

CS-ACELP와 호환성을 갖는 광대역 음성 부호화기 설계

Design of Wideband Speech Coder Compatible with CS-ACELP

김 동 주*, 이 인 성*
(Dongju Kim*, Insung Lee*)

요 약

본 논문에서는 CS-ACELP와 호환성을 갖는 광대역 음성 부호화기를 설계하였다. 16 kHz로 샘플링된 광대역 음성신호는 QMF 필터와 Decimation에 의하여 두 개의 협대역 음성신호로 나누어진다. 나누어진 두 개의 협대역 음성신호는 CS-ACELP와 ATC (Adaptive Transform Coding) 방법으로 각각 부호화되어 전송된다. 두 대역으로부터 부호화된 정보는 16 Kbps의 전송률을 갖고, 수신단에서는 각 대역을 CS-ACELP와 ATC 방법으로 역 부호화하여 음성신호를 합성한다. 설계된 광대역 음성부호화기의 성능을 평가하기 위하여 ITU-T의 표준안인 G.722를 포함하여 MOS 시험을 하였다.

핵심용어: 광대역, 음성, 부호화기

투고분야: 음성처리 분야(2.2, 2.4)

ABSTRACT

In this paper, we designed the 16 Kbps speech coder that has compatibility with CS-ACELP algorithm(G.729). The speech signal is sampled at rate of 16 KHz, divided into two narrowband signal by QMF filterbank, and decimated to rate of 8 KHz. The lower-band signal is encoded by CS-ACELP and the upper-band signal is encoded by Adaptive Transform Coding(ATC) algorithm. At the receiver, two band signals are synthesized by decoder of CS-ACELP and ATC, respectively. The reconstructed output is obtained by passing the QMF synthesis bank. The proposed wideband coder is evaluated with ITU-T G.722 coder through the Mean Opinion Score(MOS) test.

Key words: CS-ACELP, Wideband, Speech, coding, ATC.

1. 서 론

IMT-2000 시스템에서는 기존의 음성 위주의 이동 통신 서비스에서 데이터, 영상 서비스 등을 포함한 멀티 미디어 통신이 가능하게 된다. 또한 기본적인 음성 통신 서비스를 바탕으로 하는 무선 화상회의 서비스나 오디오 전송 서비스도 가능하게 된다. 일반적으로 화상회의에서 사용되는 음성 대역폭은 공중전화망(PSTN)에서의 200Hz~3400Hz 대역폭보다 넓은 50Hz~7000Hz의 대역폭을 갖고, 샘플링 주파수로 16 kHz를 사용한다. 위와 같은 시스템에 사용되는 광대역 음성 부호화기로는 ITU-T 권고안으로 결정된 64Kbps 음성부호화 방식인 G.722가 있다. 그러나 무선 통신에서 이러한 전송률을 사용하기에는 전송률이 크게 증가되어 매우 비효율적이며 가입자 수의 제한을 받는다. 또한 화상 데이터에 많은 전송률 할당을 고려한다면 전체적인 전송률의 증가는 이동 통신 시스템의 용량의 제한성을 가져오며 이에 따른 통신 요금의 증가는 무선 통신 서비스의 활성화를 제한하는 요소가 된다. 따라서

광대역 음성을 전송하기 위해서 음질의 저하가 없는 저 전송률의 부호화기가 요구된다.

본 논문에서는 이동 통신 시스템에서 광대역 음성신호를 16 Kbps의 전송률로 명료한 음질을 내는 음성 부호화 방법을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 광대역 음성 부호화기는 저주파 대역폭에서 ITU-T의 음성부호화 표준으로 결정된 CS-ACELP를 포함하여 구성되므로 일반적인 휴대전화와도 쉽게 통신이 가능하게 된다. 16 kHz로 샘플링된 입력 신호는 두 밴드의 대역통과 필터와 decimation에 의해 8000 samples/sec의 샘플링을 갖는 두 개의 협대역 음성신호로 변환된다. 두 대역의 음성 신호는 각각 다른 방식으로 10 ms의 프레임 단위로 부호화된다. 저대역 신호(0Hz~3400Hz)는 협대역 음성 부호화 방식인 CS-ACELP(G.729)를 이용하여 8 Kbps 전송률로 인코딩된다. 그리고 고대역 신호(3400 Hz~7000 Hz)는 80 샘플의 신호마다 DCT(Discrete Cosine Transform) 변환된 후, 벡터양자화 된다. 송신단의 인코더에서는 최종 16 Kbps의 전송률로 정보 신호를 전송한다. 수신단에서는 각각 CS-ACELP와 ATC 방법으로 역 부호화하여 최종 출력신호를 만들어낸다. 제안된 광대역 음성부호화기의 성능은 ITU-T G.722를 포함하여 MOS 시험을 수행한다.

* 충북대학교 전자공학과

접수일자: 1999년 2월 12일

II. 광대역 음성 부호화기의 인코더 알고리즘

본 연구에서 설계된 광대역 음성 부호화기의 인코딩 과정이 그림 1에 나타나 있다. 16kHz로 샘플링 된 입력 신호는 QMF Analysis Bank에 의해 두 개의 대역으로 나누어지고, 각각 decimation 되어 두 개의 8kHz 샘플링 신호로 변환된다.[2] [3] [4] 변환된 8kHz 샘플링 신호는 저대역(0Hz~3400Hz)의 신호와 고대역(3400Hz~7000)의 신호로 나누어지고, 각각 부호화되어 전송된다. 저대역의 신호는 ITU-T의 표준안으로 결정된 CS-ACELP 알고리즘을 이용하여 8Kbps의 전송률로 부호화된다. 고대역의 신호는 ATC (Adaptive Transform Coding) 방법으로 8Kbps의 전송률로 부호화 되고, 변환은 DCT(Discrete Cosine Transform) 알고리즘을 이용한다.[5] 저대역과 고대역의 부호화된 정보는 전체적으로 16 Kbps의 전송률을 갖는다.

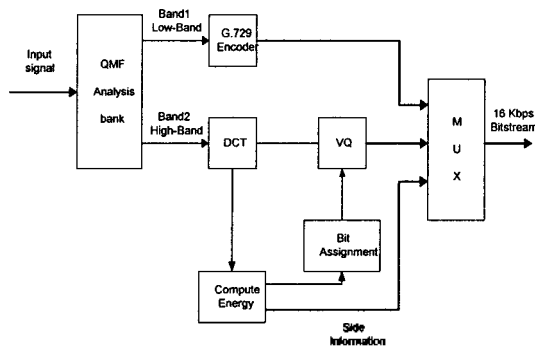


그림 1. 광대역 음성부호화기의 인코더
Fig. 1. Wideband speech encoder.

2.1. 저대역 인코더 알고리즘

QMF 필터에 의해 분리된 0Hz~3400Hz 대역의 음성 신호는 CS-ACELP의 인코더로 부호화된다. CS-ACELP 알고리즘의 인코더는 10 ms 음성 프레임마다 음성신호를 분석하여 CELP 모델 파라미터를 추출한다. 추출된 음성 파라미터들은 프레임당 80 비트가 할당되어 부호화된다. 인코딩 과정에서 사용되는 모델 파라미터들과 비트 할당이 표 1에 나타나 있다.

표 1. 8 Kbps CS-ACELP 알고리즘의 비트할당
Table 1. Bit assignment of 8 Kbps CS-ACELP

파라미터	코드워드	부프레임 1	부프레임 2	비트 수
LSP	L0,L1,L2,L3			18
적용코드북지연	P1,P2	8	5	13
피치 지연 parity	P0	1		1
고정코드북인덱스	C1,C2	13	13	26
고정코드북부호	S1,S2	4	4	8
코드북이득 1	GA1,GA2	3	3	6
코드북이득 2	GB1,GB2	4	4	8
Totas				80

그림 2는 전체적인 CS-ACELP 알고리즘의 인코딩 과정을 보여준다. 입력되는 음성신호는 고역필터를 통과한 후, 자기상관법에 의해 선형예측계수(LPC)가 추출된다. LPC 계수의 계산 및 전송은 10 ms 프레임마다 한번 수행된다. 음성 신호의 스펙트럴 포폭선 정보를 나타내는 LPC 계수는 전송을 위하여, LSP(Line Spectrum Pairs) 파라미터 값으로 변환된다. LSP 파라미터의 전송에는 18비트가 할당되며, 파라미터 값들은 2단 예측 벡터 양자화된다.

적용 코드북과 고정 코드북 파라미터 값들은 5 ms 부프레임 마다 검색되어 전송된다. 피치 지연의 검색시 계산량을 줄이기 위하여 모든 피치지연에 대하여 폐구간 검색을 하지 않고, 개구간 피치 검색 방법을 통해 대략의 피치 지연을 예측한 후, 폐구간 검색을 수행한다. 폐구간 검색에서는 개구간 방법에 의하여 예측된 피치 지연의 주변 값들만을 검색하여 정확한 피치 지연값을 찾아낸다. 검색되어지는 피치지연은 최대 1/3 샘플 피치 지연 분해도를 갖는다. 피치지연 값은 첫번째 부프레임에서는 8비트로 부호화되고, 두번째 부프레임에서는 앞 부프레임 지연값의 차이를 5비트를 사용하여 부호화한다.

최적의 피치지연 값을 찾아낸 후, 음성의 여기신호 추출을 위한 고정코드북 검색이 수행된다. 고정코드북 파라미터는 5 ms 부프레임 마다 분석/합성의 방법으로 검색된다. 고정 코드북 검색을 위한 목적신호는 선형예측 잔여신호에서 적용 코드북(adaptive codebook)의 기여분을 제거함으로써 얻어진다. 고정 코드북 여기신호를 발생은 대수적(algebraic) 코드북을 사용한다. 고정 코드북의 비트 할당은 펄스 위치에 13 비트, 펄스 부호에 4비트를 할당하며, 전체적으로 17비트를 할당한다. CS-ACELP에서 사용하는 코드북의 구조는 각 부프레임마다 4개의 펄스만이 지정된 위치에 +1, -1의 값을 갖게 되므로 고정코드북 검색시 계산량을 줄일 수 있다.

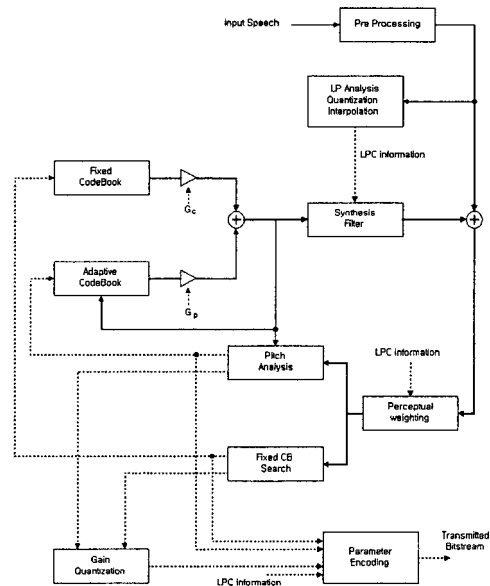


그림 2. 저대역 음성부호화기의 인코더(CS-ACELP)
Fig. 2. Lowband speech encoder(CS-ACELP).

적용코드북과 고정코드북의 이득 양자화에는 Conjugate 구조를 갖는 2개의 코드북을 사용한다. 각각의 코드북은 8개와 16개의 요소 값을 가지며 구해진 이득값과 미리 선택된 4개와 8개의 요소값들에 대해서만 검색이 이루어지므로 계산량을 줄일 수 있다. 또한 프레임간의 상관성을 이용한 4차 MA(Moving Average) 예측기를 사용한다. 인코딩의 최종적 단계에서는 다음 프레임의 목적신호를 구하기 위해 합성 및 가중필터의 메모리 갱신을 수행한다.¹¹⁾ 이와 같은 구조로 저대역 신호는 인코딩 되어 8Kbps의 전송률을 갖는다.

2.2. 고대역 인코더 알고리즘

QMF 필터에 의해 분리된 3400Hz~7000Hz 대역의 음성 신호는 DCT (Discrete Cosine Transform) 변환되어 벡터 양자화된다. 고대역 인코더에서 사용한 DCT 변환은 다음과 같다.¹⁶⁾¹⁷⁾

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \lambda(k) \cos[(2n+1)\pi k/2N]$$

단, $s(n)$: 입력신호

$S(k)$: DCT 계수

$$\lambda(k) = \begin{cases} 1/\sqrt{2} & k=0 \\ otherwise & \end{cases}$$

그림 3은 고대역 신호의 인코딩 과정을 보여준다. 고대역의 입력신호는 한 프레임 단위로 DCT 변환되어 주파수 영역의 값으로 변환된다. 한 프레임 내에서 음성의 스펙트럼은 모든 대역에 걸쳐 균등하게 분포되어 있지 않으므로, 모든 DCT 계수에 같은 크기의 비트를 할당하여 양자화하는 것은 비효율적이다. 즉, 한 부분의 스펙트럼이 다른 부분의 스펙트럼보다 크게 나타난다면, 스펙트럼이 더 큰 영역에 더 많은 비트를 할당하는 것이 효율적이다. DCT 계수는 주파수 영역의 값이므로 스펙트럼의 크기는 DCT 계수와 연관하여 표현된다. 한 주파수 영역의 스펙트럼이 다른 영역보다 크게 나타난다면, 그 주파수 영역에 해당하는 DCT 계수의 에너지는 다른 영역의 에너지보다 큰 값을 갖는다.

본 연구에서는 이러한 음성의 특성과 DCT 계수의 관계를 이용하여 고대역 신호를 부호화한다. 매 프레임마다 입력되는 10ms의 음성 신호는 DCT 계수로 변환된다. 변환된 DCT 계수는 몇 개의 블록으로 나뉘어지고, 각 블록마다 DCT 계수의 에너지가 계산된다. 한 프레임내에서 블록마다 계산된 에너지 값들은 에너지에 대한 벡터 코드북(에너지 벡터 코드북)을 이용하여 양자화되고, 얻어진 인덱스는 부가정보로 전송된다. DCT 계수의 벡터 양자화에 필요한 비트할당 정보를 얻기 위하여, 비트 정보를 포함하는 벡터 코드북(비트 벡터 코드북)은 에너지 벡터 코드북과 연관하여 설계된다. 그러므로 에너지 벡터 코드북의 인덱스는 DCT 계수의 각 블록에 대한 비트 할당 정보를 제공한다. 다음은 블록 에너지와 블록마다 할당되는 비트의 관계이다.¹⁸⁾¹⁹⁾

$$R_i = R_{avg} + \frac{1}{2} \log_2 \frac{\sigma_i^2}{[\sum_{k=1}^N \sigma_k^2]^{1/N}} \quad i = 1, 2, \dots, N$$

여기서 R_{avg} 는 평균 비트율, N 은 서브블록의 수이다. 수식으로부터 i 번째 서브 블록에 할당되는 비트는 평균 비트율 R_{avg} 와 에너지 σ_i^2 에 관계됨을 알 수 있다. 위의 관계와 에너지 벡터 코드북을 이용하여 비트 벡터 코드북은 설계된다.

각 서브 블록의 DCT 계수들은 에너지 벡터 코드북의 인덱스에 해당하는 에너지 값에 의해 정규화가 되고, 비트 할당 정보를 이용하여 벡터 양자화된다. 에너지 벡터 코드북의 인덱스는 DCT 계수의 벡터 양자화에 할당된 비트 정보와 이득을 제공한다. 그림 4는 에너지 벡터 코드북과 비트 벡터 코드북 그리고 벡터 코드북의 관계와 벡터 양자화 구조를 나타낸다. 이와 같은 구조로 고대역의 신호는 부호화되어 8Kbps의 전송률을 갖는다.

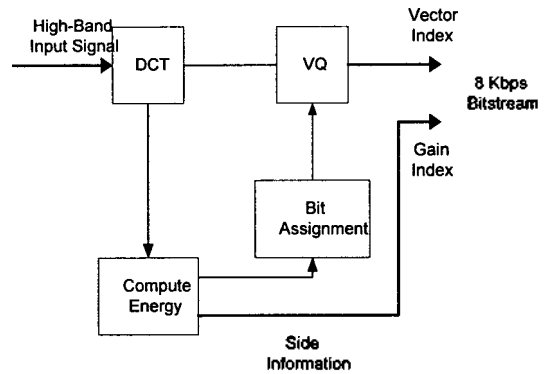


그림 3. 고대역 음성 부호화기의 인코더
Fig. 3. Highband speech encoder.

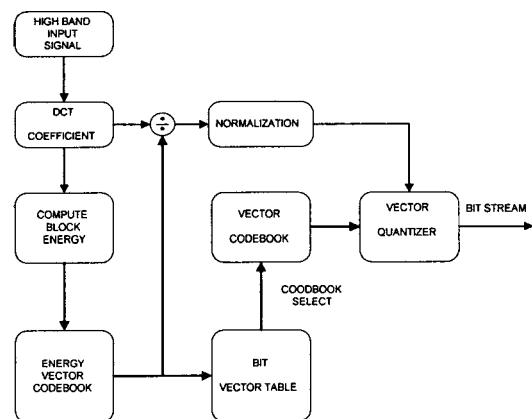


그림 4. 벡터 양자화기의 구조
Fig. 4. Structure of vector quantiser.

고대역 신호의 인코딩 과정을 요약하면 다음과 같다.

- ① 10ms의 음성신호를 매 프레임마다 DCT 변환한다.

- ② 변환된 DCT 계수는 몇 개의 서브 블록으로 나누어지고, 각 서브 블록마다 에너지가 계산된다.
- ③ 계산된 각 서브 블록의 에너지 값들은 에너지 벡터 코드북을 이용하여 양자화되고, 코드북의 인덱스 값을 얻는다. 에너지 벡터 코드북의 인덱스 값은 부가정보로 전송된다. 에너지 벡터 코드북은 각 서브 블록에 할당되는 비트 정보를 포함하는 비트 벡터 코드북과 연결되어 설계된다. 그러므로 에너지 벡터 코드북의 인덱스는 DCT 계수를 벡터 양자화할 때, 각 서브 블록에 대하여 할당되는 비트 정보를 제공한다.
- ④ 각 서브 블록 내의 DCT 계수들은 에너지 벡터 코드북의 에너지값으로 나누어짐으로써 정규화된다.
- ⑤ 비트 벡터 코드북의 비트 할당 정보를 이용하여, 각 서브 블록의 정규화된 DCT 계수는 벡터 양자화된다.

III. 광대역 음성 부호화기의 디코더 알고리즘

광대역 음성 부호화기의 전체적인 디코딩 과정이 그림 5에 나타나 있다. 수신되는 비트스트림은 Demultiplexer에 의해 두 개의 정보로 분리된다. 저대역의 정보는 CS-ACELP로 역 부호화되며, 고대역의 정보는 인덱스 값을 이용하여 신호를 구성하고 IDCT(Inverse Discrete Cosine Transform) 과정을 통해 출력 신호를 만들어낸다. 역 부호화된 두 신호는 QMF Synthesis Bank에 의하여 합성되어 최종 출력 신호를 만들어낸다.^{[2] [3] [4]}

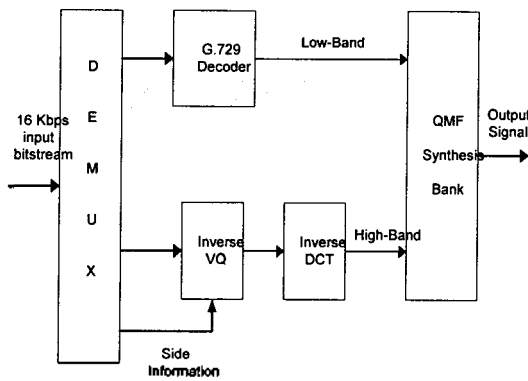


그림 5. 광대역 음성 부호화기의 디코더
Fig. 5. Wideband speech decoder.

Demultiplexer에 의해 분리된 저대역의 정보는 CS-ACELP 디코더 알고리즘에 의하여 역 부호화된다. 그림 6은 CS-ACELP의 역 부호화 과정을 보여준다. LSP계수들은 보간된 후 각각의 부프레임에 대한 선형 합성 필터 계수로 변환된다. 적응코드북과 고정코드북의 여기신호에 이득이 곱해진 후, 단구간 합성필터 및 후단여과기를 통과하여 음성신호는 합성된다.^[1]

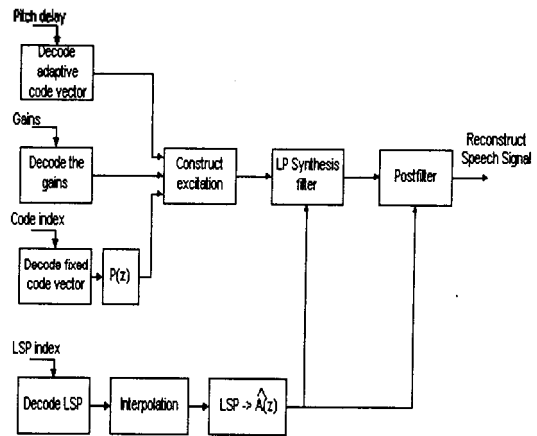


그림 6. 저대역 음성부호화기의 디코더(CS-ACELP)
Fig. 6. Lowband speech decoder(CS-ACELP).

고대역의 정보는 Inverse VQ와 IDCT 과정에 의해 역 부호화된다. 고대역 역부호화기에서 사용한 IDCT의 식은 다음과 같다.^[6]

$$s(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S(k) \lambda(k) \cos[(2n+1) \pi k/2N]$$

- 단, $s(n)$: 입력신호
- $S(k)$: DCT 계수
- $\lambda(k) = \begin{cases} 1/\sqrt{2} & k=0 \\ \text{otherwise} \end{cases}$

그림 7은 고대역 신호의 역 부호화 과정을 보여준다. 한 블록에 해당하는 이득과 비트할당 정보는 부가 정보로부터 얻어진다. 얻어진 이득 그리고 비트 할당 정보는 DCT 계수의 벡터양자화 인덱스와 결합하여 DCT 계수를 복원한다. 복원된 DCT 계수는 IDCT의 과정을 통하여 원래의 고대역 신호를 구성한다.

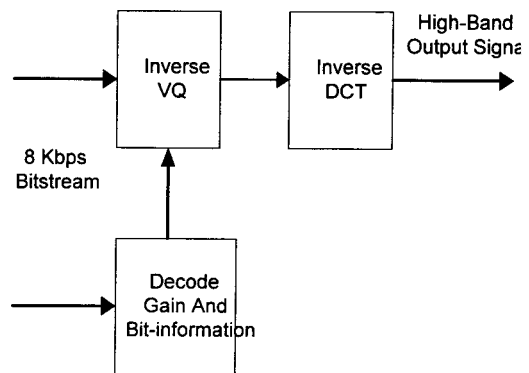


그림 7. 고대역 음성부호화기의 디코더
Fig. 7. Highband speech decoder.

IV. 실험 및 결과

설계된 고대역 부호화기의 성능평가는 G.722 56Kbps의 저대역 신호를 동일하게 하고 고대역 신호로 G.722의 56Kbps 신호와 설계된 부호화기의 신호를 각각 사용하여, 합성된 두 광대역 신호를 A-B 비교 시험함으로써 수행되었다. 시험에 사용된 문장은 24개이고, 8명의 사람이 참가하였다. A-B 비교 시험의 결과는 표 2에 나타나 있다. A-B 비교 시험의 결과로부터 설계된 고대역 음성 부호화기의 성능이 G.722의 56Kbps와 비슷함을 알 수 있었다.

또한, 본 논문에서 제안한 16 Kbps 광대역 음성 부호화기의 성능 평가는 ITU-T의 표준안인 G.722를 포함한 MOS (Mean Opinion Score) 시험을 통하여 수행되었다. MOS 시험에는 ITU-T의 표준안인 G.722의 48 Kbps, 56 Kbps, 64 Kbps 전송률을 가지는 음성이 포함되었으며, 음질 시험의 객관적인 지표를 위하여 MNRU(Modulated Noise Reference Unit)의 잡음 크기가 28dB, 33dB, 36dB인 음성도 포함되었다. 음질 시험에는 남자음성 16개와 여자음성 16개의 문장이 사용되었고, 8명의 사람이 음질 시험에 참가하였다.

표 2. A-B 비교 시험 결과
Table 2. Result of A-B test.

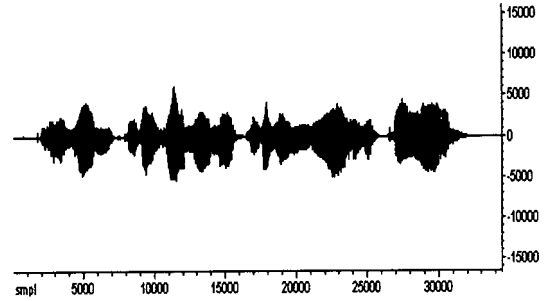
	G.722의 56Kbps 음성	설계된 음성부호화기의 음성
선호도	51%	49%

표 3. MOS 시험 결과
Table 3. Result of MOS test.

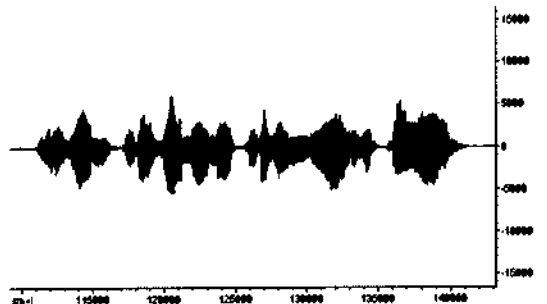
	MNRU			G.722			설계된 코더	
	원음	28dB	33dB	36dB	48Kbps	56Kbps		64Kbps
남자	4.74	3.62	4.22	4.33	3.50	4.48	4.70	4.30
여자	4.67	3.07	3.55	3.90	3.12	4.17	4.37	4.33
전체	4.70	3.34	3.88	4.11	3.31	4.32	4.53	4.31

음질 시험의 결과는 표 3과 그림 8에 나타나 있다. 표 3은 채널의 영향이 없는 환경에서 MOS 시험을 한 결과이고, 그림 8은 원음, G.722의 56 Kbps, 그리고 본 논문에서 제안된 부호화기의 파형과 스펙트럼이다. MOS 시험에서 G.722의 64 Kbps 음성은 원음과 거의 구별을 할 수 없을 정도로 음질이 좋았고, 반면 48 Kbps의 음성은 양자화 에러에 의한 잡음을 느낄 수 있었다. 그리고 G.722의 56 Kbps 음성은 64 Kbps의 음성과 구별 할 수는 없었지만, 음질의 선명도가 떨어지는 것을 느낄 수 있었다. 본 연구에서 설계된 부호화기는 스펙트럼이 모든 영역에 걸쳐 균등하게 분포한 프레임의 경우, 스펙트럼이 명확히 표현되지 않는 부분이 가끔씩 나타났다. 이는 고대역 신호의 양자화 에러로 나타났지만 비공식적 시험(Informal

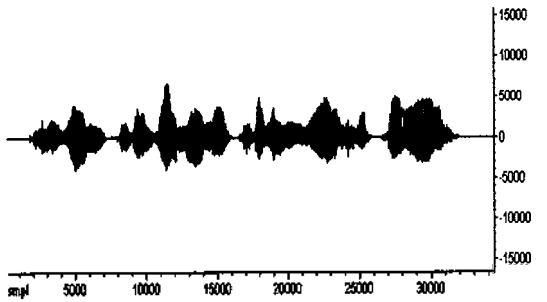
Test)에서 양자화 잡음은 들리지 않았다. 본 연구의 MOS 시험 결과로부터 설계된 부호화기의 성능이 MNRU의 36dB인 음성과, G.722의 56 Kbps인 음성과 비슷한 음질을 갖음을 알 수 있었다.



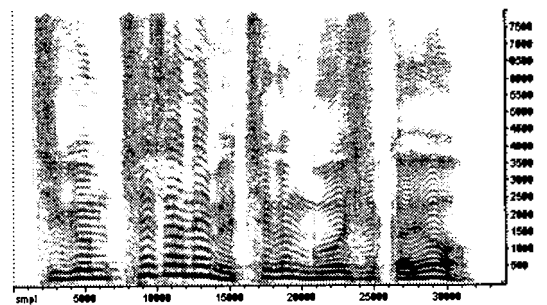
(a) 원음의 파형 (a) Waveform of original speech,



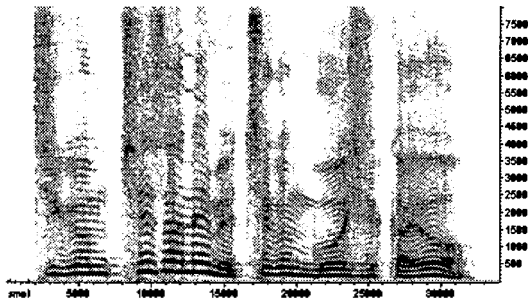
(b) G.722의 56 Kbps 음성 파형 (b) Waveform of 56 Kbps G.722 coder,



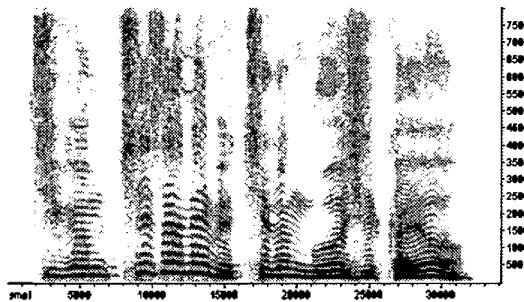
(c) 설계된 음성 부호화기의 파형 (c) Waveform of designed speech coder,



(d) 원음의 스펙트럼 (d) Spectrogram of original speech,



(e) G.722의 56 Kbps 음성 스펙트럼
(e) Spectrogram of 56 Kbps G.722 coder



(f) 설계된 음성 부호화기의 스펙트럼
(f) Spectrogram of designed speech coder.

그림 8. 설계된 음성 부호화기의 파형과 스펙트럼
Fig. 8. Waveform and spectrogram of designed speech coder;

V. 결 론

본 연구에서는 16 Kbps의 전송률을 갖는 광대역 음성 부호화기를 설계하였다. 제안된 광대역 음성 부호화기는 CS-ACELP를 포함하여 구성되었으므로 일반의 휴대전화와 호환성을 갖고며 IMT-2000시스템의 화상회의에 이용될 수 있다. 설계된 부호화기의 성능 평가는 MOS 시험을 통하여 수행되었고, G.722의 56 Kbps와 비슷한 성능을 갖음을 확인하였다. 차기 연구에는 오디오 코딩에서 사용되는 심리음향 모델을 적용하여 16 Kbps에서 더 좋은 음질을 갖는 광대역 음성 부호화기를 설계할 예정이다.

참 고 문 헌

1. ITU-T Recommendation G.729, "Coding of speech at 8 Kbps using conjugate-structure algebraic code excited linear prediction (CS-ACELP)," June, 1995.
2. CCITT Recommendation G.722, "7 kHz audio coding within 64 kbits/s," in Blue Book, vol. III, Fascicle III, Oct. 1988.
3. R. Crochiere, S. Webber, and J. Flanagan, "Digital coding of speech in sub-bands," Bell Syst. Tech. J., vol. 55, no. 8, p. 1069, Oct. 1976.
4. T. A. Ramstad, "Sub-band coder with a simple adaptive bit allocation algorithm," in Proc. ICASSP-82(Paris, France,

- Apr. 1982), p. 203.
5. R. Zelinski and P. Noll, "Adaptive Transform Speech Coding of Speech Signal," IEEE Trans. on Acoustics Speech and Signal Proc., pp.299-309, August, 1977.
6. N. Ahmed, T.Natarajan and K. R. Rao, "Discrete Cosine Transform," IEEE Trans. on Computers, pp. 90-93, January 1974.
7. J. Makhoul et al. "Vector quantization in speech coding," Proc. of IEEE 23, 1551-1588, November, 1985.
8. N.S.Jayant-Peter Noll, "Digital coding of waveforms," 1984.
9. A.K.Soman, P.P.Vaidyanathan, "Coding Gain in Paraunitary Analysis/Synthesis System," IEEE Trans. on Signal Processing, Vol.41, No.5, May, 1993.

▲김 동 주(Dongju Kim)

1998년 2월 : 충북대학교 전자공학과 학사
1998년 3월~현재 : 충북대학교 전자공학과 석사과정
※ 주관심분야 : 음성 오디오 부호화, 적응필터

▲이 인 성(Insung Lee)

1983년 2월 : 연세대학교 전자공학과 학사
1985년 2월 : 연세대학교 전자공학과 석사
1992년 12월 : Tezas A&M University 전기공학과 박사
1986년 5월~1987년 7월 : 한국통신 연구개발단 전임연구원
1993년 2월~1995년 9월 : 한국전자통신연구원 이동통신 기술연구단 선임연구원
1995년~현재 : 충북대 전기전자공학부 부교수
※ 주관심분야 : 음성 및 영상신호압축, 이동통신, 적응필터