

디지털 음성통신技術의 現況

殷 鍾 官

韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科 教授(工博)

I. 序 論

1962年 美國 ATT社가 PCM (pulse code modulation)에 의한 디지털 방식의 음성통신 서비스를 始作한 이래 디지털 음성통신은 지난 20여年 동안 刮目할만한 發展을 하여 왔다. 이러한 發展은 單純히 通信技術의 發展에만 基因한 것이 아니라 computer 技術, 半導體 IC 技術, 디지털 信號處理技術 等 여러 分野가 그동안 急速히 發展한 複合的인 結果이다.

現代는 情報化 時代로서 歐美 先進諸國은 앞으로 10年 안에 綜合情報通信網(ISDN)을 構築하여 音聲, 映像, 데이터 等 信號의 種類에 關係없이 디지털화된 信號를 같은 傳送網을 통하여 送受信할 수 있도록 많은 施設投資와 研究開發을 하고 있다. 國內에서도 이러한 趨勢에 따라 디지털 通信網의 增設이 急激히 이루어지고 있고 앞으로 15年後에는 우리도 綜合情報 通信網을 갖게 될 展望이다.

向後 20여年 동안의 通信技術은 새로운 樣相으로, 지난 20年보다 더 急速히 發展될 것이 豫想되는 바 通信과 computer 技術은 서로 합쳐져 情報化社會를 構築하는 데에 있어 가장 重要한 核心技術로서 役割을 하게 될 것이다. 또한 向後 2000年代까지의 情報通信產業은 全体 產業中 가장 큰 比重을 갖는 有望한 產業의 하나가 되고 그 波及效果는 個人生活은 물론 社會全般의 發展에 지대한 影響을 줄 것이며 나아가 國家 產業發展의 尺度가 될 것이다.

本 論告에서는 各種 通信서비스中 가장 重要한 部分을 차지하는 디지털 음성통신技術의 現況과 앞으로의 發展趨勢를 豫測하여 보고자 한다. 디지털 음성통신이라 하면 본래의 아날로그 음성波형을 디지털화하는 符號化 課程外에도 각 利用者로부터 보내온 信號를 多重化하고 또한 이 信號를 정하여진 相對方과 連結시키는 交換機能等 複合的인 일들이 同時에 이루어져야

된다. 여기에서는 음성통신에서 가장 基本的인 技術인 음성符號化 技術의 發展趨勢와 앞으로의 展望, 그리고 디지털화된 음성信號의 各種 處理技術에 관하여서만 記述하겠다.

II. 音聲의 디지털 符號化技術 現況

音聲의 디지털화 및 대역폭 縮小方式은 크게 나누어 세 가지로 分類할 수 있다. 첫째, 音聲波형을 sampling 하여 量子化하는 波形量子化(waveform quantization)方法, 둘째, 音聲의 週期和 聲道の 係數等 音聲의 特性만 抽出하여 傳送해서 受信測에서 音聲을 再生하는 vocoding 方法, 셋째 波形量子化 方法과 vocoding 方法의 잇점만 사용하는 混合符號化(hybrid coding)方式을 들 수 있다.^[1~3] 이들 符號化 方式들을 傳送速

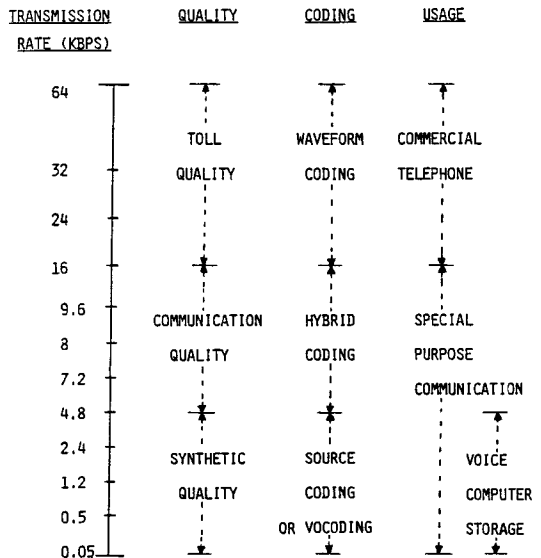


그림 1. 전송속도에 의한 음성 부호화 방식의 분류

度別로 區分하면 그림 1 과 같다.

그림 1에서 보는 바와 같이 waveform coding(또는 quantization) 방식은 傳送速度가 16배지 64kbps/s(bps)로서 傳送速度가 比較的 높으나 音質이 좋아 일반 音聲通信에 많이 使用되고 있다. Hybrid coding 방식은 傳送速度가 4.8 배지 16kbps로 比較的 낮은 速度를 갖기 때문에 modem을 使用해서 기존 아나로그 회선으로 音聲을 傳送할 수 있는 잇점이 있지만 音質은 일반적으로 waveform coding 방식보다 떨어진다. 한편 vocoding 방식은 傳送速度가 아주 낮아 50bps 부터 4.8kbps가 되므로 音聲回線當 傳送單價는 waveform coding 방식보다 훨씬 낮아지나 符號器가 複雜하고 音質에 아직도 문제점이 있는 것이 短點이다. Hybrid coding이나 vocoding 방식은 現在 일반 常用 音聲通信보다는 軍通信等 特殊通信에 쓰여지고 있고 많은 研究結果 音質이 점차 좋아짐에 따라 앞으로는 使用者의 數가 점차 늘 것으로 기대된다. 특히 vocoding 방식은 音聲을 아주 적은 bit수로 디지털화를 할 수 있기 때문에 音聲郵便(voice mail), 音聲私書函, 音聲 filing system 등 computer의 memory에 저장을 要하는 새로운 通信技術에 脚光을 받을 것으로 展望된다. 위에서 記述한 音聲 디지털화를 위한 세 가지 방식을 아래에 자세히 記述한다.

1. Waveform Coding 방식

Waveform coding 방식中 現在 가장 많이 쓰여지고 있는 것은 PCM 방식이다. PCM은 音聲信號를 디지털화하는 데 있어 概念的으로 가장 간단한 방식으로 制限된 대역폭(300~3400Hz)의 音聲을 8KHz로 sampling하여 2ⁿ level로 量子化한 後 coding해서 秒당 64 kbps로 送信한다. 量子器는 線型 또는 非線型 量子器로 나눌 수 있는데 一般的으로 音聲의 振幅分布에 의해서 設計된 logarithm 特性을 갖는 非線型 量子器가 주로 使用되고 있다. Log 特性의 量子器는 入力信號를 壓伸(companding)하는데 있어서 μ -law 방식과 a-law 방식으로 나눌 수 있는데 前者는 韓國, 美國, Canada, 日本 等地에서 쓰고 있고 後者는 Europe에서 쓰고 있다. PCM coding된 信號는 companding 방식에 따라 多重化되는 channel의 數도 다르다. 즉, μ -law PCM 방식에서는 基本的으로 24 channel이 多重化되는 反面 a-law 방식은 30 channel을 多重化하고 있다. 위에서 記述한 log 特性의 非線型 量子器는 그 level이 固定되어 있기 때문에 入力信號의 振幅이 크게 될 境遇에 overload가 되며 잘라질 可能性이 있다. 이러

한 問題點은 適應量子器(adaptive quantizer)를 使用함으로써 解決할 수 있다. 한 例로 入力信號의 振幅 또는 energy의 크기에 따라 量子器의 最低 및 最高 level을 調節하여 줌으로써 PCM의 性能을 效果的으로 向上시킬 수 있는데 이러한 system을 adaptive PCM(APCM)이라 한다. APCM을 使用함으로써 信號對雜音比(SQNR)와 dynamic range가 보통 PCM 보다 현저히 좋아지기는 하나 system이 複雜하여지는 것이 短點이라 하겠다.

音聲信號가 correlation이 크고 따라서 情報理論的으로 "redundant"하다는 것은 잘 알려진 사실이다. 디지털 音聲通信을 위해서 現在 使用中인 PCM의 傳送速度는 앞서 記述한 바와 같이 64kbps로, 이는 대역폭의 使用面에서 볼 때 아나로그 通信方式(例: SSB AM)보다 훨씬 非經濟的이다. 지금까지 PCM 傳送方式이 市內의 短距離 通信에만 使用되고 遠距離에는 아나로그 방식을 주로 사용한 理由도 이 때문이다. 이러한 問題點을 解決하기 위해서 音聲의 대역폭 縮小에 관한 研究가 지난 15年 동안 활발히 進行되어 왔다. 그의 한 結果로 豫測符號化(predictive coding) 방식들이 提案되었는데 代表的인 例로는 ADPCM(adaptive differential pulse code modulation)과 ADM(adaptive delta modulation)을 들 수 있다.⁴⁾ 豫測符號化 방식의 基本原理는 PCM과 같이 sample된 入力音聲信號를 직접 量子化하지 않고, 過去에 들어온 音聲信號의 sample들로 다음에 들어올 信號의 크기를 豫測하여 실제 入力信號로부터 빼중으로써 誤差信號를 發生시켜 이 信號를 量子化하여 傳送한다. 이 誤差信號의 振幅은 入力音聲信號의 振幅보다 훨씬 작기때문에 그만큼 量子化 level 數도 줄어들어 같은 性能을 갖게 할 境遇 傳送速度를 PCM보다 약 3 정도 줄일 수 있다. 豫測符號化 방식의 效果는 入力信號의 sample들이 얼마나 서로 correlation을 갖는가에 따라 크게 달라진다. ADPCM이나 ADM 등의 線型豫測符號化 방식을 使用할 境遇 PCM보다 큰 利得을 얻는 것도 音聲信號가 correlation이 크기 때문이다.

線型豫測符號器의 代表的인 ADPCM의 블럭도가 그림 2에 그려져 있다. ADPCM은 크게 豫測器(predictor)와 量子器의 두개의 subsystem으로 나눌 수 있다. 豫測器는 豫測 filter의 形成을 위한 係數를 固定시킬 수도 있고 入力信號에 따라 變化시킬 수 있는데 前者의 境遇를 固定豫測器(fixed predictor)라 하고 後者의 境遇를 適應豫測器(adaptive predictor)라 한다. 適應豫測器의 境遇 filter의 係數를 매 入力 sample 時間

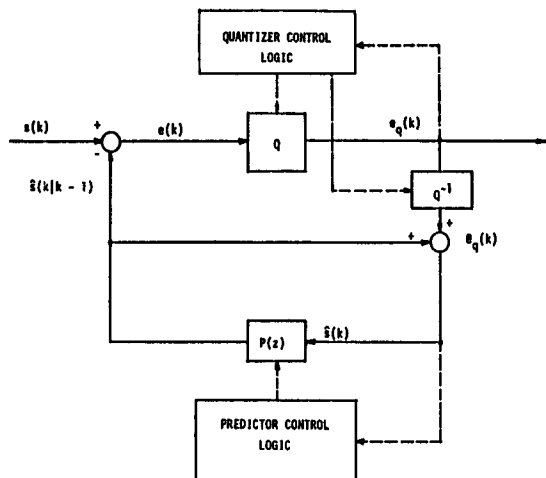


그림 2. ADPCM 송신기의 블럭도

마다 변화시키면 이를 순차適應(sequential adaptation)을 한다하고, 一定 時間마다 변화시키면 이를 블럭適應(block adaptation)을 한다고 한다. 入力音聲信號의 變化에 따라 filter의 係數를 찾는 數學的 方法은 一般的으로 gradient 方法이나 minimum mean-square error(MMSE)方法을 利用하고 있다. 순차適應方法과 블럭適應方法을 比較하면 豫測誤差를 最小化하는 데는 블럭適應方法이 보다 效果的이나 블럭適應方法은 filter 係數를 受信端에 送信을 해야 하기 때문에 量子化된 誤差信號와 多重化를 해야 되므로 시스템이 複雜하게 되는 短點이 있다. 反面 순차適應方式은 係數를 매 sample 時間마다 update 시킴으로써 실제로 豫測誤차를 最小化하는 데는 문제점이 있지만 filter 係數를 따로 送信할 必要가 없고 受信端에서 受信된 誤差信號로 送信部에서와 같이 係數를 update 시킴으로써 시스템의 構成面에서 블럭適應方法보다 훨씬 简单하다. 한편 ADPCM의 量子器는 PCM에서 使用되는 量子器의 基本構造와 같으나 一般的으로 level의 數가 적고, 또한 入力信號(즉, 豫測誤差信號)의 振幅의 變化에 따라 level의 크기를 變化시키는 適應方式을 주로 使用한다. 量子器의 level의 크기를 適應시키는 방식은 매 sampling 時間마다 level을 變化시키는 瞬間壓伸(instantaneous companding)方法과 매 약 5m sec 마다 變化시키는 syllabic companding 方法이 있는데 前者는 後者보다 信號對雜音比가 1,2dB 높으나 채널에 誤差가 있을 때 性能이 급히 떨어지는 短點이 있다. 지난 15年 동안 ADPCM에 關하여 많은 研究를 한 結果 여러 가지 ADPCM 符號化 方式들이 提案되었다. 그 중에

서도 最近 CCITT의 音聲通信 研究 group에 의해서 提案된 ADPCM 시스템은 앞으로 디지털 音聲通信에 큰 影響을 줄 것으로 期待된다. 이 CCITT 標準 ADPCM의 特性을 몇 가지 列舉하면 다음과 같다.^[5]

- Codec이 傳送速度가 32kbps에서 運用되도록 設計되고
- 音聲信號 뿐만 아니라 電話線을 使用하는 데이터 信號 그리고 tone 信號까지도 符號化할 수 있도록 設計되고
- 現在 64kbps PCM과 直接 連結이 可能하고
- 豫測器와 量子器를 둔다. 入力信號에 適應하도록 設計되고
- 채널 에러(channel error)에 比較的 強한 性能을 갖고 있다.

이 ADPCM 시스템은 앞으로 1年 안에 VLSI化 되어 大量生産이 豫想되는 바 傳送速度가 既存 PCM의 반밖에 되지 않는 反面 音質이 좋아 現在 設置된 PCM 시스템을 모두 代替하기는 經濟的인 面을 考慮할 때 어렵겠지만 앞으로 디지털 音聲通信에서 主된 役割을 할 것임은 틀림없는 事實이다.

CCITT 標準 ADPCM 시스템의 coder와 decoder가 그림 3, 4에 각각 그려져 있다. 이 codec의 각

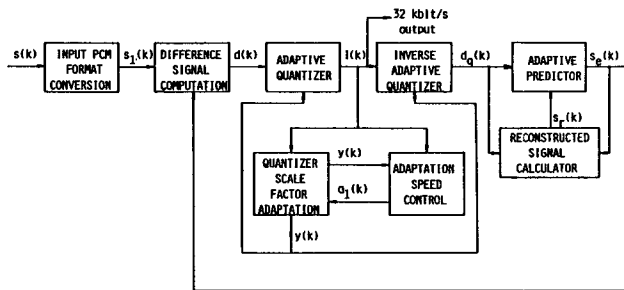


그림 3. CCITT ADPCM 송신기 블럭도

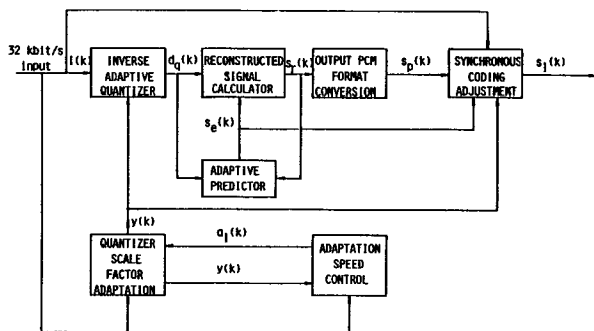


그림 4. CCITT ADPCM 수신기 블럭도

subsystem에 관하여 說明하면 다음과 같다. 먼저 이 ADPCM은 既存 64kbps PCM과 直接 連結이 되기 때문에 ADPCM으로 符號化되기 前에 μ -law로 量子化된 信號는 線型으로 바뀌어야 된다. 이 信號가 바로 ADPCM의 入力信號가 되고 豫測器로부터 豫測된 信號와 빼져서 誤差信號를 發生하게 된다. 豫測器에서 사용되는 filter係數의 update 방식은 基本的으로 簡略化된 gradient 방식으로 매 sampling 時間마다 變化시키는 順次適應方式을 使用함으로써 豫測器의 係數들을 별도로 送信하지 않도록 하였다. 豫測 filter의 構造는 入力信號를 보다 精確히 할 수 있도록 6次的 zero와 2次的 pole을 modeling하는 pole 豫測器와 zero 豫測器의 두 section의 filter로 構成되어 있다. 한편 適應 量子器는 level數를 2⁴(즉 4bit)개 갖고 log 성격을 갖는 瞬間壓伸方式을 使用하고 있는데 入力信號의 種類에 따라 音聲과 같이 급히 振幅이 變하는 境遇에는 “fast mode”로 量子器의 model을 適應시키고 PSK等 變造된 데이터 信號와 같이 比較的 振幅의 變化가 작은 信號에 대해서는 “slow mode”로 作動하도록 設計되어 있다.

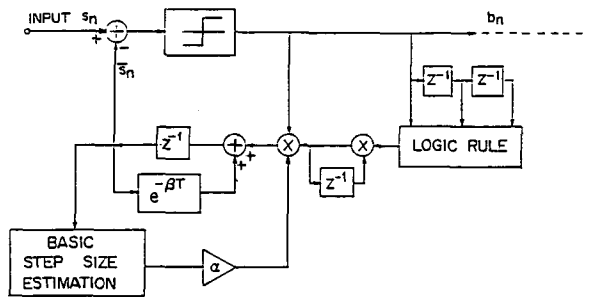
復號器(decoder)의 構造는 基本的으로 符號器의 feedback部分과 같고 여기에 μ -law 壓伸의 PCM 形態 信號로 바꾸는 信號 變換器가 追加되어 있다. 64kbps의 PCM과 32kbps의 ADPCM이 直接 連結되어 디지털 領域에서 符號變換이 됨으로써 생길지도 모르는 性能 低下에 관한 研究가 最近 遂行되었는데 이 結果에 의하면 tandem 시스템에서 生기는 性能 低下는 32kbps의 ADPCM이 64kbps보다 性能이 좋지 않기 때문이고 符號變換에 의한 性能 低下는 거의 무시할 정도(약 1dB)라는 結論이 나왔다.¹⁶⁾

위에서 說明한 CCITT 標準 ADPCM은 지금까지 研究開發된 ADPCM中 가장 複雜한 시스템의 하나이지만 hardware를 具現하는데 있어서는 multiplier를 使用하지 않고도 具現할 수 있도록 設計되어 있다. 시스템의 性能面에서도 豫測器와 量子器를 모두 入力信號에 適應되도록 만들어져 音聲信號를 符號化하는 境遇 信號對 雜音比가 28dB로서 他 ADPCM보다 약 4dB가 좋으며 voiceband 데이터 信號를 傳送하는데도 使用할 수 있다는 것이 큰 長點이라 하겠다.

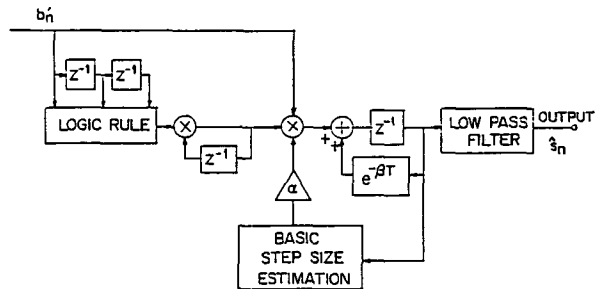
線型 豫測符號器의 또 한 部類로는 ADM을 들 수 있다. ADM도 入力音聲信號를 直接 量子化하지 않고 誤差信號를 量子化하는 點에서는 ADPCM과 같으나 다른 點은 入力信號의 sampling rate를 PCM이나 ADPCM에서 使用하는 nyquist rate 보다 훨씬 높은

(보통 2배 내지 4배) rate를 쓰고 대신 量子器의 level數는 단 2개(즉 1bit)를 갖는다. 다시 이야기하면 PCM이나 ADPCM은 入力音聲이 word 단위로 符號化되지만 ADM에서는 bit 단위로 符號化된다. 따라서 ADM의 hardware의 具現은 ADPCM보다 훨씬 簡單하며, 入力 및 出力端에서 使用하는 filter도 sampling을 nyquist rate 보다 훨씬 높게 하기 때문에 ADPCM에서 使用되는 filter보다 훨씬 簡單하다.

ADM은 量子器의 壓伸을 어떻게 하는가에 따라 크게 세가지로 分類할 수 있다. 첫째 量子器의 step의 크기를 入力信號의 振幅의 變化에 따라 時間常數를 약 5ms로 해서 서서히 變化시키는 syllabic 壓伸方式과, 둘째 매 sampling 時間마다 瞬間적으로 壓伸시키는 瞬間壓伸方法, 그리고 셋째 위 두方法을 같이 使用하는 混合壓伸(hybrid companding)方法等이다. Syllabic 壓伸方法의 代表的인 例로는 現在 가장 많이 使用하고 있는 CVSD(continuously variable slope delta modulation)을 들 수 있고 瞬間壓伸方法으로는 CFDM(constant factor delta modulation)을 들 수 있다.¹⁷⁾ 이들中 syllabic 壓伸方法은 다른 두 方法보다 dynamic range가 좁은 短點이 있고 瞬間壓伸方法은 channel



(a) Coder



(b) Decoder

그림 5. HCDM 블록도

error가 있을 境遇 性能이 급격히 떨어지는 短點이 있다. 結局 hybrid 壓伸方法이 peak SQNR, dynamic range 또는 channel error 特性을 볼 때 가장 性能이 좋다.⁽⁹⁾ ADM의 代表的인 例가 되는 hybrid 壓伸方法을 使用한 HCDM(hybrid companding delta modulation)이 그림 5에 그려져 있다. 먼저 入力信號가 들어오면 單純한 1次의 豫測器에 의해서 豫測된 信號와 比較가 되어 誤差信號의 符號가 出力信號로 나가게 된다. 量子器의 step의 크기는 두 가지로 調整되는데 먼저 豫測된 信號로써 step의 基本 크기를 정하여 音聲의 變化에 따라 매 5ms마다 變化를 시키는 同時에 ADM의 出力 bit pattern을 보고 매 sampling 時間마다 瞬時壓伸을 시킨다. 瞬時壓伸은 여러가지 方法이

표 1. HCDM 壓伸 logic

b_n	b_{n-1}	b_{n-2}	Multiplication Factor(B_n)
+	+	+	1.5
-	-	-	1.5
-	-	+	1
+	+	-	1
-	+	+	0.66
+	-	-	0.66
-	+	-	0.66
+	-	+	0.66

있겠지만 가장 最適方法으로 알려진 것은 표 1에 보는 바와 같이 3개의 出力 bit를 보고 계속 같은 bit 이 나가면 step의 크기를 增加시키고 bit pattern이 바뀌게 될 때는 크기를 減少시키거나 먼저 크기 그대로 두는 方法이 效果的인 것으로 알려져 있다. HCDM의 decoder는 coder의 feedback部分과 똑같으며 decode된 信號는 最終적으로 low-pass filtering을 함으로써 音聲이 再生된다. 提案된 HCDM은 音聲信號와 같이 non-stationary하고 振幅이 많이 變化하는 信號에 대하여 特히 效果的인데 지금까지 開發된 ADM 시스템中에서 性能이 가장 좋은 시스템으로 알려져 있다. ADPCM과 ADM의 性能을 比較하여 보면 35kbps 이상에서는 ADPCM이 SQNR이 높고 그 以下에서는 ADM이 약 2,3dB정도 좋은 것으로 알려져 있다. 두 시스템의 性能比較가 그림 6에 그려져 있다. ADM은 PCM이나 ADPCM과 比較하여 한가지 큰 長點은 word단위가 아니라 bit단위로 符號化가 되기 때문에 channel error에 強한 점이다. PCM이나 APDCM은 channel error가 10^{-3} 정도되면 音質이 극히 나빠지나

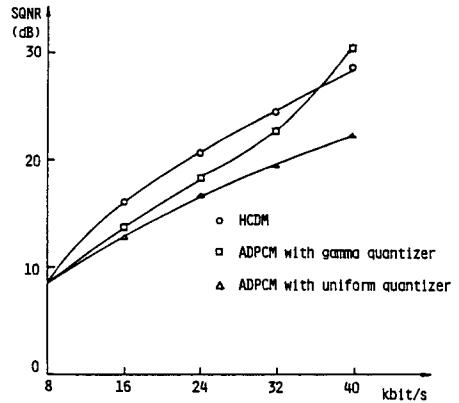


그림 6. HCDM과 ADPCM의 性能 比較

ADM은 10^{-2} 가 되어도 별로 나빠지지 않기 때문에 mobil radio와 같은 이동 音聲通信및 기타 特殊通信에 各광을 받고 있다.

2. Hybrid Coding 方式

디지털 音聲通信의 研究開發에서 現在 가장 많은 研究가 進行되고 있는 分野가 傳送速度가 4.8~16kbps의 hybrid coding 方式이라 하겠다. 그 이유는 waveform coding 分野는 符號化 方式을 CCITT가 32kbps에서 ADPCM의 方式을 確定하였으나 16kbps에서는 符號化 方式을 아직 確定하지 못한 狀態이나 音質이나 시스템의 복잡도에서 아직도 改善할 點들이 많기 때문이다. Hybrid coding은 크게 두 種類로 時間領域의 coder와 周波數領域의 coder도 나눌 수 있는데, 前者의 代表的인 例로서는 residual excited linear prediction(RELP) vocoder⁽⁹⁻¹⁰⁾와 adaptive predictive coder(APC)⁽¹¹⁾를 들 수 있고 後者の 例로서는 sub-band coder와(SC)⁽¹²⁾ adaptive transform coder(ATC)⁽¹³⁾를 들 수 있다. 이들 hybrid coding 方式들은 傳送速度가 前述한 PCM, ADPCM, ADM 등 waveform coding 方式들 보다 훨씬 낮으나 system이 複雜한 點이 큰 短點이다. 그러나 最近 VLSI 技術이 많이 發展하였고 또한 特殊 디지털 符號處理 IC들이 生産되고 있기 때문에 hardware를 具現하는데 있어서 전보다 가격이 훨씬 떨어지고 있어, 經濟性이 점차 改善되고 있다.

現在 가장 많은 各광을 받고 있는 위에 열거한 hybrid coding 方式을 考察하자. 먼저 RELP vocoder의 전체 block도가 그림 7에 그려져 있다. 이 시스템은 원래 提案된 RELP 시스템으로 부터 조금 變形된 시스템인데 傳送速度가 9.6kbps에서 作動될 수 있도록

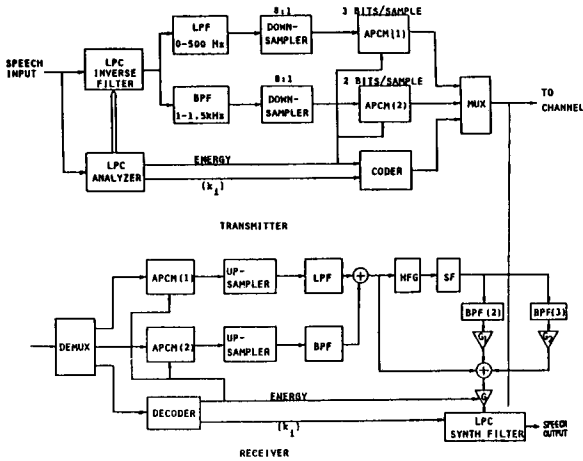


그림 7. RELP vocoder의 블럭도

設計되어 있다. RELP vocoder의 原理는 低傳送速度의 vocoder에 널리 쓰여지고 있는 線型豫測符號 [linear predictive coding (LPC)]의 原理(자세한 것은 뒤에 記述함)에 基本을 두고 있다. LPC는 音聲을 發生시키는 聲道(vocal tract)를 minimum mean-square error 과정에 의해서 modeling하는 한 方法으로 pole로만 modeling을 할 경우 豫測係數가 10개 정도 必要하다. 音聲은 non-stationary하기 때문에 이들 係數들은 20~30m 기간마다 새로 구해서 受信器에 傳送하게 된다. 受信器에서는 이 係數로 filter를 形成하여 傳送된 excitation 信號를 入力시킴으로써 合成音聲을 만들게 된다. RELP vocoder의 핵심부분의 하나는 受信端에서 excitation으로 사용하기 위한 信號를 만들어 傳送하는 부분이다. 이 excitation 信號는 基本的으로 LPC inverse filter에 의해서 생긴 誤差信號 또는 residual 信號로서 이 信號의 대역폭은 入力音聲信號와 같기 때문에 그대로 傳送하게 되면 높은 傳送速度가 所要된다. 따라서 낮은 傳送速度로 送信하기 위해서 두개의 band로 나누어 band-pass filtering을 디지털 領域에서한 다음 sampling rate를 줄인 후 APCM으로 符號化하여 LPC係數와 함께 傳送한다. 受信端에서는 역과정으로 band-pass filtering이 된 信號를 非線型處理[그림 7의 high-frequency generator(HFG) 및 spectral flattener(SF)에서 함]를 하게 되면 원래의 full-band residual로 만들 수 있는데 바로 이 信號를 振幅調整을 한 後 LPC合成 filter의 入力信號로 사용한다. RELP vocoder는 傳送速度가 9600bps에서 他 시스템보다 音質이 좋고 주위의 환경이나 雜音의 影響이 없다는 長點이 있다.

다음은 APC시스템에 관하여 考察하여 보자. APC시스템의 送信器가 그림 8에 그려져 있다. APC의 原

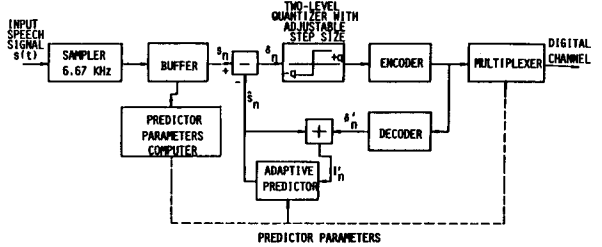


그림 8. APC 송신기의 블럭도

理는 線型豫測符號 理論을 根據로 한 一種의 ADPCM이라 말할 수 있다. 音聲信號는 두가지의 "redundancy" 원인이 있는데 하나는 准週期的인 성격의 pitch에 의한 것과 또 하나는 聲道の 係數에 의한 것이다. 따라서 音聲信號의 基本週期를 구하고 聲道の 係數를 매 일정한 시간마다 線型豫測 方法으로 구하게 되면 이들의 情報로써 ADPCM과 같이 豫測器를 形成할 수 있다. 이 豫測器의 豫測信號는 入力音聲信號와 比較되어 誤差信號를 만드는데 이 誤差信號를 量子化하여 豫測係數 및 pitch 情報와 함께 傳送하게 된다. 受信器의 構造는 送信器의 feedback 부분과 같고 傳送된 이들 情報로써 音聲을 재생시킨다. APC에서 사용하는 豫測器의 係數의 수는 일반 LPC나 RELP 시스템보다 훨씬 작게, 4개정도 사용하므로 計算量이 비교적 작은 편이나 pitch에 관한 情報도 추출하여야 하므로 전체적으로 시스템이 ADPCM보다 훨씬 複雜하다. APC는 주 傳送速度가 9.6~16kbps로써 특히 16kbps에서 비교적 우수한 音質을 갖는다.

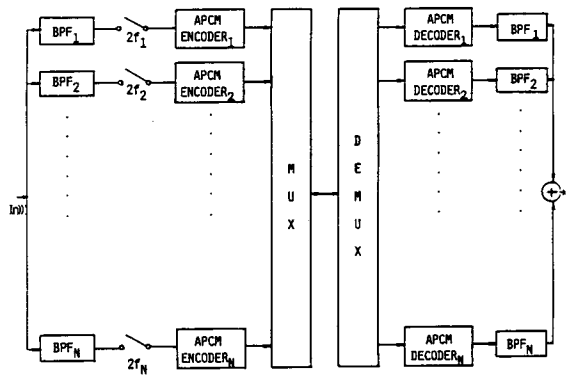


그림 9. Subband coder의 블럭도

마지막으로 sub-band coding 方式을 살펴보자. 이 方式은 概念的으로 주파수 領域에서 音聲을 符號化하는 代表的인 例로 送信器 部分이 그림 9에 그려져 있

다. 이 시스템에서는 먼저 音聲信號가 들어오면 4개 내지 8개의 band-pass filter를 사용하여 각 band의 信號들을 만든 다음 이들을 앞서 記述한 APCM이나 ADPCM 등 waveform coder를 사용해서 符號化하여 多重化한 다음 傳送한다. 受信器측에서는 역 과정을 거쳐 decode된 각 band의 信號들을 합하게 되면 원하는 音聲信號를 再生할 수 있다. Sub-band coding에서 기본적인 문제점은 3~4KHz 대역폭의 音聲信號를 어떻게 몇개의 band로 나누는가이다. 音聲은 각 주파수 band에 따라서 明瞭度(intelligibility)가 다르고 音質에 공헌하는 度가 다르다. 예를 들어 音質과 明瞭度에 가장 重要한 주파수 대역은 약 500~1200Hz 정도이고 300Hz 이하의 信號는 明瞭度에 아무런 공헌을 않는 반면 고주파대역(1000Hz 이상)의 信號는 強度가 높을수록 明瞭度가 높아진다. 따라서 이러한 現象들을 감안하여 band를 나누고 각 band마다 音質이나 明瞭度의 重要함에 따라 符號化하는데 bit수를 調節하여 주면 낮은 傳送速度에서도 좋은 音質을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다. Sub-band coder를 具現하는데 지금까지 가장 어려웠던 점은 몇개의 band-pass filter들을 어떻게 효과적으로 具現하는가였는데 그동안 디지털 信號處理 技術이 많이 발전하여 quadrature mirror filter 등 sub-band coder에 사용하기 適合한 filter의 設計 기법이 提案되어 hardware의 具現을 經濟적으로 할 수 있게 되었다.

지금까지 記述한 APC 및 sub-band coder는 16 kbps의 傳送速度에서 좋은 音質을 갖고 RELP vocoder는 시스템이 比較的 複雜하지만 9.6kbps에서 좋은 音質을 갖기 때문에 現在 關心의 焦點이 되고 있는 9.6~16kbps의 代表的인 音聲符號器로 看做되고 있다. 現在 CCITT는 32kbps의 標準 ADPCM 시스템의 制定과 함께 16kbps의 標準 音聲符號器의 制定도 서두르고 있는 바 아직 結定的으로 어느 特定 符號化 方式이 採擇되지는 않았으나 APC, subband coder 그리고 前述한 ADM 등이 強한 候補로 登場하고 있다.

3. Vocoding 方式

앞서 記述한 바와 같이 vocoding 方式은 音聲의 波形을 直接 量子化하지 않고 音聲波形을 分析하여 有聲音/無聲音 分別 基本週期, 聲道の 係數 등 音聲의 特性만 抽出해서 傳送하기 때문에 典型的인 傳送速度가

2.4~4.8kbps로 아주 낮은 반면 시스템은 상대적으로 複雜하다. 일반적인 vocoder의 構造가 그림 10에 그려

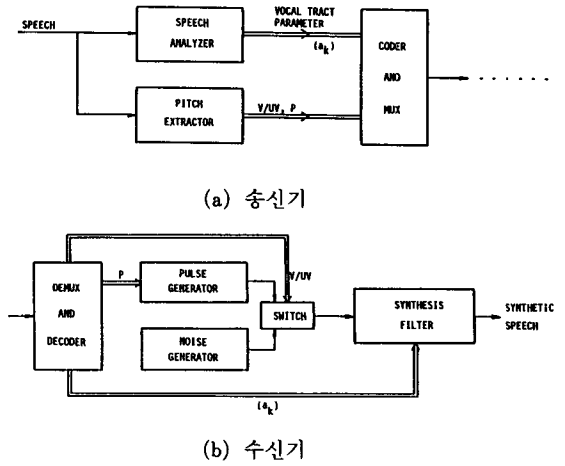


그림 10. Vocoder의 일반적인 블럭도

져 있다. 물론 vocoding 方式에 의해서 傳送速度를 2.4kbps 以下로 내리는 것도 可能하나 이 경우에는 일반 通信에 適合한 音質을 얻기는 아직 어려운 實情이다. 2.4 내지 4.8kbps에서의 vocoder의 代表的인 例로는 線型豫測符號化 原理를 사용한 LPC vocoder를 들 수 있다.¹²⁾ 여기서 線型豫測符號化 原理를 좀 자세히 記述하면 다음과 같다.

일반적으로 音聲信號와 같이 correlation이 강한 信號는 일정한 수의 前 sample 들에 의해서 다음 sample의 크기를 豫測할 수 있다. 이 豫測되는 sample의 값은 前 sample 들을 一定한 係數와 곱해서 舍하므로써 求할 수 있다.

線型豫測에서의 問題의 焦點은 sample들의 豫測을 위한 豫測 係數(보통 10~14개)를 구하는 일로 이들은 音聲 sample의 豫測된 값과 實際의 값의 誤差를 最少化시킴으로서 얻어진다.

豫測 係數는 音聲이 non-stationary하기 때문에 매 20~30ms마다 얻어지는데 이 係數들이 바로 音聲을 發生시키는 聲道를 特性지워준다.

聲道를 數學的으로 나타내는데는 pole의 係數만으로 나타내는 pole model과 pole과 zero의 係數를 둘 다 사용하는 pole-zero model이 있는데 後者が 前者보다 係數들을 구하는데는 훨씬 複雜하나 子音(consonant) 또는 鼻音(nasal)에는 훨씬 效果的이다.¹⁴⁾ Hardware를 具現하는데는 계산의 量이 큰 制約條件이 되기 때

문에 實際的으로는 pole model을 주로 사용하고 있다. Pole model에 의한 線型豫測 方式은 音聲을 매 20ms 마다 잘라 豫測 係數를 구할때 window를 사용하는가의 與否, 그리고 豫測 誤差를 어떻게 最少化하는가에 따라 autocorrelation 方式과 covariance 方式으로 나눌 수 있다. Autocorrelation 方式은 音聲이 들어오면 window(특히 hamming window)로 잘라 豫測誤差를 時間에 關係없이 最少化시키고 covariance 方式은 window를 사용하지 않으나 豫測誤差는 一定한 時間區間에서만 最少化시킨다. 結果的으로 前者의 方式을 사용하여 얻은 係數로 合成하거나 聲道 filter를 構成하면 filter의 安定度를 언제나 保障할 수 있으나 後者의 方式은 保障을 못한다. 따라서 實際로는 音聲通信을 위한 vocoder 目的으로는 autocorrelation 方式을 現在 주로 사용하고 있다.

Vocoding에서 聲道の 係數(즉 LPC vocoder 에서는 豫測係數)를 구하는 일외에 또 하나의 중요한 일은 매 20ms 정도마다 音聲이 有聲音인지 無聲音인지 分別하고 有聲音일 경우 週期를 찾아내는 일이다. 有聲音/無聲音 分別은 그림11에서 보는 바와 같이 有聲

音의 energy가 無聲音보다 훨씬 큰 反面 zero crossing의 率은 훨씬 작기 때문에 이러한 特性들에 의해서 쉽게 分別할 수 있다. 한편 有聲音의 週期를 찾는 (pitch extraction) 方法은 지난 30여년 동안 여러가지가 提案되었는데 autocorrelation, AMDF(average magnitude difference function) 등 correlation 方法들이 많이 사용되고 있다.^{15, 16)}

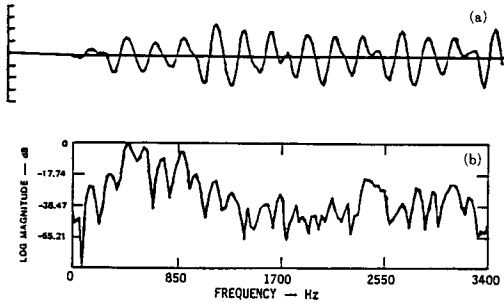
위에서 구한 여러가지 parameter 들, 즉 豫測係數(보통 10개), 有/無聲音 分別을 包含한 pitch에 關한 情報들은 符號化되어서 受信器에 傳送이 된다. 受信器에서는 이들 情報를 받아 豫測係數로 人間の 聲道에 該當하는 合成 filter를 形成하고 주어진(20ms) 時間區間이 有聲音인 경우에는 excitation 信號로 pitch의 週期에 따라 pulse를, 無聲音인 경우에는 random 雜音을 내보내어 合成 filter를 excitation 시킴으로서 合成音聲을 만들어 낸다.

LPC vocoder는 傳送速度가 2400bps일 경우 音質이 他 vocoding 方式보다 비교적 좋으나 아직도 音質 및 音色에 좀 問題가 있으며 周圍 環境에 雜音이 많거나 acoustic distortion이 있을 경우 音質이 급격히 低下되는 短點이 있다. 이 問題를 最少化하기 위해서 現在에도 많은 研究를 하고 있다.

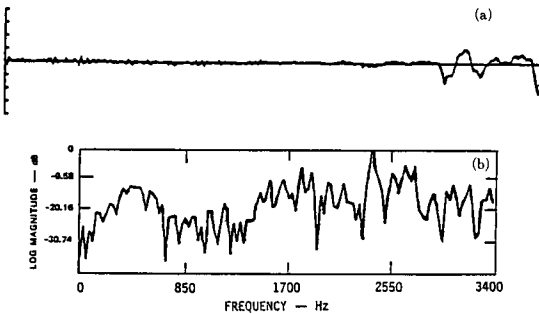
한편 水中音聲通信등 特殊 디지털 音聲通信과 音聲의 computer 貯藏을 위해서는 傳送速度가 500~1200 bps의 vocoder 方式들이 지난 몇 년동안 활발히 研究開發되어 왔다. 그 例로서 formant vocoder¹⁷⁾와 vector quantization¹⁸⁾ 方式을 들 수 있다.

Formant vocoder의 原理는 그림11에서 보는 바와 같이 音聲信號를 周波數 領域에서 보통 4KHz의 大역 폭안에 2~5개 resonant point(이를 formant라고 함)가 있는데 이들 formant의 周波數와 振幅을 抽出해서 傳送하는 것을 基本으로 하고 있다. 振幅의 情報로 共振回路를 構成하여 LPC vocoder와 같이 pitch pulse 또는 random noise를 入力시킴으로서 合成音聲을 얻을 수 있다. 물론 formant vocoder도 他 vocoder와 같이 pitch에 關한 情報가 필요하기 때문에 有/無聲音 分別 및 pitch의 週期를 찾는 일이 필요하다. Formant vocoder의 傳送速度가 他 vocoder보다 낮게 最低 500bps 정도로 音聲을 傳送시킬 수 있는 理由는 傳送되는 parameter의 數가 他 vocoder보다 훨씬 적기 때문이다.

Formant vocoding에서 중요한 점은 音聲信號로부터 formant의 周波數와 振幅을 구하는 일인데 이에 關한 情報의 正確度에 따라 合成音質에 크게 影響을



(A) 유성음



(B) 무성음

그림11. 전형적인 음성신호의 시간파형(上) 및 Spectrum(下)

주기 때문에 이들 情報를 正確히 구해야 한다. 이를 위한 여러 가지 方法中 LPC 方式으로 구해진 豫測係數로 FFT한 音聲의 spectral envelope으로부터 구하는 것이 가장 效果的인 方法으로 알려져 있다.

마지막으로 vocoding에서 뿐만 아니라 waveform coding 및 hybrid coding 등 여러 coding 方式에서 사용할 수 있는 vector quantization (VQ) 方式에 關하여 說明한다.¹¹⁾ 지난 數年間 많은 研究가 進行되어 오고 있는 이 vector quantization 方法은 一種의 pattern matching 方式으로서 音聲및 映像通信등 디지털通信에서 傳送速度를 既存 시스템보다 현저히 줄일 수 있고 또한 이들 情報를 經濟的으로 computer에 貯藏하는데에 사용할 수 있다.

既存의 모든 符號化 方式은 “scalar” 符號化 方式, 즉 信號의 각 sample이나 parameter에 대해 符號化 하나 vector quantization에서는 一定한 block의 音聲信號 sample들 또는 音聲으로 얻어진 parameter들을 한 개의 vector로 看做하여 memory에 貯藏된 標準 vector(또는 code vector라 함)들과 比較해서 가장 類似한 vector의 binary code word로 符號化하게 된다.

각 vector를 code book의 vector와 pattern matching을 시키기 위해서는 適切한 fidelity measure(例: minimum mean-square error)를 사용하여야 할 것이다. 符號化되어 傳送된 vector 信號는 受信器의 code book의 vector와 比較하여 元來의 vector 信號를 再生하는 逆過程을 거치게 된다.

Vector quantization에서 問題가 되는 점은 pattern matching을 위한 計算量과 code book을 貯藏하기 위한 memory의 크기가 vector의 길이의 exponential 函數로 增加하는 점이다.

가령 例를 들어 sample당 m bit로 code된 PCM 信號를 크기가 k인 vector quantizer로 full search하여 符號化할때 sample당 검색의 數는 2^{km} , memory는 $k2^{km}$ word가 필요하게 된다. 따라서 實質的으로 vector quantizer를 具現하는데 있어서는 k^m 의 값을 8 이상을 쓰기가 어렵다. 다행히 memory의 값이 매년 급격히 떨어지고 있고 tree search 方式등 簡素화된 code book의 search 方式이 開發됨에 따라 vector quantization 方式은 低 傳送速度의 音聲通信에서 뿐만 아니라 音聲의 貯藏및 認識등 여러 分野에서 많이 쓰여질 展望이다. 本 論稿에서는 vector quantization을 vocoding에 分類하였지만 주로 低 傳送速度의 시스템에 쓰여지기 때문에 便宜上 그렇게 分類하였을 뿐

모든 音聲符號化 方式에 適用할 수 있음을 強調하여 둔다.

표 2. 디지털 음성 coding 방식의 비교

Category	Method	Bit Rate (KBPS)	Quality	Complexity	Robustness
Waveform Coding	PCM	56-64	Excellent	Simple	Excellent
	ADPCM, ADM	16-48	Excellent at High Rate, Good at Low Rate	Simple	Excellent
Hybrid Coding	REL P, APC SBC, ATC	8-16	Good	Complex	Good
Vocoding	LPC	2.4-4.8	Fair	Complex	Fair-Poor
	Formant Vocoder, Vector* Quantizer	0.05-1.2	Poor-Fair	Very Very Complex	Poor

* 주: Vector quantization 방법은 여러가지 부호화 방식에 사용할 수 있으나 편리상 vocoder에 분류하였음.

지금까지 說明한 여러가지 音聲符號化 方式들은 표 2에 要約하였다. 일반적으로 傳送速度가 높으면 音質이 좋고 시스템의 具現이 簡單한 反面 傳送速度가 낮아질수록 音質이 떨어지고 시스템이 複雜함을 알 수 있다. 여기서 “robustness”라 함은(표 2 參照) 雜音 등 周圍 環境의 影響에 符號器 性能의 敏感性을 말한다.

4. 其他 音聲帶域幅 縮小技術

지금까지 音聲을 效率的으로 符號化하여 디지털傳送을 하는 여러 가지 方式들에 關하여 討議하였다. 音聲의 符號化와는 直接的으로 關連이 없지만 大陸間 長距離通信, 衛星通信등 回線의 數가 극히 制限된 狀況에서의 音聲通信에서는 音聲 interpolation 技術이 回線의 數를 效率的으로 줄이는데 큰 役割을 한다. 音聲 interpolation이란 二人이 通話할때 한사람이 말을 하면 相對方은 듣는 것이 常例이므로 音聲信號가 傳送되지 않는 線을 感知하여 다른 音聲信號를 傳送하므로써 電話回線 使用의 效率性(即, channel의 帶域幅)을 倍로 늘리는 技術을 말한다. 옹리한 技術을 TASI(time assignment speech interpolation)라 하는데 現在 衛星音聲通信이나 長距離 電話에 많이 使用하고 있다. TASI system이 1960年代 初에 처음 나왔을 때는 analog 方式으로 具現되었으나 近來에는 모두 digital

方式로 바뀌었다. TASI system에서 가장 중요한 subsystem의 하나는 電話回線에서 音聲信號를 感知하는 部分이 되겠는데 물론 音聲의 不正確한 感知에 의해서 通話가 제대로 連結되지 않거나 끊기는 일이 없어야 할 것이다. 多幸히도 近來에 디지털 音聲處理技術의 많은 發展으로 音聲의 感知는 雜音이 있는 어려운 狀況에서까지 쉽게 할 수 있게 되었다.

音聲을 効率的으로 傳送할 수 있는 또 한 가지 方法은 符號化된 音聲信號를 非同期的(asynchronous)으로 多重化하는 것이다. 이 方法을 일명 統計多重化(statistical multiplexing)이라 한다. 종래의 多重化 方法은 거의 모두 同期式(synchronous multiplexing)으로 PCM에서 符號化된 音聲信號를 M_{12} 또는 M_{22} 등으로 多重化하는 것도 한 例가 되겠다. 音聲의 統計多重化에 있어서는 符號化된 音聲信號를 일정한 묶음(packet이라 함)으로 만들어 여러 가입자로 부터 들어 오는데로 非同期式으로 時分割多重化하여 傳送한다. 여기서 silence 부분은 除去하고 實在音聲만 packetize하여 多重化하기 때문에 前述한 音聲 interpolation 과 비슷한 概念이 導入됨을 알 수 있다. 音聲의 統計多重化 概念은 現在 데이터 通信에서 脚光을 받고 있는 packet交換技術과도 密接한 關係가 있는데 앞으로는 音聲과 데이터 뿐만 아니라 其他 모든 信號가 디지털화 되어 같은 通信網으로 傳送될 때 効率的으로 多重化하는 것은 물론 또한 全体的인 傳送速度도 줄일 수 있기 때문에 크게 脚光을 받을 것으로 期待된다.

Ⅲ. 앞으로 解結해야 될 여러 가지 問題點

지금까지 디지털 音聲通信에서 쓰여지는 여러가지의 最新技術에 관해서 說明하였다. 디지털 音聲通信技術은 지난 20여년 동안 많은 研究開發의 結果 지금은 成熟期에 들어가 많은 시스템들이 實用化되고 있다. 그러나 解結하지 못한 여러가지 問題點들을 풀고 또한 지금까지 研究한 結果를 應用하기 위한 많은 努力이 아직도 進行中이다. 이들 重要한 點들을 羅列하여 보면 다음과 같다.

- CCITT의 標準 ADPCM은 32kbps에서 比較的 좋은 音質을 갖고 있으나 傳送速度가 7.2~16kbps에서는 符號方式이 復雜하지 않으면서 좋은 音質을 내는 符號器가 없는 實情이다. 따라서 앞으로는 中低 傳送速度(7.2~16kbps)에서 VLSI로 하드웨어를 具現할 수 있고 音質도 좋은 符號化方式의 研究에 迫車를 가하게 될 것이다. 이를 위해서 새로운 시스템의 開發보다는 RELP, APC, subband coder 등

現存 시스템을 改良하는데에 많은 努力이 쓰여질 것이다.

- 2.4~4.8kbps帶의 vocoder의 音質은 아직도 改善할 點이 많다. 따라서 이 分野에도 많은 努力이 必要하다.
- 音聲符號器를 經濟的으로 具現하는 일은 全体 音聲通信시스템의 單價를 낮추는데 絶對的으로 必要하다. 이 點은 特히 低傳送速度의 符號器일수록 切實하다.
- PCM 외에 ADPCM 및 其他 다른 傳送速度의 符號器가 디지털 領域에서 連續으로 接續되므로써 tandem coding으로 인한 全体音聲通信시스템의 性能低下를 어떻게 最小化할 것인가가 重要한 問題로 擡頭되고 있다.
- 性質이 基本的으로 다른 音聲과 데이터 信號가 同時에 같은 線路로 傳送될 때 어떻게 効率的으로 傳送할 것인가는 앞으로 ISDN을 形成하는데 重要問題이다. 音聲信號는 어느 정도의 channel error는 感受할 수 있지만 傳送時 遲延이 생기면 듣기가 매우 不自然스러워진다. 反面 데이터 信號는 어느 정도의 遲延은 感受하지만 error가 생기면 再傳送이 必要하다. 따라서 이러한 相衡되는 두 信號를 integration하여 傳送하기 위해서는 많은 研究가 必要하다.
- 지금까지는 音聲을 circuit 交換方式에 의해서 傳送하고 있으나 音聲信號가 데이터와 같이 傳送됨으로서 앞으로 一部の 音聲信號는 packet 交換方式에 의해서 傳送될 것이 期待된다. 따라서 packet 音聲傳送은 重要한 研究分野로 되고 있다.
- 디지털화된 音聲은 많은 應用分野가 있다. 例를들면
 - 音聲의 computer 底藏 및 retrieval
 - 音聲의 filing 시스템
 - 音聲의 mailing 시스템
 - 音聲의 暗號化
 등을 들 수 있다. 이들에 關하여는 紙面上 자세한 說明을 할 수 없으나 디지털 音聲信號의 computer利用의 代表的인 例로서 앞으로 數年안에 많은 實用시스템이 나올 것으로 期待한다. 이 밖에도 人間과 機械사이의 通信을 위한 音聲認識分野의 研究는 歐美에서는 지난 10여년간 進行되어 왔지만 그 結果는 아직도 初期段階에 있다.

Ⅳ. 結 論

지금까지 디지털 音聲通信技術의 現況 및 展望, 그리고 앞으로 遂行되어야 될 關連 研究分野에 대하여 記述하였다. 音聲信號의 디지털화는 지난 20여년 동안

急速히 進展이 되었고 앞으로 멀지 않은 장래에 모든 音聲信號가 디지털 傳送網을 통해서 送受信이 될 것이 期待된다. 現存하는 64kbps의 PCM은 그동안 많은 投資의 結果 새로운 시스템으로 代替될 것을 期待하기는 어려우나 앞으로는 32kbps의 ADPCM이 PCM 대신 많이 쓰여질 것이 展望된다. 또한 가까운 時日안에 CCITT는 16kbps의 標準符號方式도 制案할 것인바 이 방식은 衛星通信등 채널 帶域幅이 아주 critical한 경우에 使用될 것이다.

지금까지도 그랬고 앞으로도 音聲通信은 여러 通信 서비스중에서 가장 重要한 役割을 할 것이며, 디지털 音聲通信 自体는 물론 여러가지 應用에도 많은 研究開發 및 施設投資가 繼續되리라 믿어진다. 그리고 低傳送速度의 符號化方式은 여러가지 特殊通信, 그리고 音聲郵便, 音聲의 computer 底藏 및 storage 등 應用에 많이 쓰여질 것이다. *

參 考 文 獻

- [1] 은종관 “음성 디지털화와 대역폭 축소 방법에 관하여 (I)-ADPCM 및 ADM”, 대한전자공학회지, vol. 15, no. 3 및 no. 4, July and Sep., 1978.
- [2] 은종관 “음성 디지털화와 대역폭 축소 방법에 관하여 (II)-Vocoding”, 대한전자공학회지, vol. 15, no. 5 및 no. 6, Oct. and Dec., 1978.
- [3] J.L. Flanagan et al., “Speech coding,” *IEEE Trans. Commun.*, COM-271, pp. 710-736, 1979.
- [4] J.D. Gibson, “Adaptive prediction in speech differential encoding systems,” *Proc. IEEE*, vol. 68, pp. 488-527, April, 1980.
- [5] CCITT study group XVIII, “Report on 32 Kbit/s ADPCM,” CCITT Document, Nov., 1983.
- [6] 이직익, 은종관, “Performance analysis of PCM/ADPCM transcoding systems,” *IEEE Trans. Commun.* (to appear).
- [7] 은종관, 이황수, “A study of the comparative performance of adaptive delta modulation systems,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-28, no. 1, pp. 96-101, Jan., 1980.
- [8] 은종관, 이황수, 송주석, “Hybrid companding delta modulation,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-29, no. 9, pp. 1337-1344, Sep., 1981.
- [9] 은종관 D.T. Magill “The residual-excited linear prediction vocoder with transmission rate below 9.6 kbits/s,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-23, pp. 1466-1474, Dec., 1975.
- [10] 은종관, 이종락, *A 9600 bps RELP Vocoder with Split Band Coding*. Proc. of 1984 IEEE International Conf. on Commun., pp. 1174-1178, May, 1984.
- [11] B.S. Atal and M.R. Schroeder, “Adaptive predictive coding of speech signals,” *Bell. Sys. Tech. J.*, vol. 49, pp. 1973-1986, Oct., 1970.
- [12] R.E. Crochiere et al., “Digital coding of speech in subbands,” *Bell Sys. Tech. J.*, vol. 55, pp. 1069-1085, Oct., 1976.
- [13] R. Zelinski and P. Noll, “Adaptive transform coding of speech signals,” *IEEE Trans. ASSP*, vol. ASSP-25, pp. 299-309, Oct., 1977.
- [14] 송길호, 은종관, “Pole-zero modeling of speech based on high-order pole model fitting and decomposition method,” *IEEE Trans. ASSP*, vol. ASSP-31, pp. 1556-1565, Dec., 1983.
- [15] L.R. Rabiner et al., “A comparative performance study of several pitch detection algorithms,” *IEEE Trans. ASSP*, vol. ASSP-24, pp. 399-418, Oct., 1976.
- [16] 은종관, S.C. Yang, “A pitch extraction algorithm based on LPC inverse filtering and AMDF,” *IEEE Trans. ASSP*, vol. ASSP-25, pp. 565-572, Dec., 1977.
- [17] 은종관, “A low-rate digital formant vocoder,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-26, pp. 344-355, March, 1978.
- [18] R.M. Gray, “Vector quantization,” *IEEE ASSP Magazine*, vol. 1, pp. 4-29, April, 1984.