

## 리눅스 실시간 스펙트럼 분석기를 이용한 컴퓨터 기반 순음청력검사 시스템의 자동 보정 지원

이승희<sup>1</sup>, 신범주<sup>1,a</sup>, 송복득<sup>2</sup>, 김진동<sup>3</sup>, 전계록<sup>4</sup>, 왕수건<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 부산대학교 IT응용공학과  
<sup>2</sup> 부산대학교 바이오메디컬공학과  
<sup>3</sup> 부산가톨릭대학교 언어청각치료학과  
<sup>4</sup> 부산대학교 의과대학 의공학교실  
<sup>5</sup> 부산대학교 의과대학 이비인후과교실

### Support of Automatic Calibration for Computerized Puretone Audiometer Using Linux Real-time Spectrum Analyzer

Seung Hee Lee<sup>1</sup>, Bum Joo Shin<sup>1,a</sup>, Bok Deuk Song<sup>2</sup>, Jin Dong Kim<sup>3</sup>,  
Gye Rok Jeon<sup>4</sup>, and Soo Geon Wang<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Department of Applied IT and Engineering, Pusan National University, Miryang 627-706, Korea  
<sup>2</sup> Department of Biomedical Engineering, Pusan National University, Miryang 627-706, Korea  
<sup>3</sup> Department of Speech and Hearing Therapy, Catholic University of Pusan, Pusan 609-757, Korea  
<sup>4</sup> Department of Medical Engineering, School of Medicine, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea  
<sup>5</sup> Department of Otolaryngology, School of Medicine, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

(Received July 17, 2012; Revised September 10, 2012; Accepted September 19, 2012)

**Abstract:** Compared to conventional pure-tone audiometer(PTA), the computerized one has several advantages such as relatively lower price, better flexibility, and easy operation. In addition, the computerized PTA can be easily extended to support automatic calibration. In this study, the support of automatic calibration in the computerized PTA has been addressed using the Linux realtime spectrum analyzer and network. In terms of accuracy, the new automatic calibration machine was compared to the existing manually operated one. According to the comparison, normal operation and high accuracy were observed within the scope of the international standard.

**Keywords:** Computerized puretone audiometer, Audiometer calibration, Linux based real-time spectrum analyzer, Sound level meter

#### 1. 서 론

컴퓨터를 이용한 순음청력검사기 (puretone

audiometer, PTA)는 전자회로로 제작된 것에 비해 가격대비 성능이 우수하며, 다양한 기능을 쉽게 제공할 수 있는 장점을 가진다. 자동 보정을 지원할 수 있다는 점도 컴퓨터 기반 순음 청력 검사기의 장점들

a. Corresponding author: bjshin@pusan.ac.kr

중 하나이다.

순음청력검사기의 검사음은 피검자의 귀에 전달되는 과정에 존재하는 장치들과 주변 환경에 따라 검사음의 강도 및 주파수가 변할 수 있고, 또 동일한 장치도 시간이 경과하게 되면 정확도가 달라질 수 있다. 따라서 정확한 검사 결과를 얻기 위해서는 표준에 정합하는 검사음의 음향 보정 (acoustic calibration)이 필수적이다. 이와 관련된 표준으로는 ANSI S3.6-2004 규격과 ISO 389-1, 그리고 IEC 60645-1이 있다 [1,2].

본 논문은 컴퓨터 기반 순음청력검사기의 자동 보정을 지원하기 위해 리눅스 기반의 실시간 스펙트럼 분석기와 실시간 스펙트럼 분석기의 측정 결과를 이용하여 검사음을 보정하는 자동 보정 모듈을 구현하고 시험한 결과를 기술한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 관련 연구

본 연구와 관련된 기존 연구 결과들을 분석하면 다음과 같다. [4]는 PDA를 이용한 이동형 청력 검사 시스템에서의 음압 보정을 시도하였다. 이 방법은 수직을 적용한 점에서 본 논문의 방법과 차별되며, 특히 낮은 음압과 높은 음압에서 오차가 크다는 문제점을 가진다.

[5]는 자동 보정을 지원하는 PC 기반 순음청력검사기를 구현하였다. [5]의 방법은 구조 측면에서 본 논문의 연구와 유사하다. 그러나 음압 측정기가 Windows 기반의 LabView로 작성되었으며, 측정 값을 파일 시스템을 통해 간접적으로 교환하기 때문에 정확도가 떨어질 수 있는 단점이 있다.

본 연구는 ANSI S3.6-2004에서 정한 순음의 출력 강도, 출력강도의 선형성, 주파수 정확도, 차폐음의 출력 강도 등 검사 음에 관한 다양한 검증이 가능한 리눅스 기반 실시간 스펙트럼 분석기를 구현하여 자동 보정을 지원한다.

### 2.2 하드웨어 구성

자동보정에 사용되는 시스템의 전체 구성도는 그림 1과 같다. 헤드폰을 통해 출력되는 순음청력검사기의 검사음은 인공 귀를 통해 마이크로폰으로 전달되어 전기적 신호로 변환되고, 프리앰프를 통해 실시간 스펙트럼

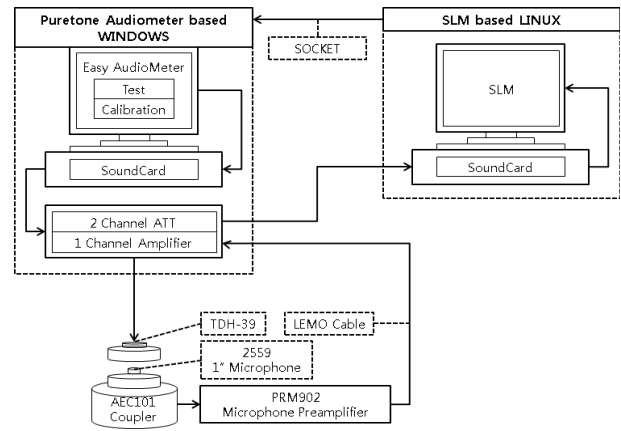


Fig. 1. H/W configuration.

펙트럼 분석기로 입력된다. 스펙트럼 분석기는 입력된 신호를 분석하여 주파수와 음의 강도를 측정한다. 측정된 음의 강도 및 주파수 값은 이더넷을 통해 순음청력검사기의 보정 모듈에 전달된다.

순음청력검사기의 보정모듈은 스펙트럼 분석기로부터 전달받은 측정값을 기반으로 보정 계수를 조정 한 후 음을 출력하고 필요한 경우 보정 계수를 재조정한다. 이 과정은 보정된 출력 값과 스펙트럼 분석기의 측정값과의 차이가 표준에서 권고하는 오차 범위 내에 들 때까지 반복된다 [6].

### 2.3 LINUX 기반 실시간 스펙트럼 분석기

순음청력검사기의 검사음을 측정하기 위해 상용 스펙트럼 분석기를 사용할 경우 순음청력검사기가 검사음의 측정값을 자동으로 인지할 수 있는 방법이 없기 때문에 자동 보정이 불가능하다. 상용 분석기는 이러한 기능을 제공하지 않기 때문에 본 논문에서는 리눅스 기반 실시간 스펙트럼 분석기를 구현하여 사용한다.

실시간 스펙트럼 분석기는 컴퓨터 사운드 카드의 ADC (analog to digital converter)를 통해 측정할 음을 입력받아 분석한다. 리눅스 실시간 스펙트럼 분석기의 소프트웨어는 Linux 운영체제, 사운드 처리와 스펙트럼 분석을 위한 Jack Audio Connection Kit, 퓨리에 변환을 지원하는 FFTW, 그리고 Pthread로 구성된다.

본 실시간 스펙트럼 분석기는 자동 보정 모듈에서 사용하는 사운드 레벨과 주파수 정확도 (frequency

accuracy)의 측정뿐 아니라 ANSI S3.6-2004, ISO 389, IEC 60645-1와 같은 국제 표준에서 규정하고 있는 청력 레벨 (hearing level), 청력 레벨 선형성 (hearing level linearity), 고조파 왜곡 (harmonic distortion), 단속음 (pulsed tone), 광대역 및 협대역 잡음 레벨 (narrow-band noise level)을 측정할 수 있다 [3,7]. 샘플링 시간은 국제 표준에서 권고하는 125 msec의 short mode와 1 sec의 long mode를 지원한다.

### 2.4 소프트웨어 구성

자동보정모듈은 컴퓨터 기반 순음청력검사기 소프트웨어의 한 모듈로 존재하며, 이는 보정 과정에 사용되는 순음과 차폐음을 발생시키기 위해 음 생성 모듈을 이용한다. 보정 계수가 결정되고 보정이 완료되면 음 생성 모듈에서는 보정 계수를 반영한 검사음을 생성하게 된다. 검사음의 보정을 위한 소프트웨어 동작 과정은 그림 2와 같다.

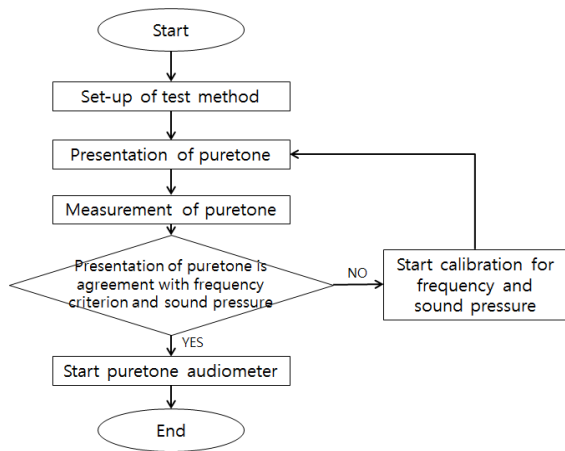


Fig. 2. Block diagram of computerized puretone audiometer software.

검사 방법 설정 후에 검사를 위한 순음이 발생되며, 검사음은 실시간 스펙트럼 분석기를 통해 측정된다. 측정된 검사음이 기준 주파수 및 음압과 일치하면 정상적인 순음청력검사 과정을 시작하고, 일치하지 않으면 주파수 및 음압의 보정 과정을 시작한다. 이 과정은 주파수와 음압이 기준을 만족할 때까지 반복된다.

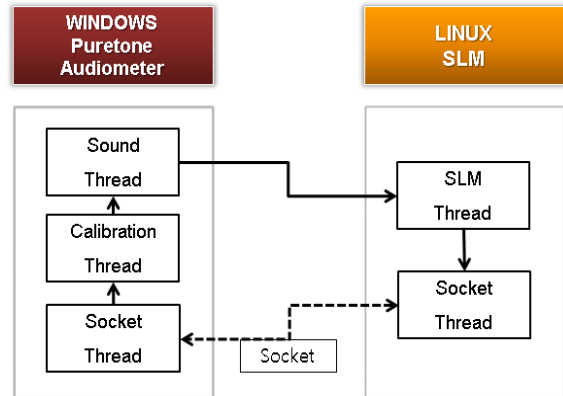


Fig. 3. Thread model of puretone audiometer.

자동 보정을 수행하기 위해 음압측정 시스템과의 통신을 담당하는 전용 쓰레드를 생성하여 동작한다. Linux 기반의 음압측정기는 음압측정을 위한 SLM 쓰레드와 통신을 위한 소켓 쓰레드가 별도로 동작하며, 각 쓰레드의 구동 시스템의 구성은 그림 3과 같다.

### 2.5 자동보정을 위한 데이터 송수신

#### 2.5.1 IP 주소 및 메시지

실시간 스펙트럼 분석기의 측정값을 순음청력검사기에 전달하기 위해 이더넷 (ethernet)을 사용한다. RS-232C 또는 USB를 사용하는 것도 가능하나, 최근 출시되는 메인보드에는 RS-232C 포트가 제공되지 않으며, USB의 경우 순음청력검사기가 많은 포트를 사용하기 때문에 부족할 가능성이 있어 이더넷 기반 고정 IP를 이용한다. 고정 IP를 사용함으로써 서버 IP 주소를 교환해야 하는 번거로움을 줄이며, IP 주소 변경만으로 타 시스템과 쉽게 결합하여 사용할 수 있다.

실시간 스펙트럼 분석기는 서버로 동작하며, 순음청력검사기의 보정 모듈이 시작될 때 클라이언트로 접속한다. 데이터 포맷은 바이너리를 사용하도록 설계함으로써 같은 기종 및 이 기종 간의 데이터 교환이 가능하다.

데이터는 하나의 패킷으로 처리하여 헤더와 메시지를 함께 전송할 수 있도록 한다. 패킷은 총 10 바이트로 2 바이트는 헤더, 8 바이트는 메시지로 활용한다.

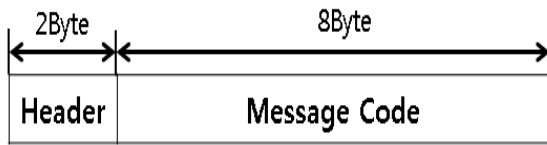


Fig. 4. Message packet.

Table 1. Specification of message header.

| Header | specification                  |
|--------|--------------------------------|
| 01     | Server sends message to client |
| 02     | Server's acknowledge message   |
| 03     | Client sends message to server |
| 04     | Client's acknowledge message   |

다. 그림 4는 패킷의 형태, 표 1은 헤더의 번호에 따른 메시지의 의미를 나타낸다. 표 1과 같이 헤더의 번호를 통해 수신지와 발신지의 확인이 가능하며, 메시지를 수신하는 쪽은 상대방으로 확인 메시지를 발송함으로써 메시지의 전송 여부도 함께 확인이 가능하다. 확인 메시지가 수신되지 않을 경우 메시지는 다시 보내도록 한다.

클라이언트인 순음청력검사기로 보정완료 메시지가 수신되면 시스템의 프로그램을 종료한다. 이와 함께 통신에 연결중인 이더넷이 종료되므로, 서버인 실시간 스펙트럼 분석기에서는 분석을 종료하고 통신을 종료한다.

리눅스 기반의 실시간 스펙트럼 분석기는 서버로 동작하며, 시스템은 앰프를 통해 입력된 검사음을 받아 실시간으로 주파수와 레벨을 분석한다. 분석된 레벨과 주파수는 분석됨과 동시에 윈도우 기반의 순음청력검사기로 소켓통신을 통해 전달되며, 실제 출력되어야 하는 주파수 및 레벨과 정합하는지 검사한다. 만약 정합한다면 같은 음이 흘러나오고, 정합하지 않는다면 보정 후에 기준 주파수와 레벨로 보정되어 보정된 음이 흘러나오게 된다. 이 과정이 연속하여 반복됨으로써 실시간으로 정확한 검사음을 출력하게 된다. 그림 5는 Linux에서 분석된 음의 주파수와 레벨이 Windows로 소켓통신으로 전달되는 화면이며, 그림 6은 Windows에서 메시지를 받는 화면이다.



Fig. 5. Send messages from linux client.

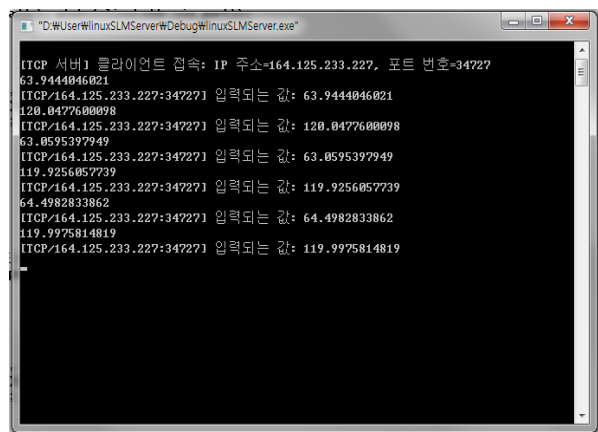


Fig. 6. Receive messages from Windows server.

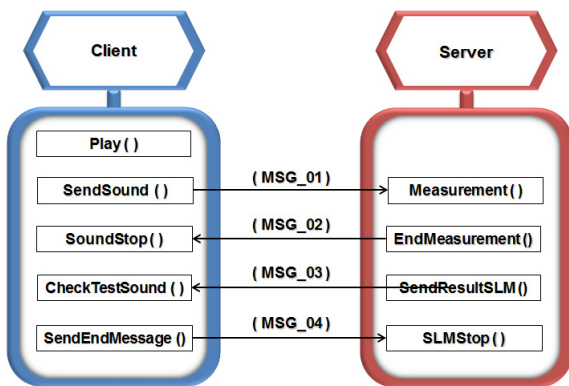
### 2.5.2 통신 함수 구현

데이터를 교환에 필요한 함수를 구현하기 위해 메시지 프로토콜을 정의하였다. 각 메시지는 서버 측과 클라이언트 측에 전달되어 각 함수의 시작과 종료를 알림으로써 시스템이 진행되도록 한다. 표 2는 통신을 위해 정의된 메시지 프로토콜이며, 그림 7은 통신을 위해 구현된 함수들의 구성도를 나타낸다.

클라이언트에서 검사음이 발생하면 검사음의 발생을 알리는 메시지인 'MSG\_01'은 서버로 전송되며, 서버는 검사음 측정을 시작한다. 측정이 끝난 후 서버는 클라이언트로 'MSG\_02' 메시지를 보내 검사음 측정이 끝났음을 알린다. 그리고 서버는 'MSG\_03'

**Table 2.** Specification of protocol message code.

| Message Code | specification                   |
|--------------|---------------------------------|
| MSG_01       | Notify presentation of puretone |
| MSG_02       | Notify completion measurement   |
| MSG_03       | Send result of measurement SLM  |
| MSG_04       | Notify completion calibration   |



**Fig. 7.** Flow of communication.

메시지에 측정된 결과를 함께 전송하여 보내는 메시지가 측정 결과임을 알린다. 클라이언트는 서버에서 전송된 'MSG\_03' 메시지를 이용하여 보정을 시작하고 기준 주파수 및 음압과 서버 측에서 보내온 측정값이 일치한다면 서버 측으로 'MSG\_04'를 전송하여 보정이 완료되었음을 알린다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 시험 환경

시험을 위한 하드웨어 구성은 그림 1과 같으며, 사용된 하드웨어는 다음과 같다. 순음청력검사기는 Intel Core2 Duo E8400 3.0 GHz 프로세서, 3.0 GB 메모리로 구성된 PC 기반, Windows 7 OS에서 동작한다. 실시간 스펙트럼 분석기는 Intel Core2 Duo E7400 2.8 GHz 프로세서, 2.0 GB 메모리, Audiophile 2496 사운드카드를 구성한 PC 기반, Ubuntu 10.10

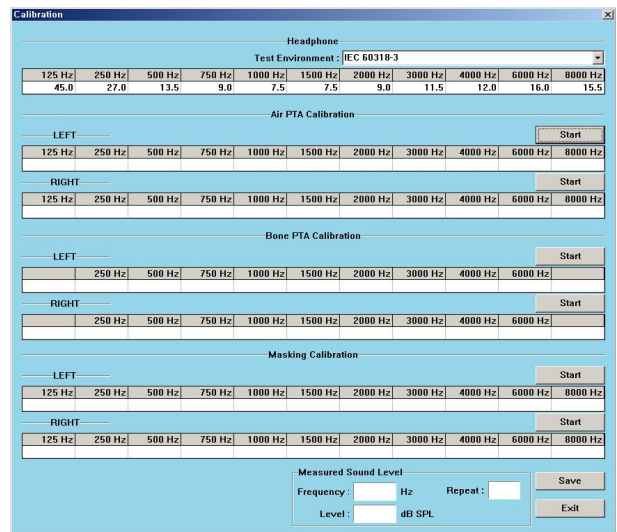
OS에서 동작한다. 네트워크를 위하여 IPv4 프로토콜을 사용한다. 송신버퍼는 128, 수신버퍼는 512이며, 절전형 이더넷과 흐름제어를 사용하도록 설정하였다.

커플러는 IEC 60318-3:1998과 ANSI S3.7-1995의 규격에 준수하는 AEC100 (Larson Davis Co., USA)를 사용하였다 [8,9]. 마이크로폰으로 IEC 60651:1979 와 ANSI S1.4-1983 (R2006)의 Type1에 부합하는 1" 정밀 무작위 입사각 마이크로폰(Larson Davis Co., USA)을 사용하였으며, 프리앰프는 IEC 61094-4의 기준을 만족하는 1" PRM 902 (Larson Davis Co., USA)를 사용하였다.

모든 음향적인 측정은 ANSI S3.1-1999 (R2008)을 준수하는 방음실(ECKEL C24)에서 수행하였으며 측정치 비교를 위하여 정밀 음압측정기인 Larson Davis사의 Audiometer Calibrator System를 이용한 측정치와 비교하였다 [10]. 기도 검사음 출력은 TDH-39 헤드폰을 사용하였고, 골도 검사음 출력은 Bruel & Kjaer 사의 4930을 사용하였다.

#### 3.2 WINDOWS 기반의 순음청력검사기

Windows 기반의 순음청력검사기는 표준화된 환경과 방법에 따라 선택하여 검사가 가능하도록 하였다. 양측 귀를 각각 주파수에 따라 차례로 검사 음이 나오도록 하였으며, 검사가 끝난 뒤에는 검사 결과를 저장하도록 하였다. 순음청력검사기의 검사화면은 그림 8과 같다.



**Fig. 8.** Windows based puretone audiometer.

### 3.3 LINUX 기반의 음압측정기

LINUX를 기반으로 한 실시간 스펙트럼 분석기는 음압 측정을 위해 개발되었다. 앰프를 통해 전달된 검사음은 LINUX에서 실시간으로 주파수와 레벨을 측정하게 된다. 측정된 결과 값은 1초에 한번 씩 화면에서 표기되며, 그림 9와 같다.

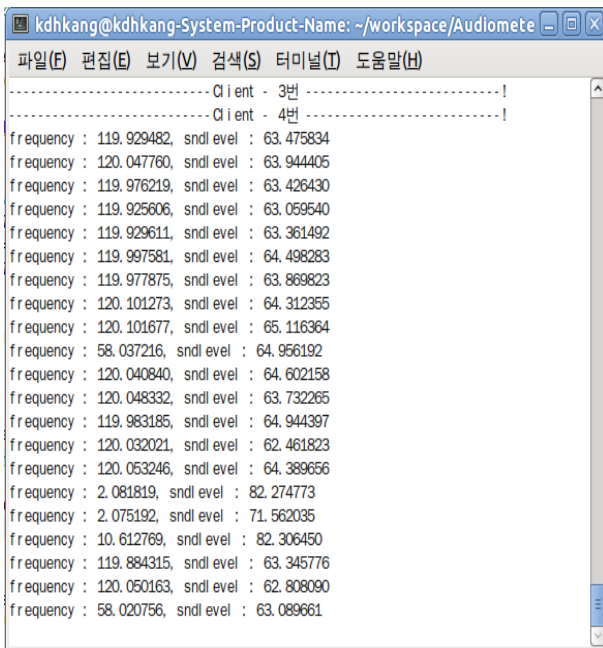


Fig. 9. Linux based sound level meter.

### 3.4 Windows PC와 LINUX PC의 통신

그림 10과 같이 소켓 통신으로 소켓이 생성된 이후에 LINUX PC에서 측정한 주파수와 레벨이 Windows PC로 전달된다. 전달되는 주파수와 레벨은 소수점 6자리까지 전달됨으로써 정밀한 측정값의 전달이 가능하다. 또한 실시간으로 측정된 측정값은 1초에 한번 씩 통신됨으로써 Windows 화면에도 1초에 한번 씩 나타나게 된다.

### 3.5 자동 보정 후 음압 측정

구현된 LINUX기반의 실시간 스펙트럼 분석기와 Larson Davis사의 Audiometer Calibrator System을 이용하여 순음 측정 결과를 비교 분석한다.

### 3.5.1 청력 레벨 정확도

순음청력검사기에서 70 dB HL을 기준으로 검사음을 출력하여 청력 레벨의 정확도를 비교하였으며, 분석한 결과는 표 3과 같다.

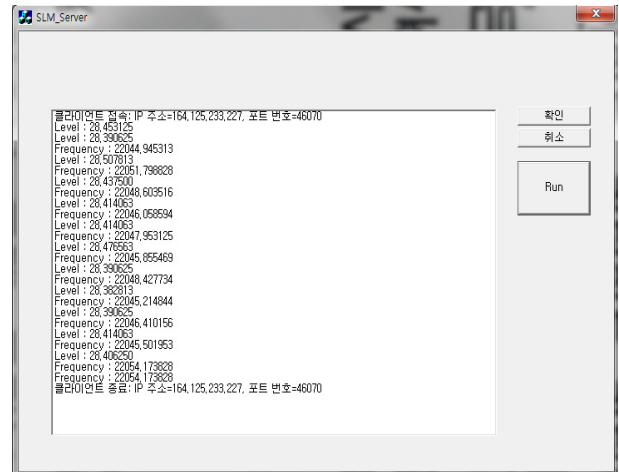


Fig. 10. Picture of Windows for communication.

Table 3. 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      |
| 1,000          | 70.6                 | 70.5                | -0.1      |
| 1,500          | 70.4                 | 70.2                | -0.2      |
| 2,000          | 70.7                 | 70.6                | -0.1      |
| 3,000          | 70.2                 | 70.1                | -0.1      |
| 4,000          | 70.6                 | 70.4                | -0.2      |
| 6,000          | 68.9                 | 68.7                | -0.2      |
| 8,000          | 73.4                 | 73.2                | -0.2      |

### 3.5.2 주파수 정확도

**Table 4.** 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       |
| 1,000          | 999.9                       | 999.9                      | 0.0       |
| 1,500          | 1499.9                      | 1499.9                     | 0.0       |
| 2,000          | 2000.0                      | 1999.8                     | -0.2      |
| 3,000          | 3000.0                      | 2999.8                     | -0.2      |
| 4,000          | 4000.0                      | 3999.7                     | -0.3      |
| 6,000          | 6000.0                      | 5999.5                     | -0.5      |
| 8,000          | 8004.0                      | 8003.4                     | -0.6      |

청력 레벨 측정과 같이 순음청력검사기에서 70 dB HL을 기준으로 검사음을 출력하여 주파수의 정확도를 측정하였으며, 분석 결과는 표 4와 같다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 Windows 기반의 순음청력검사가 정확한 측정 결과를 제공하기 위해 필수적인 보정 기능을 자동으로 수행할 수 있는 자동보정모듈을 구현하였다. 구현은 컴퓨터 사운드카드의 ADC 기능을 이용한 실시간 스펙트럼 분석기의 구현과 본 스펙트럼 분석기와 통신할 수 있는 자동 보정 모듈의 구현으로 이루어졌다.

실험을 통해 자동보정을 지원하는 순음청력검사 시스템이 출력이 표준에서 규정하고 있는 범위 내에서 정상적으로 작동함을 검증하였으며, 이 결과는 실제 임상에서 사용 가능한 수준임을 확인하였다. 기존에 진행했던 연구와 달리 C언어로 작성되어 차후에 유동성 있는 시스템 변경이 가능하며, 더 높은 정확도를 보여주고 있다.

따라서 본 논문의 자동 보정 기능은 현재 널리 사용되고 있는 고가 청력검사기에 비해 가격이 저렴하면서도 정확도가 보장되는 컴퓨터기반 청력검사기를 제공할 수 있게 한다.

#### 감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유 과제 학술연구비(2년) 지원에 의하여 연구되었습니다.

#### REFERENCES

- [1] J. D. Kim, B. J. Shin, G. R. Jeon, and S. G. Wang, *The Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, **10**, 1229 (2009).
- [2] D. H. Kang, B. D. Song, B. J. Shin, K. H. Lee, J. D. Kim, G. R. Jeon, and S. G. Wang, *The Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, **11**, 1325 (2010).
- [3] D. H. Kang, B. J. Shin, G. R. Jeon, and S. G. Wang, *The Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, **12**, 2830 (2011).
- [4] S. W. Shin, K. S. Kim, T. H. Yoon, S. M. Lee, and C. G. Song, *Trans. KIEE*, **56**, 1157 (2007).
- [5] J. D. Kim, D. H. Kang, B. D. Song, I. W. Lee, S. K. Kong, S. B. Kwon, G. R. Jeon, B. J. Shin, and S. G. Wang, *The Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, **17**, 2586 (2010).
- [6] Korea Occupational Safety & Health Agency, "KOSHA CODE H-13-2006" (2006).
- [7] IEC (International Electrotechnical Commission) 60645-1:2001, *Electroacoustics-Audiological Equipment - Part 1: Pure-Tone Audiometers*.
- [8] 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*.
- [9] ANSI S3.7-1995(R2003), *American National Standard Method for Coupler Calibration of Earphones*.
- [10] ANSI, "ANSI S3.1-1999 (R2008), Maximum Permissible Ambient Noise Levels for Audiometric Test Rooms" (2008).