

무선채널환경에서 ATM데이터의 전송성능분석 및 개선연구

A Study on The Performance of ATM Cell Transmission over Wireless Link

이 하 철* · 이 병 섭**

Ha-Cheol Lee · Byung-Seub Lee

요 약

무선 ATM통신망에서 ATM기술을 무선링크에 적용하는 경우에 Rayleigh 및 Rician 페이딩 채널특성, 전력 제한, 단일 및 버스트 에러로 인해 유선링크에서 보다 상당한 전송성능 열화가 예상되며 이를 보상하기 위한 방안들이 강구되어야 한다. 본 논문에서는 무선 ATM통신망에서 무선링크를 통한 ATM 데이터의 전송시 전송성능을 단일 및 버스트 에러환경으로 구분하여 정량적으로 분석하였으며 전송성능 열화현상이 발생된다는 것을 확인하였다. 그리고 이러한 전송성능 열화현상을 극복하기 위한 FEC, ARQ, Hybrid ARQ 기법 등의 적용방안 검토 후, ATM QoS(Quality of Service) 파라미터를 이용한 성능 분석을 통해 성능개선 효과가 있음을 확인하였다. 또한 이들 기법들간의 성능을 패킷 에러율 및 처리율 측면에서 비교 분석하였으며 이를 바탕으로 무선 ATM망의 성능개선을 위해 트래픽 속성에 따라 효율적으로 적용하기 위한 통합 에러제어 구조를 제안하였다.

Abstract

While ATM technology results in considerable advantages(less overhead, increased throughput) in an optical networks, It causes severe problems(single and burst error) when ATM is transmitted over an error-prone channel, such as wireless link. In this paper we describe our investigation on ATM over wireless network. we first evaluate performance of ATM data transmission over a wireless link. Secondly we analyze performance improvements of Forward Error Correction(FEC) or ARQ(Automatic Repeat reQuest) scheme applied to wireless ATM link and provide performance comparison between FEC and ARQ through the use of packet error rate and throughput. Lastly we suggest error control architecture to overcome the impact of the bit error characteristics of a wireless link on wireless ATM network.

Keywords : ATM, FEC, ARQ

I. 서 론

ATM기술은 광 케이블과 같이 우수한 전송특성

을 갖는 전송매체를 기반으로 개발된 기술이며 ATM 데이터를 광 전송로를 이용하여 전송할 경우에는 오버헤드가 감소하고 처리율을 증가시킬 수 있는 장점을 갖고 있다. 다시 말하면 광전송을 기반

* 유한대학 정보통신과(Dept. of Information and Telecomm., Yuhan College)

** 한국항공대학교 항공통신정보공학과(Dept. of Telecomm. Eng., Hankuk Aviation University)

· 논문 번호 : 980309-031

· 수정완료일자 : 1998년 8월 17일

으로 한 ATM기술은 랜덤특성의 단일비트 에러만 보상하도록 설계되었기 때문에 Rayleigh 및 Rician 페이딩 특성을 갖는 무선링크를 통해서 ATM데이터를 전송할 때 무선채널에서 버스트 에러(10~40 비트)가 발생하면 ATM 데이터의 전송성능은 상당히 저하된다^{[3],[4]}. 한편, 기존의 협대역 무선통신에서는 열악한 무선 전송로의 성능을 개선하기 위해서 트래픽 속성에 상관없이 다이버시티, 등화, FEC(Forward Error Correcting) 및 ARQ(Automatic Repeat reQuest)기법 등을 일괄적으로 적용하는 것이 연구되고 있다^[8]. 그러나 음성, 데이터, 영상 등의 동시성 멀티미디어 트래픽을 처리해야 하는 광대역 무선통신에서는 트래픽별로 QoS(Quality of Service) 목표치가 다르므로 트래픽 속성에 상관없이 일괄적으로 성능개선 기법들을 적용하는 것은 또 다른 성능저하 현상을 초래한다. 결국 멀티미디어 서비스 제공을 목표로 하는 무선 ATM망에서는 각각의 트래픽별로 QoS목표치를 만족시키면서 최상의 통합성능(패킷 에러율, 처리율 등)을 얻을 수 있는 대책이 강구되어야 한다.

따라서 본 논문의 2장에서는 무선 ATM통신망의 구조 및 프로토콜에 대하여 살펴보았으며 3 장에서는 무선 ATM통신망의 무선링크를 단일 및 버스트 에러환경으로 구분하여 ATM 데이터의 QoS(Quality of Service) 파라미터를 이용, 전송성능을 분석하였다. 4장에서는 무선링크를 통한 ATM 데이터의 전송시 열화된 성능을 개선할 수 있는 FEC 및 ARQ기법들을 적용한 후 성능분석을 통해 성능개선 효과를 확인하였으며, 패킷에러율과 처리율을 이용하여 기법들간 성능도 비교 분석하였다.

마지막으로 분석 결과를 토대로 무선 ATM망의 트래픽 속성을 고려한 통합 에러제어 구조를 제안하였다. 5장에서는 본 논문의 주요 연구내용 및 결과를 요약하였으며 향후 연구방향 등 결론을 맺었다.

II. 무선 ATM망

ATM은 B-ISDN을 구현하기 위한 통신방식으로 ATDM(Asynchronous TDM)을 사용하는 특수한 형태의 패킷형 전달방식이며 체계적이고 융통성있는 정보전달을 위해서 프로토콜 계층구조를 갖는데 물리계층, ATM계층, ATM 적용계층 및 상위계층으로 구성된다.

무선 ATM망은 무선환경에서 유선 ATM망과 접속할 수 있고 유선 ATM망에서 제공하는 다양한 광대역 통신서비스를 제공할 수 있는 유선 ATM망의 확장된 개념이다. 그러나 무선 전파환경의 열악한 전송특성을 고려할 때 무선 ATM망에서 제공할 수 있는 서비스의 질과 양적인 측면에서 유선 ATM망과 많은 차이가 예상된다. 무선 ATM망의 기준구성은 그림 1과 같이 라디오 액세스 부분과 고정망 부분으로 구성되며 고정망 부분은 "M(mobile ATM)" UNI 및 NNI에 의해서 규정되고 라디오 액세스 부분은 "R(Radio)" RAL(Radio Access Layer)로 규정된다.

또한 무선 ATM망은 음성, 데이터 및 영상 등의 멀티미디어 서비스에 효율적으로 대처할 수 있는 유연성을 지녀야 하며 이들 서비스들을 효과적으로 제공하기 위해서 이동성, 자원관리, 전송오류율, 프로토콜 참조모델 및 QoS 파라미터 재협상 등에 관

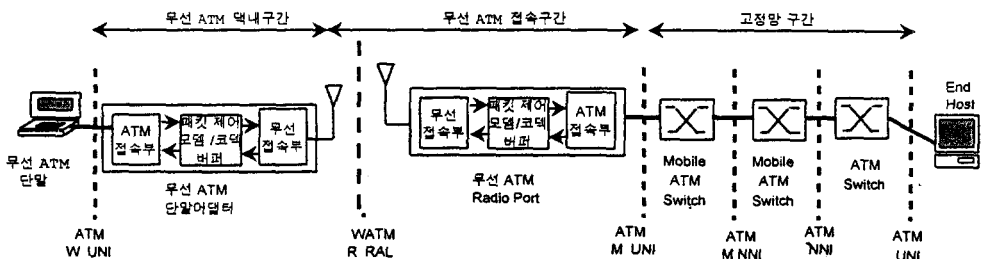


그림 1. 무선 ATM망의 구성

Fig. 1. The reference configuration of wireless ATM network.

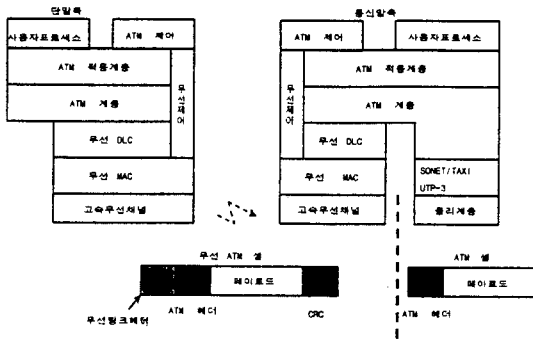


그림 2. 무선ATM망의 프로토콜 계층구조
Fig. 2. Wireless ATM network protocol layer.

한 기능들이 수행되어야 하고 유선망과의 인터페이스가 원활하게 이루어져야 한다. 다시 말하면 ATM망에 무선 액세스 기능을 확장하는 것은 그림 2와 같이 유선 ATM망의 프로토콜 계층구조에 많은 변경이 요구된다. 즉, 무선채널관련 MAC(Medium Access Control), DLC(Data Link Control) 및 무선망 제어계층(Wireless Control Layer)이 기존의 ATM 프로토콜 계층구조에 추가되어야 한다[1],[2].

III. 무선 전송성능 분석

ATM계층의 성능은 물리계층의 BER(Bit Error Rate)등 비트에러 특성에 따른다[4]. 광전송 링크에서는 비트에러가 랜덤하게 분포하나 무선전송 환경에서는 최소의 전력으로 최대의 전송 품질을 얻기 위해 모뎀에 FEC기능이 도입되는데 이 기능이 정상적으로 동작되지 못하는 경우에 비트에러가 버스트형태로 발생한다. 이렇게 무선링크에서 발생된 버스트 에러는 ATM 프로토콜 동작에 영향을 미친다. ATM셀 손실의 정도는 CLR(Cell Loss Ratio)로 나타내어지고 셀에서 에러가 감지되지 못한 경우에 셀이 다른 VC/VP(Virtual Channel/Virtual Path)로 잘못 전송될 수 있으며 이는 CIR(Cell misInsertion Rate) 파라미터로 평가된다. 결국 ATM계층에서는 헤더만 보호되며 페이로드에서 발생하는 에러는 AAL(ATM Adaptation

Layer)에서 감지되어 CER(Cell Error Ratio), SECR(Severely Errored Cell Ratio)등으로 평가된다.

3-1 랜덤 비트에러에 대한 ATM QoS파라메타 분석

독립적이고 동일하게 분포된 랜덤 단일 비트에러가 일정한 BER값 p 로 전송링크에서 발생하는 경우 식 (1)과 같이 이항 분포식을 따른다. 이는 길이 h 의 블록에 n 비트에러가 발생하는 확률로서 CLR, CER, SECR 산출의 기본식이 되며 s 는 단일 랜덤 비트 에러를 의미한다.

$$P_s(n) = {}_h C_n p^n (1-p)^{h-n} \quad (1)$$

CLR은 셀이 폐기되는 확률로서 HEC가 단일 비트에러를 정정할 수 있으므로 2개 이상의 에러가 발생하는 확률, 즉 $1 - P_s(0) - P_s(1)$ 로 계산된다. 그러나 버스트 에러에 대한 취약성을 해소하기 위해서 그림 3과 같이 HEC의 dual-mode상태가 채택된다.

셀 손실율(CLR)은 $P(\text{정정모드}) \cdot P(\text{헤더에 2개 이상 에러 발생}) + P(\text{검출모드}) \cdot P(\text{헤더에 1개 이상 에러 발생}) = P_c [1 - P_s(0) - P_s(1)] + P_d [1 - P_s(0)]$ 가 된다. 여기서 P_c 및 P_d 는 각각 수신측이 정정 및 검출모드에 있을 확률을 말한다. P_c 및 P_d 는 dual mode상태를 갖는 HEC를 2개의 상태를 갖는 Markov chain으로 모델링하여 계산될 수 있다. 상태방정식을 이용하면 $P_c = P_s(0)$ 이고 $P_d = 1 - P_s(0)$ 가 되며 $hp \ll 1$ 인 경우에 $(1-p)^h \approx 1 - hp + \frac{h(h-1)}{2} p^2$ 이 된다.

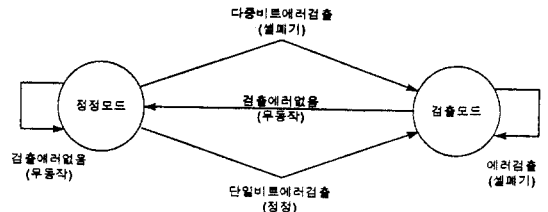


그림 3. HEC 알고리즘의 dual-mode상태
Fig. 3. Dual mode operation of the HEC algorithm.

$$CLR = P_s(0)[1 - P_s(0) - P_s(1)] + [1 - P_s(0)] [1 - P_s(0)] = 2,380p^2 - 123,240p^3 \quad (2)$$

CER은 성공적으로 전달된 셀의 수에 대한 에러 셀의 비로 정의되며 에러셀은 페이로드에 최소한 1개의 에러를 갖고 있는 셀을 말한다. 1개 이상의 랜덤비트 에러가 셀을 hit하는 확률은 식 (1)로 부터 유도된다. 즉, P (페이로드에 1개 이상 에러 발생) $= 1 - (1-p)^i$ 이며 i 는 페이로드의 비트수로 384를 적용한다. $ip \ll 1$ 이라고 하면

$$CER = 1 - (1-p)^i = 1 - P_s(0) = 384p - 73,536p^2 \quad (3)$$

SECR은 성공적으로 전달된 셀 수에 대한 심각한 에러가 발생한 셀 수의 비로 정의되며 셀에서 최소한 $N > 1$ 비트에러가 셀의 페이로드에 발생하는 경우를 심각한 에러 상태라고 한다. N 값이 2인 경우, 페이로드에 비트에러가 발생하는 확률은 식 (4)와 같다.

$$SECR = P(\text{연속적으로 2개 이상 에러발생}) = 1 - P_s(0) - P_s(1) = 73,536p^2 - 28,090,752p^3 \quad (4)$$

3-2 버스트 에러에 대한 ATM QoS 파라메타 분석

평균 버스트 길이와 버스트에서의 에러가 poisson 분포를 따른다고 하면 Neyman-A contagious 모델을 적용할 수 있다^[6]. 이 경우에 평균에러의 버스트 길이가 b 이고 h 비트의 간격에 n 비트의 에러가 발생할 확률 $P_B(n)$ 은 식 (5)와 같다. 여기서 p 는 디코더 출력에서 BER이다.

$$P_B(n) = \frac{b^n}{n!} \exp\left(-\frac{hp}{b}\right) \sum_{j=0}^{\infty} \left(\frac{hp}{b} \exp(-b)\right)^j \frac{j^n}{n!} \quad (5)$$

CLR은 2개 이상의 에러가 발생하는 확률로 모델링할 수 있고 이 경우 HEC의 dual-mode 동작상태와 에러가 검출되지 않는 경우는 무시하기로 한다. P (2개 이상의 에러 발생)는 $1 - P_B(0) - P_B(1)$ 가 되며 $x \ll 1$ 인 경우에 $1 - \exp(-x) = x$ 이고 헤더의 비트수(h)는 40 비트이므로 식 (6)과 같이 계산된다.

$$CLR = 1 - P_B(0) - P_B(1) = 1 - \exp\left(-\frac{hp}{b}\right) = \frac{40}{b}p \quad (6)$$

CER은 페이로드에 1개 이상의 에러가 발생할 확률로 계산할 수 있다. 에러가 버스트 형태로 발생하는 경우에 적용할 수 있는 식 (5)를 적용하면 CER은 식 (7)과 같다. 여기에서 h 는 ATM 셀에서 페이로드의 비트 수이고 p 는 비트에러 확률이며 b 는 평균 버스트 길이이다. 그리고 $b \gg 1$ 이고 $hp/b \ll 1$ 이라고 가정하였다.

$$CER = 1 - P_B(0) = \frac{384}{b}p \quad (7)$$

페이로드에 최소한 $N > 1$ 인 비트에러가 발생했을 때를 심각한 에러 상태라고 한다. 이 경우에 적용할 수 있는 QoS 파라메타인 SECR은 식 (8)과 같으며 $b \gg 1$ 이고 $hp/b \ll 1$ 이라고 가정하였다.

$$SECR = P(\text{최소한 } N > 1 \text{인 비트에러 발생}) = 1 - P_B(0) - P_B(1) = \frac{384}{b}p \quad (8)$$

3-3 결과검토

본 분석에서는 버스트의 길이(b)를 6, 15, 30, 40으로 가정하였다. SECR과 CLR의 경우 랜덤에러 환경에서는 BER의 제곱에 비례하지만 버스트에러 환경에서는 BER에 비례한다. 그리고 CER의 경우는 모두 BER에 비례한다. 그리고 그림 4의 시뮬레이션 결과에서 보듯이 CLR의 경우 버스트에러 환경이 랜덤 에러환경보다 성능이 저하되지만 CER은 오히려 성능이 향상될 수도 있음을 알 수 있다. 즉 CER의 경우 주어진 BER조건에서 길이 b 의 버스트는 단지 하나의 셀에만 영향을 미치지만 b 개의 랜덤 단일비트 에러는 b 개의 셀에 영향을 미칠 수 있기 때문이라고 해석할 수 있다. 결국 버스트 에러환경에서의 SECR, CLR은 랜덤 에러환경보다 성능이 저하되지만 CER은 성능이 개선될 수도 있다.

IV. 전송성능 개선기법

ATM셀을 무선링크를 통하여 전송하는 경우에 광 전송링크를 통하여 전송하는 경우보다 CLR값이 상당히 저하된다는 것을 그림 4의 성능분석 결과

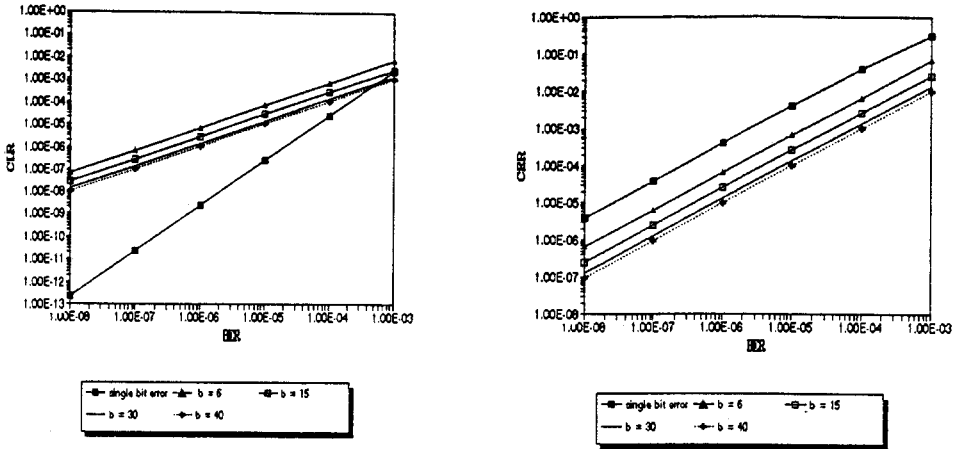


그림 4. BER에 따른 CLR, CER 파라미터 분석결과

Fig. 4. Performance for CLR and CER in terms of the bit error rate.

에서 알 수 있다. 이는 ATM셀이 무선 프레임에 삽입되어 이동단말과 기지국사이에서 송수신되는데 무선구간에서의 송수신시 다중경로 페이딩, 간섭 및 shadowing현상으로 비트에러율이 증가하기 때문이다. 따라서 ATM셀을 무선링크를 통해 전송할 때 성능 저하현상을 보상할 수 있는 방안이 강구되

어야 하는데 대표적인 방안은 표 2와 같다^[5, 6]. 본 장에서는 무선 ATM망에 FEC, ARQ 및 Hybrid ARQ기법을 적용, 이들 기법들의 전송성능을 정량적으로 비교 분석한다.

4-1 에러제어 기법분석

표 1. 트래픽 형태별 서비스 요구조건

Table 1. Service requirements for typical traffics.

트래픽등급	BER	CLR	CDV	CTD
CBR	10^{-4}	$10^{-4} \sim 10^{-6}$	0 ms	10ms~2sec
rt-VBR	10^{-6}	$10^{-6} \sim 10^{-7}$	0 ms	10ms~2sec
nrt-VBR	10^{-9}	$10^{-7} \sim 10^{-9}$	100ms~500ms	-

표 2. 무선 ATM망의 전송성능 개선기법

Table 2. Performance improvement scheme of wireless ATM network.

계층	전송성능 개선기법	비고
ATM 계층	-	-
DLC 부계층	ARQ	기존 ATM 프로토콜에 추가
MAC 부계층	-	기존 ATM 프로토콜에 추가
TC 부계층	다중접속, FEC, 인터리빙	-
PMD 부계층	섹터 안테나, 다이버시티 ^[15] , 등화	-

4-1-1 FEC

FEC코드를 이용하는 첫 번째 방법은 ATM 셀을 전송할 때 패리티 셀을 추가로 전송하여 전송시 오류가 발생한 셀을 정정하는 방식이 제안되고 있다. 이 방법은 기존 프로토콜을 변경시키지 않고 메모리 및 에러 검사 기능만을 일부 추가시키면 사용이 가능하다. 또한 ATM HEC코드(외부코드)와 콘벌루션 코드(내부코드)의 concatenation형태가 이용될 수 있으나 내부코드의 디코딩 에러로 인한 성능저하 현상을 보상하기 위해 콘벌루션 코드의 디코더 출력에서 에러를 분산시킬 수 있는 인터리빙 기법이 추가로 사용되거나 외부코드로 블록코드가 사용될 수 있다.

두 번째 방법은 그림 5와 같이 ATM셀의 헤더 및 페이로드에 다른 FEC코드를 적용하는 데 무선 ATM셀의 HEC가 제거되고 FEC가 각각 헤더 및 페이로드에 추가되는 형태로서 무선 ATM셀이 만들어지기 전에 단일비트 에러는 정정되고 다중비트 에러를 갖는 셀은 폐기된다. 그 후에 HEC는 제거되고 헤더에 FEC를 추가한 후에 에러가 검출되면 무선구간에서 셀이 폐기되며 무선구간후의 유선구간에서 새로운 HEC가 발생된다[5].

세 번째 방법으로서 두 개의 FEC중 한 개는 압축된 헤더(2 바이트)에 적용하고 다른 하나는 가변을 코드로서 48바이트의 데이터 필드에 적용하는 데 코드는 헤더에 포함된 QoS정보에 의해서 결정된다. 가변적인 에러정정 절차를 구현하기 위해 동일한 인코더/디코더 회로를 사용하여 ATM헤더의 QoS정보를 이용, 트래픽 형태에 적합한 가변을 코드를 발생시키고 디코딩하며 가변을 코드로 shortened code가 주로 이용된다[6].

4-1-2 ARQ기법

ARQ기법은 FEC기법과는 다른 형태인데 송신측으로 정보전달에 대한 성공 또는 실패 여부를 통보하기 위한 feedback채널을 갖고 있다. ARQ기법은 이동 무선채널에 적용되는 경우에 FEC기법보다 더 신뢰성이 높으며 SW(Stop and Wait), GBN(Go-Back-N), SR(Selective Repeat)기법이 있다. 이 기법은 CRC(Cyclic Redundancy Code)등의 에러검출 코드와 함께 사용되며 성능평가 파라미터인 기법별 처리율은 식 (9)와 같다[8]. P_b 는 채널 BER, n 은 에러검출 코드의 비트수, k 는 에러검출 코드의 정보비트수, D 는 왕복 전파지연 시간, R_b 는 비트전송율이다.

$$\eta_{SR} = \frac{k}{n} (1 - P_b)^n$$

$$\eta_{GBN} = \frac{(1 - P_b)^n}{(1 - P_b)^n + \{1 - (1 - P_b)^n\}N} \left(\frac{k}{n}\right) \quad (9)$$

$$\eta_{SW} = \frac{(1 - P_b)^n}{1 + \frac{DR_b}{n}} \left(\frac{k}{n}\right)$$

4-1-3 Hybrid ARQ 기법

Hybrid ARQ기법은 FEC와 ARQ기법을 결합한 방식인데 FEC를 사용하는 이유는 소량의 버스트 에러를 정정함으로써 재전송 횟수를 줄이려는 것이다. 그러나 대량의 버스트 에러가 발생하는 경우는 ARQ 기법이 효과적일 수 있다. Hybrid ARQ기법에는 Type I과 TYPE II가 있으며 Type I의 경우 수신기는 에러를 검출하여 정정하며 에러를 정정할 수 없는 상태가 되면 수신된 코드워드를 버리고 재전송을 요구한다. 식 (10)은 Type I 기법중 2개 코

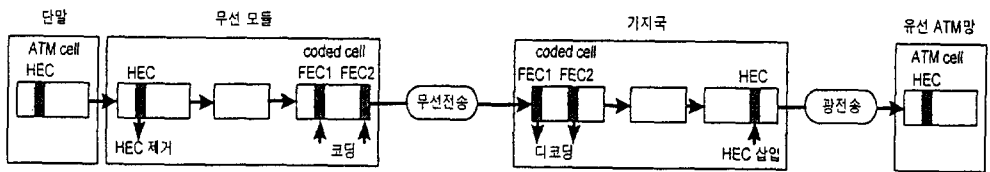


그림 5. 헤더 및 페이로드에 상이한 FEC기법의 적용개념
Fig. 5. Adding and removing HEC /FEC redundant bit.

드를 사용하는 방식의 패킷 에러율 및 각 기법별 처리율을 나타낸 것이다[8].

$$P(E) = \frac{P_{DE}P_e}{1 - P_{DE}P_r} \quad (10a)$$

$$\eta_{SR-TYPE1} = \left(\frac{k}{n}\right)(1 - P_r P_{DE})$$

$$\eta_{GBN-TYPE1} = \left(\frac{k}{n}\right) \frac{1 - P_r P_{DE}}{1 + P_r P_{DE}(N-1)} \quad (10b)$$

$$\eta_{SW-TYPE1} = \left(\frac{k}{n}\right) \frac{1 - P_r P_{DE}}{1 + \frac{\Gamma}{n}}$$

이 때 $P_r = 1 - P_e - P_c$, P_{DE} 는 2개 코드를 사용하는 시스템에서의 FEC 디코딩 에러율, P_e 는 2개 코드를 사용하는 시스템에서 수신된 패킷이 정상적인 패킷이 아닐 확률, P_r 은 수신된 패킷이 검출 가능하나 정정가능하지 못한 에러패턴을 포함할 확률(재전송요구), P_c 는 수신된 패킷이 error-free이거나 정정가능한 에러패턴일 확률, Γ 는 $R_b(t_1+t_2+t_3) = (\text{비트 전송율})(\text{순방향 전송지연} + \text{수신기 처리지연} + \text{역방향 전송지연})$, D 는 왕복전파지연시간($t_1+t_2+t_3$), R_b 는 비트전송율, n 은 FEC코드의 비트수, k 는 FEC코드의 정보비트 수를 의미한다. 그러나 채널의 비트 에러율이 변하는 경우 Type I은 처리율측면에서 성능의 기복이 매우 심하며, 따라서 이를 보완하기 위한 적응형 Type I 및 Type II hybrid ARQ기법이 사용되기도 한다.

4-2 기법별 성능분석

기법들의 성능분석을 위해 무선 채널환경은 Rayleigh 페이딩 채널이라고 하고 변조기법은 QPSK가 사용된다. 무선 ATM셀의 크기는 그림 6과 같이 54 바이트이며, 이 중 48 바이트는 페이로드이고 5 바이트의 길이를 갖는 표준 ATM셀의 헤더는 2 바이트로 압축되며, 여기에 각각 2 바이트의 무선 데이터링크 헤더와 CRC코드가 추가된다.

4-2-1 Concatenated FEC 기법

특히 콘벌루션 코드와 BCH코드로 구성되는 co-

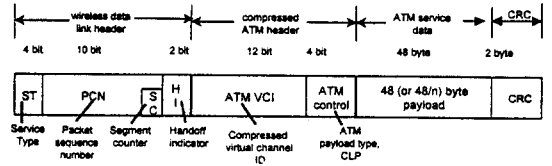


그림 6. 무선 ATM셀 구조
Fig. 6. Wireless ATM Cell.

ncatenation형태의 코드를 분석하기 위해 내부코드는 부호율이 $r=1/2$ 이고 구속장이 $\nu=7$ 인 콘벌루션 코드를 이용하고 외부코드는 (n, k, t) 로 표시되는 BCH코드를 이용한다. 엔코더에서 총 블록길이가 511비트가 되도록 t 에러 정정 패리티 검사 비트들이 만들어지고 전송시 전송효율을 높이기 위해서 총 블록길이가 축소되며 디코더에서는 패리티 검사를 위해 511비트로 재생된다. Rayleigh 페이딩환경에서 QPSK 변조방식의 오율식은 식 (11)과 같고 콘벌루션 코드의 오율은 상한식으로 식 (12)와 같이 정해지며, M 은 QPSK방식이 사용되므로 4가 된다[8]. 그리고 BCH 에러 정정 후 압축된 ATM헤더와 페이로드에 최소한 1비트 에러를 포함하는 패킷 에러율($P_e(\gamma, t)$) 및 처리율($\eta(\gamma, t)$)은 식 (13), 식 (14)와 같이 계산된다.

$$p = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2n}{k\gamma}}} \right] \quad (11)$$

$$p_{be} \leq 1/2(7D^7 + 39D^8 + 104D^9 + 352D^{10}) \quad (12)$$

$$D = 2 \sqrt{\frac{p(1-p)}{M-1}} + \left[\frac{M-2}{M-1} \right] p$$

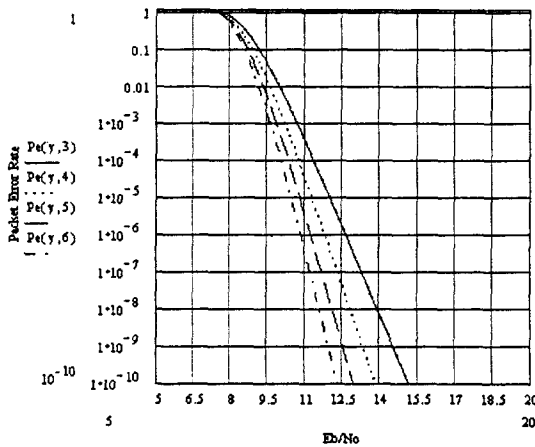
$$P_e(\gamma, t) \leq 1 - \left[\sum_{i=0}^t \binom{n}{i} (1-p_{be})^{n-i} p_{be}^i \right] \quad (13)$$

$$\eta(\gamma, t) = \frac{k'}{n'} (1 - P_e(\gamma, t))$$

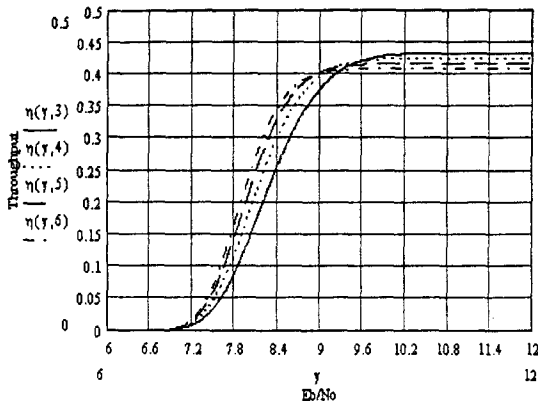
$$= \frac{k'}{n'} \left[\sum_{i=0}^t \binom{n}{i} (1-p_{be})^{n-i} p_{be}^i \right] \quad (14)$$

$$= \frac{k'}{n'} \left[\sum_{i=0}^t \binom{400+9t}{i} (1-p_{be})^{400+9t-i} p_{be}^i \right]$$

이 때 $k'=384$ 비트, $k=k'+16$ 비트, $n=400+9t$ 비트, $n'=2n+32$ 비트= $2(400+9t)+32$ 비트를 의미한다. 즉, k' 는 ATM 셀의 페이로드 길이, k 는 페이로드와 압축된 ATM 헤더의 길이, n 은 ATM셀의 페이로드와 압축된 ATM헤더를 BCH 코딩한 코드길이, n' 는 외부코딩 후 내부 코딩된 무선 ATM셀의 길이로 채널을 통해서 전송되는 비트 수를 의미한다. BER 계산시 Rayleigh 페이딩 채널과 이상적인 인터리빙을 가정하였으며, 식 (13), 식 (14)를 이용한 시뮬레이션 결과는 그림 7과 같다.



(a)



(b)

그림 7. Concatenated 부호시스템의 성능

(a) 패킷에러율 (b) 처리율

Fig. 7. Performance of concatenated coding system.

(a) Packet error rate (b) Throughput

그림 7(a)는 CLR과 CER의 합으로 계산되는 패킷 에러율이 동일한 무선채널의 E_b/N_0 조건에서 에러정정 능력이 증가(t 값이 커짐)함에 따라 성능이 향상되는 것을 나타내고, 그림 7(b)에서는 물리계층의 E_b/N_0 에 따른 처리율을 나타낸 것으로 9.3 dB 정도까지는 에러정정 능력이 더 양호한 부호를 쓸수록 처리율이 향상되나, 9.3 dB 이상의 경우에 무선채널의 성능이 양호해 짐과 동시에 여러 정정 능력이 더 좋은 부호를 사용한다는 것은 코드율의 감소를 의미하며 전체적으로 리던던시의 증가를 초래하므로 처리율이 감소된다는 것을 입증하는 결과이다.

4-2-2 2개의 상이한 코드율을 갖는 FEC 기법

ATM셀의 헤더 및 페이로드에 각각 다른 FEC기법을 적용했을 때의 성능을 분석하기 위해 셀의 헤더를 2바이트로 압축하여 무선 ATM셀에 삽입된다고 가정하고 페이로드는 48 바이트로 한다. FEC코드의 성능분석을 위해 Rayleigh 페이딩 채널하에서 QPSK 변조방식을 이용하는 경우에 식 (15)는 헤더 또는 페이로드의 성능분석 파라미터인 P_{CLR} 또는 P_{CER} 의 도출식을 나타낸다.

$$P_{CLR} \text{ 또는 } P_{CER} = 1 - (1-p)^k \quad (15a)$$

(FEC를 적용하지 않은 경우의 CLR 또는 CER)

$$p = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\gamma}}} \right] \quad (15b)$$

(FEC를 적용하지 않은 경우의 BER)

$$P_{CLR} \text{ 또는 } P_{CER} = 1 - \sum_{i=0}^k nC_i (P_c)^i (1 - (P_c))^{n-i}$$

(디코딩 후의 CLR 또는 CER) (15c)

$$P_c = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{n}{k\gamma}}} \right] \text{ (디코딩 전의 BER)} \quad (15d)$$

그리고 다른 기법들과 성능을 비교하기 위해 헤더와 페이로드를 동시에 고려하는 경우, 패킷 에러율($Pe(\gamma, t_1, t_2)$)과 처리율($\eta(\gamma, t_1, t_2)$)은 식 (16) 및 식 (17)과 같이 구해지며 헤더 및 페이로드의 특

정 에러정정 조건에서의 분석결과는 그림 8에서 보여준다.

$$P_e(\gamma, t_1, t_2) = 1 - \left[\sum_{i=0}^{t_1} n_1 C_i (P_{C1})^i (1 - (P_{C1}))^{n_1 - i} \right] \left[\sum_{i=0}^{t_2} n_2 C_i (P_{C2})^i (1 - (P_{C2}))^{n_2 - i} \right] \quad (16)$$

$$\eta(\gamma, t_1, t_2) = \frac{k_2}{n'} (1 - P_e(\gamma, t_1, t_2)) \\ = \frac{k_2}{n'} \left[\sum_{i=0}^{t_1} n_1 C_i (P_{C1})^i (1 - (P_{C1}))^{n_1 - i} \right] \left[\sum_{i=0}^{t_2} n_2 C_i (P_{C2})^i (1 - (P_{C2}))^{n_2 - i} \right] \quad (17)$$

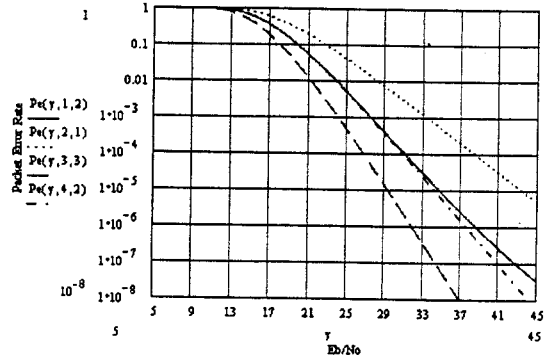
$$P_{C1} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{n_1}{k_1 \gamma}}} \right] \text{ (디코딩 하기전의 BER)}$$

$$P_{C2} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{n_2}{k_2 \gamma}}} \right] \text{ (디코딩 하기전의 BER)}$$

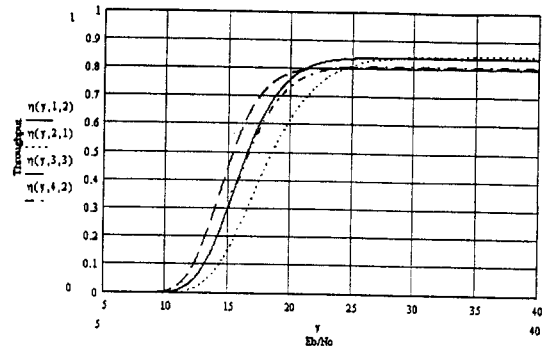
이 때 사용되는 기호의 경우 n_1 은 코딩한 후 헤더의 비트수($16+6t_1, t_1 \leq 5$), n_2 는 코딩한 후 페이로드의 비트수($384+9t_2, t_2 \leq 14$), k_1 은 헤더의 비트수(16), k_2 는 페이로드의 비트수(384), n' 는 헤더 및 페이로드가 각각 코딩된 후 오버헤드가 추가되어 채널에 전송되는 비트수($432+6t_1+9t_2$)를 의미한다. 그림 8(a)는 $P_e(\gamma, t_1, t_2)$ 로 표시되는 패킷 에러율을 의미하며 $P_e(\gamma, 3, 3)$ 일 때 성능이 가장 우수하며 $P_e(\gamma, 2, 1)$ 일 때 성능이 가장 열악한 것을 입증하는 결과이다. 한편 그림 8(b)는 $\eta(\gamma, t_1, t_2)$ 로 표시되는 처리율을 의미하며 처리율이 일정해지는 E_b/N_0 값의 범위에서 $\eta(\gamma, 2, 1)$ 일 때 성능이 가장 양호하고 $\eta(\gamma, 3, 3)$ 일 때 성능이 가장 열악한 것을 보여준다. 이는 패킷에러율과 처리율이 trade-off관계임을 입증하는 결과이다.

4-2-3 Selective Repeat ARQ기법

ARQ기법은 FEC기법과는 다른 형태인데 송신측으로 정보전달에 대한 성공 또는 실패 여부를 통보하기 위한 feedback채널을 갖고 있다. ARQ기법중 SR(Selective Repeat)기법의 성능을 분석하기



(a)



(b)

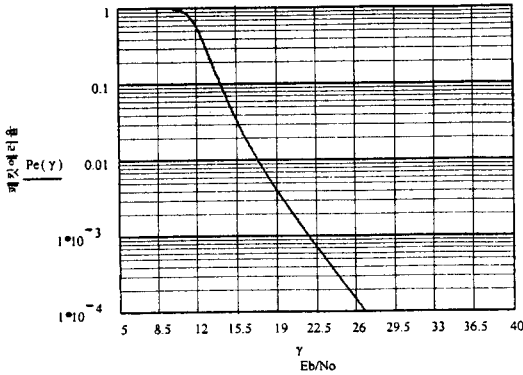
그림 8. 2개의 상이한 코드율을 갖는 FEC기법의 성능
(a) 2개의 상이한 코드율을 갖는 FEC기법의 패킷에러율
(b) 2개의 상이한 코드율을 갖는 FEC기법의 처리율

Fig. 8. Throughput of FEC scheme with two code rate.

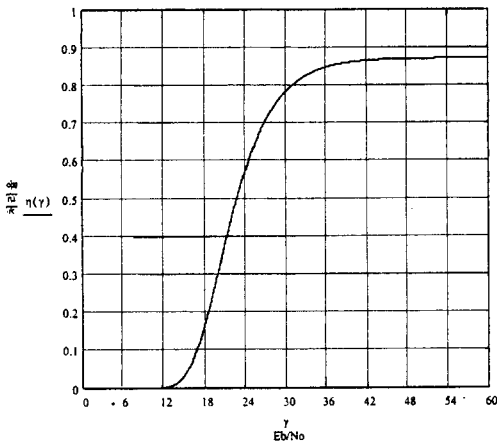
- (a) Packet error rate of FEC scheme with two code rate
- (b) Throughput of FEC scheme with two code rate

위해 패킷에러율과 처리율로 평가하기로 한다. 패킷 에러율은 식 (18), 처리율은 식 (19)와 같으며 그림 9에 나타내었다.

$$P_e(\gamma) = \frac{P_e}{1 - P_r} \quad (18)$$



(a)



(b)

그림 9. SR ARQ기법의 성능

- (a) SR ARQ방식의 패킷에러율
- (b) SR ARQ방식의 처리율

Fig. 9. Performance of SR ARQ scheme.

- (a) Packet error rate of SR ARQ scheme
- (b) Throughput of SR ARQ scheme

$$\eta(\gamma) = \frac{k'}{n'} (1 - P_r) = \frac{k'}{n'} (1 - p)^n \quad (19)$$

이때 $P_e \leq 2^{-(n-k)} [1 + (1-2p)^n - 2(1-p)^n]$, $P_r = 1 - P_c - P_e$, $P_c = (1-p)^n$, $p = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{n}{k\gamma}}} \right]$ 을 이용한다. 그리고 사용되는 기호에서 p 는 채널의 비트 에러율, P_e 는 수신된 패킷이 검출 불가능한

에러패킷을 포함할 확률, P_r 은 수신된 패킷이 검출 가능한 에러패킷을 포함할 확률($P_r < 1$), P_c 는 수신된 패킷이 error-free일 확률, n 은 에러검출코드의 총 비트수(400 bit+9 bit), k 는 에러검출코드의 정보비트수(400 bit), n' 는 코딩된 무선 ATM셀의 총 비트수(432 bit+9 bit), k' 는 ATM셀의 페이로드 비트수(384 bit)를 말한다.

4-2-4 Hybrid Type-I ARQ기법(SR ARQ+FEC/ED)

Hybrid ARQ기법은 Type I과 TYPE II가 있으며 Type I Hybrid방식 중에서도 그림 7에서 보여준 2개의 코드를 사용하는 시스템의 성능을 분석하기로 하며 패킷에러율과 처리율로 평가한다. 패킷에러율 및 처리율은 2개의 코드를 사용하는 경우 예식 (20), 식 (21)과 같이 유도된다^[17].

$$P_e(\gamma) = \frac{P_{de} P_e}{1 - P_{de} P_r} \quad (20)$$

$$\eta(\gamma) = \left(\frac{k'}{n'} \right) (1 - P_r P_{de}) \quad (21)$$

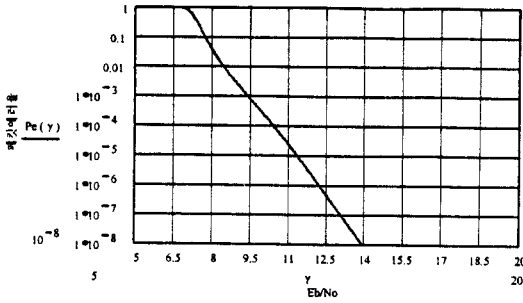
이 기호들간의 관계식은 $P_r = 1 - P_e - P_c$, $P_c \geq (1 - p_{be})^n$, $P_{de} \leq 1 - P_c$, $P_e \leq 2^{-(n-k)} [1 + (1 - 2p_{be})^n - 2(1 - p_{be})^n]$, $p = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{n_2}{k\gamma}}} \right]$, $p_{be} \leq \sum_{d=d_{free}}^{\infty} a_d P(d)$

를 만족한다. 이 때 d_{free} 는 free distance이고 a_d 는 weight spectra이며 $P(d)$ 는 식 (22)와 같다.

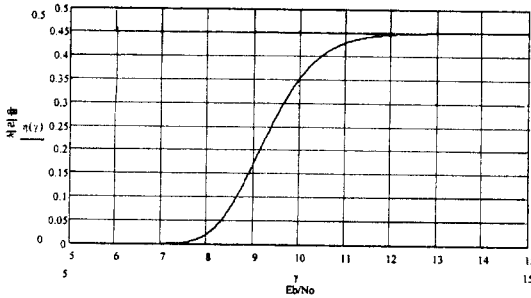
$$P(d) = \sum_{j=\frac{d+1}{2}}^d \binom{d}{j} p^j (1-p)^{d-j} \quad (d: odd) \quad (22a)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=\frac{d}{2}+1}^d \binom{d}{j} p^j (1-p)^{d-j} \\ & + \frac{1}{2} \binom{d}{d/2} (p(1-p))^{d/2} \quad (d: even) \quad (22b) \end{aligned}$$

계산을 간략히 하기 위하여 p_{be} ($M=4$ 인 경우 $\leq 1/2(7D^7 + 39D^8 + 104D^9 + 352D^{10})$ ^[9], $D=2\sqrt{\frac{p(1-p)}{M-1}}$) + $\left[\frac{M-2}{M-2} \right] p$ 를 이용하여 패킷 에러율 및 처리율을



(a)



(b)

그림 10. Hybrid type-I ARQ기법의 처리율

- (a) Hybrid type-I ARQ기법의 패킷에러율
- (b) Hybrid type-I ARQ기법의 처리율

Fig. 10. Throughput of hybrid type-I ARQ scheme.

- (a) Packet error rate of hybrid type-I ARQ scheme
- (b) Throughput of hybrid type-I ARQ scheme

구한다. 사용된 각 기호의 경우 p_{be} 는 convolutional 코드의 비트에러율, P_{de} 는 convolutional 코드의 디코더 에러확률, P_e 는 수신된 패킷이 검출 불가능한 에러패킷을 포함할 확률, P_r 은 수신된 패킷이 검출 가능하나 정정 가능하지 못한 에러패킷을 포함할 확률(재전송요구), P_c 는 수신된 패킷이 error-free이거나 정정 가능한 에러패킷일 확률, n_1 은 ED코드의 총 비트수(400 bit+9 bit), n_2 는 FEC코드($r=1/2$, 구속장=7)의 총 비트수(400 bit+9 bit+409 bit), n' 는 코딩된 무선 ATM셀의 총 비트수(432 bit+9 bit+409 bit), k' 는 무선 ATM셀의 페이로드 비트수(384 bit), A_j 은 무계 j

의 코드워드 수, k 는 $k'+16$ 비트이다. 이와 같은 조건에서 패킷 에러율과 처리율은 그림 10과 같다.

type I hybrid ARQ 기법은 채널의 품질이 열악한 경우에 처리율 성능이 떨어지는 단점을 갖고 있는데, 이를 개선하기 위한 적응형 type I hybrid ARQ 기법은 실시간으로 채널의 BER을 측정하여 채널 상태정보에 따라 최적의 코드율을 선택, 항상 최대 처리율을 얻을 수 있다. 적응형 Type-I hybrid ARQ 기법에서 코드 C_1 (외부코드)은 블록코드 (n, k) 를 이용하며 에러검출기능을 수행하고, 코드 C_2 (내부코드)는 punctured 콘벌루션 코드를 이용하며 메모리 차수(구속장)는 ν , 코드율은 $R=(b-1)/b$ 로 에러정정기능을 수행한다. 처리율은 식 (23)과 같으며 코드율에 따른 분석결과는 그림 11에 나타내었다.

$$\eta = \frac{\text{정보비트의 평균수}}{\text{전송된 채널비트수}} = \frac{k'}{n'}(1 - P_r P_{de})$$

$$= \frac{k'}{\frac{n_1}{R} + 32}(1 - P_r P_{de}) = \frac{384R}{409 + 32R}(1 - P_r P_{de})$$

$$= \frac{384R}{409 + 32R}[1 - (1 - P_c - P_e)(1 - P_c)] \quad (23)$$

이때 $P_c \geq [1 - P_{be}]^{n_1}$, $P_e \leq 2^{-(n_1-k)}[1 + (1 - 2P_{be})^{n_1} - 2(1 - P_{be})^{n_1}]$, $P_{be} \leq \sum_{d=d_{free}}^{\infty} a_d P(d)$, $p = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{n_1/R}{k\gamma}}} \right]$, $P_r = 1 - P_e - P_c$, $P_{de} \leq 1 - P_c$ 를 이용하며 특히 $P(d)$ 는

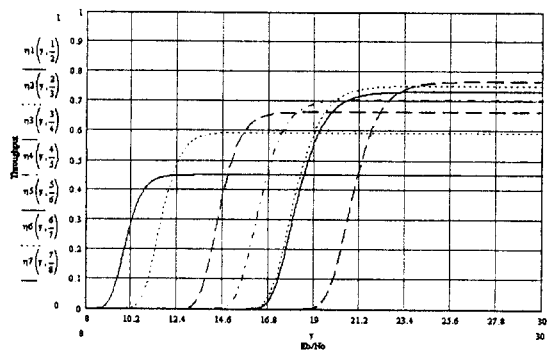


그림 11. 적응형 type I hybrid ARQ scheme의 처리율
Fig. 11. Throughput of adaptive type I hybrid ARQ scheme.

식 (22)를 이용한다^[7]. 사용된 각 기호의 경우 k' 는 페이로드의 비트수로 384 비트, k 는 페이로드와 압축된 ATM 셀 헤더의 비트수로 400 비트, ν 는 7, n_1 은 코드 C_1 의 출력 비트수로 $k+9$, R 은 콘벌루션 코드의 코드율(7/8, 6/7, 5/6, 4/5, 3/4, 2/3, 1/2), n_2 는 코드 C_2 의 출력 비트수로 n_1/R , n' 는 코딩된 무선 ATM셀의 총 비트수로 n_2+32 를 의미한다. 그림 11은 채널의 상태에 따라 코드율을 변경하면 처리율을 향상시킬 수 있다는 결과를 보여준다. 즉 채널의 BER값이 수시로 변하는 경우에 채널의 BER상태에 따라 부호율을 바꾸어 주면 최대의 처리율을 얻을 수 있다는 것을 입증하는 결과이다.

4-3 기법간 성능 비교분석

4-3-1 패킷에러율

Concatenated FEC기법은 $E_b/N_0=12\text{dB}$ 에서 $t=3, 4, 5, 6$ 일 때 각각 9.538×10^{-6} , 3.962×10^{-7} , 1.663×10^{-8} , 7.21×10^{-10} 이며 에러정정능력이 양호할수록 패킷에러율이 감소하고 표 1의 CLR 서비스 요구조건을 만족시킨다고 할 수 있다. 2개의 상이한 코드율을 갖는 FEC기법은 $E_b/N_0=12\text{ dB}$ 에서 $t_1=1, t_2=2$ 일 때 0.956, $t_1=3, t_2=3$ 일 때 0.899이며 에러정정능력이 증가되면 패킷에러율이 약간 감소하나 표 1의 CLR 서비스 요구조건을 만족시키기에는 매우 부족하다. 요구조건을 만족시키기 위해서는 에러정정능력을 상당히 높이거나 E_b/N_0 를 대략 25 dB 이상으로 높여야 할 필요가 있다. SR ARQ기법은 $E_b/N_0=12, 20, 30, 40\text{ dB}$ 에서 각각 0.996, 0.371, 5.422×10^{-3} , 5.451×10^{-5} 이며 신호대 잡음비가 증가할수록 패킷에러율이 감소하나 표 1의 CLR 서비스 요구조건을 만족시키기 위해서는 신호대 잡음비가 40 dB 정도 되어야 한다. Hybrid Type-I ARQ기법은 $E_b/N_0=12, 13, 15\text{ dB}$ 일 때 각각 1.8×10^{-6} , 1.245×10^{-7} , 5.403×10^{-10} 이며 신호대 잡음비가 증가할수록 패킷에러율이 감소하고 $E_b/N_0=12\text{ dB}$ 에서 표 1의 CLR 서비스 요구조건을 만족시킨다.

4-3-2 처리율

Concatenated FEC기법은 $t=3, 4, 5, 6$ 일 때 $E_b/N_0=8\text{ dB}$ 에서 각각 0.14, 0.18, 0.213, 0.237로 에러정정능력이 증가할수록 처리율이 향상되나, $E_b/N_0=11\text{ dB}$ 에서는 각각 0.433, 0.425, 0.416, 0.409으로 에러정정능력이 증가할수록 처리율이 감소하며 E_b/N_0 가 계속 증가해도 0.45이하의 값을 유지한다. 이는 내부코드로 코드율이 1/2인 콘벌루션 코드를 사용한 결과이며 코드율을 높이면 처리율이 증가할 것으로 생각된다. 2개의 상이한 코드율을 갖는 FEC기법은 $E_b/N_0=11\text{ dB}$ 에서 $t_1=2, t_2=1$ 일 때 0.003457, $t_1=3, t_2=3$ 일 때 0.027이며 에러정정능력이 양호할수록 처리율이 증가하나, $E_b/N_0=30\text{ dB}$ 에서 $t_1=2, t_2=1$ 일 때 0.844, $t_1=3, t_2=3$ 일 때 0.805로 에러정정능력이 양호할수록 처리율은 감소하며 E_b/N_0 가 계속 증가해도 0.9이하의 값을 유지한다. 결국 2가지 종류의 FEC기법 모두 처리율이 일정해지는 E_b/N_0 값 범위에서 에러정정 능력의 향상은 오버헤드의 증가를 초래하므로 처리율이 감소된다는 것을 입증하는 결과이다.

SR ARQ기법은 $E_b/N_0=11, 18\text{ dB}$ 에서 각각 3.206×10^{-4} , 0.169이고 $E_b/N_0=27\text{ dB}$ 에서는 0.707로 E_b/N_0 가 증가하면 처리율이 증가하나, E_b/N_0 가 계속 증가해도 처리율은 0.9이하의 값으로 유지된다. Hybrid Type-I ARQ기법은 $E_b/N_0=9, 10, 11, 13, 15\text{ dB}$ 일 때 각각 0.171, 0.352, 0.429, 0.451, 0.452가 되며 신호대 잡음비가 계속 증가해도 처리율은 0.5이하의 값을 유지한다. 이는 코드율이 1/2인 콘벌루션 코드를 사용한 결과이며 요구되는 패킷 에러율을 유지하면서 처리율을 높이기 위해서는 그림 11의 결과에서 보여주듯이 적응형 Hybrid Type-I ARQ기법을 이용하면 코드율이 7/8인 경우에 $E_b/N_0=30\text{ dB}$ 에서 처리율이 0.769로 증가한다. 결국 각 기법들간 최대 처리율의 차이는 코드율에 의존한다고 할 수 있다.

4-4 통합 에러제어 구조제안

무선채널환경은 변화의 폭이 매우 크기 때문에 전송성능을 최적화하기 위해서 에러제어 기법들을 선택하는 것은 무선채널 특성에 의해서 결정되며

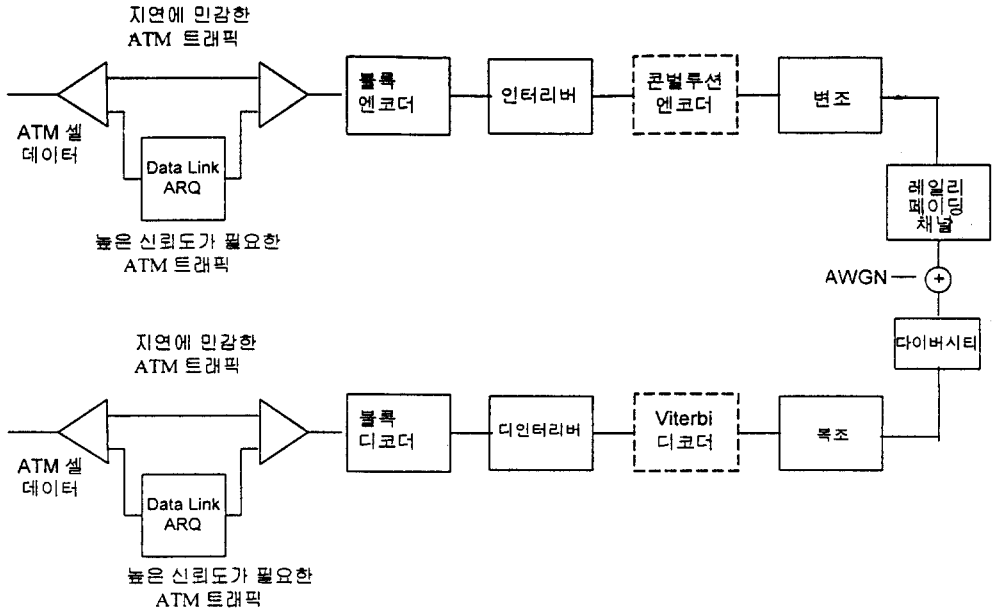


그림 12. 무선 ATM망의 전송성능 개선을 위한 에러제어구조

Fig. 12. Error control architecture to improve wireless ATM network performance.

기법들간에 trade-off가 따르게 된다. 그러므로 서로 다른 채널환경에 대해서 적절한 파라미터를 선택하는 것은 매우 다양하며 에러제어 구조는 채널 환경에 따라 달라진다. 인터리버 / 디인터리버는 버스트성 잡음채널에서만 필요하고 지연에 민감하지 않은 신뢰성있는 트래픽 전달을 필요로 하는 경우에 주로 적용되며 지연에 민감한 트래픽에 대해서는 적합치 않다. 이를 위해서 트래픽을 형태별로 구분하여 적합한 에러제어 기법을 적용하기 위한 다중화 / 역다중화 기능을 도입한다. 지연에 민감한 실시간성 트래픽에 대해서는 가급적 작은 인터리버 길이를 사용하고 블록코드와 콘벌루션코드를 직렬 결합한 concatenated FEC 기법을 적용한다. 그리고 지연에 민감하지 않고 높은 신뢰도를 필요로 하는 ATM 트래픽에 대해서는 길이가 더 큰 인터리버를 사용함과 동시에 콘벌루션코드와 데이터링크 ARQ 프로토콜을 이용하는 적응형 type-I hybrid ARQ 기법을 적용한다. 결국 각 에러제어 기법들이 무선 ATM망의 트래픽 속성에 따라 인터리빙 기법과 함께 그림 12의 통합 에러제어 구조하에서 융통성 있게 적용되어야 한다.

V. 맺음말

본 논문에서는 무선링크의 특성에 따른 ATM셀의 전송성능열화 현상을 극복할 수 있는 FEC, ARQ, Hybrid ARQ 등의 오류제어 기법에 대하여 적용방안을 제시하여 성능을 비교 분석한 후, 이러한 기법들을 트래픽 속성에 따라 무선 ATM망에 융통성 있게 적용하기 위한 통합 에러제어구조를 제안하였다. 결론적으로 ATM기술을 무선통신에 적용하는 경우에 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 채널특성, 전력제한, FEC(Forward Error Correcting) 코드의 디코딩 에러 등, 무선환경에서 발생하는 단일비트 및 버스트 에러의 영향으로 유선환경에서 보다 상당한 전송성능 열화가 필연적이므로 전송성능을 개선시킬 수 있는 기법들이 융통성 있게 통합 적용되어야 할 것이다. 앞으로 트래픽 속성을 고려하여 최상의 성능을 얻을 수 있는 이들 기법들의 통합적용을 위한 구현방안에 대하여 지속적인 연구가 이루어져야 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Dipankar Raychaudhuri, "ATM-based Transport Architecture for Multiservices wireless Personal Communication Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 12, no. 8, October 1994.
- [2] H. Xie, "Data Link Control Protocols for Wireless ATM Access Channels," *IEEE VTC*, pp. 753-757, April 1995.
- [3] S. Ramseier, "ATM over Satellite : Analysis of ATM QoS Parameters," *Proc. of ICC'95*, vol. 3, pp. 1562-1566, 1995.
- [4] S. Agnelli, "Transmission of Framed ATM Cell Streams over Satellite : A Field Experiment," *Proc. of ICC'95*, vol. 3, pp. 1567-1571, 1995.
- [5] Satoru Aikawa, Yasushi Motoyama and Masahiro Umehira, "Forward Error Correction Schemes for Wireless ATM Systems," *ICC '96*, pp. 454-458, 1996.
- [6] Satoru Aikawa, Hijin Sato and Teruaki Yoshida, "Performance Analysis of Variable-Rate for Multimedia Radio Communication," *IEICE Trans. Com.*, vol. E77-B, no. 9, Sep. 1994.
- [7] David Haccoun and Guy Begin, "High-Rate Punctured Convolutional Codes for Viterbi and Sequential Decoding," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 37, no. 11, pp. 1113-1125, Nov. 1989.
- [8] Stephen B. Wicker, *Error Control Systems for Digital Communication and Storage*, Prentice Hall International, Inc., 1995.
- [9] Viterbi, A. J., "Error Bounds for Convolution Codes and Asymptotically Optimum Decoding Algorithm," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-13, no. 4, pp. 260-269, Apr. 1967.

이 하 철



1983년 2월 : 한국항공대 항공통신공학과(공학사)
 1990년 8월 : 한국항공대 대학원 항공통신정보공학과(공학석사)
 1997년 8월 : 한국항공대 대학원 항공통신정보공학과 박사과정 수료
 1983년~1985년 : ETRI 연구원

1985년~1995년 : 한국통신 연구개발본부 선임연구원
 1995년~현재 : 유한대학 정보통신과 조교수
 1993년 12월 : 정보통신기술사
 [주 관심분야] 데이터 통신망, 무선 ATM통신, 통신망트래픽

이 병 섭



1979년 2월 : 한국항공대 항공통신공학과(공학사)
 1981년 2월 : 서울대 대학원 전자공학과(공학석사)
 1990년 5월 : New Jersey Institute of Technology(공학박사)
 1981년~1992년 : ETRI 연구실장

1992~현재 : 한국항공대 항공통신정보공학과 부교수
 [주 관심분야] 위성통신, 신호처리, Adaptive array antenna, 무선 ATM통신