

유성음 구간에서의 Epoch 추출에 관한 연구

강동규, 한민수
한국전자통신연구소

A Study on the Epoch Extraction of Voiced Speech

DONG-GYU KANG, MENSOO HAHN
ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS RESEARCH INSTITUTE

요 약

음성 신호처리분야의 기반을 이루고 있는 선형예측 기법으로 성대폐쇄구간 분석이 가능해질 경우 특히 음성 합성과 부호화 시스템의 상당한 성능개선을 기대할 수 있기 때문에 최근 관련 분야에서 높은 신뢰도를 갖는 GCI (Glottal Closure Instant) 검출 알고리즘 개발에 많은 관심을 보이고 있다. 성대폐쇄구간 검출에서 가장 중요한 것은 성대폐쇄시점에 관한 정보이며, 본 논문에서는 이에 대응될 수 있는 정보인 epoch를 음성신호에서 직접 추출할 수 있는 기법을 제안하였다.

제안된 방법은 프레임 단위별 평균 피치를 참조하여 저역통과된 유성음 신호에서 3구간 영교차점별 평균 진폭 변동율에 의해 pseudo-epoch를 검출한다. 대역통과된 유성음 신호(성대파형에 의한 저역성분이 제거된 신호)를 이용하여 pseudo-epoch 부근에 존재하는 보다 정밀한 실제 epoch를 최종적으로 결정하였다.

제안된 방법은 단계적으로 epoch가 존재할 수 있는 영역을 좁혀 나가기면서 처리하므로 검출오차를 줄일 수 있었고, 시간영역에서 처리되어 계산량이 적으므로 고속 처리가 가능하였다. 성능평가를 위해 처리 결과를 EGG (electroglottographic)신호와 비교한 결과, 약 2샘플 (0.2msec)정도의 오차만을 갖는 우수한 성능을 나타내었다.

1. 서론

LP 분석기법은 음성신호의 포먼트 정보를 내포하고 있는 특징변수를 손쉽게 변수화하여 추출할 수 있을 뿐 아니라 신뢰도가 높고 고속 처리가 가능하여 지금까지 오랫동안 이론적인 몇가지 문제점에도 불구하고 음성신호처리 분야에서 가장 많이 이용되었다.

지금까지 지적된 가장 큰 문제점은 LP 분석기법이 음성신호를 all-pole model로 가정하고, 입력을 impulse 열이나 백색잡음으로 가정하고 있으나 실제 음성신호는 이를 가정에 위배된다는 점이다. 즉, zero가 존재하는 자음이냐 비음의 경우에는 all-pole model로는 바람직한 결과를

얻을 수 없으며, 입력(음원)이 이론적으로 가정된 impulse 열이 아닌 glottal pulse로 여기되는 유성음의 경우에도 정확한 분석 결과를 기대할 수 없다.

이러한 문제점을 극복하기 위해 많은 연구가 진행되어 왔으며 보다 안정되고 정밀한 분석을 할 수 있는 LP 방법에 대한 연구가 진행되어 여러가지의 개선된 LP 분석 기법들이 발표되었다^{[1][6][11]}. 즉, 첫번째 문제점을 해결하기 위해 높은 차수의 LP분석을 하면 근사적인 zero를 추정할 수 있다는 연구결과들이 발표되었고, 근본적인 해결방법으로서 pole-zero model인 ARMA model에 대한 연구도 진행되었다. 동시에 음원의의한 영향을 줄이기 위한 방법으로서 한 피치구간에서 음원의 영향이 없는 성대 폐쇄구간에 대해서만 분석하려는 연구가 진행되고 있으나 이 방법은 정밀한 성대폐쇄구간을 먼저 검출해야 한다는 어려움이 있다. 최근 합성음의 음질향상을 위해 정밀한 성대의 진동정보를 나타내는 EGG신호로부터 성대의 폐쇄구간을 검출하여 유성음 신호를 정밀하게 분석할 수 있는 2 channel 음성 분석기술이 발표되어 합성음의 품질 개선과 음원 추출에 많은 기여를 하였으나 일반적인 경우에는 이용하기 어려운 방법이다. 따라서, 성대폐쇄시점인 epoch를 음성신호로부터 직접 추출할 수 있다면 음성관련 분야에서 상당한 효과를 기대할 수 있다^[12].

지금까지 epoch 검출을 위한 여러가지 방법들이 발표되었다. Strobe[7]는 음성신호의 covariance matrix로부터 log determinant를 구하는 방법을 제안하였고, Ananthapadmanabha[5][7]는 prediction error나 maximum likelihood 신호의 Hilbert envelope를 계산하여 epoch를 구할 수 있는 방법을 제안하였다. Wong[14]은 샘플단위별 LP분석에서 얻은 LP error sequence에 의한 방법을 제안하였으며, Veeneman[12]과 Krishnamurthy[11]는 음원 추출이나 분석합성에 이용하기 위해 음성신호와 동기된 EGG신호를 이용한 방법을 제안하였다. 한편, 강[9]은 유성음의 1.2kHz 이하 성분에 대한 2구간 영교차점별 평균 진폭변동율에 의한 근사적인 epoch 검출 방법을 제안하였다. 제안된 방법들이 LP분석에 바탕을 둔 경우에는 비

음이나 짧은 피치를 나타내는 신호에서 검출 에러를 피하기 어렵고, 영역변환이 수행되는 경우에는 계산량이 증가하고 분해능이 저하되는 단점을 보이고 있다.

본 논문에서는 음원에 의한 영향을 줄이기 위해 필요한 epoch를 음성파형으로부터 직접 검출할 수 있는 새로운 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 먼저, 유성음에서 1.2kHz 이하 성분에 대한 3구간 영교차점별 평균진폭변화에 의해 pseudo-epoch 정보들 검출한다. Epoch가 강조된 대역폭과 신호에서 epoch는 pseudo-epoch로부터 앞쪽의 약 2~8샘플 구간내에 존재한다고 한정될 수 있으므로 이 구간내에서 최대 진폭을 나타내는 지점을 검출하여 정밀한 최종 epoch를 추출하였다.

2. 음성신호와 상대 폐쇄시점

광섬유의 발달로 직경이 매우 작은 내시경이 개발되었고, 이것을 이용하여 성대의 진동을 고속으로 촬영하는 동시에 음성을 녹음하므로써 피치주기내에서 상대와 음성신호와의 관계를 보다 정밀하게 분석할 수 있게 되었다. 고속 촬영된 성대의 움직임과 음성신호를 비교 분석하면, 성대가 닫혀지는 순간에 음성신호는 피치주기 내에서 최대의 진폭변화를 나타내고 있음을 관찰할 수 있다.¹³⁾

한편, 상대 진동에 관한 정보를 손쉽게 얻을 수 있는 또 다른 방법으로서 상대의 접촉면적에 따라 변화하는 임피던스를 측정하는 방법이 있다. 이 방법에 의해 얻어진 신호를 EGG신호라 하며 음성신호와 동기시켜 EGG신호를 관찰하면 피치주기별로 변화하는 음성신호와 상대와의 관계를 쉽게 알 수 있다.¹⁴⁾¹⁵⁾ 상대는 급속히 닫히고 서서히 열릴 뿐 아니라 저항은 면적의 계급에 반비례하므로 상대의 접촉저항은 성대가 닫히는 순간에 급속한 변화들 나타낸다. 그러므로, EGG신호를 미분한 DEGG신호를 이용하면 정밀한 상대 폐쇄시점을 정확히 추출할 수 있다. EGG 신호에서 검출된 상대 폐쇄시점에서도 음성신호는 피치주기내에서 최대의 진폭변화를 일으키고 있음을 관찰할 수 있다.

3. 유성음의 주기별 평균 진폭 변화

음성신호는 음원에 따라 무성음, 유성음, 혼합음으로 구분할 수 있으며 유성음의 경우 성대의 진동을 여기원으로 성도가 공명되어 발생된다. 또한, 유성음은 성도의 물리적인 저항성분에 의해 피치주기 내에서 epoch를 사점으로 지수함수적인 감쇠를 나타내므로 epoch에서 최대의 진폭변화를 나타낸다.¹⁶⁾¹⁷⁾

유성음 신호에서 제 1포먼트의 에너지는 다른 포먼트에 비해 약 10dB이상 높으므로 시간영역에서 볼때 가장 큰 진폭변화를 보여주며 피치주기 내에서의 영교차율은 제 1포먼트의 주파수를 근사적으로 나타낸다. 그림 1의 1.2kHz 이하 성분에 대한 근사 분석과 같이 실제 음성신호도 epoch부근에서 최대 진폭변화를 보여준다.¹⁸⁾

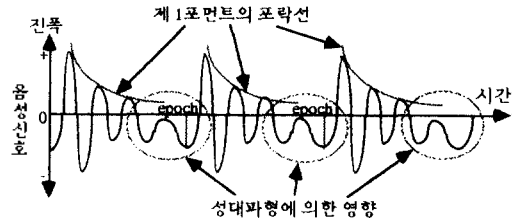


그림 1. 유성음의 1.2kHz 이하 성분에 대한 근사 분석

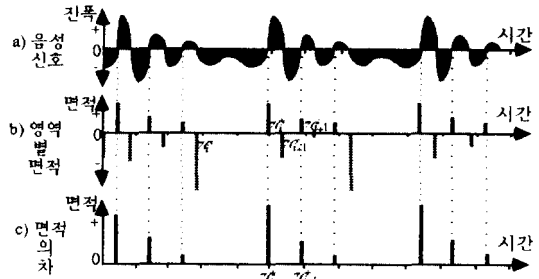


그림 2. 면적의 차에 의한 평균진폭 변화

주기별 진폭변화특성을 이용한 피치 검출 기법들 중에서 parallel processing 방법은 900Hz 미만의 성분에 대한 peak와 valley의 최대 및 최소치에 의해 주기성을 강조하여 피치를 검출하고 있다.¹⁹⁾ 이 방법은 진폭의 크기가 이용하여 주기성을 강조하므로써 그림 1.에서와 같이 상대 파형의 영향으로 작은 진폭과 낮은 주파수로 나타날 경우 이를 충분히 반영하지 못할뿐만 아니라 음성파형의 피크 정보를 이용하므로써 정밀한 주기별 피치검출에 적용하기는 어렵지만 피치 contour의 결정에서는 많이 이용되고 있다.

한편, 보다 정밀한 위치정보와 고속처리가 가능한 방법으로서 면적 비교법이 있다. 이 방법은 유성음에서 제 1포먼트의 영교차구간이 가장 길고 진폭이 큰 특징을 나타낼 수 있는 변수가 영교차 구간에서의 파형 면적임에 착안한 것이다. 영교차점 위치 k_i 에 대한 면적함수는 식 (1)과 같이 표시할 수 있다.¹⁸⁾

$$A(k_i) = \sum_{j=1}^{k_i} S(j) \quad \dots (1)$$

식 (1)의 면적함수는 주기성이 강조되어 나타나므로 결정논리에 의해 피치의 주기를 보다 정밀하게 추출할 수 있다. 이 방법은 "+" 영역의 면적만을 고려하고 있으나 parallel processing 방법에서와 같이 "+" 면적과 선행하는 "-" 면적의 차를 구하면 그림 3-3과 같이 주기성이 훨씬 강조된 신호를 얻을 수 있다. 여기서, 면적차는 1.2kHz 이하의 성분에 대한 2구간 영교차점별 평균진폭변화라 할 수 있으며 피치주기 내에서 최대치를 구하면 pseudo-epoch를 구할 수 있다.¹⁸⁾

음성신호 $S(n)$ 에서 "+" 영역의 면적함수 $A^+[x_i]$ 와 "-" 영역의 면적함수 $A^-[x_i]$ 를 각각 다음의 식 (2), (3)으로 나타낼 때,

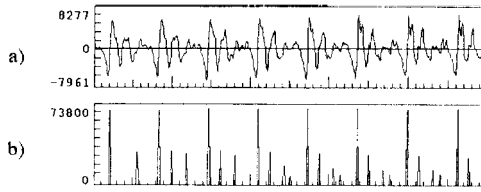


그림 3. 유성음 신호에 대한 3구간 영교차점별 평균진폭변동률. a)유성음 신호, b)3구간 영교차점별 평균진폭변화 $MF[x_i]$

$$A^+[x_i] = \sum_{n=x_i}^{x_{i+1}} S(n) \quad \dots(2)$$

$$A^-[x_i] = \sum_{n=x_i}^{x_{i+1}} S(n) \quad \dots(3)$$

2구간 영교차점별 평균 진폭변동합수 $MF[x_i]$ 는 식(3-4)와 같이 표현된다¹⁾.

$$MF[x_i] = A^+[x_i] - A^-[x_i] \\ = \sum_{j=x_i}^{x_{i+1}} S(j) - \sum_{k=x_i}^{x_{i+1}} S(k), \quad i=0, 1, 2, \dots, l \quad \dots(4)$$

한편, 음성신호가 전화선로와 같이 대역통과된 신호일 경우 특히 피치가 긴 경우에 실제의 목소리와 다르게 들리는 것은 저역성분이 차단되므로서 성대의 영향이 줄어들었기 때문이다. 이러한 현상을 음성파형에서 관찰하면 epoch 이전에 나타나는 "-" 변적에 현저히 감소된 것을 관찰할 수 있다. 이러한 경우에는 2구간 영교차점별 평균진폭변화가 주기성을 잘 나타내지 못하게 된다. 대역통과된 신호일지라도 epoch 이후의 첫번째 "+" 변적과 "-" 변적은 피치주기 내에서 가장 큰 값을 나타내는 점을 고려하면 이러한 단점을 보완할 수 있다.

Epoch 이후의 첫번째 "-" 변적합수는 식(3), (4)로부터 식(5)와 같이 표현할 수 있고,

$$A^-[x_{i+1}] = \sum_{n=x_{i+1}}^{x_{i+2}} S(n) \quad \dots(5)$$

3구간 영교차점별 평균진폭합수 $MF[x_{i+1}]$ 는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$MF[x_{i+1}] = A^+[x_i] - A^-[x_i] - A^-[x_{i+1}] \\ = \sum_{j=x_i}^{x_{i+1}} S(j) - \sum_{k=x_i}^{x_{i+1}} S(k) - \sum_{l=x_{i+1}}^{x_{i+2}} S(l) \\ i=0, 1, 2, 3, \dots, m \quad \dots(6)$$

여기서, m은 분석구간 내에서 영교차점수의 1/2이다.

그림 4는 실제음성신호에 대한 3구간 영교차점별 평균진폭변화를 나타낸 것으로서 epoch 부근에서 뚜렷이 구별되는 평균진폭변화를 관찰할 수 있다.

4. Epoch 검출

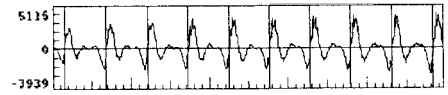


그림 4. 검출된 pseudo-epoch와 음성신호

$MF[x_i]$ 에는 근사적인 epoch 정보를 포함하고 있으므로 먼저 $MF[x_i]$ 로부터 pseudo-epoch를 검출한다. $MF[x_i]$ 에서 직접 pseudo-epoch를 검출하기는 어렵지만 분석구간 내의 평균피치를 알고 있다면 $MF[x_i]$ 에서 쉽게 피치주기 내의 최대값을 구하여 pseudo-epoch를 추출할 수 있다.

본 논문에서는 프레임별 평균 피치를 구하기 위해 가변길이 dual impulse의 스펙트럼 하모닉스 매칭에 의한 방법을 사용하였다. 이 방법은 극성이 다른 dual impulse의 스펙트럼과 유성음의 스펙트럼이 겹해질 때 유성음의 피치와 impulse의 간격이 같아지면 두 스펙트럼 하모닉스의 봉우리와 골이 서로 엇갈려 겹해지므로 에너지가 최소화되는 되는 현상을 이용하고 있다²⁾.

Pseudo-epoch를 검출하는 알고리즘은 $MF[x_i]$ 에서 최대치를 구하고, 이 점을 중심으로 평균피치의 60% 이내에 있는 값들을 제거한후, 현재의 최대치를 제외한 나머지 중에서 다시 최대치를 구하여 위의 과정을 순차적으로 반복 수행하므로써 얻어진다.

그림 4는 실제의 음성신호에 대하여 평균 진폭변동률 이용한 pseudo-epoch 검출 결과(수직선)를 음성신호와 비교한 것으로 근사적인 epoch를 나타내고 있음을 볼 수 있다.

검출된 pseudo-epoch는 실제의 epoch 이후에 나타나는 제 1포먼트의 첫번째 영교차점이므로 보다 정밀한 epoch를 결정하기 위한 처리가 필요하다. 성도는 epoch에서 최대의 에너지로 여기되고, 음성신호는 감쇠 진동을 일으키므로 시간영역의 음성파형에서 볼때 epoch는 피치주기 내에서 진폭이 가장 크게 변화하는 시점으로 나타난다.

유성음에서 입력된 상대파형의 영향을 제거할 수 있다면 음성신호를 impulse 응답으로 볼 수 있기 때문에 epoch가 강조된 음성파형을 얻을 수 있다. 입력된 상대파형은 저역성분으로서 고역통과에 의해 부분적으로 제거할 수 있으며 상대파형의 영향이 제거된 유성음신호는 그림 5의 근사분석에서와 같이 epoch가 강조된 신호를 얻을 수 있으므로 epoch 결정이 용이하게 된다.

300Hz~1.2kHz정도의 대역통과를 시킨 유성음 신호는 성대의 영향과 제 2, 3포먼트의 영향을 상대적으로 줄일 수 있다. 대역통과된 신호에서 직접 epoch를 검출하기는 어렵지만 그림 5.에서와 같이 epoch 이후에 나타나는 첫번째 영교차점인 $zc(x)$ (pseudo-epoch)를 알고 있다면 간단한 결정논리로 epoch를 결정할 수 있다. 그림 5.의 근사분석에서 epoch가 존재할 수 있는 구간은 대역통과된 신호의 zc 에 선행하는 영교차점까지의 구간인 P_1 으로 근접시킬 수 있다. epoch의 정의에 따라 P_1 구간내에

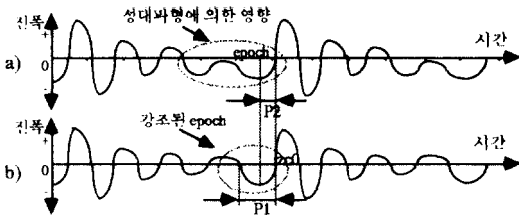


그림 5. 성대파형과 epoch 관계의 근사 분석
a) 원래의 유성음 신호, b) 성대파형이 제거된 유성음신호

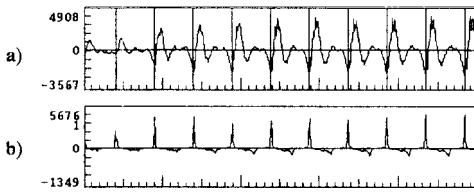


그림 6. 검출된 epoch와 DEGG신호와의 비교
a) 음성신호와 epoch, b) DEGG신호

서 진폭이 가장 큰 지점을 구하면 정밀한 epoch를 검출할 수 있다.

그림 6은 실제의 음성신호에 대하여 제안된 방법으로 검출한 epoch를 수직선으로 나타내었고 검출결과와의 비교를 위해 하단에는 미분된 EGG(DEGG)신호를 나타내었다. 검출된 결과는 근사분석된 이들과 일치할뿐 아니라 epoch를 나타내는 DEGG신호의 파크와 일치하고 있음을 볼 수 있다.

5. 실험 및 결과

유성음 신호에서 MF_{2,1}를 구하고 epoch를 결정하기 위한 컴퓨터 simulation을 위해 30대 남녀가 아래와 같은 문장을 발성한 다음 10kHz로 표본화하면서 16-bit A/D변환을 수행하여 저장하였다.

발성1) 남성화자: "그리고 우리를 간절히 부르고 있다."
발성2) 여성화자: "인간은 어느 한쪽 뇌만 가지고는"

먼저 각 음성시료에 분석 길이를 평균퍼치검출기에서 구한 최대파치의 2배 이상어 되도록하고 100샘플씩 이동시키면서 1.2kHz로 저역통과를 시킨다. 저역통과된 신호의 각 영교차점별 평균 진폭을 구하고, 연속되는 "-", "+", "-" 영역의 평균 진폭의 절대치 합을 구한다. 분석 프레임내의 평균 퍼치를 참조하여 3구간 영교차점별 평균진폭 변화함수로부터 pseudo-epoch를 결정한 다음, 300Hz~1.2kHz로 대역통과된 신호에서 epoch결정논리에 의해 정밀한 epoch를 검출하였다. 그림 7에 제안된 방법에 대한 전체적인 흐름을 나타내었다.

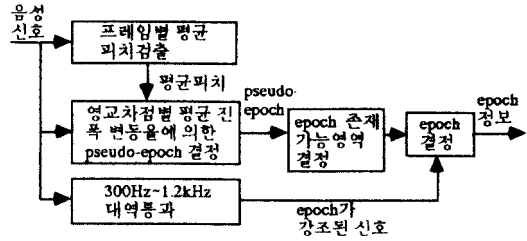


그림 7 제안된 epoch검출 기법의 처리블럭도

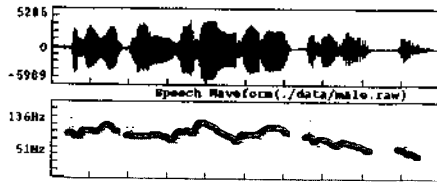


그림 8. 발성1) "그리고 우리를 간절히 부르고 있다."에 대한 처리결과

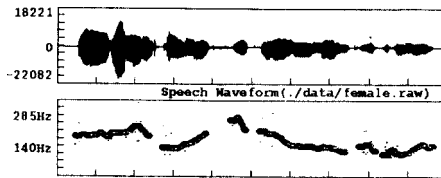


그림 9. 발성2) "인간은 어느 한쪽 뇌만 가지고는"에 대한 처리 결과

그림 8, 9에서 굵은 실선으로 표시된 프레임별 기본주파수 contour에 점선으로 검출결과에 의해 산출된 기본주파수를 표시하였다.

6. 결론

EGG신호를 이용한 2 채널 음성분석의 연구결과에 의하면 성대패쇄구간 분석의 경우가 정밀하고도 안정된 성도파라미터를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나, 이방법은 EGG신호에 의존해야 하므로 일반적인 환경에서는 적용하기가 어려운 단점을 갖고 있다. 그러므로 음성신호에서 직접 epoch를 추출할 수 있다면 음성인식, 합성 및 부호화 분야에서 상당한 파급효과를 기대할 수 있다.

지금 까지 알려진 epoch 추출 방법들은 정밀도가 낮고, 많은 계산량과 상대적으로 큰 검출에러를 보이고 있다. 본 논문에서는 유성음 신호가 퍼치주기 내의 epoch에서 최대의 에너지변화를 나타내는 현상을 이용한 새로운 epoch 검출방법을 제안하였다. 제안된 방법은 먼저, 1.2kHz 이하 성분에 대한 각 영교차점별 편차를 구한 후, 연속되는 "-", "+", "-"의 3개 편차에 대한 절대치 합을 구하여 "+" 편차의 시작점에 나타내면 3 구간 영교차점별

평균진폭 변화를 얻을 수 있다. 산출된 3구간 영교차점 별 평균 진폭변동율은 epoch부근에서 뚜렷한 피크를 나타내므로 분석구간의 평균 피치를 참조하여 쉽게 pseudo-epoch를 결정할 수 있다.

유성음 신호를 300Hz~1.2kHz 정도로 대역통과 시키면 성대파형에 의한 영향이 감소되어 epoch가 보다 잘 구별될 수 있는 신호를 얻을 수 있으므로 pseudo-epoch를 참조 하던 간단한 결정논리에 의해 정밀한 epoch를 결정할 수 있다.

제안된 방법은 epoch가 존재할 수 있는 영역을 프레임 별 평균피치도 부터 잠정적으로 정밀한 epoch까지 좁혀 가면서 처리되므로 결정에러를 줄일 수 있었으며, 대역 통과된 음성신호에서 우수한 결과를 나타내므로 전화 음성신호에서도 좋은 결과를 나타낼 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 동경대와의 국제공동연구인 "피치동기식 포먼트 추출에 관한 연구"로 수행된 결과물입니다. 원활한 연구를 위해 많은 도움을 주신 양재우 부장님과 음성언어연구실 실원들께 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] 배명진, 안수길, "편적 비교법에 의한 고속 PITCH 추출", 대한전자공학회지, 제 22권, 제 2호, 1985.3.
- [2] 강동규, 배명진, 안수길, "배경잡음하에서 스펙트럼 누설현상을 이용한 음성신호의 중심 피치검출", 한국음향학회 논문집 10권 1호 pp.37-46, 1991.2.
- [3] 강동규, 정유현, "가변 길이 Dual Impulse의 Spectrum Harmonics Matching에 의한 피치검출에 관한 연구", 제 7회 신호처리 종합학술대회 논문집, 제 7권, 1호, pp. 775-778, 1994.10.
- [4] Yan Ming Cheng, Douglas O'shaughnessy, "Automatic and Reliable Estimation of Glottal Closure Instant and Period", IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, Vol. ASSP-37, No. 12, pp. 1805-1815, December 1989.
- [5] T. V. Ananthapadmanabha, B. Yegnanarayana, "Epoch Extraction from Linear Prediction Residual for Identification of Closed Glottis Interval", IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, Vol. ASSP-27, No. 4, pp. 309-319, August 1979.
- [6] T. V. Ananthapadmanabha, B. Yegnanarayana, "Epoch Extraction of Voiced Speech", IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, Vol. ASSP-23, No. 6, pp. 562-570, December 1975.
- [7] Hans Werner Strube, "Determination of the Instant of Glottal Closure from the Speech Wave", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 56, No. 5, pp. 1625-1629, December 1974.
- [8] S. Parthasarathy, Donald W. Tufts, "Excitation-Synchronous Modeling of Voiced Speech", IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, Vol. ASSP-35, NO. 9, pp. 1241-1249, September 1987.
- [9] L.R. Rabiner/R.W. Schafer, *Digital Processing of Speech Signals* Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, pp.98-105, pp.135-141, 1978.
- [9] 강동규, 정유현, 최준혁, "음성파형의 평균진폭 변동율에 의한 주기별 피치검출", 제 11회 음성통신 및 신호처리 워크샵 논문집, 1994.10.
- [10] 김재인, 이종락, "성문 폐쇄 시점 검출에 관한 연구", 제 10회 음성통신 및 신호처리 워크샵 논문집, 제 SCAS-10권, 1호, pp.170-172, 1994.8.
- [11] A. K. Krishnamurthy, D. G. Childers, "Two-Channel Speech Analysis", IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, Vol. ASSP-34, NO. 4, pp. 730-743, August 1986.
- [12] D. E. Veeneman, S. L. Bement, "Automatic Glottal Inverse Filtering from Speech and Electroglographic Signals", IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, Vol. ASSP-33, NO. 2, pp. 369-377, April 1985.
- [13] S. Kiritani, H. Imagawa, K. Honda, "Simultaneous High Speed Digital Recording of Vocal Fold Vibration and Speech Signal", ICASSP 86, Tokyo, pp.1633-1636, 1986.
- [14] D. Y. Wong, J. D. Markel, A. H. Gray, "Least Square Glottal Inverse Filtering from the Acoustic Speech Waveform", IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, Vol. ASSP-27, NO. 4, August 1979.
- [15] A. El-Jaroudi, J. Makhoul, "Discrete All-Pole Modeling", IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 39, No. 2, February 1991.
- [16] J. Makhoul, "Stable and Efficient Lattice Methods for Linear Prediction", IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, Vol. ASSP-25, No. 5, October 1977.
- [17] H. Zhang, P. Duhamel, S. Tressens, "An Improved Burg-Type Recursive Lattice Method for Autoregressive Spectral Analysis", IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, Vol. 38, No. 8, August 1990.