

입력단 버퍼를 갖는 비차단형 ATM 교환기에서의 Large Size Asymptotics

(Large Size Asymptotics for Non-blocking ATM Switches with Input Queueing)

金榮範 *

(Young-Beom Kim)

요 약

비동기 전송방식(ATM)을 이용한 고속 통신망의 실현에 따라 기반망용 교환기의 성능 요구 조건은 매우 까다로워지고 있으며 이러한 교환 시스템의 성능 평가를 위한 시뮬레이션 기법은 엄격한 교환기 성능 요구 조건으로 인하여 막대한 컴퓨터 용량과 계산 시간을 필요로 한다. 이러한 시뮬레이션 기법 사용상의 난점으로 인하여 교환시스템에 대한 해석적 성능평가 기법의 중요성은 매우 커지고 있다. 하나의 교환시스템은 복잡한 형태의 상관관계를 갖는 여러개의 큐로 구성되기 때문에 이러한 다차원 큐잉 시스템에 대한 해석적 성능평가는 또한 일반적인 큐잉 이론을 적용하기 어렵다는 난점이 있어 왔다. 본 논문에서는, 이러한 난점을 피하기 위해 입력단 버퍼형 ATM 스위치의 해석적 성능 평가를 가능케 하는 조건으로써 기존의 많은 연구에서 가정되었던 '교환기용량 증가에 따른 입력단 큐의 HOL셀로 이뤄진 복수개의 가상 큐 상호간의 decoupling 현상'을 수학적 모델을 설정하여 증명하며, 또한 스위치 크기가 무한대로 접근할 때 얻어지는 무한점 큐길이 프로세스로부터 입력단 버퍼형 스위치의 최대 처리율을 해석적인 방법으로 예측하고자 한다.

Abstract

With the advent of high-speed networks, the increasingly stringent performance requirements are being placed on the underlying switching systems. Under these circumstances, simulation methods for evaluating the performance of such a switch requires vast computational cost and accordingly the importance of analytical methods increases. In general, the performance analysis of a switch architecture is also a very difficult task in that the conventional queueing theory can not be easily applied to multidimensional queueing system such as switching systems, which consist of a large number of queues which interact with each other in a fairly complicated manner. To overcome these difficulties, most of the past research results assumed that multiple queues become decoupled as the switch size grows unboundedly large, which enables the conventional queueing theory to be applied.

In this paper, we analyze a non-blocking space-division ATM switch with input queueing, and prove analytically the phenomenon that virtual queues formed by the head-of-line cells become decoupled as the switch size grows unboundedly large. We also establish various properties of the limiting queue size processes so obtained and compute the maximum throughput associated with ATM switches with input queueing.

* 正會員, 建國大學校 電子工學科

接受日字: 1997年11月5日, 수정완료일: 1998年3月27日

(Dept. Electronics Engineering, Kunkuk Univ.)

I. 서 론

전기통신의 모든 분야 특히, 전송 및 광통신 분야에서의 급속한 기술 발전은 광대역 고속통신망의 실현을 가능하게 하였고 또한 이를 위한 여러 가지 기반망용 교환기술이 제시되어 왔다. 이 중에서 특히 공간분할 교환방식은 패킷단위의 간단한 분산처리를 하는 대단위 병렬구조의 switching fabric을 사용함으로써 대용량 교환기 구현을 용이하게 함으로 B-ISDN 구현을 위한 교환기구조로써 상당한 주목을 받아 왔다.

비차단형 공간분할 교환기에서는 유휴상태인 임의의 입력단과 출력단의 상호 연결이 항상 가능하다. 그러나, 서로 다른 입력단에 위치한 한 개 이상의 셀이 동일한 출력단으로 나가고자 할 때 이 셀들간의 output contention은 피할 수 없다. 이러한 즉각적으로 처리할 수 없는 셀들을 저장하기 위한 버퍼가 있어야만 한다. ATM에서는 셀들이 통계적으로 다중화 (Statistical multiplexing)되므로 output contention은 ATM 교환기에서 나타나는 전형적인 현상이다. 한 개의 출력단을 향하는 경쟁상태의 ATM 셀들은 동시에 한 개의 출력단으로 전송될 수 없으므로 이러한 셀들이 유실되지 않도록 하기 위해서는 이를 저장하기 위한 버퍼가 교환기내 어느 위치에 있어야 한다. 이 버퍼의 위치와 switch fabric의 운용 속도에 따라 여러 가지 교환기구조가 가능한 데, 대표적인 것으로는 switch fabric의 전단에 버퍼를 두는 구조를 갖는 입력단 버퍼형 스위치, switch fabric의 출력단에 버퍼를 두는 구조를 갖는 출력단 버퍼형 스위치, 그리고 이의 혼합형인 입력 및 출력단 버퍼형 스위치를 들 수 있다^[3,6,7,8]. 본 논문에서는 이 세가지 형태의 스위치 구조 중, 저속도의 switch fabric 운용으로 인하여 간단한 시스템 구현이 가능한 반면 성능 평가를 위한 큐잉 해석이 가장 난해한 것으로 알려진^[3,6,7,8,11] 입력단 버퍼형 스위치의 큐잉 해석 기법에 관하여 논의하고자 한다. 이 스위치 구조에 대한 보다 구체적인 기술을 위해 각각 K개의 입력 포트와 출력포트를 갖는 비차단형 switch fabric의 경우를 살펴보기로 한다.

하나의 셀이 switch fabric을 통과할 때 소요되는 시간을 한 슬롯이라 정의하고 시간축을 이 슬롯단위로 분할하면, switch fabric이 슬롯단위에 맞추어 동기적으로 운용된다고 볼 수 있다. 매 슬롯의 시작점에서 switch controller는 동일한 출력포트 주소를 갖는 경

쟁상태의 셀중에서 하나의 셀을 랜덤하게 선택, 전송함으로써 output contention을 중재하게 된다. Switch fabric을 거쳐 전송되도록 선택된 입력단 큐의 가장 전단에 위치한 셀(head-of-lines 셀 또는 HOL 셀)은 해당 버퍼로부터 제거되어 switch fabric을 통해 즉각적으로 전송이 시작되어 그 슬롯의 종료점에서 전송이 완료된다. 이와 동시에 그 슬롯동안 시스템으로 유입된 새로운 셀들은 해당 입력포트에 위치한 버퍼에 저장된다. 이러한 과정은 매 슬롯마다 반복된다.

일반적으로 ATM 망과 같은 고속 통신망에서 사용되는 기반망용 교환기의 성능 요구 조건은 매우 엄격하며 이러한 교환 시스템의 성능 평가를 위한 시뮬레이션 기법은 엄격한 교환기 성능 요구 조건으로 인하여 막대한 컴퓨터 용량과 계산 시간을 필요로 한다. 예를 들어서 하나의 교환기가 ATM 망에서 요구하고 있는 최대 셀 손실률 10^{-9} 은 매우 작은 수이기 때문에 이를 만족하는 지를 시뮬레이션을 통해 평가하기란 대단히 어려운 일이다. 이러한 시뮬레이션 기법 사용상의 난점으로 인하여 교환시스템에 대한 해석적 성능 평가 기법의 중요성은 매우 커지고 있다.

그러나 일반적인 큐잉 이론은 일차원 큐잉 시스템에 대해서만 유용하기 때문에 교환 시스템과 같이 복잡한 형태의 상관관계를 갖는 여러개의 큐로 구성되는 다차원 큐잉 시스템에 대해서는 종래의 큐잉 이론을 적용하기 어렵다는 난점이 있어 왔다. Karol et al. [6,8]은 동일한 출력포트 주소를 갖는 HOL셀로써 형성되는 가상 큐의 개념을 도입하고 입력단 버퍼를 갖는 교환시스템의 근사영역 (Asymptotic regime)에서의 최대처리율 (maximum throughput)을 예측하는 새로운 방법을 사용하였다. 여기에서 근사영역이라 함은 교환기 용량 즉, 입력 및 출력 포트수 K가 무한대로 커질 때를 말하는 것으로서, 이 결과는 근사영역에서 가상 큐들이 상호 decouple이 된다는 가정하에 일반적인 큐잉 이론을 적용함으로써 얻어진다.

본 논문에서는 첫째, 기존의 연구^[3,6,8,11,13,14,15,16]에서 입력단 버퍼형 스위치의 해석적 성능평가를 위해 가정된 입력단 버퍼형 스위치에서의 스위치 크기 증대에 따른 복수개의 큐 상호간의 여러 decoupling 현상 중 '근사영역에서의 가상 큐 상호간의 decoupling 현상'에 대하여 수학적 모델을 제시하고, 이를 해석함으로써 이 가설을 수학적으로 증명한다. 둘째로 스위치

크기가 무한대로 접근할 때 얻어지는 무한점 큐길이 프로세스의 여러 성질을 규명하고 이로부터 입력단 버퍼형 스위치의 최대 처리율을 예측하고자 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다: 다음장은 주어진 시스템의 해석적 모델을 제시하고, III장에서는 근사영역, IV장에서는 근사영역에서 얻어지는 무한점 큐길이 프로세스들의 여러 성질을 논의하고 입력단 버퍼형 스위치의 최대 처리율을 도출한다. 끝으로 V장에서는 본 논문에서 설정된 수학적 모델로부터 얻어진 최대처리율에 대한 결과를 시뮬레이션에 의한 결과와 비교하고 그 물리적 의미를 기술한다.

본문에 앞서, 이 논문에서 사용되는 수식을 설명하기로 한다. 집합 \mathbb{N} 은 음이 아닌 정수들의 집합을 표시하고 R 과 R_+ 는 각각 실수 와 음이 아닌 실수들의 집합을 나타내기로 한다. 스위치 크기 K 는 항상 양수이고 K dimension을 갖는 실수들의 space R^K 의 한 원소 x 의 k 번째 component를 x^k 또는 x_k , $k=1, \dots, K$ 로 표시하고 벡터 x 는 따라서 $x=(x_1, \dots, x_K)$ 또는 $x=(x^1, \dots, x^K)$ 로써 표시할 수 있다. 임의의 랜덤변수 X, Y 에 대해 X, Y 가 동일한 확률분포를 가질 때, X, Y 는 equal in law 관계에 있다고 이를 $X \stackrel{d}{=} Y$ 로써 표시한다. 계수 λ 를 갖는 포아송 분포를 $\mathcal{S}(\lambda)$ 로써 나타내고, 랜덤시퀀스의 weak convergence [1,2]를 \Rightarrow 로써 표시하며 랜덤시퀀스가 공통적으로 갖는 하나의 계수 K 가 무한대로 접근할 때의 랜덤시퀀스의 weak convergence^[1,2]를 \Rightarrow_K 로써 표시한다. 마지막으로 $P[\cdot]$ 은 주어진 사건에 대한 확률, $E[\cdot]$ 은 주어진 랜덤변수에 대한 기대값을 나타내기로 한다.

II. 모델

평가대상인 $K \times K$ switch fabric의 최대처리율을 예측하기 위해서는 시스템이 포화상태 즉, 각 입력포트에서의 셀도착률이 1임을 가정하게 된다. 이 가정하에서는 매 시간슬롯이 시작할 때 마다 모든 입력포트에서 HOL에 도달하고자 하는 셀이 항상 존재한다. 도착한 셀의 출력포트 주소는 랜덤하고 모든 출력포트에 대해 균일분포를 갖는다고 가정한다. 동일한 출력주소를 갖는 HOL셀 상호간의 output contention은 이 셀들중 한 셀을 랜덤하게 선택함으로써 해결한다.

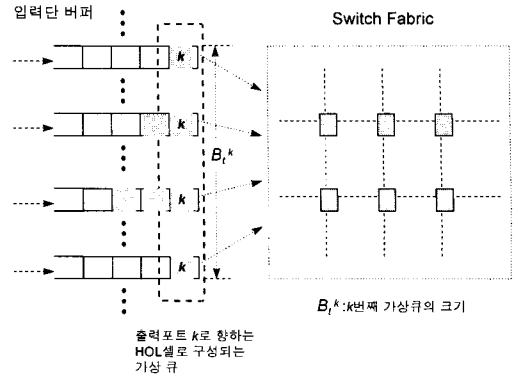


그림 1. 입력단 버퍼를 갖는 switch fabric에서의 가상 큐

Fig. 1. A virtual queue in input queueing switches.

입출력 포트의 개수 K ($K=1, 2, \dots$), 시간슬롯 t ($t=0, 1, \dots$), 그리고 출력포트 k ($k=1, 2, \dots, K$)에 대해 B_i^k 를 슬롯 $[t, t+1)$ 의 시작점에서 출력포트 k 의 주소를 갖는 HOL 셀들의 개수, A_{i+1}^k 은 슬롯 $[t, t+1)$ 동안 k 번째 가상 큐에 새로이 도착하는 셀의 개수를 나타내기로 하자(그림 1 참조). 슬롯 $[t, t+1)$ 의 시작점에서 존재하는 HOL셀들의 총개수 L_i 는 이제

$$L_i = \sum_{k=1}^K B_i^k \tag{1}$$

로써 주어지며 슬롯 $[t, t+1)$ 의 시점에서 입력단 전체 큐에 총 $K-L_i$ 개의 HOL 위치가 비어 있게 된다. 따라서 도합 $K-L_i$ 개의 셀들이 슬롯 $[t, t+1)$ 의 시점에서 새로이 HOL 위치를 차지하게 되고 이 셀들은 K 개의 출력포트중 하나를 출력주소로써 제시하게 된다.

주어진 모델의 정확한 기술을 위해 균일분포를 갖는 상호독립인 랜덤변수들의 집합 $\{U_{i+1}^k, t=0, 1, \dots; k=1, 2, \dots\}$ 을 도입하기로 한다. 이어지는 논의를 통하여 사상 $\varphi(x): x \rightarrow [x]^+, x \in R$ 은 $x > 0$ 일 때 $\varphi(x)=x$, $x \leq 0$ 일 때 $\varphi(x)=0$ 으로 정의하고 사상 $\omega(x): x \rightarrow 1[x]$, $x \in R$ 는 $x > 0$ 일 때 $\varphi(x)=1$, $x \leq 0$ 일 때 $\varphi(x)=0$ 으로 정의하기로 한다. 프로세스 $\{(B_i^1, \dots, B_i^K), t=0, 1, \dots\}$ 의 다이내믹스는 다음의 recursion으로 주어진다:

$$B_0^k = 0, \quad B_{i+1}^k = [B_i^k - 1 + A_{i+1}^k]^+, \quad t=0, 1, \dots \tag{2}$$

이 식에서 A_{i+1}^k 은

$$A_{i+1}^k = \sum_{j=1}^{K-L_i} \mathbf{1} \left[\frac{k-1}{K} \leq U_{i+1}^j < \frac{k}{K} \right], \quad t=0,1,\dots \quad (3)$$

이어지는 장에서의 논의에 필요한 여러 관계식을 도출해 보자. 첫째로,

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^K A_{i+1}^k &= \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{K-L_i} \mathbf{1} \left[\frac{k-1}{K} \leq U_{i+1}^j < \frac{k}{K} \right] \\ &= \sum_{j=1}^{K-L_i} \sum_{k=1}^K \mathbf{1} \left[\frac{k-1}{K} \leq U_{i+1}^j < \frac{k}{K} \right] \\ &= \sum_{j=1}^{K-L_i} 1 = K - L_i. \end{aligned} \quad (4)$$

다음으로, 모든 관련된 랜덤변수는 정수의 값을 가지므로,

$$[B_i^k - 1 + A_{i+1}^k < 0] = [B_i^k = A_{i+1}^k = 0]. \quad (5)$$

따라서,

$$\begin{aligned} B_{i+1}^k &= [B_i^k - 1 + A_{i+1}^k]^+ \\ &= [B_i^k - 1 + A_{i+1}^k] \mathbf{1} [B_i^k - 1 + A_{i+1}^k \geq 0] \\ &= B_i^k - 1 + A_{i+1}^k - [B_i^k - 1 + A_{i+1}^k] \mathbf{1} [B_i^k = A_{i+1}^k = 0] \\ &= B_i^k - 1 + A_{i+1}^k + \mathbf{1} [B_i^k = A_{i+1}^k = 0]. \end{aligned} \quad (6)$$

이 식을 $k=1, \dots, K$ 에 대해 더하면 식(4)-(5)로부터 다음의 결론을 얻는다. 즉,

$$\begin{aligned} L_{i+1} &= L_i - K + \sum_{k=1}^K A_{i+1}^k + \sum_{k=1}^K \mathbf{1} [B_i^k = A_{i+1}^k = 0] \\ &= \sum_{k=1}^K \mathbf{1} [B_i^k = A_{i+1}^k = 0]. \end{aligned} \quad (7)$$

III. 스위치 크기 K가 큰 영역에서의 Asymptotics

이 장에서는 스위치 크기 K가 무한대로 접근할 때 한정된 수의 가상큐들이 근사영역에서 어떠한 성질을 갖게 되는지를 논의한다. 보다 구체적으로, 양의 정수 l에 대해, 가상큐들의 길이를 나타내는 l개의 프로세스 $\{B_i^{K,1}, t=0,1,\dots\}$, $\{B_i^{K,2}, t=0,1,\dots\}$, ..., $\{B_i^{K,l}, t=0,1,\dots\}$ 가 K가 커짐에 따라 상호간에 독립이 됨을 보이고자 한다. 여기에서 이용하는 중요한 사실은 상관 관계를 갖는 각 가상 큐에 대한 도착 프로세스 (Bernoulli 랜덤변수로써 주어짐)가 K가 커짐에

따라 상호 독립인 Poisson 프로세스가 된다는 점이다.

입력단 버퍼형 스위치는 복수개의 큐로 구성되는 다원 큐잉 시스템이기 때문에 직접적인 큐잉 해석이 불가하므로, 이러한 프로세스간의 상호 독립 현상을 이용하면 하나의 큐만을 고려하여 일차원적 큐잉 해석이 가능해진다는 큰 장점이 있다. 이 결과는 Proposition 3.1에 의해 요약되며 이를 증명하기 위해 다음에 기술되는 Lemma 3.1-Lemma 3.5의 사실들을 이용한다.

여기에서의 증명은 수학적 귀납법을 사용한다. 수식 전개 of 명료성을 위해 크기 K를 갖는 시스템에 관련된 모든 랜덤변수에는 위첨자 K를 붙이기로 한다. 어떠한 한정된 가상큐의 집합을 θ 라 하면 주어진 시스템의 대칭성에 의해 양의 정수 $l (l \leq K)$ 에 대해 $\theta = \{1, \dots, l\}$ 로 설정하여도 일반성을 잃지 않는다.

스위치 크기를 고정했을 때, $k=1,2,\dots,K$ 에 대해 랜덤변수 $\{Z_i^{K,k}, t=1,2,\dots\}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$Z_0^{K,k} \equiv \emptyset, \quad Z_{i+1}^{K,k} \equiv (Z_i^{K,k}, B_i^{K,k}, A_{i+1}^{K,k}), \quad t=0,1,\dots \quad (8)$$

그리고

$$Z_i^{K,\theta} \equiv (Z_i^{K,1}, \dots, Z_i^{K,l}), \quad t=0,1,\dots \quad (9)$$

슬롯 t에 대해 그리고 상호독립이고 동일분포를 갖는 (앞으로 이러한 랜덤변수의 성질을 i.i.d.라 부르기로 한다) 무한점 랜덤변수 z_1^t, \dots, z_l^t 에 대해

$$Z_i^{K,\theta} \Rightarrow_K z_i^\theta \equiv (z_1^i, \dots, z_l^i) \quad (10)$$

의 수렴식을 가지면 조건 (θ)가 성립한다고 정의한다. 조건 (θ)이 성립한다면 모든 $s=0,1,\dots,t-1$ 에 대해 수렴식 $B_s^{K,i} \Rightarrow_K b_s^i$ 와 $A_{s+1}^{K,i} \Rightarrow_K a_{s+1}^i$, ($i=1,\dots,l$)도 성립함을 쉽게 알 수 있다. 식 (8)과 의 유사성에 의해

$$z_0^i \equiv 0, \quad z_{s+1}^i \equiv (z_s^i, b_s^i, a_{s+1}^i), \quad s=0,1,\dots,t-1. \quad (11)$$

마지막으로, 슬롯 $t (t=1,2,\dots)$ 와 어떤 상수 λ_i 에 대해,

$$\frac{1}{K} L_{t-1}^K \xrightarrow{P} \lambda_i \quad (\text{as } K \rightarrow \infty) \quad (12)$$

이 성립하면 조건 (A)가 성립한다고 정의하기로 한

다.

식 (12)에서 L_{i-1}^K 는 슬롯 $[t-1, t]$ 의 시작점에서 HOL에 있는 셀의 개수를 나타내며 $K-L_{i-1}^K$ 는 비어 있는 HOL 위치의 개수를 나타내므로 슬롯 $[t-1, t]$ 동안 새로이 HOL에 도착하는 새로운 셀의 개수는 각 입력단에서의 셀 도착률을 1로 가정하였으므로 역시 $K-L_{i-1}^K$ 이다. 이 $K-L_{i-1}^K$ 의 새로이 HOL에 도착하는 새로운 셀들은 랜덤하게 출력 포트를 (각각, 확률 $1/K$ 를 가지고) 선택하게 된다. 따라서 하나의 가상 큐로 새로이 도착하는 셀의 개수는 Binomial $(K-L_{i-1}^K, 1/K)$ 의 분포를 갖게 되며, 다음의 Lemma는 K 가 커질 때 랜덤 변수 $K-\frac{L_{i-1}^K}{K}$ 가 상수가 됨을 보인다.

Lemma 3.1 조건 (θ) 와 (A_i) 이 어떤 슬롯 t 에 대해 성립하면 (A_{t+1}) 도 역시 성립한다.

증명. 첫째, 식 (7)과 랜덤변수들의 exchangeability 성질에 의하여 다음의 식을 얻는다. 즉,

$$\begin{aligned} \text{var}\left[\frac{1}{K}L_i^K\right] &= \text{var}\left[\frac{1}{K}\sum_{i=1}^K 1[B_i^{K,i}=A_i^{K,i}=0]\right] \\ &= \frac{1}{K}\text{var}[1[B_i^{K,i}=A_i^{K,i}=0]] \\ &\quad + \frac{K-1}{K}\text{cov}[1[B_i^{K,i}=A_i^{K,i}=0], 1[B_{i-1}^{K,i}=A_{i-1}^{K,i}=0]]. \end{aligned}$$

조건 (θ) 이 성립하면 랜덤변수 z_i^1 와 z_i^2 이 i.i.d.일 때 수렴식 $(Z_i^{K,1}, Z_i^{K,2}) \Rightarrow_K (z_i^1, z_i^2)$ 이 성립하므로

$$\begin{aligned} \lim_{K \rightarrow \infty} \text{cov}[1[B_{i-1}^{K,1}=A_{i-1}^{K,1}=0], 1[B_{i-1}^{K,2}=A_{i-1}^{K,2}=0]] \\ = \text{cov}[1[b_{i-1}^1=a_{i-1}^1=0], 1[b_{i-1}^2=a_{i-1}^2=0]] = 0. \end{aligned} \tag{13}$$

이 식의 전개에서 Bounded Convergence Theorem을 적용하였다. 이 식으로 부터 $\lim_{K \rightarrow \infty} \text{var}\left[\frac{1}{K}L_i^K\right]=0$ 이 성립하므로 Chebyshev의 부등식에 의해 다음의 결론을 얻는다:

$$\frac{1}{K}L_i^K - E\left[\frac{1}{K}L_i^K\right] \xrightarrow{P} 0 \text{ (as } K \rightarrow \infty). \tag{14}$$

다음으로, exchangeability의 성질을 이용하면,

$$\begin{aligned} E\left[\frac{1}{K}L_i^K\right] &= P[B_{i-1}^{K,1}=0, A_{i-1}^{K,1}=0] \\ &= E\left[\left(1-\frac{1}{K}\right)^{K-L_{i-1}^K} 1[B_{i-1}^{K,1}=0]\right]. \end{aligned} \tag{15}$$

조건 (θ) 은 수렴식 $B_{i-1}^{K,1} \Rightarrow_K b_{i-1}^1$ 을 의미하므로 가정에 의해 수렴식 $\frac{1}{K}L_{i-1}^K \xrightarrow{P} \lambda_i$ 이 성립한다. 이상 두 가지 사실과 [1]의 정리 4.4에 의해 $(\frac{1}{K}L_{i-1}^K, B_{i-1}^{K,1}) \Rightarrow_K (\lambda_i, b_{i-1}^1)$ 이 성립하므로

$$\lim_{K \rightarrow \infty} E\left[\frac{1}{K}L_i^K\right] = e^{-(1-\lambda_i)} P[b_{i-1}^1=0] \equiv \lambda_{i+1} \tag{16}$$

의 관계식을 얻게 되고 (14)와 (16)로 부터 (A_{i+1}) 이 성립한다. □

다음의 Lemma는 랜덤 벡터 $Z_i^{K,1}, \dots, Z_i^{K,l}$ 가 K 가 커질 때 상호 독립이 되면 $Z_i^{K,1}, \dots, Z_i^{K,l}$ 의 함수로써 얻어지는 슬롯 $[t-1, t]$ 의 시작점에서의 큐길이를 나타내는 랜덤변수 $B_i^{K,1}, \dots, B_i^{K,l}$ 를 $Z_i^{K,1}, \dots, Z_i^{K,l}$ 에 대한 랜덤 벡터 $((Z_i^{K,1}, B_i^{K,1}), \dots, (Z_i^{K,l}, B_i^{K,l}))$ 도 또한 K 가 커질 때 상호 독립이 됨을 보인다.

Lemma 3.2 어떤 슬롯 t ($t=1,2,\dots$)에 대해 (θ) 가 성립하면 수렴식

$$((Z_i^{K,1}, B_i^{K,1}), \dots, (Z_i^{K,l}, B_i^{K,l})) \Rightarrow_K ((z_i^1, b_i^1), \dots, (z_i^l, b_i^l)) \tag{17}$$

이 성립한다 (이 식에서 무한점 랜덤변수 $(z_i^1, b_i^1), \dots, (z_i^l, b_i^l)$ 은 i.i.d.이다).

증명. 스위치 크기 K 나 t 에 관계없고 오직 t 에만 의존하는 하나의 사상 $F_i: \mathbb{N}^{2l} \rightarrow \mathbb{N}^{2l+1}$ 에 대해 $(Z_i^{K,i}, B_i^{K,i})$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$\begin{aligned} (Z_i^{K,i}, B_i^{K,i}) &= (Z_i^{K,i}, [B_{i-1}^{K,i}-1+A_i^{K,i}]^+) \\ &= F_i(Z_i^{K,i}), \quad i=1,2,\dots,l. \end{aligned} \tag{18}$$

사상 F_i 는 이산공간에서 정의되므로 자동적으로 continuous하며 따라서 weak convergence의 성질을 보존한다. 따라서 조건 (θ) 은 다음을 의미하게 된다:

$$((Z_i^{K,1}, B_i^{K,1}), \dots, (Z_i^{K,l}, B_i^{K,l})) \Rightarrow_K (F_i(z_i^1), \dots, F_i(z_i^l)). \tag{19}$$

이 식에서 무한점 랜덤변수 $F_i(z_i^1), \dots, F_i(z_i^l)$ 은 명백히 i.i.d.이다 [2]. 기대하는 결론 (17)은 $(z_i^i, b_i^i) = F_i(z_i^i)$, $i=1,2,\dots,l$ 로 놓음으로써 얻게 된다.

Lemma 3.2의 증명과정에서 다음의 새로운 사실을

얻게 된다. 즉,

$$b_i^j =_{st} [b_{i-1}^j - 1 + a_i^j]^+, \quad i=1, \dots, I. \quad (20)$$

다음의 Lemma는 Lemma 3.1-Lemma 3.3의 사실들을 이용하여, I 개의 프로세스 $\{B_i^{K,1}, t=0,1,\dots\}$, $\{B_i^{K,2}, t=0,1,\dots\}, \dots, \{B_i^{K,I}, t=0,1,\dots\}$ 가 K 가 커짐에 따라 상호독립이 됨을 보인다.

Lemma 3.3 조건 (ϑ_t) 와 (A_t) 이 어떤 t ($t=1,2,\dots$)에 대해 성립하면 조건 (ϑ_{t+1}) 도 따라서 성립한다.

증명. 단위구간 $[0,1]$ 상에 u_i 와 z_i , $i=1,\dots,I$ 를 고정하고 유계사상 $\varphi: \mathbb{N}^{2M} \rightarrow \mathbb{R}$ 를 고려해 보자. 필드 \mathbb{F}_i 가 랜덤변수 $\{U_{s,j}^i, j=1,2,\dots; s=1,2,\dots,t\}$ 에 의해 생성되는 σ -field를 표시한다면

$$E\left[\prod_{i=1}^I z_i^{A_i^{K,i}} \mid \mathbb{F}_i\right] = \left(1 - \frac{1}{K} \sum_{i=1}^I (1-z_i)\right)^{K-L_i^K} \quad (21)$$

의 관계식을 얻고 따라서,

$$\begin{aligned} E\left[\varphi(Z_i^{K,t}) \prod_{i=1}^I u_i^{B_i^{K,t}} z_i^{A_i^{K,i}}\right] &= E\left[\varphi(Z_i^{K,t}) \prod_{i=1}^I u_i^{B_i^{K,t}} E\left[\prod_{i=1}^I z_i^{A_i^{K,i}} \mid \mathbb{F}_i\right]\right] \\ &= E\left[\varphi(Z_i^{K,t}) \prod_{i=1}^I u_i^{B_i^{K,t}} \left(1 - \frac{1}{K} \sum_{i=1}^I (1-z_i)\right)^{K-L_i^K}\right]. \end{aligned} \quad (22)$$

Lemma 3.1에 의해 $\frac{1}{K} L_i^K \xrightarrow{P} \lambda_{i+1}$ ($as K \rightarrow \infty$)이 성립하며 또한 조건 (ϑ_t) 는 Lemma 3.2에 의해 (17)을 의미하므로 이 두가지 사실을 종합하면 [1, 정리 4.4, pp.27],

$$\left(\frac{1}{K} L_i^K, (Z_i^{K,1}, B_i^{K,1}), \dots, (Z_i^{K,I}, B_i^{K,I})\right) \Rightarrow_K (\lambda_{i+1}, (z_i^1, b_i^1), \dots, (z_i^I, b_i^I)). \quad (23)$$

Bounded Convergence Theorem을 적용하면 다음의 식을 얻는다. 즉,

$$\begin{aligned} \lim_{K \rightarrow \infty} E\left[\varphi(Z_i^{K,t}) \prod_{i=1}^I u_i^{B_i^{K,t}} z_i^{A_i^{K,i}}\right] &= E\left[\varphi(z_i^t) \prod_{i=1}^I u_i^{b_i^t} \prod_{i=1}^I e^{-(1-\lambda_{i+1})(1-z_i)}\right] \\ &= E\left[\varphi(z_i^t) \prod_{i=1}^I u_i^{b_i^t}\right] e^{-(1-\lambda_{i+1})(1-z_i)} \end{aligned}$$

그리고 이 식에 의해 수렴식 $(Z_{i+1}^{K,1}, \dots, Z_{i+1}^{K,I}) \Rightarrow_K (z_{i+1}^1, \dots, z_{i+1}^I)$ 이 성립한다. 따라서, $(A_{i+1}^{K,1}, \dots, A_{i+1}^{K,I}) \Rightarrow_K (a_{i+1}^1, \dots, a_{i+1}^I)$ 이 성립하고

$$E\left[\varphi(z_i^t) \prod_{i=1}^I u_i^{b_i^t} \prod_{i=1}^I z_i^{a_{i+1}^t}\right] = E\left[\varphi(z_i^t) \prod_{i=1}^I u_i^{b_i^t}\right] \prod_{i=1}^I e^{-(1-\lambda_{i+1})(1-z_i)}. \quad (24)$$

사상 φ 를 $\varphi \equiv 1$ 로 설정하고 또한 $i(i=1, \dots, I)$ 에 대해

$u_i=1$ 로 놓으면,

$$E\left[\prod_{i=1}^I z_i^{a_{i+1}^t}\right] = \prod_{i=1}^I e^{-(1-\lambda_{i+1})(1-z_i)} = \prod_{i=1}^I E\left[z_i^{a_{i+1}^t}\right] \quad (25)$$

그리고 이 식을 식 (24)과 연계시키면

$$E\left[\varphi(z_i^t) \prod_{i=1}^I u_i^{b_i^t} z_i^{a_{i+1}^t}\right] = E\left[\varphi(z_i^t) \prod_{i=1}^I u_i^{b_i^t}\right] E\left[\prod_{i=1}^I z_i^{a_{i+1}^t}\right] \quad (26)$$

의 식을 얻는다. 식 (25)과 (26)로부터 랜덤변수 $a_{i+1}^t, \dots, a_{i+1}^t$ 는 i.i.d.이고 $(z_i^t, b_i^t), \dots, (z_i^t, b_i^t)$ 에 무관함을 알 수 있다. 따라서 조건 (ϑ_{i+1}) 이 성립한다.

다음의 Lemma는 I 개의 랜덤 벡터 $\{B_i^{K,1}, t=0,1,\dots,t\}$, $\{B_i^{K,2}, t=0,1,\dots,t\}$, ..., $\{B_i^{K,I}, t=0,1,\dots,t\}$ 가 K 가 커짐에 따라 상호독립이면 다음 슬롯을 포함한 랜덤벡터 $\{B_i^{K,1}, t=0,1,\dots,t+1\}$, $\{B_i^{K,2}, t=0,1,\dots,t+1\}$, ..., $\{B_i^{K,I}, t=0,1,\dots,t+1\}$ 도 K 가 커짐에 따라 상호독립이 되며, 매 슬롯마다 하나의 가상 큐로 인입되는 셀의 개수는 Poisson 분포를 갖게 됨을 보인다.

Lemma 3.4 조건 (ϑ_t) 와 (A_t) 은 모든 t ($t=1,2,\dots$)에 대해 성립한다.

증명. 증명은 t 에 대한 induction으로 진행된다: 우선, $B_0^{K,i}=0$ 이므로 $L_0^K=0$ 이 성립하고 따라서 (A_t) 은 $t=1$ 에 대해 당연히 성립한다. 시간 t 에 대해 조건 (ϑ_t) 이 성립함을 보이기 위해서는 수렴식 $(A_1^{K,1}, \dots, A_1^{K,I}) \Rightarrow_K (a_1^1, \dots, a_1^I)$ 을 보이면 된다. 이 수렴식에서 랜덤변수 a_1^1, \dots, a_1^I 은 i.i.d.이다. 단위구간 $[0,1]$ 에서 값을 갖는 z_1, \dots, z_I 에 대해,

$$E\left[\prod_{i=1}^I z_i^{A_i^{K,i}}\right] = \left[1 - \frac{1}{K} \sum_{i=1}^I (1-z_i)\right]^K \quad (27)$$

를 갖게 되고 따라서,

$$\lim_{K \rightarrow \infty} E\left[\prod_{i=1}^I z_i^{A_i^{K,i}}\right] = \prod_{i=1}^I e^{-(1-z_i)} \quad (28)$$

이 성립하여 기대하는 결론이 나온다. 마지막으로, induction step은 Lemma 3.1-3.3의 직접적인 결과이다.

Lemma 3.3과 Lemma 3.4의 증명과정으로 부터 다음을 알 수 있다. 즉, 각 $t(t=0,1,\dots)$ 에 대해 i.i.d. 랜덤변수 $a_{i+1}^t, \dots, a_{i+1}^t$ 는 평균 $E[a_{i+1}^t]=1-\lambda_{i+1}$, $i=$

1, ..., I를 갖는 포이송 랜덤변수이다. 이 상수들에 대한 또다른 표현을 얻기 위하여 다음의 Lemma가 필요하다.

Lemma 3.5 모든 t (t=0,1,...)에 대해 랜덤변수 $\{B_i^{K,k}, k=1, 2, \dots, K; K=1, 2, \dots\}$ 은 uniformly integrable하다.

증명. $K(K=1, 2, \dots)$ 와 $t(t=0, 1, \dots)$ 를 고정하면 각각의 $k(k=1, \dots, K)$ 에 대해 부등식

$$A_{i+1}^{K,k} \leq \sum_{j=1}^K 1 \left[\frac{k-1}{K} \leq U_{i+1} < \frac{k}{K} \right] \quad (29)$$

을 갖게 되며 따라서

$$E[|A_{i+1}^{K,k}|^2] \leq \frac{2K-1}{K} \leq 2. \quad (30)$$

부등식 $B_{i+1}^k \leq B_i^k + A_{i+1}^k$ 으로 부터 다음의 식을 얻는다. 즉,

$$E[|B_{i+1}^{K,k}|^2] \leq 2 E[|B_i^{K,k}|^2] + 2 E[|A_{i+1}^{K,k}|^2], \quad t=0, 1, \dots \quad (31)$$

슬롯 t에 관해 induction을 적용하면 $\sup_{k,k} E[|B_i^k|^2] < \infty$ 이 성립하므로, 따라서 uniform integrable하다.

관련 랜덤변수들의 exchangeability를 이용하면 각각의 $t=0, 1, \dots$ 에 대해,

$$E\left[\frac{1}{K} L_i^K\right] = E\left[\frac{1}{K} B_i^{K,1}\right], \quad K=1, 2, \dots \quad (32)$$

따라서

$$\begin{aligned} \lambda_{i+1} &= \lim_{K \rightarrow \infty} E\left[\frac{1}{K} L_i^K\right] \\ &= \lim_{K \rightarrow \infty} E[B_i^{K,1}] = E[b_i]. \end{aligned} \quad (33)$$

이 식 전개의 마지막 단계에서 수렴식 $B_i^{K,1} \Rightarrow_K b_i$ 과 Lemma 3.5의 uniform integrability를 이용하였다.

Lemma 3.4와 식 (20)을 결합하면 다음의 결론을 얻는다: 즉, K가 매우 클 때, K개의 프로세스 $\{B_i^{K,i}, t=0, 1, \dots\}, i=1, \dots, I$ 은 근사적으로 상호독립이 되고, 각각의 프로세스는 Lindley형태의 recursion에 상호독립인 시변 포이송 랜덤변수 시퀀스 (Time varying sequence of Poisson random variables)가 입력으로써 제공되었을 때 생성되는 recursion의 출력 프로세스에 접근하게 된다. 이 사실은 다음의 Proposition으로 요약할 수 있다.

Proposition 3.1 모든 유한집합 $\vartheta = \{1, \dots, I\}$ 그리고 슬롯 $t (t=0, 1, \dots)$ 에 대해 다음의 수렴식이 성립한다.

$$((B_i^{K,i}, A_i^{K,i}), i \in \vartheta, s=0, 1, \dots, t) \Rightarrow_K ((b_i^k, a_{i+1}^k), i \in \vartheta, s=0, 1, \dots, t).$$

이 식에서 무한점 프로세스는 다음의 성질을 갖는다. 프로세스 $\{(b_i^s, a_{i+1}^s), s=0, 1, \dots, t\}, i=1, \dots, I$ 는 상호 독립이고 각각의 $i (i=1, \dots, I)$ 에 대해 랜덤변수 $\{b_i^t, t=0, 1, \dots\}$ 은 다음의 Lindley recursion을 만족한다:

$$b_0^i = 0; \quad b_{i+1}^i = [b_i^i - 1 + a_{i+1}^i]^+, \quad t=0, 1, \dots \quad (34)$$

이 식에서 랜덤변수 $\{a_{i+1}^t, t=0, 1, \dots\}$ 는 모든 $t (t=0, 1, \dots)$ 에 대해 $E[a_{i+1}^t] = 1 - E[b_i^t]$ 를 만족하고 상호독립인 포이송 랜덤변수들이다.

IV. 프로세스 $\{b_i, t=0, 1, \dots\}$ 의 성질

이 장에서는 무한점 recursion (34)을 해석한다. 집합 \mathfrak{N} 에서 값을 갖는 모든 랜덤변수 $b (0 \leq E[b] \leq 1)$ 의 collection을 B로 표시하기로 하자. 논의의 대상인 프로세스 $\{b_i, t=0, 1, \dots\}$ 는 다음의 recursion을 통하여 생성된다:

$$b_0 = b; \quad b_{i+1} = [b_i - 1 + a_{i+1}]^+, \quad t=0, 1, \dots \quad (35)$$

이 식에서 다음의 가정을 한다: (1) 초기조건 b 는 B의 원소이고 (2) 랜덤변수 $\{a_{i+1}, t=0, 1, \dots\}$ 은 $E[a_{i+1}] = 1 - E[b]$ 를 만족하는 상호독립인 포이송 랜덤변수이며, (3) 초기조건 b 와 랜덤변수 $\{a_{i+1}, t=0, 1, \dots\}$ 는 상호독립이다.

Recursion (35)은 입력 시퀀스 $\{a_{i+1}, t=0, 1, \dots\}$ 가 recursion 결과의 statistics로 부터 recursive하게 정해진다는 점에서 GI/GI/1 큐에 대한 일반적인 Lindley recursion과는 다르다.

모든 관련 랜덤변수는 \mathfrak{N} 에서 값을 취하므로

$$[b_i - 1 + a_{i+1} < 0] = [b_i = a_{i+1} = 0]. \quad (36)$$

따라서

$$b_{i+1} = b_i - 1 + a_{i+1} + 1 [b_i = a_{i+1} = 0]. \quad (37)$$

이 관계식은 다음 사실을 말해 준다.

Proposition 4.1 초기조건 b 가 B 의 원소이면 랜덤 변수 b_t 는 모든 $t(t=1,2,\dots)$ 에 대해 역시 B 의 원소이며 다음의 식을 만족한다:

$$E[b_{t+1}] = P[b_t=0]e^{-(1-E[b_t])}. \quad (38)$$

그리고 recursion (35)은 잘 정의되어 있음을 알 수 있다.

증명. 부등식 $0 \leq E[b_t] \leq 1$ 를 만족할 때의 슬롯 t 를 고려하자. 식 (37)의 양변에 기대값을 취하면

$$E[b_{t+1}] = P[b_t = a_{t+1} = 0] = P[b_t = 0] P[a_{t+1} = 0]. \quad (39)$$

관계식 (38)는 랜덤변수 a_{t+1} 의 포아송 성질에 의한 간단한 결과이며 위에 기술된 결과는 induction에 의해 얻을 수 있다.

상호독립인 동일분포를 갖는 랜덤 시퀀스에 의해 활성화되는 Lindley recursion의 경우, 결과적인 랜덤 시퀀스가 어떠한 조건하에서 안정적인 무한점 랜덤변수로 weakly converge하는지에 대해서는 잘 알려져 있으나 위의 recursion에는 적용할 수 없으므로 recursion (35)에 대해서 유사한 수렴결과를 도출해 보기로 한다.

슬롯 t 와 구간 $[0,1]$ 상의 z 에 대해

$$A_{t+1}(z) = E[z^{a_{t+1}}] = e^{-(1-E[b_t])(1-z)} \quad (40)$$

그리고

$$B_t(z) = E[z^{b_t}] \quad (41)$$

로 놓는다. 슬롯 $t(t=0,1,\dots)$ 와 구간 $(0,1)$ 상에 z 를 고정하면, 식 (36)를 이용하여 다음의 식을 얻는다:

$$\begin{aligned} z^{b_{t+1}} &= \mathbf{1}[b_t - 1 + a_{t+1} \geq 0]z^{b_t - 1 + a_{t+1}} + \mathbf{1}[b_t = a_{t+1} = 0] \\ &= z^{b_t - 1 + a_{t+1}} + \mathbf{1}[b_t = a_{t+1} = 0](1 - z^{-1}). \end{aligned} \quad (42)$$

이 식의 양변에 기대값을 취하고 랜덤변수 b_t 와 a_{t+1} 가 상호독립인 점을 이용하면

$$B_{t+1}(z) = z^{-1}B_t(z)A_{t+1}(z) + (1 - z^{-1})P[b_t = 0]P[a_{t+1} = 0]. \quad (43)$$

집합 \mathcal{N} 에서 값을 갖는 B 의 원소 b 는 $b_0 = b$ 일 때 생성된 랜덤변수 $\{b_t, t=0,1,\dots\}$ 가 stationary 시

퀀스가 될 때 즉, 모든 $t(t=0,1,\dots)$ 에 대해 $b_t =_st$ 이면, recursion (35)의 stationary solution 이라 말한다.

Proposition 4.2 Recursion (35)은 집합 B 에서 오직 한 개의 stationary solution를 갖고 이 때의 probability generating function B 는

$$B(z) = \frac{\lambda(1-z)}{e^{-(1-\lambda)(1-z)} - z}, \quad z \in (0,1) \quad (44)$$

로써 주어진다. 이 식에서

$$\lambda = \sqrt{2} - 1 = E[b] \quad (45)$$

증명. 랜덤변수 b 가 B 의 원소이고 a 가 계수 $1 - E[b]$ 를 갖는 포아송 랜덤변수라고 하면, 이 때의 probability generating function A 는

$$A(z) = E[z^a] = e^{-(1-E[b])(1-z)}, \quad z \in [0,1] \quad (46)$$

로써 주어진다.

시간 $t(t=0,1,\dots)$ 와 $(0,1)$ 상에 z 를 고정하자. 랜덤변수 b 가 recursion (35)의 stationary solution이라고 하면 $b_t =_st$ 이고 따라서 $E[b_t] = E[b]$, 그리고 $B_t(z) = B(z)$ 이다. 여기에서 B 는 b 의 probability generating function이다. 이 사실을 식 (43)에 대입하면

$$B(z) = z^{-1}B(z)A(z) + (1 - z^{-1})P[b=0]P[a=0] \quad (47)$$

의 관계식을 얻는다. 재차 정리하면,

$$(1 - z^{-1}A(z))B(z) = (1 - z^{-1})P[b=0]P[a=0] \quad (48)$$

또는 동등한 표현으로써

$$B(z) = \frac{z-1}{z-A(z)} P[b=0]P[a=0]. \quad (49)$$

식 (38)로 부터 $E[b] = P[b=0]P[a=0]$ 이므로, 식 (49)로 부터

$$B(z) = \frac{z-1}{z-A(z)} E[b]. \quad (50)$$

$B(z)$ 를 결정하기 위해서는 $E[b]$ 를 알아야 한다: 먼저 식 (50)의 양변을 z 에 관하여 미분하면

$$\dot{B}(z) = E[b]1 + (z-1)A \frac{(z-A(z))}{(z-A(z))^2} \quad (51)$$

의 관계식을 얻는다. 다음으로 $z \rightarrow 1$ 로 놓고 로피탈의 정리를 두번 적용하면

$$\begin{aligned} E[b] &= \lim_{z \rightarrow 1} B(z) \\ &= E[b] \lim_{z \rightarrow 1} \left(\frac{1 + (z-1)A'(z) - A(z)}{(z-A(z))^2} \right) \quad (52) \\ &= E[b] \frac{A''(1)}{2(1-A'(1))^2}. \end{aligned}$$

따라서 식 (46)로 부터 $A(1) = 1 - E[b]$ 그리고 $A''(1) = (1 - E[b])^2$ 이 됨을 쉽게 알 수 있고 이 수식을 식 (52)에 대입하면 $2E[b]^2 = (1 - E[b])^2$ 의 관계식을 얻는다. 이 이차방정식에 대한 유일한 해는 식 (45)로 주어지며 식 (44)은 식 (50)으로 부터 도출된다.

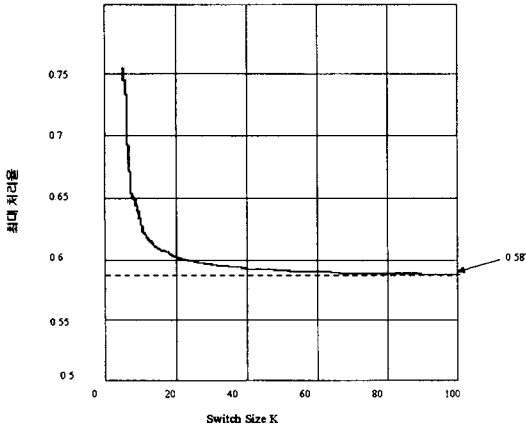


그림 2. 스위치 크기에 따른 최대 처리율의 시뮬레이션에 의한 결과^[6]
 Fig. 2. Maximum throughput vs. switch size^[6] (Simulation results).

V. 시뮬레이션 결과와의 비교 및 결론

4장의 Proposition 4.2에 의해 K가 커지면 정상 상태에서의 HOL 셀의 개수를 K로 나눈 값은 $\lambda = \sqrt{2} - 1$ 이 됨을 보였다. 이 수치의 물리적인 의미는 스위치 크기 K가 비교적 클 때, 정상 상태에서 평균적으로 $K(\sqrt{2} - 1)$ 개의 HOL 셀들이 각 버퍼의 HOL 위치를 점유하여 새로 유입되는 셀들의 경로를 차단하는 효과(throttling effect)를 가져오는 것으로 볼 수 있다(그림 3 참조). 반면에 새로 유입되는 셀은 비어 있는 HOL 위치를 통하여 유입되기 때문에 최대 처리율(maximum throughput)은 $1 - \lambda$, 즉

$2 - \sqrt{2} \approx 0.586$ 이 됨을 의미한다. 그림 2는 최대 처리율을 시뮬레이션에 의해 구한 결과^[6]를 표시하고 있다. K가 약 70 정도가 되면 최대 처리율은 거의 0.586에 접근함을 알 수 있다.

본 논문에서는 첫째로, 입력단 버퍼형 ATM 스위치의 성능 해석을 위하여 기존의 여러 관련 연구논문^[6,8]에서 취하고 있는 가정, 즉, 동일한 출력포트 주소를 갖는 HOL셀로써 형성되는 복수 개의 가상 큐 상호간의 근사영역에서의 decoupling 현상을 수학적 모델을 통하여 증명하였다. 증명된 decoupling 현상은 대개의 경우 ATM 스위치가 갖는 복잡한 다차원 큐잉 모델을 단순화함으로써 스위치 성능 해석을 용이하게 한다. 둘째로, 본 논문에서는 Lindley recursion으로서 기술되는 일반적인 큐잉 프로세스와 전혀 다른 근사영역에서의 시변 포아송 프로세스(Time varying Poisson process)를 해석함으로써, 구현이 간단하나 출력단 버퍼형 스위치에 비해 성능이 저하되는 것으로 알려진 입력단 버퍼형 스위치의 최대 처리율을 도출하였다.

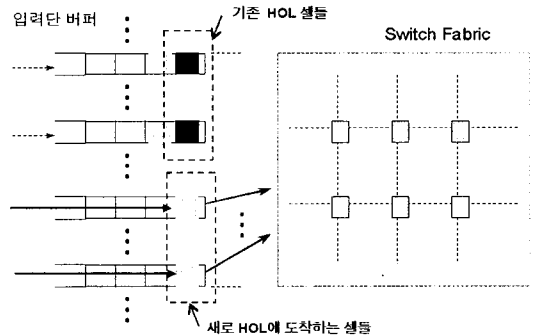


그림 3. 기존의 HOL 셀의 개수 L_r^k 와 최대 처리율의 관계
 Fig. 3. The relationship between number of blocked cells and maximum throughput.

참 고 문 헌

[1] P. Billingsley, *Convergence of probability measures*, J. Wiley & Sons, New York (NY), 1968.
 [2] P. Billingsley, *Probability and Measure*, (Second Edition), J. Wiley & Sons, New York (NY), 1986.
 [3] H. Ahmadi and W. E. Denzel, "A survey of modern high-performance switching

- techniques," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications JSAC-7* (1989), pp.1091-1103.
- [4] L.B. Boguslavsky, A. G. Greenberg, P. Jacquet, C. P. Kruskal, and A. L. Stolyar, "Models of memory interference in multiprocessors, Part II: Asymptotics and limit theorems," *Preprint* (1990).
- [5] K.L. Chung, *A Course in Probability Theory*, (Second Edition), Academic Press, New York (NY), 1974.
- [6] M. Hluchyj and M.J. Karol, "Queueing in high-performance packet switching," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications JSAC-6* (1987), pp.1587-1597.
- [7] J.Y. Hui and E. Arthurs, "A broadband packet switch for integrated transport," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications JSAC-5* (1987), pp. 1264-1273.
- [8] M.J. Karol, M. Hluchyj, and S.P. Morgan, "Input versus output queueing on a space-division packet switch," *IEEE Transactions on Communications COM-35* (1988), pp.1347-1356.
- [9] R.M. Loynes, "The stability of a queue with non-independent inter-arrival and service times," *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* **58** (1962), pp. 497-520.
- [10] D. Stoyan, *Comparison methods for queues and other stochastic models*, English Translation (D.J. Daley, Editor), J. Wiley & Sons, New York (NY), 1984.
- [11] F.A. Tobagi, "Fast packet switch architectures for broadband integrated services digital networks," *Proceedings of IEEE* **8** (1990), pp.133-167.
- [12] J.S.-C. Chen and T.E. Stern, "Throughput analysis, optimal buffer allocation, and traffic imbalance study of a generic nonblocking packet switch," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications JSAC-9* (1991), pp.439-449.
- [13] M.J. Lee and S.-Q. Li, "A study of traffic imbalances in a fast packet switch," *Proceedings of the 1989 Infocom Conference* (1989), pp. 538-547.
- [14] M.J. Lee and S.-Q. Li, "Performance of a nonblocking space-division packet switch in a time variant nonuniform traffic environment," *IEEE Transactions on Communications COM-39* (1991), pp. 1515-1524.
- [15] S.-Q. Li, "Nonuniform traffic analysis on a nonblocking space-division packet switch," *IEEE Transactions on Communications COM-38* (1990), pp. 1085-1096.
- [16] S.-Q. Li, "Performance of nonblocking space-division packet switch with correlated input traffic," *IEEE Transactions on Communications COM-40* (1992), pp. 97-108.

 저 자 소 개

金 榮 範(正會員)

1984년 서울대학교 공과대학 전자공학과 졸업. 1986년 서울대학교 전자공학 석사. 1996년 미국 메릴랜드 주립대학 전자공학 박사. 1986년~1988년 한국통신 품질보증단 전임연구원. 1988년~1989년 과학기술대학 전기전자공학부 전임조교. 1996년~1997년 TelPerion Network Systems, USA. 1997년~현재 건국대학교 공과대학 전자공학과 조교수