

ATM 망에서의 ABR 서비스 제어 알고리즘에 관한 성능평가

박희대, 육동철, 박승섭
부경대학교 컴퓨터멀티미디어공학부

Performance Evaluation for ABR Service Control Algorithms over ATM network

Hee-Dae Park, Dong-Cheol Yuk, Seung-Seob Park
Division of Computer Multimedia, Pukyong Nat'l University

요 약

초고속통신의 실현과 다양한 멀티미디어 정보의 QoS를 향상시키기 위한 ATM 방식은 TCP/IP 통신의 기본적인 전송 메카니즘으로 사용되고 있다.

TCP가 ATM 망의 ABR 서비스를 사용할 때, ABR의 율 기반 제어와 TCP 흐름제어 사이에 상호 작용이 없는 한, TCP/IP 트래픽 성능을 향상시키기 위해서는 ABR 트래픽 제어가 중요시 되어진다. 이런 환경하에서 ATM 망의 ABR 트래픽을 좀더 효율적으로 제어하기 위해서는 EFCI-ER 스위치 방식의 상호혼용 운영이 불가피하다.

본 논문에서는 이러한 상호혼용을 위하여 EFCI-ER 스위치의 혼용망을 모델로 하여 여러 가지 ER 스위치 알고리즘을 이용하여 대역할당의 공정성, 셀 손실을 그리고 처리율을 구하였다. 시뮬레이션 결과로써 여러 가지 ER 스위치 알고리즘 중에서 망의 형태에 영향을 덜 받으면서 VC(Virtual Channel)에 공정하게 대역폭을 할당할 수 있는 하나의 알고리즘을 나타내었다.

1. 서론

초고속통신을 위한 ATM(Asynchronous Transfer Mode) 기술은 광대역종합통신망(B-ISDN: Broadband Integrated Services Digital Network))을 실현하기 위한 방식이며, ATM은 하나의 물리적 링크를 통하여 다양한 특성을 갖는 트래픽을 처리하게 된다.

ATM Forum TM(Traffic Management) 4.0 에서는 ATM 트래픽을 CBR(Constant Bit Rate), rt-VBR(real-time Variable Bit Rate), nrt-VBR(non real-time Variable Bit Rate), ABR(Available Bit Rate), UBR(Unspecified Bit Rate)의 5종류의 서비스로 정의하고 있다[1].

CBR과 rt-VBR은 음성이나 영상 등의 실시간 서비스에, nrt-VBR, ABR, UBR 서비스는 비실시간 비연결성 서비스에, CBR은 연결 설정 후에는 일정한 양

의 대역이 할당되어 안정된 서비스가 보장되며, 지연에 민감한 음성, 영상 등의 서비스에 응용된다. VBR은 CBR과 같이 연결이 종료될 때 까지 서비스가 보장되며 ABR 보다 우선 순위가 높다. 따라서 ABR은 CBR, VBR같은 보장형 서비스가 사용하고 남은 여분의 링크 가용 대역폭을 활용하여 전송하기 위한 서비스이며, 이에 대한 연구가 ATM 포럼을 중심으로 활발히 수행되고 있으며 ABR 트래픽 제어를 위한 여러 가지 우수한 알고리즘이 제안되어져 왔다.

그러나 여러 가지 망의 형태, 네트워크 특성에 따른 서로 다른 성능을 보여 경제성과 네트워크 환경에 맞는 ABR 트래픽 제어 알고리즘이 필요하다. 효율적인 ABR 트래픽 제어를 위해 EFCI-ER 스위치 혼용 망에서 병목구간에서만 ER 스위치를 사용해도 모든 구간에 ER 스위치를 모두 사용한 것과 같은 결과를 보여왔다[4][5]. 그러나 ER 스위치 알고리즘의 종류나

망의 형태에 따라 ABR 서비스 결과가 다르게 나타날 수 있다.

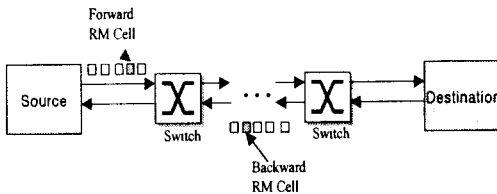
따라서 본 논문에서는 ATM 망에서 ABR 트래픽의 효율적인 제어를 위해서 EFCI-ER 스위치를 상호혼용하는 망을 시뮬레이션 모델로 하여 여러 개의 VC에 공평하게 대역폭을 할당할 수 있고, 망 형태에 영향을 덜 받는 하나의 알고리즘을 나타내었다.

2. ATM의 기본개요

ATM 기술은 기본적으로 연결성 방식이며, 다양한 멀티미디어 트래픽을 전송하기 위해서 모든 트래픽을 고정된 크기인 53 바이트의 데이터 크기를 가지는 셀로 나눠 전송한다. 각 셀들은 5바이트의 헤더와 48바이트의 사용자 정보로 구성된다.

2.1 RM 셀(Resource Management Cell)

RM 셀은 망의 자원관리를 위해서 사용되는 정보를 가지는 셀로서 소스, 목적지 종단 시스템과 스위치 사이에서 전방향 혹은 역방향으로 전송된다. 기본적으로 RM 셀은 전송되는 방향에 의해서 FRM(Forward RM) 셀과 BRM(Backward RM) 셀 두 가지로 구분될 수 있다. RM 셀의 흐름도는 그림 1과 같으며, 양방향성 트래픽의 경우에는 동일 가상연결에서 양방향으로 FRM 셀과 BRM 셀이 동시에 전송될 수 있다.



(그림 1) RM 셀의 흐름

RM 셀의 Payload 필드 정보에 의해 FRM 셀과 BRM 셀이 구분되어지며, 목적지 종단 시스템에서 DIR(Direction bit)에 의해 변환되며, 종단 시스템에서 설정되어있는 여러 가지 파라미터를 이용하여 ACR(Allowed Cell Rate)을 조절하게 된다.

2.2 ATM 트래픽 흐름제어

ATM에서는 서비스 클래스에 따라서 서로 다른 흐름제어를 하게 된다. ABR 서비스에서는 ATM 계층 자체에 율 기반 흐름제어를 제공한다. 그리고 스위치 폭주 제어와 모든 VC 간에 공평하게 자원을 할당 위

해 RM 셀의 피드백 정보에 따라 ACR를 조절할 수 있는 ER(Explicit Rate)방식과 데이터 셀의 EFCI 비트로 폭주여부를 확인하는 EFCI(Explicit Forward Congestion Indication)방식이 있다.

2.2.1 EFCI 방식

모든 셀 헤더에 EFCI 필드가 있어 데이터 셀 전송 시 폭주가 발생하면 데이터 셀 헤더에 있는 EFCI비트를 표시하는 것이다. 만약 큐의 길이가 폭주라고 설정된 임계치를 넘으면 그 스위치를 지나는 셀들은 셀 헤더에 있는 EFCI 비트를 세팅한다. 만약 큐의 길이가 임계치 이하로 떨어지면 스위치를 지나는 셀들은 EFCI 비트를 세팅하지 않는다[8]. 그래서 송신원은 피드백하는 데이터 셀 헤더에 있는 EFCI 비트가 세팅 여부에 따라 자신의 전송속도를 조절한다.

그러나 모든 VC가 버퍼를 공유하므로써 망구성 형태와 종단시스템 형태에 따라 대역폭의 불공평성 문제가 발생되며, 가상 채널 노드와 노드사이의 길이가 길 경우에 셀들이 보내지면 그 셀들은 자신의 EFCI 비트가 세팅될 확률이 높고 자신의 전송률을 높일 기회는 줄어드는 beat down 문제가 발생된다.

2.2.2 ER 피드백 방식

ER 피드백 방식은 VC에 공평한 대역 할당을 위해 송신원이 데이터 셀과 함께 RM 셀을 수신원에 전송하는데, 여러 스위치를 통과한 데이터 셀과 RM 셀 필드 정보에 의해 폭주 정도 여부와 공정한 대역폭을 수신원은 계산해서 송신원에 피드백 시킨다. 이에 송신원은 피드백되어 온 RM 셀의 각 CI, NI, ER, CCR 등의 필드값을 이용해서 ACR를 조절한다. 이 ACR 조절은 그림 2와 같다.

```

if CI bit in RM cell = 0
  if ER > ACR then
    ACR = ACR + RIF * PCR
  if ER < ACR then
    ACR = ER
if CI bit in RM cell = 1
  if ER < ACR then
    ACR = ACR - ACR * RDF
  ACR = ER
    
```

(그림 2) ER 스위치 방식의 의사코드

2.3 ER 스위치 알고리즘

2.3.1 EPRCA(Enhanced Proportional Rate Control Algorithm) 알고리즘

이 알고리즘은 fare share 계산을 통한 ER 개념을

도입하여 VC간의 불공평성을 크게 개선한 방식이다 [2]. 모든 컨택션이 두 개의 임계값인 QT(Queue Threshold), DQT(Damage Queue Threshold)를 가진 공동 큐를 사용한다고 가정한다. 매 전송되는 순방향 RM 셀을 수신시에는 스위치는 지수분포를 사용해서 MACR(Mean Allowed Cell Rate)을 다음과 같이 계산한다.

$$MACR = (1 - a) * MACR + a * CCR$$

여기서, a 는 지수 평균 요소이고, CCR(Current Cell Rate)은 현재의 셀 율이며 일반적으로 a 는 1/16으로 한다. 공평한 대역폭 *fair share*는 다음과 같다.

$$FairShare = DPF * MACR$$

DPF(Down Pressure Factor)는 1 보다 적은 압력계수를 의미한다. 스위치는 큐의 길이가 임계점 이상을 넘어가면 되돌아오는 RM 셀의 CI 비트를 세팅한다. 이 때 송신원은 계속해서 $ACR = ACR * RDF$ (Rate Decrease Factor)만큼 자신의 전송률을 감소시킨다. 송신원이 되돌아오는 RM 셀을 받을 때 폭주가 해제되어 전송률의 증가가 허락되어진다면 AIR(Additive Increase Rate) 양만큼 전송률을 증가시킨다. 만약 CI=0이면 새로운 ACR은 $ACR = MIN(ACR + AIR, ER, PCR)$ 로 값이 바뀐다.

2.3.2 ERICA(Explicit Rate Indication for Congestion Avoidance) 알고리즘

이 알고리즘은 폭주 회피형 스위치 알고리즘이다 [6][9]. ERICA 알고리즘은 측정된 입력률을 현재의 부하지수(load factor) z 를 계산하기 위해 스위치가 목표로 하는 목표 전송률(target rate)은 가용링크 대역폭의 90~95%정도로 설정되는데, 계산된 부하지수 z 의 범위에 따라서 ER 계산방법을 다르게 적용한다. 부하지수(load factor) z 의 정의는 다음 식과 같다.

$$z = \frac{Input\ Rate}{Target\ Rate}$$

현재의 전송률이 CCR인 VC에 대하여 스위치에 인가된 부하만을 고려한 ER 값은 다음과 같다.

$$ER\ based\ on\ load = ER1 = \frac{CCR}{Load\ Factor\ z}$$

이 때 각 VC들 간의 공평성은 모든 VC가 최소한 *fair share* 만큼의 전송률을 보장받으면 되므로 다음과 같은 *fair share* 계산이 필요하다.

$$Fair\ share = \frac{Target\ capacity}{Number\ of\ active\ VCs}$$

*fair share*와 스위치에 인가된 부하에 근거하여 계산

한 ER을 함께 고려하면 새로운 ER값은 다음과 같다.

$$ER2 = MAX\{FairShare, ER1\}$$

만약 계산된 ER2 값이 RM 셀의 ER 필드의 값보다 작으면 스위치는 ER2 값을 RM 셀의 값으로 대체한다. 이것은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$ER = MIN\{ER, ER2\}$$

2.3.3 NIST 알고리즘

이 알고리즘은 입력율과 목표율을 사용해서 load factor를 계산하고 각 순방향 RM 셀에서 ACR 값을 읽어서 각 VC의 ACR에 대해 지수 분포적인 가중치를 부여한다[3]. 이는 MACR를 계산하기 위한 것으로 다음의 식으로 표현된다.

$$MACR = (1 - AVF) * MACR + AVF * ACR$$

여기에서 AVF(Average Factor)는 가중치 1/16로 설정되었으며, 이 식은 단지 오버로드나 언더로드될 때 사용되고, 대역폭 할당은 다음과 같이 MAIR (Mean Additive Increase Rate)로 다시 재조정된다.

$$MACR = MACR + MAIR$$

스위치는 역방향 RM 셀에 ER 값을 계산해서 되돌려 보내는데 폭주 상태이면 $ER = MACR * MRF$ (MACR Reduction Factor = 0.95)로 계산되고, 폭주가 발생되지 않았을 때 $ER = MACR$ 로 계산되어 진다. 모든 접속의 MCR이 0이라 가정할 때 *fair share*는

$$Fairshare = \frac{Available\ Bandwidth}{All\ Active\ Connections}$$

이다.

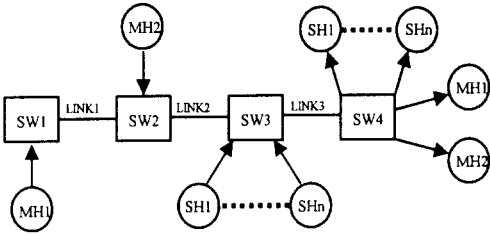
3. 시뮬레이션 환경

여러 가지 ER 알고리즘에 따른 성능비교를 위한 시뮬레이션 도구는 미국의 NIST(National Institute of Science and Technology)에서 개발되어 공개된 "ATM Simulator"를 사용하였다[7].

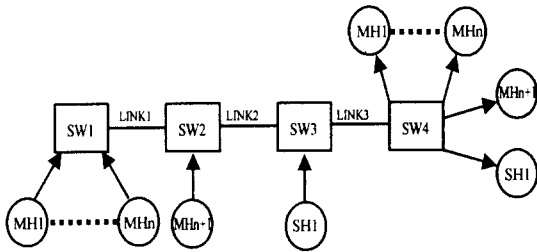
그림 3, 그림 4와 같이 병목 구간에서 기존의 여러 가지 ER 스위치 알고리즘 성능비교를 위한 시뮬레이션 망 모델이며, 이 모델은 경제성과 상호 혼용성을 고려해 병목 구간에서만 ER 스위치를 사용해도 문제가 없음을 보인 시뮬레이션 망 모델을 기초로 하고 있으며 [5][10][11] 현재까지도 ABR 서비스를 위해 EFCI와 ER 스위치의 혼용 성능비교가 연구 대상이다.

시뮬레이션 모델은 단일 홉(SH : Single Hop)과 다중 홉(MH : Multi Hop) VC들로 구성된 그림 3 망

모델 1, 그림 4 망 모델 2와 같은 두 가지의 망 모델 형태로 모든 송신원들(sources)은 시뮬레이션의 시작과 동시에 셀을 전송하고, 송신원에 허락된 최대 셀율로 항상 셀을 망으로 전송하는 일정한 모델로 가정한다.



(그림 3) 망 모델 1



(그림 4) 망 모델 2

모든 VC가 SW3의 출력 링크를 경유하기 때문에 SW3만이 폭주스위치가 된다. 망 모델 1은 병목 스위치에 단말기 수를 n 개 증가시킨 모델이고, 그래서 비병목 스위치 보다는 SW3이 VC수가 많고, 망 모델 2는 비병목 스위치에 n 개 단말기를 증가시켜 병목 스위치에 비해 SW1이 VC가 많은 모델로 가정하여 ABR 서비스 제어 알고리즘의 성능을 비교 분석한다.

NIST ATM망 시뮬레이터를 사용한 ABR 서비스 트래픽 파라미터는 표 1과 같으며 목표 율(Target Rate)은 95%로 정의했다.

<표 1> ABR 트래픽 제어 파라미터

파라미터	정의	값
PCR	Peak Cell Rate	155 Mbps
MCR	Minimum Cell Rate	1.49 Mbps
ICR	Initial Cell Rate	7.49 Mbps
RDF	Rate DecreaseFactor	1/16
RIF	Rate Increase Factor	1/16
Qhigh	High Threshold	600 cells
Qlow	Low Threshold	400 cells

4. 시뮬레이션 결과 분석

이 장에서는 ER 스위치의 서로 다른 알고리즘에 대한 성능을 비교 분석하였다.

4.1 망 모델 1과 망 모델 2간의 ACR 변화율

그림 5, 그림 6, 그림 7, 그림 8, 그림 9, 그림 10, 그림 11 및 그림 12는 망 모델 1과 망 모델 2에서 VC 수의 증가에 따른 ACR변화율을 보여준다. VC는 병목 스위치나 비병목 스위치에 각 VC가 5개씩 증가를 가정하고, 20개의 VC와 40개의 종단 시스템을 사용하여도 근사한 결과가 도출되어 이를 단순화시켜 시뮬레이션 수행한 결과이다. 각각의 VC가 할당받을 수 있는 대역폭은 22Mbps가 이상적인 할당 값이다.

그림 5, 그림 6, 그림 7, 그림 8, 그림 9, 그림 10, 그림 11 및 그림 12에서 대역폭 할당의 공정성을 유지하기 위해서 데이터 전송 상송구간에서 약간의 하향 곡선을 그린다. 약간의 하향곡선 후에 안정적이고 공평한 대역폭까지 도달하게 되며, 특히 그림 11, 그림 12에서는 일정한 값(여기서는 약 22Mbps정도)을 지속적으로 유지하여 대역폭의 공정성을 유지하게 된다. 그림 5와 그림 6은 두 EFCI 알고리즘을 사용했을 때의 결과 값으로 각 VC에 대해서 공평한 대역폭의 할당하지 못하고 있다.

그림 7, 그림 8, 그림 9, 그림 10, 그림 11은 SW3이 각각 EPRCA, NIST, ERICA 알고리즘을 사용한 스위치로써 병목 구간이나 비 병목 구간에서의 VC 수 증가에 따른 ACR 대역폭 할당에서 그림 7, 그림 8은 약간의 변화가 있고 그림 11, 그림 12는 거의 변화가 없다.

NIST, ERICA 두 알고리즘은 효율성과 공정성을 보장하는 동시에 부하가 적은 가상체널은 망의 형태와 상관없이 *fair share* 만큼 송신원의 전송률을 접근시켰다. NIST 알고리즘을 사용한 그림 7, 그림 8은 약간의 진동이 있음을 알 수 있고, ERICA 알고리즘을 사용한 그림 11, 그림 12는 전송률의 수렴 속도가 빠르고 진동이 거의 없다.

그러나 EPRCA를 사용한 그림 9, 그림 10은 망 모델 1과 망 모델 2에서의 차이점이 분명히 나타나고 있다. 이러한 문제점은 스위치가 폭주를 감지할 때 큐의 길이에 의존함을 알 수 있다.

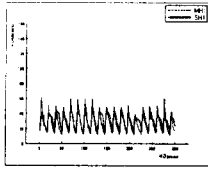
이러한 문제점 때문에 폭주가 일어난 다음에 폭주에 대한 각 송신원에 통보가 늦고 역방향 RM 셀의 CI=1 설정된 값을 빈번하게 받기 때문에 원거리의 모

든 송신원에게 자원을 공평하게 분배하는데 문제점을 가지는데, 그림 4의 망 모델 2와 같이 다중 홉에 VC 수가 많을수록 송신원은 공평성이 떨어진다.

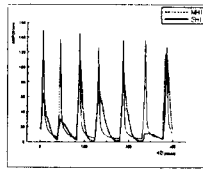
은 망 모델 2 보다 망 모델 1에서 높다. 이는 병목 구간 스위치인 SW3에서 폭주가 발생할 때 EFCI 방식에 따라 셀 율을 하위 임계치까지 줄이기 위해 셀을 폐기하며, 신속히 대처를 못하고 있기 때문이다.

<표 2> 망 모델별 셀 손실율

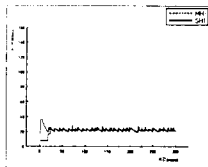
알고리즘 \ 구분	망 모델 1	망 모델 2
EFCI	25 ~ 34%	9 ~ 17%
NIST	0.2 ~ 0.4%	0.2 ~ 7.6%
EPRCA	19 ~ 59%	13 ~ 23%
ERICA	0.1 ~ 0.9%	0.1 ~ 0.9%



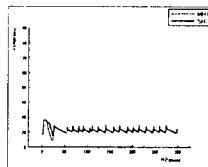
(그림 5) EFCI일 때 망 모델 1의 ACR 변화율



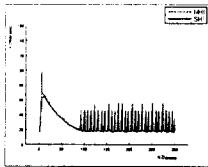
(그림 6) EFCI일 때 망 모델 2의 ACR 변화율



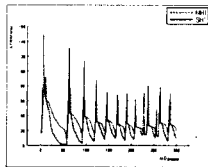
(그림 7) NIST일 때 망 모델 1의 ACR 변화율



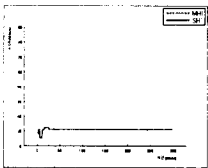
(그림 8) NIST일 때 망 모델 2의 ACR 변화율



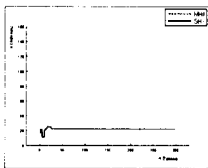
(그림 9) EPRCA일 때 망 모델 1의 ACR 변화율



(그림 10) EPRCA일 때 망 모델 2의 ACR 변화율



(그림 11) ERICA일 때 망 모델 1의 ACR 변화율



(그림 12) ERICA일 때 망 모델 2의 ACR 변화율

EPRCA 알고리즘의 결과는 망 모델 1과 망 모델 2에서 다른 알고리즘에 비해 셀 손실율이 높게 나왔으며, NIST 알고리즘은 셀 손실율은 망 모델 1보다 망 모델 2에서 높게 나타나고, ER 스위치의 한 종류인 ERICA 알고리즘은 망 구성 형태가 바뀌어도 1% 미만의 낮은 셀 손실율을 보여주고 있다.

4.3 비병목 스위치와 병목 스위치간 VC 수의 증가에 따른 처리율

표 3은 각 스위치 알고리즘의 처리율을 보여주고 있다. 여기서 기대값은 100(22Mbps)으로 설정하였고, 이 기대값을 넘는 경우는 대역폭을 공평하게 분배받지 않았을 때 이런 현상이 발생한다.

<표 3> ABR 트래픽 제어 알고리즘별 처리율

알고리즘 \ 구분	망모델 1		망모델 2	
	Multi Hop	Single Hop	Multi Hop	Single Hop
EFCI	92	99	92	98
NIST	94	97	94	98
EPRCA	95	97	90	135
ERICA	95	95	95	95

표 3에 나타난 것과 같이 EFCI, NIST, EPRCA 알고리즘은 종단시스템의 위치 및 망의 구성 형태에 따라 처리율에 차이가 있고, ERICA는 종단시스템의 위치 및 망의 구성 형태에 따라서는 영향을 받지 않고 처리율이 일정하게 나왔다.

4.2 망 모델 1과 망 모델 2간의 셀 손실율

표 2는 각 망 모델 형태에 따라 각각의 ABR 서비스 제어 알고리즘을 적용했을 때 병목 구간에서의 셀 손실율(drop rate)을 보여주고 있다.

표 2에서 나타난 것과 같이 EFCI에서의 셀 손실율

5. 결론

본 논문에서는 두 종류의 망 구성 형태에서 병목 현상이 발생하는 스위치에 기존의 여러 가지 ER 알

고리즘을 이용하여 셀 손실율, 처리율 및 ACR의 변화율을 구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

그림 5, 그림 6, 그림 7, 그림 8, 그림 9, 그림 10, 그림 11 및 그림 12의 결과로 EPRCA 알고리즘은 망 구성 형태에 따라 ACR의 변화율이 다른 결과 값을 나타내었고, NIST 알고리즘은 ACR 변화율이 기대값(22Mbps)에 비슷한 결과가 나왔지만 약간의 진동이 있으며, ERICA 알고리즘은 망의 구성 형태가 바뀌어도 거의 일정한 결과를 보임을 알 수 있다.

표 2에서 나타낸 것과 같이 ERICA 알고리즘은 다른 알고리즘과 달리 망의 구성 형태와 무관하게 1% 미만의 낮은 셀 손실율을 나타내므로 안정적인임을 알 수 있다.

표 3에서 나타낸 것과 같이 EFCI, NIST, EPRCA 알고리즘은 종단시스템의 위치 및 망의 구성 형태에 따라 처리율에 차이가 있고, ERICA 알고리즘은 종단시스템의 위치 및 망의 구성 형태와 무관하게 공평한 처리율을 보였다.

본 논문에서는 망의 형태에 영향을 덜 받으며 여러 개의 VC에 공평하게 대역폭을 할당하고, 경제성과 QoS를 보장하기 위해서는 EFCI-ER 스위치 혼용에 있어서 병목 구간에 ERICA 스위치 알고리즘 사용이 바람직함을 알 수 있다.

[참고문헌]

- [1] S. Sathaye, "ATM Forum Traffic Management Specification Version 4.0" ATM Forum af-tm-0056 Apr. 1996
- [2] L. Roberts, "Enhanced PRCA(Proportional Rate Control Algorithm)" ATM Forum/94-0735R1, August. 1994
- [3] N. Golmie, Y. Chang and D. Su "The NIST ER Switch Mechanism" ATM Forum/95-0695, June 1995
- [4] 이 철효, 조 유제 "ATM망에서 ABR 서비스를 위한 EFCI 스위치와 ER 스위치 간의 상호 운용성 분석" 정보과학회 논문지(A) 제24권 제6호 1997
- [5] Yuan-Cheng Lai, Ying-Dar Lin, Nai-Bin Hsu "Interoperability of EFCI and ER Switches for ABR Services in ATM Network" Proc. of ISCC'98, pp. 166-170, June 1998
- [6] R. Jain, S. Kalyanaraman, R. Goyal, S. Fahmy and R. Viswanathan "The ERICA Switch Algorithm: A complete Description" ATM

Forum 96-1172, Aug. 1996

- [7] N. Golmie, A. Koenig, and D. Su, "The NIST ATM Network Simulator Operation and Programming", Technical Report NISTIR 5703, NIST, Aug. 1995
- [8] A. Charny, D. Clark, and R. Jain, "Congestion Control with Explicit Rate Indication", Proc. of ICC'95, Vol. 3, pp. 1954-1963, June 1995
- [9] R. Jain et al, "Source Behavior for ATM ABR Traffic Management : An Explanation", IEEE Communication Magazine, Vol. 34, No. 11, pp. 50-57, Nov. 1996
- [10] 육동철, 박희대, 박승섭, "ATM 네트워크 환경에서의 EFCI와 ER스위치 알고리즘의 ABR트래픽 성능분석", 한국멀티미디어학회 99년 춘계학술발표논문집, 제2권 1호, pp. 305-310, 1999. 5
- [11] 박희대, 육동철, 박승섭, "TCP/IP 성능개선을 위한 ABR 서비스제어 알고리즘 : 시뮬레이션 평가", 한국정보처리학회 논문지 제6권 제11호, 1999. 11