

# 8kbps에 있어서 PCFBD-MPC에 관한 연구<sup>☆</sup>

## A Study on PCFBD-MPC in 8kbps

이 시 우<sup>1\*</sup>

See-woo Lee

### 요 약

유성음원과 무성음원을 사용하는 멀티펄스 음성부호화 방식에 있어서, 대표구간의 멀티펄스 음원을 사용하는 경우에 유성음의 합성음성과형에서 일그러짐이 나타난다. 이러한 원인은 대표구간의 멀티펄스를 피치구간마다 복원하는 과정에서 재생 음성과형이 정규화 되는 것이 원인으로 작용한다. 본 논문에서는 합성 음성과형의 일그러짐을 제어하기 위하여 V/UV/S(Voiced / Unvoiced / Silence)의 스위칭을 사용하고, 피치구간 마다 멀티펄스의 위치를 보정하며, 무성자음(Unvoiced)의 근사합성에 특정주파수를 이용하는 PCFBD-MPC(Position Compensation Frequency Band Division-Multi Pulse Coding)를 제안하였다. 또한 8kbps의 부호화 조건에서 PCFBD-MPC 시스템을 구현하고, PCFBD-MPC의 SNRseg를 평가하였다. 그 결과 PCFBD-MPC의 남자음성에서 13.8dB, 여자음성에서 13.4dB 임을 확인할 수 있었다. 향후 멀티펄스 음원의 진폭과 위치를 동시에 보정하는 8kbps 음성부호화 방식의 음질을 평가하는 연구를 수행하고자 한다. 향후, 멀티펄스 음원의 진폭과 위치를 동시에 보정하는 8kbps 음성부호화 방식의 음질을 평가하는 연구를 하고자 한다. 이러한 방법들은 셀룰러폰이나 스마트폰과 같이 낮은 비트율의 음원을 사용하여 음성신호를 부호화하는 방식에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

☞ 주제어 : 셀룰러폰, 스마트폰, 인터넷폰

### ABSTRACT

In a MPC coding using excitation source of voiced and unvoiced, it would be a distortion of speech waveform. This is caused by normalization of synthesis speech waveform of voiced in the process of restoration the multi-pulses of representation section.

This paper present PCFBD-MPC( Position Compensation Frequency Band Division-Multi Pulse Coding ) used V/UV/S( Voiced / Unvoiced / Silence ) switching, position compensation in a multi-pulses each pitch interval and Unvoiced approximate-synthesis by using specific frequency in order to reduce distortion of synthesis waveform. Also, I was implemented that the PCFBD-MPC( Position Compensation Frequency Band Division-Multi Pulse Coding ) system and evaluate the SNRseg of PCFBD-MPC in coding condition of 8kbps. As a result, SNRseg of PCFBD-MPC was 13.4dB for female voice and 13.8dB for male voice respectively. In the future, I will study the evaluation of the sound quality of 8kbps speech coding method that simultaneously compensation the amplitude and position of multi-pulse source. These methods are expected to be applied to a method of speech coding using sound source in a low bit rate such as a cellular phone or a smart phone.

☞ keyword : Cellular Phone, Smart Phone, Internet Phone

## 1. 서 론

통신기술의 발달은 인간과 전자기기간의 통신뿐만 아니라 전자기기간의 통신으로 발전하고 있다. 통신의 주요목적은 의사전달이다. 상대방에게 전달하고 싶은 의사를 확실하게 나타낼 수 있어야 하며, 오류가 적어야 한다. 이리

한 의사표시 수단으로 음성만족이나 정확한 수단은 없을 것이다. 음성신호는 의사를 인간에게 전달하는 수단 외에 전자기기가 알아들을 수 있는 기술과 더불어 음성신호에 포함된 감성을 포착하는 기술로 발전하고 있다. 아울러, 스마트폰 보급 확산과 더불어 통신네트워크의 과부하 문제를 해결하기 위하여 멀티미디어 신호처리를 효율적으로 압축하여 통신네트워크에서의 신호전송 비트율을 낮출 필요가 있다. 특히 음성신호는 다양한 방법으로 신호를 압축하고 있으나 일반적으로 음성신호의 주기성과 비주기성의 특성을 이용하여 음성신호를 압축 한다 [1-3].

음성신호는 성대진동이 주기적으로 진동하여 발생하

<sup>1</sup> Smart Information and Telecommunication Engineering, SANGMYUNG UNIV, Cheonan, 330, Korea.

\* Corresponding author (swlee@smu.ac.kr)

[Received 18 April 2017, Reviewed 26 April 2017(R2 13 July 2017), Accepted 7 August 2017]

☆ 본 논문은 상명대학교 연구과제로 수행되었음.

는 유성음(Voiced: V)과 혀와 치아에 의한 비주기적인 공기흐름에 의하여 발생하는 무성음(Unvoiced: UV)으로 구분한다. 이러한 음성신호의 특성을 이용하여 주기적인 유성음을 재생하기 위해 펄스성 유성음원을, 비주기적인 무성음 재생에는 백색잡음의 무성음원을 사용한다[4, 5]. 특히 펄스성 음원과 피치정보를 이용하여 대표구간의 음원을 이용함으로써 음성신호의 비트율을 개선할 수 있다 [6]. 그러나 유성음원과 무성음원을 이용하여 음성신호를 재생하는 경우에 비트율을 낮추기 위하여 프레임마다 피치정보와 대표구간의 음원정보를 이용하여 유성음원을 재생하고 있으나, 이러한 경우에 대표구간의 유성음원에 의하여 음성신호가 정규화 되는 문제가 발생한다. 또한 무성음에서 유성음으로 천이되는 과정에서 발생하는 음성신호는 유성음과 무성음의 중간특성을 갖기 때문에 유성음원과 무성음원 어느 한쪽의 음원으로도 본래의 음성신호를 재생하기 어려운 문제가 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 정규화된 펄스성 음원의 위치를 보상하고 특정주파수 정보를 전송하여 무성음과 유성음의 중간특성을 갖는 프레임의 음성신호를 재생하는 방법으로 PCFBD-MPC(Position Compensation and Frequency Band Division-Multi Pulse Coding)을 제안하고, 개선된 신호대 잡음비(SNR)를 알아 보고자 한다.

## 2. 위치와 주파수 보정

PCFBD-MPC에 있어서, 유성음원은 원 음성신호  $x(n)$ 와 멀티펄스  $v(n)$ 에 의하여 재생된 음성신호  $\bar{x}(n)$ 로부터 식(1)이 최소가 되도록 펄스의 진폭( $g_i$ )과 위치( $m_i$ )를 결정한다. 여기에서 PCFBD-MPC는 음성신호  $\bar{x}(n)$ 가 최소가 되도록 위치( $m_i$ )를 결정함으로써 재생된 음성신호  $\bar{x}(n)$ 가 원 음성신호  $x(n)$ 에 보다 가까운 근사 값을 갖도록 함으로써 재생된 음성신호  $\bar{x}(n)$ 의 SNRseg을 개선하고자 하는 것이다.

$$E = \sum_{n=0}^{N-1} [x(n) - \bar{x}(n) * w(n)]^2 \quad (1)$$

$$\bar{x}(n) = \sum_{i=1}^K g_i \cdot h(n - m_i)$$

여기에서  $K, g_i, m_i, h(n)$ 는 멀티펄스의 수,  $i$ 번째의 펄스진폭과 위치, 음성재생 필터(STP)의 임펄스 응답을 나

타낸다. 식(1)의  $w(n)$ 은 Weighting 필터로서 다음 식과 같은 특성을 갖는다.

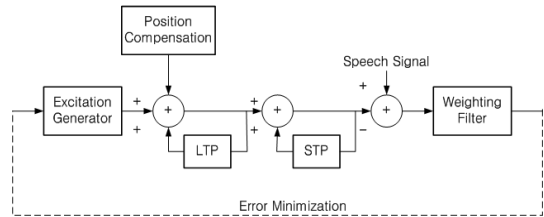
$$W(z) = (1 - \sum_{i=1}^p a_i z^{-i}) / (1 - \sum_{i=1}^p a_i r^i z^{-i}), (0 < r < 1) \quad (2)$$

아울러, 멀티펄스의 진폭과 위치는 다음 식을 만족한다.

$$\sum_{j=1}^K g_j \cdot R(m_i - m_j) = \Phi(m_i), (1 \leq i \leq K) \quad (3)$$

여기에서  $R, \Phi$ 는 자기상관함수와 상호상관함수를 나타낸다.

피치정보를 이용한 대표구간의 멀티펄스를 사용하면 정보 전송률을 낮출 수 있는 반면 멀티펄스 음원의 진폭과 위치가 정규화 되어 파형왜곡이 늘어난다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 멀티펄스 음원의 위치를 제어하는 방법을 그림 1에 나타내었다.



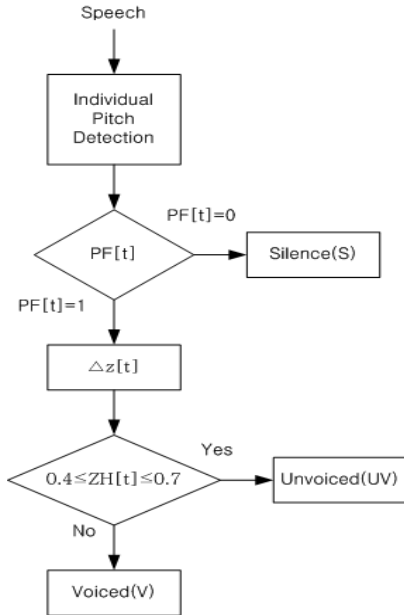
(그림 1) PCFBD-MPC  
(Figure 1) PCFBD-MPC

또한 유성음과 무성음의 중간특성을 갖는 음성신호를 유성음원과 무성음원 어느 한쪽의 음원으로 재생하기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 유성음(V)과 무성음(UV)의 중간특성을 갖는 구간을 추출하고 이를 재생하는데 유용한 주파수정보를 전송하여 재생하는 방법을 그림 2에 나타내었다.

유성음은 진폭과 위치의 변위를 갖는 연속성을 갖는  $n$ 개의 파형으로 나타낼 수 있으며, 근사적으로 다음식으로 표현할 수 있다.

$$s(t) = \sum_{k=1}^M (A_{V_r}(k) e^{(-\pi B_{V_r}(k)t}) \cdot \cos(2\pi F_{V_r}(k)t + \theta_{V_r}(k)) \quad (4)$$

여기에서  $F_{V_r}(k)$ 는 공진주파수,  $B_{V_r}(k)$ 는 대역폭,  $A_{V_r}(k)$



(그림 2) V/UV/S 추출  
(Figure 2) V/UV/S Extraction

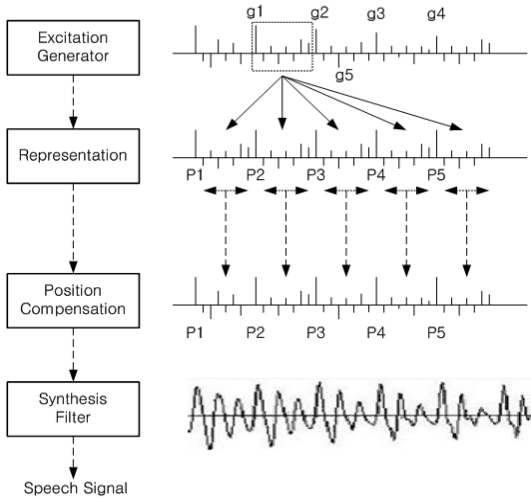
$$\theta_V(k) = \sum_{k=1}^M g_k \cdot \delta(n - m_k) \quad (5)$$

여기에서  $g_k, \delta(n)$ 는 각각 멀티펄스 음원위치에 있는 임펄스의 진폭과 위치를 나타낸다.

수신측에서는 그림 3과 같이 대표구간(점선부분)을 개별피치 구간마다 되풀이하여 음원을 구성하는 기존의 MPC 방식을 개선하기 위하여 PCFBD-MPC 방식에서는 재구성된 음원의 P1, P2,...P5에 있는 음원의 위치를 피치 정보와 ZCR(Zero Crossing Rate)을 이용하여 멀티펄스 위치를 보정한 음원을 피치간격마다 재구성하는 동시에 음성재생필터를 구동하여 음성신호를 재생하였다.

한편, 유성음과 무성음의 중간특성을 갖는 음성신호를 재생하는데 유용한 주파수정보를 알아내기 위하여, 원 음성파형을 FFT하여 얻은 주파수 영역으로 여러 영역으로 분할한 후 각각의 영역에 대하여  $SNR_{seg}$ 를 관찰하고자 하였다. 우선, 유성음과 무성음을 추출하는 하기 위하여 유성음과 무성음의 특징을 살펴볼 필요가 있다. 유성음은 피치정보를 갖고 있으며 낮은 ZCR를 나타낸다. 반면, 무성음은 피치정보가 없으며 높은 ZCR을 나타낸다[7]. 이와 같은 확실한 특징들을 근거로 유성음(V)과 무성음(UV), 무음(S)을 추출하는 그림 2를 구체적으로 살펴보면, 10kHz, 12bit로 표본화 및 양자화하고 3.4kHz LPF로 주파수 대역을 제한한 음성신호가 입력되면, 프레임임 25.6ms로하여 FFT를 실행한 후 피치를 추출한다. 만약, 탐색하는 프레임에 피치정보가 존재하지 않으면 (PF[t]=0) 무음(S)으로 판정하고, 프레임에 피치정보가 존재하면 프레임의 ZCR ( $Z[t]$ )과 프레임간의 ZCR ( $\Delta Z[t] = Z[t] - Z[t-1]$ )를 계산한 후,  $Z[t] < 0$ 이고  $Z[t-1] \geq 0.4$ 인 프레임의 ZCR( $ZH[t]$ )가  $0.4 \leq ZH[t] \leq 0.7$ 인 조건을 만족하는 경우에 무성음(UV)으로 판정하였다. 이 판정 알고리즘의 정확도는, 본래 무성음이 존재함에도 불구하고 추출되지 않았을 경우와 본래 무성음이 존재하지 않는데도 불구하고 추출된 경우를 추출오류로 규정하여 판정의 정확도를 가늠할 수 있다. 실제 남녀 9명의 연속음성(73문장, 모음수:609개, 무성자음수:195개)을 샘플로 판정의 정확도를 실험한 결과, 남자음성은 96.2%, 여자음성은 91%의 정확도를 얻을 수 있었다.

한편, 무성음 재생에 유용한 주파수 영역 정보를 취득하기 위하여 무성음 프레임에 FFT하여 얻은 주파수 대역을 여러 주파수 영역으로 분할하여  $SNR_{seg}$ 를 관찰하였다. 본 연구에서는 3.4kHz의 LPF를 사용하였기 때문에



(그림 3) 멀티펄스의 음원  
(Figure 3) Exciting Source of Multi-Pulse

와  $\theta_V(k)$ 는 파형의 진폭과 위상을 나타낸다.  $\theta_V(k)$ 는 멀티펄스 음원으로부터 대표구간의 멀티펄스 음원을 수신측에 전송하고 재구성할 때마다 다음 식을 이용하여 멀티펄스 위치를 보정한다.

10kHz로 표본화한 경우에 주파수 간격이  $f=39.0625\text{Hz}$  이 되고, 최소 3개의 주파수를 사용하면 총 3.4kHz 주파수 대역은 29개의 주파수 영역으로 분할 할 수 있다. 이렇게 분할된 각 주파수 영역의 신호를 IFFT하여 얻은 신호와의 SNRseg를 측정하였다. 실험결과 0.547kHz 이하의 낮은 주파수 영역(LF: Low Frequency)과 2.813kHz 이상의 높은 주파수 영역(HF: High Frequency)의 주파수 정보를 사용한 경우에 상대적으로 높은 SNRseg를 얻을 수 있었는데, LF를 사용한 경우에 1.24~1.82dB, HF를 사용한 경우에 0.65~0.9dB를 얻을 수 있었다. 이것은 무성음의 주요 주파수 정보가 높은 주파수와 낮은 주파수 영역으로 양분되어 있는 것을 나타내는 것이며, 무성음의 주파수 특성과도 부합하는 결과이다.

### 3. 부호화 조건

PCFBD-MPC를 이동통신 음성부호화 방식에 적용하기 위하여 전송률은 약 8kbps로 부호화 하였다. 알고리즘 및 신호처리 코딩에는 C/C++ 언어를 사용하였으며, 음성신호의 녹음에는 고성능 지향성 마이크를 사용하였다. 음성신호는 10kHz, 12bit로 표본화 및 양자화하고 3.4kHz LPF를 사용하였으며 프레임 길이는 FFT를 고려하여 25.6ms로 하였다. PCFBD-MPC와 기존의 MPC의 전송률이 8kbps가 되도록 부호화 조건을 설정하여 표 1에 나타내었다.

PCFBD-MPC와 MPC의 부호화 조건을 살펴보면, 유성음/무성자음/무음(V/UV/S)의 선택정보에 2bit를 할당하였고, V/UV/S의 선택정보에 의하여 음성재생 방법을 달리 하게 되는데 유성음(V)은 피치정보와 멀티펄스 음원을 사용하고, 무성자음(UV)의 재생에는 유용한 주파수 정보를 전송한다. 그리고 무음(S)은 음성신호가 없는 구간이므로 시간지연으로 처리한다. 멀티펄스음원을 사용하여 음성을 재생하는 필터의 차수는 10차를 사용하였으며, 음성재생필터 계수의 변화가 스펙트럼의 변화에 미치는 영향은 낮은 차수의 계수일수록 영향이 크기 때문에 낮은 차수일수록 많은 bit를 할당하였다.

MPC 경우에 음원에 사용한 멀티펄스 수는 10개이며, 멀티펄스의 최대진폭에 10bit, 멀티펄스의 진폭과 위치에 각각 8bit를 할당하였다.

한편 PCFBD-MPC 경우에 음원에 사용한 멀티펄스 수는 10개이며, 멀티펄스의 최대진폭에 10bit, 멀티펄스의 진폭과 위치에 각각 6bit, 진폭보정 계수에 3bit, 진폭레벨 패턴에 2bit를 할당하였다. PCFBD-MPC와 MPC에 사용

(표 1) 부호화 조건

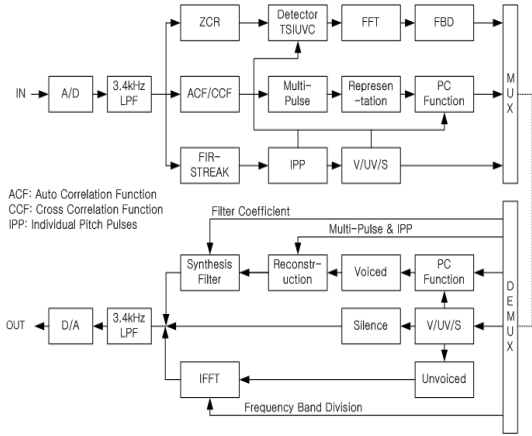
(Table 1) Coding Condition

Parameter[bit]	MPC	PCFBD-MPC
V/UV/S	2	2
[ Voiced ]		
Coefficient of Synthesis	7,6,5,5,4	7,6,5,5,4
Filter	3,3,3,3,3	3,3,3,3,3(42)
$g_{max}$	10	10
$g_k$	8	6
$m_k$	8	6
$\beta_k$		3
$\gamma$		2
Number of Multi-Pulse	10	10
Pitch	8	8
[ Unvoiced ]		
Max Amplitude		7
Frequency Signal of Low Frequency Band		3
Frequency Signal of High Frequency Band		3
	222	214
kbps	8	8

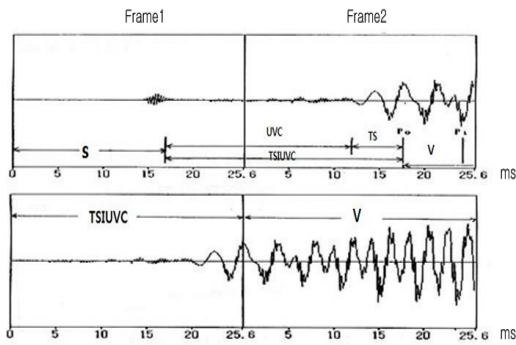
한 피치정보에는 8bit를 할당하였다. 아울러 UV로 추출된 프레임의 경우, FFT하여 얻은 주파수대역에서 최대진폭의 주파수 정보에 7bit, 0.547kHz 이하의 주파수와 2.813kHz 이상의 주파수에 3bit를 할당하였다.

### 4. 실험결과

10kHz 12bit A/D, D/A변환기와 3.4kHz LPF를 입출력단에 구비한 PCFBD-MPC 시스템을 그림 4에 나타내었다. 입력된 음성신호는 FIR-STREAK필터로부터 잔차신호를 얻은 후 이 잔차신호의 피크값에서 피치정보를 얻어 수신측에 전송한다. 음원으로 사용하는 멀티펄스는 자기상관함수(ACF)와 상호상관함수(CCF)로부터 멀티펄스 음원을 추출한다. 다음으로 피치구간내 멀티펄스 음원을 대표구간의 멀티펄스로 정한 후 수신측에 전송하고, 수신측에서는 피치구간마다 대표구간의 멀티펄스를 복사하여 멀티펄스 음원을 생성한다. 또한 UV 음성신호의 재생에 유효한 주파수정보를 수신측에 전송하고 수신측에서는 IFFT하여 UV 음성신호를 재생한다. 본 PCFBD-MPC는 V/UV/S의 선택정보에 의하여 각기 다른 처리방법으로 음성신호를 재생하고 합성하는데, V인 경우에 멀티펄스 음원을 사용하여 음성신호를 재생하고,



(그림 4) PCFBD-MPC 시스템  
(Figure. 4) System of PCFBD-MPC



(그림 5) 프레임 재구성  
(Figure. 5) Frame Reconstruction

UV인 경우에는 선택된 주파수 정보만을 이용하여 음성 신호를 재생한다. 그리고 S인 경우에는 음성신호가 없는 프레임이므로 특별한 신호처리를 하지 않고 25.6ms의 시간지연 처리를 한다.

V/UV/S 선택정보가 UV인 경우에 실제 처리되는 과정을 살펴보면 그림 5와 같이 실제 음성신호는 Frame1과 Frame2로 구성되고, Frame1에는 무음(S: Silence)구간이 15ms 진행되다가 무성자음(UVC: Unvoiced Consonant)이 10.6ms 정도 존재한다.

Frame2에는 무성자음(UVC) 구간이 10ms, 무성음과 유성음의 중간특성을 갖는 TS(Transition Segment)구간이 5ms 정도, 유성음(V: Voiced)구간이 10.6ms 정도 존재한다.

(표 2) 음성샘플  
(Table 2) Speech Sample

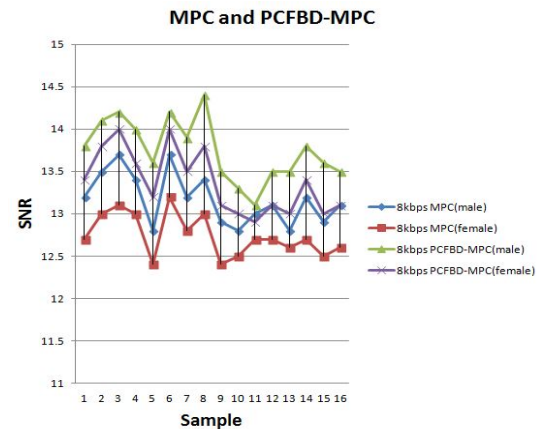
	male	female
participants	4	4
Time	54.4 sec	54.4 sec
sentences	16	16
Vowel	145	145
Unvoiced Consonant	34	34

(표 3) MPC와 PCFBD-MPC의  $SNR_{seg}$   
(Table 3)  $SNR_{seg}$  of MPC and PCFBD-MPC

Method [dB]	kbps	male	female
MPC	8	13.2	12.7
PCFBD-MPC	8	13.8	13.4

음성부호화 방식을 상호 비교하기 위하여 주로 사용되는  $SNR$ 과 남녀 4명이 발성한 표 2의 음성샘플을 사용하여 PCFBD-MPC와 기존 MPC를 비교하고자 하였다. 실험결과, 표 3에 나타낸바와 같이 약 8kbps에 있어서 PCFBD-MPC는 남자음성에서 13.8dB, 여자음성에서 13.4dB를 얻었으며, 그림 6에 나타낸바와 같이 PCFBD-MPC가 MPC에 비하여 남자음성에서 0.6dB, 여자음성에서 0.7dB 정도 개선된 것을 알 수 있었다.

이러한 개선효과와 정도는 원래의 음성신호에 얼마만큼 가깝게 재생신호를 만드는가에 따라 달라진다. 이것은 음성신호가 심리적 속성인 음량과 음색에 대응하는



(그림 6) MPC와 PCFBD-MPC의 SNR  
(Figure 6) SNR of MPC and PCFBD-MPC

물리적 속성인 음성파형의 진폭과 위상을 보상함으로써 실현 가능하다. 즉, 음원의 진폭과 위치를 보상함으로써 SNRseg를 개선할 수 있다는 것이고, 음원의 진폭을 보상하는 ACFBD-MPC방식에서 SNRseg를 개선정도를 확인할 수 있다[8]. 이번 실험에서는 음원의 위치를 보상함으로써 SNRseg의 개선정도를 확인할 수 있었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 이동통신에서 사용할 수 있는 8kbps에서 정규화된 펄스성 음원의 위치를 보상하고 특정주파수 정보를 전송하여 무성음과 유성음의 중간특성을 갖는 프레임의 음성신호를 재생하는 방법으로 PCFBD-MPC를 제안하였으며, 기존의 MPC에 비하여 남자음성에서 0.6dB, 여자음성에서 0.7dB 정도 개선된 것을 알 수 있었다.

향후에는 보다 다양한 음성부호화 파라미터를 이용하여 양호한 재생음신호를 얻을 수 있는 방법을 연구하고, 8kbps 보다 낮은 전송률에서도 음질을 유지할 수 있는 부호화 시스템에 대하여 연구하고자 한다.

## 참 고 문 헌(Reference)

- [1] Selma Ozaydm, Buyurman Baykal, "Matrix quantization and mixed excitation based linear predictive speech coding at very low bit rates", *Speech Communication*, 41, pp. 381-392, 2003.  
[https://doi.org/10.1016/S0167-6393\(03\)00009-8](https://doi.org/10.1016/S0167-6393(03)00009-8)
- [2] K.Krishna, V.L.N.Murty, K.R.Ramakrishnan, "Vector quantization of excitation gains in speech coding", *Signal Processing*, 81, p203-209, 2001.  
[https://doi.org/10.1016/S0165-1684\(00\)00200-0](https://doi.org/10.1016/S0165-1684(00)00200-0)
- [3] Ghaemmaghami,S., Sridharan,S., "Very low rate speech coding using temporal decomposition", *IEE Electronics Letters*, 35(6), pp. 456-457. 1999.  
<http://dx.doi.org/10.1049/el:19990316>
- [4] LeBlanc, W.P., Bhattacharya, B.,Mahmoud, S.A., "Efficient search and design procedures for robust multi stage vector quantization of LPC parameters for 4kbps speech coding", *IEEE Trans. Speech Audio Process.* pp. 373-385. 1993.  
<https://doi.org/10.1109/89.242483>
- [5] McCree, A.V., Barnwell, T.P., "A mixed excitation LPC vocoder model for low bit rate speech coding", *IEEE Trans. Speech Audio Process*, p242-250, 1995.<https://doi.org/10.1109/89.397089>
- [6] Feng Huang, Tan Lee, W.Bastiaan Kleijn, Ying-Yee Kong, "A method of speech periodicity enhancement using transform-domain signal decomposition", *Speech Communication*, pp. 102-112, 2015.  
<https://doi.org/10.1016/j.specom.2014.12.001>
- [7] R.C. de Lamare and A. Alcaim, "Strategies to improve the performance of very low bit rate speech coders and application to a variable rate 1.2 kbps codec", *IEE Proc.-Vis. Image Signal Process.*, Vol. 152, No. 1, February p74-86, 2005.  
<http://dx.doi.org/10.1049/ip-vis:20051189>
- [8] See-Woo Lee, "A Study on ACFBD-MPC in 8kbps," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 17, No. 7, pp. 49~53, Jul, 2016.

## ○ 저 자 소 개 ○

### 이 시 우(See-woo Lee)

1990년 日本大學(Nihon Univ) 전자공학과 (공학석사)  
 1994년 日本大學(Nihon Univ) 전자공학과 (공학박사)  
 1994년 3월~1998년 2월: (주)삼성전자 통신연구소/멀티미디어 연구소  
 1998년 3월~현재: 상명대학교 스마트정보통신공학과 교수  
 관심분야 : 통신시스템, 전기 및 전자회로, 신호처리, 빅데이터 etc.  
 E-mail : swlee@smu.ac.kr

