

# 복수버퍼를 가진 뱀연 네트워크의 성능분석

正會員 문 영 성\*

## Performance Evaluation of Multibuffered Banyan Networks

Youngsong Mun\* *Regular Member*

※본 논문은 1995년도 한국과학재단 핵심전문연구과제 951-0904-057-2 지원에 의하여 수행한 연구임.

### 요 약

뱀연 네트워크는 병렬처리를 위한 구조 및 고속 패킷 교환방식의 교환 구조로 사용될 수 있다. 교환 구조의 장단점을 분석하여 원하는 성능 목표치를 구현할 수 있는가를 알아보기 위하여는 해석적 성능 평가가 매우 유용한 방법이다. 뱀연 네트워크에 대한 기존의 해석적 성능 평가 모델들은 부정확하거나 너무 복잡하다는 단점이 있었다. 정확한 결과를 얻기 위하여서는 연속된 단간 그리고 인접한 시간슬롯간의 패킷 이동의 상관관계를 효과적으로 묘사하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 블럭상태를 효과적으로 도입함으로써 복수개의 입력버퍼를 가진 뱀연 네트워크의 성능을 상대적으로 간결하면서도 정확하게 나타내는 모델을 제시하였다. 제시된 모델의 정확성을 입증하기 위하여 시뮬레이션 및 기존의 모델들과 결과를 비교하였다.

### ABSTRACT

Banyan networks have a number of applications in the areas of computer and communications. While several analytical models have been proposed for the performance evaluation of Banyan networks, they are either not very accurate or too complex to be generalized. In this paper a new model for evaluating multibuffered MINs with  $2 \times 2$  switching elements is proposed. The proposed model is very accurate for any size and traffic conditions. It is also simple and can be easily generalized.

### I. 서 론

뱀연 네트워크<sup>(1)</sup> 및 이의 변형으로서 배치 뱀연형 및 뱀연형을 다단으로 연결한 텐덤 뱀연형 구조는 병렬처리를 위한 데이터 전송 구조 또는 고속 패킷 교환방식의 교환 구조로 사용될 수 있다. 병렬처리를 위한 데이터 전송 구조로의 응용은 기존의 컴퓨터 구조

\*승실대학교 컴퓨터학부  
School of Computing, Soongsil University  
論文番號:9556-0210  
接受日字:1995年 2月 10日

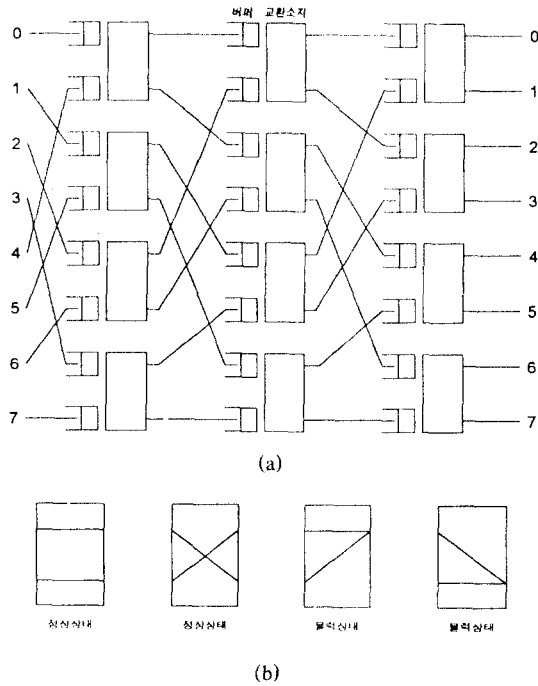


그림 1. 버퍼를 가진 뱀연 네트워크:  
(a)구조도, (b)교환소자의 상태

분야에서 많이 연구되어 왔으나, Turner<sup>(2)</sup>에 의해 고속 패킷 교환방식의 교환 구조로의 응용 가능성이 새롭게 제기되어 연구되어왔다. 이는 뱀연 네트워크가 자기 라우팅 성질을 가지고 있어, 이를 이용하면 고속 교환이 가능하기 때문이다. 다음 그림 1은 뱀연 네트워크의 구조 및 각 교환소자의 상태를 표시한다.

뱀연 네트워크에서 버퍼는 성능을 크게 향상시킬 수 있으며 이러한 현상은 트래픽이 균등하지 않을 때 더 뚜렷이 나타난다<sup>(3,4)</sup>. 복수버퍼를 갖는 교환구조에서는 각 교환소자내의 버퍼모듈이 독립적으로 동작하는 방식과 공유하는 방식으로<sup>(5,6)</sup> 구분할 수 있는데, 공유하는 방식은 버퍼를 효율적으로 사용할 수 있으나, 버퍼의 입·출력 속도가 입력 포트의 수에 비례하여 빨라져야 블러킹을 방지할 수 있다는 단점이 있다. 버퍼모듈이 독립적으로 동작하는 방식 중 뱀연 네트워크에서 버퍼를 각 교환소자에 위치시킨 구조는 버퍼가 패킷간 경로 경쟁이 발생할 때 패킷이 손실되지 않게 하는 기능을 가지고 있다. 각 교환소자에 버

퍼가 가해지고 백 프레스 방법 사용되면 패킷은 다음단의 목적지 버퍼가 가용할 때만 현재의 버퍼를 떠날 수 있다<sup>(7)</sup>. 고안된 교환 구조가 트래픽이나 버퍼의 변화등의 여러 가지 동작상황하에서 원하는 성능목표를 만족시킬 수 있는지를 알아보기 위하여 해석적 성능평가는 매우 중요하다.

버퍼가 없을 때의 뱀연 네트워크에 대한 성능평가는 비교적 단순하게 구현될 수 있으며 따라서 많이 연구되어 왔다<sup>(8-11)</sup>. 또한 버퍼가 있을 때에도 여러 가지 방법이 고안되었다<sup>(12-18)</sup>. Dias와 Jump는 페트리넷을 이용하여 단일버퍼를 가진 델타 네트워크의 성능을 분석하였다<sup>(12)</sup>. 단일버퍼란 각 교환소자에 위치한 버퍼의 크기가 한 개의 패킷만을 저장할 수 있는 크기를 의미하며 버퍼의 크기가 한 개 보다 큰 유한개의 패킷을 저장할 수 있을 때 복수버퍼라 한다. Jenq은 단일버퍼를 가진 뱀연 네트워크를 위하여 두개의 모델을 고안하였다<sup>(13)</sup>. 이중 간단한 모델은 Yoon등에 의하여 일반화 되었는데 이를 YLL 모델이라 부르겠다<sup>(14)</sup>. Theimer 등은 Jenq의 복잡한 모델을 블럭 상태 개념을 도입하여 개선하였다<sup>(7)</sup>. Hsiao와 Chen은 또한 단일버퍼를 가진 뱀연 네트워크를 블럭 상태 개념을 이용하여 해석하였다<sup>(15)</sup>. Ding과 Bhuyan은 작은 클럭 주기 개념을 이용하여 뱀연 네트워크의 성능이 향상될 수 있음을 보여주었다<sup>(16)</sup>.

이러한 기존모델들의 단점으로는 여러 가지가 있을 수 있으며, 그 중 하나는 모델이 너무 단순해서 결과가 부정확하게 얻어진다는 점이다<sup>(13,14)</sup>. 또 다른 단점으로는 정확도를 향상시키려다가 발생하는 결과로 모델이 너무 복잡하게 되거나 비현실적인 가정에 의거한다는 점이다<sup>(7,15)</sup>. 본 논문에서는 복수버퍼를 갖는 뱀연 네트워크의 성능평가를 위한 해석적 모델을 연구하였는 바 두개의 인접한 단간의 패킷이동 및 두개의 연속된 네트워크 클럭주기간의 상관관계를 효과적으로 수용함으로써 정확성을 얻었으며 또한 블럭 상태를 현실적으로 반영하였다. 성능평가를 위한 방법으로는 시뮬레이션 또는 수학적 표현에 의하여 구하는 방법이 있는데 수학적 표현에서는 변수설정 및 네트워크의 동작을 묘사하기 위한 변수 등의 상관관계 설정에 따라 정확성이 달라지게 된다. 여기서 해석적 모델의 연구라 함은 이러한 독창적인 수학적 표현을 구하기 위한 연구를 의미한다. 그러면서도 기존의 모

델들보다 훨씬 간단하며 정확도도 높은 결과를 얻게 되었다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 다음 장에서는 해석적 모델링에 있어서 중요한 문제점과 기존에 고안된 모델들 중 주요한 몇 가지를 살펴본다. 3장에서는 단일버퍼를 가진 모델을 제시한다. 이 단일버퍼 모델을 확장함으로써 4장에서는 복수버퍼 모델이 제시된다. 5장에서는 제안된 해석적 모델들을 시뮬레이션 및 기존의 모델들의 결과와 비교하여 그 정확성을 입증하였다. 성능변수로는 수율과 전달지연시간이 사용되었다.

## II. 해석적 모델링

### 1. 해석적 모델링시 고려해야 할 사항

밴연 네트워크의 성격을 정확하게 모델하기 위하여서는 두개의 연속된 시간슬롯간의 패킷이동의 상관관계를 고려하는 것이 필수적이다. 이뿐만 아니라, 두개의 연속된 단간의 상관관계도 고려되어야 한다. 이러한 상관관계를 반영하기 위해서는 블럭상태를 반드시 모델에 포함해야 한다. 이러한 상관관계를 고려하지 않는다면 모델을 비교적 쉽게 얻을 수 있겠으나 정확한 결과를 얻기가 어렵다. 버퍼내의 패킷이 같은 출력링크를 사용하고자 하는 다른 패킷과의 경쟁에서 지거나, 다음단에 있는 목적지의 버퍼가 가용하지 않을 때 블럭상태는 발생한다. 버퍼의 정상상태는 그 버퍼가 이전의 시간슬롯에서 받은 패킷이 버퍼의 전단에 위치하고 있을 때로 정의된다. 버퍼에 있는 패킷의 갯수로는 그 버퍼가 정상상태에 있는지 블럭상태에 있는지 구별할 수 없다. 그러나 정상상태에 있는 패킷은 어느 출력링크로 나아갈 확률이 균등하지만 블럭상태에 있는 패킷은 이전에 가려고 했던 링크로 다시 가려고 하기 때문에, 블럭상태에 있는 버퍼의 행동은 정상상태에 있는 버퍼의 행동과 구별되어야 한다.

### 2. 기존의 모델들

#### 1) Jenq의 모델

Jenq은 단일버퍼를 가진 밴연 네트워크를 위하여 두개의 해석적 모델을 고안하였다. 첫번째 모델은 두번째 보다 간단한데 한 개의 교환소자에 있는 버퍼들은

서로 독립적이며 트래픽은 균일하다고 가정하였다. 여기서 사용된 독립성이라는 가정을 점검하기 위하여 그러한 가정을 포함하지 않은 다른 한 개의 모델을 고안하였다. 두개의 모델이 매우 근접하는 결과를 보여주었기 때문에 독립성의 가정은 합리적이라고 그의 논문에서는 결론지어졌다. 그러나 이 두개의 해석적 모델은 시뮬레이션과 비교되어지지 않았다. 나중에 보고된 연구에 의하면 이 모델들은 트래픽이 클 때는 매우 부정확한 것으로 판명되었다. 블럭상태는 두번째 모델인 복잡한 모델에도 포함되지 않았다. 그러므로 복잡한 모델도 간단한 모델에 비해서 더 나은 결과를 보여주지 못했다.

#### 2) YLL 모델

단일버퍼를 가진 델타네트워크를 위해서 YLL은 Jenq의 간단한 모델을 일반화하였다. Jenq의 모델이  $2 \times 2$ 의 교환소자로만 구성된 네트워크에 국한된 반면 YLL 모델은 임의의 크기를 가진 교환소자로 구성된 네트워크에도 적용될 수도 있다. 그림 2는 상태 전이도를 보여주고 있다. 여기서  $r$ 은  $k$ 단에 있는 교환소자의 버퍼내에 있는 패킷이 시간슬롯내에 이동할 수 있는 확률이다. YLL 모델은 Jenq의 모델을 단순히 일반화한 것이므로 정확도에 있어서 향상되지는 않았다. 이러한 단일버퍼 모델로부터 복수버퍼 모델도 고안되었다. 단일버퍼 모델에서와 마찬가지로 복수버퍼 모델도 블럭상태를 고려하지 않았다.

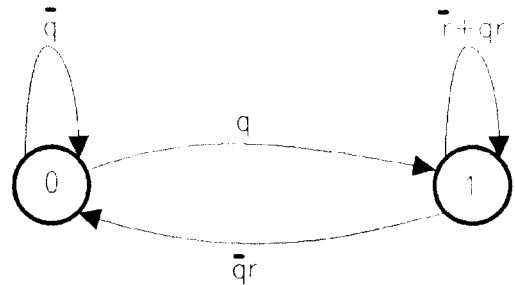


그림 2. YLL 모델의 상태 전이도

#### 3) TRH 모델

TRH 모델은 단일버퍼를 가진 밴연 네트워크를 위한 것이다. 이 모델은 앞의 두 모델에 있던 동일한 교환

소자내의 버퍼간의 독립성의 가정을 제거하였다. 한 교환소자내의 한 버퍼가 가질 수 있는 가능한 상태를 모두 포함시킴으로서, 한 개의 교환소자에 대해 아홉 개의 상태를 정의하였다. 단지 두개의 상태만 가진 YLL 모델에 비교하면 확실히 훨씬 복잡해진 것이다. 아홉 개의 상태를 이용하여 블럭상태를 고려하였으므로 Jenq의 모델과 비교하여 상당한 정확도를 얻게 되었다.

4) HC 모델

HC 모델은 임의의 크기를 가진 교환소자로 구성된 단일버퍼 교환기를 위하여 고안되었다. 이 모델은 블럭상태를 고려하였다. 그림 3은 상태 천이도를 보여 주고 있다. 이 모델은 상대적으로 간단하기는 하지만 몇개의 비현실적인 가정에 근거하고 있다. 첫째로 정상상태에 있는 패킷이 이동하기 위하여 먼저 블럭상태에 있는 패킷들과 경쟁해야 한다. 여기서 이길 경우 정상상태에 머무르게 되며 질 경우 블럭상태에 들어가게 된다. 두번째로는 블럭상태에 있는 패킷은 먼저 블럭상태에 있는 패킷들과 경쟁해야 한다. 경쟁에서 이길 경우 블럭상태에서 정상상태로 상태가 바뀌게 된다. 이상의 가정들로부터 두 가지의 비정상적인 현상이 발견된다. 첫째로는 블럭상태에 있는 패킷은

목적지의 버퍼가 가용해도 다음 단으로 이동할 수가 없다. 그 패킷은 상태를 정상상태로 상태를 바꾸기 위하여 최소한 한 시간슬롯을 소모해야 하는 것이다. 그러므로 전달지연시간이 과대 계산된다. 두번째로는 블럭상태의 패킷은 서로간에 먼저 경쟁해야 한다는 점이다. 이러한 비 정상적인 가정을 보상하기 위하여 이 모델은 실험에서 얻어진 변수들을 포함시켜야만 하는 단점을 갖게 되었다. 또한 블럭상태를 포함하기는 하였지만 이전의 모델들과는 달리 블럭상태의 패킷은 원래의 목적지로 재시도되지 않고 균등하게 분산될 확률을 갖는다.

이상에서 고찰해 본 바와 같이 블럭상태를 어떻게 묘사하느냐에 따라 정확한 모델이 얻어질 수 있게 된다. 다음의 두 장에서 이러한 목적을 달성하기 위한 모델이 제시된다.

III. 단일 버퍼 모델

1. 가 정

이전의 모델들에서 사용되었던 가정과 동일한 단일 트래픽이 가정되었으며 그 자세한 내용은 아래와 같다.

- ◎ 각 입력포트에서는 모든 출력포트에 걸쳐 균등하게 분포된 확률로 액세스 요구를 발생시킨다.
- ◎ 한 개의 교환소자 내에 있는 두개의 버퍼는 통계적으로 독립적이다.
- ◎ 각 패킷은 경쟁에서 이길 확률이 같다. 그리고 블럭된 패킷은 원래의 목적지로 다시 가려고 시도된다.

이러한 가정하에 한개의 단의 상태는 단지 한 교환소자의 상태를 고려함으로써 알 수 있다. 더 나아가 한 개의 버퍼는 한 개의 교환소자를 특정 지우고 따라서 한 개의 단을 특정 지운다. 시간슬롯은 기존의 디자인에서와 같이 두 개의 단계로 구성된 것으로 가정한다. 즉, 1 단계에서는 패킷을 전송할 버퍼는 목적지 버퍼의 공간에 여유가 있는지를 점검하며, 2 단계에서는 이러한 버퍼여유에 따라 패킷을 전송하던가 아니면 블럭된 상태로 들어가게 된다.

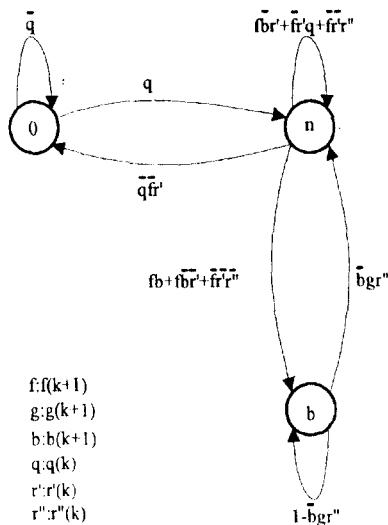


그림 3. HC 모델의 상태천이도

2. 정 의

해석적인 모델을 구하기 위하여 다음과 같은 변수들이 정의된다.  $SE(k)$ 는  $k$ 단에서의 한 개의 교환소자를 가리킨다. 또한  $t_b$ 는 한 시간슬롯이 시작할 때의 시작 시간을 의미하고,  $t_d$ 는 한 시간슬롯의 경과시간을 의미한다.

- ⊙  $n$ : 교환 단의 갯수
- ⊙  $P_0(k, t)$ :  $SE(k)$ 의 버퍼가  $t_b$ 에 비어있을 확률
- ⊙  $P_n(k, t)$ :  $SE(k)$ 의 버퍼가  $t_b$ 에 보통패킷을 가지고 있을 확률
- ⊙  $P_b(k, t)$ :  $SE(k)$ 의 버퍼가  $t_b$ 에 블럭된 패킷을 가지고 있을 확률
- ⊙  $q(k, t)$ : 패킷이  $t_d$ 동안에  $SE(k)$ 에 올 준비가 되어 있을 확률
- ⊙  $r_m(k, t)$ :  $SE(k)$ 에 있는 보통패킷이  $t_d$  동안에 이동할 확률
- ⊙  $r_{mn}(k, t)$ :  $SE(k)$ 에 있는 보통패킷이  $t_d$  동안에 원하는 포트로 갈 수 있는 확률. 다른 버퍼가 블럭 상태에 있으면 이 블럭된 패킷은 다른 포트로 향한다고 가정한다.
- ⊙  $r_{nb}(k, t)$ :  $SE(k)$ 에 있는 보통패킷이  $t_d$  동안에 다른 버퍼에 있는 블럭된 패킷과의 경쟁에서 이겨서 원하는 포트로 갈 수 있는 확률.
- ⊙  $r_b(k, t)$ :  $SE(k)$ 에 있는 블럭된 패킷이  $t_d$  동안에 이동할 확률
- ⊙  $r_{bn}(k, t)$ :  $SE(k)$ 에 있는 블럭된 패킷이  $t_d$  동안에 원하는 포트로 갈 수 있는 확률. 이 때 다른 버퍼는 비어 있거나 보통 패킷을 가지고 있다고 가정한다.
- ⊙  $r_{bb}(k, t)$ :  $SE(k)$ 에 있는 블럭된 패킷이  $t_d$  동안에 원하는 포트로 갈 수 있는 확률. 이 때 다른 버퍼도 블럭된 패킷을 가지고 있다고 가정한다.
- ⊙  $P^{na}(k, t)$ :  $SE(k)$ 에 버퍼가  $t_d$  동안에 패킷을 받을 빈 공간이 있을 확률. 이 때에는 이 버퍼를 향한 블럭된 패킷은 없다고 가정한다.
- ⊙  $P^{ba}(k, t)$ :  $SE(k)$ 에 버퍼가  $t_d$  동안에 패킷을 받을 빈 공간이 있을 확률. 이 때에는 이 버퍼를 향한 한 개의 블럭된 패킷이 있다고 가정한다.
- ⊙  $P^{bba}(k, t)$ :  $SE(k)$ 에 버퍼가  $t_d$  동안에 패킷을 받을 빈 공간이 있을 확률. 이 때에는 이 버퍼를 향한 두 개의 블럭된 패킷이 있다고 가정한다.

⊙  $T(k, t)$ :  $SE(k)$ 의 입력포트가 패킷을 받을 확률. 다시 말해서  $SE(k-1)$ 의 한 출력포트로부터 패킷이 전송될 확률.

이러한 변수들간의 관계는 그림 4에 표시되어 있다.

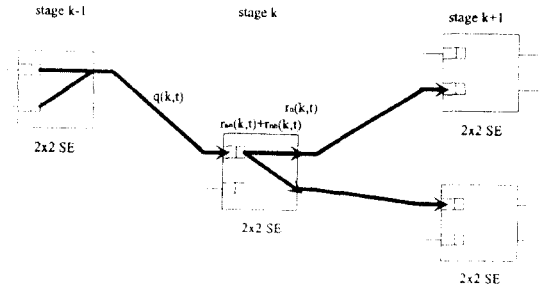


그림 4. 변수들간의 관계

3. 버퍼의 상태

한 개의 버퍼는 블럭된 상태를 포함해서 총 세개의 상태를 가질 수 있다.

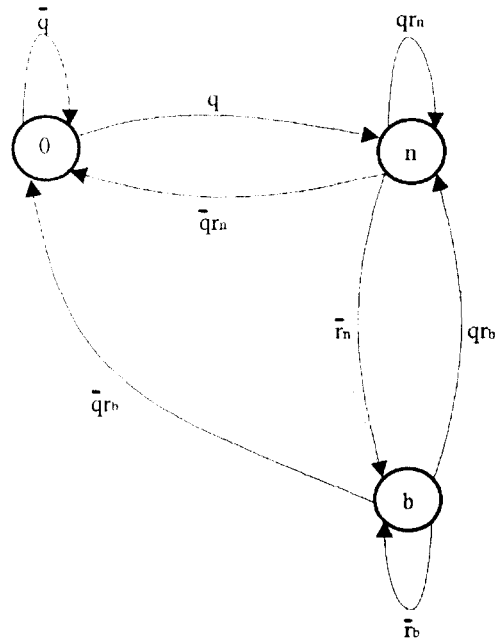


그림 5. 단일버퍼 모델의 상태천이도

- ⊙ 빈 상태: 버퍼가 비어 있는 상태.
- ⊙ 상태  $n$ : 버퍼가 바로 이전의 시간슬롯에 도착한 보통 패킷을 가지고 있는 상태.
- ⊙ 상태  $b$ : 버퍼가 블러킹 때문에 최소한 한 개의 시간슬롯동안 머무르고 있는 패킷을 가지고 있는 상태.

그림 5는 이러한 모델에 사용된 상태천이도를 보여 주고 있다.

이렇게 정의된 변수들과 상태천이도를 이용해서 상태식이 얻어진다.

#### 4. 변수의 계산

수용과 전달지연시간으로 표시되는 밴연 네트워크의 성능은 마지막 단으로 부터 처음 단까지 리커시브하게 계산되어 얻어진다. 이는 어느 시간슬롯에서든 네트워크는 패킷이 마지막 단으로부터 네트워크를 떠남으로서 상태를 바꾸기 시작하기 때문이다. 이러한 변화는 처음 단까지 끼꾸로 전달되며 처음 단까지 전달되면 한 개의 시간슬롯이 종료되는 것이다.

한 교환소자의 보통 패킷은 다른 버퍼가 비어있거나 다른 버퍼에 있는 보통 패킷의 목적지와 다른 포트로 향할 때는 항상 원하는 출력 포트에 갈 수 있다. 두개의 보통 패킷이 경쟁할 때는, 각 패킷이 경쟁에서 이길 확률은 동일하다. 보통패킷이 다른 버퍼에 있는 블러킹 패킷과 경쟁하지 않을 확률은 0.5이다. 그러므로  $r_{mn}(k, t)$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$r_{mn}(k, t) = P_0(k, t) + 0.75P_n(k, t) + 0.5P_b(k, t)$$

$r_{nb}(k, t)$ 은 패킷이 다른 버퍼에 있는 블러킹 패킷과 동일한 목적지를 가지며 이로 인해 발생하는 경쟁에서 이길 확률이다. 그러므로 다음과 같이 표시된다.

$$r_{nb}(k, t) = 0.25P_b(k, t)$$

$SE(k-1)$ 에 블러킹 패킷이 존재하면 목적지의 버퍼는 상태  $n$ 이나 상태  $b$ 에 있다. 버퍼가 이전의 시간슬롯에서 패킷을 받았으면 현재는 상태  $n$ 에 있다. 버퍼가 이전의 시간슬롯에서 패킷을 받지 않았으면 현재는 상태  $b$ 에 있다. 그러므로  $P^{ba}(k, t)$ 는 다음과 같

이 표현된다.

$$\begin{aligned} P^{ba}(k, t) &= T(k, t-1) \frac{P_n(k, t) r_n(k, t)}{P_n(k, t)} \\ &\quad + [1 - T(k, t-1)] \frac{P_b(k, t) r_b(k, t)}{P_b(k, t)} \\ &= T(k, t-1) r_n(k, t) + [1 - T(k, t-1)] r_b(k, t) \end{aligned}$$

$P^{na}(k, t)$ 는 목적지의 버퍼가 어느 상태에도 있을 수 있다. 그러나 그 버퍼가 이전의 시간슬롯에서 패킷을 받았으면 현재는 상태  $n$ 에 있게 된다. 받지 않았다면 상태  $n$ 에 있을 수 없다. 그러므로  $P^{na}(k, t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} P^{na}(k, t) &= T(k, t-1) \frac{P_n(k, t) r_n(k, t)}{P_n(k, t)} \\ &\quad + [1 - T(k, t-1)] \frac{P_0(k, t) + P_b(k, t) r_b(k, t)}{P_0(k, t) + P_b(k, t)} \end{aligned}$$

패킷이 다음 단으로 이동하기 위해서는 먼저 원하는 출력포트로 갈수 있어야 하고 또한 목적지의 버퍼가 가용해야 한다. 그러므로  $r_n(k, t)$ 는 다음과 같다.

$$r_n(k, t) = r_{nm}(k, t) P^{na}(k+1, t) + r_{nb}(k, t) P^{ba}(k+1, t)$$

$r_{nb}(k, t)$ 는 다른 버퍼가 비어있거나 보통패킷을 가지고 있을 때, 블러킹 패킷이 원하는 출력포트로 갈 수 있는 확률이다. 그러므로 다음과 같이 표시된다.

$$r_{nb}(k, t) = P_0(k, t) + 0.75P_n(k, t)$$

$r_{bb}(k, t)$ 는 두 개 버퍼 모두다 블러킹 패킷을 가지고 있을 경우를 가정한 것이다. 경쟁이 없을 확률은 0.5이고, 경쟁이 있으며 이 경쟁에서 이길 확률은 0.25이다. 그러므로 다음과 같이 표시된다.

$$r_{bb}(k, t) = 0.75P_b(k, t)$$

$SE(k-1)$ 의 두개의 버퍼가 블러킹 되어 있으면  $k$ 단의 대응되는 목적버퍼는 블러킹 상태만 있을 수 있다. 이 경우에는  $P^{bba}(k, t)$ 는 다음과 같다.

$$p^{bba}(k, t) = \frac{P_b(k, t) r_b(k, t)}{P_b(k, t)} = r_b(k, t)$$

결과적으로  $k < n$  일 때  $r_b(k, t)$ 는 다음과 같이 계산되어진다.

$$r_b(k, t) = r_{bn}(k, t) p^{ba}(k+1, t) + r_{bb}(k, t) p^{bba}(k+1, t)$$

SE(k)의 입력포트에서의 수율은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T(k, t) &= P_n(k-1, t) r_n(k-1, t) + P_b(k-1, t) r_b(k-1, t) \\ &\quad (2 \leq k \leq n) \\ &= q(k, t) [P_0(k, t) + P_n(k, t) r_n(k, t) + P_b(k, t) r_b(k, t)] \\ &\quad (1 \leq k \leq n) \end{aligned}$$

그러므로  $(2 \leq k \leq n)$  일 때  $q(k, t)$ 는 다음과 같다.

$$q(k, t) = \frac{T(k, t)}{P_0(k, t) + P_n(k, t) r_n(k, t) + P_b(k, t) r_b(k, t)}$$

처음 단과 마지막 단은 다른 단들과는 다른 조건을 가지고 있으므로 경계조건은 별도로 고려해야 한다.

### 5. 경계조건

처음 단과 마지막 단을 위한 조건은 다음과 같다.

- 1) 처음 단: 처음 단보다 전단은 없으므로  $q(1, t)$ 는 네트워크의 입력단에 주어진 트래픽 부하로 주어져야 한다.
- 2) 마지막 단: 한 SE의 양 버퍼는 블럭된 상태에 있을 수 없으므로  $r_n(n, t)$ 와  $r_b(n, t)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$r_n(n, t) = r_{nn}(n, t) + r_{nb}(n, t)$$

$$r_b(n, t) = r_{bn}(n, t)$$

### 6. 상태식

상태식들은 위에서 얻어진 식들을 이용해서 다음과 같이 구해진다.

### 7. 수율과 전달지연

밴연 네트워크의 정규화 된 수율은 마지막 단의 출력 포트에서의 수율으로 정의된다. 그러므로  $t$  시각에서의 정규화 된 수율은 다음과 같다.

1920

$$T(n, t) = P_n(n, t) r_n(n, t) + P_b(n, t) r_b(n, t)$$

정상상태에서의  $k$ 단에서 발생하는 전달지연시간은 리틀의 식<sup>(19)</sup>을 이용해 계산된다.

$$T(k) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{P_n(k, t) + P_b(k, t)}{T(k)}$$

그러므로 전체 네트워크에서의 전달지연시간은 다음과 같다.

$$D = \sum_{k=1}^n D(k)$$

### 8. 계산순서

다음은 수율과 전달지연시간을 구하기 위한 계산 순서이다.

- 1) 초기조건:  $t=0$  일 때 입력 부하  $q(1, 0)$ 가 규정되며  $(1 \leq k \leq n)$ 일 때  $P_0(k, 0)$ 는 1로 주어진다. 모든 다른 변수들의 초기값은 0으로 주어진다.
- 2)  $t=t+1$
- 3)  $P_n(k, t)$ ,  $P_b(k, t)$  및  $P_0(k, t)$ 가  $(1 \leq k \leq n)$  때 구해진다.
- 4)  $r_{nn}(k, t)$ ,  $r_{nb}(k, t)$ ,  $r_{bn}(k, t)$ , 및  $r_{bb}(k, t)$ 가  $(1 \leq k \leq n)$  때 구해진다.
- 5)  $r_n(k, t)$  및  $r_b(k, t)$  그리고  $p^{na}(k, t)$ ,  $p^{ba}(k, t)$ ,  $p^{bba}(k, t)$ 를 마지막 단으로부터 리커시브하게 계산한다. 각 단에서  $r_n(k, t)$ 와  $r_b(k, t)$ 는  $p^{na}(k, t)$ ,  $p^{ba}(k, t)$ ,  $p^{bba}(k, t)$ 보다 먼저 계산된다.
- 6)  $T(k, t)$ 와  $q(k, t)$ 가  $(2 \leq k \leq n)$ 에서 구해진다.
- 7) 수율과 전달지연시간이 계산된다.
- 8) 2단계부터 7단계까지를 반복하여 수율과 전달지연시간의 정상상태 값을 구한다.

## IV. 복수 버퍼 모델

### 1. 가 정

복수버퍼를 가진 밴연 네트워크에서는 각 교환소자의 각 입력포트에 유한개의 크기를 가진 버퍼가 존재한다. [13]에서의 정의와 마찬가지로 버퍼모듈은 한 입력포트에 있는 버퍼전체를 그리고 버퍼는 버퍼모듈의 각 공간을 의미하는 것으로 정의한다. 다음 두 조건 중 한개가 만족되면 패킷은 다음 단으로 이동할 수 있다. 첫째조건은 다음 단에 최소 한 개의 빈 버퍼





$$SP_b(k, t) = \sum_{i=1}^m P_{b_i}(k, t)$$

$r_{nm}(k, t)$ 와  $r_{nb}(k, t)$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} r_{nm}(k, t) &= P_0(k, t) + 0.75SP_n(k, t) + 0.5SP_b(k, t) \\ r_{nb}(k, t) &= 0.25SP_b(k, t) \end{aligned}$$

버퍼모듈이 다 차있지 않을 확률 ( $P(k, t)$ )은 다음과 같다.

$$P(k, t) = 1 - P_{nm}(k, t) - P_{bm}(k, t)$$

패킷의 버퍼모듈이 상태  $b_i$ 에 있다면 목적지의 버퍼 모듈은 상태  $n_i$ 나  $b_i$ 에 있어야 한다. 이 상황을 더 자세히 고려해보면 이전의 시간슬롯에서 패킷을 받았다면 그 버퍼모듈은 상태  $n_i(k, t)$  ( $1 \leq i \leq m$ )나  $b_i(k, t)$  ( $2 \leq i \leq m$ )에 있게 된다. 패킷을 받지 않았다면 상태  $b_m$ 에 있게 된다. 그러므로  $P^{ba}(k, t)$ 는 다음과 같다.

$$P^{ba}(k, t) = T(k, t-1) \times A + [1 - T(k, t-1)]$$

$$\frac{P_{bm}(k, t) r_b(k, t)}{P_{bm}(k, t)}$$

여기에서  $A$ 는 아래와 같다.

$A =$

$$\frac{\sum_{i=1}^{m-1} P_{n_i}(k, t) + \sum_{i=1}^{m-1} P_{b_i}(k, t) + P_{nm}(k, t) r_n(k, t) + P_{bm}(k, t) r_b(k, t)}{1 - P_0(k, t) - P_{b_1}(k, t)}$$

$P^{na}(k, t)$ 도 같은 방법으로 얻어진다.

$$P^{na}(k, t) = T(k, t-1) \times A + [1 - T(k, t-1)] \times B$$

여기에서  $B$ 는 아래와 같다.

$B =$

$$\frac{P_0(k, t) + \sum_{i=1}^{m-1} P_{n_i}(k, t) + \sum_{i=1}^{m-1} P_{b_i}(k, t) + P_{bm}(k, t) r_b(k, t)}{1 - P_{nm}(k, t)}$$

$r_n(k, t)$ 의 식은 단일버퍼 모델에서와 동일하다.  $r_{bm}(k, t)$ 와  $r_{bb}(k, t)$ 는  $SP_b(k, t)$ 와  $SP_n(k, t)$ 를 이용하여 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} r_{bm}(k, t) &= P_0(k, t) + 0.75SP_n(k, t) \\ r_{bb}(k, t) &= 0.75SP_b(k, t) \end{aligned}$$

$P^{bba}(k, t)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P^{bba}(k, t) &= \frac{P_{bm}(k, t) r_b(k, t)}{P_{bm}(k, t)} \\ &= r_b(k, t) \end{aligned}$$

$r_b(k, t)$ 는 단일버퍼 모델에서와 동일하다.  $T(k, t)$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} T(k, t) &= SP_n(k-1, t) r_n(k-1, t) + SP_b(k-1, t) r_b(k-1, t) \\ &\quad (2 \leq k \leq n) \\ &= q(k, t) [P(k, t) + P_{nm}(k, t) r_n(k, t) + P_{bm}(k, t) r_b(k, t)] \\ &\quad (1 \leq k \leq n) \end{aligned}$$

$q(k, t)$  ( $2 \leq k \leq n$ )는 다음과 같이 구해진다.

$$q(k, t) = \frac{T(k, t)}{P(k, t) + P_{nm}(k, t) r_n(k, t) + P_{bm}(k, t) r_b(k, t)}$$

## 5. 경계조건

경계조건은 변하지 않는다.

## 6. 상태식

$$P_0(k, t+1) = [1 - q(k, t)] [P_0(k, t) + r_n(k, t) P_{n_1}(k, t) + r_b(k, t) P_{b_1}(k, t)]$$

$$\begin{aligned} P_{n_1}(k, t+1) &= q(k, t) P_0(k, t) + q(k, t) r_n(k, t) P_{n_1}(k, t) \\ &\quad + q(k, t) r_b(k, t) P_{b_1}(k, t) \\ &\quad + [1 - q(k, t)] [r_n(k, t) P_{n_2}(k, t) \\ &\quad + r_b(k, t) P_{b_2}(k, t)] \end{aligned}$$

$$P_{b_1}(k, t+1) = [1 - q(k, t)] [(1 - r_n(k, t)) P_{n_1}(k, t) + (1 - r_b(k, t)) P_{b_1}(k, t)]$$

다음 식들은 ( $2 \leq i \leq m-1$ )일 때 성립한다.

$$P_m(k, t+1) = q(k, t)r_n(k, t)P_m(k, t) + q(k, t)r_b(k, t)P_{bi}(k, t) + (1-q(k, t))[r_n(k, t)P_{n(i+1)}(k, t) + r_b(k, t)P_{b(i+1)}(k, t)]$$

$$P_{bi}(k, t+1) = (1-q(k, t))[(1-r_n(k, t))P_m(k, t) + (1-r_b(k, t))P_{bi}(k, t)] + q(k, t)[(1-r_n(k, t))P_{n(i-1)}(k, t) + (1-r_b(k, t))P_{b(i-1)}(k, t)]$$

버퍼모듈이 다 차 있을 때는 다음식들이 성립한다.

$$P_{nm}(k, t+1) = q(k, t)r_n(k, t)P_{nm}(k, t) + q(k, t)r_b(k, t)P_{bm}(k, t)$$

$$P_{bm}(k, t+1) = q(k, t)[(1-r_n(k, t))P_{n(m-1)}(k, t) + (1-r_b(k, t))P_{b(m-1)}(k, t)] + (1-r_n(k, t))P_{nm}(k, t) + (1-r_b(k, t))P_{bm}(k, t)$$

### 7. 수율과 전달지연시간

수율은 다음과 같다.

$$T(n, t) = SP_n(n, t)r_n(n, t) + SP_b(n, t)r_b(n, t)$$

평균전달지연시간은 이들의 식을 이용하여 다음과 같이 구해진다.

$$D(k) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^m i [P_{ni}(k, t) + P_{bi}(k, t)]}{T(k, t)}$$

## V. 결 과

본 논문에서 구해진 모델의 정확성을 입증하기 위하여 네트워크의 수율과 전달 지연값을 시뮬레이션에서 얻어진 값과 비교하였다. YLL 모델과 TRH 모델도 구해진 모델의 정확성을 입증하기 위하여 같이 비교되었다. 시뮬레이션에서는 95%의 신뢰도 구간을 사용하였다. 시뮬레이션을 위하여 다음과 같은 방법이 사용되었다.

- ⊙ 각 입력포트는 시간슬롯마다  $q(1)$ 의 율로 패킷을 발생시킨다.
- ⊙ 각 패킷의 목적지는 난수 발생기를 이용해 랜덤하게 생성한다.
- ⊙ 교환소자내에 경쟁이 있으면 랜덤하게 해결한다.
- ⊙ 시뮬레이션 기간 동안의 네트워크의 출력포트에서 얻어진 패킷의 총 개수를 입력포트의 개수와 시뮬레이션 시간으로 나누어 정규화된 수율을 구한다.
- ⊙ 네트워크의 출력포트에서 얻어진 패킷들이 사용한 시간을 다 더한 후 이 패킷의 총 개수로 나누어 전달지연시간을 얻는다.

그림 7과 8은 본 논문에서의 모델로 부터 구해진 수율과 전달지연시간을 나타낸다. 여섯 단으로 구성 되어 있으며 단일버퍼를 가진 네트워크에서 트래픽 부하가 0에서부터 1까지 증가할 때의 조건이며 YLL, TRH 그리고 시뮬레이션 결과도 같이 비교되었다. 이 그림은 구해진 모델이 YLL 모델보다 어느 트래픽 부하에서든 더 정확하다는 것을 보여준다. 구해진 모델의 수율과 전달지연시간은 시뮬레이션 결과에 항상 가깝게 나타난다. 특히 트래픽 부하가 작을 때 더 정확한 결과를 나타내고 있다. 구해진 모델이 YLL 모델보다 더 정확한 이유는 YLL 모델은 블럭된 상태를 고려하고 있지 않기 때문이다. 그러므로 트래픽 부하가 커질 때 YLL 모델은 구해진 모델보다 더 부정확한 결과를 나타내게 되는 것이다. TRH 모델은 구해진 모델보다 약간 나은 결과를 나타내나 이 모델은 한 버퍼당 아홉 개의 상태를 사용하는 매우 복잡한 모델인 것이다. 다른 크기의 네트워크에서도 동일한 결과를 보여준다.

YLL 모델에서는 다음 단의 가용도는 항상  $P_0 + P_n$ ,  $r_n$ 으로 가정된다. 그러나 가용도는 어떤 상황에서는  $P_0$ 를 포함하지 않는다.  $SE(k)$ 의 버퍼에 블럭된 패킷이 있고 이전의 시간슬롯에서 그 버퍼로 이동한 패킷이 있었다면 그 버퍼는 현재 상태  $n$ 에 있게 된다. 또한편으로는 이전의 시간슬롯에서 그 버퍼로 이동한 패킷이 없었다면 그 버퍼는 현재 상태  $b$ 에 있게 된다. 이러한 현상은 연속적인 시간슬롯에서 버퍼간의 종속성을 보여준다. 더군다나, 양 버퍼가 블럭화 되어 있다면 다음 단의 목적버퍼는 블럭된 상태에 있게 된

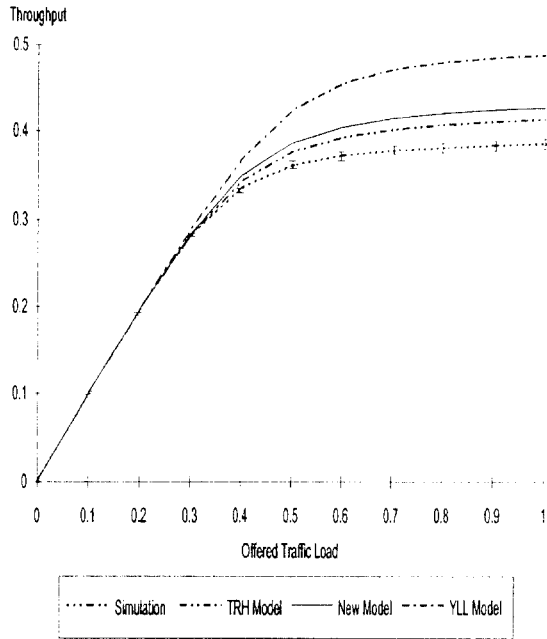


그림 7. 단일 버퍼를 가진 배연 네트워크의 수율  
(네트워크 크기: 64×64, 교환소자 크기: 2×2)

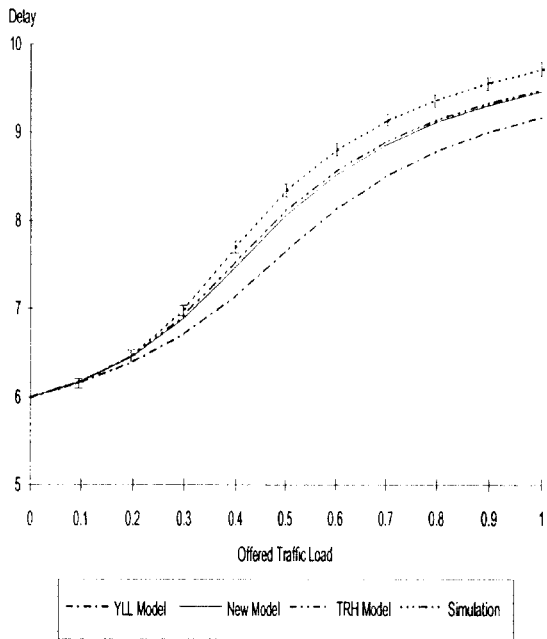


그림 8. 단일 버퍼를 가진 배연 네트워크의 전달지연시간  
(네트워크 크기: 64×64, 교환소자 크기: 2×2)

다. 또한 블럭된 패킷은 원래의 목적지로 다시 전달되어야 한다. YLL모델은 이러한 중요한 현상을 고려하지 않았기 때문에 다음 단의 가용도를 과대 계산하게 되며 따라서 수율도 항상 과대 계산된다. 실제적으로 블리킹 확률은 입력부하가 클수록 커지게 되며 높은 부하에서는 많은 패킷이 처음 단에서부터 블리킹화 되게 된다. 전달지연시간의 비교도 수율과 유사한 결과를 나타낸다. YLL모델은 위에서 설명한 현상을 고려하고 있지 않기 때문에 전달지연시간을 항상 작게 계산하게 된다.

본 논문에서 제시된 모델의 정확성을 보이기 위하여 네트워크의 수율과 전달지연시간을 단일버퍼모델에서와 같은 방법으로 비교하였다. 시뮬레이션에 추가된 가정은 버퍼가 선입선출 방식으로 동작한다는 것이다. 복수버퍼를 가진 배연 네트워크에서는 버퍼크기가 3보다 큰 경우는 유용하지 않다고 간주되며<sup>(12,14)</sup> 대부분의 응용에 있어서 버퍼의 크기는 최대 3으로 권고된다. 따라서 버퍼크기가 2와 3일 때 복수버퍼 모델의 성능이 조사되었다. 그림 9는 본 논문에서 구해진 모델, YLL 모델 그리고 시뮬레이션에서 얻어진 수율을 보여주고 있다.

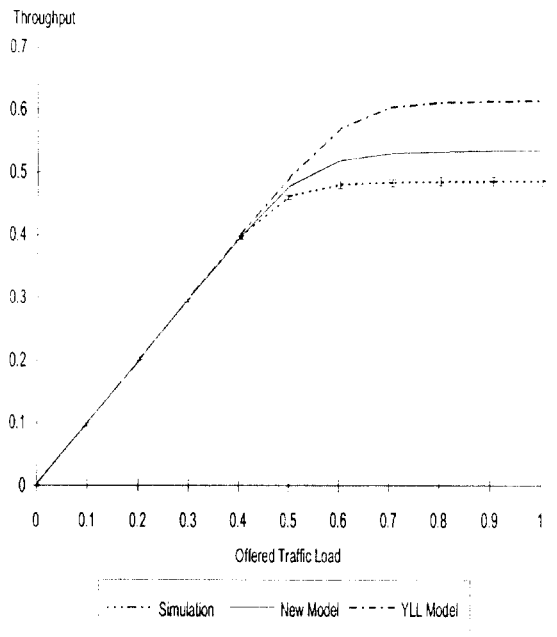


그림 9. 2개 버퍼를 가진 배연 네트워크의 수율  
(네트워크 크기: 64×64, 교환소자 크기: 2×2)

이 경우 여섯 개의 단으로 구성되었으며 2개의 버퍼를 가진 밴연 네트워크에서 구해졌으며 트래픽 부하는 0에서부터 1까지 변화시켰다. 전달지연시간은 그림 10에 나타나 있다. 본 논문에서 구해진 모델은 예상했던 대로 YLL모델보다 좋은 결과를 나타내고 있다. 그림 11과 12는 여섯 개의 단으로 구성되고 3개의 버퍼를 가진 밴연 네트워크에서의 수율과 전달지연시간을 보여주고 있다. 이 그림은 본 논문에서 제시된 모델이 여러 경우에도 정확하다는 것을 보여주고 있다. 수율에 대한 버퍼모듈의 크기의 영향은 그림 13에 나타나 있다. 여기서 트래픽 부하는 1이 사용되었다. 포화 현상은 어느 정도 큰 크기의 버퍼를 가진 밴연 네트워크에서는 심각한 것으로 알려져 있다<sup>(12,14)</sup>. 어느 크기 이상으로 버퍼의 크기를 증가시키는 것은 추가적으로 얻어지는 수율이 작기 때문에 실용적이지 아니다. 결론적으로 본 논문에서 구해진 모델은 YLL 모델보다 어떤 크기의 네트워크 크기 및 버퍼크기 그리고 트래픽 부하에서도 정확하므로 실용적 크기의 밴연 네트워크의 성능에 대한 정확한 척도를 제공하고 있다.

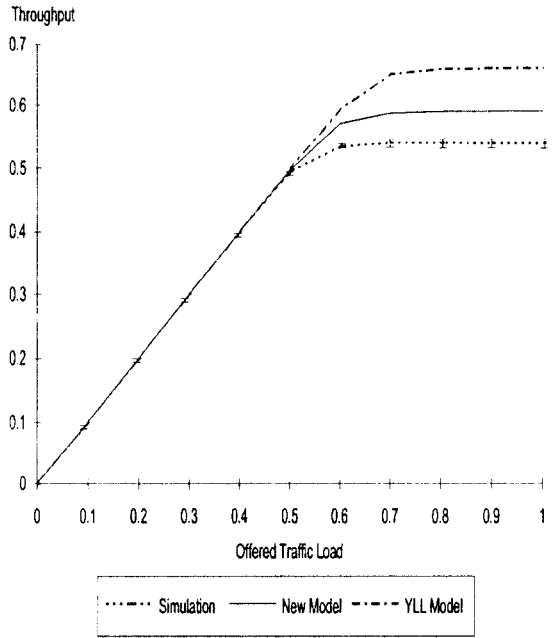


그림 11. 3개 버퍼를 가진 밴연 네트워크의 수율  
(네트워크 크기: 64×64, 교환소자 크기: 2×2)

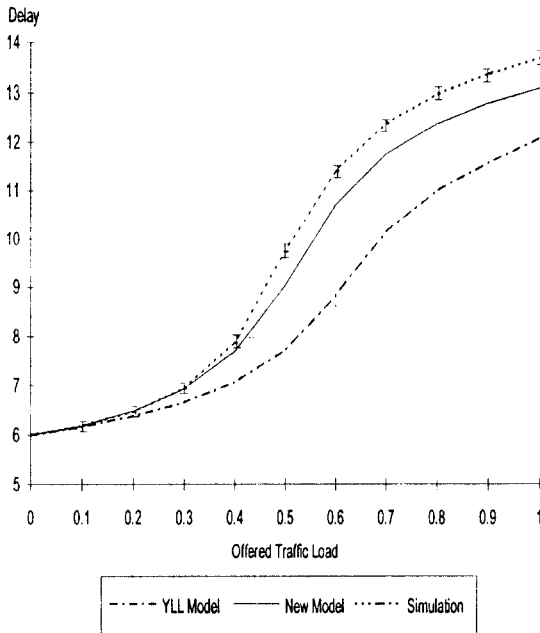


그림 10. 2개 버퍼를 가진 밴연 네트워크의 전달지연시간  
(네트워크 크기: 64×64, 교환소자 크기: 2×2)

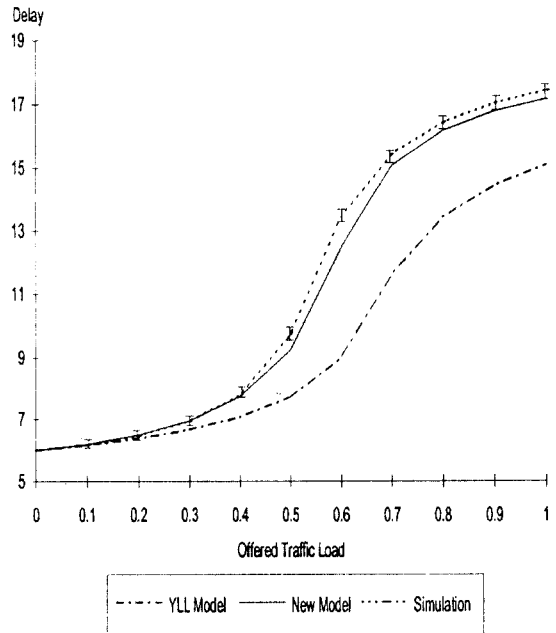


그림 12. 3개 버퍼를 가진 밴연 네트워크의 전달지연시간  
(네트워크 크기: 64×64, 교환소자 크기: 2×2)

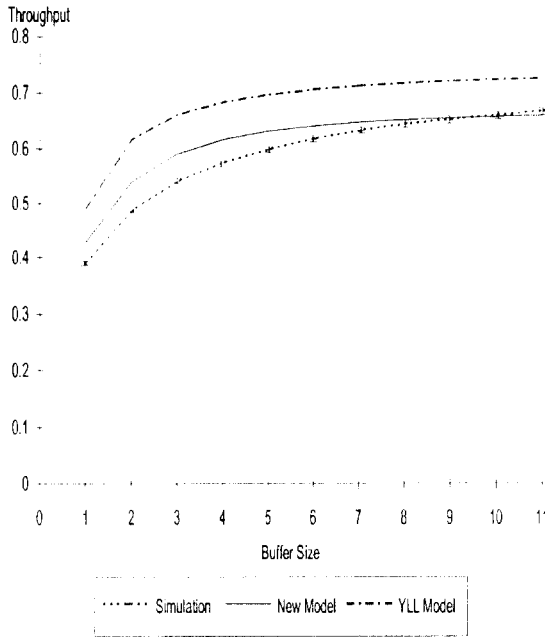


그림 13. 버퍼를 가진 뱀연 네트워크의 수율  
(네트워크 크기: 64×64, 교환소자 크기: 2×2)

### VI. 결 론

유한개의 버퍼를 가진 뱀연 네트워크의 성능을 정확하게 평가할 수 있는 새로운 모델을 제시하였다. 기존의 모델들은 너무 단순해서 부정확하거나 너무 복잡하다는 단점이 있었다. 본 연구에서 제시된 모델은 복잡하지 않으면서도 인접한 단간 그리고 시간슬롯간 연관관계를 효율적으로 도입하여 네트워크의 동작을 사실적으로 묘사하였다. 단일 버퍼뿐만 아니라 복수개의 버퍼가 있을 때도 결과가 매우 정확하게 나타났다. 기존의 모델들 및 시뮬레이션 결과와의 비교에서 볼 때 네트워크의 크기나 버퍼의 크기 그리고 트래픽 크기의 변화에 관계없이 항상 정확한 결과를 보여주었다. 또한 다른 네트워크 구조나 트래픽 조건에 적용하기 위하여 쉽게 변형될 수 있을 것으로 예상된다.

### 참 고 문 헌

1. L.R. Goke and G.J. Lipovski, "Banyan networks

for partitioning multiprocessor systems," First Ann. Symp. Comput. Archit., pp. 21-28, 1973.

2. J.S. Turner, "Design of an integrated services packet network," in Proc. Ninth Data Commun. Symp., ACM Sigcomm. Comput. Commun. Rev., vol. 15, pp. 124-133, Sept. 1985.

3. H.Y. Youn and C. Chevli, "Local hot spot control with bypassing for multistage interconnection networks," Proc. the 1991 Symp. on Applied Computing, pp. 273-282, April 1991.

4. S.L. Scott and G.S. Sohi, "Using feedback to control tree saturation in multistage interconnection networks," Proc. the 16th Annual Int'l Symp. on Computer Archit., pp. 167-176, 1989.

5. Ahmadi, H., and W. Denzel, "A Survey of Modern High-Performance Switching Techniques," IEEE J. on Selected Areas in Communications, Vol. 7, Sept. 1989, pp. 1,091-1,103.

6. Endo, N., et al., "Shared Buffer Memory Switch for an ATM Exchange," IEEE Trans. on Communications, Vol. 41., Jan. 1993, pp. 237-245.

7. T.H. Theimer, E.P. Rathgeb and M.N. Huber, "Performance analysis of buffered banyan networks," IEEE Trans. on Commun. vol. c-39, pp. 269-277, Feb. 1991.

8. J.H. Patel, "Performance of processor-memory interconnections for multiprocessors," IEEE Trans. Comput., vol. C-30, pp. 771-780, Oct. 1981.

9. C.P. Kruskal and M. Snir, "The performance of multistage interconnection networks for multiprocessors," IEEE Trans. Comput., vol. C-32, pp. 1091-1098, Dec. 1983.

10. A. Varma and C.S. Raghavendra, "Performance analysis of a redundant-path interconnection network," Proc. 1985 Int'l Conf. Parallel Processing, pp. 474-479, Aug. 1985.

11. M. Kumar and J.R. Jump, "Performance of unbuffered shuffle-exchange networks," IEEE Trans. Comput., vol. C-35, pp. 573-578, June 1986.

12. D.M. Dias and J.R. Jump, "Analysis and simulation of buffered delta networks," IEEE Trans.

Comput., vol. C-30, pp. 273-282, April 1981.

13. Y.C. Jenq, "Performance analysis of a packet switch based on single-buffered banyan network," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. SAC-3, pp. 1014-1021, Dec. 1983.
14. H.S. Yoon, K.Y. Lee and M.T. Liu, "Performance analysis of multibuffered packet-switching networks in multiprocessor systems," IEEE Trans. Comput., vol. C-39, pp. 319-327, March 1990.
15. S.H. Hsiao and CY.R. Chen, "Performance analysis of single-buffered multistage interconnection networks," Proc. Third IEEE Symp. on Parallel and Distributed Processing, pp. 864-867, Dec. 1991.
16. J. Ding and L.N. Bhuyan, "Performance evaluation of multistage interconnection networks with finite buffers," Proc. 1991 Int. Conf. Parallel Processing, pp. 592-595, 1991.
17. T. Szymanski and S. Shaikh, "Markov chain analysis of packet-switched banyans with arbitrary switch lines, queue lines, link multiplicities and speedups," Proc. IEEE INFOCOM '89, pp. 960-971, April 1989.
18. T. Lin and L. Kleinrock, "Performance analysis of finite-buffered multistage interconnection networks with a general traffic pattern," Proc. 1991 ACM SIGMETRICS Conf., pp. 68-78, May 1991.
19. D. C. Little, "A proof of the queueing formula  $L = \lambda W$ " Operations Res., vol. 9, pp. 383-387, 1961.
20. Y. Mun and H.Y. Youn, "Performance analysis of finite buffered multistage interconnection networks," IEEE Trans. Comput. vol. C-43, pp. 153-162, Feb. 1994.



文 榮 成(Youngsong Mun) 정회원

1960년 1월 27일생

1983년 2월:연세대학교 전자공학과 졸업(학사)

1986년 6월:캐나다 University of Alberta 전기공학과 졸업(석사)

1993년 8월:미국 University of Texas, Arlington 컴퓨터학과 졸업(박사)

1987년 7월~1994년 2월:한국통신 전임연구원

1992년 11월:미국 Supercomputing 학술대회 최우수 학생논문상 수상

1994년 3월~현재:승실대학교 컴퓨터학부 조교수

※주관심분야:다단상호연결네트워크, ATM, 이동 통신