

ATM망에서 폭주 제어를 위한 스위치 성능의 비교 분석

(A comparative analysis on switch performances for congestion controls in ATM Networks)

조 미 령* 이 상 훈**
(Mee-Ryoung Cho) (Sang-Hun Lee)

요 약

본 논문에서는 EPRCA(Enhanced Proportional Rate Control Algorithm) 스위치 방식과 EMRCA(Explicit Max_min Rate Control Algorithm) 스위치 방식의 성능을 평가하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션의 평가 기준으로 과도상태와 정상상태에서 각 송신원에서의 전송률(ACR)의 변화, 큐 길이, 링크 대역폭 이용률과 전송률의 공평성 여부를 사용하였다.

실험 결과 EMRCA 스위치 방식은 EPRCA 스위치 방식보다 더 안정적이며 스위치의 버퍼 크기도 줄었으며 더 높은 링크 이용률을 보였다. 이 방식은 스위치에서 MACR(Mean Allowed Cell Rate)의 계산을 위한 부동소수점 연산을 제거하여 EPRCA 스위치 방식이나 기존의 다른 폭주 제어 방식들보다 훨씬 낮은 하드웨어 복잡도를 갖는다.

ABSTRACT

In this paper a simulation has been performed to compare and evaluate the performance between the EPRCA(Enhanced Proportional Rate Control Algorithm) and EMRCA(Explicit Max_min Rate Control Algorithm) switches. The variation of the ACR at the source end system, the queue length, the utilization rate of the link bandwidth and the share fairness at the transient and steady states are used as the evaluation criteria for the simulation.

The EMRCA switch is more stable than the EPRCA switch and reduces its buffer size. Also, it achieves a higher utilization rate of the link bandwidth than the EPRCA switch. The hardware complexity of the EMRCA switch is significantly lower than the EPRCA and other rate-based switches. Since it eliminates the necessity of the floating-point operation for calculation of the MACR(Mean Allowed Cell Rate) at the switch.

1. 서론

ATM(Asynchronous Transfer Mode)은 광대역 통신망(B-ISDN)의 핵심이 되는 기술로서 접속 규격에 있어 다양한 속도와 전송 매체를 지원하는 탄력성을 제공하고 있으며 다양한 QoS(Quality of Service)를 지원하여 음성, 데이터, 이미지, 영상등 멀티미디어 데이터를 수용할 수 있다[1].

고속 데이터 트래픽은 매우 버스티(Bursty)한 특성을 가지기 때문에 통신망이 보장해 주어야 할 서비스 품질(QoS)을 만족시키기 쉽지가 않다. 그래서 ATM Forum에서는 통신망에서의 효율적인 데이터 서비스 제공을 위해서 데이터 트래픽의 특성을 CBR(Constant Bit Rate), VBR(Variable Bit Rate), ABR(Available Bit

* 정회원 : 광운대 일반대학원 전자공학(박사) 재학

** 종신회원 : 광운대학교 전자공학부 교수

논문접수 : 2001. 5. 9.

심사완료 : 2001. 5. 26.

Rate), UBR(Unspecified Bit Rate)의 형태로 구분하였으며, 이중 전송지연에 대한 엄격한 제한이 요구되지 않고 고속 데이터 서비스에 적합한 ABR 서비스에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다[2~7].

ATM의 주요 장점중의 하나는 LAN(Local Area Network)과 WAN(Wide Area Network) 환경하에서 다양한 서비스를 트래픽 제어 메커니즘에 의해서 안정적이고 효과적으로 지원하는 것이다. 트래픽 제어 메커니즘 가운데 폭주제어는 망과 시스템 설계자에게 가장 많은 연구대상이 되고 있다[2,8].

ATM Forum을 중심으로 많은 ABR 폭주제어 방식들이 제안되었고 많은 논란이 있었으나 '94년 9월 EPRCA(Enhanced Proportional Rate Control Algorithm) 스위치 방식을 근간으로 하는 전송률 기반 방식을 최종 단일안으로 채택하였다[9~11].

본 논문에서는 ATM Forum에서 표준으로 정한 EPRCA 스위치 방식과 EPRCA 스위치 방식의 문제점을 개선한 EMRCA 스위치 방식의 성능을 LAN과 WAN 환경에서 비교 분석하였다.

2. ABR 트래픽 폭주제어

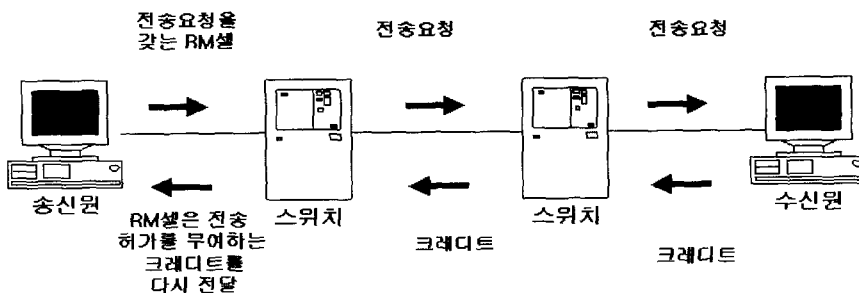
ATM 트래픽 제어는 크게 두 가지로 분리하여 정의할 수 있는데 그 하나로는 사용자의 Connection 셋업시 설정하는 QoS 파라미터에 따라 스위치가 트래픽을 관리하는 UPC(Usage Parameter Control)와 같은 예방제어(Preventive Control)와 네트워크에서 혼잡이 생겼을 경우 혼잡을 줄이기 위해 반응하는 반응제어(Reactive Control)로 구분한다. 대부분의

ATM 망에서는 폭주를 미연에 방지하는 예방제어가 주된 폭주제어 방식으로 대두되고 있으나 ABR 서비스에 있어서 UPC는 사용자가 설정한 MCR(Minimum Cell Rate)을 보장하고 PCR(Peak Cell Rate)를 넘지 않도록 관리하는데 ABR 트래픽은 MCR이 0이 되는 경우가 많은 특징이 있으므로 다른 서비스와는 달리 예방제어보다는 반응제어가 폭주제어에 주로 이용된다. 반응제어에 있어서 무엇보다 중요한 요인은 스위치내의 혼잡이 발생한 경우 소스(Source)에게 전송률을 감소시키도록 유도하는 피드백 방법이다[9,11].

ABR 서비스를 위한 폭주제어는 크게 크레딧 기반(Credit-based) 폭주제어 방식과 전송률 기반(Rate-based) 폭주제어 방식이 있다. 크레딧 방식은 전송되는 트래픽을 링크 단위로 제어하는 방식으로 대역폭과 전송지연이 큰 고속 통신망의 환경에서 사용하기에는 적합하지 않다. 그러나 전송률 기반 방식은 송신원에서 전송되는 데이터의 속도를 중단 사이에서 직접 제어할 수 있기 때문에 고속 통신망 환경에 적합한 흐름제어 방식이라고 평가되고 있다.

2.1 크레딧 기반 폭주제어 방식

이 방식은 링크 대 링크 윈도우 흐름제어 방식에 기반한다. 독립적인 흐름제어는 다른 접속들의 경우 각 링크에 대해 실행되고 각 접속은 각 링크에 대해 셀 전송을 위해 버퍼 예약을 얻어야만 한다[9,11,13]. 각 접속은 자신의 앞 노드로부터 크레딧을 얻은 만큼 전송을 할 수 있다. 만일 접속 크레딧이 부족하다면 크레딧을 기다려야 한다. 또한 폭주가 발생



[그림 1] 크레딧 기반 방식의 피드백 루프

[Fig. 1] Credit-based feedback loop

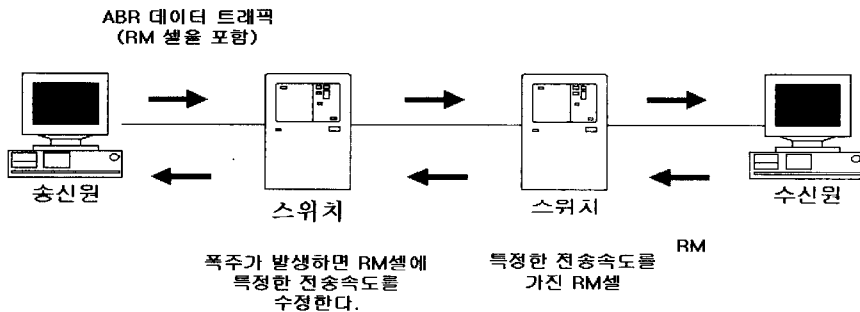
한 곳에서는 크레딧이 발생하지 않는다. 이러한 링크 대 링크 피드백 방식 때문에 순간적인 폭주는 제거되고 또한 접속이 크레딧이 없으면 전송을 할 수 없기에 셀 손실이 발생하지 않는다. 이 방식은 가상채널 흐름제어(FCVC ; Flow Controlled Virtual Channels)의 하나로써 하나의 가상 채널을 점유하게 되고 그 가상 채널을 통해 데이터 셀과 크레딧 셀들이 전송된다. 이러한 VC에 대한 제어는 두 가지 측면으로 볼 수 있다. 첫째는 버퍼 할당 측면으로 VC는 수신원에서 버퍼 기억 장소를 할당받는다. 둘째로는 크레딧 제어 측면으로 송신원은 수신원에 할당된 버퍼의 범람을 방지하기 위해 크레딧 잔고를 유지한다. [그림 1]에서는 크레딧 기반 폭주 제어 방식을 나타낸 것이다. 각 링크에 데이터 셀을 보내기 전에 송신원은 수신원으로부터 VC에 대한 크레딧을 받아야만 한다. 수신원은 VC의 데이터 셀을 받을 수 있는 유용한 버퍼 공간이 있다는 것을 가리키기 위해 송신원에게 크레딧을 보내는 것을 나타낸다. 따라서 크레딧 기반 방식은 균집성이 큰 데이터의 전송에 유리하다.

FCVC의 초기 방식인 고정버퍼 할당방식은 많은 VC가 링크를 공유하더라도 각 VC가 왕복 전송 지연 동안 전송할 수 있는 셀 수만큼 버퍼를 필요로 하기 때문에 수많은 VC가 연결되는 WAN 환경에서 각 스위치 노드에 요구되는 버퍼가 엄청나게 커지는 문제점이 있다. 이것은 적응버퍼 할당방식을 도입해서 어느 정도 해결되었다. 적응형(Adaptive) FCVC 방식은 각 VC의 왕복지연의 일부분에 해당하는 버퍼를 할당하여 고정 FCVC에 비해 요구되는 버퍼의 크기를 줄였다.

버퍼할당 비율은 해당 VC의 크레딧 사용률에 비례하는데 활성화된 VC가 상대적으로 버퍼를 할당받는 비율이 더 높다. 어떤 VC가 크레딧 셀을 전부 사용하지 않는다면 한 주기동안 측정된 사용률은 낮아지게 되고 다음 주기에서는 바로 전보다 작은 버퍼크기를 할당받는다. 적응형 FCVC는 요구되는 버퍼의 크기를 줄일 수 있으나 Ramp-up 시간에 문제가 있다. 즉 다른 사용자가 없고 하나의 VC만이 활성화된 경우에도 전체 링크대역을 활성화된 VC가 완전히 사용하는 데는 링크 왕복지연의 몇 배에 이르는 시간이 필요하여 구현상에 어려운 점이 많다[13,14].

2.2 전송률 기반 폭주제어 방식

스위치에서 전송되는 혼잡에 대한 정보를 이용하여 송신원에서 전송되는 데이터율을 결정하는 방법으로 송신원이 모든 VC를 통해 망으로 셀을 방출하는 최대 전송률을 정의하기 위해 망으로부터 피드백 정보를 사용한다. 이 방법은 각 스위치 노드의 부담을 줄일 수 있고 구현에 있어서 간단하여 여러 가지 구현방법을 주어진 상황에 맞게 구현할 수 있는 유연성이 있다. 또한 LAN보다 WAN에서 좋은 성능을 나타내고 있다[15]. [그림 2]는 전송률 기반 폭주 제어방식을 나타낸 것이다.



[그림 2] 전송률 기반 방식의 피드백 루프

[Fig. 2] Rate-based feedback loop

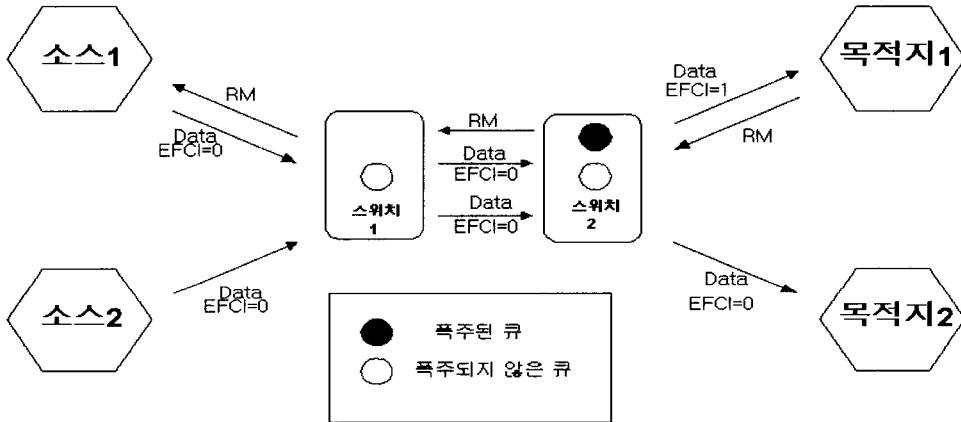
2.2.1 FECN(Forward Explicit Congestion Notification)

FECN은 종점간 제어를 기반으로 제안된 전송률 방식중의 하나로 피드백 방식은 순방향으로 폭주정보를 전달하기 위해 PTI(Payload Type Identifier) 필드에 실린 EFCI(Explicit Forward Congestion Indication) 상태를 이용하여 제어한다. 스위치 폭주시 각 VC를 통해 다음 목적지로 보내질 모든 셀의 EFCI 상태를 표시한다. 이 셀을 받은 목적지는 다시 송신원에게 폭주상태를 알리기 위해 폭주인지(Notification) 셀을 폭주된 VC의 송신원에게 되돌려 보내 송신원에서 각 VC상으로 셀 전송률을 줄이거나 중

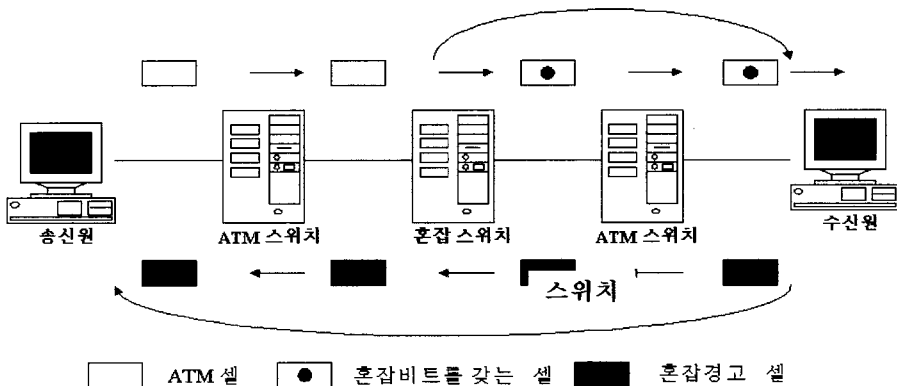
가시킴을 위해 이 피드백 정보를 사용한다. [그림 3]과 [그림 4]는 FECN과 제어 트래픽을 나타낸 것으로 스위치의 폭주상태를 나타내기 위해 모든 셀들에게 EFCI 상태를 나타내게 한다.

2.2.2 BECN(Backward Explicit Congestion Notification)

이 방식은 FECN과 유사하지만 폭주가 발생한 곳에서 다음 목적지로 EFCI를 보내는 FECN과는 달리 BECN은 폭주가 발생한 곳에서 바로 송신원까지 되돌려 보내기 때문에 FECN에 비해서 폭주에 빠르게 응답하는 장점을 가진다. 그러나 BECN은 RM셀과



[그림 3] 출력버퍼 스위치를 가진 FECN
[Fig. 3] FECN with output buffer switch



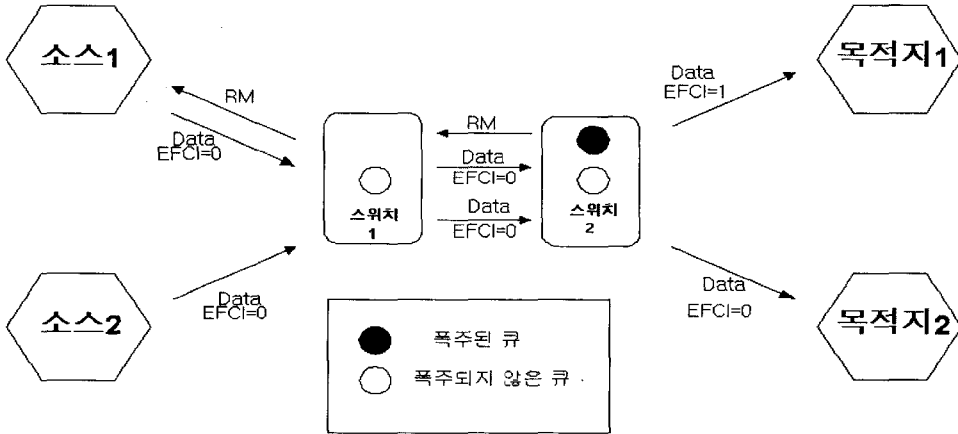
[그림 4] FECN
[Fig. 4] FECN

폭주정보를 필터링하기 위해 스위치에서 더 많은 하드웨어가 요구되어진다. [그림 5]와 [그림 6]은 BECN과 제어 트래픽을 나타낸 것으로 폭주된 큐의 길이가 문턱값을 넘어설 때 스위치가 폭주되는 문제가 있다. 이 문제점은 "negative" 피드백 방식에 준한 것으로 개선하기 위하여 "positive polarity" 알고리즘을 사용하였다.

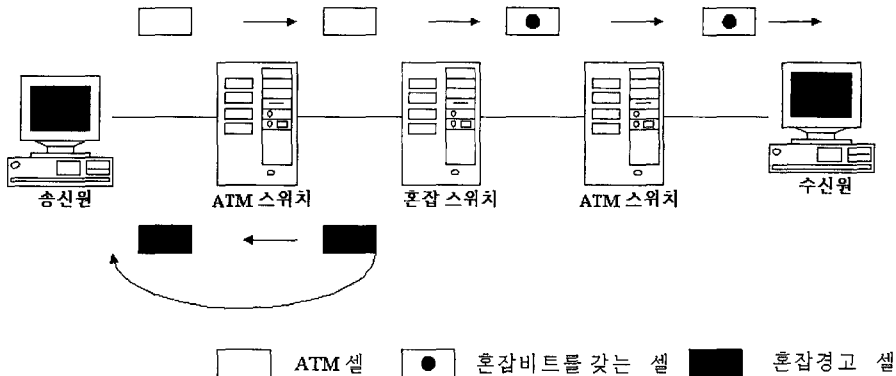
본 절에서는 여러 가지 관점에서 서로 다른 특징을 가진 크레딧 기반 방식과 전송률 기반 방식의 장단점들을 비교하고 전송률 기반 방식이 채택된 이유에 대해 분석한다[8,13].

(1) VC 단위 큐잉

크레딧 기반 방식은 각 VC마다 분리된 큐를 가져야 한다. VC 단위의 큐잉은 VC수에 비례하여 스위치가 복잡해지므로 WAN 환경에서와 같이 매우 많은 수의 VC를 지원할 대규모 스위치를 구현하는 데는 상당한 복잡성을 유발하고 있다. 그러나 전송률 기반 방식은 VC 단위의 큐잉이 필요하지 않은 반면 큐잉 방식은 스위치 설계에 따라 달라질 수 있는 유연성을 가지고 있다.



[그림 5] 출력버퍼 스위치를 가진 BECN
[Fig. 5] BECN with output buffer switch



[그림 6] BECN
[Fig. 6] BECN

(2) 셀 손실

고정 크레딧 기반 방식은 사용 가능한 버퍼만큼 셀을 전송할 수 있기 때문에 셀 손실을 완전히 방지할 수 있는 장점이 있다. 적응 크레딧 방식이나 전송률 기반 방식은 과부하 상태에서는 버퍼 범람에 의한 셀 손실이 발생할 수 있으나 버퍼를 충분히 크게 하여 원하는 셀 손실률을 어느 정도 보장할 수 있다.

(3) Ramp-Up 시간

고정 크레딧 기반 방식은 VC들이 링크를 완전하게 이용하는데 걸리는 시간이 매우 짧아 링크에 새로운 가용 대역폭이 생기면 즉시 사용이 가능하다. 그러나 적응 크레딧 방식이나 전송률 기반 방식들은 몇 번의 피드백 제어를 거쳐야 링크의 가용 대역폭을 완전히 이용할 수 있기 때문에 몇 배의 왕복 전송 지연 시간이 걸리게 된다.

(4) 위반 사용자의 영향

VC 단위의 큐잉의 장점은 위반 VC가 다른 VC를 방해할 수 없다는 점이다. 크레딧 기반 방식은 VC 단위의 큐잉을 사용하지만 고정 버퍼 할당 방식이 아닌 적응형 크레딧 방식에서는 위반한 VC가 전송률을 증가시키므로써 버퍼를 상대적으로 많이 차

지하는 문제점이 있다. 전송률 기반 방식에서도 필요하다면 VC 단위의 큐잉을 구현하여 위반 사용자가 다른 사용자에게 영향을 주지 않게 할 수 있다.

(5) 버퍼 크기

크레딧 기반 방식은 적응 버퍼 할당 방식을 도입하여 버퍼 요구량을 크게 감소시켰으나 여전히 전송률 기반 방식에 비해서는 버퍼량이 많다. 크레딧 기반 방식은 필요한 버퍼 크기가 VC의 수 뿐만 아니라 전송 링크의 전송 지연에 비례하여 증가한다. 따라서 매우 많은 VC가 존재하는 WAN 환경에서 크레딧 기반 방식은 필요한 버퍼가 엄청나게 커지는 문제점이 있다.

(6) 스위치 설계의 유연성

전송률 기반 방식은 스위치의 구현 면에서 상당한 유연성을 갖는다. 즉 스위치간에 서로 다른 큐잉 방식이나 알고리즘을 사용하더라도 동일한 망에서 상호 운용이 가능하다. 반면에 크레딧 기반 방식은 각 스위치마다 반드시 VC 단위의 큐잉을 사용하여야 한다.

<표 1> 크레딧 기반 방식과 전송률 기반 방식의 비교

<Table 1> Comparison between Credit-based and Rate-based

비교기준	크레딧 기반 방식	전송률 기반 방식
셀 손실률	고정 할당 방식 : 0 적응 할당 방식 : 작다.	버퍼 크기를 크게 하면 셀 손실률을 충분히 줄일 수 있다.
Ramp-up 시간	고정 할당 방식 : 매우 빠르다. 적응 할당 방식 : 왕복 전송지연의 몇 배의 시간이 걸린다.	왕복 전송지연의 몇배의 시간이 걸린다.
위반 VC의 영향	VC 단위 큐잉으로 다른 VC에 영향을 주지 않기 때문에 policing이 필요 없다.	위반 VC에 대한 감시를 위해 policing이 필요하다.
공평성	보장된다.	불공평성이 나타날 수도 있다.
버퍼 크기	큰 버퍼를 요구한다.	비교적 작은 버퍼를 요구한다.
구현의 유연성	반드시 VC 단위의 큐잉을 사용하여야 한다.	스위치의 구현에 유연성을 제공한다.
망 노드 수의 증가에 따른 영향	영향이 작다.	VC간에 공평성 문제가 나타날 수 있다.
VC 수의 증가에 따른 영향	망 내의 모든 스위치의 복잡성이 증가한다.	송수신 단말기의 복잡성만 증가한다.

(7) 구현상 복잡도

크레딧 기반 방식을 사용하게 되면 스위치는 전송률 기반 방식에 비해 상대적으로 복잡하지만 단말기는 간단하게 구현이 가능하다. 반면 전송률 기반 방식은 스위치의 구현이 비교적 간단하지만 단말기의 구현은 크레딧 기반 방식에 비해 복잡해진다.

(8) 공평성

크레딧 기반 방식은 VC 단위의 큐잉을 사용하기 때문에 전송률 기반 방식에 비해 VC간에 전송대역폭을 보다 공평하게 나누어 사용하는 것이 가능하다. 그러나 적응 크레딧 기반 방식을 사용하는 경우는 VC간의 공평성이 완전하게 보장되지 않는다. 기존의 전송률 기반 방식은 공평성에 큰 문제가 있었으나 EPRCA 방식에서는 fair share에 의한 지능형 마킹을 도입함으로써 공평성이 크게 개선되었다.

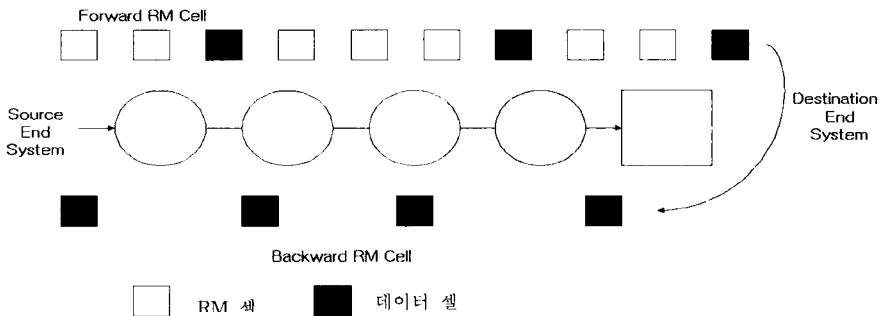
3. EPRCA/EMRCA 스위치의 성능 분석

3.1 EPRCA 스위치 방식

EPRCA 방식은 기존의 PRCA 방식에 Fair Share 계산을 통한 ER 개념을 도입하여 VC간의 불공평성을 개선한 방식으로 가상경로마다 큐를 관리하지 않고 각 가상경로의 적정한 전송률을 계산하는 것이다 [13]. 이 방식은 [그림 7]에서 보는 바와 같이 송신원은 N개의 데이터셀을 전송한 다음 하나의 RM셀을 전송하고 이 RM셀을 역방향으로 받기 전에는 각각

의 데이터셀을 전송한 후에 일정 비율로 전송속도를 감소시킨다.

송신원에서 전송한 RM셀이 수신원을 경유하여 수신되면 RM셀 필드에 있는 CI 비트를 검사하여 0이면 지금까지 감소되었던 전송속도를 보상하기 위하여 ACR(Allowed Cell Rate)을 증가시키고 1이면 ACR을 감소시키는 방법으로 폭주를 제어한다. ACR은 AIR(Additive Increase Rate) 만큼씩 빠르게 증가되는 반면 감소는 RDF(Rate Decrease Factor)에 의해 서서히 이루어진다. 연결 설정 시 초기 셀 전송률인 ICR(Initial Cell Rate)로 전송이 시작되며 후에 연결이 휴지상태로 되면 ACR은 ICR로 감소된다. 이는 망이 폭주상태일 때 망으로의 입력 트래픽을 줄임으로써 폭주상태를 회복시키기 위한 방법이다. RM셀은 망에서 허용할 수 있는 전송률을 송신원에게 알리기 위해 ER 필드, 해당 VC의 현재 전송률을 나타내는 CCR(Current Cell Rate) 필드, 송신원에 보장되는 최소 전송률인 MCR(Minimum Cell Rate) 필드, 폭주 발생 여부를 나타내는 CI(Congestion Indication) 비트를 가진다. 송신원은 순방향 RM셀의 ER 필드를 자신이 원하는 최대 전송률인 PCR로 초기화하고 CI 비트를 0으로 설정하여 전송한다. 각 스위치는 지수 가중 평균치를 이용하여 Fair Share를 계산하고 필요하다면 되돌아오는 역방향 RM셀의 ER 필드를 Fair Share를 사용하여 줄인다. 스위치는 ER을 설정하는 것 외에 큐 길이가 임계치 보다 커지면 역방향 RM셀의 CI 비트를 설정한다. 수신원은 RM셀을 받으면 받은 RM셀을 되돌려 보내고 데이터셀의 EFCI 비트를 감시하다가 가장 최근 데이터셀의 EFCI 비트가



[그림 7] 순방향 RM셀과 역방향 RM셀
[Fig. 7] Forward RM Cell and Backward RM Cell

설정되어 있었으면 RM셀의 CI 비트를 설정하여 송신원으로 돌려보낸다. 송신원에서 전송한 RM셀이 수신원을 경유하여 CI 비트가 0인 상태로 수신되었을 경우에는 연결 설정시에 결정된 AIR 만큼 증가시켜 지금까지 감소된 전송속도를 보상한다. 이때 ACR은 고정된 크기의 PCR × RIF 만큼씩 증가되지만 PCR 값을 초과할 수 없다. 송신원은 역방향 RM셀을 수신하면 ACR이 MCR과 PCR 사이에서 계산되는 과정은 아래와 같다.

IF CI = 0 (정상상태)

$$ACR = \text{Max}(PCR \times RIF, MCR)$$

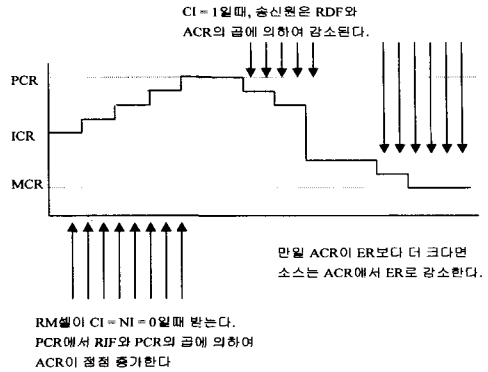
IF CI = 1 (폭주상태)

$$ACR = \text{Max}(ACR \times RDF, MCR)$$

$$ACR = \text{Min}(ACR, ER, MAX)$$

여기에서 ACR은 망이 허용하는 단말 전송속도의 상한값이고 RIF는 ACR의 증가계수, RDF는 ACR의 감소계수이다. 한편 수신된 RM셀이 CI 비트가 1로 설정된 상태로 수신되었을 경우에는 ACR은 연결 설정시에 결정된 RDF값과 현재의 ACR을 곱하여 ACR을 감소시키는데 MCR이하로 감소시킬 수는 없다. 이는 망이 폭주상태일 때 망으로의 입력 트래픽을 줄임으로써 폭주상태를 해제시키기 위한 방법이다. [그림 8]은 ACR의 변환과정을 나타낸 것이다. EPRCA방법은 ER 스위치뿐만 아니라 보다 간단히

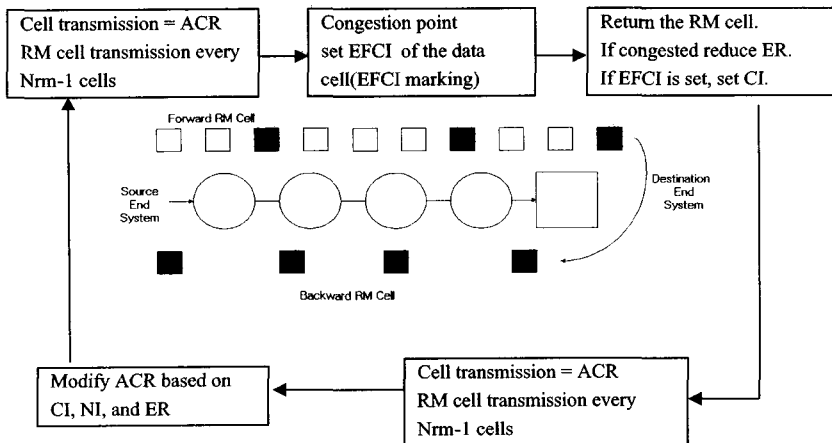
구현되는 EFCI 스위치도 혼합하여 사용할 수 있는 장점이 있다.



[그림 8] EPRCA의 ACR 전송률의 변화

[Fig. 8] The variation of ACR in EPRCA

EPRCA 스위치 방식은 SES(Source End System)와 DES(Destination End System)로 나누어 설명할 수 있다. SES는 먼저 파라미터의 초기값을 설정한 후 제어가 시작된다. N개의 데이터셀을 전송한 후에 RM셀을 전송하고 셀을 하나씩 전송할 때마다 이미 설정한 셀 허용 전송률인 ACR을 감소시키고 RM셀을 주기적으로 발생시킨다. [그림 9]은 ATM망에서의 송신원, 수신원, 스위치들간의 접속 모델을 나타낸 것이다. 트래픽 제어방식에서는 송신원은 데이터셀 전송의 일정간격 즉, ATM Forum 표준 규격에서 정



[그림 9] ATM 모델

[Fig. 9] ATM model

하고 있는 32개(Nrm)의 데이터셀을 전송할 때마다 순방향 RM셀을 보내며 CCR 필드에 현재 전송률 정보를 실어 보낸다. 수신원은 순방향 RM셀을 받으면 역방향 RM셀을 송신원으로 되돌려 보내게 된다.

EPRCA 스위치는 Fair Share를 계산하기 위해 먼저 RM셀의 CCR값에서 지수 가중 평균(Exponential Weighted Averaging) 계산 방법을 이용하여 MACR을 구하고 Fair Share는 구해진 MACR을 이용하여 다음과 같이 구해진다.

$$MACR = (1 - AV) MACR + AV \times CCR \quad (3-1)$$

$$Fair\ Share = SW_DPF \times MAC \quad (3-2)$$

여기서 AV는 지수 가중 평균치를 위한 계수로서 $\frac{1}{16}$ 이고 SW_DPF는 스위치의 상황에 따라 1보다 작은 값으로 설정된다. EPRCA 스위치 알고리즘은 fair share의 계산을 위해 순방향 RM셀의 CCR 필드 값을 사용하여 스위치가 현재 폭주상태이면 CCR이 MACR보다 낮은 VC에 대해 식 (3-1)을 사용하여 MACR을 갱신하고 스위치가 폭주상태가 아니면 CCR이 $MACR \times \frac{7}{8}$ 보다 큰 VC에 대해 역시 식 (3-1)을 사용하여 MACR을 갱신한다. 스위치는 식 (3-1)과 식 (3-2)와 같이 구해진 MACR을 이용하여

fair share를 계산하고 필요에 따라 역방향 RM셀의 ER 필드값을 Fair Share에 근거하여 줄인다. 스위치는 경미한 폭주상태와 심각한 폭주상태를 나타내는 두 개의 임계치를 가지고 있다. 먼저 심각한 폭주상태이면 모든 VC에 대하여 ER을 $\frac{1}{4} \times MACR$ 이하로 감소시키고 경미한 폭주상태이면 CCR이 MACR의 $\frac{7}{8}$ 보다 큰 VC에 대해서만 선택적으로 ER을 $\frac{15}{16} \times MACR$ 이하로 감소시킨다.

3.1.1 ABR 서비스 파라미터

ABR 전송률 제어 알고리즘의 동작을 위해서는 연결 설정 시에 많은 파라미터들이 설정되어야 한다. 이러한 파라미터들은 연결 설정시 단말기와 망 사이에서 개별적으로 협상되어지는 파라미터들과 프로파일 셋으로 결정되어지는 파라미터들로 분류할 수 있다. <표 2>에서는 ABR 서비스에 요구되는 파라미터들을 나타낸 것이다. 또한 그 파라미터들의 정의에 대해서 간략하게 설명하였다.

<표 2> ABR 파라미터

<Table 2> ABR parameters

파라미터	Unit	Length	Function
PCR	cells/sec	16 bit	최대 전송 속도
MCR	cells/sec	16 bit	망에 의하여 보장된 최소 전송 속도
ICR	cells/sec	16 bit	Idle 후 소스의 전송속도
RIF	cells/sec	16 bit	송신원의 전송속도 증가분
Nrm	cells	16 bit	RM 셀 사이의 데이터 셀 수
Mrm	cells	8 bit	순방향 RM 셀간의 전송되는 최소 데이터 셀 수
RDF	none	16 bit	전송원의 전송속도 감소분
ACR	cells/sec		전송원에 허용된 전송속도
CRM	none		순방향 RM 셀수 제한
ADTF	sec		순방향 RM 셀의 전송간격제어
Trm	msec	8 bit	순방향 RM 셀의 전송간격제어
FRIT	10 msec		송신원과 수신원간의 고정지연과 전송지연의 합
TBE	cells/sec		첫 번째 RM 셀이 되돌아오기 전에 송신원이 전송할 셀 수
CDF	none	8 bit	CRM과 함께 ACR 감소
TCR	10 cells/sec		순방향 RM 셀의 전송 제어

<표 3> RM 셀의 형식
<Table 3> Type of RM Cell

FIELD	OCTET	BIT(s)	DESCRIPTION	Initial Value	
				if source-generated	if switch-generated or destination-generated
Header	1-5	all	ATM Header	RM-VPC : VCI=6 & PTI=110 RM-VCC : PTI=110	
ID	6	all	Protocol Identifier	1	
DIR	7	8	Direction	0	1
BN	7	7	BECN Cell	0	1
CI	7	6	Congestion Indication	0	either CI=1 or NI=2 or both
NI	7	5	No Increase	0 or 1	
RA	7	4	Request/Acknowledge	0 or set in accordance with I.371-draft	
Reserved	7	3-1	Reserved	0	
ER	8-9	all	Explicit Cell Rate	a rate not greater than PCR parameter	any rate value
CCR	10-11	all	Current Cell Rate	ACR Parameter	0
MCR	12-13	all	Minimum Cell Rate	MCR Parameter	0
QL	14-17	all	Queue Length	0 or set in accordance with I.371-draft	
SN	18-21	all	Sequence Number	0 or set in accordance with I.371-draft	
Reserved	22-51	all	Rerved	6A(hex) for each octet	
Reserved	52	8-3	Rerved	0	
CRC-10	52	2-1	CRC-10		
	53	all			

3.1.2 RM 셀 형식

EPRCA 방식은 망의 상태를 피드백 정보에 의해 파악하여 폭주상태 여부에 따라 송신원에서의 전송률을 감소시키므로 망의 폭주상태 여부를 전달하는 RM셀이 매우 중요한 역할을 한다. <표 3>은 RM셀 형식과 각 필드가 갖는 의미를 설명한다[9,13,16,17].

3.2 EMRCA 스위치 방식

ATM Forum에서 폭주제어 방식으로 채택된 EPRCA 스위치 방식은 망에서의 트래픽 폭주상태를 판단하는 방법이 스위치의 큐 길이와 임계치 초과 여부만을 사용하는 것이었다. 셀 버퍼에는 경미한 폭주상태와 심각한 폭주상태를 나타내는 두 개의 임계치 T_{high} 와 T_{low} 를 가지고 폭주상태를 판단한다. 셀 버퍼에 있는 큐의 길이가 T_{low} 를 초과하면 스위치는 경미한 폭주상태라고 인식하고 망의 폭주발생을 해제하기 위하여 지능적인 마킹을 수행한다. 따라서 스위치는 모든 연결들에 대하여 MACR을 유지한다. 스

위치는 모든 연결들에 대하여 MACR보다 큰 ACR은 전송률을 감소시켜야 한다. 특히 스위치는 폭주상태에 있는 동안 RM셀에 있는 CCR이 $MACR \times DPF$ 를 초과하면 MACR에 근접하도록 전송률을 감소시킨다. 만약 스위치가 계속 폭주상태로 남아있고 큐의 길이가 T_{high} 를 초과하면 스위치는 심각한 폭주상태라고 인식하고 모든 연결들의 전송률은 자신의 현재 전송률에 관계없이 전송률을 감소시킨다.

여기에서 가장 중점이 되는 MACR의 정확한 계산은 모든 연결된 전송률의 총계를 활성화한 연결들의 총수로 나누는 것이다. 이 평균 전송률을 정확하게 계산하기 위하여 부동 소수점 연산이 필요로 하기 때문에 실제 구현시 발생하는 하드웨어의 복잡성을 줄이기 위하여 식 (3-3) 같이 MACR의 근사치를 구하고 있다. AV는 지수 평균 계수로 $\frac{1}{16}$ 이다.

$$MACR \approx MACR(1-AV) + CCR \times AV \quad (3-3)$$

위에서 설명한 EPRCA 방식은 다음과 같은 결점을 갖고 있다.

가. EPRCA 방식은 연결시에 전송률을 선택적으로 제어하기 위하여 임계치를 이용한 모든 VC 연결에 MACR을 전송한다. 그러나 MACR을 정확하게 계산하기 위해서는 각 스위치 노드에 부동 소수점 연산장치가 필요한데 이는 스위치 구현 시 하드웨어의 복잡성만 가중시킨다.

나. 정확하게 MACR이 계산되었어도 EPRCA 방식은 불공평성과 수렴(Convergence) 문제가 있다. 그 원인은 연결된 전송률만 감소시키기 위하여 선택된 하나의 임계치만 사용하기 때문이다. 폭주상태에 있는 동안 MACR 이상의 전송률을 가진 모든 연결들은 자신의 전송률에 상관없이 똑같은 값으로 전송률을 감소시켜 각 VC간의 불공평성을 야기시킨다.

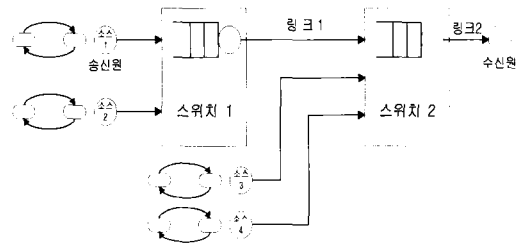
다. 부동 소수점 연산(계산)을 피하기 위하여 MACR을 계산하는 방식으로 지수적 평균기법을 이용하여 근사치에 접근한다. 그러나 이 근사치는 정확한 MACR과는 차이가 있어 결과적으로는 연결시에 대역폭할당에 있어 부가적인 불공평성을 초래한다.

EMRCA 방식은 폭주발생과 폭주해제를 정확하게 판단하여 전송률을 제어할 수 있어 기존의 EPRCA 스위치 방식보다 성능이 우수하다 [18]. 또한 스위치에서 MACR을 계산 시에 요구되는 부동소수점 나누기 연산을 제거하였기 때문에 스위치를 구현하는 데도 상당히 용이하다. 이 방식은 폭주를 찾아내기 위하여 셀 버퍼안에 있는 큐 길이에 현재 망의 모든 스위치 노드에 연결된 최대 전송률과 최소 전송률을 판단하는 두 개의 임계치 DQT와 QT를 사용한다. 또한 스위치에 도달하는 모든 연결의 최대 전송률인 ACR_{MAX} 값과 최소 전송률인 ACR_{MIN} 값을 유지하고 아울러 연결된 MAX_VC 와 MIN_VC 에 일치하는 VC 개수도 유지한다[16].

4. 시뮬레이션 및 결과 분석

4.1 시뮬레이션 모델

두 스위치간의 성능을 분석하기 위하여 4개의 ABR 서비스 연결과 2개의 스위치 노드를 연결한 망 모델을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 모델은 [그림 10]과 같으며 각 소스들과 링크는 155Mbps로 연결되어 있다. 송수신원과 스위치사이의 거리는 1km로 구성하였고 스위치간의 거리는 LAN과 WAN의 환경을 고려하여 각각 5km, 200km로 구성하였다. 그리고 각 스위치 노드간의 전송지연시간은 1msec로 가정하였다. 소스1과 소스2의 연결지속 시간은 840msec이며 소스3과 소스4는 240msec에서 전송을 시작하여 1120msec까지 전송을 하게 하였다.



[그림 10] 시뮬레이션 모델
[Fig. 10] Simulation model

<표 4> 시뮬레이션에 사용된 ABR 파라미터
<Table 4> ABR parameters using simulation

파라미터	값	파라미터	값
PCR	155Mbps	DPF	$\frac{7}{8}$
MCR	1.55Mbps	IPF	$\frac{9}{8}$
ICR	7.75Mbps	Nrm	32
ADR	1.55Mbps	QT	300
PDR	0.155Mbps	DQT	600
AIR	1.55Mbps	Ngl	30
MX_MN_DIFF	15.5Mbps	RQL	2

4.2 결과 분석

송신원은 전송을 개시하여 240msec까지는 소스1과 소스2만 전송을 하므로 링크 대역폭 155Mbps를 전부 점유하여 사용하고 240msec에서 840msec까지는 소스3과 소스4가 전송을 시작하게 되어 모든 소스가 링크 대역폭을 공유함을 알 수 있다. 소스1과 소스2가 전송을 중단하는 840msec 이후에는 소스3과 소스4가 모든 링크 대역폭을 할당받게 된다.

4.2.1 ACR의 변화

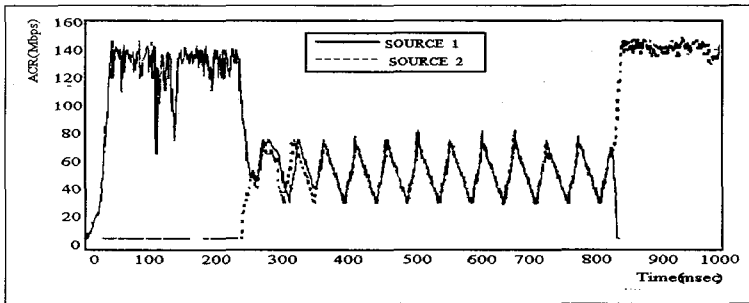
[그림 11]과 [그림12]는 LAN 환경에서, [그림 13]과 [그림14]는 WAN 환경에서 ACR의 변화를 시뮬레이션한 결과이다. ACR의 변화는 역방향 RM셀의 CI 비트 상태에 따라 증가 파라미터와 감소 파라미터에 의해 조정되는데 ACR의 변화가 적고 일정한 값을 유지하는 것이 ABR 서비스 품질유지와 망의 폭주제어가 용

이하다. 시뮬레이션 결과 ACR의 변화 모양이 LAN/WAN 환경에서 비슷하나 EPRCA 스위치 방식을 사용한 경우에는 초기 과도 상태와 스위치2가 전 대역을 모두 사용하는 840msec 이후에는 ACR의 변화폭이 심하지만 EMRCA 스위치 방식의 경우에는 초기상태에서는 약간의 변화가 있으나 평형상태에서는 매우 안정적인 것을 볼 수 있다. <표 5>에 나타난 것처럼 EMRCA 스위치 방식이 EPRCA 스위치 방식보다 과도상태와 평형상태에서 ACR의 진동폭이 작고 안정적이므로 성능이 우수함을 알 수 있다.

<표 5> ACR의 변화(LAN/WAN)

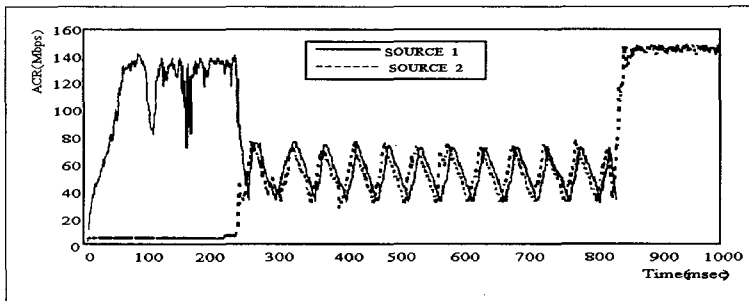
<Table 5> The variation of ACR(LAN/WAN)

		EPRCA 스위치	EMRCA 스위치
LAN	최소 전송률	37Mbps	39Mbps
	최대 전송률	153Mbps	151Mbps
WAN	최소 전송률	35Mbps	37Mbps
	최대 전송률	151Mbps	146Mbps



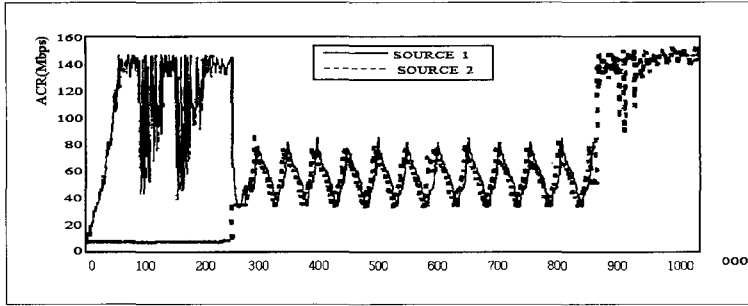
[그림 11] EPRCA 스위치(LAN)

[Fig. 11] EPRCA switch(LAN)

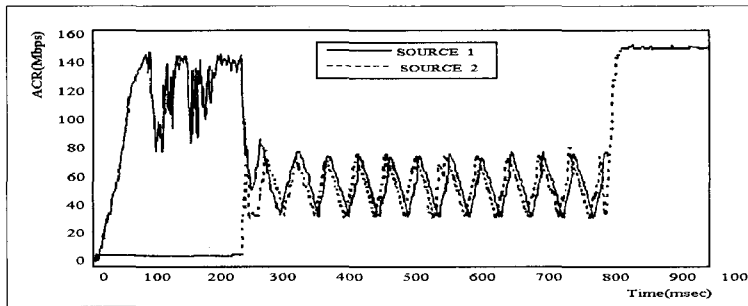


[그림 12] EMRCA 스위치(LAN)

[Fig. 12] EMRCA switch(LAN)



[그림 13] EPRCA 스위치(WAN)
 [Fig. 13] EPRCA switch(WAN)

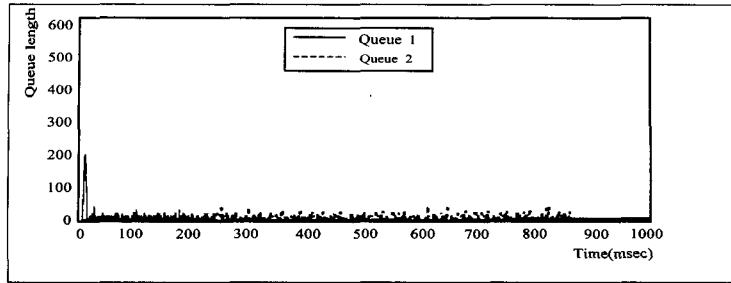


[그림 14] EMRCA 스위치(WAN)
 [Fig. 14] EMRCA switch(WAN)

4.2.2 스위치 큐 길이의 변화

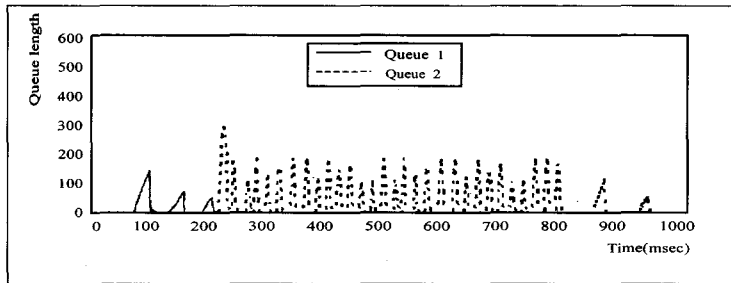
[그림 15] ~ [그림 18]는 LAN/WAN 환경에서 스위치1과 스위치2의 큐길이 변화에 대한 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 시작 단계에서 스위치1은 소스1과 소스2가 동시에 전송을 시작하므로 초기 과도 상태에서 경미한 폭주 발생을 경험하나 소스3과 소스4가 전송을 시작하는 240msec 이후에는 망에 과도한 트래픽이 유입되므로 스위치2는 심각한 폭주 상태를 경험하게 된다. LAN 환경에서 EPRCA 스위치는 평형상태에서 거의 스위치 큐에 셀이 쌓이지 않고 과도 상태에서만 약간의 큐 증가를 관찰할 수 있으나 EMRCA 스위치는 평형 상태에서도 큐에 약간의 셀들이 쌓이는 것을 볼 수 있다. EMRCA 스위치에서 과도한 트래픽이 유입되면 큐 길이는 최대 전송률과 최소 전송률이 임계치에 의해 설정되어 송신원에서 전송되는 전송률을 제어하면서 전송률이 임계치 QT 이하로 낮아져 폭주 해제를 송신원에게

알려줄 때까지 평균 큐 길이를 유지하다가 폭주 해제가 되어 망이 평형상태에 진입하는 것을 볼 수 있다. WAN 환경에서 EPRCA 스위치의 경우 링크1과 링크2에 서로 다른 송신원이 대역폭을 공유하는 240msec에 순간적으로 큐에 상당한 셀이 쌓이고 300msec 이후 평형상태에서는 안정적이지만 과도 상태에서 셀손실이 발생할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 EMRCA 스위치의 경우 과도기간에 큐 길이의 증가가 있지만 트래픽 폭주가 발생하면 임계치 DQT, QT에 의해 송신원의 전송률을 신속하게 감소시켜 큐 길이를 일정하게 유지하고 있다. <표 6>에 나타난 것처럼 WAN 환경하에서 EMRCA 방식이 EPRCA 방식보다 낮은 수준의 큐 길이로 안정적으로 폭주 발생을 대처할 수 있는 것은 잠재적으로 내재된 폭주 발생 가능성이 있는 연결들의 트래픽을 송신원이 미리 전송률을 감소시켜 폭주를 예방한 결과이다.



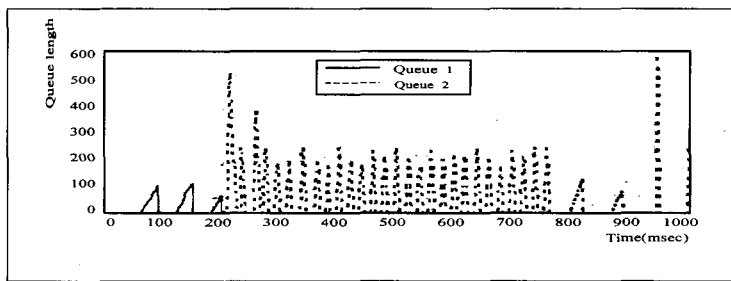
[그림 15] EPRCA 스위치(LAN)

[Fig. 15] EPRCA switch(LAN)



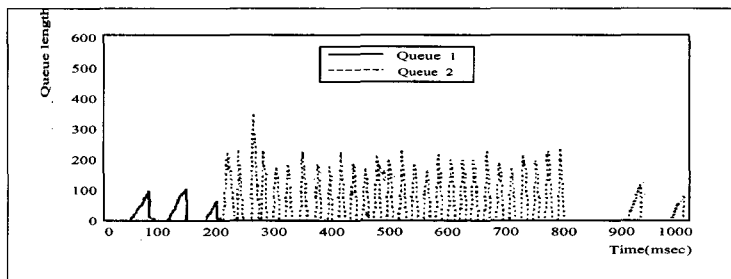
[그림 16] EMRCA 스위치(LAN)

[Fig. 16] EMRCA switch(LAN)



[그림 17] EPRCA 스위치(WAN)

[Fig. 17] EPRCA switch(WAN)



[그림 18] EMRCA 스위치(WAN)

[Fig. 18] EMRCA switch(WAN)

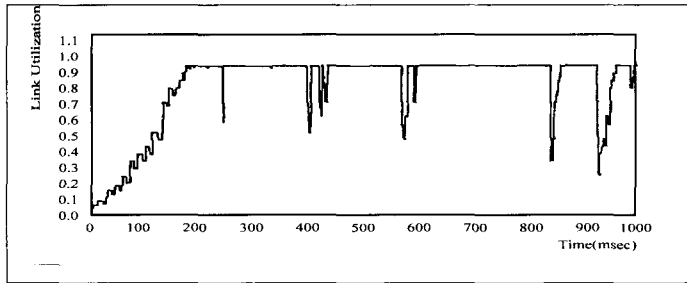
<표 6> 스위치 큐 길이의 변화(LAN/WAN)

<Table 6> The variation of switch queue length(LAN/WAN)

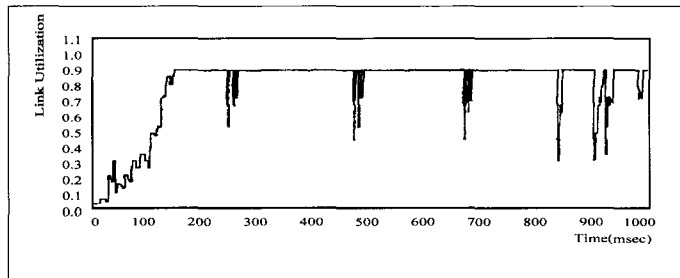
		EPRCA 스위치	EMRCA 스위치
LAN	최소 큐 길이	20	60
	최대 큐 길이	57	350
WAN	최소 큐 길이	82	90
	최대 큐 길이	530	350

4.2.3 링크 이용률의 변화

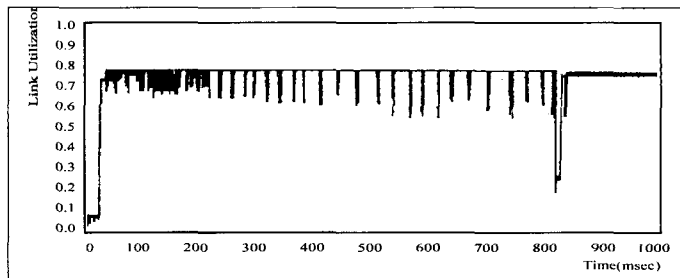
[그림 19]와 [그림 20]의 LAN 환경에서 EPRCA 스위치 방식의 경우 링크 이용률이 93% 부근에서 유지되며 EMRCA 스위치 방식은 거의 97%인 것을 볼 수 있다. [그림 21]과 [그림 22]의 WAN 환경에서 EPRCA 스위치 방식의 경우 평형 상태에서도 링크 이용률 저하가 매우 심한 것을 볼 수 있는데 이는 망에 폭주가 발생하면 MACR을 계산하여 모든 연결의 전송률을 MACR 값으로 감소시키기 때문이다.



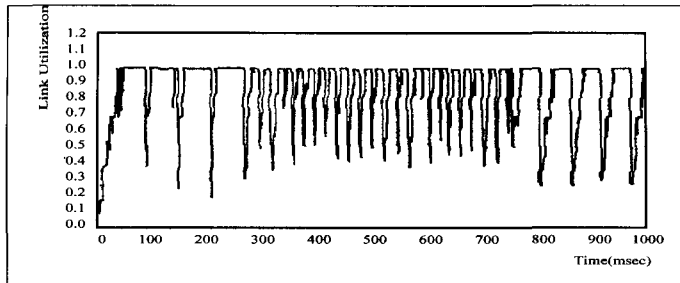
[그림 20] EMRCA 스위치(LAN)
[Fig. 20] EMRCA switch(LAN)



[그림 19] EPRCA 스위치(LAN)
[Fig. 19] EPRCA switch(LAN)



[그림 21] EPRCA 스위치(WAN)
[Fig. 21] EPRCA switch(WAN)



[그림 22] EMRCA 스위치(WAN)
[Fig. 22] EMRCA switch(WAN)

EMRCA 스위치 방식은 송신원에서 전송하는 전송률을 스위치 큐에 있는 두 개의 임계치가 최대 전송률과 최소 전송률로 폭주가 발생된 연결만 선택하여 전송률을 감소시키기 때문에 평형 상태에서 거의 95%의 매우 높은 링크 이용률을 보이며 잠재적 폭주 발생을 사전에 탐지하여 전송률을 제어하므로 셀 손실이 거의 발생하지 않는다. <표 7>에서 보듯이 EMRCA 스위치 알고리즘이 성능이 우수한 것을 볼 수 있다.

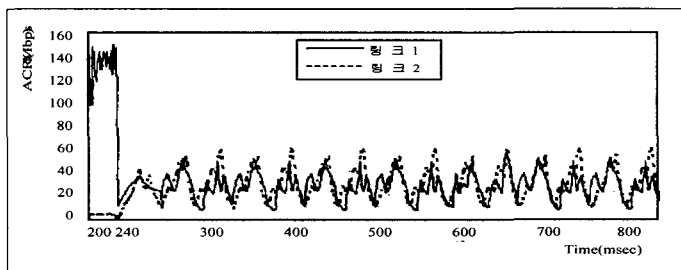
4.2.4 공평성 지수의 변화

[그림 23]과 [그림 24]는 시간에 따른 공평성 지수를 나타낸 것이다. 스위치2에 소스3과 소스4가 추가로 전송을 시작하는 240msec부터 링크 대역폭 전부를 공유하면서 송신원에서의 급격한 전송률 감소를 보이면서 링크1과 링크2에 전송 대역폭이 공평하게 할당됨을 보여준다. 이처럼 LAN/WAN 환경에서 EPRCA 방식과 EMRCA 방식이 모두 공평성 보장이 우수함을 확인할 수 있다. WAN 환경에서는 EPRCA 스위치의 경우 망에 거리가 다른 VC가 존재할 때 공평성이 좀 떨어지지만 큰 성능 저하는 볼 수 없으며 EMRCA 스위치 방식은 공평성 부분에서 우수한 성능을 유지하는 것을 확인할 수 있다.

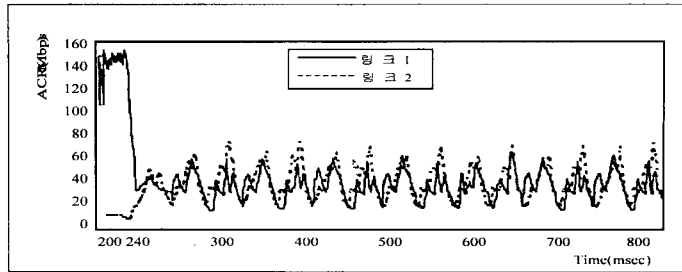
<표 7> 평균 링크 이용률의 변화(LAN/WAN)

<Table 7> The variation of average link utilization rate(LAN/WAN)

	EPRCA 스위치	EMRCA 스위치
LAN	93.39%	98.46%
WAN	76.05%	95.18%



[그림 23] EPRCA 스위치(LAN)
[Fig. 23] EPRCA switch(LAN)



[그림 24] EMRCA 스위치(LAN)

[Fig. 24] EMRCA switch(LAN)

5. 결론

본 논문에서는 EPRCA 스위치 방식과 EMRCA 스위치 방식의 성능을 평가하기 위하여 LAN과 WAN 환경에서 각 송신원에서의 전송률(ACR)의 변화, 스위치 큐 길이, 링크 이용률과 송신원들이 할당 받은 전송률의 공평성 여부를 평가 기준으로 하여 시뮬레이션을 수행한 결과 EMRCA 스위치 방식이 EPRCA 스위치 방식보다 전송률의 변화가 안정적이며 높은 링크 이용률을 유지하면서도 스위치의 큐 길이의 변화가 적었고 공평성 지수에는 별 차이가 없어 전반적으로 성능이 우수함을 알 수 있었다.

EPRCA 방식은 망에 폭주가 발생하면 폭주가 발생된 연결의 전송률을 제어하기 위하여 폭주 발생 여부를 판단하는 하나의 임계치를 사용하여 MACR을 계산하여 모든 VC 연결에 MACR을 전송한다. 송신원에서 매 셀을 전송할 때마다 CCR의 정보를 순방향 RM 셀에 실어보내고 스위치는 이 피드백 정보를 이용하여 MACR을 계산하였다. EPRCA 방식에서 역방향 RM 셀을 받았을 때만 ACR을 감소시키는 것과는 달리 EMRCA 방식은 전송률의 최대값(ACR_{MAX})과 최소값(ACR_{MIN})을 일정하게 유지하고 있어 MACR 값을 계산하기 위한 부동소수점 연산의 필요성이 제거되었으며 망에 폭주가 발생시에 해당 연결들에 대하여 ACR을 변화시킴으로써 평형 상태에서의 ACR이 감소되었고 과도 상태에서의 ramp-up 시간도 다소 개선되었다. 큐 길이를 살펴보았을 때 EMRCA 방식은 LAN 환경에서 전체적인 큐 길이는 조금 증가하였으나 평형 상태에서의 큐 길이가 감소되었고 WAN 환경에서는 전체적인 큐 길이가 줄어들어 큐 특성이 개선되었다.

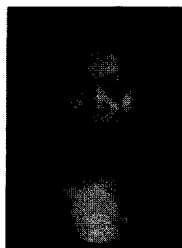
앞으로의 연구 과제로는 다른 여러 ER 피드백 방식들(NIST, ERICA, CAST)과 이진 피드백 스위치 방식의 성능 비교를 위한 지속적인 연구가 요구된다.

※ 참고문헌

- [1] Gary C. Kessler, "ISDN Concepts, Facilities, and Services", McGraw-Hill, 1996.
- [2] The ATM Forum Technical Commitee, "Traffic Management Specification Version 4.0", ATM Forum Contribution 96-0013RI, 1996.
- [3] Shirish S. Sathaye, "ATM Forum a Management Specification Version 4.0", ATM Forum 95-0013R10, Feb. 1996.
- [4] Mischa Schwartz, "Broadband Integrated Networks", Prentice Hall, 1996.
- [5] Y. T. Hou, N. Yin and S. S. Panwar, "Effective Frequency Range of Rate-Based Closed-Loop Congestion Control for ABR Service," In Proceedings of the IEEE ATM'96 Workshop, SanFrancisco, USA, Vol. 1, Session SP1, Aug. 1996.
- [6] 조성현, 오윤택, 박성환, "Development of a Cell Scheduling Algorithm for Transmitting Various Traffics on ATM Networks," Proceedings of the ITC-CSCC97, Okinawa, Japan, July 1997.
- [7] 이 수경, 정 상준, 송 주석, "A Study on ABR Traffic Management in ATM Networks", 통신정보보호학회지, 제 8권, 제 1호, March, 1998.
- [8] Shirish S. Sathaye, "Draft Version 3.0 of ATM Forum Traffic Management Specification Version 4.0", ATM Forum 95-0013R2, April. 1995.

- [9] Katsumi Yamato and Hiroshi Esaki, "Congestion control for ABR Service Based on Dynamic UPC/NPC", IEICE TRANS, COMMU. Vol. E79-B. No 2, Feb, 1996
- [10] Michel Ritter "Network Buffer Requirements of the Rate-based Control Mechanism for ABR Services", 1996
- [11] 김동호, 조유제, 안윤영, 박홍식, "ATM망에서 ABR 서비스를 위한 이진 피드백 스위치 알고리즘의 성능 해석", 한국통신학회논문지, Vol. 22, No. 1, Jan. 1997.
- [12] G. Bianchi, L. Fratta, L. Musumeci, "Congestion Control Algorithm for the ABR Service in ATM Networks," In Proceedings of IEEE Globecom'96, London, Nov. 1996.
- [13] 조유제, "ABR 서비스를 위한 폭주제어 기술 동향", 텔레콤 제11권 제1호, June. 1995.
- [14] Nanying Yin, Michael G. Gluchyj, "On Closed-Loop Rate Control for ATM Cell Relay Networks", INFORCOM '94, June. 1996.
- [15] F. BONOMI AND K.Fendick, "The Rate-Based Flow Control Framework for the Available Bit Rate in ATM service", IEEE Network, Mar/Apr. 1995
- [16] Avril Smith and John Adams and Geoff Tagg, "Availabel Bit Rate a New Service for ATM", 0169-7522/96, 1996.
- [17] ATM Forum, Traffic Management Specification Ver. 4.0, Feb. 1996.
- [18] S. Muddu, F. M. Chiussi, C. Tryfonas, V. P. Kumar, "Max-Min Rate Control Algorithm for Available Bit Rate Service in ATMNetworks," In Proceedings of IEEE ICC'96, Texas, June 1996.

조미령



1997년 2월 방송통신대(독학사)
전자계산학 학위 취득
1997년 8월~1999년 8월
광운대 일반대학원 전자공학
(석사) 졸업
2000년 3월 광운대 일반대학원
전자공학(박사) 재학

이상훈



1983년 2월 광운대학교
응용전자과 졸업(공학사)
1987년 8월 광운대학교 대학원
전자과 졸업(공학석사)
1992년 2월 광운대학교 대학원
전자과 졸업(공학박사)
1991년~현재 광운대학교
전자공학부 교수