보다 성능이 뛰어난 사운드카드를 이용할 경우, 조금 더 좋은 측정 결과를 얻을 수 있다.

고조파 왜곡의 측정 결과는 최대 0.4%의 오차가 발생하였다. 이 측정 결과 역시 저주파 대역에서 가장 크게 발생한 오차이기 때문에, 사운드카드의 하드웨어 성능을 가장 크게 받는다고 판단된다. 하지만 고조파 왜곡의 측정 결과의 오차 또한 충분히 신뢰할 수 있는 범위의 작은 오차이다.

단속음의 측정 결과는 최대 4.5ms의 오차가 발생하였다. 하지만 Larson Davis사 시스템으로 단속음을 매번 측정할 때마다 약간의 오차가 발생하였다. 따라서 본 논문에서 구현한 실시간 스펙트럼 분석기의 단속음 측정 결과 역시 약간의 오차가 발생하였기 때문에, 신뢰할만한 측정 결과로 판단된다.

협대역 잡음의 측정 결과는 최대 -0.5 dB의 오차가 발생하였다. 이 오차는 표준에서 규정하는 협대역 잡음 허용 범위에 비해 상당히 작은 차이이기 때문에 문제로 되지 않는다.

4. 결론

본 논문에서는 순음청력검사기를 위한 리눅스 기반의 실시간 스펙트럼 분석기를 개발하고, 국제 표준을 준수하는 정밀 음압측정기인 Larson Davis사의 Audiometer Calibrator System과 성능을 비교 평가하였다.

본 논문에서 구현한 실시간 스펙트럼 분석기는 PC 기반에서 개발되었으므로 사운드카드의 하드웨어 성능에 의해 검사음 측정 결과가 정밀 음압측정기에 비해 떨어지는 현상이 발생하였다. 하지만 일반 청력검사 기관에서 기능보정점검 및 음향보정점검을 위해 이 분석기를 이용한다면, 생물학적인 기능보정점검 보다 더욱 정확한 순음 청력검사기 보정점검이 가능하다고 판단된다. 또한 PC 기반으로 개발되었기 때문에 가격 경쟁력에서 큰 장점을 가진다. 따라서 청력검사기관에서 본 논문에서 개발한 실시간 스펙트럼 분석기를 이용하여 보정점검을 수행한다면 피검자의 청력검사 결과를 더욱 신뢰할 수 있을 것이다.

References

- [1] K. S. Kim, "Guidelines on the Pure-tone Audiometry", KOSHA, October, 2006.
- [2] ANSI "ANSI S1.4-1983 (R2006), American National Standard Specification for Sound Level Meters", 2006.
- [3] Standards Secretariat Acoustical Society of America, "ANSI S3.6-2004, American National Standard Specification for audiometers", American National Standards Institute, May, 2004.
- [4] TC 43, "ISO 389-1:1998, Acoustics - Reference zero for the calibration of audiometer equipment - Part 1 : Reference equivalent threshold sound pressure levels for pure tone and supra-aural earphones", International Organization for Standardization, 1998.
- [5] IEC TC/SC 29, "IEC 60645-1:2001, Electroacoustics - Audiological Equipment - Part 1: Pure-Tone Audiometers", International Electrotechnical Commission, 2001.
- [6] KS, "KS C IEC 60645-1:2005, Audiometers - Part 1 : Pure-tone audiometers", Korean Standards Association, December, 2005.
- [7] K. S. Kim, et al., "Acoustic Calibration of Clinical Audiometers Used for Special Periodic Health Examination", Korean J Occup Environ Med, Vol. 16, No. 4, pp.381-390, December, 2004.
- [8] Fons Adriaensen, "Audio Measurements using JAAA", LAC04 Presentation, Germany, 2004.
- [9] Brian Phelps and Andreas Schwab, "BRP-PACU", <http://sourceforge.net/projects/brp-pacu>
- [10] Nicholas J. Humphrey, "jackmeter", <https://github.com/njh/jackmeter/>
- [11] Larson Davis, "Audiometer Calibration System", <http://www.larsondavis.com/>
- [12] AUSSCO, "ACS100", <http://audiometercal.com>
- [13] Paul Laumann et al, "Jack: The Jack Audio Connection Kit", <http://jackaudio.org>
- [14] The Open Group, "IEEE Std 1003.1-2004, The core of the single UNIX Specification", http://www.unix.org/version3/ieee_std.html, April, 2004.
- [15] ANSI, "ANSI S1.40-R2006, American National Standard Specifications and verification procedures for sound calibrators", 2006.
- [16] EPL 29, " IEC 60942-2003, Electroacoustics - Sound calibrators", October, 2003.
- [17] ANSI, "ANSI S3.1-1999 (R2008), Maximum Permissible Ambient Noise Levels for Audiometric Test Rooms", 2008.
- [18] IEC, "IEC 60318-3:1998-08, Electroacoustics - Simulators of human head and ear - Part 3: Acoustic coupler for the calibration of supra-aural earphones used in audiometry", 1998.
- [19] ANSI "ANSI S3.7-1995 (R2003), American National Standard Method for Coupler Calibration of Earphones", 1995.
- [20] IEC "IEC 60651, The new International Standard for Sound Level Meter"
- [21] IEC, "IEC 61094-4, Measurement microphones - Part 4: Specifications for working standard microphones", 1995.
- [22] ANSI, "ANSI S1.40-2006, Verification Procedures for Sound Calibrators", 2006.
- [23] IEC, "IEC 60942-2003, Electroacoustics - Sound calibrators", 2003.
- [24] J. D. Kim, et al., "Development of Automatic Calibration System for PC-Based Pure Tone Audiometer", KAIS, Vol. 11, No. 7, pp.2586-2594, July, 2010.
- [25] D. H. Kang, et al., "Development of SISI Test Software based on PC", KAIS, 제11권, 제4호, pp.1325-1332, April, 2010.
- [26] B. D. Song, et al., "Development of PC-Based Client/Server Puretone Audiometer supporting Multiple Subject Concurrently", KAIS, Vol. 11, No. 6, pp.2225-2233, June, 2010.

강 덕 훈(Deok-Hun Kang)

[준회원]



• 2009년 8월 ~ 현재 : 부산대학교 대학원 바이오메디컬공학과 (공학석사)

<관심분야>

메디컬 소프트웨어 응용, 영상·음성 신호처리

신 범 주(Bum-Joo Shin)

[정회원]



- 1991년 2월 : 경북대학교 대학원 컴퓨터공학과(공학석사)
- 1998년 8월 : 경북대학교 대학원 컴퓨터공학과(공학박사)
- 1987년 3월 ~ 2002년 2월 : 한국전자통신연구원 책임연구원
- 2006년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 바이오메디컬공학과 부교수

<관심분야>

센서시스템, 메디컬 소프트웨어 응용

전 계 록(Gye-Rok Jeon)

[정회원]



- 1982년 2월 : 부산대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 1993년 2월 : 동아대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
- 1985년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 의과대학 교수

<관심분야>

의용계측, 영상신호처리, 생체시스템 모델링

왕 수 건(Soo-Geun Wang)

[정회원]



- 1981년 2월 : 부산대학교 대학원 의학과(의학석사)
- 1988년 2월 : 부산대학교 대학원 의학과(의학박사)
- 1987년 10월 ~ 현재 : 부산대학교 의학전문대학원 교수

<관심분야>

메디컬소프트웨어, 센서시스템, 생체신호처리