

# 채널 환경을 고려한 무선 ATM MAC 및 DLC 기법

정회원 서정환\*, 서승우\*

## A New MAC and DLC Scheme Considering Channel Conditions in Wireless ATM

Jeong-Hwan Seo\*, Seung-woo Seo\* *Regular Members*

### 요 약

이 논문은 유선 ATM에서 제공하는 QoS가 보장되는 서비스를 무선 환경까지 확장하기 위하여 무선 채널이 대역폭이 제한적이라는 점과 BER이 높은 불안정한 매체라는 문제점을 극복하는 새로운 MAC 및 DLC 방안을 제시한다. 이 논문에서 제안하는 MAC 및 DLC 방안의 특징은 무선 채널 상황과 이동 사용자의 트래픽 클래스 및 요구 QoS를 고려하는 특별한 대역폭 할당 기법 및 적응적인 FEC을 사용하여 무선 채널의 제한된 대역폭의 이용도를 최대한 높이며 이동 사용자의 트래픽 클래스에 맞는 QoS를 보장한다는 점이다. 이 논문에서 제안하는 MAC 및 DLC 프로토콜의 기본적인 동작 원리와 그 과정이 블록 다이어그램을 통해 제시되었으며 그것을 구현하는 무선 ATM 패킷 구조와 트래픽 클래스 또는 요구 QoS에 따른 FEC 및 대역폭 분배 기법 등이 제시되었다. 이 논문에서 제안하는 MAC 및 DLC 방안의 성능을 측정하기 위해서 이동 사용자의 무선 채널 환경에 맞는 모델을 가정하여 시뮬레이션을 수행되었으며 시뮬레이션 결과는 본 논문에서 제시하는 방안이 각 이동 사용자의 무선 채널 상태를 대역폭 할당과 오류 제어에 활용하여 유선 ATM의 트래픽 클래스별 요구 QoS를 무선 환경에서 제공하는 방법으로 적합함을 보여 주고 있다.

### ABSTRACT

In this paper, we propose a new MAC and DLC scheme for wireless ATM. The proposed MAC and DLC protocol utilizes wireless channels as effectively as possible to resolve the wireless channel's bandwidth-limited characteristics. At the same time, the scheme guarantees the QoS of various service classes by means of an adaptive FEC code to overcome the wireless channel's error prone and time varying characteristics. We present the system architecture and procedure of the proposed scheme. Also we present the FEC policy bandwidth allocation principle for a specific ATM traffic class according to channel's condition. In order to verify the usefulness of the proposed scheme, we propose some simulation result. It shows a large improvement in channel utilization and bandwidth allocation since the channel's condition is estimated and utilized both in a bandwidth allocation procedure and in a FEC procedure.

### I. 서 론

차세대 통신은 네트워크 사용자들에게 음성 서비스나 실시간 비디오, 또는 데이터 전송 등의 다양한 종류의 광대역 멀티미디어 종합 서비스를 하나의 망으로 통합하여 제공하는 것을 그 목적으로 한다.

이를 위해 각 사용자들이 요구하는 다양한 서비스들의 QoS(quality of service)를 보장해 주는 새로운 통신 기반 구조가 필요하다. ATM(asynchronous transfer mode)은 이러한 문제를 해결하기 위해 회선 교환 방식의 연결 지향성 특성을 패킷 전송에 도입한 것으로 대표적인 차세대 통신 기반 구조로

\* 서울대학교 전기공학부 컴퓨터통신 및 교환 연구실(seojh2@snu.ac.kr)  
논문번호 : 00150-0505, 접수일자 : 2000년 5월 5일

제안되어 왔다. 무선 ATM(WATM)은 이러한 유선 ATM 기술을 기반으로 광대역 멀티미디어 서비스를 무선 영역까지 확장하여 무선 멀티미디어 이동 통신망을 구축하기 위해 제시되었으며 유선 ATM에서 제공하는 다양한 서비스들의 QoS와 무선 환경에서 서비스 이용자들의 이동성을 동시에 지원하는 것을 목표로 하고 있다<sup>[1][3]</sup>.

그런데 이와 같은 무선 네트워크에서 가장 커다란 문제점으로 대두되는 것은 유선 매체와는 달리 무선 채널은 사용 대역폭의 제한이 많고 전송 시 오류가 생길 확률이 많아 전송 매체로는 기본적으로 부적합하다는 점이다<sup>[4]</sup>. 즉 유선 네트워크는 고용량의 유선 케이블을 깔아 부족한 대역폭을 충분히 늘일 수 있지만 무선 네트워크의 경우 전송 매체인 RF (radio frequency)가 공공의 재산이라는 점과 대부분의 경우 그것의 사용에 인준과 허가를 거쳐야 한다는 점 때문에 사용 가능한 대역폭이 제한적이고 부족하다는 특징이 있다. 또한 상대적으로 오류율이 낮아 상당히 안정적인 유선 채널과는 달리 무선 채널은 높은 심벌 오류 확률을 가지고 있으며 더욱이 이런 오류 확률이 사용자와 기지국 사이의 무선 채널 환경에 따라 시변적인 요소를 지니고 있다. 따라서 WATM에서 제한된 대역폭을 가능한 효과적으로 사용할 수 있게 하는 MAC(media access control) 프로토콜을 설계하는 것은 전체 무선망의 성능을 좌우하는 아주 중요한 일이다<sup>[5][7]</sup>. 특히 WATM에서 MAC 프로토콜을 설계할 때에는 각 서비스마다 다양한 QoS를 보장하는 유선 ATM의 특성을 높은 오류율을 지닌 무선 채널에서 구현하기 위해서 FEC(forward error correction)이나 ARQ (automatic repeat request)같은 특별한 오류 제어 방법을 고려할 필요가 있다<sup>[8][11]</sup>.

이 논문에서는 ATM의 트래픽 클래스별 요구 QoS를 무선 영역에서 지원하기 위한 새로운 MAC 및 DLC(data link control) 방안을 제시한다. 이 논문에서 제시하는 MAC 및 DLC 프로토콜의 특징은 무선 채널 환경을 측정하여 얻어진 채널 상태에 대한 정보와 무선 사용자의 트래픽 클래스 및 요구 QoS에 관한 정보를 MAC 계층의 대역폭 분배 과정과 DLC 계층에서의 FEC 과정에서 이용한다는 점이다. 즉 무선 사용자의 트래픽 클래스와 채널 환경에 대한 정보에 따라 대역폭 할당 순위 및 방법에 변화를 주고 FEC 코드의 오류 정정 능력을 달리하여 대역폭 이용률을 최대화하며 각 사용자별로 해당 트래픽 클래스에 맞는 QoS를 제공한다. 특히

이 논문에서 제시하는 방안은 적응적 FEC를 사용하면서도 페이로드의 전송을 위한 대역폭을 유지한다는 점에서 일반적인 무선 네트워크에서의 적응적 FEC 기법과 차이점이 있다<sup>[10]</sup>. 한편 이러한 방법은 무선 사용자들 사이의 대역폭 할당량의 균형을 유지 못한다는 단점이 있는데 이 논문에서는 무선 사용자별 대기(queueing) 정보를 무선 사용자의 트래픽 클래스와 함께 고려하여 이 문제를 해결하였다.

이 논문의 나머지 부분의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 이 논문에서 제시하는 MAC 및 DLC 프로토콜의 전체 구조와 전반적인 수행 과정에 대하여 설명한다. 특히 MAC 계층 및 DLC 계층의 기능과 구조를 블록 다이어그램을 통해 제시하고 이 논문에서 제시하는 WATM 패킷 구조를 설명한다. 제 3장에서는 채널 BER(bit error rate) 및 무선 사용자의 트래픽 클래스 및 요구 QoS에 따른 FEC 및 대역폭 할당 기법을 제시한다. 특히 트래픽 클래스 별 FEC 기법을 적용하기 위해서 BER에 따른 패킷 오류율을 분석하고 채널 이용도를 정의하고 분석한다. 제 4장에서는 이 논문에서 제시하는 방안의 효율성을 검증하기 위한 시뮬레이션 환경과 패러미터 값을 설명하고 이에 따른 시뮬레이션 결과를 무선 사용자의 트래픽 클래스 별로 제시하고 분석한다. 마지막으로 제 5장에서는 본 논문을 정리하고 전체적인 결론을 제시한다.

## II. 프로토콜의 전체 구조 및 수행 과정

이 장에서는 이 논문에서 제시하는 MAC 및 DLC 프로토콜의 전체 구조와 전반적인 수행 과정에 대하여 설명한다. 프로토콜의 기본적인 동작원리를 시스템 블록 다이어그램을 제시하고 이에 따른 MAC 계층 및 DLC 계층의 상세 기능과 구조를 설명한다.

그림 1은 이 논문에서 제시하고 있는 WATM 프로토콜의 기본 계층 구조도이다. 그림 1에서 WATM은 사용자가 요구하는 QoS에 따른 차별화된 서비스를 연결지향적으로 제공하는 ATM의 특성을 이동사용자와 기지국 사이의 무선망까지 확장하는 역할을 하고 있다. WATM에서의 물리적 계층은 시간에 빠른 오류율의 변화가 크고 오류율 자체가 유선에 비해서 상당히 큰 무선 채널을 통해 전송이 이루어지므로 무선 링크에서 발생한 오류를 제어하기 위한 WATM DLC 계층과 각 이동 사용자의 무선 채널 접근을 관리할 WATM MAC 계층

이 정의되어야 한다<sup>[1]-[4],[7]</sup>.

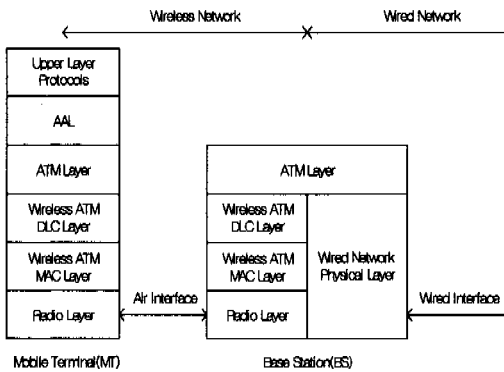


그림 1. Wireless ATM protocol architecture

### 1. WATM MAC 계층

그림 2는 이 논문에서 제안하는 WATM MAC 계층의 블록 다이어그램이다. 우선, 기지국에서 새로운 호 연결을 수락할 때 기지국은 각 이동 사용자와 트래픽 QoS에 관해서 협상을 하게 된다. 이때 기지국은 합의된 QoS에 대한 정보를 각 이동 사용자별로 저장하여 QoS 참조 테이블을 만드는 동시에 각각의 사용자가 요구하는 QoS에 맞는 최적 FEC 수준(FEC 코드의 오류 정정 능력) 참조 테이블을 만든다. 이 최적 FEC 수준 참조 테이블은 각각의 이동 사용자별로 무선 채널의 BER에 따른 적절한 FEC 수준이 어느 정도인지를 나타낸다.

이러한 과정을 통해 기지국으로부터 연결 수락을 받은 이동 사용자가 보내야 할 WATM 셀이 있을 때 각 이동 사용자는 기지국에 보내야 할 WATM 셀의 개수를 알리는 과정을 통해 그것이 필요로 하는 대역폭을 요구한다. 한편 기지국은 이동 사용자의 무선 채널의 BER과 이동 사용자가 요구한 QoS와 대역폭을 바탕으로 각 이동 사용자별로 대역폭을 할당하는데 그 과정은 다음과 같다. 우선 기지국은 각 이동 사용자의 무선 채널의 BER을 산출해 내고 있는 기지국의 채널 측정기에게 각 이동 사용자의 BER 정보를 조회한다. 그리고 이 정보는 WAPLS(wireless ATM packet length settler)에게 통보되고 WAPLS는 이 BER 정보를 바탕으로 적정 FEC 수준 참조 테이블에서 적절한 FEC 수준을 찾아내고 아울러 각 이동 사용자의 WATM 패킷의 길이를 결정한다. 마지막으로 BWAA(bandwidth allocation agency)는 WAPLS에서 넘겨받은 각 이동 사용자의 WATM 패킷의 길이에 대한 정보와

각 이동 사용자가 요구한 대역폭 요구량과 QoS 참조 테이블에서 얻은 각 이동 사용자에게 대한 QoS에 대한 정보를 바탕으로 채널의 대역폭을 여러 이동 사용자들에게 할당한다. 기지국은 이러한 대역폭 할당 정보와 각 이동 사용자의 적정 FEC 수준을 하향 링크에서 각 이동 사용자에게 보낸다.

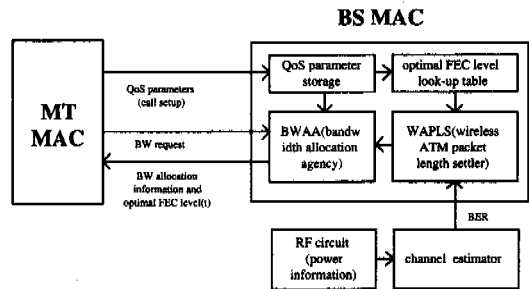


그림 2. Wireless ATM MAC block diagram

▶ 채널 측정기 : 각 기지국에서 받아들인 이동 단말기의 수신 파워를 분석하여 SNR(signal to noise power ratio)를 계산하여 각 이동 사용자의 무선 채널의 평균 BER을 알아낸다. 이 때 산출되는 평균 BER은 다중경로 페이딩 현상에 영향을 받는 순간적인 BER이 아니라 사용자와 기지국 사이의 거리와 shadowing에 의해 영향을 받는 평균 BER이다.

▶ WAPLS(wireless ATM packet length settler) : 이것은 적정 FEC 수준 참조 테이블과 QoS 참조 테이블을 참조하여 각 무선 채널의 BER에 알맞은 적정 FEC 수준과 WATM 패킷의 길이를 결정한다. WATM 패킷은 하나의 WATM 셀과 0개 이상의 PCR(parity check redundancy)셀들로 구성되어 있다. 일단 적정 FEC 수준이 정해지면 WATM 패킷의 길이는 WATM 셀의 길이에 적정 FEC 수준에 알맞은 PCR(parity check redundancy)셀들의 길이를 더하면 된다.

▶ BWAA(bandwidth allocation agency) : 각 이동 사용자의 WATM 패킷 길이에 대한 정보와 각 이동 사용자가 요구한 대역폭 정도와 각 이동 사용자에게 대한 QoS에 대한 정보를 바탕으로 채널의 대역폭을 여러 이동 사용자들에게 할당하는 역할을 하게 된다. 채널 할당 정보를 바탕으로 여러 이동 사용자 사이에서 대역폭을 할당 할 때는 어떤 정보에 우선적인 순위를 두어 할당할지를 정하는 특별한 대역폭 할당기법을 따른다.

2. WATM DLC 계층

그림 3은 이 논문에서 제안하는 Wireless ATM DLC 계층의 블록 다이어그램이다. DLC 계층에서 사용하는 오류제어 기법은 ARQ와 FEC를 결합하여 사용한다. 그림 3에서 ARQ 기법을 사용하기 위해서 송신단에서 전송하고자 하는 ATM 셀에 sequence number와 CRC(cyclic redundancy check)를 붙여서 WATM 셀을 만든다. 채널을 통해 WATM 셀의 전송이 이루어진 후 수신단에서는 CRC를 통해 WATM 셀의 오류 여부를 검사한다. 전송된 셀에 대한 오류 검사가 끝나면 수신단에서는 해당하는 sequence의 셀의 오류 여부를 ACK를 통해 송신단에 알린다. 송신단에서는 오류가 발생한 WATM 셀을 필요에 따라 재전송한다. 유선망에서 주로 사용되는 ARQ 기법은 오류 검출에 높은 성능을 보여 준다. 그러나 유선망과는 달리 높은 오류율을 지닌 무선망에서는 ARQ 기법은 무선 채널의 대역폭 이용도를 지나치게 떨어뜨린다. 이 논문에서는 무선 채널의 높은 오류율을 극복하기 위해 FEC를 ARQ와 결합하여 사용하였다. 그림 3의 DLC는 WATM 셀을 FEC 기법을 사용하여 WATM 패킷을 만들어 이를 송신단과 수신단 사이의 전송에 사용한다. WATM 패킷의 전송 중 FEC 코드의 오류 정정 능력(t) 보다 적은 개수의 비트가 오류가 생긴 경우 이 패킷은 FEC 코덱에서 오류를 정정받게 된다. 만일 FEC 코드의 오류 정정 능력 보다 많은 개수의 비트가 오류가 생긴 경우 이 패킷은 FEC 코덱에서 오류 제어를 받지 못하게 되는데 이 경우 오류 검출 성능이 더 좋은 ARQ의 CRC를 통해 오류가 제어된다<sup>[8]-[10]</sup>.

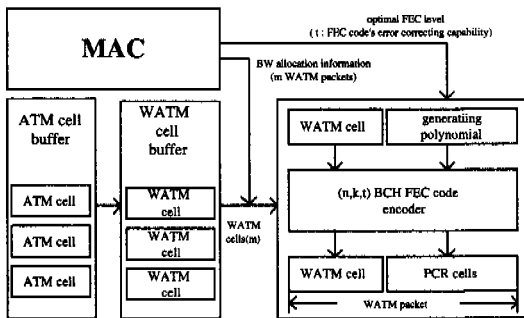


그림 3. Wireless ATM DLC block diagram

3. WATM 패킷 구조

블록 사이즈가 n이고 메시지 비트의 양이 k이며

t개의 오류 정정 능력을 가진 BCH(Bose, Chaudhuri, and Hocquenghem) 코드는 (n, k, t)으로 표시된다. 여기서 t개의 오류 정정 능력이란 이 코드가 n개의 블록 중 t개나 혹은 그 이하의 개수만큼 오류가 생겼을 때 이를 정정할 수 있음을 의미한다. 이 때  $d_{min}$ 을 BCH 코드의 최소 거리, m을 임의의 양의 정수라고 할 때 이 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립한다<sup>[12]</sup>.

$$n = 2^m - 1,$$

$$n - k \leq mt,$$

$$d_{min} \geq 2t + 1$$

본 논문에서 메시지 부분에 해당하는 것은 WATM 셀이고 parity 체크 부분에 해당하는 것은 PCR 셀들이며 전체 FEC 코드의 블록에 해당하는 것은 WATM 패킷 그 자체가 된다. 따라서 정보 비트의 양인 k는 WATM 셀 사이즈인 55 bytes, 또는 440 bits인데 이 때 n 값은 511이나 1023 또는 2047 등등이 될 수 있다. FEC 코덱을 보다 간단히 만들기 위해선 n값을 가능한 작게 잡을수록 좋다. 그러나 n이 511일 때는 FEC 코드 오류 정정 능력의 최대 값이 7로 제한된다는 점을 감안한다면 n값을 1023으로 잡아서 FEC 코드 오류 정정 능력에 어느 정도의 유동성을 주는 것이 바람직하다. 메시지 부분의 길이가 440으로 고정되어 있으므로 정보 비트들 중 몇몇의 leading high-order 비트들을 가상적으로 0으로 세팅하였다. 즉 이 부분은 송신단에서 인코딩할 때는 0으로 세팅하여 인코딩하고 실제로 전송 시에는 전송에서 제외되었다가 수신단에서 디코딩할 때는 다시 0을 삽입하여 디코딩을 한다. 결과적으로 이 논문에서 고려하는 BCH 코드는 (440 + 10t, 440, t)의 형태를 지니게 된다. 그림 4는 WATM 패킷의 구조를 나타낸다.

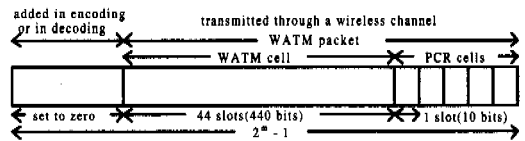


그림 4. WATM packet structure

4. Wireless ATM MAC frame

이 논문에서 제안하는 MAC 프로토콜의 채널 접근 방법은 각 사용자에게 할당된 대역폭의 양을 가

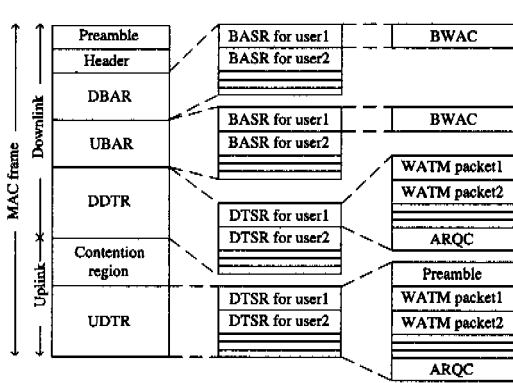


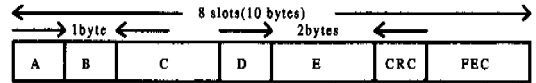
그림 5. MAC frame structure

변적으로 조정하기가 유리한 TDMA(time division multiple access)를 기반으로 하였다. 한 프레임 중 상향 링크와 하향 링크의 구별을 위해서는 하향 sub-frame과 상향 sub-frame의 길이의 비를 조정함으로써 하향 링크와 상향 링크의 대역폭 분배의 비를 유동적으로 쉽게 조정할 수 있는 TDD(time division duplexing) 기법이 적용되었다. 또한 많은 이동 사용자들끼리의 contention을 해결하는 방법으로는 슬롯 할당에 있어서 상당한 유연성을 가지는 PRMA(packet reservation multiple access)를 적용하였다. 즉 프레임용 예약 구간과 데이터 전송 구간으로 나누고 보내야 할 데이터가 있는 사용자는 예약 구간에서 대역폭을 예약하여 일정한 데이터 전송 구간을 할당받아 그 구간동안 데이터를 전송한다. 이렇게 데이터 전송 구간을 예약을 해서 사용함으로써 데이터 전송 시 발생할 수 있는 collision으로 인한 대역폭의 낭비를 최소화할 수 있다. 이 같은 TDMA 와 PRMA 기반의 MAC 프로토콜 설계는 WATM MAC 설계에서 보편적인 경향이 되고 있다<sup>[1],[2],[4]-[7]</sup>.

그림 5는 이 논문에서 제안하는 MAC 프레임의 구조를 보여주고 있다. 프레임의 최소 구성 단위는 10 비트 길이의 슬롯이며, 모든 프레임은 8 슬롯으로 구성된 프리앰블과 해당 프레임의 구조를 설명하는 프레임 헤더로 시작한다. 프레임의 나머지 부분은 여러 개의 region으로 구성되어 있고 각각의 region은 각 사용자를 위한 여러 개의 subregion으로 구성되어 있다. 또한 각각의 subregion은 WATM 패킷 전송을 위한 period나 각 이동 사용자의 프리앰블이나 제어 셀들을 전송하기 위한 period들로 구성되어 있다.

프레임 헤더는 해당 프레임의 거시적인 구조를

설명한다. 프레임 헤더에는 데이터 전송 및 대역폭 할당을 위한 region이나 여러 subregion 혹은 contention region 등의 길이에 대한 정보가 담겨 있다. 각 이동 사용자들은 프레임 헤더를 해석하여 프레임의 전체 길이나 상향 링크나 하향 링크의 길이 등에 대한 정보를 얻게 된다. 그림 6은 프레임 헤더의 포맷을 보여 주고 있다.



- A : the length of DLBAR(downlink BW allocation region) in slots
- B : the length of ULBAR(uplink BW allocation region) in slots
- C : the length of downlink DTSR(data transmission subregion) in slots
- D : the length of contention region in slots
- E : the length of uplink DTSR(data transmission subregion) in slots

그림 6. Frame header

DBAR(downlink bandwidth allocation region)과 UBAR(uplink bandwidth allocation region)은 각 이동 사용자들을 위한 여러 개의 BASR(bandwidth allocation subregion)들로 구성되는데 하나의 BASR은 하나의 이동 사용자에게 대한 대역폭 할당 정보를 전송하기 위한 구간이다. BASR에서는 각 이동 사용자에게 얼마나 많은 WATM 패킷들이 상향 링크 혹은 하향 링크에서 전송하거나 전송 받을 수 있는지 알리고 각각의 이동 무선 채널에 적합한 FEC 수준은 무엇인지 알리기 위해서 BWAC(bandwidth allocation cell)이 사용되어 진다. 그림 7-a는 BWAC 포맷을 보여 준다. 이 중 TSSN(transmission starting slot number)은 언제 각각의 이동 사용자들이 WATM 패킷이나 ACKC(acknowledgement cell) 등의 데이터를 전송하기 시작할지를 표시한다.

DDTR(downlink data transmission region)과 UDTR(uplink data transmission region)은 각 이동 사용자들을 위한 여러 개의 DTSR(data transmission subregion)로 이루어져 있는데 DDTR의 DTSR은 기지국이 ACKC와 함께 WATM 패킷들을 각각의 이동 사용자에게 전송하는 구간이다. 이 경우 ACKC의 용도는 기지국이 이동 사용자들이 전 프레임에서 기지국으로 전송한 패킷의 성공적인 수신 여부를 각각의 이동 사용자들에게 알리는데 사용된다. 그림 7-b는 ACKC 포맷을 나타낸다. 이 포맷에서 RCSN(received cell sequence number)는 기지국이 바로 이전 프레임에서 받은 첫 번째 WATM 패킷의 시퀀스 넘버를 나타낸다. 그리고 acknowledge-

ment bitmap 은 RCSN 이후의 셀들에 대해 성공적인 수신 여부를 체크한다. 이러한 방식의 ACK 방법은 최소한의 대역폭을 사용하여 효과적으로 수신된 여러 셀들에 대해 오류 여부를 표시할 수 있다<sup>[7]</sup>. UDTR은 각 DTSR마다 프레임이 필요하다는 점 빼고는 DDTR과 비슷하게 생각할 수 있다.

BWRC(bandwidth reservation cell)은 contention region에서 각각의 이동 사용자들이 기지국에게 대역폭을 요구하기 위해 사용된다. CBR(constant bit rate) 서비스를 사용하는 이동 사용자가 경우에는 일단 CAC(call admission control) 과정을 거치게 되면 매 프레임마다 보내야 할 WATM 셀의 개수가 일정하기 때문에 BWRC 사용하여 여러 이동 사용자와 contention을 하는 과정이 필요가 없다. 그러나 여타의 서비스를 사용하는 이동 사용자의 경우 프레임마다 보내야 할 WATM 셀의 수가 가변적이기 때문에 전송 대기 중인 WATM 셀의 개수를 BWRC를 사용하여 알릴 필요가 있다. 이런 경우 이동 사용자가 BWRC를 전송할 타임 슬롯은 랜덤한 방법으로 contention region에 있는 타임 슬롯 중 선택하게 된다. 둘 이상의 이동 사용자가 동일한 타임 슬롯을 선택할 경우 collision이 발생하기 때문에 contention region은 연결이 수락된 이동 사용자의 숫자를 충분히 서비스할 수 있을 정도로 커야 한다. 만일 contention 구간이 지나치게 짧을 경우 collision이 많이 발생하여 전송 효율을 떨어뜨릴 수 있다. 따라서 전체 프레임의 길이에 대한 contention 구간의 비는 프로토콜의 성능에 상당한 영향을 끼친다. 그림 7-c는 BWRC 셀의 포맷을 보여 준다.

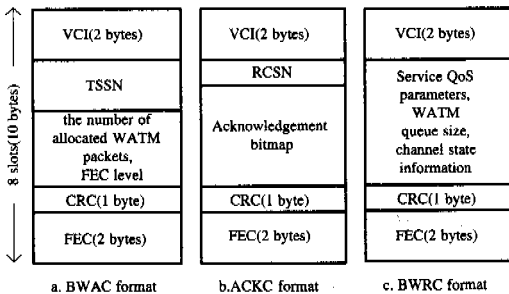


그림 7. Cell formats

### III. FEC 및 대역폭 할당 원칙

이 장에서는 실시간 데이터 전송과 비실시간 데이터 전송의 경우에 대해 채널 BER에 따른 FEC

정책을 제시하고 기지국의 BWAA에서 각 이동 사용자가 요구한 대역폭 정도와 각 이동 사용자에게 대한 QoS에 대한 정보를 바탕으로 채널의 대역폭을 여러 이동 사용자들에게 할당할 때 적용하는 대역폭 할당 기법을 제시한다.

#### 1. PER(packet error rate)분석

우선 N을 하나의 WATM 패킷 전송 시 발생하는 오류의 개수를 나타내는 확률 변수라 하고, p를 BER을 나타내는 랜덤 프로세스라고 하자. 그럼 다음과 같은 수식을 생각할 수 있다.

$$P_N(N=i) = \int_{\langle \bar{p} \rangle} P_{N/\bar{p}}(N=i/\bar{p}=\bar{\rho})P(\bar{p}=\bar{\rho})d\bar{\rho} \quad (1)$$

이 식을 간단히 풀기 위해서 채널의 BER이 한 WATM 패킷 전송 동안 p로서 일정하다고 가정하자. 그럼 N은 다음과 같이 binomial 분포를 따른다고 가정할 수 있다.

$$P_N(N=i) = \binom{n}{i} (1-p)^{n-i} p^i \quad (2)$$

WATM 셀이 오류가 생기는 경우는 WATM 패킷의 오류개수가 FEC 코덱에서 오류 정정 능력, t를 넘는 경우이다. 따라서 CER(cell error rate)는 다음과 같은 식으로 주어진다<sup>[8][9]</sup>.

$$CER = \sum_{i=t+1}^n P_N(N=i) = \sum_{i=t+1}^n \binom{n}{i} (1-p)^{n-i} p^i \quad (3)$$

#### 2. 실시간 트래픽을 위한 FEC 정책

CBR 및 VBR(variable bit rate) 트래픽과 같은 실시간 데이터는 지연에 민감하다는 전송 특성을 갖는다. 따라서 전송 중 WATM 셀에 오류가 발생할 경우 오류가 발생한 WATM 셀을 재전송할 시간적 여유가 없다. 따라서 이런 경우는 채널 BER이 일정하다고 가정할 때 CER이 호 수락시 무선 사용자에게 보장해 주기로 한 값 이하에 있도록 하는 것이 좋다. 결과적으로 실시간 트래픽을 위한 FEC 코드의 적정 FEC 수준  $t_{opt}$ 은 다음 식으로부터 구하게 된다.

$$CER = \sum_{i=t+1}^n P_N(N=i) \leq P_{QoS} \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^n P_N(N=i) \geq 1 - P_{QoS} \quad (5)$$

$n = 440 + 10t$  이므로

$$\sum_{i=0}^{440+10t} \binom{440+10t}{i} (1-p)^{440+10t-i} p^i \geq 1 - P_{QoS} \quad (6)$$

이 때  $P_{QoS}$ 란 호 수락이 일어날 때 이동 사용자에게 보장해 주기로 한 CER이다. 실시간 전송의 경우 적정 FEC 수준  $t_{opt}$ 은 식 (6)을 최소로 하는 값이다.

### 3. 비실시간 트래픽을 위한 FEC 정책

ABR(available bit rate) 및 UBR(unspecified bit rate) 트래픽과 같은 비실시간 데이터의 전송에서는 전송 지연에 대한 제약이 거의 없다. 따라서 비실시간 데이터의 전송 중 WATM셀에 오류가 생겼을 때는 재전송을 하면 되기 때문에 FEC 수준을 채널 이용도를 최대화시켜 주는 값으로 정하는 것이 좋다. 채널 이용도는 채널의 BER이 0이라고 가정했을 때 하나의 WATM 셀을 전송하기 위해 필요한 대역폭을 현재 채널의 BER에서 전송시 전송이 성공하기까지 필요한 평균적인 총 대역폭으로 나눈 값으로 정의되는데, 이 경우 채널 이용도(U)는 다음과 같이 산출될 수 있다.

$$U = \frac{L_{wc}}{L_{wc} E[N_T]} \quad (7)$$

$$= \frac{L_{wc}}{L_{wp} \sum_{k=1}^{\infty} k(1-CER) CER^{k-1}} \quad (8)$$

$$= \frac{L_{wc}(1-CER)}{L_{wp}} \quad (9)$$

$$= \frac{L_{wc}}{L_{wp}} \sum_{i=0}^t P_N(N=i) \quad (10)$$

여기서  $L_{wc}$ 는 WATM 셀의 길이이고  $L_{wp}$ 는 WATM 패킷의 길이이며  $N_T$ 는 하나의 WATM 셀을 전송하기 위해 시도한 총 전송 횟수를 나타낸다. 비실시간 데이터의 경우  $t_{opt}$ 는 식 (11)을 최대화하는 값이다. 높은 오류 정정 능력은 오류가 생긴 WATM 셀의 재전송을 줄인다는 점에서는 채널의 이용도를 높이기도 하지만 높은 오류 정정 능력 자체는 PCR 셀들의 개수를 늘리기 위해 더 많은 대역폭을 요구한다는 것을 의미하기 때문에 그 결과

하나의 WATM 셀의 길이 당 WATM 패킷의 길이는 늘어나서 채널의 이용도를 줄이기도 한다. 채널의 BER이 일정할 때,  $t$ 값이  $t_{opt}$ 보다 작을 땐  $t$ 값이 증가함에 따라 채널의 이용도도 역시 높아지지만  $t$ 값이  $t_{opt}$ 보다 클 때는 오히려  $t$ 값이 증가함에 따라서 채널의 이용도는 떨어지게 된다. 그림 8은 BER이 0.006일 때 FEC 수준에 따른 채널 이용도의 변화를 나타내고 있다. 이 경우  $t_{opt}$ 는 7이다. 한편  $t_{opt}$ 값 자체는 채널 환경이 열악해 질수록 즉 BER이 높을수록 증가하는 경향을 보인다. 표 1은 이러한 BER에 따른  $t_{opt}$ 값의 변화를 보여 주고 있다.

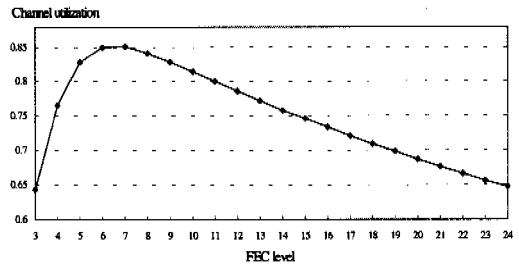


그림 8. Channel utilization

### 4. 무선 채널 환경을 고려한 대역폭 할당 기법

유선 ATM에서 제공하는 QoS를 무선 영역에서 최대한 보장하기 위해서 무선 채널 환경을 고려한 특별한 대역폭 할당 기법이 필요하다. 기존 무선 네트워크에서 열악한 채널 환경을 극복하기 위한 적응적인 FEC 기법을 사용할 경우 FEC를 위한 대역폭은 사용자의 페이로드의 전송을 위해 할당된 대역폭을 사용하였다. 이런 방법은 무선 채널의 오류율이 높아질수록 FEC를 위한 대역폭 필요량이 늘어나게 되고 그 결과 페이로드의 전송률이 저하되는 현상을 가져온다. ATM의 서비스 클래스 중 CBR이나 VBR과 같은 실시간 데이터들은 전송 지연에 민감하기 때문에 이러한 방법으로는 CBR이나 VBR과 같은 트래픽 클래스의 QoS를 만족시킬 수 없다. 따라서 이 논문에서는

그림 5의 WATM 패킷의 구조와 같이 채널 상황에 관계없이 페이로드에 대한 일정한 대역폭을 보장해 주고 채널 상황에 따라서 FEC에 필요한 대역폭을 덧붙이는 방법을 사용하였다. 그림 5의 WATM 패킷 구조는 채널 상황에 관계없이 WATM 셀에 대한 대역폭을 유지하고 채널 상황이 변함에 따라 오류 컨트롤을 위한 PCR 셀들을 덧붙이는 구조로 되어 있다.

표 1. Lookup table for an optimal FEC level of non-real-time traffic

채널 BER 범위	$t_{opt}$
0 - $0.5 \times 10^{-4}$	0
$0.5 \times 10^{-4} \sim 1.35 \times 10^{-3}$	1
$1.35 \times 10^{-3} \sim 2.38 \times 10^{-3}$	2
$2.38 \times 10^{-3} \sim 3.51 \times 10^{-3}$	3
$3.51 \times 10^{-3} \sim 4.71 \times 10^{-3}$	4
$4.71 \times 10^{-3} \sim 5.94 \times 10^{-3}$	5
$5.94 \times 10^{-3} \sim 7.18 \times 10^{-3}$	6
$7.18 \times 10^{-3} \sim 8.43 \times 10^{-3}$	7
$8.43 \times 10^{-3} \sim 9.67 \times 10^{-3}$	8
$9.67 \times 10^{-3} \sim 1.089 \times 10^{-2}$	9
$1.089 \times 10^{-2} \sim 1.210 \times 10^{-2}$	10
$1.210 \times 10^{-2} \sim 1.329 \times 10^{-2}$	11
$1.329 \times 10^{-2} \sim 1.446 \times 10^{-2}$	12
$1.446 \times 10^{-2} \sim 1.560 \times 10^{-2}$	13
$1.560 \times 10^{-2} \sim 1.672 \times 10^{-2}$	14
$1.672 \times 10^{-2} \sim 1.782 \times 10^{-2}$	15
$1.782 \times 10^{-2} \sim 1.890 \times 10^{-2}$	16
$1.890 \times 10^{-2} \sim 1.995 \times 10^{-2}$	17
$1.995 \times 10^{-2} \sim 2.098 \times 10^{-2}$	18
$2.098 \times 10^{-2} \sim 2.199 \times 10^{-2}$	19
$2.199 \times 10^{-2} \sim 2.297 \times 10^{-2}$	20
$2.297 \times 10^{-2} \sim 2.393 \times 10^{-2}$	21
$2.393 \times 10^{-2} \sim 2.487 \times 10^{-2}$	22
$2.487 \times 10^{-2} \sim 2.578 \times 10^{-2}$	23
$2.578 \times 10^{-2} \sim 2.688 \times 10^{-2}$	24
$2.688 \times 10^{-2} \sim 2.756 \times 10^{-2}$	25
$2.756 \times 10^{-2} \sim 2.842 \times 10^{-2}$	26
$2.842 \times 10^{-2} \sim 2.925 \times 10^{-2}$	27
$2.925 \times 10^{-2} \sim 3.007 \times 10^{-2}$	28
$3.007 \times 10^{-2} \sim 3.087 \times 10^{-2}$	29
$3.087 \times 10^{-2} \sim 3.166 \times 10^{-2}$ 이상	30
$3.166 \times 10^{-2}$ 이상	31

한편, 이동 사용자의 무선 채널 상태가 데이터를 전송하기에 심각하게 나쁜 경우 해당 이동 사용자의 트래픽은 대역폭을 할당 대상에서 제외된다. 이 경우 대역폭이 할당된다고 하더라도 패킷 오류 때문에 재전송을 하거나 버리게 되어 결과적으로 대역폭을 낭비하는 결과가 되기 때문이다. 그러나 이러한 이동 사용자에게 대해서는 채널 상태가 다시 좋아졌을 경우 같은 상태의 다른 이동 사용자에게 비해 대역폭 할당에 있어서 더 높은 우선 순위를 주어 적정 시간동안 할당된 전체 대역폭은 비슷한 수준으로 유지해 준다.

표 2는 클래스별 트래픽 특성 및 이에 대한 FEC 정책 및 대역폭 할당 원칙을 정리한 표이다.

표 2. Traffic policy for each service class

traffic class	delay	loss	service rate	FEC policy	BW allocation
CBR	bounded	permitted	constant	satisfy PER	1st priority
VBR	bounded	permitted	variable	satisfy PER	high priority
ABR	unbounded	sensitive	variable	maximize utilization	low priority
UBR	unbounded	permitted	unspecified	maximize utilization	low priority

그림 9는 트래픽 클래스별 대역폭 할당 원칙을 구현하는 알고리즘이다. 그림에서 CBR, VBR, ABR 및 UBR 트래픽 사용자의 총수는 각각 k, l, m, n 명이다. 기본적인 대역폭을 할당하고 나서 총 할당 대역폭(BWA\_All)이 한 프레임 당 제공할 수 있는 대역폭(BW\_frame)보다 많을 경우 대역폭 재할당을 하는 방식으로 구현되었다. 재할당 시 각 서비스 클래스별 대역폭 할당 우선 순위는 CBR, VBR, ABR, UBR 순이다. 그림 10은 그림 9의 Initial BW allocation 부분의 상세 플로우 차트이다. 각 트래픽 사용자의 채널 BER이 미리 정해진 트래픽의 BER 임계치(BER<sub>thi\_CBR</sub>, BER<sub>thi\_VBR</sub>, BER<sub>thi\_ABR</sub>, BER<sub>thi\_UBR</sub>)를 넘을 경우 대역폭 할당 대상에서 제외된다. 한편 비실시간 트래픽 클래스(ABR, UBR)의 경우 대역폭을 할당받지 못한 사용자에게 대해서는 다음 프레임이나 채널 상태가 다시 좋아졌을 경우 대역폭 할당에 있어서 더 높은 우선 순위를 주기 위해 Waiting 정보(CBR<sub>i\_WAIT</sub>, VBR<sub>i\_WAIT</sub>, ABR<sub>i\_WAIT</sub>, UBR<sub>i\_WAIT</sub>)에 이를 기록해 둔다.

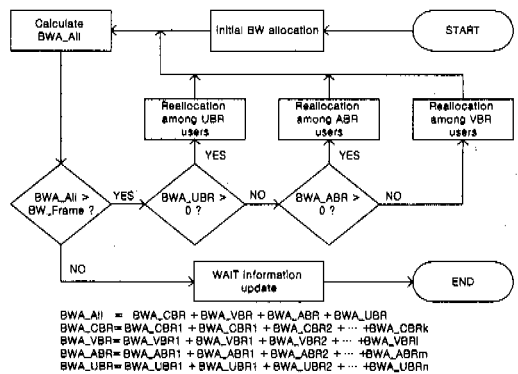


그림 9. Flow chart for BW allocation



그림 11은 VBR, ABR 및 UBR 트래픽에 대한 대역폭 재할당 알고리즘이다. 채널상황(FEClevel)이 안 좋을수록 Waiting 정보가 작을수록 대역폭 할당에서 제외된다. 역시 제외된 사용자의 Waiting 정보는 증가한다.

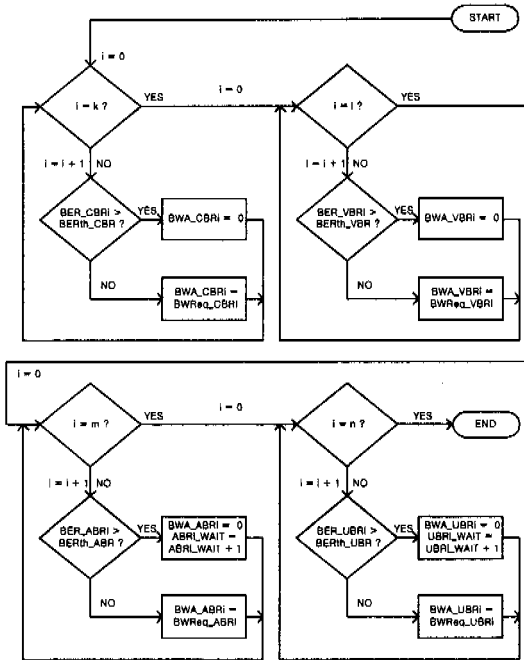


그림 10. Flow chart for initial BW allocation

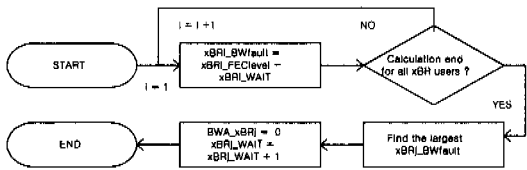


그림 11. Reallocation for xBR user(VBR, ABR, UBR)

#### IV. 시뮬레이션 및 결과 분석

##### 1. 시뮬레이션 모델

시뮬레이션을 위한 무선 채널 모델과 이동 단말의 분포 및 이동성 모델은 다음과 같다. 시뮬레이션을 위한 파라미터 값들은 표 4에 정리하였다.

1) 평균 신호 파워 P와 이동 단말기와 기지국 사이의 거리 R의 관계는 propagation exponent n을 사용하여 다음과 같이 표현된다<sup>[14]</sup>.

$$P \propto R^{-n} \quad (12)$$

2) 평균 신호 파워는 로그 노말 분포를 따르는데 이것의 의미는 평균 신호 파워에 로그를 취했을 때 그것의 분포가 가우시안 분포가 됨을 의미한다. 이 논문에서는 신호 파워의 로그 노말 분포의 표준편차(σ)값을 8dB로 잡았다<sup>[13][14]</sup>.

3) 다중 경로 페이딩은 짧은 시간 간격을 두고 측정되는 신호 파워에 영향을 끼친다. 채널에서 짧은 시간을 두고 관찰된 신호 파워(R)은 오래 시간을 두고 관찰된 평균 신호 파워(P)값을 평균으로 하는 exponential 분포를 갖는다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다<sup>[13][14]</sup>.

$$f_R(r) = \frac{1}{P} e^{-\frac{r}{P}} \quad (12)$$

4) SNR은 신호 파워와 노이즈 파워의 비로 표시 되는데 이 논문에서 노이즈 파워는 일정하다고 가정하였다. 따라서 이동 단말기의 SNR은 신호 파워와 같은 모양의 확률 분포를 지닌다고 생각할 수 있다.

5) SNR을 S라 할 때 채널 BER은 BPSK 변조를 가정하면 다음과 같이 얻어진다.

$$p = Q(\sqrt{2S}) \quad (14)$$

$$Q(x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

6) 시뮬레이션 지역 반경은 850m이고 시뮬레이션 지역을 다음 표와 같이 총 57개의 shadowing 구역으로 나누었다. 각 shadowing 구역은 표 3과 같이 각 구역을 대표하는 거리와 그 거리에서의 평균 SNR 값이 주어진다. 각 shadowing 구역의 평균 SNR 값은 거리 대표 평균 SNR을 평균으로 하고 표준편차 8dB로 하는 로그 노말 분포로부터 구하였다. 단 각 shadowing region의 SNR값은 로그 노말 분포를 따르되 10dB에서 32dB사이의 값을 가지도록 조작하였고 특히 100m이하에서는 32dB로 고정시켰다.

표 3. shadowing region

거리 대표값	거리 범위	shadowing 구역 개수	평균 SNR
	0m ~ 100m	1개	32dB
300m	100m ~ 450m	8개	32dB
600m	450m ~ 700m	16개	20dB
800m	700m ~ 850m	32개	15dB

7) 무선 터미널의 시작 위치 좌표는 기지국이 관리하는 지역 전체에서 uniform distribution을 가진다고 가정하였다. 무선 터미널의 이동 방향은 수평축과 수직축 두 개의 방향을 가지고 초기에는 왼쪽, 오른쪽, 위쪽, 아래쪽이 동일한 확률로 그리고 일정 시간의 update 간격이 지날 때마다 각각 미리 주어지던 확률  $P_f, P_g, P_h, P_b$ 으로 이동 방향을  $0^\circ, +90^\circ, -90^\circ, 180^\circ$  바꾸게 하였다. 이동 터미널의 속도는 5~60km/h에서 이동 터미널마다 임의의 값으로 고정시켰다.

표 4. Simulation parameter and data

Carrier frequency	5GHz	Mobiles' number	20
transmission BW	25Mbps	CBR Mobiles's number	12
frame capacity	26Kbytes	VBR Mobiles's number	3
frame duration	10.4ms	ABR Mobiles's number	3
BS Separation	850m	UBR Mobiles's number	2
Propagation Exponent(n)	4	Mobiles' speed	5~60km/h
$\sigma$	8dB	$P_f$	0.75
shadowing region	57개	$P_g$	0.1
modulation scheme	BPSK	$P_b$	0.05

2. 시뮬레이션 결과

그림 12는 고정 FEC 방식의 경우 FEC의 오류 정정 능력에 따른 실시간 트래픽(CBR, VBR)의 평균 CER 값의 변화를 보여 주고 있다. 실시간 트래픽은 전송한 바와 같이 전송 지연에 민감하기 때문에 사용자의 요구 CER을 보장해 주어야 한다. 무선 링크에서 제공해 주어야 할 CER을 0.001이라고 할 때 이 논문에서 가정한 시뮬레이션 환경에서 고정 FEC 방법의 경우 FEC 수준이 27이상이어야 사용자의 요구 CER을 만족시킬 수 있다. 이어야 한다. 그림 13은 고정 FEC 방식의 경우 FEC의 오류 정정 능력에 따른 전체 트래픽(CBR, VBR, ABR, UBR)의 평균 채널 이용도 U 값의 변화를 보여 주고 있다. 이 논문에서 가정한 시뮬레이션 환경에서 고정 FEC 방법의 경우 FEC 수준이 8일 때 U는 최대 값이 되었다.

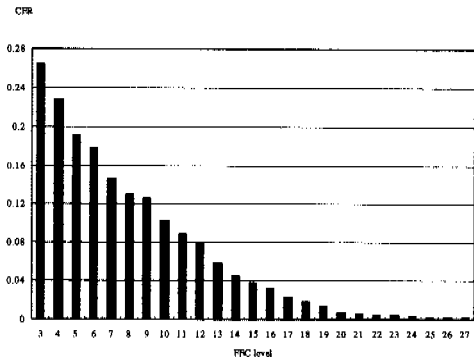


그림 12. Average CER for real time traffic

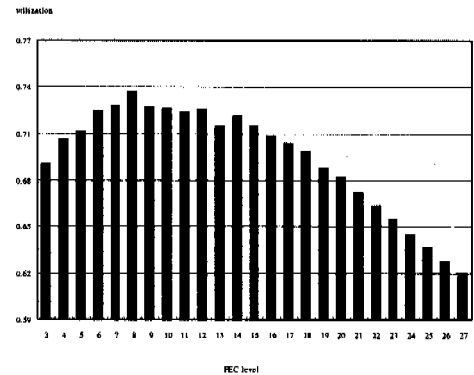


그림 13. Average utilization for all traffic

그림 14와 그림 15는 이 논문에서 제시하는 MAC 및 DLC 방안의 성능을 고정 FEC 방안과 비교한 것이다. W, X, Y 는 각각 FEC 수준이 8, 14, 27로 고정된 경우이고 Z는 이 논문에서 제시하는 방안의 결과이다. Y의 경우 사용자 요구 CER 0.001을 만족시킨다. 그러나 이 경우 채널 이용도는 0.62 이하로 낮아져 실시간 트래픽의 QoS를 지원하기 위해 대역폭이 지나치게 낭비되고 있음을 알 수 있다. 또한 채널 이용도가 가장 높은 W의 경우 대역폭을 효과적으로 사용하긴 하지만 CER이 0.13으로 지나치게 높아 실시간 트래픽의 전송에 적합하지 못하다. FEC 수준을 8과 27 사이의 적당한 값 14로 한 X의 경우 채널 이용도는 FEC 수준이 8인 경우와 비슷하고 CER도 0.045 정도로 비교적 상당히 낮은 값을 유지할 수 있다. Z의 경우 사용자의 요구 CER도 만족시키고 전체적인 평균 채널 이용도도 가장 높은 값을 보인다. 이러한 결과는 그림 16을 통해서도 확인할 수 있다. 그림 16은 이 논문에서 제시하는 MAC 및 DLC 방안의 실시간

트래픽과 비실시간 트래픽의 대역폭 할당량 및 이용 상태를 고정된 FEC를 사용하는 방안과 비교하기 위해 만든 그래프이다.

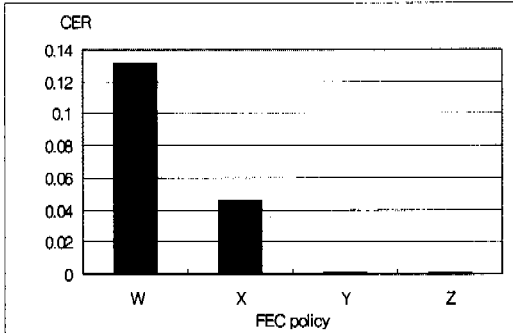


그림 14. Average CER for real time traffic

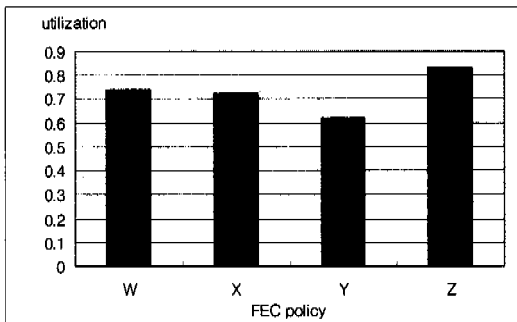


그림 15. Average utilization for all traffic

그림 16에서 영역 A는 전체 대역폭 중 전송에 오류 없이 전송된 실시간 트래픽 WATM 셀이 차지하는 비율을 나타낸다. 영역 B는 전체 대역폭 중 영역 A를 위해 간접적으로 사용된 대역폭의 비율이다. 실시간 트래픽 전송 중 셀 오류로 인해 낭비된 대역폭이나 오류 없이 전송된 패킷 중 WATM 셀을 제외한, FEC를 위해 덧붙여진 PCR 셀들의 전송을 위해 사용된 대역폭 등이 영역 B에 해당한다. 마찬가지로 영역 C와 영역 D를 더하면 전체 대역폭 중 비실시간 트래픽 전송을 위해 할당된 대역폭의 비율이며 이 중 영역 D는 오류 없이 전송에 성공한 비실시간 트래픽 WATM 셀의 대역폭 사용 비율이며 영역 C는 이를 위해 간접적으로 사용된 대역폭 양의 비율을 나타낸다. W와 X의 경우 그림 15에서처럼 CER이 높아서 그림 16의 A의 영역이 작고 이것은 결국 실시간 트래픽 페이로드의 전송량이 감소하게 되고 CBR이나 VBR 트래픽 이용자의 서비스 품질이 저하되게 된다. Y의 경우 실시간 트래픽 페이로드의 전송량을 유지하기 위해서 소비되는 대역폭(B)이 지

나치게 많아서 전체 대역폭의 효율이 떨어지게 된다. 전반적으로 W, X, Y는 무선 사용자의 채널 환경의 변화를 FEC 기법이 고려하지 않기 때문에 B에 대한 A의 비 혹은 C에 대한 D의 비 자체가 상당히 낮다는 사실을 알 수 있다. Z의 경우 비실시간 트래픽에 대해서 채널 이용도를 최대화 시키기 때문에 C에 대한 D의 비가 상당히 높다. 실시간 트래픽에 대해서는 사용자의 QoS를 만족시키는 것을 우선 시하기 때문에 B에 대한 A의 비는 C에 대한 D의 비만큼 높지만 않다. 그러나 W, X, Y에 비해서는 월등히 높다. 즉 Z의 경우 실시간 트래픽에 대해서 QoS를 만족시키는 조건 아래에서 채널 이용도를 최대화시키고 있는 것이다.

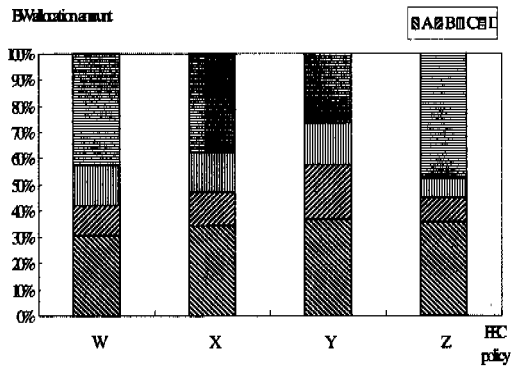


그림 16. Comparison of bandwidth allocation amount

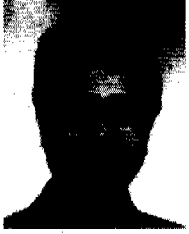
## V. 결론

이 논문은 유선 ATM의 특징인 QoS를 보장하는 서비스를 무선 영역에서 확대 제공하는 것에 초점을 맞추었다. 무선 채널의 높은 BER과 시간에 따른 채널 상태의 변화에 대처하며 부족한 대역폭을 효과적으로 이용하고 실시간 트래픽의 전송을 지원하기 위한 QoS 문제를 해결하기 위해 이 논문은 적응적 FEC를 WATM에 도입하고 이동 사용자가 사용하는 트래픽 클래스에 맞는 FEC 방식을 제공하였다. 이러한 적응적 FEC 방식과 더불어 무선 채널 환경을 고려한 트래픽 클래스에 따른 대역폭 할당 원칙을 제공하여 보다 효과적으로 대역폭을 이용하는 방식을 제시하였다. 이 논문에서 제시하는 MAC 및 DLC 방안은 페이로드의 전송을 위한 대역폭을 유지한 채 무선 사용자의 채널 상황에 맞게 적응적으로 FEC를 수행하는 것이 가능하며 전송 지연에 민감한 실시간 트래픽의 경우 실시간 트래픽이 요구하는 전송 지연을 만족시키기 위한 CER



서 승 우(Seung-woo Seo)

정회원



1987년 2월 : 서울대학교

전기공학과 졸업

1989년 2월 : 서울대학교

전기공학과 석사

1990년 3월~1991년 6월 :

서울대학교 기초전력

연구소 및 제어계측

공학과 연구원

1993년 12월 : 미국 펜실베니아 주립대학교 전기공  
학과 박사

1993년 8월~1994년 7월 : 미국 펜실베니아 주립대  
학 전산기공학과 조교수

1994년 8월~1996년 7월 : 미국 프린스턴 대학 전기  
공학과 및 POEM연구소 연구원(미국 과학  
재단 선발 연구원)

1996년 9월~현재 : 서울대학교 전기공학부 조교수

<주관심 분야> 고속 통신망, 광 통신망, 유/무선 교  
환 시스템