

# 멀티캐스트 교환기내 혼합 트래픽의 성능 분석

正會員 金 鍾 權\*

## Blocking Probability of Heterogeneous Traffic in a Multicast Switch

Jong Kwon Kim\*

### 요 약

단일 교환기로 다양한 트래픽 유형을 효율적으로 지원할 수 있는 멀티캐스트 교환기는 광대역 종합망의 성공적인 확산에 필요 불가결한 요소이다. 본 논문에서는 멀티캐스트 교환기에서 이질적 트래픽이 혼합된 환경을 가정하고 회선 에뮬레이션 트래픽의 성능을 분석하였다. 기존의 연구에서, 모든 호가 동일한 fan-out을 갖는 동질 트래픽 환경에서 fan out이 증가함에 따라 호 불통률이 급격히 증가하는 것이 관찰되었다. 본 논문에서는 Fan-out이 서로 다른 호가 혼합된 이질 트래픽 환경에서는 fan-out에 따른 호 불통률 차이가 동질 트래픽 경우보다 오히려 증가하는 결과를 도출하였다. 이 결과는 멀티캐스트 교환기에서 멀티캐스트 호의 성능을 향상시키기 위한 효율적인 자원 할당 알고리즘을 사용해야 한다는 것을 지적하고 있다. 본 논문에서는 멀티캐스트 교환기의 성능을 향상시킬 수 있는 몇가지 방안을 제시하였다.

※주요어 : ATM 스위치, 이질 트래픽, 멀티캐스팅, 호 스케줄링, 자원 할당 방법

### ABSTRACT

A multicast switch, which can provide a single uniform switching function for vastly different classes of traffic, is crucial for the successful deployment of intergrated broadband networks. In this paper, we study the call blocking probability of heterogeneous circuit emulated traffic in a multicast switch. A previous work on the analysis of homogeneous traffic, where all calls have the same fan-out, show the performance showed that the call blocking probability increases rapidly as fan-out increases. We study the performance of heterogeneous traffic, which consists of calls of different fan-out, and show the performance gaps between larger fan-out traffic and smaller fan-out traffic are larger than those of homogeneous traffic. these results indicate the necessity of efficient resource allocation policies to improve the performance of multicast calls. We conclude the paper introducing several methods to improve the performance of multicast traffic.

※ keywords: ATM Switch, Heterogeneous Traffic, Multicasting, Call Scheduling, Resource Allocation

\* 서울대학교 자연과학대학 계산통계학과  
Dept. of Computer Science & Statistics College, of Natural Science, Seoul National University

論文番號 : 94150  
接受日字 : 1994年 6月 11日

## I. 서론

광대역 종합통신망은 트래픽 특성이 매우 다른 여러 가지 서비스를 복합적으로 지원하는 네트워크[1,2]이다. 광대역 종합통신망에서 지원하는 대표적인 서비스로 실시간 통신의 경우 음성전화 서비스와 수요가 폭발적으로 증가할 것으로 기대되고 있는 화상회의, 화상 전화등으로 대표되는 동화상 전송 서비스 [3,4]가 있다. 비실시간 통신 서비스로는 현재 전산망으로 전송되고 있는 컴퓨터간의 데이터전송이 있고 컴퓨터의 파격적인 발전에 힘입어 제공되는 여러 종류의 정보 서비스 및 정지화상 전송 등을 열거할 수 있다.

이렇게 다양한 서비스를 지원해야 하는 광대역 종합통신망을 실현시킬 수 있는 전송방법으로 ATM 전송방법이 대두되고 있다[2]. ATM 방식은 전체 대역을 고정 크기를 갖는 슬롯으로 나누고 대역의 할당을 슬롯 단위로 함으로서 대역 할당을 매우 유연성 있게 할 수 있다. 또 다른 ATM 방식의 특징은 대역의 할당이 미리 되어 있지 않고 요구에 따라 할당되는 동적 대역 할당을 한다는 점인데 이 특징을 잘 이용하면 변동 대역을 갖는 호나 비실시간 데이터 통신을 효율적으로 지원할 수 있다는 장점을 가지고 있다. ATM 방식이 광대역 종합 통신망의 전송 방식으로 대두됨에 따라 ATM 네트워크에 대한 연구와 표준 활동이 매우 활발하게 전개되고 있다. ATM 네트워크에 관한 연구 중에서도 ATM 네트워크 구축에 필수적인 ATM 스위치에 대한 연구가 집중적으로 전개되었다. 이런 연구 활동의 결과 Starlite[5], Three phase batcher banyan[6], Knockout[7] 그리고 중첩 다중 ATM 스위치[8] 등과 같은 ATM 스위치가 고안되었다.

ATM 스위치의 하드웨어에 대한 연구는 위에서 언급한 바와 같이 매우 활발히 전개되었으나 스위치 동작을 제어하는 제어 알고리즘 및 스위치 자원 할당 알고리즘과 같이 스위치의 운영에 대한 연구는 상대적으로 소홀히 취급되어 왔다[9]. 근래에 들어와 ATM 스위치에서의 스케줄링 방법과 성능 평가가 이루어져 왔으나 지금까지의 연구는 ATM 스위치에 특성이 같은 트래픽만이 존재한다는 동질 트래픽 가정을 사용하여 실제 ATM 스위치의 동작 환경을 제대로 반영하지 못하였다[9,10,11].

본 논문에서는 지금까지의 ATM 스위치에 대한 연구 결과 및 활동을 토대로 하여 ATM 네트워크의 실제 동작 환경과 비슷한 환경, 즉 이질적 트래픽이 공존

하는 환경에서의 ATM 스위치의 성능 평가를 하는데 그 목적을 두고 있다. ATM 네트워크는 모든 통신 요구를 한 네트워크에서 만족시키므로 이질성을 지닌 트래픽을 동시에 전송한다. 특성이 다른 트래픽을 스위칭하는 방법은 두 가지가 있는데[2] 첫째 방법은 트래픽의 특성에 따라 전체 트래픽을 다수의 그룹으로 분류하여 각 그룹에 적합한 스위치를 개별적으로 설치하여 운영하는 방법이다. 이 방법에서는 한 스위치가 어떤 특성 그룹에 적합하게 설계되므로 개별적인 최적화를 달성할 수 있으나 전체적으로는 다수의 스위치를 제작, 운영해야 하므로 비용이 증가하여 부적합한 방법이라고 평가되고 있다. 두번째 방법은 단일 스위치로 모든 트래픽을 지원하는 방법이다. 이 방법은 모든 트래픽을 종합 지원하는데 따른 비용상의 이점이 있으나 이질 트래픽 환경하에의 스위치 운영 및 성능에 대한 연구가 되어 있지 않아 바로 현장에 투입할 수 없다는 단점이 있다. 그러므로 복합 목적으로 고안된 ATM 스위치의 보급을 정당화하기 위해서는 실제 환경하에서의 ATM 스위치의 성능과 동작 특성을 고찰해야 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2 장에서는 스위치가 동질 트래픽 환경하에서 작동하는 것을 가정하고 수행한 기존의 연구 결과[9]를 분석하였다. 제 3 장에서는 동질성 트래픽이 아닌 이질성 트래픽이라는 좀더 현실적인 가정하에서 멀티캐스트 교환기의 성능에 대해 연구하였다. 이질 트래픽의 성능 분석 결과 트래픽의 fan out에 따른 성능 차이가 동질 트래픽의 경우보다 더 심화된다는 것을 관찰하였다. 제 5 장에서는 결론 및 향후 연구 방향에 대하여 기술하였다.

## II. 동질 트래픽에 관한 기존 연구 결과

### 2.1 호 스케줄링 조건

본 논문은 유연한 멀티캐스팅 기능이 있는 시간 다중화 교환기(Time Multiplexed Switch)에 이질적인 트래픽이 가해진다고 가정하여 성능 분석을 수행하였다. 멀티캐스트는 교환기는 그림 1과 같이 복사 네트워크와 라우팅 네트워크로 구성된다. 입력 포트에 들어온 셀은 우선 복사 네트워크에 의해 적당한 개수로 복사되며 각 사본은 라우팅 네트워크에 의해 목적지 출력 포트에 스위치된다. 시간 다중화 교환기에서는 각 입출력 포트가 프레임 구조를 가지고 있다. 각 프레임은 C개의 고정 길이 슬롯으로 구성되어 있으며 모든 입출력 프레임은 동기화되어 있다. 스위치에 들어온 회전

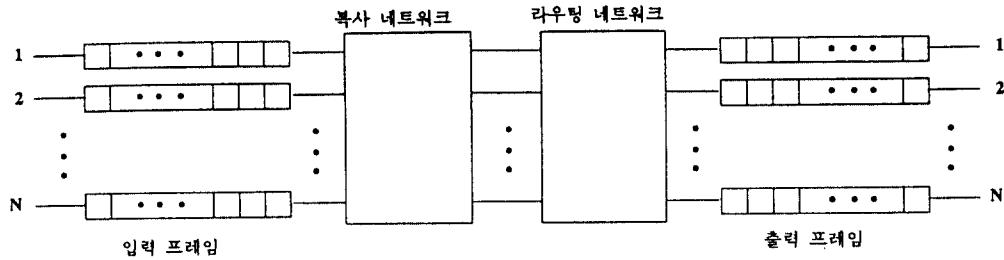


그림 1. 시간 분할 스위치  
Fig. 1. Time multiplexed switch

에뮬레이션(Circuit Emulation) 호는 지정된 입출력 프레임에서 하나의 슬롯을 할당받아 스케줄된다.

Kim & Lee[9]는 시간 다중화 스위치에서 호를 스케줄링할 수 있는 조건을 조사하였다. 그림 1과 같은 다중화 스위치에 가해지는 제공 부하를 트래픽 행렬  $T=[t_{ij}]$ 로 표시하자. 여기에서  $t_{ij}$ 는 입력 포트  $i$ 로부터

출력 포트  $j$ 까지의 트래픽 부하를 프레임당 시간 슬롯의 개수로 나타낸 것이다. 입력 포트  $i$ 로부터  $j$ 개의 출력 포트  $j_1, \dots, j_f$ 까지의 fan-out이  $f$ 인 호 요청은  $i \rightarrow (j_1, j_2, \dots, j_f)$ 와 같이 나타내어진다. 이 호 요청에 대한 용량 제한(Capacity Constraints)은

$$\sum_{k=1}^n t_{ik} < C, \tag{1}$$

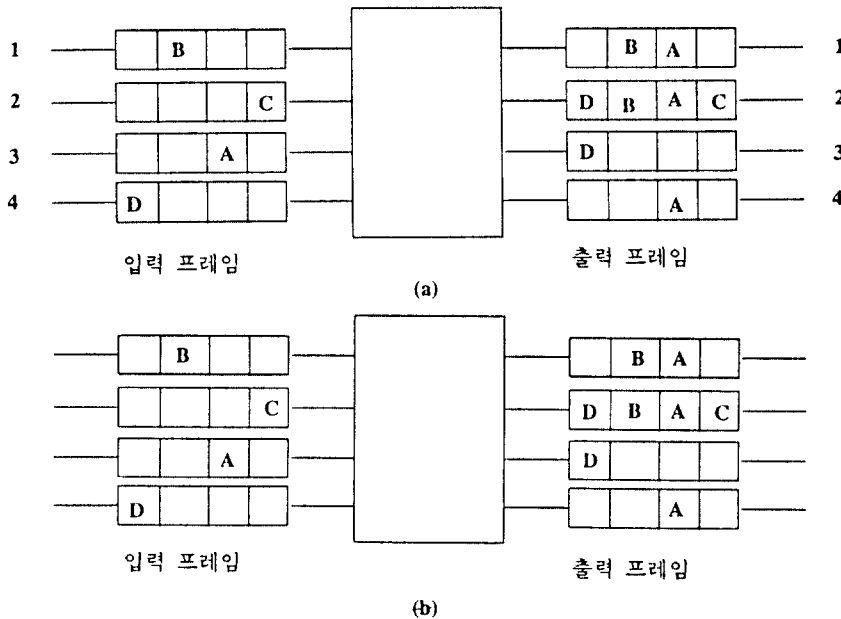


그림 2. 오버플로우 불통(Overflow blocking)과 슬롯 경쟁 불통(Slot contention blocking)

- a) Output 2에서의 overflow로 인한 호 (3→(2,4))의 불통
- b) 슬롯 경쟁으로 인한 호 (2→(1,3))의 불통

Fig. 2. Overflow blocking and slot contention blocking

- a) Blocking of a call (3 → (2, 4)) by frame overflow at output 2
- b) Blocking of a call (2 → (1, 3)) by slot contention

그리고

$$\sum_{k=1}^n t_{kim} < C, m=1, \dots, f \quad (2)$$

이다. 위 용량 제한은 입력 프레임과 모든 요청된 출력 프레임에 적어도 하나의 유휴 슬롯이 존재하는 것을 나타낸다. 오버플로우 불통은 하나 또는 복수개의 관련된 입출력 포트에 유휴 슬롯이 없어서 일어나는 호 불통이다.

용량 제한 조건은 호를 스케줄할 수 있는 충분 조건이 되지 못한다. 왜냐하면 어떤 호를 스케줄하기 위해서는 입력 프레임과 모든 목적지 출력 프레임에 유휴 슬롯이 있을 뿐만 아니라 이 유휴 슬롯들이 같은 슬롯 위치에 있어야 하기 때문이다. 그러나 유휴 슬롯의 위치가 달라도 이미 스케줄된 호가 차지하고 있는 슬롯의 위치를 변동하여 호를 스위칭할 수 있는 데 이런 스위칭을 재구성 비불통 교환기(Rearrangeable Non-Blocking Switch)라고 부른다. 재구성 비불통 스위치는 이미 스케줄된 많은 호를 변경시켜야 하기 때문에 일반적으로 사용되지 않는다.

위에서 언급한 바와 같이 입력 프레임과 모든 출력 프레임에 유휴 슬롯이 있어도 이 유휴 슬롯들이 시간적으로 정확히 일치하지 않으면 슬롯 경쟁으로 인해 멀티캐스트 호가 불통된다. 슬롯 경쟁 불통은 이와 같이 입력과 요청된 출력 프레임들에 유휴 슬롯이 있어도 시간적 위치가 맞지 않아서 일어나는 불통이다. 오버플로우 불통과 슬롯 경쟁 불통의 예가 그림 2에 나와 있다. 그림 2(a)는 입력 포트 3에서 출력포트 2와 4로 가는 호가 출력 포트 2에서의 오버플로우로 인해 불통되는 것을 나타낸다. 그림 2(b)는 슬롯 경쟁으로 인해 입력 포트 2에서 출력 포트 1과 3으로 가는 호가 불통되는 것을 보여주고 있다. 여기에서 각 입력, 출력 프레임에는 오버플로우가 없으나 공통 위치에서의 유휴 슬롯이 없음으로 인해 호가 불통된 것이다.

### 2.2 동질 트래픽의 분석

Kim & Lee[9]는 시간 다중화 스위치에 동질 트래픽이 제공되는 환경을 가정하여 성능을 분석하였다. 본 논문에서는 이질 트래픽이 동질 트래픽과 비교하여 스위치 성능에 어떤 영향을 미치는 가에 대해 연구하는 것이 주 목적이므로 동질 트래픽의 성능 분석 결과를 자세히 고찰하도록 하자. 우선, 스위치의 성능을 분석

하기 위해서는 AND-프레임[9]에 대한 개념을 소개할 필요가 있다.

어떤 프레임의 집합이 있을 때, 슬롯군은 각 프레임에서 같은 시간적 위치를 차지하는 슬롯들의 집합이다. 만일 각 프레임에 C개의 슬롯이 있다면, 그 프레임 집합에 대해 C개의 슬롯군을 정의할 수 있다. 슬롯의 유휴/사용 상태를 부울린 논리의 참/거짓으로 나타내 보자. 슬롯군의 AND-중첩은 원소 슬롯들에 부울린 AND-연산을 함으로써 구해진다. AND 프레임은 주어진 프레임 집합의 각 C 슬롯군에 AND-중첩을 함으로써 만들어지는 크기 C의 논리적 프레임이다. AND 프레임의 예는 그림 3에 나와 있다.

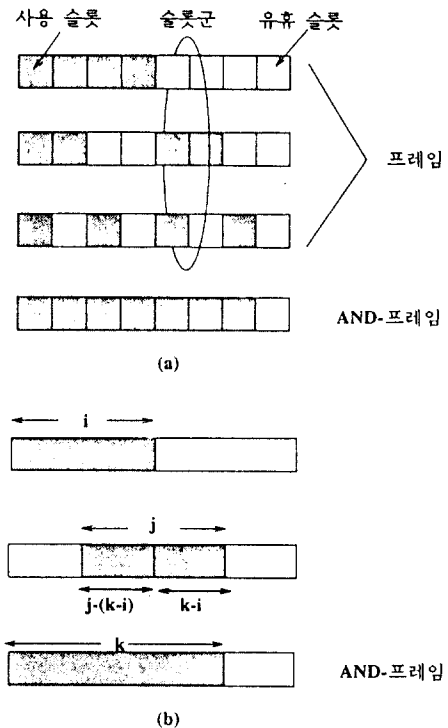


그림 3. AND 프레임의 예

- a) AND 프레임의 구성
- b) AND 프레임의 사용 슬롯의 개수

Fig. 3. An example of the AND frame

- a) Construction of an AND frame
- b) Number of busy slots in an AND frame

주어진 호에 대하여, 그에 해당하는 프레임 집합은 입력 프레임과 목적지로 포함된 모든 출력 프레임이다.

호가 스케줄될 수 있는지 결정하기 위해, 그에 해당하는 프레임 집합의 AND-프레임을 생성한다. AND-프레임의 슬롯은 그에 해당하는 슬롯군의 모든 원소 슬롯들이 유히(참)이면 유히(참)이다. 그러한 슬롯을 공통 유히 슬롯(군)이라 한다. 호는 AND-프레임에 한 개 이상의 공통 유히 슬롯이 있으면 스케줄될 수 있다.

각각  $i$ 와  $j$ 개의 랜덤하게 분포된 사용슬롯을 갖는 크기  $C$ 인 두 프레임이 있을 때( $0 \leq i, j \leq C$ ), 이 두 프레임으로 부터 생성된 AND 프레임에 사용 슬롯이  $k$  개 있으려면 그림 3(b)에 제시된 바와 같이  $j$ 개의 사용 슬롯중  $(j - (k - i))$ 개가  $i$ 개의 사용슬롯과 겹치고  $(k - i)$ 개는 겹치지 않아야한다[9]. 이런 사건이 일어날 조건부 확률은 다음과 같다.

$$\pi(k | i, j) = \begin{cases} \frac{\binom{i}{j-k+i} \cdot \binom{C-i}{k-i}}{\binom{C}{j}} & \text{if } \max(i, j) \leq k \leq \min(i+j, C) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

두 개 이상의 프레임으로부터 생성된 AND-프레임에 존재하는 사용 슬롯의 개수의 확률 분포는 식 (3)을 귀납적으로 적용하여 계산한다.

동질 트래픽 가정하에서 입출력 프레임은 그림 4와 같은 일차원 마코프 과정(Markov Process)으로 모델할 수 있다[9]. 마코프 체인의 상태는 입력이나 출력 프레

임에서 스케줄되어 슬롯을 할당받고 있는 호의 개수로 결정된다.  $C$ 개의 시간 슬롯으로 된 프레임은 최대  $C$ 개의 호를 지원할 수 있으므로 마코프 체인에는 총  $C+1$  상태가 있다.  $f = 1$  (점대점 트래픽)이라면, 입출력 프레임은 대칭적이므로 동일한 마코프 과정으로 모델할 수 있다. 그러나,  $f > 1$ 이면, 호들은 한 개의 입력 프레임에서  $f$ 개의 출력 프레임으로 멀티캐스트되고 한 출력 프레임에는 입력 프레임에 비해  $f$ 배의 사용 슬롯이 존재하게 된다. 그러므로, 멀티캐스트 트래픽인 경우에는 입출력의 마코프 과정이 같지 않다.

Kim & Lee[9]는 AND-프레임의 개념을 도입하여 그림 4의 마코프 체인을 분석하였다. 이들은 스위치가 제공할 수 있는 최소 호 불통 확률과 랜덤 호 스케줄링에 따른 최대 호 불통확률을 구해 이 두 성능 사이의 차이를 조사하였다. 시간 다중화 스위치에서 용량 제한을 만족하지 않는 새 호는 어떤 알고리즘에 의해서도 스케줄될 수 없으므로 오버플로우 불통에 의한 호 불통 확률이 시간 다중화 스위치의 최소 호 불통 확률  $B_k$ 이 된다 랜덤 스케줄링 알고리즘은 멀티캐스트 호를 임의로 선택된 슬롯에 위치시키는 것으로서 가장 간단한 스케줄링 알고리즘이다. 이 랜덤 스케줄링 알고리즘은 가장 간단하고, 좀더 복잡한 알고리즘을 쓰면 이 보다는 성능을 높일 수 있으므로 랜덤 스케줄링 알고리즘의 성능을 불통 확률의 상한  $B_k$ 로 정의하였다 [9].

Kim & Lee[9]는 동질 트래픽 가정에서 fan-out, 프

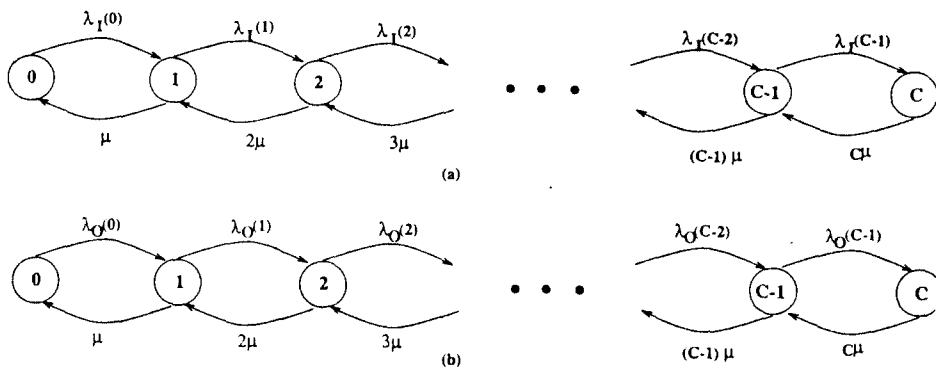


그림 4. 동질 트래픽의 연속 시간 마코프 체인

- a) 입력 프레임
- b) 출력 프레임

Fig. 4. Continuous time Markov chain of homogeneous traffic

- a) Input frame
- b) Output frame

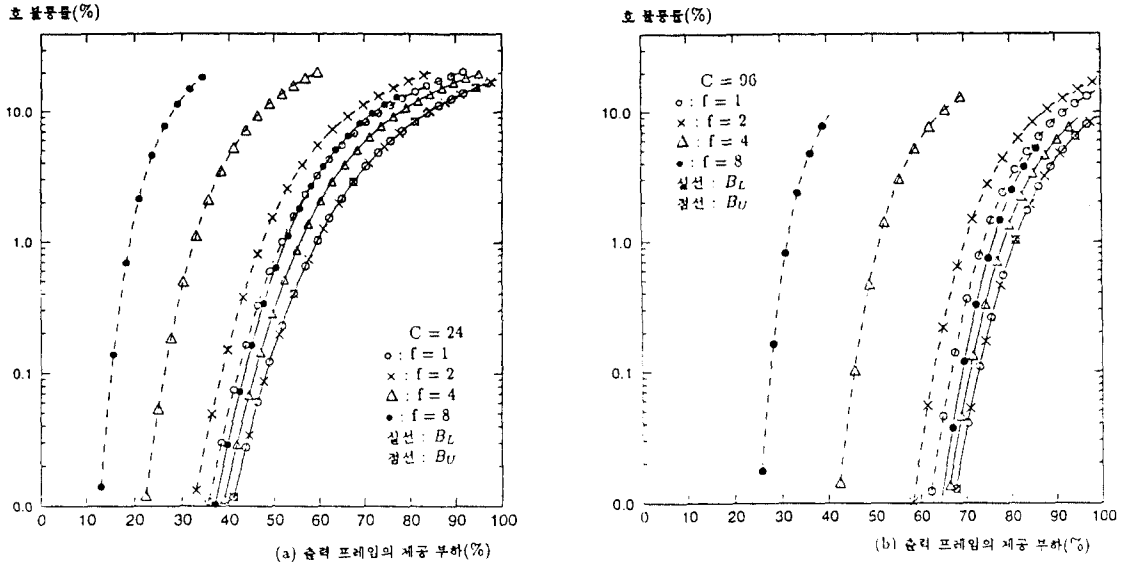


그림 5. 동질 트래픽의 호 불통 확률

Fig 5. Blocking probability of homogeneous traffic

- a) C=24
- b) C=96

리임 크기(C) 그리고 제공 부하를 변동시키면서 최소 호 불통률과 최대 호 불통률을 구하였다. 기존 연구 결과는 그림 5에 나타나 있는데, 여기에서 제공 부하는 출력 프레임에 가해지는 제공 부하를 의미한다. 그림 5에서 최소 불통률과 최대 불통률은 각각 실선과 점선으로 표시되어 있다. 프레임의 크기가 C = 24, C = 96인 두 개의 그래프를 비교하면 프레임이 큰 스위치의 성능이 월등히 좋다는 것을 관찰할 수 있다. 이유는 프레임이 클수록 통계적 다중화 이점(Statistical Multiplexing Gain)이 더욱 뚜렷하게 부각되기 때문이다. 만약 프레임의 크기가 무한대로 증가한다면 제공 부하가 100% 미만인 범위에서 최대 불통률과 최소 불통률 모두 0으로 수렴할 것이다. 그러나, 최대 호 불통률은 최소 호 불통률보다 훨씬 느리게 0으로 수렴하므로 현실적인 프레임 크기 범위안에서는 최대 호 불통률과 최소 호 불통률 사이에 큰 차이가 있을 수 있다.

그림 5에서 최소 호 불통률은 fan out이 증가함에 따라 크게 변화하지 않는 반면 최대 호 불통률은 fan-out의 증가에 따라 매우 빠른 속도로 증가하고 있음을 관찰할 수 있다. 이는 무작위적으로 슬롯이 할당된 여러 개의 프레임을 중첩하면 공통 유휴 슬롯이 남아있을 확률이 빠른 속도로 감소한다는 것을 의미한다.

Fan out 증가에 따른 두 가지 호 불통률이 서로 다른 감도를 가지고 있으므로 Rose와 Hluchyj[11]가 지적한 대로 f = 1인 경우에는 최대 호 불통률과 최소 호 불통률의 차이가 크지 않으나 fan-out이 증가함에 따라 두 가지 호 불통률의 차이가 커지게 된다는 것을 관찰할 수 있다.

Kim & Lee[9]는 fan out 변화에 따른 스위치의 이용률을 분석하기 위해 고정된 호 불통률을 만족시키면서 스위치가 최대로 지원할 수 있는 트래픽의 제공 부하를 도출하였다. 그림 6은 고정된 호 불통률 1%를 유지하면서 최대로 지원할 수 있는 제공 부하를 fan out의 함수로 표시한 것이다. 그림 6에서 fan out이 증가함에 따라 스위치 이용률이 현격하게 저하하는 현상을 관찰할 수 있다. 이 결과에서 랜덤 호 스케줄링 기법을 사용하면 스위치의 이용률이 매우 저조한 상태에서 스위치를 운용해야 한다는 것을 알 수 있다.

### III. 이질 트래픽의 성능

ATM 스위치에서 fan out이 같은 트래픽은 같은 용량의 자원을 스위치로부터 요구할 뿐만 아니라 요구하는 형태도 같다. 따라서 fan out이 같은 트래픽은 같은 호 불통률 기대값을 갖게 되므로 트래픽을 fan out에

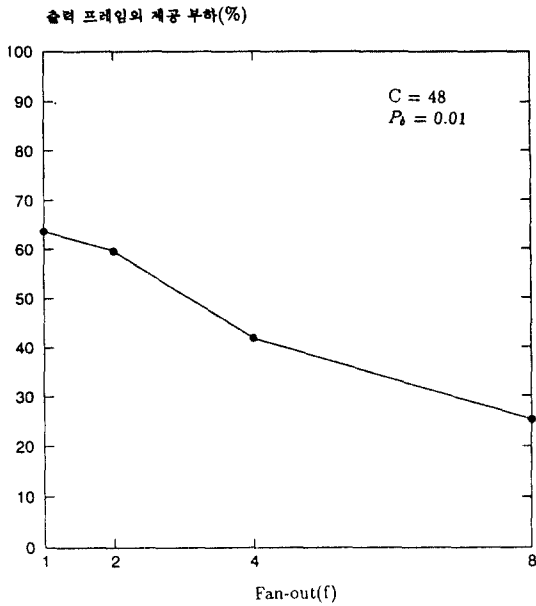


그림 6. 동질 트래픽의 최대 제공 부하 대 fan-out(1% 호 불통률)

Fig. 6. Fan-out vs. maximum homogeneous traffic offered load at 1% blocking probability

따라 분류할 수 있다. 제 3 장에서 다룬 동질 트래픽 가정은 ATM 스위치에 도착하는 모든 호가 같은 fan-out을 가지고 있다고 가정한다. 즉 모든 호의 호 불통률 기대치는 같다고 가정하여 스위치 성능을 분석하였다.

ATM이 지원하는 서비스는 매우 다양하므로 ATM 스위치에 도착한 호가 모두 같은 fan-out을 가지고 있다는 가정은 매우 현실과 거리가 먼 가정이다. 그러므로 본 장에서는 ATM 스위치에 도착한 호가 서로 다른 fan-out을 가지는 이질 트래픽 환경에서 각 트래픽의 호 불통률에 대한 성능 분석을 수행하였다.

분석을 단순화하기 위해, 트래픽과 교환기 운영에 관한 몇 가지 가정을 하기로 한다. 만일 이질성 트래픽이 T개의 트래픽 부류로 구성되어 있다면, 각 입력 프레임에는 각 트래픽 부류에 해당하는 T개의 호 생성기가 있다. 호 생성기는 포와송 과정(Poisson Process)에 따라 호를 생성하고, 호의 도착지들은 N개의 출력 중 임의로 균등하게 선택된다. 모든 호의 지속 시간은 평

균  $1/\mu$ 의 지수분포를 따른다고 가정한다. 새 호가 도착하면, 교환은 적절한 슬롯들을 찾아 임의로 선택된 슬롯을 할당한다(무작위 호 스케줄링). 호들이 임의로 위치한다 해도 호는 같은 시간적 위치를 갖는 슬롯에 스케줄되므로 입출력 프레임간에, 그리고 출력 프레임들간에 상호 의존성이 존재한다. 그러나, 기존의 시뮬레이션 연구 결과[9], 교환기 크기가 평균 트래픽 fan-out보다 훨씬 크면 프레임간의 상호 의존성은 무시될 수 있을 정도로 작다는 것이 증명되었다. 여기에서 교환 크기는 평균 fan-out보다 크다고 가정하였으므로, 이후의 분석에서는 프레임간의 상관 관계는 무시하기로 한다.

위의 가정하에서, 각 입력이나 출력 프레임은 연속 시간 마코프 체인(Markov Chain)으로 모델화할 수 있다. 마코프 체인의 상태는 각 트래픽 부류에 속하는 스케줄된 호의 개수의 합으로 정의된다. 점대점(Point-to-point) 호는 입력 프레임과 출력 프레임에서 같은 개수의 슬롯을 사용하므로 입력 링크와 출력 링크는 같은 마코프 체인으로 모델할 수 있다. 그러나, 멀티캐스트 교환에서는 출력 프레임의 사용 슬롯 개수가 입력 프레임의 f배이다. 한편, 마코프 체인을 분석할 때, 어떤 호는 호 불통으로 인하여 시스템에 실제로 들어갈 수 없으므로 도착률  $\lambda$ 를 그대로 사용할 수 없다. 입력 포트와 출력 포트에 실제 입력되는 유효도착률,  $\lambda_i(\cdot)$ 와  $\lambda_o(\cdot)$ 는 성공적인 호의 도착만을 고려한 값이다. 호는 프레임 오버플로우나 슬롯 경쟁에 의해 불통될 수 있으므로 유효도착률은 불통 확률에 의해 결정되는데, 이 불통 확률은 또 유효도착률에 따라 달라진다. 그러므로 반복적인 수치적 방법을 사용하여 마코프 체인의 불변 상태 확률 분포(Steady State Probability)를 구해야 한다.

Fan out이 다른 이질 트래픽 환경하의 마코프 프로세서를 해석하는데 있어서 fan-out이 다른 호를 구별하여 분석할 필요는 없다. 왜냐하면 호의 fan-out이 다를지라도 호가 요구하는 대역폭은 모두 같으므로 호가 도착하여 ATM 스위치의 용량을 새로 사용할 때나 스케줄된 호가 ATM 스위치에서 떠날 때 마코프의 천이(transition)에 미치는 영향은 호의 fan-out과 관계없이 일정하기 때문이다. 만약 어떤 호의 fan-out이 f라면 이 호는 입력 및 f개의 출력 포트 각각에서 한 개의 슬롯을 사용한다. 그러므로, 어떤 특정한 입력 또는 출력 포트의 입장에서 볼 때 모든 호는 같은 수의 슬롯을 할당받으므로 fan-out에 따라 호를 구별할 필요가 없다.

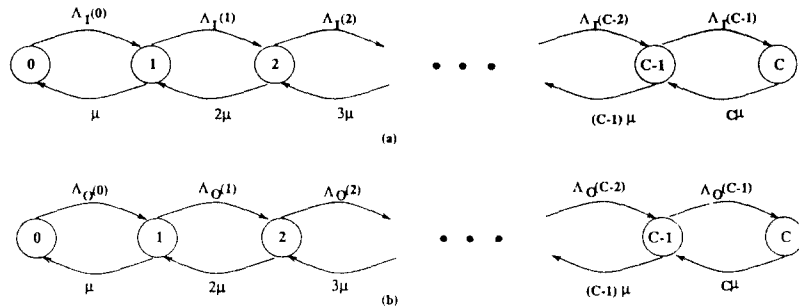


그림 7. 이질 트래픽의 연속 시간 마코프 체인

- a) 입력 프레임
- b) 출력 프레임

Fig. 7. Continuous time Markov chain of heterogeneous traffic

- a) Input frame
- b) Output frame

Fan-out이 다른 호가 어떤 입력 및 출력 포트에 요구하는 자원의 양이 일정하여도 fan out에 따라 자원을 요구하는 출력 포트의 수는 다르므로 각 비균질 트래픽의 호 불통률은 따로 계산하여야 한다. 일반적으로 fan-out이 클수록 더 많은 수의 출력 포트에 자원을 요구하게 되므로 이 요구를 만족시킬 확률이 적어지고 따라서 호 불통률이 커지게 된다. 위와 같은 관찰을 기반으로 하여 각 입력 및 출력 포트를 그림 7과 같은 일차원적 마코프 체인을 이용하여 모델하였다. 그림 7의 마코프 체인에서 각 상태는 그 포트에 스케줄된 호의 수에 의해 결정된다. 여기에서 이질 트래픽은 F개의 트래픽 종류로 구성되어 있다고 가정하였다. 각 입력 및 출력 프레임은 C 개의 슬롯으로 구성되어 있으므로 최대 C 개의 호를 스케줄할 수 있다. 그림 5 1에서  $\Lambda_I(\cdot)$ 와  $\Lambda_O(\cdot)$ 는 각각 어떤 입력 또는 출력 포트에 가해지는 F 개 트래픽의 종류 유효 도착률을 모두 합한 것을 나타낸다.

그림 7의 마코프 체인을 분석하기 위해 입력 포트가 m이라는 상태(즉 m 개의 호가 이미 스케줄되어 있는 상태)에 있을 때 가해지는 트래픽 종류  $\zeta$ 의 유효도착률을 계산하도록 하자. 트래픽  $\zeta$ 의 fan-out은  $f_\zeta$ 이므로 우선  $f_\zeta$  개의 출력 프레임을 AND 프레임으로 중첩했을 때 AND 프레임에 분포하는 사용 슬롯 개수의 분포,  $gr_\zeta(j)$ 를 계산하자. 트래픽  $\zeta$ 의 호는 입력 프레임과  $f_\zeta$ 개의 출력 프레임을 중첩한 AND 프레임이 유효

슬롯을 가지고 있지 않을 때 호의 스케줄링이 거부된다. 트래픽  $\zeta$ 의 도착률이  $\lambda_\zeta$ 라고 가정하면, 상태 m에 있는 입력 프레임에 가해지는 유효 도착률  $\lambda_{L,\zeta}(m)$ 은 다음과 같다.

$$\lambda_{L,\zeta}(m) = \begin{cases} \lambda_\zeta \left( 1 - \sum_{j=0}^{C-m} \pi(C | m, j) \cdot q_{f_\zeta}(j) \right), & 0 \leq m < C, \\ 0, & m = C \end{cases} \quad (4)$$

위 식에서  $gr_\zeta(j)$ 는  $f_\zeta$  개의 출력 프레임을 중첩했을 때 AND 프레임에  $j$ 개의 할당 슬롯이 있을 확률을 나타내며 유효 도착률은 불통된 호를 제외한 것이므로 식 4가 도출된다. 입력 프레임이 상태 m에 있을 때 총 유효 도착률  $\Lambda_I(m)$ 은 모든 트래픽 종류의 유효 도착률을 합한 것이므로 다음과 같이 결정된다.

$$\Lambda_I(M) = \sum_{\zeta}^F \lambda_{L,\zeta}(M), \quad \text{for } m = 0, \dots, C. \quad (5)$$

트래픽  $\zeta$ 가 상태 m에 있는 출력 프레임에 가하는 유효도착률  $\lambda_{O,\zeta}(m)$ 은  $\lambda_{L,\zeta}(m)$ 과 비슷한 방법으로 구해진다. 먼저 호 불통률을 구하기 위해서 상태 m에 있



는 출력 프레임에 포함된  $f_\zeta$ 개의 출력 프레임으로 AND-프레임을 생성할 때 이 프레임에  $j$ 개의 사용슬롯이 있을 확률을 구하고 이 AND-프레임과 입력 프레임을 다시 AND-중첩한 결과에서 유효슬롯이 없는 확률을 도출하여야 한다. 이 때 하나의 호는  $f_\zeta$ 개의 출력 프레임으로 멀티캐스트되므로  $f_\zeta$ 를 곱해야 한다. 결국 상태  $m$ 에 있는 출력 프레임에 가해지는 유효 도착률은 다음과 같이 결정된다.

$$\lambda_{o,\zeta}(m) = \begin{cases} f_\zeta \cdot \lambda_\zeta \left( 1 - \sum_{i=0}^C \sum_{j=m}^C \pi(C | i, j) \right) \\ \cdot g_{f_\zeta}(j | m) \cdot p(i) \text{ , } 0 \leq m < C, \\ 0 \text{ , } m = C \end{cases} \quad (6)$$

$$\lambda_{o,\zeta}(m) = \begin{cases} f_\zeta \cdot \lambda_\zeta \left( 1 - \sum_{i=0}^C \sum_{j=m}^C \pi(C | i, j) \right) \\ \cdot g_{f_\zeta}(j | m) \cdot p(i) \text{ , } 0 \leq m < C, \\ 0 \text{ , } m = C \end{cases}$$

상태  $m$ 인 출력 프레임에 가해지는 총 유효도착률  $\Lambda_o(m)$ 은 다음과 같다.

$$\Lambda_o(M) = \sum_{\zeta=0}^F \lambda_{o,\zeta}(m), \quad (7)$$

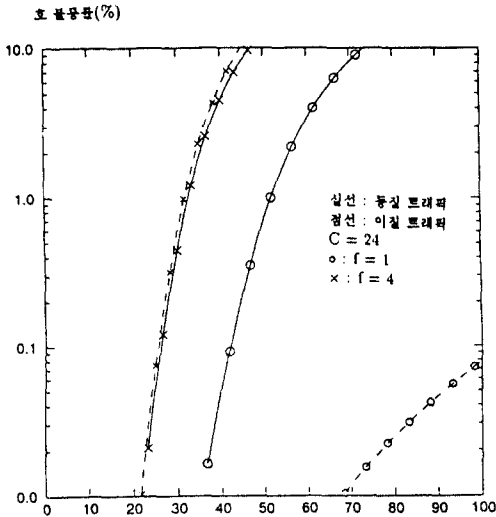
for  $m = 0, \dots, C$ .

트래픽  $\zeta$ 에 속하는 어떤 호가 상태  $m$ 인 입력 프레임에 도착할 경우의 호 불통률  $P_{B,\zeta | I=m}$ 은 입력 프레임과  $f_\zeta$ 개의 출력 프레임에 중첩한 AND-프레임에 유효슬롯이 없을 경우이므로 다음과 같이 결정된다.

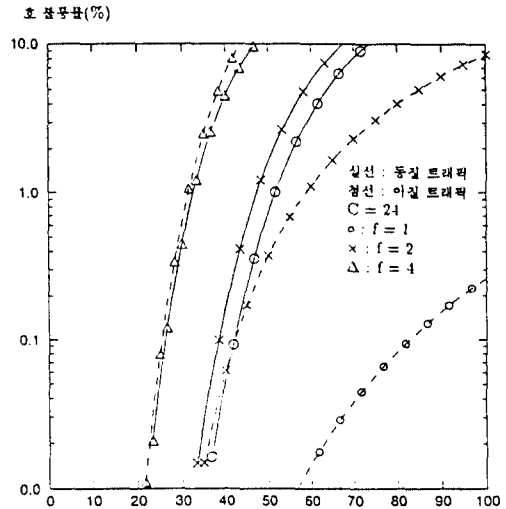
$$P_{B,\zeta | I=m} = \sum_{j=0}^C \pi(C | m, j) \cdot g_{f_\zeta}(j) \quad (8)$$

도착하는 입력 프레임의 조건을 없애면, 트래픽  $\zeta$ 의 평균 호 불통률  $P_{B,\zeta}$ 은 다음과 같이 구해진다.

$$P_{B,\zeta} = \sum_{m=0}^{C-1} P_{B,\zeta | I=m} \cdot p(m) + P(C) \quad (9)$$



(a) 슬롯 프레임의 제공 부하(%)



(b) 슬롯 프레임의 제공 부하(%)

그림 8. 동질 트래픽과 이질 트래픽의 호 불통률 비교

- a)  $f = 1, 4$  인 경우
- b)  $f = 1, 2, 4$  인 경우

Fig. 8. Comparison of call blocking probabilities of homogeneous and heterogeneous traffic

- a)  $f = 1, 4$  case
- b)  $f = 1, 2, 4$  case

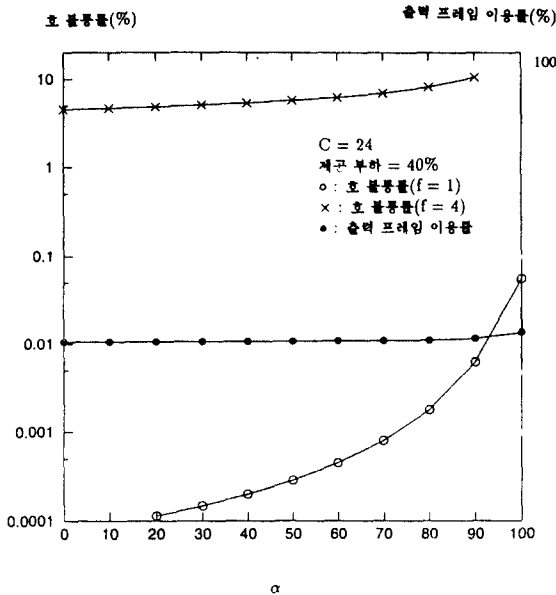


그림 9. 이질적 트래픽 환경에서의 트래픽 간섭 효과  
 Fig. 9. Interference of traffic under heterogeneous traffic environment

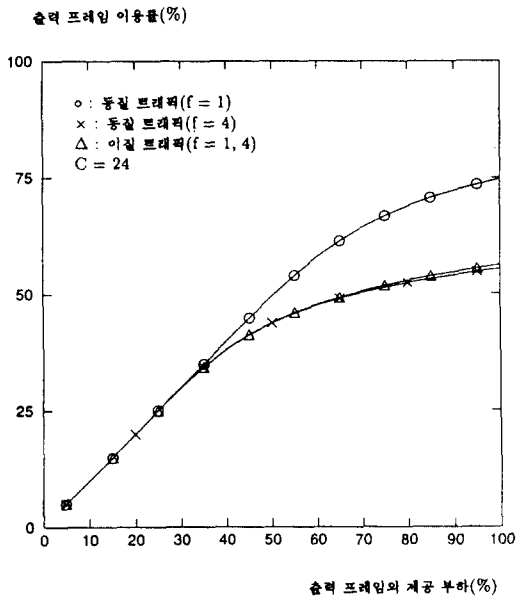


그림 10. 동질적 트래픽과 이질적 트래픽의 스위치 이용률  
 Fig. 10. Switch utilization of homogeneous traffic and heterogeneous traffic

4. 1 성능 평가 결과

그림 8(a)는  $f=1$ 의 트래픽과  $f=4$  트래픽으로 구성된 이질 트래픽 환경에서의 호 불통률과  $f=1$  트래픽만으로 구성된 동질 트래픽의 호 불통률 및  $f=4$  트래픽만으로 구성된 동질 트래픽의 호 불통률을 비교한 것이다.  $f=1$  트래픽과  $f=4$  트래픽의 도착률이 같은 경우에 이 두 트래픽이 입력 프레임에 가하는 부하는 같으나 출력 프레임에 가하는 부하는  $f=4$  트래픽이  $f=1$  트래픽에 비해 네 배 더 많은 부하를 가하게 된다. 그림 8(a)를 관찰한 바에 의하면  $f=4$  트래픽의 경우 이질 트래픽 환경에서의 호 불통률이 동질 트래픽의 호 불통률보다 약간 더 크고  $f=1$  트래픽의 경우에는 이질 트래픽 환경에서의 호 불통률이 동질 트래픽의 호 불통률보다 훨씬 작다는 것을 알 수 있다. 이 성능 평가 결과는 다음과 같이 해석될 수 있다. 제 3 장에서 관찰한 바에 의하면 호 불통률은  $fan-out$ 이 증가함에 따라서 매우 급격하게 증가한다는 것을 알 수 있었다. 이질 트래픽 환경에서  $f=4$  인 호는 대다수가 불통되므로 ATM 스위치의 낮은 이용률로 인하여  $f=1$  트래픽의 호는 제공 부하가 높은 경우에도 쉽게 스케줄링을 할 수 있게 된다. 반대로  $f=1$  호가 많이 스케줄되면 ATM 스위치의 이용률이 높아지게 되고  $f=4$  호의 호 불통률은 더욱 커지게 된다. 그림 8(a)에서는  $f=1$ 의 성능 변화 범위와  $f=4$ 의 성능 변화 범위가 서로 겹치지 않기 때문에 위의 현상이 뚜렷하게 나타나 있지 않다. 그림 9는 동질 트래픽과 이질 트래픽의 스위치 이용률을 계공 부하의 함수로서 보여 주고 있는데 이 그림에서 앞에서 설명한  $fan-out$ 이 작은 트래픽과  $fan-out$ 이 큰 트래픽의 상호 관계를 더욱 명확하게 관찰할 수 있다. 그림 9는 이질 트래픽의 출력 프레임 이용률이  $f=4$  동질 트래픽의 이용률 보다 약간 높으나  $f=1$  동질 트래픽 보다는 매우 낮다는 것을 보여주고 있다.

그림 8(b)는  $f=1, f=2$  그리고  $f=4$ 인 호로 구성된 이질 트래픽 환경의 성능 분석 결과를 보여주고 있는데 여기에서도 그림 8(a)와 비슷한 현상을 관찰할 수 있다. 그림 8(b)는  $f=1, f=2, f=4$  호의 각 도착률은 동일하다고 가정하고 성능 분석을 수행하였다. 이질 트래픽 환경에서의  $f=1, f=2$ 인 트래픽의 호 불통률은  $f=1$  또는  $f=2$  동질 트래픽의 호 불통률보다 매우 작으나 이질 트래픽 환경에서의  $f=4$ 의 호 불통률은  $f=4$  동질 트래픽의 호 불통률보다 훨씬 높다.

$f=1$ 과  $f=4$  두 개의 트래픽 타입으로 구성된 이질 트래픽에서의 트래픽의 배합 비율에 관한 성능 분석을

하기로 하자. 그림 10은 호 불통률과 스위치 이용률을

$\alpha = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}$  의 함수로 표현한 것이다. 여기에서  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 는 각각  $f=1$  트래픽과  $f=4$  트래픽의 도착률을 표시하고 있다. 이 성능 평가는 출력 프레임에 가해지는 제공 부하를 40%로 고정하고 수행한 결과이다. 그림 10에서  $\alpha$ 가 증가할수록, 즉  $f=1$  트래픽의 제공부하가 커질수록,  $f=1$  트래픽의 호 불통률이 증가한다는 것을 볼 수 있다. 이 현상은  $\alpha$ 가 커질수록  $f=4$  호가 감소하며 따라서  $f=1$  트래픽끼리 스위치 자원 사용을 경쟁해야 하기 때문에 발생한다. 그러나  $f=1$  트래픽의 호 불통률은  $f=4$  트래픽의 호 불통률보다 훨씬 작기 때문에 스위치 이용률은  $\alpha$ 에 비례해서 증가하게 되고  $f=4$  트래픽의 호 불통률도 따라서 증가하게 된다.

#### IV. 결론

트래픽 특성이 매우 다른 여러 가지 서비스를 복합적으로 지원하는 네트워크인 광대역 종합 통신망을 실현시킬 수 있는 전송 방법으로 ATM 전송방법이 대두되고 있다. ATM 방식의 특징은 전체 대역을 고정 크기를 갖는 슬롯으로 나누고 대역의 할당을 슬롯 단위로 하는 대역 할당 유연성을 가진다는 점이다. 또 다른 특징은 대역의 할당이 미리 되어 있지 않고 요구에 따라 할당되는 동적 대역 할당을 한다는 점인데 이 특징을 잘 이용하면 변동 대역을 갖는 호나 비실시간 데이터 통신을 효율적으로 지원할 수 있다는 장점을 가지고 있다. ATM 방식이 광대역 종합 통신망의 전송 방식으로 대두됨에 따라 ATM 네트워크에 대한 연구와 표준 활동이 매우 활발하게 전개되고 있다. ATM 네트워크에 관한 연구 중에서도 ATM 네트워크 구축에 필수적인 ATM 스위치에 대한 연구가 집중적으로 전개되었다. 본 연구에서는 이러한 여러가지 ATM 스위치 중 가장 양호하고 보편적이며 그 활용이 유력시되는 스위치 중 Starlite 스위치, Batcher-Banyan 스위치, Knockout 스위치의 특성과 복사 네트워크의 특성을 연구 조사하였다.

지금까지 스위치 동작을 제어하는 제어 알고리즘 및 스위치 자원 할당 알고리즘과 같이 스위치의 운영에 대한 연구는 스위치 하드웨어의 연구에 비해 상대적으로 소홀히 취급되어 왔기 때문에 본 연구 과제에서는 지금까지의 ATM 스위치에 대한 연구 결과 및 활동을 토대로 하여 ATM 네트워크의 실제 동작 환경과 비슷

한 환경, 즉 이질적 트래픽이 공존하는 환경에서의 ATM 스위치의 성능 평가를 하고자 하였으며 이를 위해 다중 지점 통신 서비스를 위한 광대역 통신망에서의 효율적인 전송을 제공하는 멀티캐스트 교환을 위한 호 스케줄링 알고리즘을 연구하였다.

이질 트래픽의 성능 연구에 앞서 먼저 모든 호가 같은 fan-out 을 갖는 동질성 트래픽에 대한 기존 연구 결과(9)를 분석하였다. 동질 트래픽 가정에서 fan-out, 프레임 크기(C) 그리고 제공 부하를 변동시키면서 용량 제한에 따른 최소 호 불통률과 슬롯 경쟁에 의한 최대 호 불통률을 구하였다. 성능 분석 결과 최소 호 불통률은 fan-out이 증가함에 따라 크게 변화하지 않는 반면 최대 호 불통률은 fan-out의 증가에 따라 매우 빠른 속도로 증가하고 있음을 관찰할 수 있었다. 이는 무작위적으로 슬롯이 할당된 여러 개의 프레임을 중첩하면 공통 유휴 슬롯이 남아있을 확률이 빠른 속도로 감소한다는 것을 의미한다. 이 결과에서 랜덤 호 스케줄링 기법을 사용하면 스위치의 이용률이 매우 저조한 상태에서 스위치를 운용해야 한다는 것을 알 수 있다.

동질 트래픽에 대한 결과를 도출한 다음 fan-out이 서로 다른 트래픽이 혼재하는 이질 트래픽에 대한 성능 분석을 시행하였다. Fan-out이 다른 트래픽이 같은 도착률을 가진다면 fan-out이 큰 트래픽은 fan-out이 작은 트래픽보다 출력 프레임에 더 많은 부하를 가하게 된다. Fan-out이  $f=1, f=4$ 로 구성된 이질 트래픽을 분석한 결과  $f=4$  트래픽의 경우 이질 트래픽 환경에서의 호 불통률이 동질 트래픽의 호 불통률보다 약간 더 크고  $f=1$  트래픽의 경우에는 이질 트래픽 환경에서의 호 불통률이 동질 트래픽의 호 불통률보다 훨씬 작다는 것을 알 수 있다. 이 결과는 이질트래픽 환경에서 fan-out에 따른 트래픽간의 성능 차이가 더욱 심화된다는 것을 제시하고 있다. 그러므로, fan-out 증가에 따른 성능 저하를 방지하기 위해 효율적인 자원 할당 방식이 필요하게 된다.

자원 할당 방식으로 호 패킹 방식과 호 분할 방식 두가지가 있다. 호 패킹 방식은 스위치의 자원을 더욱 체계적으로 사용하는 것으로서 성능 평가 결과 호 패킹 방법은 스위치의 성능을 향상시키지 못하는 것으로 밝혀졌다. 호 분할 방식은 fan-out이 큰 호를 fan-out이 작은 다수의 호로 분할하는 방식으로 FS(Fixed Splitting)과 GS(Greedy Splitting) 두 알고리즘이 있다. 호 분할 방식은 ATM 스위치의 성능을 현

격하게 향상시키는 결과가 나왔으므로 호 분할 방식은 ATM 스위치의 성능을 향상시키는 현실적인 알고리즘으로 활용될 것을 기대한다.

### 참 고 문 헌

- [1] CCITT Recommendation I.121, "Broadband Aspects of ISDN", 1992.
- [2] S. E. Minzer, "Broadband ISDN and Asynchronous Transfer Mode(ATM)", *IEEE Comm Magazine*, vol.27, no.9, pp.17-24, Sept., 1989.
- [3] CCITT Recommendation I.321, "B ISDN Protocol Reference Model and Its Implementation", 1992.
- [4] L. T. Wu, E. Arthurs, and W. D. Sincoskie, "A Packet Network for BISDN Applications", *Int. Zurich Seminar on Digital Comm.*, Zurich, Switzerland, pp.191-198, March, 1988.
- [5] A. Huang and S. Knauer, "Starlite : A Wideband Digital Switch", *Proceedings of Globecom '84*, pp.121-125, 1984.
- [6] J. Hui, and E. Arthurs, "A Broadband Packet Switch for Integrated Transport", *IEEE JSAC*, vol.SAC 5, pp.1264-1273, Oct., 1987.
- [7] Y. Yeh, M. Hluchyj, and A. Acampora, "The Knockout Switch : A Simple Modular Architecture for High Performance Packet Switching", *IEEE JSAC*, vol.SAC-5, no.9, pp.1426-1435, 1987.
- [8] C. K. Kim, "Performance Analysis of a Duplex Multicast Switch", *IEEE Trans. on Comm.*, vol.40, no.10, October, 1992.
- [9] C. K. Kim, and T. T. Lee, "Cell Scheduling Algorithms in a Multicast Switch", *IEEE Trans. on Comm.*, vol.40, no.3, March, 1992.
- [10] L. Dron, G. Ramamurthy, and B. Sengupta, "Delay Analysis of an ATM Switch for Continuous-Bit-Rate Traffic", *13th ITC*, vol.15, pp.33-38, June, 1991.
- [11] C. Rose, and M. G. Hluchyj, "The Performance of Random Optimal Scheduling in a Time-Multiplexed Switch", *IEEE Trans. on Comm.*, vol.35, no.8, pp.813-817, Aug., 1987.
- [12] R. Melen, and J. S. Turner, "Nonblocking Multirate Networks", *SIAM J. Computing*, vol.18, no.2, pp.301-313, April, 1989.
- [13] US Patent No. 4,896,934, Broadband Optical Multicast Switch, 1990.
- [14] G. Gopal, C. K. Kim, and A. Weinrib, "Dynamic Network Configuration Management", *ICC'90*, pp.295-301, April, 1990.
- [15] G. Gopal, C. K. Kim, and A. Weinrib, "Algorithms for Reconfigurable Networks", *13th ITC*, June, 1991.
- [16] C. K. Kim, S. H. Lee, and L. T. Wu, "Circuit Emulations", *Int. J. of Digital and Analog Cabled Systems*, vol 1, no.4, pp.245-256, December, 1988.
- [17] J. C. Bellamy, *Digital Telephony*, John Wiley & Sons, 1982.
- [18] V. E. Benes, *Mathematical Theory of Connecting Networks and Telephone Traffic*, New York : Academy Press, 1965.
- [19] T. T. Lee, R. Boorstyn, and E. Arthurs, "The Architecture of a Multicast Packet Switch", *Proceedings of Infocom'88*, New Orleans, 1988.
- [20] T. Lee, "Non-blocking Copy Networks for Multicast Packet Switching", *Int. Zurich Seminar on Digital Communications*, pp.221-230, March, 1988.
- [21] M. Villen-Altamirano, and J. Villen-Altamirano, "Restart : A Method for Accelerating Rare Events Simulations", *13th ITC*, vol.15, pp.71-76, June, 1991.



金鍾權(Chong Kwon Kim) 정회원

198년 2월 2일생

1981년 : 서울대학교 산업공학과 졸업(학사)

1982년 : 미국 조지아 공대졸업(O.R. 석사)

1987년 : 미국 일리노이 대학 전산 과학과 졸업(박사)

1984년 ~ 1985년 : IBM센호세 연구소 연구조원

1987년 ~ 1991년 : 미국 벨 통신 연구소 연구원

1991년 ~ 현재 : 서울대학교 계산통계학과 조교수