

## Development of Ambulatory Audiometric System by Sound Pressure Level Calibration

辛承元\* · 金敬燮<sup>†</sup> · 尹泰皓\* · 李相旻\*\* · 宋哲奎\*\*\*

(Seung-Won Shin · Kyeong-Seop Kim · Tae-Ho Yoon · Sang-Min Lee · Chul-Gyu Song)

**Abstract** - In this paper, we implement a PDA(Personal Digital Assistant)-based audiometric system in order to estimate hearing threshold by adopting both pure-tone sound and speech audiometric test system. To estimate a subject's hearing threshold in an ambulatory audiometric test environment, an efficient sound calibration scheme between a PDA and a headphone device is proposed by applying polynomial fitting algorithms in 8-banded frequency ranges.

**Key Words** - PDA, Audiometric System, Pure-tone Audiometry, Speech Audiometry, Sound Pressure Level

### 1. 서 론

현대의 생활에서 소음은 일상적인 부분의 하나로 자리잡고 있다. 특히 멀티미디어의 보급과 더불어, 지속적인 소음에 장시간 노출되어 청각 신경의 손상이 발생하여 청력 손실이 발생하는 난청성 인구가 증가하고 있는 실정이다. 그러나 대부분의 사람들이 청력의 손실에 대해 무감각하고, 귀가 잘 들리지 않는다는 것을 느꼈을 때에는 이미 청력의 손실이 상당 부분 진행되어 보청기의 착용 시기를 놓치는 경우가 많다. 따라서 정기적인 청력 검사를 통하여 청력의 손상 정도를 파악하여 이상 유무를 확인하고, 필요하다면 보청기를 착용하는 등의 청력 관리가 필요하다[1]. 현재 병원에서 사용되고 있는 청력 검사 시스템은 병원에 고정 설치되어 있으며, 결과적으로 차폐실이라는 특수한 공간에서 청력 검사를 수행하여야 한다. 이 때문에 환자들의 청력 검사를 위해서는 병원을 직접 방문하여야 하고, 또한 청력 검사실에서 수행하는 검사가 필요할 때마다 매번 병원을 방문해야 하는 불편함이 있으며 아울러 병원 내방에 따른 비용이 발생한다. 따라서 어디에서나 간편하게 청력 검사를 수행할 수 있는 소위 '이동형 청력 검사 시스템'의 도입이 필요하다.

일반적으로 청력 검사가 수행된 후 검사 결과는 보청기의 보정이나 기타 청각 질환의 진단에 기초 자료로 활용된다[2]. 따라서 청력 검사 시스템의 검사 결과를 저장하고 관리할 수 있는 데이터베이스 시스템의 도입이 반드시 필요하다.

즉, 데이터베이스 구축을 통하여 환자 정보, 검사 결과 등이 저장되어야 하고, 필요할 경우 쉽게 제공될 수 있어야 한다.

이동형 청력 검사 시스템을 구축하기 위한 적절한 하드웨어 장치는 이동형 컴퓨터 단말기로 각광을 받고 있는 PDA(Personal Digital Assistant)와 밀폐형 헤드폰(Closed Headphone)으로 구성된다. 그러나 현재 다양한 종류의 PDA가 활용되고 있는바, 각각의 PDA마다 음압 출력 크기의 특성이 모두 다르다. 따라서 이동형 청력 검사 시스템을 구성할 때 사용되는 PDA의 음압 특성에 맞게 음압 출력의 크기를 보정하는 과정이 반드시 필요하다. 헤드폰 역시 그 종류가 다양하고, 음압 수신 특성이 각각 다르기 때문에 음압 수신의 보정 과정을 거쳐야 한다.

본 논문에서는 병원에서 수행하는 기존의 청력 검사 시스템을 PDA를 이용하여 어디에서나 쉽게 순음 및 어음 검사(Pure-tone and Speech Audiometry)를 통한 환자의 청력을 측정할 수 있는 '이동형 청력 검사 시스템'을 구축하고, 환자 정보와 검사 결과를 효율적으로 저장하고 관리하기 위한 데이터베이스를 구축하는 시스템을 구현하고자 하였다. 또한 기존의 청력 검사 시스템에 대응되는 검사 결과를 얻기 위하여 선택된 PDA와 헤드폰의 종류와 사양에 따른 음압 입/출력 특성을 고려한 청력 검사 시스템의 보정 방법을 제시하여 청력 검사에 필요한 음압을 정확하게 출력 및 수신할 수 있도록 하고자 하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1. 배경

##### 2.1.1. 순음 청력 검사

순음 청력 검사란 소리굽쇠에서 발생하는 것과 같은 일정한 주파수의 순음을 전기적으로 발생시켜 각 주파수에 따라

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 建國大 醫療生命大 醫學工學部 副教授, 建國大 醫工學實用技術研究所 · 工博

E-mail : kyeong@kku.ac.kr

\* 學生會員 : 建國大 醫學工學部 博士課程

\*\* 正會員 : 仁荷大 電氣 · 電子工學部 助教授 · 工博

\*\*\* 正會員 : 全北大 電子正報工學部 副教授,

接受日字 : 2007年 4月 23日

最終完了 : 2007년 5月 7日

음의 강도를 조절하여 청력 역치(HL: Hearing Threshold)를 측정하고, 그 결과로 청력 손실의 정도와 유형, 양상 등을 확인하는 검사이다[3][4]. 청력 측정은 좋은 귀를 먼저 검사하고 나쁜 귀를 나중에 검사하지만, 양쪽 귀의 청력에 차이가 없으면 오른쪽 귀를 먼저 검사한다. 검사하는 주파수의 순서는 1kHz부터 시작하여 2kHz, 3kHz, 4kHz, 6kHz, 8kHz의 순서로 검사하고 다시 1kHz를 검사한 뒤 500Hz, 250Hz의 순서로 검사를 진행한다. 검사의 방법으로는 상승법, 하강법, 혼합법 등이 있다. 한 예로써 그림 1은 상승법을 이용하여 청력을 측정하는 검사 프로토콜을 보여준다.

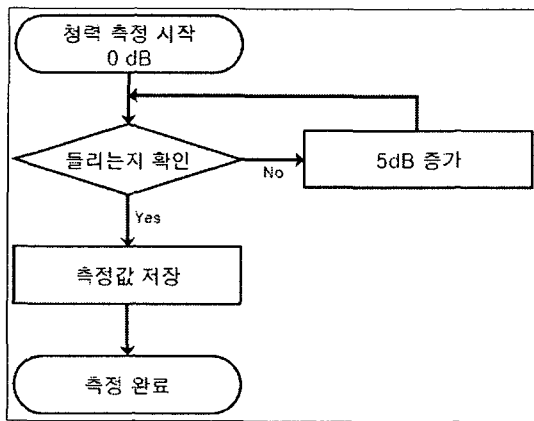


그림 1 상승법 청력 측정  
Fig. 1 A Flow chart for ascending hearing test

검사 결과의 판독은 각 주파수별 역치의 평균 역치인 평균 청력 역치에 의하여 피검자의 청력 소실 정도를 판독한다. 평균 청력 역치를 도출하는 방법으로 4분법과 6분법이 있다. 4분법은 500Hz와 2kHz의 청력 역치와 1kHz의 청력 역치의 2배를 합하여 4로 나눈 값을 평균 청력 역치로 결정하고, 6분법은 500Hz와 4kHz의 청력 역치와 1kHz, 2kHz의 청력 역치의 각 두 배의 값을 모두 합하여 6으로 나눈 값을 평균 청력 역치로 결정한다. 다음의 (1)식은 4분법, (2)식은 6분법을 이용하여 평균 청력 역치를 결정하는 경우를 보여주고 있다.

$$4\text{분법} = \frac{(HT)_{500\text{Hz}} + 2 \cdot (HT)_{1\text{kHz}} + (HT)_{2\text{kHz}}}{4} \quad (1)$$

$$6\text{분법} = \frac{(HT)_{500\text{Hz}} + 2 \cdot (HT)_{1\text{kHz}} + 2 \cdot (HT)_{2\text{kHz}} + (HT)_{4\text{kHz}}}{6} \quad (2)$$

여기에서  $(HT)_{\text{주파수}}$  는 각 주파수에서의 평균 청력 역치를 나타낸다. 본 논문에서는 6분법을 활용하여 검사 결과의 판독 방법으로 사용하였다.

### 2.1.2. 어음 청력 검사

어음 청력 검사는 일상적인 의사소통 과정에서 흔히 사용되는 어음을 이용하여 언어의 청취 능력과 이해의 정도를 파악하는 검사로서 다른 청력 검사 결과와 함께 난청의 감별진단, 사회적 능력의 평가, 보청기 사용 결정과 적응 평가,

청력개선술의 적응 등에 이용된다[3][4]. 어음 청력 검사에는 단음절, 이음절, 삼음절 또는 4음절 이상의 단어와 문장 등이 사용되는데, 이들 단어의 조건으로는 우선 일상생활에 친숙해야 하고, 단음절어는 모든 단어의 강도가 동일하게 발생되는 발생학적 동일음압단어(PB word: Phonetically Balanced Word)라야 한다. 이음절어는 양음절 모두에 강도가 있는 양양격단어(Spondee Word)를 선택해야 한다. 어음표는 각 표마다 비슷한 난이도와 적절한 음소(Phoneme)의 배분이 중요하다. 어음 청력 검사에 활용되는 어음은 테이프 등에 녹음된 것을 사용하거나 검사자의 육성을 들려주는 방법이 있는데, 육성을 사용할 경우 동일한 조건의 유지가 곤란하고, 결과의 일관성이 떨어지는 단점이 있다. 검사 방법으로는 이음절 단어를 사용하여 순음 평균 청력보다 20~30dB 정도 높은 어음 강도에서 시작하여 검사 어음에 대하여 50%를 바르게 응답하는 최소 어음 강도를 구하는 어음 청취 역치 검사와 단음절어를 사용하여 순음 평균 청력보다 약 20~40dB 정도 높은 어음강도에서 들려주고 이를 바르게 응답하는 비율을 구하는 어음 명료도 검사가 있다. 본 논문에서는 어음 명료도 검사를 어음 청력 검사 방법으로 사용하였으며, 어음 명료도 검사의 표준적인 방법으로 사용되는 단음절 어음인 PB 단어리스트를 사용하여 검사를 수행하도록 하였다. 어음 검사를 위해서, 음성학적으로 균형을 이루어야 하고, 일상 회화에서 사용되는 어음의 빈도와 같은 구성을 가져야 하며, 친숙한 어음을 사용하여야 한다. 표 1은 [3]에서 제시된, 어음명료도 검사에 사용되는 한국어 단음절 어표(Monosyllabic Word Table)를 보여준다.

표 1 어음 청력 검사용 한국어 단음절 어표  
Table 1 Korean monosyllabic word table for speech audiometry

group 1		group 2		group 3		group 4	
1.귀	26.황	1.허	26.금	1.눈	26.흙	1.글	26.밭
2.힘	27.법	2.득	27.홍	2.공	27.굴	2.집	27.깨
3.논	28.산	3.잠	28.비	3.길	28.면	3.꿈	28.연
4.맛	29.꿀	4.복	29.역	4.못	29.농	4.선	29.못
5.술	30.집	5.운	30.명	5.밥	30.삼	5.목	30.절
6.잔	31.늑	6.갓	31.쌀	6.섬	31.무	6.앞	31.광
7.국	32.꿀	7.신	32.범	7.돈	32.안	7.넷	32.시
8.숨	33.통	8.납	33.코	8.장	33.굿	8.벽	33.달
9.닭	34.삼	9.문	34.깃	9.극	34.틀	9.상	34.젓
10.옆	35.뽕	10.곳	35.밭	10.춤	35.떡	10.돌	35.쌈
11.불	36.되	11.숲	36.등	11.역	36.매	11.틈	36.목
12.남	37.꼭	12.종	37.질	12.숫	37.옛	12.겉	37.뺨
13.숫	38.설	13.답	38.더	13.방	38.죄	13.육	38.만
14.감	39.뚝	14.책	39.뜸	14.적	39.빛	14.말	39.콩
15.웃	40.명	15.땀	40.실	15.강	40.담	15.소	40.벗
16.들	41.은	16.씻	41.곽	16.손	41.시	16.검	41.쇠
17.달	42.금	17.망	42.붓	17.막	42.뺨	17.박	42.땅
18.배	43.점	18.걸	43.맥	18.벌	43.팔	18.뜰	43.벗
19.침	44.빌	19.일	44.일	19.꿀	44.샘	19.총	44.님
20.꿀	45.씩	20.죽	45.뼈	20.칼	45.뚝	20.낮	45.속
21.반	46.벼	21.밤	46.살	21.숨	46.잎	21.술	46.품
22.멋	47.왕	22.신	47.몸	22.낮	47.벌	22.단	47.인
23.키	48.색	23.널	48.풀	23.뒤	48.새	23.쥐	48.빨
24.딸	49.물	24.새	49.뚱	24.백	49.좁	24.굴	49.해
25.겉	50.개	25.꽃	50.끈	25.꿀	50.활	25.흙	50.곰

2.1.3. 차폐 (Masking)

차폐란 각각의 귀에 대한 최소 가청 역치를 구하는 과정에서 두 귀의 청력에 차이가 있고, 청력 손실이 큰 쪽의 귀를 검사할 때 자극음이 두개골의 진동을 통해 검사하지 않는 좋은 귀로 누설되어 발생하는 음영 청취(Shadow Hearing or Cross-over)를 막아 나쁜 쪽 귀의 정확한 최소 가청 역치를 구하기 위하여 좋은 귀에 잡음을 들려주는 것을 말한다. 차폐는 같은 주파수에서 두 귀의 최소 가청 역치가 두 귀 사이의 손실 이상의 차이를 보이면 반드시 시행하여야 한다. 사용되는 잡음으로는 톱니잡음, 백색잡음, 어음잡음, 협대역잡음 등이 있다. 본 연구에서는 차폐음의 생성을 위하여 가우시안 백색 잡음(Gaussian White Noise)을 활용하였다.

2.2. 청력 검사 시스템 개발

청력 검사 시스템 개발을 위한 기반 하드웨어 시스템으로 PDA를 설정하였다. PDA에는 기본적으로 운영체제가 내장되어 있는데 PDA 제품마다 사용하는 운영체제가 각각 다르다. 따라서 각각의 운영체제에 적합한 프로그램을 개발할 필요성이 있다. 본 연구에서는 Microsoft사의 Windows CE 기반의 PocketPC 2003을 기본 운영체제로 사용하는 HP사의 hx4700 모델을 기본 시스템으로 사용하였고, 프로그램 개발 도구는 eMbedded Visual C++ 4.0과 PocketPC 2003 SDK(System Development Kit)를 사용하였다. PDA 상에 구현되는 청력 검사 시스템의 기본 구성은, i) 순음 청력 검사 소프트웨어 모듈, ii) 어음 청력 검사 소프트웨어 모듈, iii) 환자 정보, 검사결과 및 어음 데이터를 저장하고 관리할 수 있는 데이터베이스, iv) 청력 검사 진행을 위한 헤드폰 출력 장치로 이루어져 있다. 그림 2는 통합 이동형 청력 검사 시스템의 구성도를 보여준다.

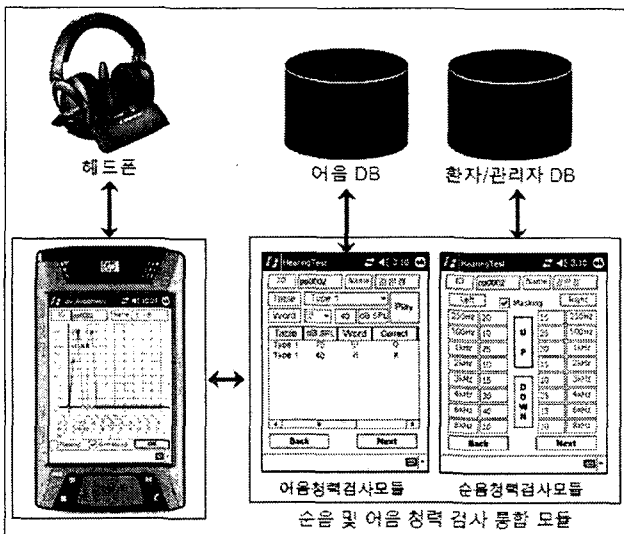


그림 2 이동형 청력 검사 시스템 구성도  
Fig. 2 Ambulatory audiometric system

음압 보정을 통한 이동형 청력 검사 시스템 구현

2.2.1. 순음 청력 검사 모듈

순음 청력 검사를 위해서는 일정한 주파수의 소리를 출력할 필요가 있다. 따라서 2차 IIR(Infinite Impulse Response) 필터를 이용하여 특정한 주파수를 가지는 디지털 신호를 생성하여 소리를 발생시키는 장치인 톤 발생기를 소프트웨어적으로 구현하였다[5]. (3)식은 일정한 주파수를 가지는 디지털 신호  $x_n$ 을 발생시키는 수식과 초기값을 보여준다.

$$x_n = 2\cos\left(\frac{2\pi f}{f_s}\right)x_{n-1} - x_{n-2} \quad (3)$$

$$x_{n-1} = 0, x_{n-2} = -A\sin\left(\frac{2\pi f}{f_s}\right)$$

여기서  $f_s$ 는 샘플링 주파수이고,  $f$ 는 생성하고자 하는 순음의 주파수,  $A$ 는 진폭을 나타낸다. 각각의 주파수 별로 음압을 변화시키면서 순음을 출력할 수 있도록 구현되었으며, 출력 음압은 보정을 위한 일정한 관계식을 거쳐 출력 음압이 결정되도록 하였다. 검사 방법은 상승법을 사용하였으며, 또한 검사가 끝난 후 청력도(Audiogram)를 통하여 결과를 판독할 수 있도록 하였다. 그림 3은 순음 청력 검사 모듈의 프로토콜을 보여주고 있고, 그림 4는 순음 청력 검사 모듈의 GUI(Graphic User Interface)를 보여준다.

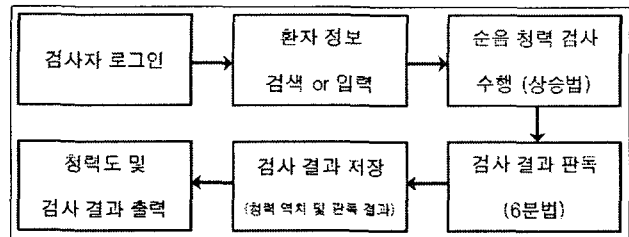


그림 3 순음 청력 검사 프로토콜  
Fig. 3 Protocol for pure-tone audiometric system

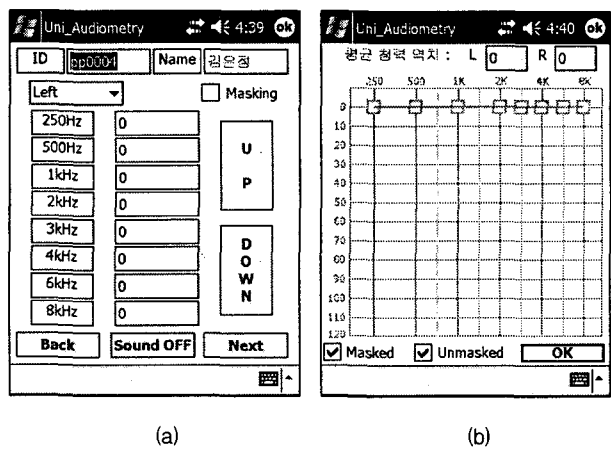


그림 4 순음 청력 검사 모듈의 GUI  
Fig. 4 GUI for pure-tone audiometric system  
(a) 순음 청력 검사 화면  
(b) 순음 청력 검사 결과의 청력도 화면

### 2.2.2. 어음 청력 검사 모듈

어음 청력 검사 모듈에서는 녹음된 어음 파일을 직접 출력하여 검사할 수 있도록 구현되었다. 검사 방법은 어음 명료도 검사를 사용하므로 단음절어를 녹음한 어음 파일을 사용하도록 구현하였고, 각각의 어음을 출력할 때 음압을 조절하여 출력할 수 있도록 하였다. 그림 5는 어음 청력 검사 모듈을 보여주고, 그림 6은 어음 청력 검사 모듈의 GUI를 보여준다.

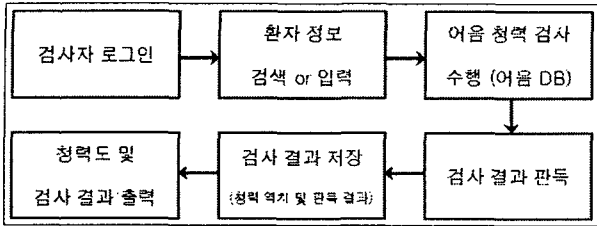
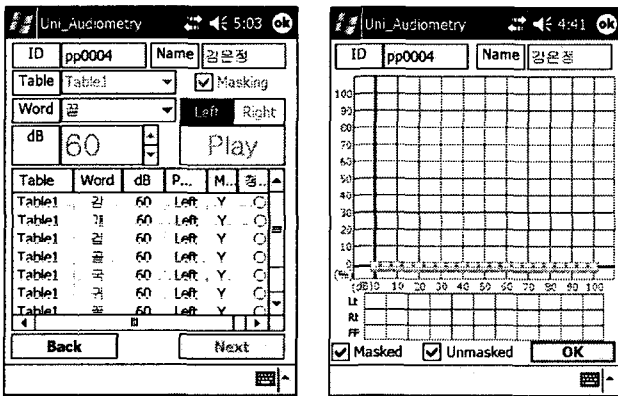


그림 5 어음 청력 검사 프로토콜  
Fig. 5 Protocol for speech audiometric system



(a) (b)

그림 6 어음 청력 검사 모듈의 GUI  
Fig. 6 GUI for speech audiometric system

- (a) 어음 청력 검사 화면
- (b) 어음 청력 검사 결과의 청력도 화면

### 2.3. 차폐를 위한 잡음 생성

차폐 기능을 구현하기 위하여 균일한 확률분포를 갖는 잡음  $X_1, X_2, \dots, X_{12}$  를 각각 독립적으로 생성한 후 이를 합산하는 방식으로 다음과 같이 (4)식을 통하여 가우시안 백색 잡음을 생성하였다.

$$X = X_1 + X_2 + \dots + X_{11} + X_{12} \quad (4)$$

중심 극한 정리(Central Limit Theorem)[6]에 따라서  $X$  는 (5)식에서 표현된 것과 같이 가우시안 분포를 지니게 된다.

$$f(x) \approx \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

### 2.4. 데이터베이스 구성

환자 정보와 검사 결과를 효율적으로 저장, 관리하기 위하여 Microsoft Windows CE에서 제공하는 데이터베이스 API(Application Program Interface)를 사용하여 PDA에 데이터베이스를 구축하였다. 데이터베이스 API 함수는 PC에서 구현되는 데이터베이스와는 달리 단순한 기능을 제공하며, SQL(Structure Query Language)을 지원하지 않는다. 그러나 소규모의 데이터를 저장하고 관리하는 데 매우 편리한 도구이며, 사용자가 데이터베이스 파일을 삭제하는 등의 실수를 범할 가능성이 적다[7]. 본 연구에서는 i) 검사자 데이터베이스, ii) 환자 데이터베이스, iii) 순음 청력 검사 데이터베이스, iv) 어음 청력 검사 데이터베이스 및 v) 어음 데이터베이스를 구축하였다. 검사자 데이터베이스는 검사자의 신상정보를 저장하고, 환자 데이터베이스는 환자의 신상정보를 저장한다. 그리고 순음 청력 검사 데이터베이스와 어음 청력 검사 데이터베이스는 환자의 ID를 키(key)로 하여 각각의 환자에 대한 검사 결과를 저장한다. 또한 어음 데이터베이스는 표 1에서 표시된 어음 청력 검사에 사용되는 어음을 저장하고 관리함으로써 쉽게 어음파일을 검색하여 청력 검사를 수행할 수 있도록 하였다. 표 2는 각각의 데이터베이스의 구성 필드를 각각 보여준다.

표 2 데이터베이스의 구성 필드

Table 2 Database structures

- (a) 검사자 데이터베이스
- (b) 환자 데이터베이스
- (c) 순음 청력 검사 결과 데이터베이스
- (d) 어음 청력 검사 결과 데이터베이스
- (e) 어음 데이터베이스

검사자 ID	Password	검사자 이름	주민등록번호
직위	나이	전화번호	E-mail

(a)

환자 ID	환자 이름	주민등록번호	나이
성별	주소	전화번호	E-mail

(b)

환자 ID	UL_250	UL_500	UL_1K	UL_2K	UL_3K	UL_4K
	UL_6K	UL_8K	UR_250	UR_500	UR_1K	UR_2K
	UR_4K	UR_6K	UR_8K	ML_250	ML_500	ML_1K
	ML_2K	ML_3K	ML_4K	ML_6K	ML_8K	MR_250
	MR_500	MR_1K	MR_2K	MR_3K	MR_4K	MR_6K
	MR_8K					

(c)

환자 ID	HL_0	HL_5	HL_10	HL_15	HL_20
	HL_25	HL_30	HL_35	HL_40	HL_45
	HL_50	HL_55	HL_60	HL_65	HL_70
	HL_75	HL_80	HL_86	HL_90	HL_95
	HL_100				

(d)

Table이름	단어_1	단어_2	단어_3	단어_4	단어_5
	단어_6	단어_7	단어_8	단어_9	단어_10
	단어_11	단어_12	단어_13	단어_14	단어_15
	단어_16	단어_17	단어_18	단어_19	단어_20
	단어_21	단어_22	단어_23	단어_24	단어_25
	단어_26	단어_27	단어_28	단어_29	단어_30
	단어_31	단어_32	단어_33	단어_34	단어_35
	단어_36	단어_37	단어_38	단어_39	단어_40
	단어_41	단어_42	단어_43	단어_44	단어_45
	단어_46	단어_47	단어_48	단어_49	단어_50

(e)

표 2의 (c)에서 'UL\_가청주파수'는 차폐를 수행하지 않은 상태의 왼쪽 청력 역치, 'UR\_가청주파수'는 차폐를 수행하지 않은 상태의 오른쪽 청력 역치를 나타내고, 'ML\_가청주파수'는 차폐를 수행한 상태의 왼쪽 청력 역치, 'MR\_가청주파수'는 차폐를 수행한 오른쪽 청력 역치를 나타낸다. (d)에서 'HL\_음압'은 각각의 음압별로 차폐를 수행한 상태의 왼쪽과 오른쪽 명료도치를 차폐를 수행하지 않은 상태의 왼쪽과 오른쪽 명료도치를 모두 포함하는 문자열이다. 또한 (e)에서 '단어\_번호'는 표 1의 한국어 단어집 어표의 순서에 따른 단어를 나타낸다. 그림 7은 예제 프로그램(CeDbView)을 통한 데이터베이스의 구조의 예를 보여준다.

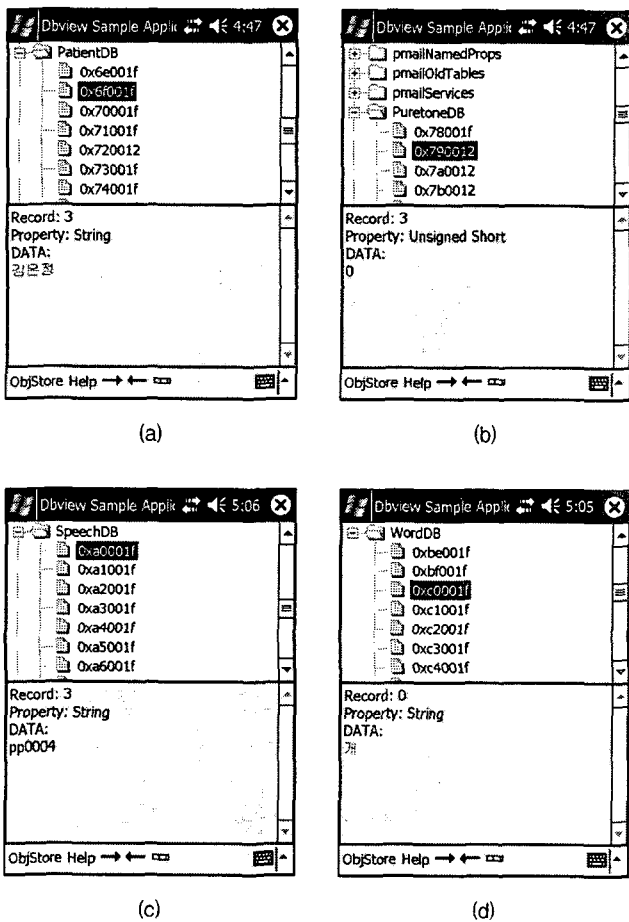


그림 7 이동형 청력 검사를 위한 데이터베이스 구조의 예  
Fig. 7 Examples of audiometric database.

- (a) 환자 데이터베이스(PatientDB)
- (b) 순음 청력 검사 결과 데이터베이스(PuretoneDB)
- (c) 어음 청력 검사 결과 데이터베이스(SpeechDB)
- (d) 어음 데이터베이스(WordDB)

그림 7에서 윗 부분은 데이터베이스의 이름과 하위 트리로서의 필드 구조를 보여주고, 밑 부분은 선택된 필드의 레코드의 순서와 저장되는 형태, 그리고 저장된 데이터의 내용을 보여준다. 그림 7의 (a)는 환자 데이터베이스인 PatientDB의 내용을 보여주고 있는데, 선택된 트리는 PatientDB의 두 번째 필드인 환자 이름의 레코드의 순서와 타입, 저장된 데이터를 보여주고 있다. 같은 방법으로 그림 7의 (b)는 순

음 청력 검사 결과 데이터베이스인 PuretoneDB의 필드구성과 필드의 내용을, 그림 7의 (c)는 어음 청력 검사 결과 데이터베이스인 SpeechDB의 필드 구성과 필드의 내용을 보여주고, 그림 7의 (d)는 어음 청력 검사에 활용되는 어음 데이터베이스인 WordDB의 필드 구성과 내용을 보여주고 있다. 이와 같은 데이터베이스의 구성으로 환자와 검사자의 신상 정보 및 환자의 청력 검사 결과, 어음 청력 검사에 활용되는 어음을 효율적으로 관리할 수 있다.

2.5. 음압 입/출력 보정(Sound Calibration)

현재 널리 사용되고 있는 PDA와 헤드폰은 그 제품 모델에 따라서 사양과 특성이 각각 다르므로, 같은 음압 입/출력 시스템을 사용한다 하더라도, 청력 검사에 적합한 음압을 출력하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 각각의 제품들의 사양에 맞도록 출력 음압을 보정하는 과정을 반드시 거쳐야 한다. 본 연구에서는 출력 음압의 보정을 위하여 PDA와 헤드폰이 선정되면, 실제로 PDA 시스템에서 출력되는 순음의 음압을 측정하고 이를 헤드폰에서 측정하는 경우를 설정하여, 청력 검사에 사용할 수 있는 정확한 음압을 도출하기 위한 방법을 연구하였다. 그림 8은 음압 측정에 사용한 장비와 실험 장면을 보여준다.

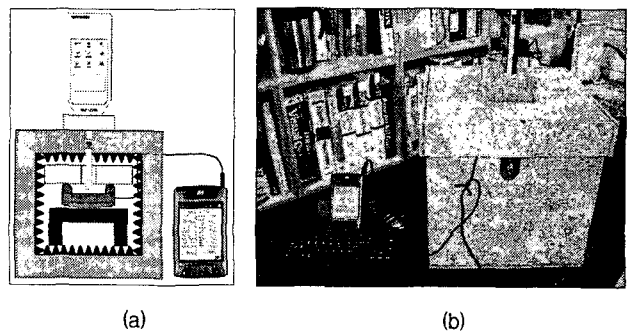


그림 8 실험 장비의 단면도 및 실험 장면  
Fig. 8 Schematic diagram of device for sound calibration

- (a) 자체 제작한 방음상자의 단면도
- (b) 실제 방음 상자

주변의 소음을 차단하기 위하여 소형의 방음상자를 자체 제작하였다. 완성된 방음 상자의 내부 음압을 측정한 결과, 최저 21.1dB, 평균 25dB로 일반적인 청력검사실과 비슷한 수준으로 주변 소음을 차단할 수 있었다. 실험에 사용된 장비는 음압을 측정하는 도구로 CESVA 사의 SC-30 사운드 레벨 미터를 사용하였고, 음압 출력 시스템은 청력 검사 시스템 개발에 사용된 HP사의 hx4700 모델의 PDA와 주변의 소음을 차단할 수 있는 밀폐형 헤드폰인 Sennheiser 사의 HD250 모델의 헤드폰을 사용하였다. 실험 방법은 각 Hz별, dB별로 10회씩 음압을 반복 측정하면서 일정하게 출력되는 음압에 대한 진폭 데이터를 도출하고, 측정된 진폭 데이터를 음압의 정의에서 사용된 관계식을 적용하여 진폭의 dB형태의 데이터로 변환하였다. (6)식은 진폭 데이터를 진폭의 dB 변환 데이터로 변환하는 수식을 보여준다.

$$Y = 20 \cdot \log_{10} X \quad (6)$$

여기에서 X는 측정된 음압의 진폭 데이터이고, Y는 진폭의 dB 변환 데이터이다. 진폭의 dB 변환 데이터라 함은 실제 음압이 아닌 단순히 dB 관계식을 적용하여 계산된 값이다. 이 데이터들을 MATLAB의 polyfit, polyval 함수를 통한 곡선 맞춤(Curve Fitting)을 수행하여 각 주파수 별로 실제 음압에 대응되는 진폭의 dB 값을 도출할 수 있는 선형 방정식을 도출하였다. 도출된 진폭 dB를 역 로그함수 변환을 통하여 원래의 값으로 환원하면 정확한 음압 출력을 위한 진폭 데이터로 사용할 수 있다.

### 3. 결 과

#### 3.1. 음압 입/출력 보정 결과

실제 음압 데이터와 진폭의 dB변환 데이터는 같은 형태의 데이터 형식을 표현하므로 진폭의 dB변환 데이터를 통하여 실제 음압을 예측할 수 있다. 곡선 맞춤을 통하여 도출한 선형 방정식은 원하는 음압을 이용하여 위의 순음 발생 알고리즘에 이용되는 진폭 데이터를 도출하도록 한다. PDA와 헤드폰의 종류와 사양에 따라 적절한 선형 방정식을 도출하면 원하는 음압이 출력될 수 있는 진폭 데이터를 도출할 수 있다. 표 3은 각 주파수 별로 실험 결과 데이터에 의해 도출된 보정 수식을 보여준다.

표 3 각 주파수별로 도출된 보정 수식  
Table 3 Fitting equations for sound calibration

주파수(Hz)	도출된 보정식
250	$y = 1.0207x + 5.1405$
500	$y = 1.0127x - 4.95$
1K	$y = 1.0092x - 7.0744$
2K	$y = 1.003x - 13.159$
3K	$y = 1.016x + 0.4608$
4K	$y = 0.9989x - 8.9792$
6K	$y = 1.0176x + 2.139$
8K	$y = 1.0289x + 11.3245$

1차 선형 방정식으로 수식을 도출한 이유는 측정 데이터가 1차 선형 방정식의 형태를 가지고 있고, 2차 및 3차 방정식과 비교했을 때 실제 측정된 데이터의 구간에서는 곡선 맞춤에 의한 오차가 거의 없으나, 실제로 측정되지 못한 음압 데이터 구간에서 2차와 3차 방정식은 오차가 커지는 문제점이 있기 때문이다. 그림 9는 250Hz, 그림 10은 2kHz, 그림 11은 8kHz에서 각 차수별 수식의 데이터를 비교한 그래프를 보여준다. 또한 표 4는 도출된 보정식을 이용하여 구한 각 주파수별 진폭의 dB값을 보여준다. 그림 9와 그림 10, 그림 11에서는 실제 측정된 데이터 구간에서의 그래프는 각 차수별 보간 데이터간의 오차가 크게 발생하지 않았으나, 측정되지 못한 낮은 음압구간과 높은 음압구간에서는 오차가 크게 발생함을 알 수 있다.

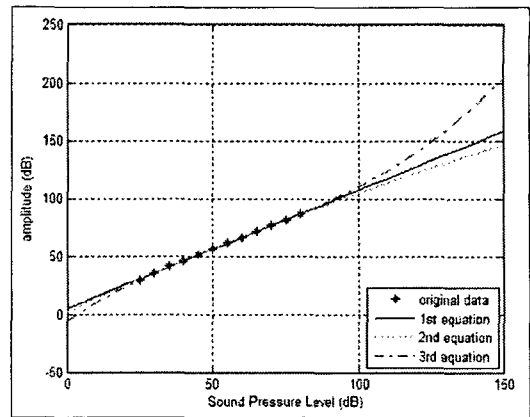


그림 9 250Hz에서 차수별 수식의 데이터 비교  
Fig. 9 Calibration of 250Hz sound data for 1st, 2nd and 3rd polynomial fitting

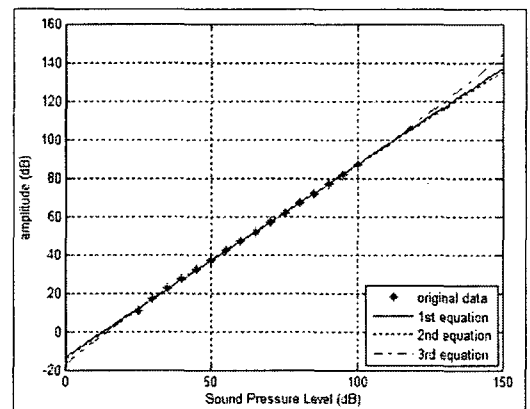


그림 10 2kHz에서 차수별 수식의 데이터 비교  
Fig. 10 Calibration of 2kHz sound data for 1st, 2nd and 3rd polynomial fitting

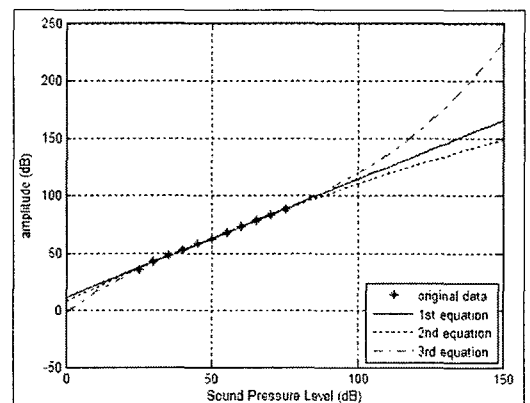


그림 11 8kHz에서 차수별 수식의 데이터 비교  
Fig. 11 Calibration of 8kHz sound data for 1st, 2nd and 3rd polynomial fitting

표 4 보정 수식을 이용하여 도출된 각 주파수별 진폭의 dB 결과

Table 4 Calibrated sound pressure level in dB scale

음압dB	주파수별 진폭의 dB 값							
	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	3kHz	4kHz	6kHz	8kHz
0	5.1405	-4.95	-7.0744	-13.159	0.4608	-8.9792	2.139	11.3245
5	10.2438	0.1136	-2.0284	-8.1442	5.5408	-3.9849	7.2268	16.4689
10	15.3471	5.1772	3.0176	-3.1294	10.6208	1.0095	12.3147	21.6133
15	20.4503	10.2408	8.0637	1.8854	15.7008	6.0038	17.4025	26.7576
20	25.5536	15.3044	13.1097	6.9002	20.7808	10.9981	22.4904	31.902
25	30.6569	20.368	18.1558	11.9151	25.8608	15.9924	27.5782	37.0464
30	35.7602	25.4316	23.2018	16.9299	30.9408	20.9867	32.6661	42.1907
35	40.8635	30.4952	28.2478	21.9447	36.0208	25.9811	37.754	47.3351
40	45.9668	35.5588	33.2939	26.9595	41.1008	30.9754	42.8418	52.4795
45	51.0701	40.6224	38.3399	31.9744	46.1808	35.9697	47.9297	57.6238
50	56.1734	45.686	43.3859	36.9892	51.2608	40.964	53.0175	62.7682
55	61.2766	50.7496	48.432	42.004	56.3408	45.9583	58.1054	67.9125
60	66.3799	55.8132	53.478	47.0188	61.4208	50.9527	63.1932	73.0569
65	71.4832	60.8768	58.524	52.0337	66.5008	55.947	68.2811	78.2013
70	76.5865	65.9404	63.5701	57.0485	71.5808	60.9413	73.369	83.3456
75	81.6898	71.004	68.6161	62.0633	76.6608	65.9356	78.4568	88.49
80	86.7931	76.0676	73.6621	67.0781	81.7408	70.93	83.5447	93.6344
85	91.8964	81.1313	78.7082	72.093	86.8208	75.9243	88.6325	98.7787
90	96.9997	86.1949	83.7542	77.1078	91.9008	80.9186	93.7204	103.9231
95	102.1029	91.2585	88.8003	82.1226	96.9808	85.9129	98.8082	109.0675
100	107.2062	96.3221	93.8463	87.1374	102.0608	90.9072	103.8961	114.2118
105	112.3095	101.3857	98.8923	92.1522	107.1408	95.9016	108.984	119.3562
110	117.4128	106.4493	103.9384	97.1671	112.2208	100.8959	114.0718	124.5005
115	122.5161	111.5129	108.9844	102.1819	117.3008	105.8902	119.1597	129.6449
120	127.6194	116.5765	114.0304	107.1967	122.3808	110.8845	124.2475	134.7893
125	132.7227	121.6401	119.0765	112.2115	127.4608	115.8788	129.3354	139.9336
130	137.8259	126.7037	124.1225	117.2264	132.5408	120.8732	134.4232	145.078
135	142.9292	131.7673	129.1685	122.2412	137.6208	125.8675	139.5111	150.2224
140	148.0325	136.8309	134.2146	127.256	142.7008	130.8618	144.599	155.3667
145	153.1358	141.8945	139.2606	132.2708	147.7808	135.8561	149.6868	160.5111
150	158.2391	146.9581	144.3066	137.2857	152.8608	140.8505	154.7747	165.6555

3.2. 청력 검사 테스트 결과

음압 보정 실험을 통하여 도출한 수식으로 음압 보정 과정을 거친 청력 검사 시스템을 이용하여 정상청력을 가진 남성 3명, 여성 2명(23±3세)에 대한 순음 청력 검사와 24세의 여성 1명에 대한 어음 청력 검사 테스트를 수행하였다. 소요된 검사 시간은 평균적으로 순음 청력 검사는 약 10분, 어음 청력 검사는 약 18분 정도가 소요되었다. 표 5는 5명에 대한 순음 청력 검사 결과 데이터인 평균 청력 역치를 보여준다. 또한 그림 12는 순음 청력 검사 결과의 청력도의 예를, 그림 13은 어음 청력 검사 결과의 청력도의 예를 보여준다.

표 5 5명에 대한 평균 청력 역치

Table 5 The average hearing threshold

ID	차폐를 수행한 상태		차폐를 수행하지 않은 상태	
	왼쪽	오른쪽	왼쪽	오른쪽
subject 1	15	17	10	17
subject 2	10	10	9	13
subject 3	10	10	13	12
subject 4	11	11	11	11
subject 5	14	14	13	14

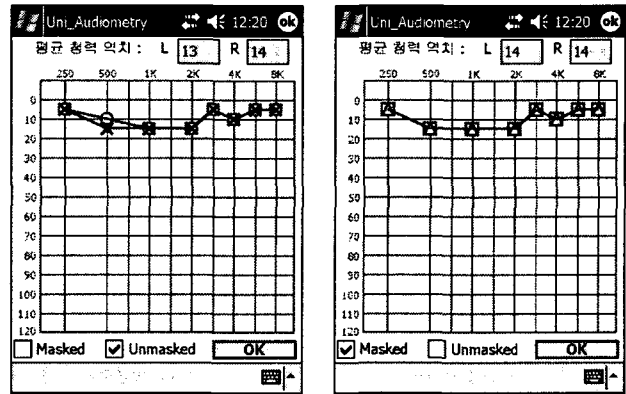


그림 12 순음 청력 검사 결과의 청력도의 예

Fig. 12 Audiogram of pure-tone audiometric test

- (a) 차폐를 수행하지 않은 상태의 청력도
- (b) 차폐를 수행한 상태의 청력도

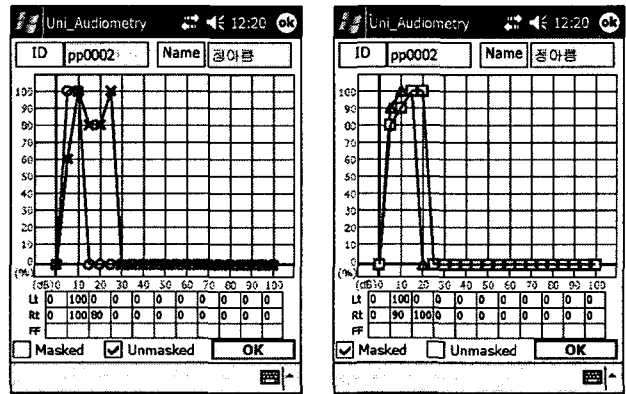


그림 13 어음 청력 검사 결과의 청력도의 예

Fig. 13 Audiogram of speech audiometric test

- (a) 차폐를 수행하지 않은 상태의 청력도
- (b) 차폐를 수행한 상태의 청력도

그림 12의 순음 청력도에서는 청력 소실 정도가 정상 범위 내에 있고, 양쪽 귀의 청력의 차이가 거의 없으며 차폐를 수행하지 않았을 때와 수행했을 때의 청력의 차이도 없으므로 정상으로 판정할 수 있다. 또한 그림 13의 어음 청력도에서는 차폐를 수행하지 않았을 때의 검사 결과는 어음 변별력에는 문제가 없으나 거짓 반응이 발생한 경우로 판단할 수 있고, 차폐를 수행하였을 때의 결과는 어음 변별력에 문제가 없는 정상적인 반응을 보인 것으로 판단할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 이동형 단말기인 PDA를 이용하여 간편하게 다양한 청력 검사를 수행할 수 있는 통합형 청력 검사 시스템과, 획득한 환자의 청력 정보 데이터를 효율적으로 관리할 수 있는 데이터베이스 시스템을 구축하였다. 또한 정확

하고 일정한 음압 출력을 위하여 PDA 단말기와 헤드폰의 종류와 사양에 따라 적절하게 순음의 음압을 보정할 수 있는 방법을 도출하였다. 추후에는 병원에서 환자와 정상인의 비교 테스트 및 사용되는 청력 검사기와 비교 테스트를 수행하여 통합 청력 검사 시스템의 유효성을 분석하는 연구가 필요할 것으로 사료되며, 유무선 통신을 이용한 PC 서버와의 연동을 통하여 환자 데이터 및 검사 결과 데이터를 통합 관리할 수 있는 시스템에 대한 연구와 어음의 음압을 보정할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 여겨진다.

**감사의 글**

본 연구는 보건복지부 첨단 감각 기능 회복장치 연구센터 (과제번호: 02-PJ3-PG6-EV10-0001)의 지원으로 수행되었습니다.

**참고 문헌**

- [1] 장성실, "정기 청력 검사에 의한 청각역 변화 검출 가능성," 산업보건, 12권, pp.71-72, 1993.
- [2] 임혜진, 김경섭, 윤태호, "Noah 보청기 적응(Fitting) 소프트웨어," 전기의 세계, vol. 53, No. 6, pp.55-59, Jun. 2004.
- [3] 이규석, 석동일, "청각학," 대구대학교 출판부, Sep. 2003.
- [4] 허승덕, 유영상, "청각학 3판," 동아대학교 출판부, Apr. 2004.
- [5] 한학용, 하성욱, 허강인, "Multimedia Sound Programming," 영진닷컴, 2004.
- [6] Papoulis. Athanasios, "Probability, Random Variables and Stochastic Processes," McGraw Hill, Jan. 2002.
- [7] Douglas Boling, "Programming Microsoft Windows CE .NET," Microsoft Press, Feb. 2004.
- [8] 신승원, 김경섭, 윤태호, 한명희, 이상민, "PDA 기반의 청력 검사를 위한 데이터베이스 구성," 정보 및 제어 학술대회(CICS '05) 논문집, pp.385-387, Oct. 2005.
- [9] Gregg D. Givens, Adrian Blarovich, Timothy Murphy, Scott Simmons, David Blach, Saravanan Elangovan, "Internet-Based Tele-Audiometry System for the Assessment of Hearing: A Pilot Study," Telemedicine Journal and e\_Health, Vol. 9, No. 4, 2003.
- [10] Norio Nakamura, "Development of Mobile Audiometric Test System Using Mobile Phones," Biomedical Engineering, 2003, IEEE EMBS Asian-Pacific Conference, pp. 356-357, 2003.

**저 자 소 개**



**신승원 (辛承元)**

2005년 건국대학교 의학교육부 졸업. 동대학원 석사(2007). 2007년~현재 동대학원 박사과정 재학중.



**김경섭 (金敬燮)**

1979년 연세대학교 전기공학과 졸업. 동대학원 석사(1981). Louisiana State University, Electrical Engineering, M.S.(1985). The University of Alabama in Huntsville, Electrical & Computer Engineering, Ph.D.(1994). 2001년~현재 건국대학교 의학교육부 부교수.



**윤태호 (尹泰皓)**

2003년 건국대학교 의학교육부 졸업. 동대학원 석사(2005). 2005년~현재 동대학원 박사과정 재학중.



**이상민 (李相旻)**

1987년 인하대학교 전자공학과 졸업. 동대학원 석사(1989) 및 박사(2000). 2002년 1월~2005년2월 한양대학교 의공학교실 연구교수. 2005년3월~2006년8월 전북대학교 조교수. 2006년9월~현재 인하대학교 조교수.



**송철규 (宋哲奎)**

1989년 연세대학교 의용전자공학과 졸업. 연세대학교 전기공학과 석사(1991) 및 박사(1998). 2000년~현재 전북대학교 전자정보공학부 부교수.