

# Dual Leaky Bucket에 의해 규제되는 트래픽의 오버플로 확률분석과 대역폭 할당방법

윤영하<sup>1</sup> · 이창훈<sup>1</sup> · 홍정식<sup>2</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 산업공학과 / <sup>2</sup>서울산업대학교 산업공학과

## Overflow Probability Analysis and Bandwidth Allocation for Traffic Regulated by Dual Leaky Bucket

Y. H. Yoon<sup>1</sup> · C. H. Lie<sup>1</sup> · J. S. Hong<sup>2</sup>

A scheme of more exact overflow probability analysis is proposed for traffic regulated by dual leaky bucket. To each regulated traffic stream is allocated bandwidth and buffer independent of other traffic stream and overflow occurs when total bandwidth or buffer allocated to each traffic exceed link capacity or physical buffer size. Ratio of buffer and bandwidth allocated to each traffic stream is assumed to be constant, and this ratio is larger than the ratio of physical buffer and bandwidth due to buffer sharing effect. Numerical experiments show that this sharing effect have significant influence on overflow probability and effective bandwidth.

### 1. 서론

ATM 망은 전송속도와 요구되는 전송품질이 상이한 음성, 데이터, 비디오 등의 다양한 트래픽들이 동일한 망 자원을 이용하면서 셀(cell)이라는 전송단위로 전송되게 된다. 다양한 트래픽들이 서로 다른 특성을 가지고 있고, 이들이 요구하는 전송 품질 또한 다르기 때문에 이들 트래픽을 효율적으로 제어하는 문제는 매우 중요하며, 현재까지도 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 VBR(Variable Bit Rate) 트래픽은 트래픽 원에 따라서 다양한 특성들을 보이기 때문에, 트래픽의 통계적 특성을 파악하는 것이 어려울 뿐만 아니라, 이를 제어하는 것도 매우 어렵다. VBR(Variable Bit Rate) 트래픽은 보통 Dual Leaky Bucket을 통해 규제되고, 이 장치의 파라미터들은 트래픽의 특성을 나타내는 파라미터로 많이 이용되고 있다.

Dual Leaky Bucket은 사전에 협약된 트래픽 파라미터를 사용자가 지키도록 규제하는 장치로, 이를 어기는 셀에 대해서는 셀을 버리거나 우선순위가 낮은 셀로 표시를 하게 된다. Dual Leaky Bucket은  $P$ (peak rate),  $SCR$ (Sustainable Cell Rate),  $B_T$ (Burst Tolerance)의 세 가지 파라미터로 트래픽을 규제하는데, 이를 개념적으로 나타내면 <그림 1>과 같다.

입력 트래픽의 각 셀들은 각 토큰버퍼에 토큰이 있는 경우, 망에 입력되게 되고, 그렇지 않은 경우 낮은 우선순위로 표시되거나 셀이 버려지게 된다. 첫 번째 bucket의 크기는 1이고, 여기서는 입력트래픽의 최대셀률을 관리하며, 두 번째 bucket의 크기는  $B_T$ 로, 버스트의 허용 정도와 전체적인 입력률을 관리하게 된다. 실제 Dual Leaky Bucket은 위와 같이 물리적인 토큰버퍼가 있는 것은 아니고 단지 카운터(counter)에 의해 작동되는 시스템이다. 이 카운터는 토큰이 생성되는 경우 하나씩 증가하고, 셀이 도착하는 경우 하나씩 감소하게 된다.

Dual Leaky Bucket을 통과한 트래픽은 보통 주기적 on-off 과정으로 단순화하여 모형화된다. 주기적 on-off 과정으로의 모형화는 트래픽이 최대셀률로 토큰버퍼가 비워질 때까지 셀을 발생시키고(on-period), 그 이후 토큰버퍼에 토큰이 다 채워질때까지 트래픽을 발생시키지 않는(off-period) 과정을 반복하는 모형이다. 이러한 주기적 on-off 모형이 입력 트래픽에 대한 최악의 경우(worst case)의 트래픽 모형인가에 대해서는 이론의 여지가 있지만(Worster, 1994; Doshi, 1994), 일반적인 ATM 망에서의 트래픽 상황에서는 대체적으로 위와 같은 주기적 on-off 모형이 최악의 트래픽 형태를 보이게 된다고 볼 수 있다(Elwalid, Mitra and Wentworth, 1995; Presti, Zhang, Kurose and Towsley, 1997).

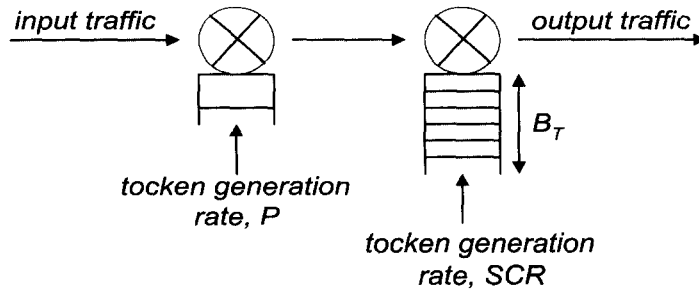


그림 1. Dual Leaky Bucket 시스템의 개념도.

주기적 on-off 모형의 on과 off의 길이는 다음과 같이 계산되며, 이 모형의 입력과정은 <그림 2>와 같다.

$$T_{ON} = \frac{B_T}{P - SCR}$$

$$T_{OFF} = B_T / SCR \tag{1}$$

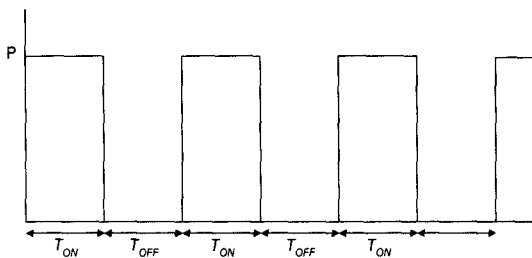


그림 2. 주기적 on-off 모형.

위와 같은 주기적 on-off 모형은 일반적인 마코프 모형에서 사용되는 유체흐름 모형의 수리적 분석(Anick, Mitra and Sondhi, 1982; Baiocchi and Blefari-Melazzi, 1993; Igelnik, Kogan, Kriman and Mitra, 1995; Coffman, Igelnik and Kogan, 1991; Quian and McDonald, 1995; Mitra, 1998) 방법들을 적용할 수가 없다. Elwalid(1995)는 가상 대기시스템을 이용하여 분석하는 방법과 이를 이용한 대역폭과 버퍼의 설계방법을 제시하였고, Presti(1997)는 버퍼와 대역폭의 trade-off를 이용하여 좀더 정확한 셀 손실률 계산방법을 제시하였다. Elwalid(1995)는 버퍼와 대역폭의 비율 제약하에서 버퍼와 대역폭의 2개 자원의 할당문제를 하나의 자원할당문제로 접근하였지만, 이는 버퍼에 의한 오버플로가 발생하지 않기 때문에 버퍼의 낭비가 발생하게 된다. Presti(1997)는 버퍼에 의한 오버플로 확률을 반영하였지만, 여기서는 각 가상시스템에 할당되는 버퍼와 대역폭의 각 조합에 대해 전체 오버플로 확률값을 최소화하는 버퍼/대역폭 조합에 대한 오버플로 확률값을 실제 시스템의 오버플로 확률값으로 보았다.

본 연구에서는 Elwalid(1995)와 Presti(1997) 등은 방법에서 발생하는 버퍼의 낭비를 줄일 수 있는 새로운 오버플로 확률 계산방법과 이를 이용한 대역폭 계산법에 대해서 다루고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2절에서는 가상 대기시스템의 개념에 대해, 3절과 4절에서는 새로운 오버플로 확률 계산식과 이를 이용한 대역폭 계산방법에 대해 다루고, 5절에서는 수치예제를 제시한다.

## 2. 가상대기 시스템의 개념

하나의 버퍼와 대역폭을 공유하는 대기시스템을 각 트래픽 소스에 개별적인 대역폭과 버퍼가 할당된다고 가정하는 다음과 같은 가상시스템(virtual system)을 생각해보자.

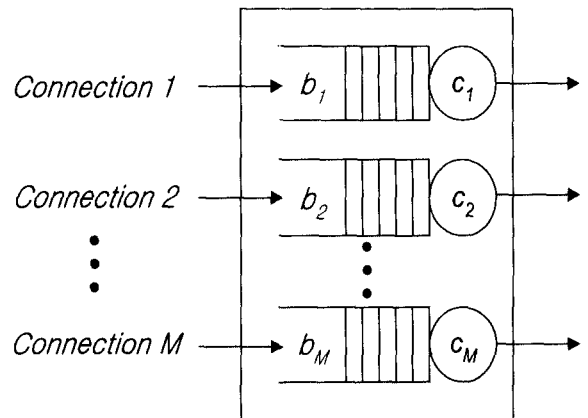


그림 3. 가상 대기시스템.

위와 같은 가상시스템을 이용하면, 각 연결(connection)들에 할당된 버퍼와 대역폭의 사용상황은 다른 연결들의 상태를 고려하지 않아도 알 수 있게 된다. 하나의 소스에 대해 나타내면 다음과 같다.

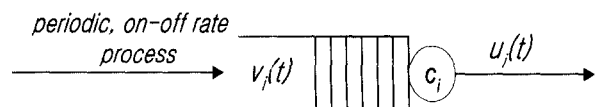


그림 4. 단일 소스에 대한 가상 대기시스템.

여기서  $v_j(t)$ ,  $u_j(t)$  는  $t$ 시점에서의 버퍼상태와 대역폭의 사용상황으로 주기적 on-off 입력과정인 경우, 다음과 같은 과정을 보이게 된다. 여기서  $T_{j,on}$ ,  $T_{j,off}$  는 주기적 on-off 모형의 on, off의 길이이고,  $D_{j,on}$ ,  $D_{j,off}$  는 가상시스템을 통과한 트래픽의 on, off의 길이이다.

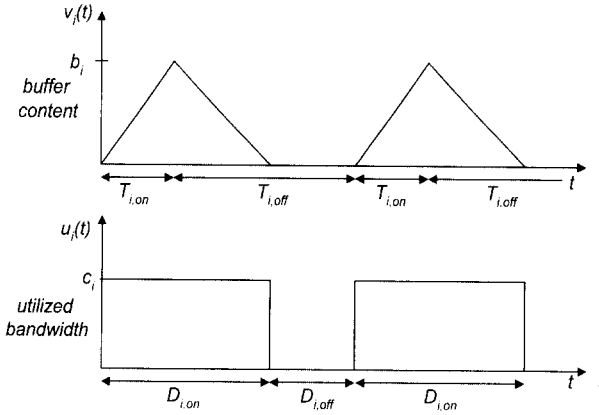


그림 5. 가상 대기시스템의 버퍼와 대역폭의 사용상황.

따라서 가상버퍼를 거친 트래픽은 원래의 최대셀률이  $c_j$ 로 완만화(smoothing)된 주기적 on-off 과정이 된다. Elwalid(1995)는 각 가상시스템에 할당되는 버퍼와 대역폭의 비를 일정하게 할당한 후, 완만화된 트래픽을 대상으로 전체 대역폭을 계산하였다. 따라서 버퍼와 대역폭의 비가 주어지는 경우, 버퍼와 대역폭의 계산문제는 완만화된 on-off 과정을 대상으로 하는 버퍼가 없는 경우의 대역폭 계산문제와 같아지게 된다.

### 3. 오버플로 확률

앞 절에서 소개한 가상 대기시스템에서 오버플로는 가상버퍼들에 있는 트래픽의 전체 합이 실제 버퍼의 크기 ( $B$ )를 초과하는 경우와 사용되고 있는 가상대역폭의 전체 합이 실제 대역폭 ( $C$ )를 초과하는 경우에 발생하게 된다. 본 연구에서는 버퍼의 크기를 전체 대역폭의  $\delta$ 배라고 생각한다. 즉  $B = \delta C$ 로 가정한다.

$U_j$ ,  $V_j$ 를  $j$ 번째 가상시스템에서 사용되고 있는 대역폭의 양과 버퍼에 있는 트래픽의 양을 나타내는 확률변수라 하면, 전체 사용대역폭과 버퍼에 있는 전체 트래픽의 양은  $U_j$ ,  $V_j$ 의 합으로 표시될 수 있고, 이를 이용하면 오버플로 확률을 다음과 같이 정의할 수 있다.

대역폭에 의한 오버플로 확률:

$$Q_C = \Pr\left\{\sum_{j=1}^M U_j > C\right\} \quad (2)$$

버퍼에 의한 오버플로 확률:

$$Q_B = \Pr\left\{\sum_{j=1}^M V_j > B\right\} \quad (3)$$

본 연구에서는 이 두 개의 오버플로 확률 중 더 큰 값을 시스템의 오버플로 확률로 정의한다.

$$Q = \max\left\{\Pr\left\{\sum_{j=1}^M U_j > C\right\}, \Pr\left\{\sum_{j=1}^M V_j > B\right\}\right\} \quad (4)$$

<그림 5>에서 대역폭은 버퍼에 트래픽이 있는 경우 가상시스템에 할당된 대역폭  $c_j$ 를 모두 사용하지만, 버퍼의 경우는 할당된 버퍼가 전부 사용되는 것이 아니라 일부만 사용된다는 것을 알 수 있다. 따라서 가상 시스템의 버퍼는  $c_j$ 의  $\delta$ 배 이상 할당될 수 있다. 이 값을  $\omega$  ( $\omega \geq \delta$ )라 하자. 각 가상 시스템에 할당되는 버퍼의 크기를 대역폭의  $\omega$ 배라고 하면,  $c_j$ 값은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$j$ 번째 가상 시스템에  $c_j$ 만큼의 대역폭이 할당되는 경우 버퍼에 쌓일 수 있는 최대트래픽의 양은  $(P_j - c_j)T_{j,ON}$ 이고, 버퍼의 크기가  $\omega c_j$ 이므로  $(P_j - c_j)T_{j,ON} = \omega c_j$ 를 풀면  $c_j$ 값을 계산할 수 있다.

$$c_j = \frac{P_j T_{j,ON}}{\omega + T_{j,ON}} \quad (5)$$

그리고 완만화된 트래픽의 ON시간의 비율을  $p_j$ 라 할 때,  $p_j$ 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$p_j = SCR_j / c_j \quad (6)$$

위의 식에서  $P_j$ ,  $T_{j,ON}$ ,  $SCR_j$ 는 소스  $j$ 에 대한 트래픽 파라미터를 나타낸다.

따라서 임의의 시점에서  $j$ 번째 가상시스템이 사용하는 대역폭과 버퍼에 있는 트래픽의 양을 나타내는 확률변수  $U_j$ ,  $V_j$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$U_j = \begin{cases} c_j, & \text{w.p. } p_j \\ 0, & \text{w.p. } 1 - p_j \end{cases} \quad (7)$$

$$V_j = \begin{cases} U(0, \omega c_j), & \text{w.p. } p_j \\ 0, & \text{w.p. } 1 - p_j \end{cases} \quad (8)$$

위 식에서  $U(a, b)$ 는 구간  $(a, b)$ 에서 정의된 일양 확

률변수(uniform random variable)를 나타낸다.

$Q_C(\omega)$ ,  $Q_B(\omega)$  를 가상 시스템에 할당된 버퍼의 크기의 비율이  $\omega$  일 때의 대역폭에 의한 오버플로 확률값, 버퍼에 의한 오버플로 확률값이라 정의하면, 시스템의 오버플로 확률값  $Q(\omega)$  는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$Q_C(\omega) = \Pr\left\{\sum_{j=1}^M U_j > C\right\} \quad (9)$$

$$Q_B(\omega) = \Pr\left\{\sum_{j=1}^M V_j > B\right\} \quad (10)$$

$$Q(\omega) = \inf_{\omega} \max\{Q_C(\omega), Q_B(\omega)\} \quad (11)$$

일반적으로  $\omega$  값이 큰 경우, 버퍼에 의한 오버플로가 시스템의 오버플로 확률을 결정하게 되고,  $\omega$  값이 작아지는 경우 ( $\delta$  값에 가까워지는 경우) 대역폭에 의한 오버플로가 시스템의 오버플로 확률을 결정하게 된다.

#### · 체르노프 상한을 이용한 오버플로 확률값 계산

오버플로 확률값은 서로 독립인 확률변수의 합이 주어진 값을 초과할 확률을 계산함으로써 얻어질 수 있는데, 일반적으로 위의 확률값들은 쉽게 계산할 수 없다. 본 연구에서는 여러 확률변수의 합의 분포의 꼬리확률값을 계산하는 데 많이 사용되고 있는 체르노프 상한(Chernoff's bound)을 이용하여 위의 오버플로 확률값을 계산한다.

체르노프 상한은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned} \Pr(X > C) &= \Pr(X - C > 0) \\ &= \Pr(\exp(s(X - C)) > 1) \\ &\leq E[\exp(s(X - C))] = E[\exp(sX)] e^{-sC}, \\ & \quad s > 0 \end{aligned} \quad (12)$$

위의 식은 임의의 양수에 대해 항상 성립하기 때문에 부등호의 오른쪽 식이 최소화되는 경우의 값을  $\Pr\{X > C\}$ 의 근사값으로 이용할 수 있다. 이 체르노프 상한은 합해지는 확률변수의 수가 증가할수록 더욱 정확한 근사값을 제공한다. 이를 다른 식으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \ln \Pr\{X > C\} &\approx -\sup_s \{sC - \ln M(s)\}, \\ M(s) &= E[\exp(sX)] \end{aligned} \quad (13)$$

$$M_j^C(s) = E[\exp(sU_j)], \quad M_j^B(s) = E[\exp(sV_j)]$$

라 하면,  $M_j^C(s)$ ,  $M_j^B(s)$  는 다음과 같이 표현되고,

$$M_j^C(s) = 1 - p_j + p_j \exp(sc_j) \quad (14)$$

$$M_j^B(s) = 1 - p_j + \frac{p_j}{s\omega c_j} (\exp(s\omega c_j) - 1) \quad (15)$$

이를 이용하면,  $\ln Q_C(\omega)$ ,  $\ln Q_B(\omega)$  는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln Q_C(\omega) = -\sup_s \left\{ sC - \sum_{j=1}^M \ln M_j^C(s) \right\} \quad (16)$$

$$\ln Q_B(\omega) = -\sup_s \left\{ sB - \sum_{j=1}^M \ln M_j^B(s) \right\} \quad (17)$$

## 4. 대역폭 계산 방법

본 절에서는 3절에서 제시한 오버플로 확률식을 이용하여 대역폭을 계산하는 방법을 제시한다. 3절에서와 마찬가지로 전체 대역폭과 버퍼크기의 비율은  $\delta$  가 되도록 한다. 본 절에서는  $C$  값이 주어지지 않은 상황에서 주어진 오버플로 확률값을 만족하는 전체 대역폭  $C$  를 계산하는 방법을 제시한다.

식 (16)과 (17)의 최소값은  $s$  에 대해 미분한 다음의 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$C - \sum_{j=1}^M \frac{d}{ds} M_j^C(s) / M_j^C(s) = 0 \quad (18)$$

$$B - \sum_{j=1}^M \frac{d}{ds} M_j^B(s) / M_j^B(s) = 0 \quad (19)$$

식 (16)과 (17)이 최소가 되는  $s$  값이 주어지는 경우  $C$  와  $B$  값은 위의 식을 이용하여 계산할 수 있다. 이  $s$  값이 주어지는 경우, 오버플로 확률은 다음과 같이 계산된다.

$$\ln Q_C(\omega) = -\left\{ \sum_{j=1}^M \frac{d}{ds} M_j^C(s) / M_j^C(s) - \sum_{j=1}^M \ln M_j^C(s) \right\} \quad (20)$$

$$\ln Q_B(\omega) = -\left\{ \sum_{j=1}^M \frac{d}{ds} M_j^B(s) / M_j^B(s) - \sum_{j=1}^M \ln M_j^B(s) \right\} \quad (21)$$

$C(s)$ ,  $B(s)$  를  $s$  값이 주어진 경우, 이 값이 오버플로 확률값을 결정하게 하는 전체 대역폭과 버퍼의 크기라고 하자.

$$C(s) = \sum_{j=1}^M \frac{d}{ds} M_j^C(s) / M_j^C(s) \quad (22)$$

$$B(s) = \sum_{j=1}^M \frac{d}{ds} M_j^B(s) / M_j^B(s) \quad (23)$$

·  $C(s)$  와  $B(s)$  의 성질

$C(s)$ 와  $B(s)$ 는  $s$ 에 대해 증가함수이다.

<증명>  $M(s) = E[\exp(sX)]$ 로 정의하자.

$$\frac{d}{ds} \frac{M'(s)}{M(s)} = \frac{M''(s)M(s) - [M'(s)]^2}{[M(s)]^2} \quad (24)$$

식 (24)의 우변 분자부분은 식 (25)의 좌변과 같이 나타낼 수 있고, 임의의  $k$ 에 대해  $E[(X-k)^2 \exp(sX)] \geq 0$  임을 이용하면 식 (25)의 부등식이 성립하게 된다.

$$E[X^2 \exp(sX)]E[\exp(sX)] - \{E[X \exp(sX)]\}^2 \geq 0 \quad (25)$$

따라서  $C(s)$ 와  $B(s)$ 는  $s$ 에 대한 증가함수이다

$C(s)$ 와  $B(s)$ 가 증가함수라는 사실에서 식 (20), (21)의 오버플로 확률값은  $s$ 에 대해 감소함수임을 쉽게 알 수 있다. 따라서 식 (20)~(23)를 이용하면, 주어진 오버플로 확률값( $\epsilon$ )을 만족하는  $C$ 값과  $B$ 값을 쉽게 계산할 수 있다.

가상 시스템의 버퍼가  $\omega$ 만큼의 지연을 허용하는 크기일 때의 주어진 오버플로 확률값을 만족하는 버퍼의 크기와 전체 대역폭은 앞에서 설명한 방법을 이용하여 계산할 수 있다. 계산된 버퍼의 크기와 전체 대역폭 사이에  $B < \delta C$ 의 관계가 성립하면,  $\omega$ 의 값을 증가시키고,  $B > \delta C$ 인 경우,  $\omega$ 를 감소시키면서  $B = \delta C$ 의 관계를 만족하도록 하면, 대역폭의 계산이 이루어지게 된다.

### 5. 수치예제

첫 번째 절에서는 버퍼공유(buffer sharing) 효과( $\omega$ )를 반영하지 않는 경우( $\omega = \delta$ 인 경우)의 오버플로 확률과 버퍼공유 효과를 반영한 본 연구의 오버플로 확률값의 비교실험에 대해 다루고, 두 번째 절에서는 주어진 오버플로 확률값의 제약을 만족하는 대역폭의 비교실험에 대해 다룬다. 비교실험에 사용된 트래픽 파라미터는 <표 1>과 같다.

#### 5.1 오버플로 확률값 비교예제

<그림 6>과 <그림 8>은 오버플로 확률값을  $\delta$ 가 0.1인 경우와 0.2인 경우에 대해 비교실험한 결과이다. 버퍼가 상대적

으로 작은 경우 두 확률값들의 차이가 별로 크지 않지만, 버퍼가 커지는 경우 그 차이가 커진다는 것을 알 수 있다. 이는 버퍼가 작은 경우 버퍼에 의한 완단화효과가 그리 크지 않기 때문에 발생하는 것으로 생각이 된다. <그림 7>과 <그림 9>는 버퍼공유효과( $\omega$ )에 대해 실험한 결과로 <그림 6>의 경우는 버퍼크기가 대역폭의 0.15배 정도의 버퍼를 가지고 있는 효과가 있고, <그림 8>의 경우는 대역폭의 0.27배 정도의 버퍼를 가지고 있는 효과가 있음을 알 수 있다. 이는 실제 버퍼 크기(대역폭의 0.1, 0.2배) 보다 상당히 크다는 것을 알 수 있다.

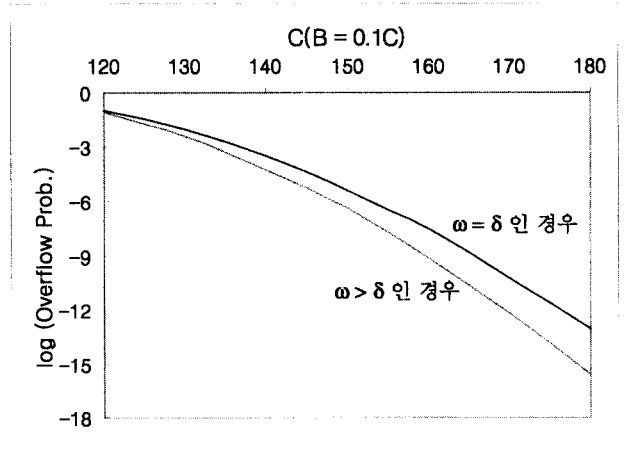


그림 6.  $\delta = 0.1$ 인 경우의 오버플로 확률값.

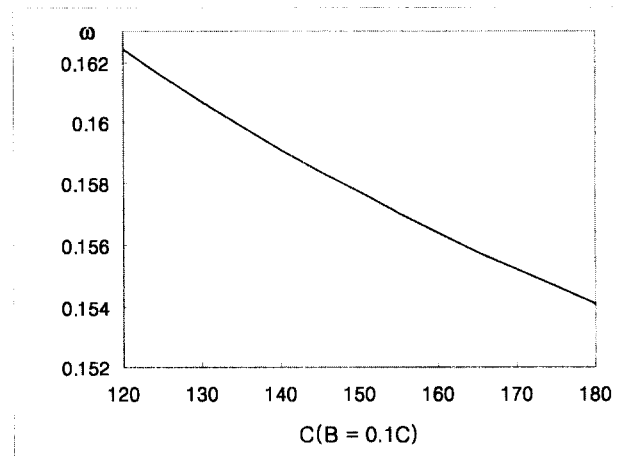


그림 7.  $\delta = 0.1$ 인 경우의 버퍼공유효과( $\omega$ ).

표 1. 실험에 사용된 트래픽 파라미터

$T_{ON}$	$T_{OFF}$	$P$	소스의 수
1(msec)	9(msec)	1(Mbps)	1000

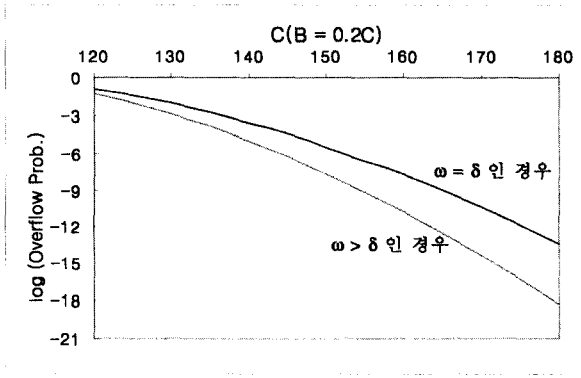


그림 8.  $\delta = 0.2$ 인 경우의 오버플로 확률값.

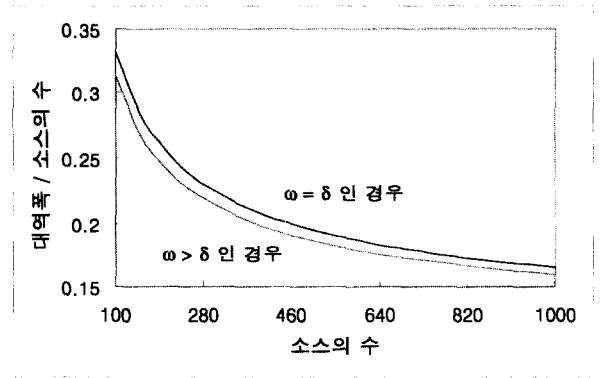


그림 11. 소스의 수에 따른 대역폭 비교( $\delta = 0.1$ ).

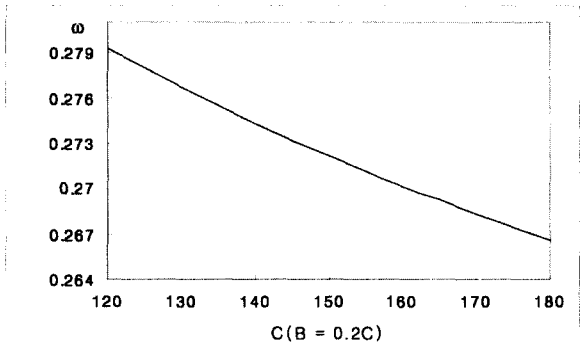


그림 9.  $\delta = 0.2$ 인 경우의 버퍼공유효과( $\omega$ ).

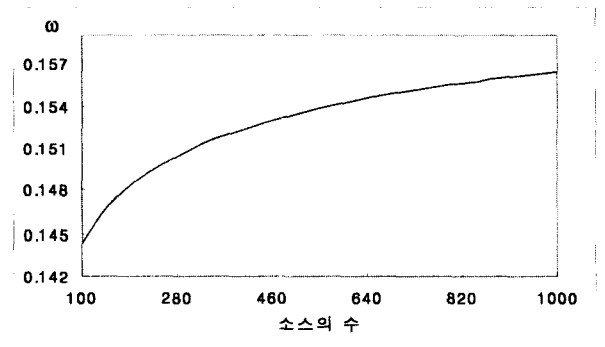


그림 12. 소스의 수에 따른 버퍼공유효과( $\delta = 0.1$ ).

5.2 대역폭 비교예제

<그림 10>은  $\delta$ 값의 변화에 따른 대역폭을 비교한 실험결과로  $\delta$ 가 커지는 경우 전체 대역폭에 상당한 차이가 발생함을 알 수 있다. <그림 11>은 소스의 수를 변화시켰을 때, 소스 하나에 할당되는 대역폭의 값을 비교실험한 결과이고, <그림 12>는 같은 실험에 대해 버퍼공유효과( $\omega$ )를 구해본 것으로, 소스의 수가 증가함에 따라 버퍼공유효과가 커짐을 알 수 있다. 여기서 오버플로 확률에 대한 QoS는  $10^{-9}$ 이다.

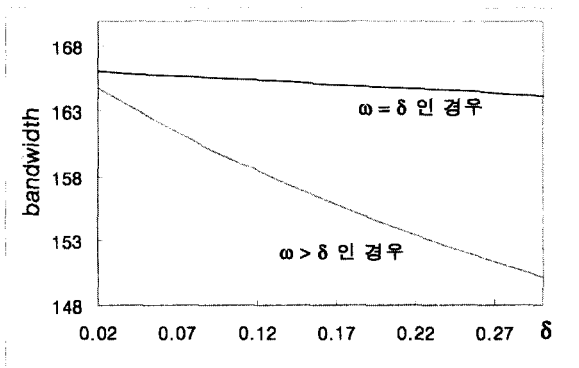


그림 10.  $\delta$ 값의 변화에 따른 대역폭 비교.

6. 결론 및 추후 연구사항

본 연구에서는 가상 대기시스템의 개념을 이용하여 오버플로 확률과 대역폭 계산방법에 대해서 다루었다. 각각의 가상 시스템에 대역폭의 일정비율만큼 버퍼를 할당하는 방법이 대역폭 계산이나 오버플로 계산을 단순화시키지만, 오버플로나 대역폭을 과대평가한다는 문제가 있다. 본 연구에서는 버퍼의 공유효과를 반영한 새로운 오버플로 확률계산법과 대역폭 계산방법을 제시하였다.

동질 on-off 소스 모형의 경우, 버퍼의 할당이 본 연구에서 제시한 방법대로 이루어질 수 있지만, 이질 트래픽의 경우는 이런 방법이 최적의 버퍼할당이라고 볼 수가 없다. 일반적으로 버스트의 길이가 길수록 최대셀룰의 완만화 정도가 낮아지기 때문에 버스트의 길이가 짧은 트래픽에 더 많은 버퍼를 할당하는 것이 바람직하다. 셀 손실이 없는 다중화기법(lossless multiplexing)의 경우, 버퍼할당은 버스트의 길이가 작은 트래픽의 순서대로, 할당될 수 있는 최대버퍼를 할당하는 정책이 대역폭을 최소화한다(Elwalid, Mitra and Wentworth, 1995; Presti, Zhang, Kurose and Towsley, 1997). 셀 손실을 허용하는 통계적 다중화 기법의 경우, 위와 같은 버퍼/대역폭 할당 정책을 적용한다면, 시스템의 성능을 좀더 정확하게 평가하는 것이 가능할

것이다. 그리고 본 연구에서 시도하지는 않았지만, CAC(Connection Acceptance Control)등의 실시간 제어를 위해서는 버퍼공유효과를 정량화하는 것도 필요할 것이다. 버퍼공유효과가 정량화되면, 버퍼가 없는 시스템에서의 자원할당문제와 같아지기 때문에, 훨씬 효율적인 CAC가 이루어질 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- Anick, S., Mitra, D. and Sondhi, M. M. (1982), Stochastic theory of a data-handling systems with multiple sources, *Bell System Tech. J.*, 61(8), 1871-1894.
- Baiocchi, A. and Blefari-Melazzi, N. (1993), An error-controlled approximate analysis of a stochastic fluid flow model applied to an ATM multiplexer with heterogeneous on-off sources, *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 1(6), 628-637.
- Coffman, E. G., Igel'nik, B. M. and Kogan, Y. A. (1991), Controlled stochastic model of a communication system with multiple sources, *IEEE Trans. on Information Theory*, 37(5), 1379-1387.
- Doshi, B. T. (1994), Deterministic rule based traffic descriptors for broadband ISDN : worst case behavior and connection acceptance control, *ITC 14*, 591-600.
- Elwalid, A., Mitra, D. and Wentworth, R. H. (1995), A new approach for allocating buffers and bandwidth to heterogeneous, regulated traffic in an ATM node, *IEEE J.S.A.C.*, 13(6), 1115-1127.
- Igel'nik, B., Kogan, Y., Krivan, V. and Mitra, D. (1995), A new computational approach for stochastic fluid models of multiplexers with heterogeneous sources, *Queueing Systems*, 20, 85-116.
- Mitra, D. (1998), Stochastic theory of a fluid model of producers and consumers coupled by a buffer, *Adv. Appl. Prob.*, 20, 646-676.
- Presti, F. L., Zhang, Z. L., Kurose, J. and Towsley, D. (1997), Source time scale and optimal buffer/bandwidth trade-off for regulated traffic in an ATM node, *IEEE INFOCOM*, 676-683.
- Quian, K. and McDonald, D. (1995), An approximation method for complete solutions of markov-modulated fluid models, *IEEE INFOCOM*, 1406-1411.
- Worster, T. (1994), Modelling deterministic queues : the leaky bucket as an arrival process, *ITC 14*, 581-590.