

유성음 구간 검출 알고리즘에 관한 연구*

A Novel Algorithm for Discrimination of Voiced Sounds

장 규 철** · 우 수 영** · 유 창 동**

Gyuchoel Jang · Sooyoung Woo · Chang D. Yoo

ABSTRACT

A simple algorithm for discriminating voiced sounds in a speech is proposed. In addition to low-frequency energy and zero-crossing rate (ZCR), both of which have been widely used in the past for identifying voiced sounds, the proposed algorithm incorporates pitch variation to improve the discrimination rate. Based on TIMIT corpus, evaluation result shows an improvement of 13% in the discrimination of voiced phonemes over that of the traditional algorithm using only energy and ZCR.

Keywords: Voiced Sound Discrimination, Pitch Variation

1. 서 론

사람의 음성은 크게 유성음과 무성음으로 나눌 수 있다. 이는 성대의 진동 유, 무에 의해서 구분된다. 공기가 성문을 통과할 때 성문이 거의 닫힌 상태에서 얇은 막의 두 성대가 진동하며 만들어지는 음을 유성음(有聲音: voiced sounds)이라 하며, 반대로 성문이 열려져서 성대가 진동하지 않으며 만들어지는 음을 무성음(無聲音: unvoiced sounds)이라 한다. 이러한 발생원리에 의해서, 유성음과 무성음은 각각 주기신호와 고대역 랜덤 신호로 표현할 수 있다 [1].

사람의 음성을 유·무성음으로 구별할 수 있다면 음성정보적 측면에서 여러 가지 음성가공이나 처리에 많은 도움이 된다. 특히 음성인식의 관점에서 유·무성음의 검출은 연속음 인식과 더불어 사용되었을 때 검색공간 감소와 인식률의 향상을 기대할 수 있다.

음성의 음향학적 특징을 이용해서 신호처리기법을 통해 구별하는 시도가 많이 있어 왔다 [4,11]. 이러한 시도들은 유성음의 피치주기 뿐만 아니라 여러 가지 특징 파라미터들을 이용하여 주기성 판단에 의한 유·무성음 검출을 향상시키려고 하였다. 그리고 패턴인식 기법을 이용한 방법[3,10]이나 신경회로망을 이용한 방법도 많이 시도되어 왔다[5-8].

* 이 논문은 한국과학재단이 지원한 목적기초연구로 (과제번호 R01-2000-00259) 얻은 연구 결과의 하나이며, 이에 고마움을 나타냅니다.

** Multimedia Processing Lab, KAIST

본 논문에서는 유성음의 근사적인 주기성을 보완하기 위해 피치를 정확히 판단하기보다는 피치의 분포를 이용한 유무성음 판단에 대해 연구하였다. 기존의 제시된 복잡한 방법대신에 에너지, 영교차율, 그리고 피치 주기의 변화량에 관한 분포를 이용한 유성음 음소군 구간 판단을 위한 간단한 알고리즘을 제안한다.

2장에서 본 알고리즘에 사용된 특징 파라미터들에 대해서 알아보고, 3장에서는 유성음 검출을 위한 알고리즘을 제안한다. 4장에서 실험결과를 보이고 그에 대한 고찰을 한다. 그리고 5장에서 결론을 맺는다.

2. 특징 파라미터

2.1 저대역 에너지(low-frequency energy)

전통적으로 저대역 에너지는 유·무성음 구별, 음성구간 구별 등 음성의 특징으로 널리 사용되는 파라미터이다. 유·무성음의 에너지 분포를 살펴보았을 때 유성음은 저대역에 에너지가 높은 반면, 고대역 랜덤 신호로 모델링 할 수 있는 무성음은 그렇지 못하다. n 번째 프레임 에너지 $e[\cdot]$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$e[n] = \sum_{i=1+nM}^{N+nM} s_{LP}[i] \quad (1)$$

여기서 N 은 프레임의 길이 M 은 프레임의 이동(shift) 길이를 나타낸다. $s_{LP}[\cdot]$ 는 저대역 통과된 음성신호이다. 본 논문에서는 에너지의 단위로서 dB단위를 사용하였으며, N 은 160, M 은 0으로 사용하였으며 저대역 필터로는 1 kHz를 차단 주파수로 하는 14 차 butterworth 필터를 사용하였다.

2.2. 영교차율(zero-crossing rate)

에너지와 마찬가지로 영교차율은 유·무성음 구별 등 음성을 구별하기 위한 특징으로 전통적으로 사용되는 파라미터이다. 유성음 구간에서는 일정 크기의 주기를 가지는 큰 진폭의 파형으로 표현되므로 영교차율이 낮고, 반대로 무성음의 구간에서는 영교차율은 높게 나타난다. n 번째 프레임의 영교차율 $z[\cdot]$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$z[n] = \sum_{i=1+nM}^{N+nM} \frac{1}{2N} \text{abs}[\text{sgn}(s[i]) - \text{sgn}(s[i-1])] \quad (2)$$

$$\text{where, } \text{sgn}(y) = \begin{cases} -1, & y < 0 \\ 1, & y \geq 0 \end{cases}$$

여기서 N 은 프레임의 크기, M 은 프레임의 이동(shift) 길이를 나타내며 $s[\cdot]$ 는 음성신호이다.

2.3 피치 주기(pitch period)

음성의 피치 주기 정보는 음성의 주기성분의 정보를 나타내는 좋은 파라미터로 널리 사용되어 왔다. 음성신호의 피치 주기를 구하는 방법으로는 linear prediction(LP) 오차의 자기상관을 이용해서 구한다[1,9]. 자기상관 $R[i]$ 로부터 얻게되는 n 번째 프레임의 피치 주기 $T[n]$ 은

$$T[n] = \arg \max_i R[i], T_{\min} \leq i \leq T_{\max} \quad (3)$$

이다. 본 논문에서 T_{\min} 은 20, T_{\max} 는 140으로 사용하였다. 유성음의 피치 주기는 약 60-400 Hz 사이에 존재하고, 이는 8kHz 샘플링에서는 20-140 샘플에 해당한다.

2.4 Delta 피치 주기와 Delta-delta 피치 주기

프레임과 프레임간의 피치 주기의 시간에 따른 변화량은 유성음과 무성음을 구분할 수 있는 중요한 요인이다. Delta 및 delta-delta 주기($\Delta T[n]$, $\Delta\Delta T[n]$)를 다음과 같이 정의한다.

$$\Delta T[n] = T[n] - T[n-1] \quad (4)$$

$$\Delta\Delta T[n] = \Delta T[n] - \Delta T[n-1] \quad (5)$$

그림 1은 TIMIT corpus[2]에서의, 피치 주기와 피치 주기변화량에 대한 분포를 나타낸 histogram이다. 가로축은 각 피치주기와 피치주기의 변화량을 나타내고, 세로축은 발생한 빈도를 나타낸다. 피치 주기의 변화를 나타내는 $\Delta T[n]$ 와 $\Delta\Delta T[n]$ 을 관찰하면 유성음의 분포가 무성음에 비해서 더욱 원점에 밀집되어 있다. 이것은 유성음의 구간에서 안정된 피치 주기를 가지는 구간이 많다는 것을 보여주며, 반대로 무성음의 경우에는 피치 주기의 값이 고르지 않다는 것을 나타낸다. 유성음과 무성음 사이의 $T[n]$ 의 분포는 두드러진 차이점이 관찰되지 않으므로, 이를 이용하기는 힘들다.

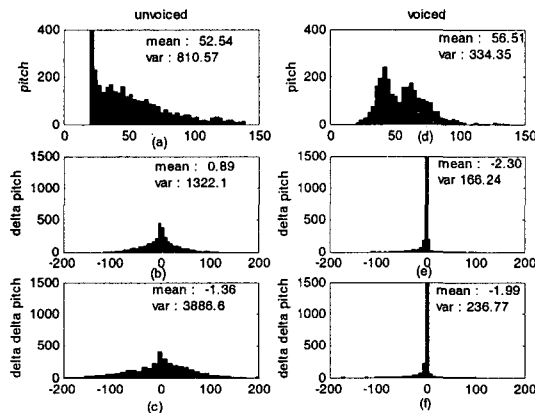


그림 1. TIMIT corpus를 이용한 피치 주기의 분포, (a,b,c) 무성음 구간에 대한 $T[n]$, $\Delta T[n]$, $\Delta\Delta T[n]$ 의 분포, (d,e,f) 유성음 구간에 대한 $T[n]$, $\Delta T[n]$, $\Delta\Delta T[n]$ 의 분포

3. 유성음 구간의 검출

3.1 선형함수를 이용한 판별율과 피치의 시간적 변화량

저대역 에너지와 영교차율은 유·무성음의 검출에 있어서 유용한 정보들이다. 그림 2는 TIMIT corpus로부터 얻은 약 2,000 개의 프레임에 대해서 유·무성음 구간에서의 에너지와 영교차율의 관계를 나타낸 그래프이다. 유성음과 무성음의 구간이 비교적 뚜렷이 나뉘어 지는 것을 관찰할 수 있다. 일반적으로, 무성음은 유성음보다 에너지가 더 작고, 영교차율의 분포가 유성음보다 더 넓게 퍼져서 분포하는 경향이 있다[1].

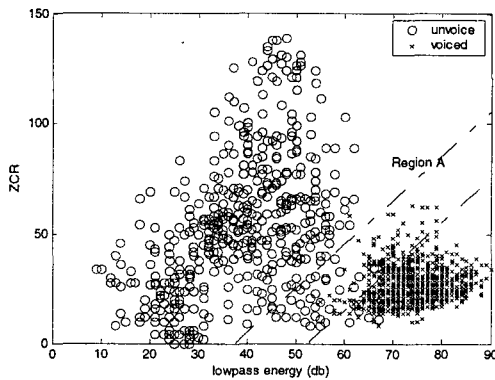


그림 2. 저대역 에너지와 영교차율과의 관계

프레임의 저대역 에너지 e 와 영교차율 z 를 이용해서 유·무성음을 구분하기 위해서, 선형함수 $f(x) = ax + b$ 가 사용되었다. $f(e) - z < 0$ 이면 무성음, 그렇지 않을 경우에는 유성음으로 판별했을 때의 결과를 표 1에서 확인할 수 있다. 이때, 함수의 기울기 $a=2$ 는 가장 높은 판별률을 얻기 위해 실험적으로 구한 값이다.

표 1. 한 프레임의 길이가 20 ms인 프레임 단위의 유성음/무성음 구간 판별율(TIMIT corpus에서 임의로 뽑은 400 문장을 이용)

$f(x)=2x+b$	유성음 구간 판별율(%)	무성음 구간 판별율(%)
$b=-70$	99.51	85.13
$b=-90$	96.74	93.23
$b=-110$	82.77	98.67
$b=-130$	39.14	99.90

피치 주기의 변화량 파라미터를 유·무성음의 판단에 이용하면 유성음과 무성음이 섞여 있는 영역의 유·무성음 검출성능을 향상시킬 수 있다. 그림 2에서 $f(x) = 2x + b_1$ 와 $f(x) = 2x + b_2$ 의 사이에 있는 영역 A는 유성음과 무성음 구간이 섞여 있는 영역이다. 이 영역에 존재하는 유·무성음 구간에 대한 ΔT 와 $\Delta \Delta T$ 의 분포는 그림 3과 같다.

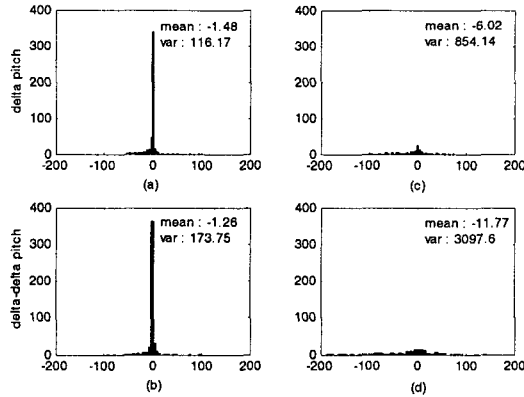


그림 3. 그림 2에서 $2e[n]-70 < z[n] < 2e[n]-130$ 인 영역 A에 존재하는 유성음인 음성 구간에 대한 (a) ΔT 와 (b) $\Delta\Delta T$ 에 대한 분포 그래프, 무성음 구간에 대한 (c) ΔT 와 (d) $\Delta\Delta T$ 에 대한 분포 그래프

그림 3에서 가로축은 ΔT , $\Delta\Delta T$ 의 크기를 나타내고, 세로축은 발생빈도를 나타낸다. 판별률을 향상시키기 위해서 유성음 또는 무성음의 판별률이 99% 이하인 영역에 대해서 ΔT 와 $\Delta\Delta T$ 의 분포를 적용하였다. 이 영역은 그림 2에 나타난 영역 A이다. 유성음의 ΔT 와 $\Delta\Delta T$ 의 분포의 분산이 무성음 구간에 대한 분포보다 각각 8 배, 17 배 작다. ΔT 와 $\Delta\Delta T$ 의 분포를 바탕으로 영역 A 내의 유·무성음을 구별하였을 때 전체 유성음의 판별률은 표 2와 같다.

표 2. 영역 A에 대해서 ΔT 와 $\Delta\Delta T$ 를 사용하여 판단하였을 때 전체 음성 구간에 대한 판별률

$f(x) = 2x + b_1$ and $f(x) = 2x + b_2$ (Region A)	유성음 구간 판별률(%)	무성음 구간 판별률(%)
$b_1 = -70, b_2 = -90$	98.89	89.98
$b_1 = -80, b_2 = -100$	97.79	93.44
$b_1 = -90, b_2 = -110$	94.39	96.16
$b_1 = -100, b_2 = -120$	88.14	98.18
$b_1 = -110, b_2 = -130$	77.54	99.30

이와 같이 에너지, 영교차율보다 안정적이고 밀집된 분포를 보여주는 ΔT 와 $\Delta\Delta T$ 를 위와 같이 기존의 파라미터와 상호 보완적으로 사용한다면 유·무성음 추출에 있어서 검출효과를 증대시킬 수 있을 것이다. 따라서 유성음과 무성음이 섞여 있는 영역에서 신뢰성 있는 판단을 기대할 수 있다.

3.2 유성음 구간을 잘못 검출했을 때의 분석

ΔT 와 $\Delta\Delta T$ 를 사용한 유성음 구간의 검출을 위해 고려해야 할 문제는 유성음 음소가 여

러 개 연결되어 있는 유성음 음소군을 판별해야 할 경우가 많다는 것이다. 이러한 경우 개인적인 발음 성향이나 서로 다른 유성음 음소간의 급격한 조음상의 변화가 피치주기 검출 성능을 떨어뜨릴 수 있다.

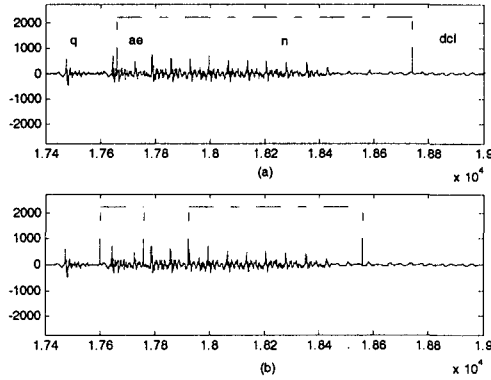


그림 4. 유성음군 구간내의 잘못된 판단의 예 (a) 올바른 검출 (b) 잘못된 검출 (점선은 유성음 구간)

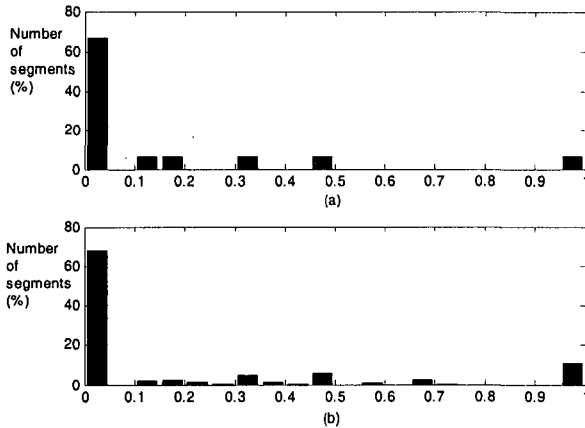


그림 5. 그림 2의 영역 A 내의 잘못 판단된 유성음 구간들의 해당 음소구간 내의 분포 (a) 유성음 음소 사이에 위치하는 유성음 음소에 대한 분포와 (b) 그 외의 유성음 음소에 대한 분포

그림 5는 그림 2의 영역 A에 속해 있는 유성음구간 중에서 무성음으로 잘못 판단된 유성음 프레임의 유성음 음소 구간내의 분포그래프를 그린 것이다. 가로축은 0에서 1 사이의 값을 가지며 0은 음소의 시작, 1은 음소의 끝을 나타낸다. 세로축은 해당 위치에 나타난 프레임의 개수를 나타낸다. 유성음 검출에 불리한 파라미터 값을 가지는 파라미터 값이 나오는 빈도는 음소구간은 시작 경계에서 가장 두드러진다는 것을 나타내고 있다.

그림 5의 결과에 따르면 음소구간을 검출한 후에 음소군의 검출을 위해서 다음과 같은 과정을 거칠 필요가 있다. 음소군 내의 음소간의 경계에서 유성음 구간임에도 불구하고 무성음

구간으로 잘못 판단된, 30 ms 이내의 짧은 구간에 대해서 유성음 구간인지 아닌지 다시 판단해야 한다.

3.3 검출 알고리즘

제안된 유성음 구간 검출 알고리즘은 그림 6의 순서도에 소개가 되어있다. n 번째 프레임의 저대역 에너지 $e[n]$, 영교차율 $z[n]$, 피치주기의 변화량 $\Delta T[n]$, $\Delta\Delta T[n]$ 에 대해서 $d(x_1, x_2)$ 는 x_1 와 x_2 사이의 거리척도, $\underline{y}[n] = [2e[n] \ z[n]]^T$, $\underline{o}[n] = [\Delta T[n] \ \Delta\Delta T[n]]^T$ 라고 정의하고, λ_0 를 임계값이라고 할 때 다음과 같이 알고리즘을 표현할 수 있다. 단, \underline{y}_v 는 유성음 음성구간들에 대한 $\underline{y}[n]$ 값의 대푯값, \underline{y}_u 는 무성음 음성구간들에 대한 $\underline{y}[n]$ 값의 대푯값, \underline{y}_m 는 유성음인지 아닌지 구별하기 어려운 영역에 대한 $\underline{y}[n]$ 값의 대푯값, \underline{o}_v 는 유성음 음성구간들에 대한 $\underline{o}[n]$ 값의 대푯값이다. 거리척도로는 $d(x_1, x_2) = |x_1 - x_2|$ 이 사용되었다. (대푯값은 임계구간에 따라서 결정된다.)

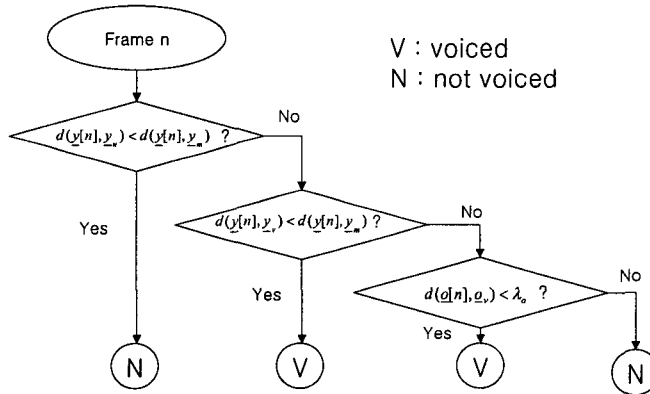


그림 6. 유성음 구간 검출을 위한 순서도

프레임 n_1 과 n_2 사이를 무성음으로 판별된 구간이라고 할 때, $n_1 - n_2 < L$ 일 경우에, 모든 $n_1 < k < n_2$ 에 대하여 다음이 성립하면 프레임 k 를 유성음으로 판단한다.

$$d(\underline{y}[k], \underline{y}_v) < d(\underline{y}[k], \underline{y}_u) \text{ and } d(\underline{o}[n], \underline{o}_v) < \lambda'_0 \quad (6)$$

이때, λ'_0 은 λ_0 보다 큰 값이며, \underline{y}_v 는 $d(\underline{y}_u, \underline{y}_v) < d(\underline{y}_u, \underline{y}_v)$ 를 만족하는 새로운 대푯값으로서 짧은 무성음 구간이 유성음 구간으로 포함하지 않게 하고 피치 주기가 변하는 유성음 음소 경계면의 유성음을 검출해 내기 위한 설정이다.

4. 실험 및 결과고찰

유·무성음 음소의 구간을 검출해 내고자 할 때 다음과 같은 어려움이 있을 수 있다. 첫째로 유성음 음소가 연속적 나타날 때 유성음 세분류의 어려움이다. 유성음 음소 여러 개가 연속적으로 발음되었을 때 연속되는 유성음 음소를 모두 포함하는 구간으로 검출은 가능하나, 해당하는 구간 내에서의 각 유성음을 세분류하는 데에는 어려움이 따른다. 두 번째로는 앞서 논의한 바가 있는 유성음군 사이의 짧은 무성음 음소가 존재하는 경우의 검출의 어려움이다. 이러한 경우에는 그림 7과 같이 짧은 무성음 음소의 구간이 유성음화 되는 경향을 보이게 되므로 같이 유성음 군으로 판별되는 경우가 많다.

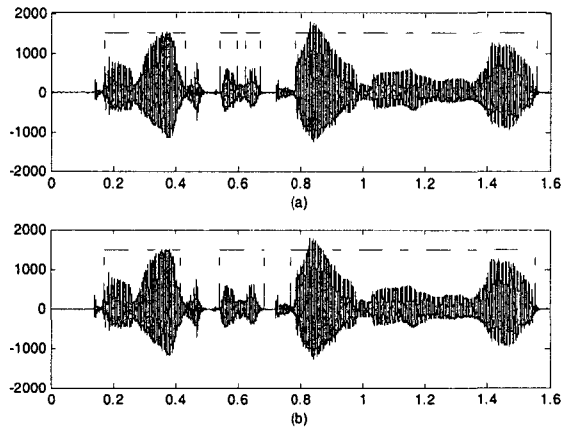


그림 7. 발음 'Don't ask me to carry an oily rag...'에 대한 (a) TIMIT 레이블 데이터를 이용한 음소 구간과 (b) 제시된 알고리즘을 통한 유성음 음소구간 검출 결과 (점선으로 표시된 구간이 유성음 구간)

유·무성음 음소의 구간 검출실험을 TIMIT corpus 중에서 임의로 약 200 개의 데이터를 추출하여 실험하였다. 20 ms의 오차를 가지고 TIMIT의 음소 구간정보를 검출해 내는 실험은 프레임 길이 20 ms로 수행한다. 사용된 TIMIT 데이터들은 모두 8 kHz로 decimation하였다.

표 3. 에너지와 영교차율을 이용한 음소군에 대한 판별률 (6 개 연속인 것까지만 표시)

연속하는 음소의 개수	검출된 유성음 음소의 개수	유성음 음소의 총 개수	%
1	177	309	57.28
2	554	794	69.77
3	425	525	80.95
4	15	24	62.50
5	150	595	25.21
6	38	108	35.19

표 4. 제안된 파라미터와 알고리즘을 이용한 음소군에 대한 판별율 (6 개 연속인 것까지만 표시)

연속하는 음소의 개수	검출된 유성음 음소의 개수	유성음 음소의 총 개수	%
1	158	309	51.13
2	571	794	71.91
3	430	525	81.91
4	18	24	75.00
5	419	595	70.42
6	49	108	45.37

표 3, 4는 제안된 알고리즘을 사용하여 유성음 추출을 한 결과이다. 유성음이 연속하는 경우 유성음 각각을 검출해 내지 않고 몇 개의 연속적인 유성음 군을 검출해 내는 실험의 결과이다. 유성음 검출률을 계산하기 위해서 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$(\text{유성음 검출률}) = (20 \text{ ms의 오차로 검출된 유성음의 총 개수}) / (\text{해당 유성음의 총 개수}) \quad (7)$$

해당하는 음소군의 종류에 대해서 총 개수는 해당하는 음소군들에 총 몇 개의 음소가 존재하는 지를 의미한다. 결과는 영어 문장 발음상에 있어서 연속하는 유성음 음소의 발음이 얼마나 많이 존재하는가를 보여주는 동시에 음소군 내의 음소 검출의 필요성 또한 제시하고 있다.

표 5, 6은 유성음 음소의 종류에 따른 검출 결과를 나타낸 것이다. 이중모음과 후설모음에 대해서 높은 검출률을 나타내었으며 에너지와 영교차율을 이용한 것 보다 뛰어난 유성음군의 검출결과를 나타내었다. 본 실험에서 사용된 파라미터 값들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \underline{y}_m &= [2 \times 96 \quad 102]^T, \quad \underline{y}_v = [2 \times 104 \quad 98]^T, \\ \underline{y}_u &= [2 \times 88 \quad 106]^T, \quad \underline{q}_v = [0 \quad 0]^T, \quad \lambda_o = 10 \end{aligned}$$

표 5. 저대역 에너지와 영교차율을 이용한 유성음 음소의 종류에 따른 검출 결과

유성음의 종류	검출된 유성음 음소의 개수	유성음 음소의 개수	%
Front Vowels	579	963	60.12
Middle Vowels	237	450	52.67
Back Vowels	70	72	97.22
Diphthongs	64	123	52.03
Liquids	166	310	53.55
Glides	244	404	60.40
Nasals	150	250	60.00
total	1,510	2,572	58.71

표 6. 제안된 파라미터와 알고리즘을 이용한 유성음 음소의 종류에 따른 검출 결과

유성음의 종류	검출된 유성음 음소의 개수	유성음 음소의 개수	%
Front Vowels	694	963	72.07
Middle Vowels	263	450	58.44
Back Vowels	71	72	98.61
Diphthongs	101	123	82.11
Liquids	224	310	72.26
Glides	299	404	74.01
Nasals	180	250	72.00
total	1,832	2,572	71.23

5. 결 론

본 논문에서는 유·무성음 구간을 검출하기 위한 간단한 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 음성의 유·무성음의 주기성에 대한 특성을 보완할 수 있는, 저대역 에너지와 영교차율, 그리고 주기성의 안정성을 판단하기 위한 피치 변화량을 파라미터로 사용하였다. 유·무성음의 구간검출을 음소단위의 검출이라는 측면에서 접근하여 음소군의 검출률과 음소군내의 음소의 검출률을 얻었다. 에너지와 영교차율을 이용한 판별알고리즘[1]과 비교하였을 때 프레임별 판별률은 보다 안정적이고 향상된 결과를 나타내었으며, TIMIT corpus를 사용하여 실험했을 때 유성음 음소 검출률이 약 13% 향상되었다. 좀더 정밀한 수준의 음소군 판별과 여러 음소로 이루어진 음소군내의 음소 판별에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Rabiner, L. & Schafer R. W. 1978. *Digital Processing of Speech Signals*. Prentice-Hall.
- [2] TIMIT. 1990. *Acoustic-Phonetic Continuous Speech Corpus CD*. American Helix.
- [3] Atal, B. S. & L. R. Rabiner. 1976. "A Pattern Recognition Approach to Voiced-Unvoiced-Silence Classification with Applications to Speech Recognition." *IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Processing*, vol, ASSP-24, 201-212.
- [4] Un, C. K. & S. C. Yang. 1977. "A Pitch Extraction Algorithm Based on LPC Inverse Filtering and AMDF." *IEEE Trans. Acoust., Speech Signal Processing*, vol. ASSP-25, 565-572.
- [5] Bendiksen, A. & K. Steiglitz. 1990. "Neural Networks for Voiced/Unvoiced Speech Classification." *ICASSP-90*, 521-524.
- [6] Cohn, R. P. 1991. "Robust Voiced/Unvoiced Speech Classification Using a Neural Net." *ICASSP-91*, 437-440.
- [7] Ghiselli-Crippa, T. & A. El-Jaroudi. 1991. "Fast Neural Net Training Algorithm and Its Application to Voiced-Unvoiced-Silence Classification of Speech." *ICASSP-91*,

- 441-444.
- [8] Ahn, Raphael & W. Harvey Holmes. "Voiced/Unvoiced/Silence Classification of Speech Using 2-Stage Neural Networks With Delayed Decision Input." *Proc. of ISSPA*, 389-390.
- [9] TIA/EIA/IS-127. 1997. "Enhanced Variable Rate Codec, Speech Service Option 3 for Wideband Spread Spectrum Digital Systems."
- [10] Siegel, L. J. 1980. "A Procedure for Using Pattern Classification Techniques to Obtain a Voiced/Unvoiced Classifier." *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-28, 398-407.
- [11] Krubsack, D. A. & R. J. Njederjohn. 1991. "An Autocorrelation Pitch Detector and Voicing Decision with Confidence Measures Developed for Noise-Corrupted Speech." *IEEE Trans. Acoust., Signal Processing*, vol. 39, 319-329.

접수일자: 2002. 7. 10.

게재결정: 2002. 8. 29.

▲ 장규철

대전시 유성구 구성동 373-1 (우: 305-701)
 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 Multimedia Processing Lab.
 Tel: +82-42-869-5470
 Fax: +82-42-862-0559
 E-mail: nic@kaist.ac.kr

▲ 우수영

대전시 유성구 구성동 373-1 (우: 305-701)
 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 Multimedia Processing Lab.
 Tel: +82-42-869-5470
 Fax: +82-42-862-0559
 E-mail: woodung@eeinfo.kaist.ac.kr

▲ 유창동

대전시 유성구 구성동 373-1 (우: 305-701)
 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 Multimedia Processing Lab.
 Tel: +82-42-869-3470
 Fax: +82-42-862-0559
 E-mail: cdyoo@ee.kaist.ac.kr