

ATM망에서 ABR 서비스를 위한 Relative Rate 스위치 알고리즘의 성능 해석

正會員 김 동 호*, 조 유 제*

Analysis of a Relative Rate Switch Algorithm for the ABR Service in ATM Networks

Dong Ho Kim*, You Ze Cho* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 ATM망에서 ABR (Available Bit Rate) 흐름제어를 위한 RR (Relative Rate) 스위치 알고리즘의 성능을 해석하였다. RR 스위치는 망의 폭주상황을 BRM (Backward Resource Management) 셀의 CI (Congestion Indication) 비트와 NI (No Increase) 비트를 이용하여 송신원에 전달하는 방식이다. 이러한 RR 스위치는 폭주 판단 (congestion detection)과 폭주 통지 (congestion notification) 방법에 따라 여러 방식으로 구현될 수 있다.

본 논문에서는 폭주 판단과 통지 방법에 따른 세 가지 방식의 RR 스위치 알고리즘의 구현 방식을 제안하고, 평형 상태에서 송신원의 ACR (Allowed Cell Rate)과 스위치의 큐 길이의 변화를 유체흐름 근사법 (fluid flow approximation)을 이용하여 해석하였다. 이를 이용하여 RR 스위치에 대한 평형상태에서의 큐 길이의 최대값과 최소값에 대한 상 하한치를 유도하고, ABR 파라미터들의 변화에 따른 큐 길이의 영향을 분석하였다. 또한, 버퍼 고갈에 의한 링크 이용 효율의 저하와 버퍼 범람에 의한 셀 손실을 동시에 방지할 수 있는 RIF (Rate Increase Factor)와 RDF (Rate Decrease Factor) 파라미터의 선택영역을 제시하였다.

ABSTRACT

This paper investigates the performance of a relative rate (RR) switch algorithm for the rate-based available bit rate (ABR) flow control in asynchronous transfer mode (ATM) networks. A RR switch may notify the network congestion status to the source by using the congestion indication (CI) bit or no increase (NI) bit in the backward RM (BRM) cells. A RR switch can be differently implemented according to the congestion detection and notification methods.

In this paper, we propose three implementation schemes for the RR switch with different congestion detection and notification methods, and analyze the allowed cell rate (ACR) of a source and the queue length of a switch in steady state. In addition, we derive the upper and lower bounds for the maximum and minimum queue lengths for each scheme respectively, and evaluate the effects of the ABR parameter values on the queue length. Furthermore, we suggest the range of the rate increase factor (RIF) and rate decrease factor (RDF) parameter values which can prevent buffer overflow and underflow at a switch.

I. 서 론

최근에 ATM 포럼에서는 Traffic Management 규격 4.0을 승인함으로써 전송률 기반 ABR (Available Bit Rate) 흐름제어를 위한 송신원과 수신원의 동작에 관한 규격을 확정하였다. 그러나, 스위치의 동작은 다양한 vendor 제품들의 상호운용을 위한 기본적인 요구사항만을 규정하고 있으며 구체적인 구현방법은 개발자의 선택사항으로 되어 있다[1].

지금까지 제안된 대표적인 전송률 기반의 ABR 스위치로는 폭주 정보의 전달 방식에 따라 EFCI (Explicit Forward Congestion Indication) 스위치와 RR (Relative Rate) 스위치, 그리고 ER (Explicit Rate) 스위치로 나눌 수 있다. EFCI 스위치는 ATM 셀의 헤더에 있는 EFCI 비트를 이용하여 망이 폭주상태인지 아닌지를 구분하는 두 가지 상태만을 수신원에 알리게 된다. 수신원은 도착하는 데이터 셀의 EFCI 비트의 상태에 따라 BRM (Backward Resource Management) 셀의 CI (Congestion Indication) 비트를 이용하여 송신원에 폭주발생과 해제를 알린다[1]-[4]. RR 스위치는 망의 중간 스위치가 BRM 셀의 CI 비트와 NI (No Increase) 비트를 이용하여 망의 상태를 송신원에 알리는 방식이다[1]. 그리고, ER 스위치는 VC (Virtual Connection)들 간의 전송률의 공평한 몫인 fair share와 입력부하의 정도를 고려하여 각 VC마다 망에서 허용할 수 있는 전송률인 ER 값을 결정하여 BRM 셀의 ER 필드에 실어 송신원에 알리게 된다[1].

지금까지는 주로 ER 스위치 알고리즘 개발과 EFCI 스위치의 평형상태에서의 해석에 대해서 주로 연구가 이루어지고 있다[2]-[4]. 그리고, RR 스위치의 구현 방식에 대해서는 일부 논문에서 제안되고 있으나 성능 해석에 관한 연구는 전무한 상태이다[5]-[6]. [5]에서는 NI 비트를 사용하여 폭주 통지 기능은 수행하나

송신원 동작이 본 논문에서와 같은 ATM 포럼의 표준 ABR 송신원 동작을 따르는 것은 아니다. 그리고, [6]에서도 역시 NI 비트를 사용할 것을 제안하고 있으나 단일 노드 환경에 대해서 시뮬레이션을 통해 일부 ABR 파라미터에 따른 성능 분석만을 수행 하였다. EFCI 스위치는 구현이 간단하다는 장점은 있으나 망의 상황이 송신원으로 전달되는 데 걸리는 피드백 시간이 길어지는 WAN 환경에서는 셀 손실과 링크의 효율적인 이용을 보장하기 어렵다는 단점을 가진다 [2]-[4]. 반면에, ER 스위치는 EFCI 스위치가 가지는 단점들은 해결할 수 있으나 구현이 복잡한 문제가 있다. 따라서, 이들 두 방식의 절충안으로 어느 정도의 성능을 보장하면서 수용할만한 복잡도를 가지는 RR 스위치가 널리 사용될 것으로 전망된다.

본 논문에서는 RR 스위치의 구현 방식을 폭주 판단과 폭주 통지 방법에 따라 세 가지 방식으로 구분하고, 유체흐름 근사법 (fluid flow approximation)을 이용하여 평형상태에서 큐 길이의 최대값과 최소값에 대한 상 하한치를 해석한다. 그리고, PCR (Peak Cell Rate), MCR (Minimum Cell Rate), RIF (Rate Increase Factor), RDF (Rate Decrease Factor) 등과 같은 ABR 파라미터들의 변화에 따른 큐 길이의 최소값과 최대값의 영향을 분석한다. 또한, 버퍼 고갈에 의한 셀 손실과 버퍼 범람에 의한 링크 이용 효율의 저하를 방지할 수 있는 RIF와 RDF의 선택방법을 제시한다.

논문의 구성은 서론에 이어 II장에서는 본 논문에서 고려된 세 가지 방식의 RR 스위치 알고리즘과 해석에 사용된 망 모델을 소개하고, 평형상태에서 송신원의 ACR (Allowed Cell Rate)과 스위치의 큐 길이의 변화를 해석한다. III장에서는 II장에서 구한 결과들을 이용하여 큐 길이의 최대값에 대한 상한치와 최소값에 대한 하한치를 유도한다. IV장에서는 ABR 파라

미터 변화에 따른 큐 길이의 최대값과 최소값의 영향을 분석하고, 버퍼 고갈과 범람을 방지할 수 있는 RIF와 RDF 파라미터의 선택방법을 제시한다. 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. Relative Rate 스위치의 평형상태 해석

2.1 RR 스위치의 구현 방식

RR 스위치는 망의 상황을 BRM 셀의 CI 비트와 NI 비트를 이용하여 송신원에게 알리는 방식이다. RR 스위치는 스위치에서 링크 대역폭의 공평한 몫을 ER 필드에 실어 송신원으로 전송하는 ER 스위치에 비해 성능은 다소 떨어지나, ER 스위치보다 아주 간단하게 구현할 수 있으며 EFCI 스위치에 비해 우수한 성능의 얻을 수 있다. 이러한 RR 스위치는 폭주 판단과 통지 방법에 따라 여러 방식으로 구현될 수 있다.

폭주 판단 방법은 버퍼 임계치를 이용하는 방식과 버퍼의 임계치와 큐 길이의 변화율을 동시에 이용하는 방식으로 나눌 수 있다. 폭주 판단을 위해 버퍼 임계치만을 사용하는 방식은 큐 길이와 미리 정한 버퍼 임계치를 비교하여 폭주의 발생과 해제를 판단한다. 따라서, 스위치가 폭주를 판단하는 데 항상 지연이 발생하게 된다. 반면에, 큐 길이의 변화율을 버퍼의 임계치와 동시에 사용하는 방식은 큐 길이의 증감 상태를 이용함으로써 폭주 발생과 해제를 신속히 판단할 수 있다.

폭주 통지 방법은 BRM 셀의 CI 비트만을 사용하는 방식과 CI 비트와 NI 비트를 동시에 사용하는 방식으로 나눌 수 있다. 먼저, CI 비트만을 사용하는 경우에 송신원은 CI 비트의 상태에 따라 자신의 전송률을 증가시키거나 감소시켜야 하기 때문에 ACR의 진동이 필연적으로 발생하게 된다. 반면에, 폭주 통지를 위해 NI 비트를 CI 비트와 동시에 사용할 경우는 NI가 1로 설정된 BRM 셀을 받은 송신원은 자신의 전송률을 그대로 유지시킬 수 있으므로 CI 비트만을 사용하는 방식에 비해 ACR의 진동을 크게 줄일 수 있다.

본 논문에서는 폭주 판단과 통지 방식에 따른 세 가지 RR 스위치의 구현 방식을 제안하는데 이들 방식의 특징은 표 1과 같다. 방식 I과 II는 폭주 판단 방법은 동일하나 폭주 통지 방법이 서로 다르며, 방

표 1. RR 스위치의 구현 방식

Table 1. Implementation methods for RR switch.

	폭주 판단	폭주 통지
방식 I	버퍼 임계치	CI 비트
방식 II	버퍼 임계치	CI 비트와 NI 비트
방식 III	버퍼 임계치와 큐 길이 변화율	CI 비트와 NI 비트

식 II와 III은 폭주 통지 방법은 동일하나 서로 다른 폭주 판단 방법을 사용한다.

표 2. 방식 I에 의한 CI 비트 설정 방법

Table 2. Setting method of CI bit for the scheme I.

$Q \geq Q_H$	BRM.CI = 1, Flag = 1	
$Q \leq Q_L$	Flag = 0	
$Q_L < Q < Q_H$	Flag = 1	BRM.CI = 1
	Flag = 0	no action

먼저, 방식 I은 폭주 통지 방법으로 BRM 셀의 CI 한 비트를 이용함으로써 망의 상태를 두 가지로 구분하여 송신원에 전달한다. BRM 셀 도착시 큐 길이 Q 가 폭주가 발생한 것으로 판단하는 버퍼의 임계치 Q_H 를 넘으면 CI 비트를 1로 설정하며, 이러한 설정과 정은 큐 길이가 폭주가 해제된 것으로 판단하는 버퍼의 임계치 Q_L 이하로 줄어들 때까지 계속된다. 이 방식에 따른 CI 비트 설정 방법은 표 2에 나타나 있다.

표 3. 방식 II에 의한 CI 비트와 NI 비트 설정 방법

Table 3. Setting method of CI and NI bits for the scheme II.

$Q \geq Q_H$	BRM.CI = 1
$Q_L < Q < Q_H$	BRM.NI = 1
$Q \leq Q_L$	no action

반면에, 방식 II와 III은 폭주 통지 방법으로 NI 비트를 CI 비트와 함께 고려함으로써 망의 상태를 세 가지로 구분하여 송신원에 전달할 수 있다. BRM 셀 도착시 망이 폭주상태에 있으면 CI 비트를 1로 설정하고, 폭주해제나 발생이 예상되면 NI 비트를 1로 설정한다. 폭주해제 상황이면 BRM셀의 CI 비트와 NI

비트는 수신된 상태 그대로 다음 스위치로 전달한다. 이러한 방식은 폭주 판단을 위해 버퍼 입계치만을 이용하는 방식 II와 버퍼 입계치와 큐 길이의 변화율을 동시에 이용하는 방식 III으로 나눌 수 있으며, 각 방식에 따른 CI 비트와 NI 비트의 설정 방법은 표 3과 4에 각각 나타나 있다.

표 4. 방식 III에 의한 CI 비트와 NI 비트 설정 방법
Table 4. Setting method of CI and NI bits for the scheme III.

$Q \geq Q_H$	$dQ/dt \geq 0$	BRM.CI = 1
	$dQ/dt < 0$	
$Q_L < Q < Q_H$		BRM.NI = 1
$Q \leq Q_L$	$dQ/dt > 0$	
	$dQ/dt \leq 0$	no action

먼저, 방식 II는 폭주 통지 방법으로 NI 비트를 설정할 수 있는 가장 간단한 방식으로, 방식 I과는 달리 큐 길이가 Q_L 과 Q_H 사이에 존재하면 NI 비트를 설정하여 송신원의 ACR을 유지시킨다. 그리고, 방식 III은 큐 길이가 Q_H 보다 크지만 감소상태에 있거나, Q_L 보다는 작지만 증가상태에 있으면 폭주해제나 발생이 예상된다고 판단하여 CI 비트 대신에 NI 비트를 설정함으로써 ACR을 유지시킨다. 이러한 영역을 제외한 나머지 영역에서의 CI 비트와 NI 비트의 설정 방법은 방식 II에서와 동일하다.

2.2 망 모델 및 파라미터의 정의

RR 스위치의 성능을 해석하기 위해 고려된 망 모델은 그림 1에서와 같이 N개의 동질 (homogeneous)의 트래픽 소스들이 하나의 병목 ATM 링크 LCR (Link Cell Rate)을 공유하여 전송하는 것으로 가정하였다. 각 송신원은 persistent 소스로 전송할 셀이 무한히 많다고 가정하였다. 그리고, 수신원은 송신원에서 발생된 RM 셀을 되돌리는 기능만을 가지며 자신의 셀은 발생시킬 수 없다고 가정하였다. 또한, 스위치에서 BRM 셀에 대한 큐잉지연과 처리지연은 없다고 가정하였다.

먼저, 해석을 위해 사용되는 파라미터들에 대하여 정의를 하면 다음과 같다.

- N: 활성중인 송신원의 수.

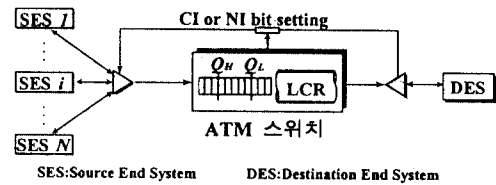


그림 1. 망 모델
Fig. 1 Network model.

- LCR: 병목 링크의 전송용량.
- ACR_{max} : 평형상태에서 송신원의 ACR의 최대값.
- ACR_{min} : 평형상태에서 송신원의 ACR의 최소값.
- Q_H : 스위치에서 폭주가 발생한 것으로 판단하는 버퍼의 입계치.
- Q_L : 스위치에서 폭주가 해제된 것으로 판단하는 버퍼의 입계치.
- Q_{max} : 평형상태에서 스위치의 큐 길이의 최대값.
- Q_{min} : 평형상태에서 스위치의 큐 길이의 최소값.
- τ_{sx} : 송신원과 스위치 사이의 전파지연 시간.
- w_s : 스위치에서 망 상황을 송신원에 알리기 위한 BRM 셀을 받는 데까지 걸리는 지연 시간을 나타내는 변수.

2.3 송신원의 ACR과 스위치의 큐 길이 해석

2.3.1 송신원의 전송률의 변화 $ACR(t)$ 의 해석

ABR 흐름제어에서 송신원은 FRM (Forward Resource Management) 셀의 ER 필드를 PCR로 CI 비트와 NI 비트를 영으로 설정하여 망으로 전송하고, 수신원에서 되돌아오는 BRM 셀의 정보에 따라 자신의 ACR을 조정하게 된다. 본 논문에서는 RR 스위치만을 고려하였으므로 BRM 셀의 ER 필드의 값은 송신원에서 설정된 PCR과 동일한 것으로 볼 수 있다. 따라서, 송신원은 BRM 셀의 CI 비트와 NI 비트의 상태만을 이용하여 자신의 ACR을 조정하게 된다.

먼저, CI = 1인 BRM 셀을 수신한 송신원은 NI 비트의 상태와는 무관하게 전송률 감소분을 결정하는 파라미터 RDF를 이용하여 자신의 ACR을 다음과 같이 감소시켜야 한다[1].

$$ACR = \max[MCR, \min\{ER, (ACR - RDF \cdot ACR)\}] \quad (1)$$

그리고, CI=0이고 NI=1인 BRM 셀을 수신한 송신원은 전송률 조정과정 없이 계속해서 현재의 ACR로 전송할 수 있다. 반면에, CI=0이고 NI=0인 BRM 셀을 수신한 송신원은 전송률 증가분을 결정하는 파라미터 RIF를 이용하여 자신의 ACR을 다음과 같은 수식에 따라 증가시키게 된다[1].

$$ACR = \min\{PCR, ER, (ACR + RIF \cdot PCR)\} \quad (2)$$

본 논문에서는 버퍼의 범람에 의한 셀 손실과 버퍼 고갈에 의한 링크 이용 효율의 저하를 동시에 방지할 수 있는 RIF와 RDF 파라미터의 값을 결정하고자 한다. 링크 이용 효율의 저하를 방지하기 위해서는 스위치의 큐 길이의 최소값이 항상 영 이상으로 유지되어야 한다. 따라서, 스위치 버퍼에는 항상 전송할 셀이 존재하므로 평형상태에서 송신원의 ACR의 변화는 각 방식에 따라 그림 2에서 4까지를 통해 볼 수 있듯이, ACR이 감소되는 기간인 phase 1과 ACR이 증가되는 기간인 phase 2가 교대로 반복되는 것으로 볼 수 있다. 이 그림에서는 유체흐름 근사법을 사용하여 시간에 따라 ACR과 큐 길이가 연속적으로 변화하는 것으로 가정하여 나타내었다. 이러한 유체흐름 근사법을 사용하면 불연속적인 셀의 흐름을 연속적인 셀의 흐름으로 근사화하여 해석이 가능하다는 장점을 가진다.

그리고, 해석의 편의를 위해 각 phase를 다시 두 부분으로 나누어 해석한다. 먼저 phase 1'는 끝나는 시간은 phase 1과 동일하나 N 개의 송신원들로부터의 ACR의 합이 링크 전송률 LCR과 같게 되는 시간에서 시작한다. 그리고, phase 2' 역시 끝나는 시간은 phase 2와 동일하나 phase 1'와 마찬가지로 ACR이 LCR/N 이 되는 시간에 시작된다. 이렇게 각 phase를 세분화 하면 그림 2에서 4까지를 통해 보는 바와 같이 phase 1'가 시작되어 τ_{sx} 후에 스위치의 큐 길이는 최대에 이르게 되며, phase 2'가 시작되고 τ_{sx} 후의 큐 길이가 최소가 됨을 알 수 있다.

또한, phase i 가 시작하는 시간 t_i 에서의 ACR의 초기값과 스위치의 큐 길이의 초기값을 다음과 같이 정의한다.

$$ACR_i(0) \equiv ACR(t_i), \quad Q_i(\tau_{sx}) \equiv Q(t_i + \tau_{sx}). \quad (3)$$

위의 식 (3)의 정의에 따라 각 phase에서 ACR의 초기값과 큐 길이의 초기값은 그림 2에서 4까지에서 볼 수 있듯이 다음과 같이 주어진다.

$$ACR_1(0) = ACR_{max}, \quad ACR_2(0) = ACR_{min},$$

$$ACR_1(0) = \frac{LCR}{N}, \quad ACR_2(0) = \frac{LCR}{N}, \quad (4)$$

$$Q_1(\tau_{sx}) = Q_{max}, \quad Q_2(\tau_{sx}) = Q_{min}.$$

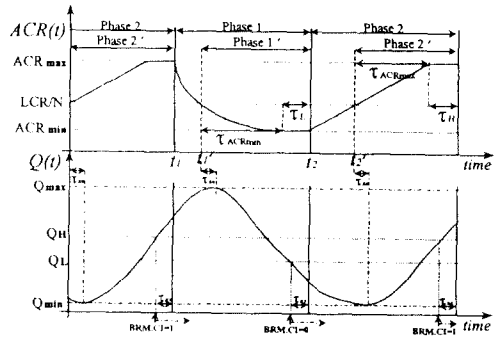


그림 2. 방식 1에 대한 평형상태에서의 ACR과 큐 길이의 변화

Fig. 2 Dynamic behavior of $ACR(t)$ and $Q(t)$ for the scheme 1 in steady state.

가. Phase 1, Phase 1': $ACR_1(t), ACR_1(t)$

스위치에서 폭주가 발생하면 송신원은 CI=1인 BRM 셀을 받게되고 자신의 ACR을 식 (1)과 같이 현재의 ACR에 비례하여 감소시키게 된다. 따라서, phase 1과 phase 1'에서의 ACR의 변화는 유체흐름 근사법을 이용하여 다음과 같이 각각 구할 수 있다[4].

$$ACR_i(t) = \max\left\{MCR, ACR_i(0) e^{-\frac{RDF \cdot LCR}{N \cdot Nm} t}\right\},$$

$$i = 1, 1'. \quad (5)$$

나. Phase 2, Phase 2': $ACR_2(t), ACR_2(t)$

스위치에서 폭주가 해제되면 CI와 NI 비트의 상태가 모두 영인 BRM 셀이 송신원으로 전달되므로 송신원의 ACR은 식 (2)와 같이 additive하게 증가한다.

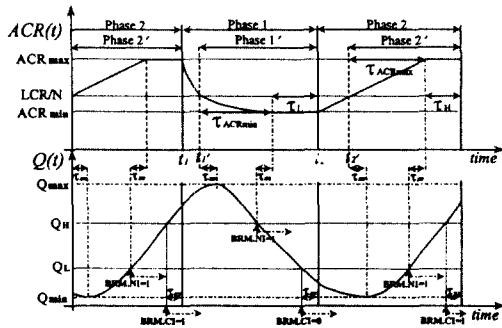


그림 3. 방식 II에 대한 평형상태에서의 ACR과 큐 길이의 변화

Fig. 3 Dynamic behavior of $ACR(t)$ and $Q(t)$ for the scheme II in steady state.

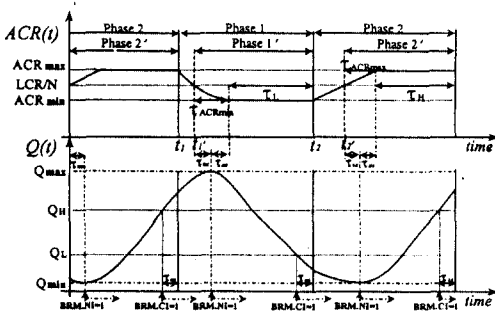


그림 4. 방식 III에 대한 평형상태에서의 ACR과 큐 길이의 변화

Fig. 4 Dynamic behavior of $ACR(t)$ and $Q(t)$ for the scheme III in steady state.

따라서, phase 2와 phase 2'에서의 ACR의 변화는 다음과 각각 같이 구해진다[4].

$$ACR_i(t) = \min \left\{ PCR, ACR_i(0) + \frac{RIF \cdot PCR \cdot LCR}{N \cdot Nrm} t \right\}$$

$$i = 2, 2'. \quad (6)$$

2.3.2 스위치의 큐 길이의 변화 $Q(t)$ 의 해석

실제 송신원의 ACR의 변화는 송신원과 스위치 사이의 전파지연 시간으로 인해 τ_{sx} 시간이 경과된 후에 라야 스위치의 큐 길이에 영향을 미치게 되며, phase i 에서 큐 길이의 변화 $Q(t)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다[4].

$$Q_i(t) = \max \left[0, Q_i(\tau_{sx}) + \int_{\tau_{sx}}^t \{N \cdot ACR_i(x - \tau_{sx}) - LCR\} dx \right]$$

$$t > \tau_{sx}. \quad (7)$$

III. 큐 길이의 최대값과 최소값 해석

3.1 큐 길이의 최대값 해석

스위치의 큐 길이는 버퍼에 도착하는 ACR의 합이 링크의 전송용량 LCR을 초과하는 동안에는 계속 증가하게 되며, phase 1에서 큐 길이의 최대값 Q_{max} 는 다음과 같이 구해진다[4].

$$Q_{max} = Q_i(\tau_{sx}) + \frac{N \cdot Nrm}{RDF} \left\{ \ln \left(\frac{LCR}{N \cdot ACR_{max}} \right) + \frac{N \cdot ACR_{max}}{LCR} - 1 \right\}. \quad (8)$$

따라서, 큐 길이의 최대값은 송신원의 ACR의 최대값 ACR_{max} 와 phase 1에서 스위치에서의 큐 길이의 초기값 $Q_i(\tau_{sx})$ 를 알면 위의 식 (8)로부터 구할 수 있다. 먼저, ACR_{max} 를 구하기 위해서는 phase 2'에서 ACR이 최대로 증가하는 데 걸리는 시간을 구해야 하며 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_{ACR_{max}} = \min(\tau_{max}, \tau_{PCR}), \quad (9)$$

여기서, τ_{max} 는 송신원의 ACR이 PCR까지 증가하지 못한 경우에 ACR이 additive하게 증가하여 최대값에 도달하는 데까지 걸리는 시간을 나타내며, 식 (4)와 (6) 그리고 식 (7)을 이용하면 각 방식에 따라 다음과 같이 구해진다.

$$\tau_{max} = \begin{cases} \sqrt{\frac{2Nrm(Q_H - Q_{min})}{RIF \cdot PCR \cdot LCR}} + 2\tau_{sx}, & \text{for the scheme I} \\ \sqrt{\frac{2Nrm(Q_L - Q_{min})}{RIF \cdot PCR \cdot LCR}} + 2\tau_{sx}, & \text{for the scheme II} \\ 2\tau_{sx}, & \text{for the scheme III} \end{cases} \quad (10)$$

그리고, τ_{PCR} 은 송신원의 ACR이 PCR까지 증가할 수

있는 경우에 걸리는 시간을 의미한다.

$$\tau_{PCR} = \frac{Nrm(N \cdot PCR - LCR)}{RIF \cdot PCR \cdot LCR} \quad (11)$$

따라서, 식 (9)를 식 (6)에 대입하면 ACR의 최대값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$ACR_{max} = \frac{LCR}{N} + \frac{RIF \cdot PCR \cdot LCR}{N \cdot Nrm} \tau_{ACR_{max}} \quad (12)$$

그리고, 식 (8)에서 phase 1에서의 큐 길이의 초기값 $Q_1(\tau_{sx})$ 는 phase 2'에서의 큐 길이의 초기값과 ACR 그리고 지속 기간 등을 식 (7)에 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_1(\tau_{sx}) &= Q_2(\tau_{sx}) + \int_{\tau_{sx}}^{\tau_{ACR_{max}} + \tau_H + \omega_s + \tau_{sx}} \{N \cdot ACR_2(t - \tau_{sx}) - LCR\} dt \\ &= Q_{min} + \left(\frac{\tau_{ACR_{max}}}{2} + \tau_H + \omega_s \right) (N \cdot ACR_{max} - LCR). \end{aligned} \quad (13)$$

여기서, τ_H 는 phase 2'에서 ACR이 최대값에 이른 후 phase 2'가 끝나서 다시 감소하기 전까지 ACR_{max} 값으로 지속되는 기간을 의미한다. Phase 2'는 큐 길이가 Q_H 된 후 τ_{sx} 후에 끝나며, 큐 길이가 Q_H 되게 하는 송신원의 ACR이 이미 최대로 증가한 경우와 그렇지 못한 경우에 따라 다음과 같이 구해진다.

$$\tau_H = \begin{cases} \frac{Q_H - Q_{min}}{N \cdot ACR_{max} - LCR} + 2\tau_{sx} - \frac{\tau_{ACR_{max}}}{2} & \text{if } Q_2(\tau_{ACR_{max}} + \tau_{sx}) < Q_H, \\ \sqrt{\frac{2Nrm(Q_H - Q_{min})}{RIF \cdot PCR \cdot LCR}} + 2\tau_{sx} - \tau_{ACR_{max}} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (14)$$

그리고, w_s 는 스위치가 망의 상황을 송신원에 알리기 위한 BRM 셀을 받는 데까지 걸리는 지연 시간으로 다음과 같다.

$$w_s = \begin{cases} 0, & \text{for the best case} \\ \frac{N(Nrm - 1)}{LCR}, & \text{for the worst case} \end{cases} \quad (15)$$

여기서, "best case"는 망의 상황 변화시 스위치가 바로 해당 VC의 BRM 셀을 받는 경우로 송신원으로 보낼 BRM 셀을 받는 데 걸리는 지연 시간이 가장 짧은 경우를 의미한다. 반면, "worst case"는 망의 상황이 변화하기 바로 전에 해당 VC에 BRM 셀을 전송한 경우로 송신원으로 보낼 BRM 셀을 받는 데 걸리는 지연 시간이 가장 길어지는 경우를 의미한다.

3.2 큐 길이의 최소값 해석

버퍼에 도착하는 ACR의 합이 전송 링크 용량 LCR 보다 낮게 유지되는 동안에는 큐 길이는 계속 감소하게 되며, phase 2에서 큐 길이의 최소값 Q_{min} 은 다음과 같이 구해진다[4].

$$Q_{min} = Q_2(\tau_{sx}) - \frac{Nrm(N \cdot ACR_{min} - LCR)^2}{2RIF \cdot PCR \cdot LCR} \quad (16)$$

먼저, 식 (16)에서 ACR의 최소값인 ACR_{min} 을 구하기 위해서는 phase 1'에서 ACR이 최소로 감소하는 데 걸리는 시간을 알아야 하며 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_{ACR_{min}} = \min(\tau_{min}, \tau_{MCR}). \quad (17)$$

여기서, τ_{min} 은 송신원의 ACR이 MCR보다 큰 경우에 ACR이 multiplicative하게 감소하여 최소값에 도달하는 데까지 걸리는 시간을 의미하며 각 방식에 따라 다음과 같이 구해진다.

$$\tau_{min} = \begin{cases} Q_1^{-1}(Q_L) + 2\tau_{sx}, & \text{for the scheme I} \\ Q_1^{-1}(Q_H) + 2\tau_{sx}, & \text{for the scheme II} \\ 2\tau_{sx}, & \text{for the scheme III} \end{cases} \quad (18)$$

여기서, $Q_1^{-1}(Q_x)$ 는 $Q_1(t + \tau_{sx}) = Q_x$ 의 역함수를 의미한다. 예를 들어, $Q_1^{-1}(Q_L)$ 은 다음 식을 만족시키는 t 를 나타낸다.

$$Q_{max} - \frac{N \cdot Nrm}{RDF} \left(e^{-\frac{RDF \cdot LCR}{N \cdot Nrm} t} - 1 \right) - LCR \cdot t - Q_L = 0 \quad (19)$$

그리고, τ_{MCR} 은 송신원의 ACR이 MCR까지 낮아지는 경우에 걸리는 시간을 의미한다.

$$\tau_{MCR} = -\frac{N \cdot Nrm}{RDF \cdot LCR} \ln \left(\frac{N \cdot MCR}{LCR} \right). \quad (20)$$

따라서, 식 (17)을 식 (5)에 대입하면 ACR의 최소값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$ACR_{max} = \frac{LCR}{N} e^{-\frac{RDF \cdot LCR}{N \cdot Nrm} \tau_{ACR_{min}}}. \quad (21)$$

그리고, 식 (16)에서 phase 2에서 큐 길이의 초기값 $Q_2(\tau_{sx})$ 는 phase 1'에서의 큐 길이의 초기값과 ACR 그리고 지속 시간 등을 식 (7)에 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_2(\tau_{sx}) &= Q_1(\tau_{sx}) + \int_{\tau_{sx}}^{\tau_{ACR_{min}} + \tau_L + \omega_s + \tau_{sx}} \{N \cdot ACR_1(t - \tau_{sx}) - LCR\} dt \\ &= Q_{max} - \frac{N \cdot Nrm}{RDF} \left(e^{-\frac{RDF \cdot LCR}{N \cdot Nrm} \tau_{ACR_{min}}} - 1 \right) \\ &\quad - LCR \cdot \tau_{ACR_{min}} + (\tau_L + \omega_s)(N \cdot ACR_{min} - LCR). \end{aligned} \quad (22)$$

여기서, τ_L 는 phase 1'에서 ACR이 최소로 감소한 후 phase 1'가 끝나서 다시 증가하기 전까지 ACR_{min} 값으로 지속되는 기간을 의미한다. Phase 1'는 큐 길이가 Q_L 된 후 τ_{sx} 후에 끝나며, 큐 길이가 Q_L 되게 하는 송신원의 ACR이 이미 최소로 감소한 경우와 그렇지 못한 경우에 따라 다음과 같이 구해진다.

$$\tau_L = \begin{cases} \frac{Q_L - Q_{max} + \frac{N \cdot Nrm}{RDF} \left(e^{-\frac{RDF \cdot LCR}{N \cdot Nrm} \tau_{ACR_{min}}} - 1 \right) + LCR \cdot \tau_{ACR_{min}}}{N \cdot ACR_{min} - LCR} + 2\tau_{sx} & \text{if } Q_1(\tau_{ACR_{min}} + \tau_{sx}) > Q_L, \\ Q_L^{-1}(Q_L) + 2\tau_{sx} - \tau_{ACR_{min}} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (23)$$

IV. 수치 결과 분석

본 장에서는 앞 장에서 해석한 큐 길이의 최대값과 최소값의 상·하한치를 이용하여 ABR 파라미터 변화에 따른 RR 스위치의 성능을 분석한다. 먼저, ABR 파라미터 변화에 따른 큐 길이의 최대값의 상한치와 최소값의 하한치의 영향을 분석한다. 그리고, ABR 파라미터 변화에 대한 각 방식의 성능의 민감도를 비교 분석한다. 또한, 버퍼 고갈에 의한 링크 이용 효율

저하와 버퍼 범람에 의한 셀 손실을 동시에 방지할 수 있는 RIF와 RDF의 선택영역을 제시한다.

표 5. 고려된 ABR 파라미터의 값

Table 5. ABR parameter values considered.

LCR	PCR	MCR	N	Nrm	RIF	RDF	Q_H, Q_L	$2\tau_{sx}$
150 Mbps	150 Mbps	0	10	32 cells	1/16	1/16	2000, 1000 cells	1 msec

표 5에는 성능 분석을 위해 사용된 ABR 파라미터의 값들을 나타내었으며, 특별한 언급이 없는 경우 모든 결과는 이를 이용하여 구한다.

4.1 ABR 파라미터에 따른 큐 길이

그림 5에서 11까지는 버퍼 크기가 무한대라고 가정할 경우에 ABR 파라미터 변화에 따른 큐 길이의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 점선은 각 방식의 최소값의 하한치를 나타내며 실선은 최대값의 상한치를 나타낸다. 여기서부터, 큐 길이의 최대값의 상한치와 최소값의 하한치를 각각 큐 길이의 최대값과 최소값으로 간략화시켜 부르기로 한다.

그림 5에는 송신원의 피크 셀수에 따른 큐 길이의 영향을 나타내고 있으며, 피크 셀수가 증가할수록 모든 방식에 대해 큐 길이의 최대값과 최소값이 증가함을 알 수 있다. 이러한 이유는 ACR의 증가폭은 PCR에 비례하여 증가하고 감소폭은 현재의 ACR에 비례하여 감소하기 때문이다.

그림 6에는 송신원의 최소 셀수의 변화에 따른 큐 길이의 영향을 나타내고 있으며, 최소 셀수가 증가할수록 큐 길이의 최소값은 증가하고 최대값은 감소함을 알 수 있다. 이러한 이유는 MCR이 증가할수록 스위치의 버퍼가 고갈될 가능성이 낮아지며, ACR이 최대로 증가하는 데 걸리는 시간이 줄어들기 때문이다.

그림 7에는 송신원의 ACR의 증가폭에 관련된 파라미터인 RIF의 변화에 대한 큐 길이 영향을 나타내고 있으며, RIF의 값이 증가할수록 큐 길이의 최대값과 최소값이 증가함을 알 수 있다. 최소값이 증가하는 이유는 RIF 값이 커질수록 고정된 값의 RDF에 의한 ACR의 감소폭보다 RIF에 의한 ACR의 증가폭이 더 크기 때문이다.

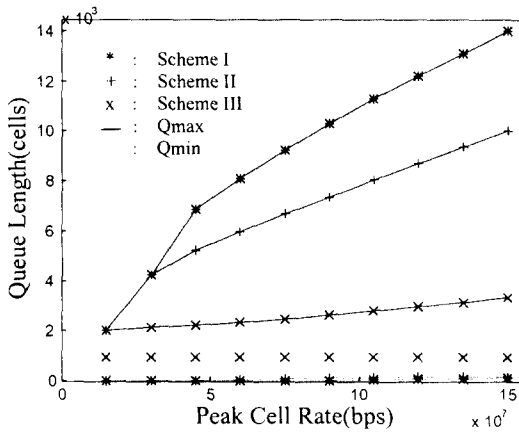


그림 5. 송신원의 피크 셀률에 따른 큐 길이
Fig. 5 Queue length vs. the peak cell rate.

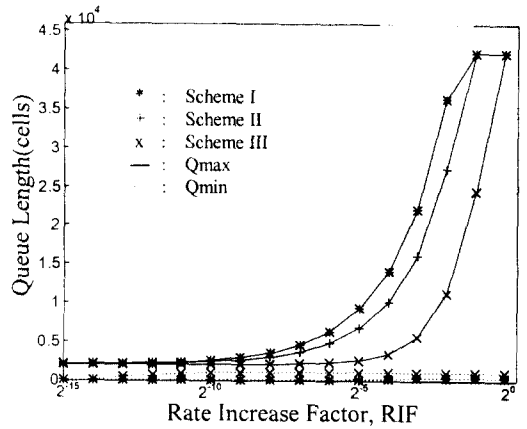


그림 7. RIF에 따른 큐 길이
Fig. 7 Queue length vs. RIF.

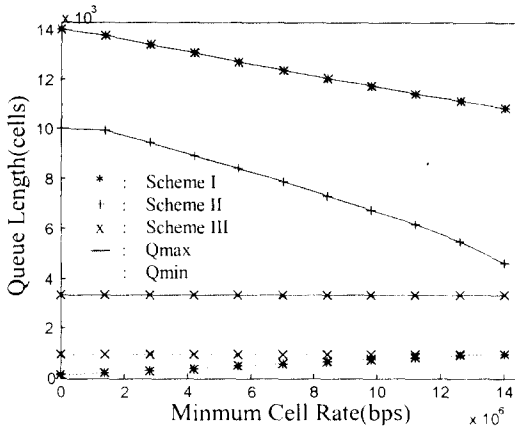


그림 6. 송신원의 최소 셀률에 따른 큐 길이
Fig. 6 Queue length vs. the minimum cell rate.

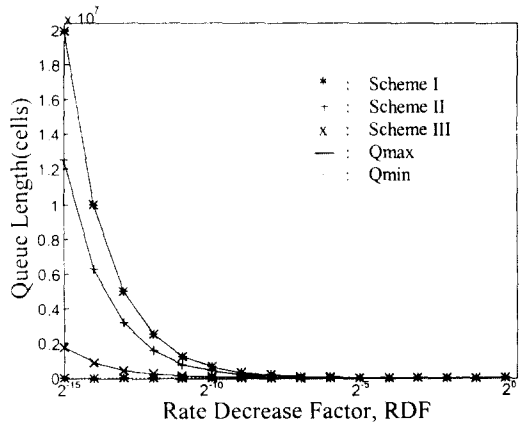


그림 8. RDF에 따른 큐 길이
Fig. 8 Queue length vs. RDF.

그림 8에는 송신원의 ACR의 감소폭에 관련된 파라미터인 RDF의 변화에 대한 큐 길이의 영향을 나타내고 있다. RDF가 증가할수록 큐 길이의 최대값과 최소값이 감소함을 알 수 있다. 특히, RDF의 값이 1에 근접할수록 RIF에 의한 ACR의 증가폭에 비해 RDF에 의한 ACR의 감소폭이 훨씬 더 크기 때문에 큐 길이의 최대값이 급격히 감소함을 알 수 있다.

그림 9에는 송신원과 스위치간의 왕복 전파지연 시

간 $2\tau_{sx}$ 의 변화에 따른 큐 길이의 영향을 나타내고 있다. 전파지연 시간이 증가할수록 망의 폭주상황이 송신원으로 전달되는 데 걸리는 시간이 증가되어 송신원의 ACR의 진동이 심해짐을 알 수 있다. 이로 인해, 스위치의 큐 길이의 진폭이 증가하여 큐의 최대값은 증가하고 최소값은 감소하게 된다.

그림 10에는 활성 중인 송신원의 수의 변화에 따른 큐 길이의 영향을 나타내고 있으며, 송신원의 수가

증가할수록 큐 길이의 최소값은 감소하고 최대값은 증가함을 알 수 있다. 특히, 송신원의 수가 증가할수록 각 방식의 성능 차이가 더 두드러짐을 볼 수 있다.

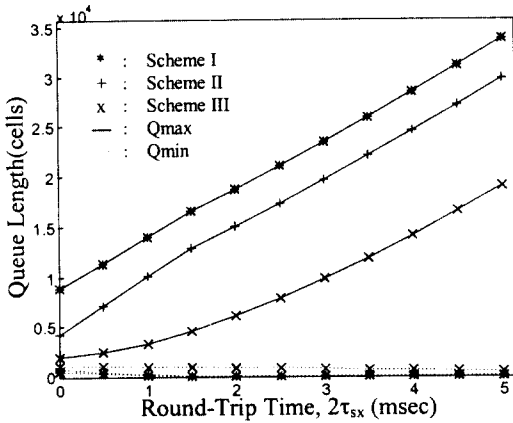


그림 9. 송신원과 스위치간의 왕복 전파지연 시간에 따른 큐 길이
Fig. 9 Queue length vs. the round-trip propagation delay from source to switch.

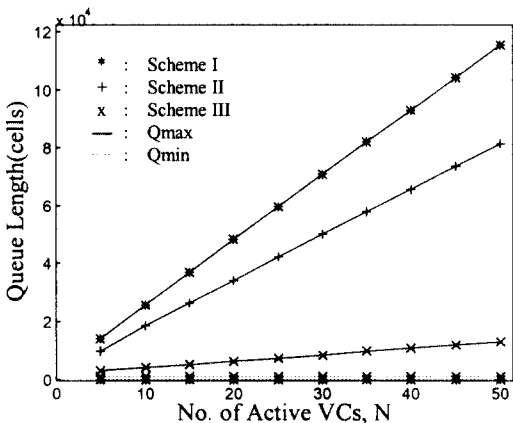


그림 10. 활성화중인 송신원의 수에 따른 큐 길이
Fig. 10 Queue length vs. the number of active virtual connections.

그림 11에는 폭주발생 임계치 Q_H 가 고정되어 있는 경우, 폭주해제 임계치 Q_L 에 따른 큐 길이의 영향을 나타내고 있다. Q_L 이 Q_H 로 접근할수록 큐 길이의 최

소값은 RR 스위치의 구현 방식에 관계없이 증가하며, 최대값은 방식 II를 제외하고 감소함을 볼 수 있다. 그리고, Q_L 이 Q_H 와 같아지는 경우에 방식 I과 II는 동일한 방식임을 알 수 있다. 또한, 단일 임계치를 가지는 방식이 이중 임계치를 가지는 방식에 비해 훨씬 더 우수한 성능을 보임을 알 수 있다. 이러한 결과는 Q_L 을 낮게 설정하면 버퍼 고갈 확률이 증가하여 링크 이용 효율의 저하가 발생하고, Q_H 를 높게 설정하면 버퍼 범람에 의한 셀 손실이 발생할 확률이 증가하기 때문이다.

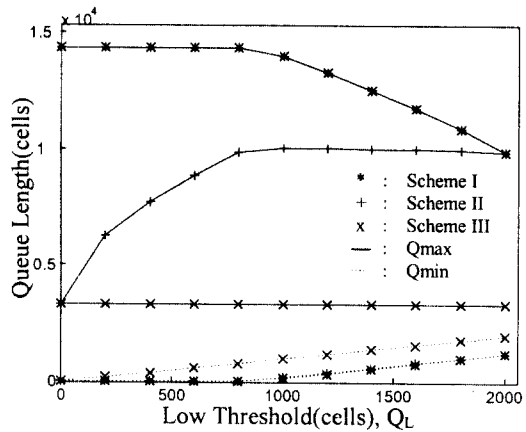


그림 11. 폭주해제 임계치에 따른 큐 길이
Fig. 11 Queue length vs. low buffer threshold.

이상의 결과를 통해 알 수 있듯이, 방식 III의 성능은 RIF와 RTT (Round Trip Time) 파라미터 변화에 민감한 반면, 나머지 방식들의 성능은 모든 ABR 파라미터 변화에 매우 민감함을 알 수 있다. 그리고, 버퍼 범람에 의한 셀 손실 확률을 줄이기 위해서는 가능한 한 PCR을 낮게, MCR을 높게, RIF를 낮게, RDF를 높게 설정하여야 한다. 반면에 버퍼 고갈에 의한 링크 이용 효율의 저하를 줄이기 위해서는 가능한 한 PCR을 높게, MCR을 높게, RIF를 높게, RDF는 낮게 설정하여야 한다. 따라서, 버퍼 범람과 고갈을 방지하기 위한 일부 제어 파라미터 (즉, PCR, RIF, RDF)들의 선택방법에 상반관계 (tradeoff)가 존재함을 알 수 있다.

폭주 판단 방법이 동일한 경우는 모든 성능 면에서

폭주 통지 방법으로 CI 비트만 사용하는 방식 I에 비해 CI 비트와 NI 비트를 동시에 사용하는 방식 II가 더 우수한 성능을 보임을 알 수 있다. 그리고, 폭주 통지 방법이 동일한 경우는 폭주 판단 방법으로 큐 길이의 변화율과 버퍼의 임계치를 동시에 사용하는 방식 III이 버퍼 임계치만 사용하는 방식 II에 비해 훨씬 더 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있다.

또한, 방식 III이 큐 길이와 파라미터 변화에 따른 큐 길이 변화의 민감도 면에서 다른 방식들에 비해 훨씬 더 우수한 성능을 보임을 알 수 있다. 즉, 방식 III은 고려된 파라미터의 거의 모든 범위에 대해 큐 길이의 최소값을 영이상으로 제공하므로 망 자원을 가장 효과적으로 사용할 수 있고, 큐 길이의 최대값 역시 가장 작게 제공하여 버퍼 범람에 의한 셀 손실 확률을 다른 방식들에 비해 크게 줄일 수 있다. 그리고, 방식 III이 순간적인 제어 파라미터들의 변화에 대해 가장 작은 큐 길이의 변화량을 제공함으로써 파라미터 변화에 가장 견실함을 알 수 있다.

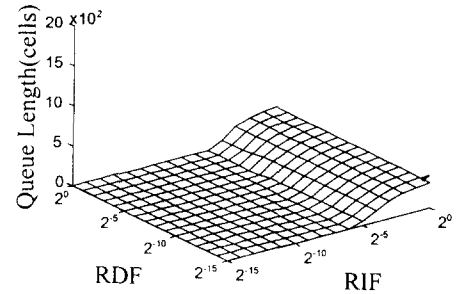
4.2 RIF와 RDF 파라미터의 선택영역

이상적인 피드백 흐름제어 알고리즘은 버퍼 범람에 의한 셀 손실과 버퍼 고갈에 의한 링크 이용 효율의 저하를 동시에 방지해야 한다. 즉, 셀 손실을 방지하기 위해서 큐 길이의 최대값이 스위치의 버퍼 크기를 초과하지 않아야 하며, 링크 이용 효율의 저하를 방지하기 위해서는 큐 길이의 최소값이 항상 영보다는 커야 한다. 따라서, 스위치의 버퍼 크기가 정해진 경우 이상의 두 조건을 동시에 만족시키는 조건을 구하기 위해서는 ABR 파라미터들이 적절히 설정되어야 한다. 일반적으로 망 파라미터와 스위치 파라미터는 망 설계시 결정되며, 송신원의 피크 셀률과 최소 셀률 역시 연결 설정시 사용자가 요구한 셀률로 고정되는 경우가 많으므로, RIF와 RDF 파라미터 값을 적절히 정해주는 것이 무엇보다도 중요하다.

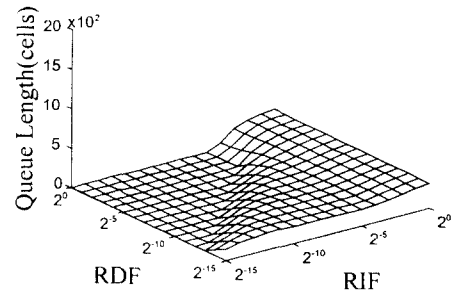
먼저, 그림 12에는 RIF와 RDF 파라미터 변화에 따른 큐 길이의 최소값을 나타내고 있으며, 버퍼 고갈에 의해 링크 이용 효율의 저하가 발생하는 영역은 큐 길이가 영인 부분으로 편편하게 나타나 있다. 이러한 영역이 작을수록 링크 이용 효율의 저하를 방지하기 위한 RIF와 RDF 파라미터 선택영역이 넓어짐을 의미한다. 그림 12(c)를 통해 알 수 있듯이 방식 III

이 링크 이용 효율 저하를 방지할 수 있는 RIF와 RDF 파라미터의 선택영역을 가장 넓게 제공함을 알 수 있다.

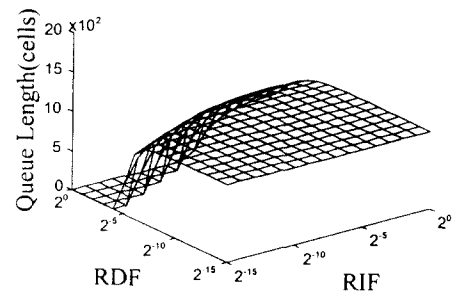
그림 13에는 RIF와 RDF 파라미터 변화에 따른 큐 길이의 최대값을 나타내고 있으며, 버퍼 범람에 의해



(a) 방식 I

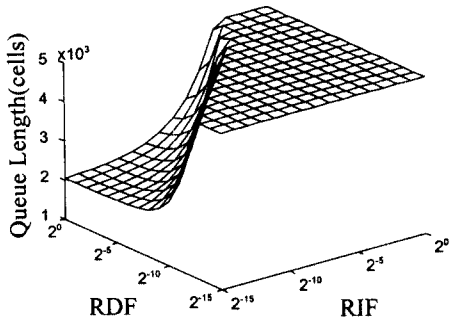


(b) 방식 II

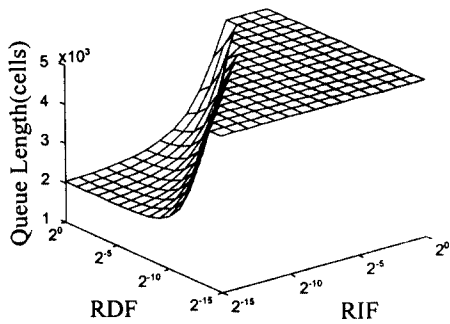


(c) 방식 III

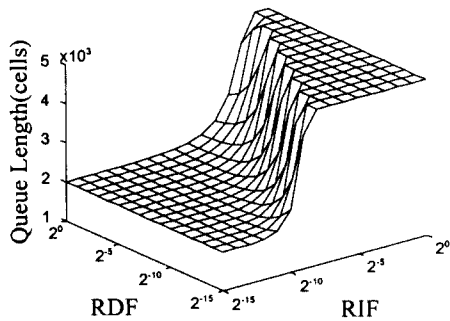
그림 12. RIF와 RDF 파라미터에 따른 큐 길이의 최소값
Fig. 12 Minimum queue length vs. RIF and RDF.



(a) 방식 I



(b) 방식 II



(c) 방식 III

그림 13. RIF와 RDF 파라미터에 따른 큐 길이의 최대값
Fig. 13 Maximum queue length vs. RIF and RDF.

셀 손실이 발생하는 영역은 큐 길이가 버퍼 크기 (5000 셀)에 해당하는 영역으로 편편하게 표시되어 있다. 이러한 영역이 작을수록 셀 손실 방지를 위한

RIF와 RDF 파라미터의 선택범위가 커지며, 성능이 RIF와 RDF 파라미터의 변화에 덜 민감함을 의미한다. 그림 13(c)를 통해 알 수 있듯이 세 방식 중에서 방식 III이 셀 손실 방지할 수 있는 RIF와 RDF 파라미터의 선택영역을 가장 넓게 제공할 수 있다.

이상의 결과를 통해 알 수 있듯이, 그림 12에는 RDF 값은 작고 RIF 값이 증가할수록 버퍼가 고갈될 확률이 낮아져 링크 이용 효율의 저하를 방지할 수 있음을 나타내고 있다. 그러나, 이러한 결과는 버퍼 범람 방지를 위한 파라미터 선택과는 상반되는 양상을 나타낸다. 즉, 그림 13에서는 큐 길이의 최대값을 줄여 버퍼가 범람할 확률을 낮추기 위해서는 RIF 값은 작게 RDF 값은 크게 설정되어야 함을 나타내고 있다.

따라서, RIF와 RDF 파라미터의 선택방법은 먼저, 본 논문에서 해석된 결과를 이용하여 버퍼 범람에 의한 셀 손실과 버퍼 고갈에 의한 링크 이용 효율의 저하를 방지할 수 있는 RIF와 RDF 파라미터의 범위를 각각 구한다. 버퍼 범람과 고갈 방지 조건들을 동시에 만족시키는 파라미터 범위가 존재하면, 버퍼가 범람하지 않게 RIF 파라미터를 결정 한 후 버퍼가 고갈되지 않는 영역에서 RDF 파라미터를 선택한다. 그러나, 위의 두 가지 조건을 동시에 만족시키는 범위가 존재하지 않으면, RIF와 RDF 파라미터의 값을 가능한 한 버퍼 범람을 발생시키지 않는 영역에서 선택하는 것이 보다 바람직할 것이다.

V. 결론

본 논문에서는 폭주 판단과 통지 방법에 따른 세 가지 방식의 RR 스위치 알고리즘의 구현 방식을 제안하고, 이들에 대해 평형상태에서의 큐 길이의 최대값과 최소값에 대한 상 하한치를 유도하였다. 그리고, ABR 파라미터의 변화에 따른 큐 길이의 최대값과 최소값의 영향을 분석하였다. 또한, 버퍼 고갈에 의한 링크 이용 효율의 저하와 버퍼 범람에 의한 셀 손실을 동시에 방지할 수 있는 RIF와 RDF 파라미터의 선택영역을 제시하였다.

분석 결과, RR 스위치의 성능이 ABR 파라미터 변화에 민감함을 알 수 있었다. 그리고, 폭주 판단 방법이 동일한 경우에 폭주 통지 방법으로 CI 비트만 사용

하는 방식에 비해 CI 비트와 NI 비트를 동시에 사용하는 방식이 더 우수한 성능을 보임을 알 수 있었다. 폭주 통지 방법이 동일한 경우에는 폭주 판단 방법으로 큐 길이의 변화율과 버퍼의 임계치를 동시에 사용하는 방식이 버퍼 임계치만 사용하는 방식에 비해 훨씬 더 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있었다. 또한, 폭주 통지를 위해 CI와 NI 비트를 동시에 사용하고 폭주 판단을 위해 큐 길이의 변화율과 버퍼의 임계치를 동시에 사용하는 방식이 큐 길이와 파라미터 변화에 따른 큐 길이 변화의 민감도 면에서 다른 방식들에 비해 훨씬 더 우수한 성능을 보임을 알 수 있었고, 버퍼 범람과 고갈을 방지할 수 있는 RIF와 RDF 파라미터의 선택범위 역시 가장 넓게 제공함을 알 수 있었다.

결론적으로, RR 스위치 구현시 폭주 통지는 CI 비트와 NI 비트를 동시에 사용하는 것이 바람직하며, 폭주발생 유무의 판단은 버퍼 임계치와 큐 길이의 변화율을 동시에 고려하는 것이 가장 바람직함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. The ATM Forum Technical Communittee, "Traffic management specification version 4.0," *af-tm 96-0056.000*, 1996.
2. H. Ohsaki, M. Murata, H. Suzuki, C. Ikeda, and H. Miyahara, "Parameter tuning of rate-based congestion control algorithm for ATM networks," *ATM Forum Contribution 95-1483*, 1995.
3. M. Ritter, "Network buffer requirements of the rate-based control mechanism for ABR services," *IEEE INFOCOM'96*, pp. 1190-1197, 1996.
4. 김동호, 조유제, 안윤영, 박홍식, "ATM망에서 ABR 서비스를 위한 이진 피드백 스위치 알고리즘의 성능 해석," 한국통신학회논문지, 제 22권 제 1호, pp. 162-172, 1997년 1월.
5. M. Ajmone Marsan, A. Bianco, R. Lo Cigno, and M. Munafo, "TCP over ABR in ATM networks with variable topology and background traffic," *IEEE ATM'96 Workshop*, 1996.
6. D. Lapsley and M. Rumsewicz, "Improved buffer

efficiency via no increase flag in EFCI flow control," *IEEE ATM'96 Workshop*, 1996.



김 동 호(Dong Ho Kim) 정회원
1992년 2월:경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1994년 2월:경북대학교 전자공학과(공학석사)
1994년 3월~현재:경북대학교 전자전기공학부 박사수료

※주관심분야:ATM 트래픽 제어, 차세대 이동통신망
e-mail: dhkim@ee.kyungpook.ac.kr



조 유 제(You Ze Cho) 정회원
1982년 2월:서울대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1983년 8월:한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)
1988년 8월:한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사)

1989년 3월~현재:경북대학교 전자전기공학부 부교수
1992년 8월~1994년 1월:Univ. of Toronto, 객원교수
※주관심분야:ATM 트래픽 제어, 차세대 이동통신망, 멀티미디어 통신

e-mail: yzcho@ee.kyungpook.ac.kr