

## PC 기반의 Békésy 청력검사 시스템 개발

강 덕 훈\* 송 복 득\* 신 범 주\* 김 진 동\*\* 왕 수 건\*\*\*

### Development of a Békésy Audiometry System based on PC

Deok-Hun Kang\* Bok-Deuk Song\* Bum-Joo Shin\* Jin-Dong Kim\*\* Soo-Geun Wang\*\*\*

#### 요 약

Békésy 청력검사는 피검자의 청력 역치를 결정할 수 있을 뿐만 아니라 누가현상을 추정 할 수 있고 난청의 병변 위치를 규명하는데도 도움을 주는 청력검사 방법이다. 본 논문은 가격 경쟁력을 제공하기 위한 방법으로 PC 사운드카드를 사용하여 ANSI 표준을 준수하는 Békésy 청력검사 시스템의 개발에 대해 기술한다. 본 시스템은 동적으로 검사 신호를 생성하며, 실시간으로 검사 결과를 확인할 수 있는 인터페이스를 제공한다. 또한 표준에서 요구하는 최대 청력 레벨을 지원하기 위해 증폭기를 구현한다. 그리고 구현된 시스템이 ANSI 표준을 준수하는지 검증한다.

▶ Keyword : Békésy 청력검사기, PC 기반 청력검사기

#### Abstract

The Békésy audiometry makes possible to determine not only hearing threshold but also assumption of recruit phenomenon. Additionally, it is helpful to investigate cause of hearing loss. In this paper, we describe a development of PC based Békésy audiometer which complies with ANSI standards and provides cost competitiveness. It dynamically produces sound having required frequency and sound pressure level and supports audiogram interface showing test result at realtime. To provide ANSI defined maximum sound level, an amplifier has been developed. We have been verified our system whether it conforms to ANSI standards.

▶ Keyword : Békésy Audiometer, PC-based audiometer

• 제1저자 : 강덕훈 • 교신저자 : 신범주

• 투고일 : 2011.02.17, 심사일 : 2011.03.28, 게재확정일 : 2011.04.13

\* 부산대학교 바이오메디컬공학과(Dept. of Biomedical Engineering, Pusan National University)

\*\* 부산대학교 의과대학 의공학교실(Dept. of Medical Engineering, School of Medicine, Pusan National University)

\*\*\* 부산대학교 의과대학 이비인후과교실(Dept. of Otolaryngology, School of Medicine, Pusan National University)

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

## I. 서론

컴퓨터 하드웨어 및 소프트웨어의 발전은 다양한 분야의 전문기기를 PC 환경에서 구현 가능하도록 하고 있다. 특히, 사운드카드의 발전은 청력검사 전용기기를 PC 환경의 소프트웨어로 구현 가능하도록 하고, 이와 관련된 다양한 연구가 시도 되었다[2-8].

전용기기로 제작된 청력검사기를 PC 기반으로 제공 할 경우 여러 가지 장점들을 가진다. 다양한 청력검사 기능을 쉽게 지원할 수 있고, 피검자(subject)의 검사 결과를 편리하게 관리 및 활용 할 수 있다. 또한 고가의 청력검사 전용기기에 비해 가격 경쟁력을 가지는 장점이 있다.

본 논문은 일부 청력검사 전용기기[9-10]에서만 제공하는 Békésy 청력검사 기능을 PC 기반으로 구현한다. Békésy 청력검사는 검사음의 주파수 및 출력 음압 레벨을 검사자(audiometrist)의 개입 없이, 청력검사 시스템에 의해 자동으로 결정하여 피검자의 청력을 평가하는 검사이다. 따라서 사용자 편의성을 고려한 인터페이스를 제공하는 것이 중요하다.

Békésy 청력검사는 피검자에게 검사음을 들려주고, 피검자가 검사음이 들리는 동안은 응답 버튼을 누르게 하고 들리지 않는 동안은 응답 버튼을 누르지 않도록 하는 검사이다. 검사음의 주파수는 피검자의 응답 유무에 관계없이 검사 방법에 따라 1 octave/min 증가하거나 감소하고, 검사음의 음압 레벨은 피검자의 응답이 있는 동안은 2.5 dB/s 감소하고, 응답이 없는 동안은 2.5 dB/s 증가한다[11].

Békésy 검사음에는 연속음(continuous tone)과 단속음(pulse tone)이 있다. Békésy 청력검사는 두 종류의 검사음에 대한 청력검사 결과를 비교하여 피검자의 청력상태를 진단한다. 이 검사는 순음청력검사보다 더 많이 이용하는 검사방법은 아니지만, 한명의 검사자가 다수의 피검자를 검사하기에 유용하고 청력역치를 구할 수 있을 뿐만 아니라 피검자의 병변 위치 결정에도 도움을 주는 검사이다. 또한 보청기를 사용할 경우 기능성 이득을 측정 할 수 있는 장점도 있다[1]

본 논문은 Békésy 청력검사 기능을 PC 사운드카드를 이용하여 구현하고, 구현한 시스템이 청력검사 국제 표준[11]을 만족하는지 검증한다.

## II. 관련 연구

청력검사 시스템에 대한 국내 연구들은 다음과 같다. 노형

욱 외 5인은 의사소통이 불가능한 신생아 또는 유아를 대상으로 하는 마이크로프로세서를 이용한 자동청력검사(A-ABR) 시스템을 개발하였다[2]. 그리고 이동훈 외 7인은 PC를 이용하여 웹 기반의 자동 차폐가 가능한 기도 순음청력검사 시스템을 개발하였다[3]. 그러나 이들 시스템은 Békésy 청력검사 기능을 제공하지 않는다.

Békésy 청력검사 기능 구현과 관련된 기존 연구는 다음과 같다. Interacoustics[9]사의 AC40, AD226, AD229e는 Békésy 청력검사 기능을 제공하고, 국내·외 의료기관에서 널리 사용하고 있는 청력검사 전용기기이다. 그러나 이들 기기는 PC 사운드카드를 이용하는 청력검사기에 비해 상당히 고가의 기기이다. 그리고 MegaMed[10]사의 MM-ADM002는 Békésy 청력검사 기능을 제공하는 PC 기반 청력검사기기이다. 그러나 이 기기는 PC 사운드카드를 사용하여 검사음을 생성하지 않고, 청력검사 전용기기를 PC와 연결하여 PC에서 이 기기를 제어한다. 그러므로 PC 사운드카드만을 사용하여 구현한 청력검사기에 비해 가격 경쟁력이 떨어진다.

반면 본 논문은 PC 사운드카드를 사용하여 Békésy 청력검사 시스템을 소프트웨어로 개발하고, 개발한 청력검사 시스템이 ANSI 표준[11]을 만족하는지 검증한다.

## III. 설계 및 구현

본 논문에서는 PC에서 소프트웨어로 실행 가능한 Békésy 청력검사 시스템을 개발하였다. 그리고 이 시스템이 ANSI 표준[11]에서 규정하는 최대 음압 레벨을 출력하기 위해 사운드카드의 출력 음압 레벨 한계를 보완하는 증폭기를 추가하였다. 본 장에서는 이들의 설계 및 구현 내용을 기술한다.

### 1. Békésy 청력검사 시스템

청력검사와 관련된 표준에는 ANSI S3.6-2004[11]와 IEC 60645-1[12]이 있다. ANSI 표준에서는 청력검사기에 서 제공하는 순음 검사 기능에 따라 청력검사를 Type 1 ~ 4의 4가지 유형으로 분류한다.

본 논문의 Békésy 청력검사 시스템은 Type 1 유형을 준수하도록 구현하였다. PC에서 사용하는 대부분의 사운드카드는 Type 1 순음청력검사의 최대 음압 레벨보다 낮은 출력 음압 레벨을 가진다. 그러므로 본 논문에서는 시리얼 통신으로 제어 가능한 증폭기를 제작하였고, 이 증폭기를 사용하여 사운드카드의 출력 음압 레벨을 보완하였다. 그림 1은 Békésy 청력검사 시스템 구성도를 나타낸다.

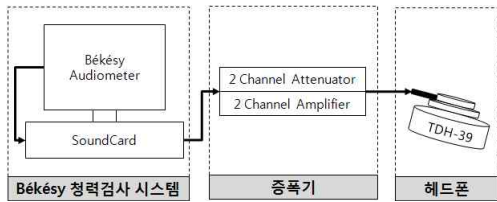


그림 1. Békésy 청력검사 시스템 구성도  
Fig 1. Békésy audiometer system map

피검자에게 최종적으로 검사음을 들려주는 헤드폰은 청력 검사에서 가장 보편적으로 사용하는 Telephonics사의 TDH-39 헤드폰을 사용하였고, 피검자의 검사음에 대한 반응 입력 장치는 키보드를 사용하였다.

## 2. Békésy 청력검사 검사음

### 2.1 검사음의 동적 생성

Békésy 검사음은 PCM 방식으로 44.1 kHz 샘플링 주파수와 24 bit 샘플 사이즈를 가지는 WAV 포맷을 이용하여 생성하였다. 검사음을 동적으로 생성하기 위해 수식 1.1을 이용하여 1 Hz의 기본 정현파 데이터를 가지는 록업테이블을 생성하였고, 록업테이블에서 정해진 주파수 간격으로 데이터를 추출한 후 음의 강도(sound intensity)를 곱하여 검사음을 생성하였다. 수식 1.2는 검사음을 생성하기 위해 사용한 함수를 나타낸다.

$$y(n) = \sin(2\pi \frac{n}{f_s}) \tag{1.1}$$

$$y(n) = A \cdot \sin(2\pi f \frac{n}{f_s}) \tag{1.2}$$

- $f$  : frequency
- $f_s$  : sampling rate
- $n$  :  $n^{th}$  sample
- $A$  : sound intensity

### 2.2 검사음의 주파수 및 청력 레벨

ANSI 표준[11]에서는 Békésy 검사음에 대한 주파수 변화율을 1 octave/min으로 규정하고 검사음의 청력 레벨 변화율은 25 dB/s(청력검사기 Type1~3)로 규정한다. 본 논문은 피검자가 검사음의 주파수 변화를 연속적인 변화로 인지하도록 주파수 변화율을 1분에 6000회로 10 ms마다 검사음의 주파수가 변화하도록 구현하였고, 청력 레벨 변화율은 200 ms마다  $\pm 0.5$  dB 단위로 변화하도록 구현하였다. 그리고 표준에서는 청력검사기의 최소 청력 레벨을 -10 dB HL로 규정하고 최대 청력 레벨은 청력검사기 Type에 따라 다르게 규

정한다. 따라서 본 논문은 최소 청력 레벨을 -10 dB로 준수하고 최대 청력 레벨은 Type 1의 최대 청력 레벨을 준수하도록 구현하였다.

Békésy 청력검사는 100 ~ 1000 Hz 사이의 주파수 대역에서 검사를 진행한다[1]. ANSI 표준[11]에서는 순음청력검사의 가장 상위 유형인 Type 1에서 가장 낮은 주파수와 가장 높은 주파수가 각각 125 Hz와 8000 Hz이다. 그리고 상용화된 대부분의 청력검사 전용기기들은 이 주파수들 사이의 주파수에서 순음청력검사를 진행하고, 검사 결과를 바탕으로 피검자의 청력 역치 및 난청 유형을 판별한다. 그러므로 이 주파수들 사이의 대역에서 Békésy 청력검사를 진행하여도 피검자의 청력 역치 및 난청 유형을 검증하기 위한 충분한 검사 결과를 획득 할 수 있다. 따라서 본 논문은 125 ~ 8000 Hz 사이의 주파수 대역에서 검사를 진행하도록 Békésy 시스템을 구현하였다.

### 2.3 음압 레벨

청력검사에서 사용하는 청력 레벨(dB HL)은 청력이 정상인 사람들의 주파수별 최소가청레벨(dB SPL)을 평균한 후 이 평균값을 기준청력레벨(0 dB HL)로 변환한 것이다. 그러므로 동일한 청력 레벨의 검사음은 주파수별로 다른 음압 레벨을 가진다. 즉, 피검자가 동일한 음의 크기(loudness)로 인지하는 검사음은 주파수별로 다른 음의 강도(intensity)를 가진다는 것을 의미한다.

청력 레벨을 음압 레벨로 변환하기 위해서 ANSI 표준 [11]에서 규정하는 기준등가역치음압수준(Reference Equivalent Threshold Sound Pressure Levels, RETSPLs)을 본 논문의 시스템에 적용하였다. 기준등가역치음압수준은 최종적으로 검사음이 출력되는 출력 장치와 이 장치에서 출력되는 검사음을 측정하기 위해 사용하는 커플러(coupler)의 특성을 고려하여 계산된 표준 값이다.

표 1은 본 논문의 시스템에서 사용한 TDH-39 귀덮개형 이어폰과 NBS-9A 커플러의 기준등가역치음압수준을 나타낸다.

표 1. TDH-39 귀덮개형 이어폰과 NBS-9A 커플러의 기준가역치음압수준  
Table 1. RETSPLs for NBS-9A Coupler with TDH-39 supra-aural earphone

Frequency (Hz)	RETSPLs (dB SPL)
125	47.5
250	26.5
500	13.5
750	8.5
1000	7.5
1500	7.5
2000	11.0
3000	9.5
4000	10.5
6000	13.5
8000	13.0

표 1은 순음청력검사에 사용하는 주파수에 대한 기준등가역치음압수준만을 나타내었다. 하지만 Békésy 검사음은 연속적으로 주파수가 변화하는 특성을 가진다. 그러므로 표 1에 나타난 주파수들 이외의 주파수들에 대한 기준등가역치음압수준이 필요하다. 본 논문에서는 표 1의 주파수들 사이의 주파수들에 대해 기준등가역치음압수준이 선형적으로 변화한다고 가정하였고, 이 가정을 바탕으로 해당 주파수의 기준등가역치음압수준을 계산하였다.

2.4 연속음과 단속음

Békésy 청력검사는 연속음(continuous tone)과 단속음(pulsed tone) 두 종류의 검사음을 가지며, 각 검사음으로 검사를 진행한 후 두 검사 결과를 비교하여 피검자의 청력 상태를 평가한다. 연속음은 청력검사 알고리즘에 의해 결정된 청력 레벨로 검사음이 연속적으로 출력되는 것을 의미하며, 단속음은 200 ms On, 200 ms Off 구간이 반복되는 검사음이 연속적으로 출력되는 것을 의미한다. 단속음의 Rise와 Fall time은 ANSI 표준[11] 규정을 준수하도록 20 ms로 구현하였다.

그림 2는 연속음과 단속음을 보여준다. 그림에서 수직축은 검사음의 강도를 나타내고, 수평축은 시간을 나타낸다.

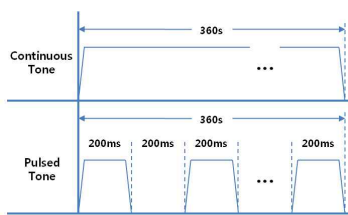


그림 2. Békésy 청력검사 연속음과 단속음  
Fig 2. Continuous Tone and Pulsed Tone for Békésy Audiometry

3. 검사 알고리즘 및 검사자 인터페이스

Békésy 청력검사에서 검사 진행 시간 및 주파수 변화율은 ANSI 표준[11]에서 이미 규정하고 있으므로 본 논문은 피검자의 반응에 따라 증폭기의 증폭 레벨만을 조절하여 검사 진행이 가능하도록 하였다. 또, 검사자에게 피검자의 검사 진행 과정을 실시간 모니터링 가능하도록 청력도를 검사자 인터페이스에 제공하였다.

3.1 검사 알고리즘

본 논문은 오른쪽 귀에 대한 청력검사를 먼저 시작하고, 검사음은 연속음에 대한 검사 후, 단속음에 대한 검사를 시작하도록 시스템을 구현하였다. 그리고 오른쪽 귀에 대한 검사를 완료하면 왼쪽 귀에 대한 검사를 같은 순서로 진행하도록 구현하였다. 본 논문의 시스템은 양측 귀에 대한 검사 시간으로 총 24분이 소요된다.

검사음의 초기 청력 레벨은 0 dB HL로 설정하였다. 그리고 2.5 dB/s로 청력 레벨이 피검자의 반응에 따라 증가하거나 감소해야하므로, 200 ms마다 피검자의 반응을 검사하고 0.5 dB 단위로 증폭기의 출력 레벨을 조절하도록 시스템을 구현하였다. 만약 청력 레벨이 -10 dB HL 이하로 설정되면 더 이상 청력 레벨이 감소하지 않도록 구현하였다. 최대 청력 레벨은 주파수마다 다른 값을 가진다. 따라서 표 1의 주파수들 사이의 주파수들에 대한 최대 청력 레벨은 선형적으로 변화한다고 가정하였고, 각 주파수의 최대 청력 레벨을 초과하지 못하도록 시스템을 구현하였다.

피검자의 반응에 따라 검사음의 청력 레벨이 결정 되면 증폭기의 출력 레벨을 조절하고, 검사자 인터페이스의 청력도에 200 ms마다 검사음에 대한 그래프를 실시간으로 출력하도록 시스템을 구현하였다.

그림 3은 Békésy 청력검사 시스템의 검사 진행 과정을 보여주는 순서도이다.

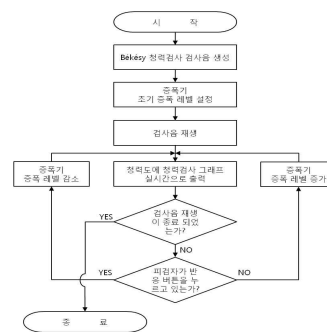


그림 3. Békésy 청력검사 진행 순서도  
Fig 3. A flow chart of the Békésy Audiometry Progress

### 3.2 쓰레드 구성

본 논문의 청력검사 시스템은 여러 기능들이 동시에 수행된다. 기본적으로 청력검사 진행 및 피검자의 실시간 모니터링을 위한 검사자 인터페이스 기능이 수행되고, 피검자의 반응에 따라 검사음의 청력 레벨을 조절해야 하므로 Bekesy 검사 알고리즘이 수행된다. 또한, 검사 알고리즘 및 검사자 인터페이스 조작에 따라 검사음 재생 및 정지, 일시정지 기능이 수행되고, 마지막으로 검사음의 음압 레벨 설정을 위한 증폭기 조절 기능이 수행된다. 따라서 Bekesy 청력검사 시스템의 쓰레드는 Main 쓰레드 외에 HearingTestThread, AudiometerThread, CommThread를 추가로 사용하였다. 그림 4는 각 쓰레드가 수행하는 기능을 간단하게 보여준다.

Main Thread	HearingTestThread	AudiometerThread	CommThread
청력검사 진행 제어 (시작, 일시정지, 정지)	검사 귀 결정	검사음 재생	증폭 레벨 조절
청력도 그래프 출력	검사음 결정 (연속음, 단속음)	검사음 정지	
검사음 정보 출력	검사음 생성	검사음 일시 정지	
검사 결과 저장		검사음 정보 저장	

그림 4. 쓰레드 구성  
Fig 4. Thread

Main 쓰레드는 검사자 인터페이스를 위한 기본 쓰레드로 청력검사 진행을 제어하고 청력도 및 검사음 정보를 보여준다. HearingTestThread 쓰레드는 검사 알고리즘에 따라 검사를 진행하고 필요한 검사음을 생성하여 메모리에 저장한다. AudiometerThread 쓰레드는 실제 메모리에 생성된 검사음을 재생, 정지, 일시정지 하고, 검사음의 주파수 및 레벨 정보를 실시간으로 Main 쓰레드에 전달한다. 마지막으로 Comm Thread 쓰레드는 증폭기의 증폭 레벨을 설정하기 위한 쓰레드이다.

### 3.3 검사자 인터페이스

Bekesy 청력검사는 검사자의 개입 없이 피검자의 검사음에 대한 입력 반응만으로 진행이 가능한 검사이다. 따라서 검사자에게 제공되는 인터페이스는 다른 청력검사에 비해 단순하다.

그림 5는 본 논문에서 구현한 Bekesy 청력검사 시스템의 검사자 인터페이스를 나타낸다.

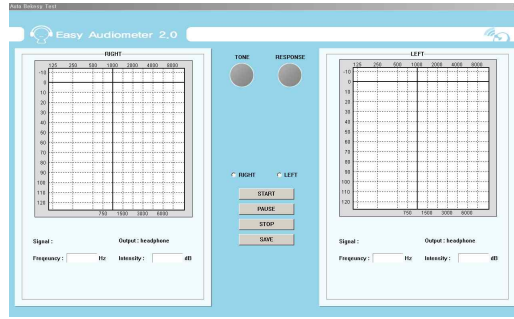


그림 5. Bekesy 청력검사 인터페이스  
Fig 5. Bekesy Audiometry Interface

그림 5의 Bekesy 청력검사 인터페이스는 양쪽 귀에 대한 연속음과 단속음의 검사 진행 과정을 실시간으로 보여주어 한 청력도를 제공한다. 또한 청력검사 진행을 제어하기 위한 시작 및 일시정지, 정지 버튼 컨트롤을 제공하고, 검사 결과를 저장하기 위한 버튼 컨트롤을 제공한다. 청력검사 진행 중 검사음의 출력 및 피검자의 검사음에 대한 반응 여부를 램프로 확인 가능하도록 하였다. 마지막으로, 검사음의 주파수 및 청력 레벨 변화에 대한 수치 정보를 제공한다.

### 3.4 청력도(Audiogram)

청력검사 결과를 한 눈에 파악 할 수 있는 청력도는 청력검사 시스템에서 필수 기능들 중 하나이다. 일반적으로 청력도의 수평축은 주파수를 나타내며 수직축은 청력 레벨을 나타낸다. 청력도는 1 octave의 주파수 간격과 20 dB의 청력 레벨 간격이 동일한 크기를 가져야한다. 또한 Type 1 청력검사기의 청력레벨 영역과 주파수 영역을 지원하기 위해 -10 ~ 120 dB의 청력레벨 대역과 125 ~ 8000 Hz의 주파수 대역을 가져야 한다. 따라서 본 논문에서는 이 조건들을 만족하는 청력도를 구현하였다.

그림 6은 Bekesy 청력검사 결과를 출력하고 있는 본 논문에서 구현한 청력도를 나타낸다.

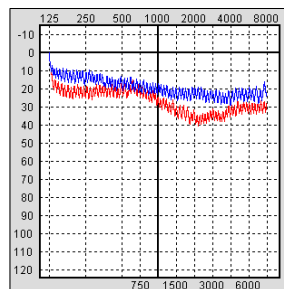


그림 6. 청력도  
Fig 6. Audiogram

연속음과 단속음에 대한 검사 결과의 명확한 구분이 가능하도록 연속음의 결과는 빨간색 선으로, 단속음의 결과는 파란색 선으로 나타내었다.

#### 4. 증폭기

PC 사운드카드의 출력 한계를 보완하기 위해 증폭기를 제작하였다. 제작한 증폭기는 사운드카드에서 출력되는 검사음 신호를 입력 받기 위한 2채널 오디오 입력 단자 및 헤드폰으로 검사음 신호를 출력하기 위한 2채널 오디오 출력 단자를 가지며 시리얼통신을 위한 시리얼포트(serial port)를 제공한다. 시리얼통신 데이터는 2채널의 출력 단자 제어 및 각 채널에 대한 증폭 레벨 값을 가지도록 구성하였다. 증폭기의 증폭 레벨 값은 0 ~ 295 범위의 값을 가지고, 0.5 dB 단위로 증폭 레벨 조절이 가능하도록 제작하였다.

### IV. 시험 및 결과

#### 1. 시험 환경

Békésy 청력검사 시스템은 Intel Core2 Duo E7400 2.8 GHz 프로세서, M-Audio사의 Audiophile 2496 사운드 카드의 하드웨어를 사용하였고, Windows XP 운영체제 기반에서 Visual Studio로 개발하였다. Békésy 청력검사 시스템의 검사음 출력을 시험하기 위해서 Telephonics사의 TDH-39 10 Ω 헤드폰 및 Larson Davis사의 NBS-9A 커플러, 1" 마이크로폰, PRM 902 프리앰프를 사용하였다. 그리고 ANSI S3.1-1999(R2008)[13]을 준수하는 ECKEL C24 방음실에서 헤드폰 출력을 측정하였다.

#### 2. 시험 결과

Békésy 검사음의 연속적인 주파수 및 레벨 변화를 측정하기 위해서 선행 연구[7]에서 개발한 음압 측정 소프트웨어를 이용하였다. 음압 측정 소프트웨어는 헤드폰으로 출력되는 음을 측정하여 주파수와 레벨 정보를 보여주는 소프트웨어이다. 이 소프트웨어로 헤드폰에서 출력되는 Békésy 검사음을 1초 간격으로 음압 측정 소프트웨어에서 측정하였다.

측정한 검사음 데이터를 이용하여 검사음에 대한 ANSI 표준 준수 여부를 검사하기 위해 주파수 및 레벨 변화를 관찰하였다. 측정된 검사음 데이터의 주파수 변화를 분석한 결과, 검사음의 주파수는 6분동안 125 ~ 8000 Hz의 대역에서 선형적으로 증가하였고 60초 동안 1 octave의 주파수가 정확

하게 증가하였다. 그림 7은 측정된 검사음 데이터를 60초 간격으로 나누어 출력한 그래프이다.

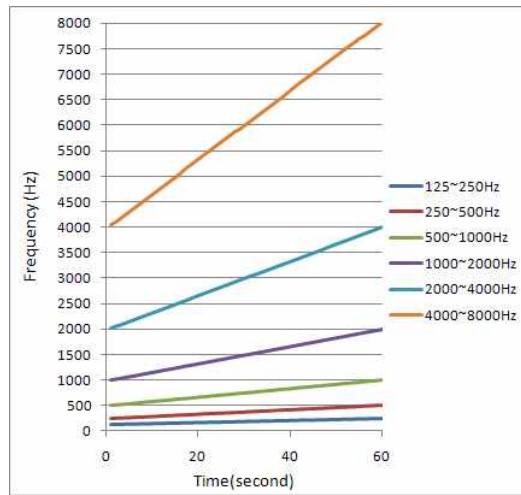


그림 7. 주파수 변화  
Fig 7. Frequency Drift

음압 레벨 변화를 분석하기 위해 임의로 검사음에 대한 피검자의 반응을 입력하였다. 그림 8은 피검자의 임의의 입력에 대한 2 ~ 4kHz 구간의 검사음 음압 레벨을 측정된 그래프를 나타낸다.

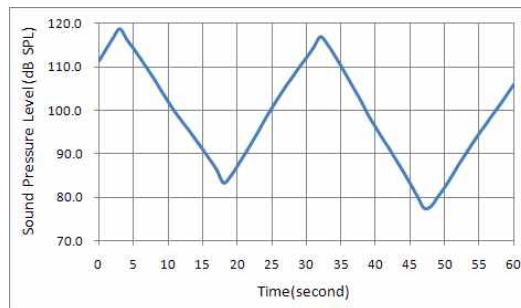


그림 8. 음압 레벨 변화  
Fig 8. Sound Pressure Level Drift

그림 8의 그래프에는 음압 레벨의 상승 및 하강 구간이 4 구간이 있다. 각 구간의 최고점과 최저점을 이용하여 상승 및 하강 구간의 평균 음압 레벨 변화를 계산하였다. 각 구간의 평균 음압 레벨 변화는 ANSI 표준[11]에서 규정하는  $\pm 2.5$  dB/s에서 최대  $\pm 0.15$  dB의 오차가 관찰되었고, 다른 주파수 구간에 대한 평균 음압 레벨 변화도 최대  $\pm 0.2$  dB 이내의 오차가 관찰되었다.

선행 연구[7]의 순음 출력 음압 레벨의 최대 오차인  $\pm 0.3$

dB를 적용하였을 경우, 최대 ±0.5 dB의 오차가 발생한다. 이 오차 범위는 Type 1 청력검사기 허용 오차인 ±1 dB 이내에 포함되므로, 본 논문에서 구현한 Békésy 청력검사 시스템은 ANSI 표준[11] 규정을 준수한다.

표 2는 2 ~ 4 kHz 주파수 대역에서 음압 레벨 상승 및 하강 구간의 최고점과 최저점을 이용하여 평균 음압 레벨 변화를 측정된 결과이다.

표 2 음압 레벨 변화  
Table 2 Sound Pressure Level Drift

Time (s)	Sound Pressure Level (dB SPL)	Average of change (dB/s)	
		Increase	Decrease
3	118.8	2.41	2.37
18	83.2		
32	117.0		2.35
48	77.8		
60	106.0		

### V. 결론

본 논문에서는 PC 사운드카드를 사용하여 Békésy 청력검사 시스템을 구현하였고, 구현된 시스템이 ANSI 표준[11]을 준수하는지 시험을 통해 검증하였다.

본 논문의 시스템은 검사음을 동적으로 생성함으로써 피검자의 청력 상태에 따라 나타나는 다양한 반응에 대해 정확한 검사음을 생성할 수 있을 뿐만 아니라, PC 기반으로 청력검사 시스템을 구현하였으므로 상용화된 고가의 청력검사 전용 기기에 비해 가격 경쟁력을 가지는 장점이 있다. 또한, 검사자에게 피검자의 검사 진행 결과를 청력도를 통해 실시간으로 분석 가능하도록 실시간 모니터링 기능을 지원하였다.

본 논문의 Békésy 청력검사 시스템은 선행 연구[8]에서 구현한 청력검사 시스템을 확장하여 구현하였다. 그러므로 검사자에게 기도·골도 순음청력검사 및 SISI, ABLB 검사와 함께 Békésy 청력검사 기능을 제공함으로써 피검자의 청력검사 결과에 대한 정밀도 및 신뢰성을 높일 수 있다.

### 참고문헌

- [1] C.W.Park, "Békésy Audiometry", Journal of Clinical Otolaryngol, Vol. 7, No. 2, pp. 251-260, Nov. 1996.
- [2] H.W.Noh, "Development of A-ABR System Using a Microprocessor", IEEK, Vol. 46, No. 2, pp. 15-21, Mar. 2009.
- [3] D.H.Lee, "Development of Web-Based Digital Air-Conduction Pure Tone Audiometer with Automated Masking", Korean Journal of Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery, Vol. 50, No. 10, pp. 860-868, Oct. 2007.
- [4] J.D.Kim, "Development of Auto-Masking Puretone Audiometer supporting Multiple Modes", KAIS, Vol. 10, No. 6, pp. 1229-1236, Jun. 2009.
- [5] J.D.Kim, "Differential Diagnosis on the Types of Hearing Loss using Short Increment Sensitivity Index(SISI) Test and Bekesy Audiometry", KIEEME, Vol. 22, No. 8, pp. 704-713, Aug. 2009.
- [6] D.H.Kang, "Development of SISI Test Software based on PC", KAIS, Vol. 11, No. 4, pp. 1325-1332, Apr. 2010.
- [7] J.D.Kim, "Development of Automatic Calibration System for PC-Based Pure Tone Audiometer", KAIS, Vol. 11, No. 7, pp. 2586-2594, Jul. 2010.
- [8] D.H.Kang, "Development of an Auto ABLB Test Software", KAIS, Vol. 11, No. 12, pp. 5120-5126, Dec. 2010.
- [9] Interacoustics, "Audiometers", [http://interacoustics.com/com\\_en/Pages/Product/Audiometers/\\_index.htm](http://interacoustics.com/com_en/Pages/Product/Audiometers/_index.htm)
- [10] MegaMed, "MM-ADM002 PC Audiometer", <http://www.megamedicals.com/mm-adm002-pc-audiometer.htm>
- [11] ANSI(American National Standard Institute) S3.6-2004, "American National Standard Specification for audiometers", 2004.
- [12] IEC(International Electrotechnical Commission) 60645-1-2001, "Electroacoustics - Audiological Equipment - Part 1: Pure-Tone Audiometers", 2001.

[13] ANSI S3.1-1999 (R2008), Maximum Permissible Ambient Noise Levels for Audiometric Test Rooms.

저 자 소 개



강 덕 훈  
2009: 부산대학교  
바이오정보전자공학과 공학사  
현 재: 부산대학교  
바이오메디컬공학과 공학석사과정  
관심분야: 영상 및 음성 신호처리,  
메디컬 소프트웨어 응용  
Email : kdlhkang@naver.com



왕 수 건  
1981: 부산대학교, 의학과 의학석사  
1988: 부산대학교, 의학과 의학박사  
현 재: 부산대학교  
의학전문대학원 교수  
관심분야:  
Email : wangsg@pusan.ac.kr



송 복 득  
1999: 동서대학교, 컴퓨터공학과 공학사.  
2004: 동서대학교  
소프트웨어학과 공학석사.  
현 재: 부산대학교  
바이오메디컬공학과 공학박사과정  
관심분야: 영상신호처리, 머신 비전,  
메디컬 소프트웨어 응용  
Email : bdsong@pusan.ac.kr



신 범 주  
1998: 경북대학교  
컴퓨터공학과 공학박사  
1987: 한국전자통신연구원 책임연구원  
2002: 밀양대학교  
컴퓨터공학과 교수  
현 재: 부산대학교  
바이오메디컬공학과 교수  
관심분야: 센서시스템,  
메디컬 소프트웨어응용  
Email : bjshin@pusan.ac.kr



김 진 동  
2006: 부산대학교, 의학과 의학석사  
2010: 부산대학교  
의공학협동과정 의공학박사수료  
현 재: 부산대학교병원 이미인후과  
관심분야: 신호처리, 생체계측, 의공학  
Email : cpjdkim@hanmail.net