

서브밴드 스케일링에 의한 음성신호의 피치변경법에 관한 연구*

A Study on the Pitch Alteration Technique by Subband Scaling in Speech Signal

김 영 규** · 배 명 진**
Young-Kyu Kim · Myung-Jin Bae

ABSTRACT

Speech synthesis can classify by synthesis way, that is waveform coding, source coding and mixture coding. Specially, waveform coding is suitable for high quality synthesis. However, it is not desirable by synthesis techniques of syllable or phoneme unit because it do not separate and handles excitation and formant part. Therefore, there is a need for pitch alteration method applied in synthesis by the rule in waveform coding. This study propose about pitch alteration method that use spectrum scaling after do to flatten spectra by subband linear approximation to minimize spectrum distortion.

This paper show evaluation whether show excellency of some measure compared with LPC, Cepstrum, lifter function and method that propose. estimation method seeks distribution of each flattened signal and measured degree of flattened spectra Signal flattened is normalized, So that highest point amounts to zero, and distribution of signal ,whose average is zero, is calculated. this show result that measure the spectrum distortion rate to estimate performance of method that propose. The average spectrum distortion rate was kept below the average 2.12%, so the method that propose is superiors than existent method.

Keywords: speech synthesis, excitation, formant, pitch alteration, spectrum distortion

1. 서 론

음성합성은 합성방식에 따라서 파형 부호화를 이용한 합성법, 신호원 부호화를 이용한 합성법, 혼성 부호화를 이용한 합성법으로 분류할 수 있다[1-3]. 파형 부호화를 이용한 합성법은 음성 파형 자체의 잉여성분을 제거한 후에 부호화 하는 방법으로 PCM, DPCM, ADPCM, ADM 등이 제안되어 있다. 이 방식은 음성 파형의 형태를 그대로 보존하기 때문에 음질이 상당히 양호하다. 하지만, 데이터베이스 구성시 요구되는 메모리의 양이 방대하고, 분석시 인간의 개성과 감정을 나타내는 여기(excitation) 정보와 의사 내용을 나타내는 성도 여파기의 포만

* 본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 R01-2002-000-00278-0)의 지원에 의하여 이루어졌음.

** 숭실대학교 정보통신과

트(formants) 정보를 분리하지 않고 처리하기 때문에 음원을 변경시켜야 하는 음절단위나 음소단위의 합성기법으로는 바람직하지 못하다. 신호원 부호화를 이용한 합성법은 음성 생성 모델에 근거하여 분석 시에 음성신호를 여기정보와 여파기정보로 분리하여 독립적으로 부호화하는 방법으로 LPC, PARCOR, LSP 등이 제안되어 있다[1]. 이 방식은 여기정보와 여파기정보에 대한 분석 결과를 특징 파라미터의 형태로 저장하거나 전송하고 두 특징 파라미터를 이용하여 다시 합성하므로 전송 대역폭이나 저장 메모리는 매우 효율적이지만, 분석 시의 오차와 합성 시의 오차가 누적되어 합성음의 자연성과 명료성은 크게 떨어지게 된다. 신호원 부호화의 메모리 효율성과 파형 부호화의 고음질을 적당히 유지하기 위해 이 두 가지 방식을 결합시킨 방법이 혼성 부호화를 이용한 합성법이며, MPLPC, RELP, VELP, CELP 등의 방법이 있다[1]. 그렇지만 혼성부호화법에서는 성도 여파기정보의 부호화에 신호원 부호화법을 적용하고, 성대 여기정보의 부호화에 파형 부호화법을 주로 적용하고 있다. 따라서 파형 부호화를 이용한 합성법과 마찬가지로 여기정보를 변경시켜야하는 음절단위나 음소단위의 규칙에 의한 합성 방식에는 적용하기가 어렵다.

음성을 인간과 기계 사이의 정보전달 수단으로써 효율적으로 사용하기 위해서는 고음질의 합성음뿐만 아니라 다양한 음색을 갖는 합성음을 필요로 한다. 예를 들어, 유명 성우의 음성으로 녹음된 동화를 부모의 음색으로 자녀들에게 들려줌으로써 정서 함양에 도움을 준다든지, 과거의 유명 배우의 목소리를 재현해 낸다든지 혹은 전자메일을 이용해 전송된 메시지를 발송자의 음색으로 들려줌으로써 메시지 전달의 효과를 높일 수 있게 된다. 고음질을 유지하기 위한 합성방식으로는 파형 부호화나 혼성 부호화를 이용한 합성법이 바람직하다. 그렇지만 파형 부호화법이나 혼성 부호화법을 사용하면 데이터베이스용 메모리 규모가 방대하고 인간의 개성을 나타내는 음원 피치의 변경이 어렵다는 문제점이 발생한다. 현재의 반도체 집적기술에 의해 데이터베이스용 메모리 문제는 자연스럽게 해결될 수 있지만 고음질을 유지하면서도 다양한 음색을 갖는 합성음을 생성해 내기 위해서는 파형 부호화법이나 혼성 부호화법에서 음원을 변경할 수 있는 피치 변경법이 요구된다. 일반적으로 주파수 영역에서 피치를 변경하면 스펙트럼 왜곡은 적으나 위상의 보존이 어려워 에너지 불균형으로 인하여 자연성이 열화된다는 특징이 있으며, 시간영역에서 피치를 변경하면 위상을 잘 보존될 수 있으나 스펙트럼 왜곡이 커진다는 특징이 있다.

본 논문에서는 고음질을 유지하면서도 다양한 음색을 갖는 합성음을 생성하기 위해 스펙트럼 왜곡과 위상 왜곡을 최소화 시킬 수 있는 피치변경법을 제안하였다. 기존의 스케일링 방법이 정확히 여기스펙트럼을 분리해 내지 못해 발생하는 스펙트럼 왜곡을 보완하기 위하여 스펙트럼영역에서 서브밴드 선형 근사에 의해 고조파 성분을 얻고 스케일링을 이용하여 피치변경을 수행하여 스펙트럼 왜곡을 최소화하는 주파수 영역 피치 변경법이다.

2. 고조파 스케일링에 의한 피치 변경의 문제점

음성 신호의 스펙트럼 분석은 푸리에 변환에 의해 수행될 수 있다. 단구간 음성 신호의 푸리에 변환은 스펙트럼 포락 $H(w)$ 와 여기 스펙트럼 $X(w)$ 의 곱으로 모델링 될 수 있다. 스펙

트럼 포락은 원래의 음성 스펙트럼의 개략적인 형태를 나타내며, LPC 계수, Cepstrum 계수, lifter function법, 포만트 주파수와 대역폭 등 여러 가지 방법에 의해 표현된다. 여기서 피치검출이나 포만트검출은 매우 중요하다. 하지만 음성신호에서는 여파기성분과 여기성분이 상호 작용하기 때문에 피치검출이나 포만트검출이 매우 어렵다. 특히 음성신호에 잡음이 부가될 경우에는 더욱 어려워진다. 따라서 낮은 SNR 조건에서도 피치정보나 포만트 정보를 유지하는 스펙트럼 신호는 음성처리 분야에서 매우 중요하다고 할 수 있다. 그런데 스펙트럼 신호에는 고조파 성분과 포만트 성분이 함께 나타난다. 따라서 이를 잘 분리하는 것이 피치검출이나 포만트검출의 관건이라 할 수 있다. 음성신호의 로그 스펙트럼신호는 잡음에 강한 특징 파라미터 중에 하나로 낮은 SNR 조건에서도 피치 정보나 포만트 정보를 잘 유지한다. 그러나 고조파 성분과 포만트 성분의 합으로 나타나므로 두 성분의 분리가 매우 중요하다고 할 수 있다. 정확히 여기 스펙트럼을 분리해 내지 못해 발생하는 스펙트럼 왜곡을 보완하기 위하여 스펙트럼영역에서 서브 밴드 선형 근사에 의해 보다 정확한 고조파 성분을 얻고 스케일링을 이용하여 스펙트럼 왜곡을 방지하여 음질 열하를 막을 수 있게 된다.

3. 제안한 알고리즘

일반적으로 시간영역 피치변경법은 위상 왜곡은 적으나 스펙트럼왜곡이 심하다는 특징이 있으며, 주파수영역 피치변경법은 스펙트럼왜곡은 적으나 위상왜곡이 크다는 특징이 있다.

본 논문에서는 피치 변경이 발생하는 스펙트럼왜곡을 최소화하기 위해 스펙트럼 신호를 최대한 평탄화시킴으로써 포만트의 영향을 제거하고 고조파 성분을 분리하여 주파수 스케일링에 의하여 피치를 변경하는 방법을 새로이 제안한다. 그림 1은 본 논문에서 제안한 피치변경법의 블록도이다. 블록도의 A 부분은 여기스펙트럼을 검출하는 과정을 나타내고 B 부분은 스케일링에 의한 위상왜곡을 보상하는 과정을 보여준다. 마지막으로 C 부분은 합성하는 과정을 나타낸다. 주파수영역에서 피치변경법에서 위상을 보상하는 방법은 여전히 해결되지 않은 문제이다. 따라서 서브밴드 스케일링에 의한 피치변경법과 동시에 시간영역 피치변경 기법을 동시에 사용하여 위상왜곡을 줄이는 방법을 제안한다.

3.1 여기 스펙트럼 검출

음성신호는 FFT 변환을 통해 주파수 영역에서 스펙트럼 분석이 이루어진다. 그림 1의 A 부분은 여기 스펙트럼 검출을 나타낸 알고리즘의 블록도이다. 스펙트럼 신호로부터 포만트의 영향과 천이진폭의 영향을 제거하기 위한 첫 단계로서 주파수 대역을 몇 개의 서브밴드로 나눈다. 이때 서브밴드의 대역폭은 스펙트럼 평탄화에 많은 영향을 준다. 본 논문에서는 피치의 범위가 보통 2.5-25 ms인 것을 감안하여 300 Hz와 400 Hz를 서브밴드의 대역폭으로 사용하였다. 이는 입력음성에 따라 적응적으로 대처하기 위한 것이다. 다음 단계로 각각의 서브밴드에서 최대값을 취하여 프레임의 파라미터로 저장한다. 이 파라미터의 값은 8 KHz 샘플링을 했을 경우 10-13 개가 된다. 이 값들은 직접 포만트 성분들을 반영하기 때문에 포만트 포락선을 잘 모델링한다고 할 수 있다. 다음은 구해진 파라미터들로 선형보간을 하여 대략적인 포만트

포락선을 얻은 후 스펙트럼 신호로부터 이를 빼주면 제1 차 스펙트럼 평탄화가 되는 것이다. 가장 이상적인 결과는 입력음성의 피치단위로 서브밴드의 대역폭이 결정된 경우에 나타난다. 따라서 제1 차 스펙트럼 평탄화의 결과를 보상하기 위해 평탄화된 신호를 가지고 다시 한번 위의 알고리즘을 거쳐 제2 차 스펙트럼 평탄화를 시킨다. 이때 서브밴드의 대역폭은 각각 3 가지 경우의 대역폭을 사용했다. 제1 차 평탄화의 대역폭이 300 Hz였을 경우 200 Hz, 300 Hz, 400 Hz를 사용하고 400 Hz였을 경우에는 300 Hz, 400 Hz, 500 Hz를 사용했다. 각각의 결과에 대한 비교 평가방법은 분산을 이용하였다. 분산을 계산하기 전에 각 결과신호들은 최대값이 영이 되도록 정규화시키고 평균이 영인 분산을 계산하여 분산값이 작은 것을 최종적인 결과로 사용하였다. 본 논문에서 사용한 분산은 다음과 같다.

$$\text{Variance} = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^{N/2} (x(k) - m)^2 \quad (1)$$

여기서 N은 FFT 포인트 수이고 스펙트럼 신호가 Y축으로 대칭이기 때문에 분산은 N/2까지만 이루어진다. 또한 k는 주파수 영역에서의 샘플인덱스이고 m은 평균을 의미한다. 이때 m 값은 0을 사용하여 0을 기준으로 평탄화의 정도를 평가하였다.

3.2 위상보상법

시간영역에서 피치를 변경하기 이전에 저역통과 필터를 통과시켜 기본주파수 이상의 고조파성분을 제거하여야 한다. 저역통과필터는 식 (2)에 표현되어 있다.

$$s'(n - \frac{N}{2}) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} s(n-1) \quad (2)$$

여기서 fs가 샘플링 주파수이고 저역통과필터의 차단주파수는 fs/N와 같다. 저역통과필터를 통과한 음성신호는 유성음의 여기원과 유사하다. 이제 그 신호는 다음 식 (3)와 같이 시간영역에서 스케일링된다.

$$\widehat{s}(n) = s'(n \times \rho) \quad (3)$$

여기서 $\widehat{s}(n)$ 는 시간영역에서 스케일링된 신호를 의미하며 $s'(n)$ 는 저역통과 필터를 거칠 신호를 의미한다. 스케일링 인자 ρ 는 식 (4)과 같이 정의된다.

$$\rho = \frac{P'}{P} \quad (4)$$

여기서 P는 화자의 피치이고 P'은 변경하려고 하는 피치이다. 만약 ρ 가 1보다 작다면 피치를 줄이는 것이고, 1보다 크다면 피치를 크게 하는 것이다. 그 후 시간영역에서 피치가 변경

된 신호를 FFT하여 위상정보를 추출한다. 이 위상정보와 서브밴드 스케일링에 의한 피치 변경된 진폭스펙트럼 정보를 결합하여 최종적으로 피치 변경된 신호를 얻는다.

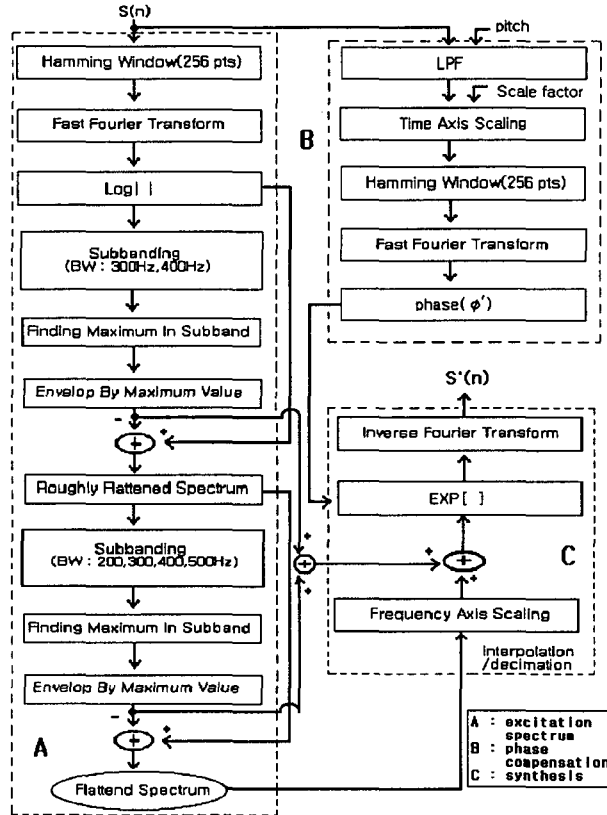


그림 1. 제안한 피치변경법의 블록도

4. 실험 및 결과

컴퓨터 시뮬레이션에 이용한 장비는 IBM PC(1.7 GHz) 시스템이며 여기에 음성신호를 입출력하기 위한 상용화된 16 비트 A/D 변환기를 인터페이스하여 8 kHz의 표본율로 데이터를 입력하였다. 처리결과에의 성능을 측정하기 위해 다음의 대표적인 문장을 연령층이 다양한 남녀 5 명의 화자가 각 5 번씩 발성하여 시료로 사용하였다.

발성 1 : /인수네 꼬마는 천재소년을 좋아한다./

발성 2 : /예수님께서 천지 창조의 교훈을 말씀하셨다./

발성 3 : /창공을 날으는 인간의 도전은 끝이 없다./

발성 4 : /숭실대학교 정보통신과 음성통신 연구팀이다./

4.1 객관적인 평가

제안된 여기 스펙트럼 검출법의 객관적인 비교 평가 및 성능 평가의 비교 대상은 일반적으로 포먼트 정보를 얻기 위해 사용되어온 LPC법, Cepstrum법, lifter function법이다. 스펙트럼을 평탄화하는 데에 각각의 방법과 제안한 방법을 적용하여 분산을 계산하였고 평가하였다. 표 1은 남성화자의 평탄화된 스펙트럼의 분산값을 나타내었고 표 2는 여성 화자의 발생별 분산값을 나타내었다. 평탄화의 정도를 평가하여 최적의 서브밴드 대역폭을 찾고 완전한 스펙트럼 평탄화를 하도록 하였다. 표 1과 표 2에서와 같이 Cepstrum법이 가장 큰 분산값을 나타내고 LPC법은 양호한 특성을 보이지만 제안한 방법보다 약 1.5 배 큰 분산값을 보이고 있고 제안한 방법의 분산 값이 가장 작은 것을 알 수 있다. 그림 1과 그림 2은 남성과 여성의 음성신호와 로그스펙트럼을 나타내었고 그림 3과 그림 4는 평탄화된 스펙트럼신호를 각 방법에 대해 비교하였다.

표 1. 남성화자의 분산값[dB]

	LPC	Cepstrum	lifter function	New method
발성1	178.98	759.56	494.10	117.08
발성2	157.84	703.28	414.44	104.41
발성3	177.56	700.41	481.03	114.65
발성4	146.23	694.37	415.47	93.44
Average	165.15	714.405	451.26	107.39

표 2. 여성화자의 분산값[dB]

	LPC	Cepstrum	lifter function	New method
발성1	303.10	842.59	817.36	210.97
발성2	266.82	756.29	741.87	172.93
발성3	269.69	718.35	678.62	182.25
발성4	237.41	688.99	631.05	151.00
Average	269.25	751.55	717.22	179.28

제안된 피치 변경법의 객관적인 성능 평가는 식 (5)를 이용하여 스펙트럼 왜곡율을 측정하여 평가하였다.

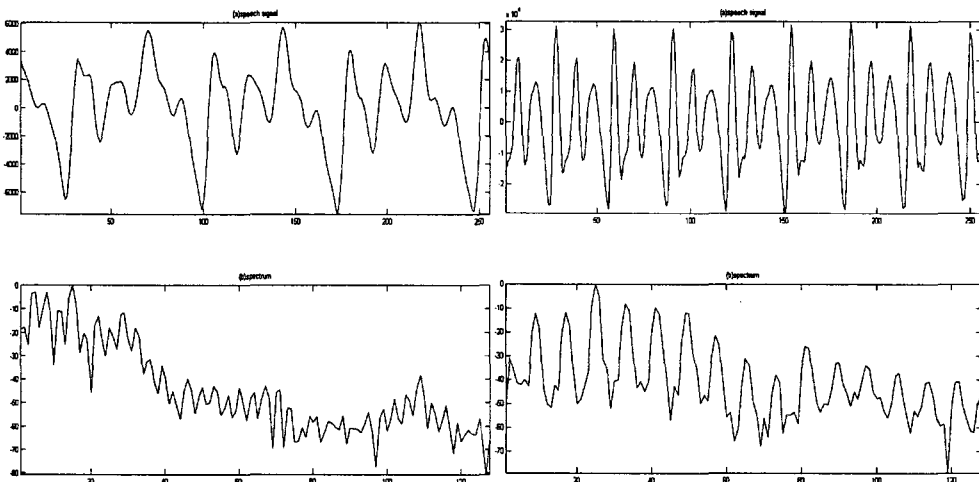


그림 1. 유성음구간의 신호(남성)

그림 2. 유성음구간의 신호(여성)

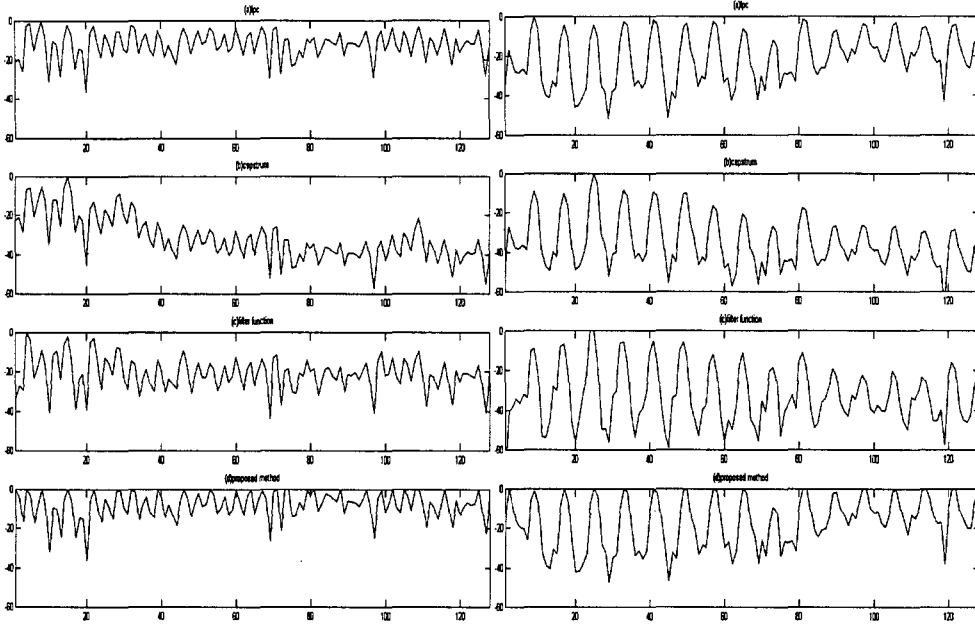


그림 3. 평탄화된 스펙트럼 신호(남성) 그림 4. 평탄화된 스펙트럼 신호(여성)
 (a) LPC method (b) Cepstrum method
 (c) lifter function method (d) Proposed method

$$SD = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} [10\log | H(e^{i\omega}) |^2 - 10\log | \widetilde{H}(e^{i\omega}) |^2] d\omega \quad (5)$$

음성 신호의 피치 주기를 120%에서 180%까지 변경시키면서 원래음성 신호의 스펙트럼에 비해 나타나는 스펙트럼의 왜곡률을 측정하여 백분율로 환산하여 표 3에 제시하였고 그림 5와 그림 6에는 제안한 방법에 의해 기본 주파수를 130%와 120%로 높인 경우의 처리 결과를 나타내었다. 스펙트럼의 비교 기준은 피치가 변경되기 이전의 원래 음성의 스펙트럼을 사용하였다. 피치를 변경시키면 원래의 스펙트럼과 직접 비교할 수 없기 때문에 피치주기를 120%, 150%, 180%로 각각 신장시킨 다음에 83%, 66%, 55%로 각각 압축하여 원래의 음성 스펙트럼과 고조파를 일치시킨 다음에 에너지 왜곡률을 측정하였다. 표 3에 제시된 바와 같이 평균 왜곡률은 기존의 고조파 스케일링에 의한 피치변경법의 2.31%에서 제안한 방법이 2.12%로 개선되었음을 알 수 있다.

표 3. 피치 변경에 따른 스펙트럼 왜곡률 비교

변경률 \ 변경법	기존의 방법			제안한 방법		
	남성화자	여성화자	평균(%)	남성화자	여성화자	평균(%)
120%	1.67	2.03	1.85	1.51	1.83	1.67
150%	2.12	2.45	2.28	1.84	2.25	2.04
180%	2.68	2.95	2.81	2.52	2.79	2.65
Average	2.15	2.47	2.31	1.95	2.29	2.12

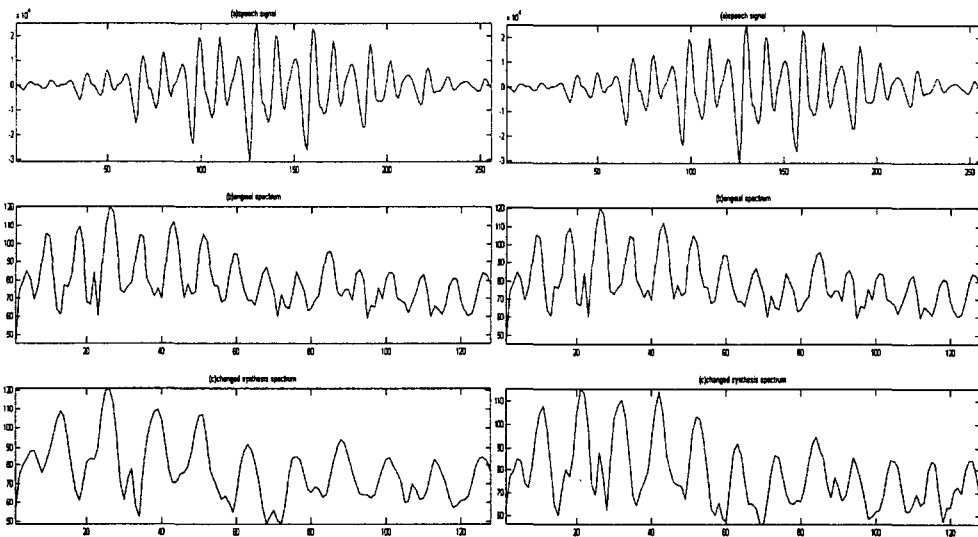


그림 5. 기본주파수를 130%로 높인 결과

그림 6. 기본주파수를 120%로 높인 결과

4.2 주관적인 평가

주관적인 음질 평가를 위해서 음성 시료로 사용된 4 가지 문장을 기존의 스펙트럼 스케일링법과 제안한 피치 변경법을 적용하여 50%, 70%, 90%, 120%, 140%로 각각 변경시켜 합성하고 무작위로 추출된 청취자 15 명에게 들려주고 그에 대한 MOS(mean opinion score)를 측정하였다. MOS의 등급은 Excellent(5), Fair(4), Good(3), Poor(2), Unsatisfactory(1)로 구분하였다. 표 4에 주관적인 평가 결과를 제시하였고, 주관적인 평가 결과는 기존의 스펙트럼 스케일링에 의한 피치변경법의 MOS 3.2에 비해 0.4이 개선된 3.6으로 향상된 것을 알 수 있다.

표 4. 피치 변경에 따른 MOS 비교

발 성	변경률	5 Level MOS	
		기존의 방법	제안한 방법
발성 1	50%	3.1	3.3
	70%	3.4	3.6
	90%	3.5	4.0
	120%	3.5	3.8
	140%	3.3	3.6
	평 균	3.3	3.6
발성 2	50%	3.0	3.4
	70%	3.0	3.5
	90%	3.2	3.6
	120%	3.4	3.7
	140%	3.2	3.6
	평 균	3.1	3.5
발성 3	50%	3.2	3.5
	70%	3.4	3.7
	90%	3.5	4.1
	120%	3.7	4.0
	140%	3.3	3.8
	평 균	3.4	3.8
발성 4	50%	2.8	3.4
	70%	3.0	3.5
	90%	3.5	3.8
	120%	3.2	3.5
	140%	3.0	3.2
	평 균	3.1	3.5
평 균		3.2	3.6

5. 결 론

멀티미디어가 급속히 보급되면서 인간과 기계 사이의 정보 전달도 인간과 인간사이의 정보 전달 만큼이나 매우 중요하게 취급되고 있다. 또한 음성합성기술의 개발에 힘입어 합성음의 음질이 향상됨에 따라 고음질의 합성음뿐만 아니라 다양한 음색을 갖는 합성음이 요구되고 있다. 합성을 위한 부호화법에는 파형부호화법, 신호원부호화법, 혼성부호화법이 있다. 고음질 합성을 위해서는 파형 부호화를 이용한 합성법이 적합하다. 하지만 파형 부호화를 이용한 합성법은 부호화시에 여기 성분과 여파기 성분을 분리하지 않고 처리하기 때문에 다양한 음색을 구현하기 위해 음원을 변경시키기가 어렵다. 따라서 고음질을 유지하면서도 다양한 음색을 갖는 합성음을 합성하기 위해서는 파형 부호화를 이용한 합성법에 적용할 수 있는 피치 변경법

이 필요하다.

본 논문에서는 합성음의 음질을 유지하면서도 다양한 음색을 갖는 합성음을 생성하기 위해 파형 부호화를 이용한 합성법에서 음성신호의 피치를 변경하는 방법에 대하여 제안하였다. 제안한 방법은 스펙트럼 왜곡을 최소화하기 위하여 대수 연산을 적용하여 로그 스펙트럼을 구성하고 근사적인 포먼트 스펙트럼을 구하기 위해 각 서브밴드의 대역을 최대값을 취해 선형보간하고 다음으로 원래의 로그 스펙트럼으로부터 근사적인 포먼트 스펙트럼을 빼어내어 평탄화된 여기 스펙트럼을 추출하였다. 이렇게 추출된 고조파 성분에 대해서만 스펙트럼 스케일링법을 이용하여 피치를 변경하였다. 그런 다음에 피치 변경된 고조파성분과 포먼트 정보를 결합하여 진폭스펙트럼을 재구성하였다. 또한, 위상왜곡을 최소화하기 위하여 시간영역 스케일링법을 이용하여 피치변경된 신호의 위상성분을 추출하였다. 최종적으로 이렇게 구하여진 진폭스펙트럼 성분과 위상성분을 이용하여 피치가 변경된 음성신호를 재구성하게 된다. 제안된 방법을 객관적인 척도와 주관적인 척도로 평가해 본 결과 스펙트럼 왜곡율은 2.12%로 기존의 고조파 스케일링에 의한 피치 변경법에 비해 0.19%가 개선되었고 주관적인 음질도 평균 3.2에서 3.6으로 개선되었다.

참 고 문 헌

- [1] Papamichalis, Panos E. *Practical Approaches to Speech Coding*. Prentice-Hall, 1987.
- [2] Rabiner, L.R. & Schafer, R.W. *Digital Processing of speech Signals*. Prentice-Hall, 1978.
- [3] Kondoz, A.M. *Digital Speech -Coding for Low Bit Rate Communications Systems*. John Wiley & Sons, 1994.
- [4] Bae, M. "On the Pitch Alteration Methods for a High Quality Speech Synthesis." J., Acoust., Soc., Korea, Vol.12, No.2, pp.66-77, April 1993.
- [5] Bae, M.J., Lee, W.C. and Im, S.B. "On a Pitch Alteration Method by Time-axis Scaling Compensated with the Spectrum for High Quality Speech Synthesis." J., Acoust., Society, Korea, Vol.14, No.4, pp.89-95, August 1995.
- [6] Jo, W.R., Bae, M.J. and Kim, D.S. "On a Pitch Alteration Technique in the V/UV Spectrum for High Quality Speech Synthesis Technique." J., Acoust., Society, Korea, Vol.15, No.6, pp.99-103, December 1996.
- [5] Seneff, S. "Real Time Harmonic Pitch Detection." IEEE Trans. Acoust. Speech, and Signal Processing, Vol. ASSP-26, pp. 358-365, Aug. 1978.
- [6] Stearns, S.D. & David, R.A. *Signal Processing Algorithms*. Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New-Jersey, 1988.

접수일자: 2003. 11. 15.

게재결정: 2003. 12. 20.

▲ 김영규

서울특별시 동작구 상도5동 1-1 (우: 156-743)

숭실대학교 정보통신공학과 음성통신연구실

Tel: +82-2-824-0906

E-mail: nadiasky@nate.com

▲ 배명진

서울특별시 동작구 상도5동 1-1 (우: 156-743)

숭실대학교 정보통신공학과 음성통신연구실

Tel: +82-2-820-0902

E-mail: mjbae@ssu.ac.kr