醫工學會誌 : 第11卷, 第1號, 1990
J. of KOSOMBE : Vol. 11, No. 1

研 究 論 文
90-1-10

청각 장애자를 위한 시각 음성 처리 시스템에 관한 연구

김 원 기 · 김 남 현 · 유 선 국* · 정 성 헌

A study on the Visible Speech Processing System for the Hearing Impaired

Won-Ky Kim, Nam-Hyun Kim, Sun-Kook Yoo*, and Sung-Hun Jung

-Abstract-

The purpose of this study is to help the hearing impaired's speech training with a visible speech processing system. In brief, this system converts the features of speech signals into graphics on monitor, and adjusts the features of hearing impaired to normal ones. There are formant and pitch in the features used for this system. They are extracted using the digital signal processing such as linear predictive method or AMDF(Average Magnitude Difference Function).

In order to effectively train for the hearing impaired's abnormal speech, easilly visible feature has been being studied.

1. 서 론

1876년 Bell이 전화를 발명하면서 부터 음향학(acoustic science)을 청각 장애자에 대한 훈련 장치로 사용하는 계기가 되었으며, 최근 반도체 기술의 발달과 소형이며 성능이 우수한 마이크로 컴퓨터의 발전은 복합적이고 효율적인 훈련 및 진단장비를 제시하게 되었다. 또한 디지탈 신호처리 기법을 이용한 음성 인식 및 합성에 관한 진보와 함께 이를 재활공학(rehabilitation engineering)에 응용하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

정도가 심한 청각 장애자는 의사소통 뿐만아니라 언어 발달상에 심한 장애를 일으킴으로써 지능이나 정신생활에 커다란 장애를 초래하게 된다. 특징적으로 이러한 장애는 5살 이전에 발생하므로 청각 장애자에게 특별한 교육을 하지 않으면 언어생성과 음성인식은 발달하지 못한다.

음성처리 보조기구에는 직접 귀에 이식하는 방법, 촉각에 의한 방법, 시각을 통한 방법 등이 있으나, 그 중에서도 귀에 이식하는 방법은 외과적 수술을 통해서만 가능하며 아직까지도 단지 청력을 상실한 지 얼마되지 않은 사람만이 약간의 소리를 인식 할 수 있는 정도이므로 이 방법을 활용하는 데에는 제

〈접수 : 1990년 4월30일〉
연세대학교 의용공학과
*순천향 대학교 전기공학과
Yonsei Univ. Dept. of Medical Eng.
*Soochunhyang Univ. Dept. of Electrical Eng.
본 논문은 한국과학재단의 기초연구비 지원에 의해 수행 되었읍니다.)

한이 따른다. 촉각을 이용하는 방법은 활용은 되고 있으나 제한된 조합에의한 실현만이 가능하며, 입술을 통한 언어의 인지에는 약간의 도움을 주고 있으나 청각 장애자가 정확한 발음을 훈련하는 장치로는 부적합하다. 그러므로 시 변환 음성 스펙트럼을 나타낼 수 있으며, 청각 장애자가 직접 자신의 음성을 관찰하면서 음을 교정할 수 있도록 하는 시각에 의한 표시 방법을 활용하고자 한다.

본 연구에서는 종래의 훈련 장치의 미비점인 정량적인 분석의 결핍을 해결하여 효과적인 훈련장치를 제작하기 위하여 현재 많이 통용되고 있는 마이크로컴퓨터와 디지탈 신호 처리기 및 그래픽을 이용하여 청각 장애자의 음성 신호를 검출하고, 장애자의 잘못된 발성 특성을 구분하는데 정량적인 변수를 추출하여 이를 정상인과 비교함으로써 청각 장애자의 음성 훈련에 도움을 줄 수 있는 시스템구성 및 알고리즘을 제시하기로 하겠다.

2. 청각 장애자의 음성 특성

청각 장애자를 위한 효율적인 시스템을 구성하고, 필요한 음성 신호의 특징을 추출하기 위해서는 청각 장애자의 음운 특성에 관한 분석이 필요하다. 청각 장애자의 장애 정도는 외이의 손상이 있는 conductive 형태와 내이의 신경까지 손상이 있는 sensory-neural 형태가 있으며, 또한 음성 훈련은 나이 또는 지능의 발달 정도, 청력 손실도, 성별 뿐만 아니라 음성 결함 정도에 따라 달라지기 때문에 종합적인 시스템을 청각 장애자의 음운특성에 대한 분석이 선행된 후에 필요한 매개 변수를 추출하게 된다.

청각 장애자는 정확한 성문(Glottis) 개폐 능력이 부족하며 주로 고립어에 대한 훈련만을 받았기 때문에 언어를 발음할 때 과다한 호흡을 하게 되며 부적절한 휴지기를 갖게 된다. 이러한 특성은 언어의 질을 결정하는 요소로서, 발음 속도 및 강조 구문과 보통문 사이의 시 구간 제어 능력이 부족하게 된다. 그러므로 구음운동(articulatory movement)의 시 구간 조절능력과 한 구음에서 다음 구음으로의 빠른 변화 및 음의 시작점(voice onset time)을 구분하지 못하게 된다. 또한 최소한도의 구음 운동으로 과다한 발성을 하기 때문에 불규칙적인 음조의 변화나 음조가 없어지는 현상이 생긴다. 특징적으로는 부적절한 평균 음조를 나타내거나 정상인보다 높은 주파수의 음조, 단조로운 음조 현상을 보이며 가성음(falsetto)을 갖게 된다.

이외에도 청각 장애자는 비음을 결정짓는 연구개의 움직임이 눈에 보이지 않으므로 비음에 대한 피드백이 형성되지 못하기 때문에 음질을 결정하는 주된 요소인 비음을 제대로 발음하지 못한다. 마찬가지로 구음운동도 눈에 보이지 않기 때문에 모든 모음을 /ə/로 발음하는 현상을 보이며 유성 자음과 무성 자음을 구분하지 못하거나 자음을 생략하는 현상을 보이게 된다.

3. 음성 신호의 특징 추출 방법

앞 절에서 언급한 것처럼 청각 장애자의 비정상적인 음성을 분석하는데 중요한 정보를 주는 음성 신호의 특징은 유성음과 무성음의 구분 및 유성음 중에서 구음 운동에 의한 형성음과 음조, 비음, 음의 세기, 과다한 호흡에 의한 불규칙한 휴지기 등으로 요약될 수 있다. 이러한 정량적인 특징을 찾는 방법은 다음과 같다.

3.1 형성음 추출

음성은 유성음에 대해서는 quasi-periodic 펄스로 무성음에 대해서는 랜덤 잡음으로 여기되는 저시변계통(slowly time varying linear system)으로 모델링할 수 있으며 비음에 대한 영점(zero)을 무시하게 되면 AR(auto regressive)모델링을 할 수 있다. 특히 모음의 특징을 결정하는 주된 주파수 성분을 형성음이라고 정의 할 수 있으며 성도의 특징에 대한 음성 충격응답(acoustic impulse response)으로 간주 할 수 있다. 특히 성도의 길이를 17cm라고 간주한다면 3kHz내에 형성음 F1, F2, F3가 위치한다. 형성음 추출은 smoothing된 스펙트럼 상에서 계수의 차수에 대응하는 형성음 만의 첨두치를 보여주는 선형 예측 방법을 그림 3.1과 같이 구성하여 형성음 F1, F2, F3 및 대수 스펙트럼을 계산하였다.

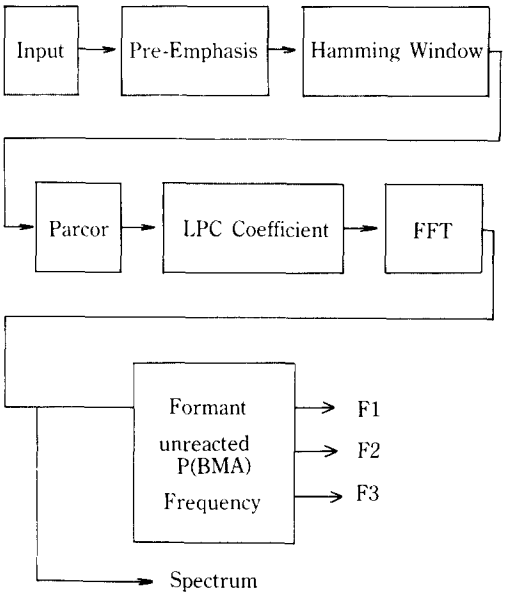

그림 3.1 형성음을 추출하기 위한 블럭선도
Fig. 3.1 Block diagram for extracting formants

3.1(1) Pre-emphasis 및 Windowing

음성 신호가 성문파형(glottal waveform) 및 입에서의 음성 방출 특성(lip radiation)의 영향을 받지 않으며 성도만의 주파수 성분을 해석하기 위해서는 6dB/octave의 고역 주파수 강조를 함으로서 저주파 에너지를 감소시키며 스펙트럼의 동적 영역을 감소시켜야 한다. 그러므로 pre-emphasis된 음성신호의 스펙트럼은 주기적인 펄스열과 성도 전달 함수로만 이루어지게 된다. Pre-emphasis는 식 3.1과 같이 단순한 1차 디지탈 필터를 사용하였다.

$$H(z)=1-0.9375Z^{-1} \qquad (3.1)$$

한편 pre-emphasis된 신호에 window 함수를 곱하여 음성신호의 샘플을 추출하게 되는데 window 함수에는 음조의 주기성에 의하여 야기되는 동요를 감소시키며 rectangular window에서의 경계면 효과를 줄이기 위해 식 3.2와 같은 Hamming window를 사용하였다.

$$W(n)=0.54-0.46\cos\{2\pi n/(N-1)\} \qquad (3.2)$$
$$(0<n<N-1)$$

3.1(2) 부분 상관(PARCOR) 계수에 의한 선형 예측 계수 추출

음성 신호의 이웃한 샘플 간에는 상관 관계가 높으므로 음성 신호의 샘플값은 과거의 p샘플의 합에 의하여 식 3-3과 같이 예측할 수 있다.

$$A(z)=1+\sum_{i=1}^{P}A_i Z^{-1} \qquad (3.3)$$

그러므로 원래의 신호와 예측된 신호와의 차를 예측 오차라 할때 예측오차의 자승 평균값(mean square)을 최소화하는 계수들을 구해야 한다. 그러한 계수를 구하는 관계식으로서 식 3.4와 같은 Yule Walker 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & \cdots & r_{p-1} \\ r_1 & r_0 & r_1 & \cdots & r_{p-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{p-1} & r_{p-2} & r & \cdots & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ A_p \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \\ \\ \\ r_p \end{bmatrix} \qquad (3.4)$$

여기에서 A는 선형 예측 계수를 나타내며 r은 자기 상관 함수를 나타낸다. 특히 좌변의 자기 상관 행렬식은 Toeplitz형으로 주어지며 이 방정식의 해는 Durbin법, Lattice법 등에 의하여 순환적으로 계산할 수 있다. AR모델의 복소함수 해는 스펙트럼상에서 형성음을 구하기 위해서는 최소 6차의 예측 계수가 필요하다. 특히 PARCOR(partial correlation) 계수에 의한 Le-Roux방법으로 계산함으로써 16비트 고정 소숫점 연산에서 0.005미만의 작은 오차가 되며 Lattice형태의 순환 연산을 함으로써 적은 수의 곱셈 연산에 의한 실시가 처리가 가능하므로 이 알고리즘을 채택하였다. PARCOR계수는 식 3-5와 같은 방정식에 의해 연산한다.

$$k_{n+1}=e^n_{n+1}/e^n_0 \qquad (n=0, 1, \cdots\cdots p)$$
$$e^{n+1}_0=e^n_0-k_{n+1}\,e^n_{n+1}=e^n_0(1-k^2_{n+1}) \qquad (3.5)$$
$$e^{n+1}_i=e^n_0-k_{n+1}\,e^n_{n-1-i} \quad (i=n, n-1, \cdots\cdots p)$$

여기에서 k는 PARCOR 계수이며 e는 dummy변수이다. 초기조건은 식 3.6과 같이 주어지며 선형 예측 계수는 식 3.7과 같이 병렬적으로 계산한다.

$$e_i^0 = r_i \qquad (i = 1,2, \cdots\cdots p) \quad (3.6)$$

$$A_i^{(n+1)} = A_i^{(n)} - k_{n+1} A_{n+1-i}^n \quad (3.7)$$

3.1(3) 형성음 추출

형성음은 식 3.3의 근을 구하면 얻어지나 수치적인 연산은 계산 시간이 오래 걸린다. 그러므로 필터 응답의 자기 상관함수는 입력 데이터의 자기 상관함수와 정합한다는 스펙트럼 정합 방법에 의하여 성도 충격 응답의 추정된 스펙트럼의 첨두치를 찾은 후 보간(interpolation)함으로써 구한다. 선형 예측 방법에 의한 해는 성도 전달 함수만의 근을 표시하게 된다.

2차 보간 함수에 의해 보간된 형성음과 대역폭은 식 3.8과 같이 주어지며 여기서 np는 첨두치의 위치점이다.

$$\hat{f} = (np + \lambda_p) fs/2N \qquad \lambda_p = -b/2a$$
$$\hat{B} = \frac{-\{b - 4a[c - 0.5y(\lambda_p)]\}^{1/2} fs}{aN} \quad (3.8)$$

보간에 의한 형성음과 밴드폭을 raw데이터라 하면 raw데이터로 부터의 자동 형성음 추출은 에러를 포함하고 있다. 형성음은 유성음에서 정의하며, 형성음 F3은 3kHz미만에서 존재하며 대역폭은 600Hz미만에 제한하여 추출하게 된다. 형성음 추출은 만약 첨두치가 하나만 존재하는 경우에도 그전의 형성음과 가장 근접한 형성음을 취하며 나머니 2개의 형성음은 전프레임을 취한다. 만약 첨두치가 2개일 경우에는 나머지 1개만을 전프레임으로 부터 취하며, 4개일 경우에는 가장 이전의 형성음과 먼 첨두치 만을 제거한 3개의 형성음만을 취하며, 3개일 경우에는 전부 형성음으로 간주한다.

3.2 음조 및 유성음 무성음 구분

성대(Vocal folds) 개폐의 시 구간으로 정의되는 음조는 성도에 가해지는 quasi-periodic펄스열로 간주 할 수 있다. 또한 음조의 유무는 유성음과 무성음을 구분하는 중요한 매개 변수가 된다. 이러한 음조는 첨두치와 첨저치, 자기 상관 함수, 영교차율을 이용하여 시구간에서 추출하는 방법과 주파수 영역에서의 특성을 이용하는 방법 등이 있다. 지금까지의 대표적인 음조 검출 방법으로는 병렬 처리법, 데이터 감축법, 변형 상관법, SIFT 알고리즘, 셉스트럼법, AMDF법 등이 있는데 본 논문에서는 곱셈 연산을 제거함으로써, 계산량을 줄인 AMDF법을 사용하였다.

Inverse필터의 잔여신호(residual signal)는 모든 형성음 성질이 없어지므로 주파수 영역에서의 평평한(spectrally flat) 특성과 매 주기마다 spike같은 펄스특성을 보여준다. 그러므로 형성음 추출시와 동일한 선형 예측방법에 따라 주파수 특성과 시구간 특성을 동시에 이용하는 방법에 의하여 소프트웨어적으로 음조를 추출한다. 선형 예측 계수는 PARCOR 계수에 의한 Le-Roux방법을 실시간 가능 알고리즘으로 하여 그림 3.2와 같이 구성하였다.

Inverse 필터의 pre emphasis는 스펙트럼 상에서 고주파 영역의 첨두치를 강조하기 때문에 음조 검출시에는 강조된 고주파성분을 감소시켜야 한다. 또한 고주파 영역의 비음과 주파수의 불균일한 성분을 제거해야 하므로 식 3.9와 같은 단순한 디지를 적분기에 의하여 de emphasis하여 계산하였다.

$$H(z) = 1/(1 - 0.9375Z^{-1}) \quad (3.9)$$

한편 자기 상관 함수 계산시의 곱셈 연산을 제거하기 위한 방법인 AMDF (Average Magnitude Difference Function)방법은 시간지연이 0인 경우에는 항상 0이 되며 입력신호에 주기가 있는 경우에는 매 주기마다 깊은 null이 나타난다. 그러므로 유성음인 경우에는 AMDF파형은 매 주기마다 깊은 null을 나타내므로 이를 검출함으로써 음조의 주기를 알 수 있으며 무성음인 경우에는 주기가 없기 때문에 null이 나타나지 않으므로 유성음과 무성음을 구분할 수 있다. 또한 기본 주파수는 음조의 역수를 취하여 계산한다. AMDF는 식 3.10과 같이 정의되며 K가 증가하거나 시변위가 있는 경우에는 null이 일정한 특징이 있다.

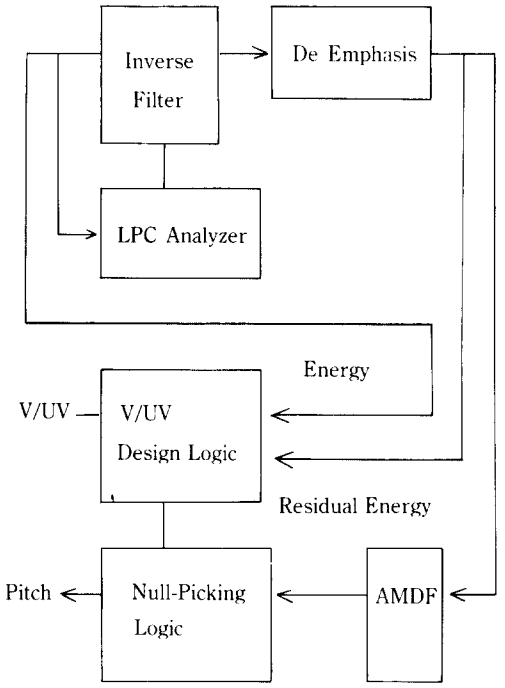

그림 3.2 선형 예측 방법에 의한 음조 추출 및 유성음, 무성음 구분 알고리즘

Fig. 3.2 Algorithm for pitch detection and voiced/unvoiced distinction by LPC

$$AMDF(k)=\frac{1}{R}\sum_{i=1}^{N'}|r_i-r_{i+k}| \qquad (3.10)$$

$(k=0,1,\cdots\cdots, N)$

$$R=\sum_{i=1}^{N'}|r_i|$$

$r_{i+k}=0$ for $i+k>n$ $N'<N$

여기서 N은 예상되는 음조주기가 된다.

4. 시각 음성 처리 시스템 구성

4.1 데이터 추출 시스템의 구성

데이터 추출 시스템은 센서의 출력 신호를 컴퓨터 입력시키기 위한 전처리 과정(pre-processing)을 수행하는 부분이다. 본 논문에서는 음성과 음조 및 비음에 대한 데이터를 추출하기 위해 양면 접착 테이프를 사용하여 2개의 accelerometer를 코와 후두(Larynx) 및 흉골(Sternal notch) 사이의 목에 부착시키며 또한 head mounted된 마이크를 통하여 음성 신호를 받아 들이게 된다. Accelerometer는 10 Hz에서 1kHz까지의 주파수 특성을 갖으며 가볍고 소형인 Murata사의 PKS-4AI압전 센서를 사용하였으며, 마이크는 HAN사의 모델 301을 사용하였다. A/D변환기는 Data Translation사의 DTX311 모듈을 사용하여 마이크 출력신호는 10kHz까지 샘플링을 하여 accelerometer의 출력 신호는 5kHz까지 샘플링을 하며 12비트의 분해능을 갖는다. 그림 4.1에 데이터 추출 시스템의 블럭 다이아그램을 나타내었다.

음성 추출 부분은 입에서 발성된 음성 신호를 컴퓨터에 입력시켜 스펙트럼을 분석하고 유성음 및 무성음을 정확히 구분하기 위해 필요한 데이터를 추출하는 전처리 부분이다. Head-mounted된 마이크로부터 입력된 신호는 A/D변환기의 입력신호의 크기에 맞게 증폭되며 샘플링시 aliasing을 제거하기 위하여 차단주파수 최대 5kHz를 갖으며 통과 대역에서 일정한 진폭특성을 나타내는 6pole Buttreworth 저역통과 필터를 사용하였다. 직류성분에 의한 옵셋은 차단주파수 1.6Hz를 갖는 고역 통과 필터에 의하여

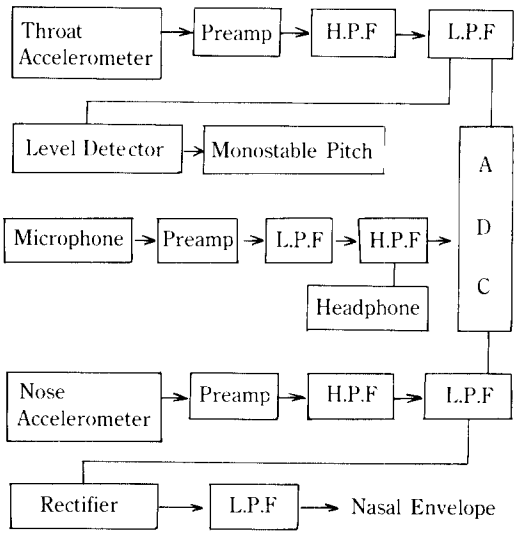

그림 4.1 데이터 추출 시스템

Fig. 4.1 Data extraction system

제거된다. 또한 이 신호는 conductive 형태의 청각 장애자에게 피드백을 제공하기 위하여 TDA2822M 증폭기에 의하여 헤드폰을 구동하게 된다.

음조 추출 부분은 성문의 개폐에 의하여 모음에 대한 주기 신호를 발생하는 음조 주파수를 목에 부착된 압전 센서로 부터 성도의 영향을 받지 않고 아날로그적으로 추출하게 된다. 센서로부터의 입력 신호는 증폭과 옵셋조정을 거쳐 차단주파수 2.5kHz를 갖는 4pole-Butterworth필터를 통과시킨다. 이 신호는 입력신호의 크기에 따라 비교기의 비교 전압이 적응하여 변화하는 적응 문턱기를 통과한 후에 문턱치 회로의 제어하에 잡음 및 자음의 낮은 출력 전압을 제거한다. 이 신호는 단안정 회로(monostable)에 의하여 매 음조 주기마다 펄스를 발생하게 된다. 비음 추출 부분은 음조추출 부분과 마찬가지로 증폭과 옵셋 조정 및 저역 통과 필터를 한다. 또한 이 신호는 전파 정류 회로를 거친 후 차단주파수 10 kHz를 갖는 저역 통과 필터에 의하여 비음에 대한 포락선을 검출하게 된다.

그림 4.2와 그림 4.3은 각각 '아'음과 '이'음에 대한 마이크, 목, 코에서의 출력 신호를 보여준다.

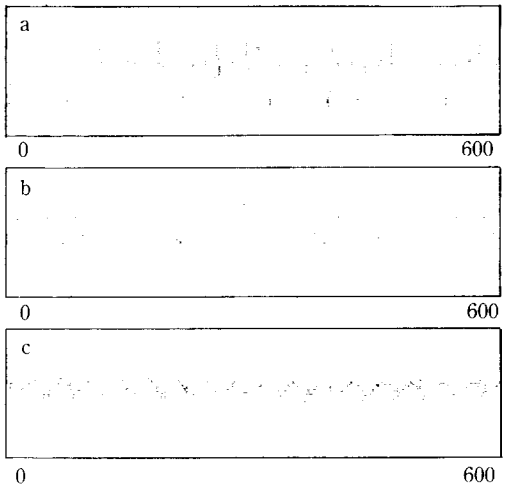

그림 4.2 입, 목, 코에서 추출한 '아'음의 샘플 신호
Fig. 4.2 The sample signal of 'a' sound from mouth, throat, and nose

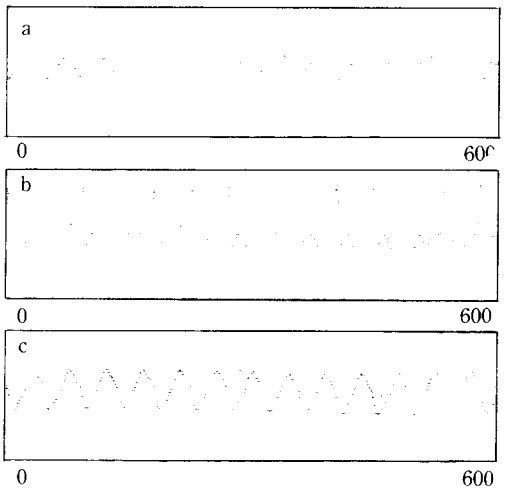

그림 4.3 입, 목, 코에서 추출한 '이'음의 샘플 신호
Fig. 4.3 The sample signal of 'i' sound from mouth, throat, and nose

4.2 시스템 구성

시스템은 그림 4.4와 같이 구성하여 상호 인터페이스 시킨다.

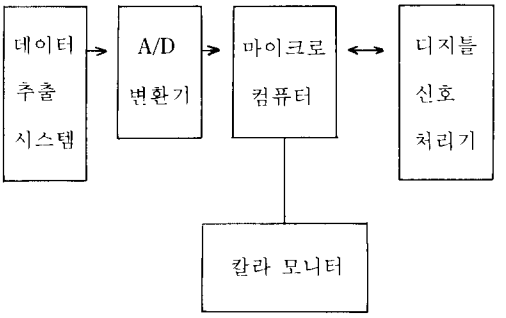

그림 4.4 시스템 블럭 선도
Fig. 4.4 System block diagram

5. 결과 및 고찰

그림 5.1(a)는 목에서 추출한 '아"음의 음조 신호로서 형성음 성분이 제거된 음조만의 신호를 보여주며 그림 5.1(b)는 적응 문턱 회로에 의하여 매 음

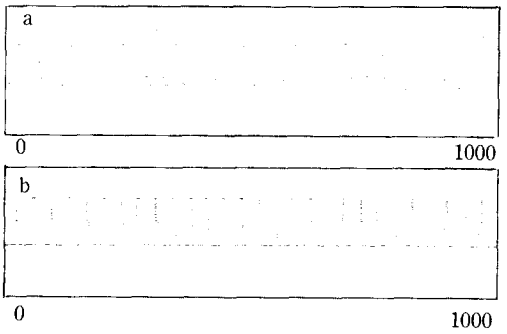

그림 5.1 아날로그 회로에 의한 음조 추출 신호
Fig. 5.1 Pitch detection from analog circuits

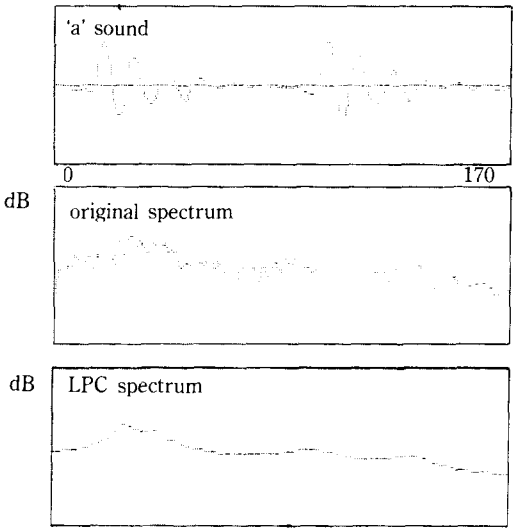

그림 5.2 '아'음의 형성음 F1, F2, F3추출
Fig. 5.2 Formants F1, F2, F3 extracted from 'a'

조마다 펄스 신호를 추출한 단안정 회로의 출력 신호를 보여 준다.

그림 5.2는 '아'음에 대한 raw신호와 FFT의한 스펙트럼, 그리고 Le-Roux법에 의한 선형 예측 방법으로부터 추출한 형성음 스펙트럼을 보여준다.

입력된 데이터 170개를 취한 후 256point FFT연산을 한 original 스텍트럼 상에서 음조 주기에 의한 주파수 변동이 심하기 때문에 어떠한 특징을 찾아내

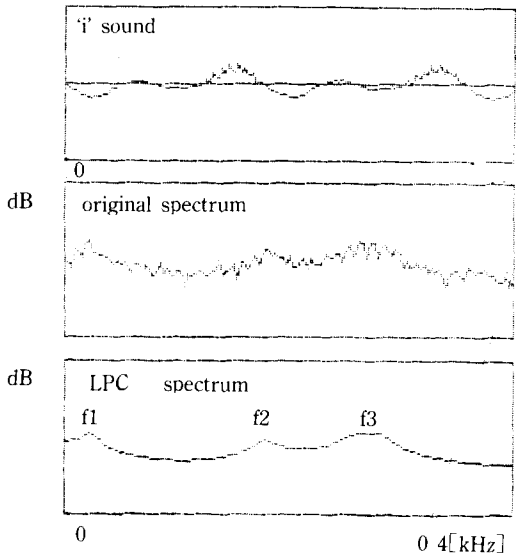

그림 5.3 '이'음의 형성음 F1, F2, F3추출
Fig. 5.3 Formants F1, F2, F3 extracted from 'i'

기가 어렵다. '아'음에 대한 LPC 스펙트럼에서는 635Hz, 2251Hz, 3110Hz에서 첨두치 F1, F2, F3을 보이고 있으며 각각의 대역폭은 160Hz, 465Hz, 393 Hz가 되었다.

그림 5.3은 '이'음에 대한 결과로서 original 스펙트럼 상에서는 '아'음과의 구분이 쉽지 않으나 선형 예측 방법에 의한 스펙트럼에서는 형성음의 위치를 보여 줌으로써 다른 신호와의 구분을 시각적으로 쉽게 할 수 있다.

본 실험에서는 직접 임상 실험을 하지는 못하였으나 같은 음에 대해 정상인과 청각 장애자의 음성 신호로부터 추출한 형성음의 위치와 음조의 길이를 비교함으로써 시각적으로 틀린 부분을 알수 있게 하여 이를 교정하게 하는 방법을 제시해 준다.

6. 결 론

본 논문에서는 청각 장애자의 비정상적인 발성 특성을 교정하는 방법으로 기본적인 음성 신호처리 기술과 그래픽 기술을 적용한 시각 음성 처리 시스템을 구성해 보았다.

제작된 시스템은 음성 신호의 특성을 나타내는 변수를 찾아내어 이를 처리하여 모니터 상에 나타냄으로써 청각 장애자의 잘못된 음성 특성을 시각적으로 비교, 교정할 수 있는 방법을 제시한다.

그러나 형성음 또는 음조와 같은 변수들은 정상인과 청각 장애자의 음성 특성을 비교하는데에 사용될 수는 있지만 대부분의 청각 장애자는 이러한 변수들의 물리적인 의미를 이해하지 못하므로 발성을 교정하는 과정에서 많은 시행 착오를 겪게 된다. 한편 무성음의 경우에는 형성음이나 음조를 찾는 것이 의미가 없으므로 새로운 특징 변수를 찾아야 하며, 또한 실제로 효과적인 시스템이 되려면 청각 장애자의 음성 교정방법이 고립어 뿐만 아니라 연속된 문장의 경우에까지 적용되어야 한다.

앞으로의 연구에서는 유성음 이외에 무성음의 특징 추출 알고리즘을 개발하고, 이것을 바탕으로 물리적인 의미를 쉽게 알 수 있으며 실시간 시변 특징을 나타내 주는 방법을 찾고자 한다.

참 고 문 헌

1) Shuzo Saito and Kazuo Nakata, "Fundamentals of Speech Signal Processing", pp. 93-110, ACADEMIC PRESS, 1985.
2) Duglas O'Shaughnessy, "Speech Communication", pp. 205-214, Addison Wesley Publishing Company, 1987.
3) H. Levitt, "Speech processing aids for the deaf : An overview", IEEF Trans. Audio Electro, Vol. AU-21, pp. 269-273, Sept. 1973.
4) C. W. Parkins, "Cochlear implant : A sensory prosthesis frontier", IEEE Eng. Med. Biol. pp. 18-27, June 1983.
5) Stephanie S. McCandless, "An Algorithm for Automatic Formant Extraction Using Linear Prediction Spectra", IEEE Trans. on ASSP, Vol. assp-22, No. 2, appril 1974.
6) L. R. Rabiener et al., "A comparative study of several pitch detection algorithms", IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, Vol. ASSP-24, pp. 339-417, Oct. 1976.
7) J. Leroux and C. Gueguen, "A fixed-point computation of partial correlation coefficients", IEEE Trans., Speech, Signal Processing, pp. 257-259, June 1977.