

ATM 스위치의 셀 손실을 추정을 위한 Hybrid 시뮬레이션 기법[†]

김지수* · 최우용* · 전치혁*

A Hybrid Simulation Technique for Cell Loss Probability Estimation of ATM Switch[†]

Jisoo Kim* · Woo-Yong Choi* · Chi-Hyuck Jun*

Abstract

An ATM switch must deal with various kinds of input sources having different traffic characteristics and it must guarantee very small value of cell loss probability, about $10^8 \sim 10^{12}$, to deal with loss-sensitive traffics. In order to estimate such a rare event probability with simulation procedure, a variance reduction technique is essential for obtaining an appropriate level of precision with reduced cost. In this paper, we propose a hybrid simulation technique to achieve reduction of variance of cell loss probability estimator, where hybrid means the combination of analytical method and simulation procedure. A discrete time queueing model with multiple input sources and a finite shared buffer is considered, where the arrival process at an input source is governed by an Interrupted Bernoulli Process and the service rate is constant. We deal with heterogeneous input sources as well as homogeneous case. The performance of the proposed hybrid simulation estimator is compared with those of the raw simulation estimator and the importance sampling estimator in terms of variance reduction ratios.

1. 서론

최근들어 관심을 모으고 있는 광대역 종합 정보 통신망(B-ISDN: Broad-band Integrated

Services Digital Network)은 데이터, 음성, 화상정보 등과 같이 서로 트래픽 특성이 다른 여러가지 다중매체(multimedia) 서비스들의 통합처리를 목적으로 하는 차세대 통신망이다. 이와같이 다양한 종류의 서비스들을 효율적으

[†] 본 연구는 공정산업의 지능자동화 연구센터(한국과학재단 ERC)의 부분적 지원으로 수행하였음

* 포항공과대학교 산업공학과

로 융통성있게 다루기 위한 통신방식으로서 비동기 전송방식(ATM: Asynchronous Transfer Mode)이 널리 인식되기 시작함에 따라, 구 국제전자전화 자문위원회(CCITT) 체제하에서는 이를 표준화시키는데 주력하였다[6].

다중매체환경에서의 서비스 품질특성(QOS: Quality Of Service)을 살펴보면 다루고자 하는 서비스의 특성에 따라 셀 손실율과 셀 전달 지연시간에 대한 요구조건이 다양함을 알 수 있다. 이 중에서도 셀 손실에 대한 분석은 효율적인 트래픽 처리에 있어 가장 중요한 부분이라 할 수 있는데, ATM 스위치는 손실에 민감한 트래픽까지도 제대로 처리하기 위하여 $10^{-8} \sim 10^{-12}$ 정도까지의 셀 손실율을 보장할 수 있어야 한다[12].

ATM 스위치 자체의 복잡성 때문에 특정 시스템에 대한 셀 손실율의 정확한 계산은 매우 힘들고 대부분 근사기법, 혹은 시뮬레이션에 의한 추정에 의존하게 된다. 먼저 근사기법을 다룬 기존의 연구로는 각 입력원이 ATM의 성능에 미치는 영향을 직접적으로 고려한 연구[14], 입력 트래픽의 버스티(bursty)한 특성을 이용한 연구[2-4,13,19,20], 그리고 유체흐름(fluid-flow) 근사기법을 이용한 연구[1,18] 등을 들 수 있는데, 입력원의 갯수가 증가함에 따라 계산이 매우 복잡해진다거나 특정한 경우에만 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있다는 점 등의 여러가지 문제점을 가지고 있다.

이와같은 이유로 시뮬레이션을 통하여 여러 가지 성능척도를 추정하려는 접근방식은 상당한 당위성을 가지고 있으나, 셀 손실율의 추정시에는 관심을 갖는 사건이 일어날 확률이 매우 작기 때문에 이러한 희소사건(rare event)의 확률 추정에 일반적인 시뮬레이션을 적용한다면 통계적으로 의미있는 추정치를 얻기까지

막대한 시간과 비용이 소요될 것이므로, 적절한 분산축소기법(variance reduction technique)의 적용이 필수적이라 할 수 있다.

시뮬레이션 수행시 추정치의 분산을 줄이기 위한 기존의 연구는 많이 이루어져 왔으며 그 결과로 conditioning을 이용한 기법이나 control variate를 이용한 기법 등이 유용하게 사용되고 있다[11,15]. 그러나 상기의 기법으로는 매우 작은 값을 추정해야 한다는 본 연구의 근본적인 문제점을 해결할 수 없으며, 이제까지 통신망의 셀 손실을 추정에 많이 적용되어 온 방법인 importance sampling 기법[5,7-9,16]의 경우에는 시뮬레이션 시간을 획기적으로 줄이는 장점을 가지긴 하지만, 확률분포를 적절히 변형시키기 위한 점근최적(asymptotically optimal)의 파라미터를 산출하는 과정에서 복잡한 편미분방정식이나 비선형방정식의 해를 구해야 한다는 등의 난점을 가지고 있기 때문에, 새로운 개념을 가진 추정치의 도입이 절실히 요구되고 있다.

본 연구에서는 ATM 스위치의 셀 손실을 추정을 위하여 hybrid 추정치를 도입하고, 이를 적용시킬 수 있는 시뮬레이션 모델을 개발하고자 한다. 시뮬레이션 대상은 이산시간 대기시스템(discrete time queueing system)으로, 각 입력원들의 도착분포가 모두 동일한 homogeneous 시스템과 도착분포가 서로 다른 heterogeneous 시스템에 대하여 분석적 요소의 계산에 이용되는 알고리즘과 시뮬레이션 절차를 개발하고, 실제 시뮬레이션의 수행을 통하여 분산축소효과의 정도를 확인하는데 연구의 목표를 두고 있다.

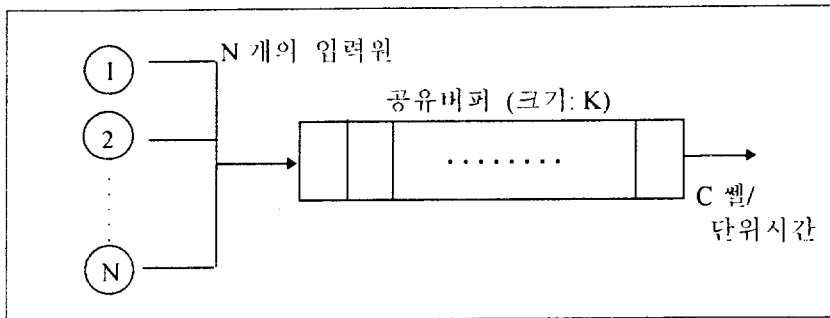
2절에서는 본 연구에서 사용된 ATM 대기시스템을 나타내었고, 이에 대한 2차원 마코브 체인 모델링은 3절에, 그리고 셀 손실확률의

추정을 위한 hybrid 시뮬레이션 기법은 4절에 나타내었다. 5절에서는 실제 시뮬레이션을 통하여 본 연구에서 제안된 hybrid 시뮬레이션 기법과 일반적인 시뮬레이션 기법 및 기존의 importance sampling 기법의 성능을 비교분석하였고, 마지막으로 6절에서는 본 연구에 관한 결론 및 추후연구방향에 관하여 언급하였다.

2. ATM 대기시스템

본 연구에서 사용되는 대기시스템인 ATM 스위치는 <그림 1>에서 보는 바와 같이 N개의

독립적인 입력원과 크기가 $K(>N)$ 인 하나의 공유버퍼로 구성되며 단위시간당 C개의 셀을 처리한다. 각 입력원에서의 도착 프로세스는 IBP(Interrupted Bernoulli Process)에 의하여 지배되는데, ON과 OFF의 두 상태로 구성되며 ON 상태에서는 단위시간당 1개의 셀이 도착하고 OFF 상태에서는 셀이 도착하지 않는다. 각 입력원의 IBP 파라미터, 즉 상태전이확률(state transition probability)은 <그림 2>와 같다. 여기서 각 입력원의 도착분포에 대한 파라미터가 모두 동일한 시스템을 homogeneous 시스템, 그리고 서로 다른 시스템을 heterogeneous 시스템이라 부른다.



<그림 1> ATM 스위치 대기시스템

	OFF	ON	
OFF	$P_{(k)00}$	$P_{(k)01}$	$P_{(k)00} + P_{(k)01} = 1$
ON	$P_{(k)10}$	$P_{(k)11}$	$P_{(k)10} + P_{(k)11} = 1$

<그림 2> 입력원 k의 상태전이확률

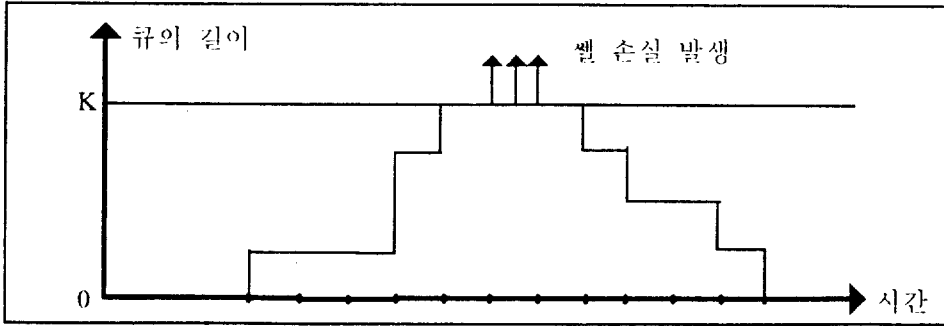
이러한 시스템의 경우 입력원의 갯수, 혹은 버퍼의 크기가 커지게 되면 분석모델의 상태공간(state space)이 지나치게 커지므로 셀 손실율 등에 대한 정확한 분석은 매우 힘들고 시뮬

레이션에 의한 분석이 바람직하다. 일반적인 regenerative 프로세스에 기초한 시뮬레이션에서 이용되는 셀 손실확률에 대한 추정치(ρ)는 ratio 추정치로

L_i : i 번째 싸이클에서 손실된 총 셀의 수,
 T_i : i 번째 싸이클에서 도착한 총 셀의 수,

$$\rho = \sum_i L_i / \sum_i T_i \quad (1)$$

와 같이 정의되며, 한 싸이클에서 공유버퍼에서의 큐 상태의 변화와 셀 손실 발생현상은 <그림 3>에서 보는 바와 같다.



<그림 3> 한 싸이클에서의 큐의 변화와 셀 손실 발생현상

1절에서 언급한 바와같이 ATM 스위치는 매우 작은 값의 셀 손실율을 요구하므로 시뮬레이션에서의 셀 손실사건은 희소사건임을 예상할 수 있다. 그러므로 대부분의 싸이클에서 손실된 총 셀의 수는 0이기 때문에 식 (1)의 추정치는 도착 셀의 수를 제대로 반영하지 못한다. 이러한 문제점으로 인하여 셀 손실확률의 추정치에 대해서 만족할 만한 수준의 분산을 얻기까지 막대한 시간이 소요될 것임을 예상할 수 있다.

3. 2차원 마코브 체인 모델링

본 연구에서는 Shanthikumar와 Sargent [17]가 제시한 hybrid 시뮬레이션의 4가지 유형 중 하나인 부분적으로 시뮬레이션을 이용한 분석적 기법을 통하여 셀 손실확률의 불편추정치를 구하고자 한다.

<그림 1>과 같은 ATM 스위치 시스템의 상

태를 나타내는 요소로는 입의의 타임슬롯에서의 큐의 길이와 그 시점에서의 각 입력원의 상태(ON, 또는 OFF)를 들 수 있다. 이 때 각 입력원의 상태만을 고려한다면 ON 상태에서는 1개의 셀이, 그리고 OFF 상태에서는 0개의 셀이 도착하므로

$Y_k(t)$: 시점 t 에 입력원 k 에 도착한 셀의 수, $k=1, 2, \dots, N$; $Y_k(t)=0, 1$

를 정의할 때,

$$\{(Y_1(t), Y_2(t), \dots, Y_N(t)), t \geq 0\}$$

의 N 차원 마코브 체인을 구성할 수 있다. 그러나 이와같이 구성된 시스템의 총 상태의 수는 2^N 으로 입력원의 갯수가 많아질 경우 정확한 분석이 어려워진다.

그러므로

$Y(t)$: 시점 t 에 시스템에 도착한 셀의 수 ($=Y_1(t)+Y_2(t)+\dots+Y_N(t)$), $Y(t)=0, 1, \dots, N$

를 정의하여

$$\{Y(t), t \geq 0\} \quad (2)$$

의 통합 프로세스를 생각해보면, homogeneous 시스템의 경우에는

$$AP_{ij} = P\{Y(t) = j | Y(t-1) = i\}$$

로 상태 i에서 상태 j로의 상태전이확률을 정의할 수 있다. 또한 각 입력원의 상태전이확률이 모두 동일하므로

$$P_{ij} = P_{(k)ij}, k=1, 2, \dots, N$$

로 놓으면 다음의 식 (3)을 통하여 통합 프로세스의 상태전이확률을 구할 수 있다.

$$AP_{ij} = \sum_{k=0}^{\min(i,j)} \binom{i}{k} P_{11}^{i-k} P_{10}^{i-k} \binom{N-i}{j-k} P_{01}^{j-k} P_{00}^{N-i-j+k} \quad (3)$$

한편 heterogeneous 시스템의 경우에는 각 입력원의 상태전이확률이 서로 다르므로 단위시간당 도착 셀의 수에 대한 1차원 마코브 체인의 구성이 불가능하지만, 다음의 방법을 통하여 통합 프로세스의 상태전이확률을 근사적으로 구할 수 있다. 이 방법은 입력원을 차례로 거쳐가며 반복적으로 통합하는 방식으로, 일단 부분적으로 통합된 상태와 다음 통합대상 입력원의 상태를 고려한 2차원 마코브 체인을 구성하고, 얻어진 2차원 마코브 체인의 각 상태에 대한 극한확률(limiting probability)을 적절히 표준화(normalization)시킴으로써 새로운 부분통합 마코브 체인을 구성한다. 이러한 과정을 N개의 입력원이 모두 통합될 때까지 계속하면 최종적으로 단위시간당 도착 셀의 수에 대한 (N+1)-상태 1차원 마코브 체인을 얻을 수 있다.

먼저 $Y^{(k)}(t)$ 를 시점 t에서의 처음 k개 입력원으로부터 도착한 셀의 수라 하면 $\{Y^{(k)}(t), t \geq 0\}$ 는 k번째 통합을 통하여 얻어진 1차원 마코브 체인이라 할 수 있고, 결국 N번째 통합을 통하여 얻어지는 $Y^{(N)}(t)$ 가 식 (2)에서 정의한

$\{Y(t), t \geq 0\}$ 가 될 것이다. 여기서 $Y^{(1)}(t) = Y_1(t)$ 이며 다음의 관계가 성립한다.

$$Y^{(k)}(t) = Y^{(k-1)}(t) + Y_k(t), k=2, 3, \dots, N \quad (4)$$

또한 (k+1)번째 통합을 위하여 2차원 마코브 체인인

$$\{(Y^{(k)}(t), Y_{k+1}(t)), t \geq 0\}, k=1, 2, \dots, N-1$$

을 구성하며 필요한 기호를 다음과 같이 정의한다.

$LP_{(k)i}$: 입력원 k의 상태 i의 극한확률

$$\left(= \frac{P_{(k)(1-i)}}{P_{(k)01} + P_{(k)10}} \right), k=1, 2, \dots, N; i=0, 1$$

$Q_{(k)ij}$: $\{Y^{(k)}(t), t \geq 0\}$ 의 상태 i에서 상태 j로의 상태전이확률, $k=1, 2, \dots, N; i, j=0, 1, \dots, k$

$LQ_{(k)i}$: $\{Y^{(k)}(t), t \geq 0\}$ 의 상태 i의 극한확률, $k=1, 2, \dots, N; i=0, 1, \dots, k$

$TQ_{(k+1)ij, mn}$: $\{(Y^{(k)}(t), Y_{k+1}(t)), t \geq 0\}$ 의 상태 (i,j)에서 상태 (m,n)으로의 상태전이확률, $k=1, 2, \dots, N-1; i, m=0, 1, \dots, k; j, n=0, 1$

$LTQ_{(k+1)ij}$: $\{(Y^{(k)}(t), Y_{k+1}(t)), t \geq 0\}$ 의 상태 (i,j)의 극한확률, $k=1, 2, \dots, N-1; i=0, 1, \dots, k; j=0, 1$

여기서 $\{Y^{(k)}(t), t \geq 0\}$ 의 상태전이확률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_{(k)ij} &= P\{Y^{(k)}(t) = j | Y^{(k)}(t-1) = i\} \\ &= P\{Y^{(k-1)}(t) + Y_k(t) = j | Y^{(k-1)}(t-1) + Y_k(t-1) = i\} \\ &= \sum_{\{(a,b) | a+b=j\}} \sum_{\{(c,d) | c+d=i\}} \{P\{Y^{(k-1)}(t) = a, Y_k(t) = b | Y^{(k-1)}(t-1) = c, Y_k(t-1) = d\} \\ &\quad \times \frac{P\{Y^{(k-1)}(t-1) = c, Y_k(t-1) = d\}}{P\{Y^{(k-1)}(t-1) + Y_k(t-1) = i\}} \end{aligned} \quad (5)$$

위의 식에서 $P\{Y^{(k-1)}(t-1)=c, Y_k(t-1)=d\}$ 를 극한확률 $LTQ_{(k)cd}$ 로 근사시키면 아래 식이 성립한다.

$$Q_{(k)ij} = \sum_{\{(a,b)\} | a+b=j} \sum_{\{(c,d)\} | c+d=i} TQ_{(k)cd,ab} \frac{LTQ_{(k)cd}}{\sum_{\{(e,f)\} | e+f=i} LTQ_{(k)ef}} \quad (6)$$

또한

$$TQ_{(k)ij,mm} = P\{Y^{(k-1)}(t)=m, Y_k(t)=n | Y^{(k-1)}(t-1)=i, Y_k(t-1)=j\} = Q_{(k-1)im} P_{(k)jn} \quad (7)$$

의 관계식에 의하여

$$Q_{(k)ij} = \sum_{\{(a,b)\} | a+b=j} \sum_{\{(c,d)\} | c+d=i} Q_{(k-1)cd} P_{(k)ab} \frac{LTQ_{(k)cd}}{\sum_{\{(e,f)\} | e+f=i} LTQ_{(k)ef}} \quad (8)$$

가 성립하며, 여기서 LTQ 와 LQ 에 대하여 다음 식이 성립한다.

$$LTQ_{(k)ij} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{Y^{(k-1)}(t)=i\} \lim_{t \rightarrow \infty} P\{Y_k(t)=j\} = LQ_{(k-1)i} LP_{(k)j} \quad (9)$$

$$LQ_{(k)i} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{Y^{(k)}(t)=i\} = \sum_{\{(a,b)\} | a+b=i} LTQ_{(k)ab} \quad (10)$$

위의 절차를 통하여 heterogeneous 시스템의 각 입력원의 상태에 대한 N 차원 마코브 체인을 단위시간당 도착 썸의 수에 대한 1차원 마코브 체인으로 근사시킬 수 있다. 자세한 절차는 <부록 I>에 나타나 있다.

위의 근사방법은 long time average의 개념을 이용한 것으로, 결과적으로 마코브 체인의 총 상태 수는 통합과정을 수행치 않았을 때의 2^N 개에서 $N+1$ 개로 줄어들게 되며, 이러한 1차원 마코브 체인이 4절에서 설명할 단위시간당 썸 손실율의 계산에 이용되는 두 요소, 즉 극

한확률과 상태전이확률 중 전자에 대해서는 항상 정확한 값을, 그리고 후자의 경우에도 만족할 만한 수준의 값을 제공하는 것으로 보인다.

한편 위의 결과를 이용하여 전체 시스템을 다음과 같은 2차원 마코브 체인으로 모델링할 수 있다.

$X(t)$: 시점 t 에서의 큐의 길이, $X(t)=0, 1, \dots, K$

$$\{(X(t), Y(t)), t \geq 0\} \quad (11)$$

이러한 2차원 마코브 체인의 상태전이확률은

$$TP_{ij,kl} = P\{X(t)=k, Y(t)=l | X(t-1)=i, Y(t-1)=j\} \quad (12)$$

로 정의될 수 있다. 위의 상태전이확률은

- $(i+1-C) < 0$ 이고 $k=0$
- $0 \leq (i+1-C) \leq K$ 이고 $k=i+1-C$
- $(i+1-C) > K$ 이고 $k=K$

인 경우에만

$$TP_{ij,kl} = AP_{jl} \quad (13)$$

로 정의되며, 다른 경우에는 항상 0이 된다.

4. Hybrid 시뮬레이션 기법

앞서 설명한 전체 시스템에 대한 2차원 마코브 체인 모델의 경우, 상태공간 규모는 단위시간당 도착 썸의 수에 대한 통합확률분포의 도출 이후에도 $[(K+1)(N+1)]^2$ 로 버퍼의 크기나 입력원의 갯수가 증가함에 따라 대단히 커

지게 되므로, 순수한 분석적기법을 적용시켜 셀 손실확률을 계산하기가 곤란하다. 따라서 추정치 도출을 위한 계산식을 분석함으로써 분석적기법으로 계산이 가능한 부분과 시뮬레이션의 수행을 통하여 추정되어야 할 부분을 구분한 다음, hybrid 시뮬레이션기법을 적용하는 것이 바람직하다.

ATM 스위치에서의 셀 손실확률은

$$\text{셀 손실확률} = \frac{\text{단위시간당 셀 손실율}}{\text{단위시간당 셀 도착율}} \quad (14)$$

로 정의할 수 있다. 단위시간당 셀 도착율은 homogeneous 시스템의 경우

$$\text{시스템의 단위시간당 셀 도착율} = N \times \frac{P_{01}}{P_{01} + P_{10}} \quad (15)$$

로, 그리고 heterogeneous 시스템의 경우에는

$$\text{시스템의 단위시간당 셀 도착율} = \sum_{k=1}^N \frac{P_{(k)01}}{P_{(k)01} + P_{(k)10}} \quad (16)$$

로 표현되므로 분석적기법에 의한 계산이 가능함을 알 수 있다.

한편 단위시간당 셀 손실율을 구하기 위해서는 손실발견가능 상태와 손실위기 상태에 대한 정의가 필요하다. 임의의 시점에서 셀 손실이 관측되기 위해서는 그 시점에서의 큐의 길이는 허용가능한 최대크기인 K여야만 하며, 도착 셀의 수는 C+1부터 최대인 N까지 중 임의로 지

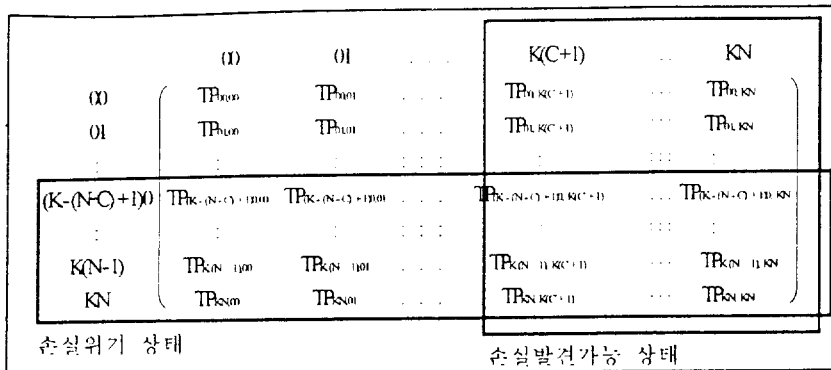
정되어도 무방하므로 그 수는 모두 N-C개라 할 수 있다. 이러한 성질을 가진 상태를 손실발견가능 상태로 정의하면

손실발견가능 상태의 집합={ (i, j) | i=K; j=C+1, C+2, ..., N }로 나타낼 수 있다.

한편 시스템의 모든 상태에서 손실발견가능 상태로의 전이가 가능한 것은 아니다. 한 시점에서 그 다음 시점으로 전이가 일어날 때 큐 길이의 증가분은 그 시점에 도착한 셀의 수와 시스템의 링크 스피드에 영향을 받게되며 최소 -C개에서 최대 N-C개 사이의 값을 가진다. 따라서 다음 타임슬롯에 손실발견가능 상태로의 전이가 일어나기 위해서는 이전 시점에서의 큐의 길이는 반드시 K-(N-C)+1개 이상이어야 한다. 이러한 성질을 가진 상태를 손실위기 상태로 정의하면

손실위기 상태의 집합={ (i, j) | i=K-(N-C)+1, ..., K; j=0, 1, ..., N }으로 정의할 수 있다. 따라서 손실위기 상태의 가능한 최대갯수는 (N-C)(N+1)개이다.

이제까지 설명한 연구대상 시스템 상태가 갖는 성질에 의하여 <그림 4>에서 보는 바와같이 손실위기 상태의 극한확률과, 손실위기 상태에서 손실발견가능 상태로의 상태전이확률이 얻어지면 단위시간당 셀 손실율을 계산할 수 있다는 사실을 알 수 있다.



<그림 4> 손실위기 상태와 손실발견가능 상태

단위시간당 셀 손실율을 계산하기 위하여 사용되는 기호를 아래와 같이 정의한다.

π_{ij} : $\{(X(t), Y(t)), t \geq 0\}$ 의 극한확률, $i=0, 1, \dots, K; j=0, 1, \dots, N$

δ_j : $\{Y(t), t \geq 0\}$ 의 극한확률, $j=0, 1, \dots, N$

CLR : 단위시간당 셀 손실율

π_{ij} 는 <그림 4>의 2차원 마코브 체인에서의 손실위기 상태에 대한 극한확률로 이를 조건부 확률의 개념을 이용하여

$$\begin{aligned} \pi_{ij} &= \lim_{t \rightarrow \infty} P\{X(t)=i, Y(t)=j\} \\ &= \lim_{t \rightarrow \infty} P\{Y(t)=j\} \lim_{t \rightarrow \infty} P\{X(t)=i | Y(t)=j\} \end{aligned} \quad (17)$$

로 정의할 수 있다. 여기서 $\lim_{t \rightarrow \infty} P\{Y(t)=j\}$ 는 단위시간당 도착 셀의 수에 대한 통합확률분포를 나타내는 1차원 마코브 체인의 극한확률이므로 이를 δ_j 로 나타내면

$$\pi_{ij} = \delta_j \times \lim_{t \rightarrow \infty} P\{X(t)=i | Y(t)=j\} \quad (18)$$

의 결과가 얻어진다. 이 때 δ_j 는 분석적기법을 통하여 계산할 수 있음을 알 수 있다. 한편 손실위기 상태에서 손실발견가능 상태로의 상태전이확률은 heterogeneous 시스템의 경우 상태통합에 의해 근사적으로 얻어진 값이라 할 수 있으나, 극한확률은 homogeneous 시스템과 heterogeneous 시스템 모두에 대하여 정확한 값이다.

위의 결과를 이용하여 단위시간당 셀 손실율을 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$CLR = \sum_{i=k-(N-C)+1}^K \sum_{j=0}^N \sum_{k=C+1}^N$$

$$\{\max[k-C+i-K, 0] \cdot \pi_{ij} \cdot TP_{ij, \min\{k-C+i, K\} | k}\} \quad (19)$$

이상의 결과를 통하여 셀 손실확률의 계산에 이용되는 부분 중 임의의 시점에서의 도착 셀의 수에 대한 큐의 길이를 나타내는 조건부 확률의 극한값($\lim_{t \rightarrow \infty} P\{X(t)=i | Y(t)=j\}$)을 제외한다면 나머지는 모두 적절한 분석적기법으로 계산이 가능하다는 사실을 알 수 있다. 그러므로 계산이 어려운 위 조건부 확률의 극한값만을 시뮬레이션을 통해 추정함으로써 전체 시스템에서의 셀 손실확률에 대한 추정치를 얻을 수 있다.

이상의 과정을 통하여 hybrid 시뮬레이션 기법에 의해 얻어지는 homogeneous 시스템과 heterogeneous 시스템에 대한 최종적인 셀 손실확률의 추정치를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

• Homogeneous 시스템

셀 손실확률의 추정치

$$= CLR / (N \times \frac{P_{01}}{P_{01} + P_{10}}) \quad (20)$$

• Heterogeneous 시스템

셀 손실확률의 추정치

$$= CLR / \sum_{k=1}^N \frac{P_{(k)01}}{P_{(k)01} + P_{(k)10}} \quad (21)$$

5. 결과 및 성능분석

5.1. 시뮬레이션 방법

조건부 확률의 극한값에 대한 추정치를 구하

기 위한 실제 시뮬레이션은 하나의 싸이클을 버퍼가 빈 상태에서 다음 번 버퍼가 빈 상태까지로 정의한 regenerative 프로세스로 구현되었다. 이때 한 싸이클의 종료상태는 다음 싸이클의 초기상태로 각 싸이클이 독립이 아니므로 배치(batch) 시뮬레이션 기법이 이용되었다.

본 연구에서는 10000 싸이클의 배치 크기로, 100개의 배치에 대하여 시뮬레이션을 수행시켰다. 본 논문을 통하여 제시된 hybrid 시뮬레이션 기법 외에 homogeneous 시스템의 경우에는 일반적인 시뮬레이션과 Chang, et al. [7]이 제시한 importance sampling 기법을, 그리고 heterogeneous 시스템에 대해서는 일반적인 시뮬레이션을 함께 구현하여 각각의 성능을 비교분석하였다.

5.2. Hybrid 시뮬레이션의 성능분석

이 절에서는 본 연구에서 개발한 hybrid 시뮬레이션 기법을 실제로 적용시킨 결과를 나타내고자 한다. 시뮬레이션에 적용된 homogeneous 시스템의 입력원의 갯수는 3, 링크 스피드 C는 1(셀/단위시간)이며, 각 입력원의 도착분포도 P_{∞} 는 0.9, P_{10} 는 0.3이 지정되었다.

다양한 버퍼 크기에 대하여 hybrid 시뮬레이션 기법을 적용시켜 얻어진 셀 손실확률의 추정치를 <표 1>에, 그리고 추정치의 분산을 <표 2>에 나타내었다. 여기서 참조한 셀 손실확률은 Choi와 Jun[10]의 결과를 이용하여 얻어진 것이다(HB: hybrid 시뮬레이션, PS: 일반적인 시뮬레이션, IS: importance sampling).

<표 1> 셀 손실확률의 추정치(Homogeneous 시스템)

버퍼의 크기	셀 손실 확률	PS	HB	IS
10	0.02098	0.02160	0.02131	0.01446
20	0.003035	0.00311	0.003055	0.001296
30	0.000459	0.000457	0.000443	0.000120
40	7.01E-05	6.56E-05	6.39E-05	1.17E-05
50	1.14E-05	1.04E-05	1.16E-05	1.15E-06

<표 2> 셀 손실확률 추정치의 분산(Homogeneous 시스템)

버퍼의 크기	PS	HB	IS
10	4.29E-06	4.52E-06	8.33E-07
20	5.48E-06	1.21E-06	2.17E-07
30	3.90E-06	1.22E-07	5.13E-08
40	6.16E-06	2.98E-08	8.93E-09
50	3.50E-06	2.78E-09	1.47E-09

한편 링크 스피드 C가 2(셀/단위시간)이며, 4개의 입력원을 갖는 heterogeneous 시스템에 대해서도 hybrid 시뮬레이션을 적용시켜 셀 손실확률의 추정치와 그 분산을 얻었으며 이 결

과를 <표 3>에 나타내었다. 이 시스템에서의 각 입력원의 도착분포는 다음과 같다.

$$P_{(1)00}=0.7, P_{(1)10}=0.4, P_{(2)00}=0.8, P_{(2)10}=0.3, \\ P_{(3)00}=0.9, P_{(3)10}=0.1, P_{(4)00}=0.9, P_{(4)10}=0.3$$

<표 3> 셀 손실확률의 추정치와 분산(Heterogeneous 시스템)

버퍼의 크기	추정치		추정치의 분산	
	PS	HB	PS	IS
5	0.0282	0.026557	1.70E-06	1.43E-06
10	0.00932	0.008754	2.16E-06	8.80E-07
20	0.00114	0.001078	2.57E-06	1.82E-07
30	1.50E-04	1.37E-04	3.17E-06	3.26E-08
40	1.93E-05	2.14E-05	2.09E-06	4.37E-09

본 연구에서 개발된 hybrid 시뮬레이션 기법, 그리고 일반적인 시뮬레이션 기법이나 importance sampling 기법에 의하여 얻어진 결과의 비교를 통하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1. homogeneous 시스템이나 heterogeneous 시스템에 대하여 hybrid 시뮬레이션 기법을 적용시킴으로써 상당히 정확한 셀 손실확률의 추정치를 얻을 수 있다. homogeneous 시스템의 경우는 Choi와 Jun[10]의 결과를 통하여 참조된 실제 셀 손실확률과 비교했을 때, 그리고 heterogeneous 시스템의 경우는 일반적인 시뮬레이션 기법에 의하여 얻어진 추정치를 실제 셀 손실확률로 가정할 때, hybrid 시뮬레이션 기법을 통하여 셀 손실율에 대한 불편추정치를

얻을 수 있음을 알 수 있다.

2. homogeneous 시스템이나 heterogeneous 시스템에 대하여 hybrid 시뮬레이션 기법을 적용시킴으로써 상당한 정도의 분산축소효과를 거둘 수 있다. Importance sampling의 경우는 추정치 자체의 편향성에 대한 의문이 있으므로 비교의 대상에서 제외하고, 일반적인 시뮬레이션 기법과 hybrid 시뮬레이션 기법에 대한 분산축소비율을 산출한 결과를 <표 4>와 <표 5>에 나타내었다. 분산축소비율은 다음의 식 (22)를 통하여 산출되었다.

$$\text{분산축소비율}(\%) = \frac{\text{분산}_{(PS)} - \text{분산}_{(HB)}}{\text{분산}_{(PS)}} \times 100 \quad (22)$$

<표 4> 분산축소비율(Homogeneous 시스템)

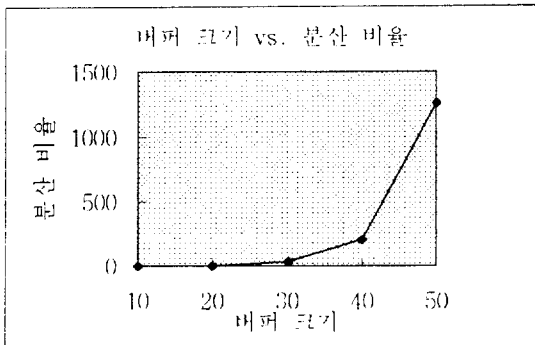
버퍼의 크기	분산축소비율(%)
10	-5.458
20	77.8904
30	96.8618
40	99.5197
50	99.9204

<표 5> 분산축소비율(Heterogeneous 시스템)

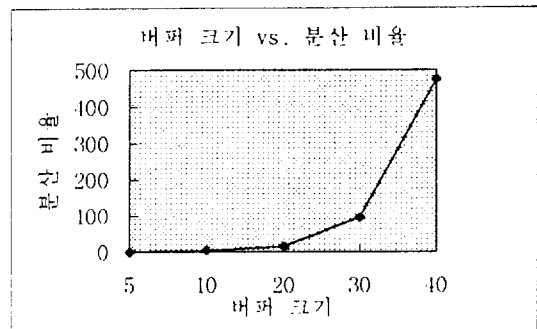
버퍼의 크기	분산축소비율(%)
5	15.6949
10	59.1962
20	92.9056
30	98.9715
40	99.7908

한편 <그림 5>과 <그림 6>은 일반적인 시뮬레이션 기법과 hybrid 시뮬레이션 기법에 대한 분산 비율을 산출한 결과를 나타낸다. 분산 비율은 다음의 식 (23)을 통하여 산출되었다.

$$\text{분산 비율} = \frac{\text{분산}_{(PS)}}{\text{분산}_{(HB)}} \tag{23}$$



<그림 5> 버퍼의 크기 vs. 분산비율 (Homogeneous 시스템)



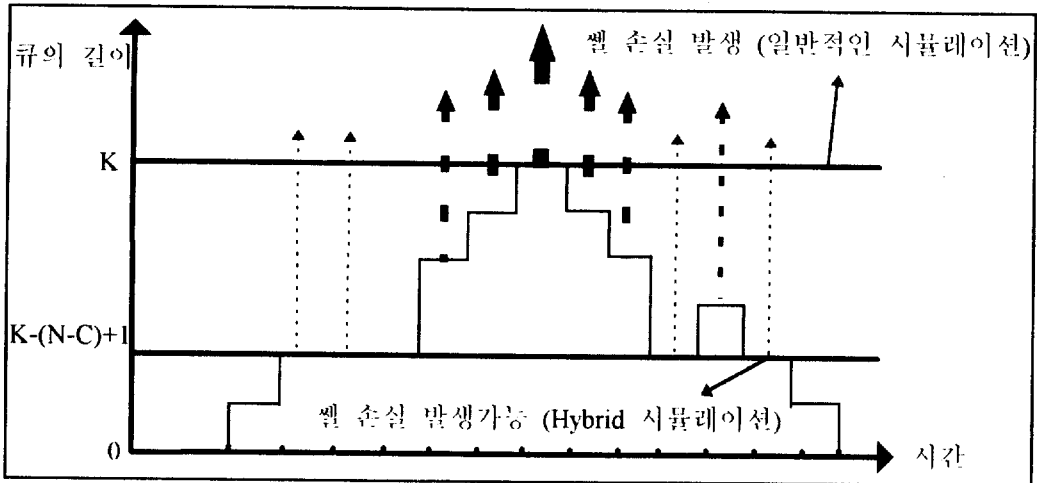
<그림 6> 버퍼의 크기 vs. 분산비율 (Heterogeneous 시스템)

위의 결과를 통하여 ATM 스위치의 버퍼 크기가 증가할 수록, 즉 셀 손실확률의 실제값이 작아질 수록 분산축소효과의 정도가 점차 커진다는 결론을 내릴 수 있다. 이러한 결과는 단위시간당 셀 도착율은 식 (15), 혹은 식 (16)를 통하여, 그리고 단위시간당 셀 손실율을 이루는 부분 중 도착 셀의 수에 대한 통합확률분

포의 극한확률 및 손실위기 상태에서 손실발생 가능 상태로의 상태전이확률 등은 식 (3), 혹은 <부록>의 프로시저를 이용하여 분석적기법으로 구함으로써, 일반적인 시뮬레이션에서는 랜덤 변수로 취급될 요소를 hybrid 시뮬레이션에서는 상수로 취급하기 때문에 가능해졌다고 할 수 있다.

3. 일반적인 시뮬레이션과 달리 hybrid 시뮬레이션의 경우에는 실제 손실은 발생하지 않고 본 연구에서 정의된 손실위기 상태만 관측된다 하더라도, 이 결과가 정해진 가중치에 의하여 셀 손실확률의 추정치에 반영될 수 있으므로

회소사건 시뮬레이션의 본질적인 문제점을 부분적으로나마 해결할 수 있다는 장점을 가지고 있다. <그림 7>은 이러한 효과를 나타내고 있는데, 여기서 화살표의 두께는 적용되는 가중치의 정도를 나타낸다.



<그림 7> Hybrid 시뮬레이션에서의 셀 손실

6. 결 론

본 연구에서는 광대역 통신망의 핵심요소인 ATM 스위치에서의 셀 손실율을 추정하기 위한 hybrid 시뮬레이션 기법을 개발하였다. 제안된 기법에서 전체적인 셀 손실율의 추정치는 분석적 기법으로 산출되며 일부분의 값 만이 시뮬레이션을 통하여 얻어진다.

ATM 스위치 시스템은 이산시간 대기시스템 $(\sum_{i=1}^N G_i / D / 1 / K)$ 으로 모델링되었으며, homogeneous 시스템과 heterogeneous 시스템의 두 가지 경우에 대한 분석적 기법으로서의 절차들과 시뮬레이션 방법 등이 제안되었다. 이 기법을 통하여 순수한 분석적 기법을 이용하는 경

우의 $[(K+1)(N+1)]^2$ 에 달하는 상태공간을 $(N-C)^2(N+1) + (N+1)^2$ 으로 줄이는, 즉 버퍼 크기(K)에 관계없이 입력원의 갯수(N)에만 영향받는 모델의 개발이 가능하였다. 한편 시뮬레이션 결과를 통하여 본 논문에서 제안된 기법을 이용함으로써 일반적인 시뮬레이션을 이용하여 얻어진 추정치와 비교할 때, 상당한 정도의 분산축소효과를 거둘 수 있는 셀 손실율의 불편추정치를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 또한 셀 손실율의 실제 값이 작아짐에 따라 추정치에 대한 분산축소효과는 증가하는 경향을 나타내므로, 본 논문에서 제시된 기법은 회소사건 시뮬레이션에 비교적 적합한 기법이라는 결론을 내릴 수 있었다.

그러나 본 연구에서 제안된 hybrid 시뮬레이션 기법은 그 접근방식에 있어 새로운 가능성

을 제공했다고 할 수는 있지만, 적용범위는 상당히 제한적이므로 이를 일반화시키는 방안이 모색되어야 할 것이다. 또한 보다 현실적인 모델이 되기 위하여 대부분의 ATM 스위치가 채택하고 있는 우선순위제어(priority control)도 다룰 수 있는 방안에 대한 고찰 역시 필요하리라 여겨진다.

참 고 문 헌

- [1] Anick, D., D. Mitra, and M.M. Sondhi, "Stochastic Theory of Data-Handling Systems with Multiple Sources", *Bell System Tech. J.*, Vol. 61, No. 8(1982), pp. 1871-1894.
- [2] Baiocchi, A., N.B. Melazzi, M. Listanti, A. Roveri, and R. Winkler, "Loss Performance Analysis of an ATM Multiplexer Loaded with High-Speed ON-OFF Sources", *IEEE J.S.A.C.*, Vol. 9, No. 3 (1991), pp. 388-393.
- [3] Baiocchi, A., N. B. Melazzi, M. Listanti, A. Roveri, and R. Winkler, "Modeling Issues on an ATM Multiplexer within a Bursty Traffic Environment", *Proc. INFOCOM '91* (1991), pp. 83-91.
- [4] Blondia, C. and O. Casals, "Performance Analysis of Statistical Multiplexing of VBR Sources", *Proc. INFOCOM '92*(1992), pp. 828-837.
- [5] Bucklew, J.A., *Large Deviation Techniques in Decision, Simulation, and Estimation*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1990.
- [6] CCITT Rec. I. 121, "B-ISDN Service Aspects", 1991, Geneva.
- [7] Chang, C.S., P. Heidelberger, S. Juneja, and P. Shahabuddin, "The Application of Effective Band-Width to Fast Simulation of Communication Networks", *IBM Research Report RC 18877*, Yorktown Heights, New York, 1993.
- [8] Chen, J.C., D. Lu, J.S. Sadowsky, and K. Yao, "On Importance Sampling in Digital Communications-Part I: Fundamentals", *IEEE J.S.A.C.*, Vol. 11, No. 3(1993), pp. 289-299.
- [9] Chen, J.C., D. Lu, J.S. Sadowsky, and K. Yao, "On Importance Sampling in Digital Communications-Part II: Trellis-Coded Modulation", *IEEE J.S.A.C.*, Vol. 11, No. 3(1993), pp. 300-308.
- [10] Choi, W.Y. and C.H. Jun, "Exact Loss Performance Analysis of an ATM Multiplexer with Homogeneous Discrete-Time ON-OFF Sources", *Proc. GLOBECOM '95*(1995), pp. 824-827.
- [11] Fishman, G.S., *Principles of Discrete Event Simulation*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1978.
- [12] Gillian, M.W. and R. Kositpaiboon, "Multimedia Traffic Management Principles for Guaranteed ATM Network Performance", *IEEE J.S.A.C.*,

- Vol. 8, No. 3(1990), pp. 437-446.
- [13] Heffes, H. and D.M. Lucantoni, "A Markov Modulated Characterization of Packetized Voice and Data Traffic and Related Statistical Multiplexer Performance", *IEEE J.S.A.C.*, Vol. 4, No. 6(1986), pp. 856-868.
- [14] Li, S.Q., "Study of Information Loss in Packet Voice Systems", *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 37, No. 11 (1989), pp. 1192-1202.
- [15] Ross, S.M., *A Course In Simulation*, Macmillan Publishing Co., New York, 1990.
- [16] Satdler, J.S. and S. Roy, "Adaptive Importance Sampling", *IEEE J.S.A.C.*, Vol. 11, No. 3(1993), pp. 309-316.
- [17] Shanthikumar, J.G. and R.G. Sargent, "A Unifying View of Hybrid Simulation / Analytic Models and Modeling", *Operations Research*, Vol. 31, No. 6 (1983), pp. 1030-1052.
- [18] Tucker, R.G., "Accurate Method for Analysis of a Packet-Speech Multiplexer with Limited Delay", *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 36, No. 4(1988), pp. 479-483.
- [19] Wang, S.S. and J.A. Silvester, "A Discrete-Time Performance Model for Integrated Service ATM Multiplexers", *Proc. GLOBECOM '93*(1993), pp. 757-761.
- [20] Yang, T. and D.H.K. Tsang, "A Novel Approach to Estimating the Cell Loss Probability of an ATM Multiplexer Loaded with Homogeneous Bursty Sources", *Proc. GLOBECOM '92*(1992), pp. 511-517.

부 록

〈Heterogeneous 통합 프로세스의 상태전이확률을 구하기 위한 알고리즘〉

Step 1. $k=1$

$$1.1. LP_{(k)0} = \frac{P_{(k)10}}{P_{(k)01} + P_{(k)10}}, LP_{(k)1} = \frac{P_{(k)10}}{P_{(k)01} + P_{(k)10}}$$

1.2. $k=k+1,$

if($k>N$) then GOTO Step 2.

else GOTO Step 1. 1.

Step 2. $k=1, LQ_{(1)0}=LP_{(1)0}, LQ_{(1)1}=LP_{(1)1}, Q_{(1)00}=P_{(1)00}, Q_{(1)01}=P_{(1)01}, Q_{(1)10}=P_{(1)10}, Q_{(1)11}=P_{(1)11}$

2.1. $k=k+1,$

if($k>N$) then STOP, $AP_{ij}=Q_{(N)ij}$, for $i,j=1, 2, \dots, N$.

2.2. $TQ_{(k)ij,mn} = Q_{(k-1)im} P_{(k)jn}$, for $i,m=0, 1, \dots, k-1; j,n=0, 1,$

$LTQ_{(k)ij} = LQ_{(k-1)ji} LP_{(k)i}$, for $i=0, 1, \dots, k-1; j=0, 1$

2.3. $Q_{(k)00} = TQ_{(k)00,00}$,

$Q_{(k)0j} = TQ_{(k)00,(j-1)1} + TQ_{(k)00,j0}$, for $j=1, 2, \dots, k-1,$

$Q_{(k)0k} = TQ_{(k)00,(k-1)1}$,

$$Q_{(k)10} = TQ_{(k)(i-1)1,00} \times \frac{LTQ_{(k)(i-1)1}}{LTQ_{(k)(i-1)1} + LTQ_{(k)00}}$$

$$+ TQ_{(k)10,00} \times \frac{LTQ_{(k)00}}{LTQ_{(k)(i-1)1} + LTQ_{(k)00}}, \text{ for } i=1, 2, \dots, k-1,$$

$$Q_{(k)ij} = (TQ_{(k)(i-1)1,(j-1)1} + TQ_{(k)(i-1)1,j0}) \times \frac{LTQ_{(k)(i-1)1}}{LTQ_{(k)(i-1)1} + LTQ_{(k)00}}$$

$$+ (TQ_{(k)10,(j-1)1} + TQ_{(k)10,j0}) \times \frac{LTQ_{(k)00}}{LTQ_{(k)(i-1)1} + LTQ_{(k)00}}, \text{ for } i, j=1, 2, \dots, k-1,$$

$$Q_{(k)ik} = TQ_{(k)(i-1)1,(k-1)1} \times \frac{LTQ_{(k)(i-1)1}}{LTQ_{(k)(i-1)1} + LTQ_{(k)00}} + TQ_{(k)10,(k-1)1} \times \frac{LTQ_{(k)00}}{LTQ_{(k)(i-1)1} + LTQ_{(k)00}}$$

for $i=1, 2, \dots, k-1,$

$Q_{(k)k0} = TQ_{(k)(k-1)1,00}$,

$Q_{(k)ki} = TQ_{(k)(k-1)1,(i-1)1} + TQ_{(k)(k-1)1,j0}$, for $j=1, 2, \dots, k-1,$

$Q_{(k)kk} = TQ_{(k)(k-1)1,(k-1)1}$

2.4. $LQ_{(k)0} = LTQ_{(k)00}$,

$LQ_{(k)i} = LTQ_{(k)(i-1)1} + LTQ_{(k)00}$, for $i=1, 2, \dots, k-1,$

$LQ_{(k)k} = LTQ_{(k)(k-1)1}$,

GOTO Step 2.1.