

# EPA를 이용한 유한한 사용자를 갖는 WDMA 프로토콜의 성능 분석

정희원 조원홍\*, 오영열\*\*, 허남조\*\*, 이재용\*\*, 이상배\*\*

## Performance Analysis of A Wavelength Division Multiple Access Protocol using A Equilibrium Point Analysis Method

Wonhong Cho\*, Young-Yul Oh\*\*, Nam-Jo Heo\*\*, Jai-Yong Lee and Sangbae Lee\*\*

Regular Members

### 요 약

본 논문에서는 수동 스타형 토폴로지(passive star topology)를 위한 고속 광 섬유 근거리 지역망의 파장 분할 다중 접근 (Wavelength Division Multiple Access : WDMA) 프로토콜을 제시하고, 이를 평형점 (EPA : Equilibrium Point Analysis) 분석 방법을 이용하여 유한한 사용자를 갖는 시스템에 대해 성능 분석하였다. 파장 분할 다중 접근에 의한 다중 채널의 접근 방식은 예전의 많은 연구에서 사용되었던 것과 같이 슬롯화 된 Aloha 프로토콜을 기본적으로 이용하나, 많은 논문들이 무한한 수의 사용자에게 S-G (Throughput - Load) 해석 방법을 사용하는데 반해, 유한한 수의 사용자에게 대한 프로토콜 분석을 위해 평형 점 분석 방법을 이용하여 유도된 Markov 체인을 해석하였다. 이를 통해 유한한 수의 사용자를 가진 제한한 시스템의 성능과 불안정성 문제를 표현할 수 있었으며, 아울러 해석된 무한한 사용자와 유한한 사용자 시스템의 관계와 정확성을 SLAM 프로그램을 이용한 시뮬레이션을 통해 증명하였다.

### ABSTRACT

A protocol for a high speed optical fiber LAN using a wavelength division multiple access (WDMA) passive star topology is proposed. The protocol is analyzed using a equilibrium point analysis (EPA) method on a system with finite users. The wavelength division multiple access on multi-channels is basically accomplished by the slotted Aloha protocol as used in many previous works. While many works have used the S-G (throughput-load) method for the infinite users, the derived Markov chain is solved by the EPA for a protocol analysis with finite users, which can present the performance and the instability problem in the slotted Aloha system with a finite population. In addition to this mathematical analysis, we showed the relation between the analyzed infinite population system and the analyzed finite population system and proved the correctness of its analysis.

### I. 서론

밀집(dense) 파장 분할 다중 접근 (Wavelength Division Multiple Access : WDMA)와 동조 기능

한(tunable) 광 트랜시버의 기술을 이용함으로써, 거리가 짧고 전파 손실을 거의 무시할 수 있는 근거리 지역망에서는 광섬유를 사용함으로써 큰 대역폭을 갖는 고속의 광 지역망을 구축할 수 있다<sup>1,2</sup>. 파장 분할 다중화란 기본적으로 제공되는 광섬유의

\* 군산대학교 컴퓨터학과

\*\* 연세대학교 전자공학과(oyy@nasla.yonsei.ac.kr)

※ 이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단 대학부설연구소 연구비 지원에 의하여 연구되었음.  
논문번호 : 98002-0105, 접수일자 : 1998년 1월 5일

넓은 광 대역폭을 작은 용량의 채널들로 나누고, 이 작은 용량의 채널들 각각을 수 Gbit/sec의 전자적인 최고 처리 속도로 동작시키는 것이다. 그러나 이러한 대용량의 광 네트워크를 실현하는데 있어서의 난점은 광과 전자적인 인터페이스 속도에서의 병목 현상이므로 파장 분할 다중화를 이용하기 위해서는 이러한 환경에서 패킷 전송을 위한 효율적인 매체 접근(media access) 기술을 개발해야 한다.

점대점(point-to-point) 방식의 단일-홉(single-hop) WDMA 통신에서는 동조가능한 송신단 과/또는 수신단을 사용함으로써 다중 채널은 만들어진다. 즉, 각 스테이션은 동조가능한 광 송신단을 사용함으로써 다른 스테이션들과 다른 고유한 파장으로 메시지를 전송하며, 송신된 신호는 모든 스테이션에 방송되고, 각 스테이션에서는 동조가능한 광 필터가 수신을 위해 여러 파장들 중 자신의 노드로 메시지를 전송하길 원하는 송신단에서 이용한 한 파장을 선택하는 것이다.

이미 많은 연구에서 스타형 토폴로지를 사용해서 이러한 동작 원리를 증명하는 실험 결과를 발표하였다. 빠르게 동조하는 송신단 과/또는 수신단이 이용 가능하다고 가정하고, 단일-홉 방송-그리고-선택(broadcast-and-select) 방식 네트워크에 대해 여러 가지 매체 접근 프로토콜이 제안되었다<sup>[4]</sup>. 여러 프로토콜들과 그들의 처리율 능력이 [5]에 비교 제시되었다. 고속 환경에서 정규화된 채널 전파 지연은 1을 초과하기 때문에, 제어 패킷이 성공적으로 전송되면 데이터 패킷도 성공적으로 전송될 것이라고 가정하는 실제적인 프로토콜은 [6,7]의 관심의 초점이었다. [8]에서는 각 스테이션은 여러 고정된 송신단들과 여러 동조 가능한 수신단들을 가지고 있으며, WDMA 근거리 지역망에 대한 많은 구조적인 대안들이 논의되었다. [9]에서는 각 스테이션은 제한된 동조 능력을 가진 하나의 동조가능한 전송단과 여러 고정된 수신단들을 가진다. 스테이션이 어떤 파장으로 전송하게 할 것인가를 결정하기 위해 Aloha와 시분할 다중 접속(TDMA)에 기초한 두 접속 프로토콜들이 사용되었다. [10]에서는 많은 수의 채널들에 대해서 빠르게 동조할 수 있는 동조 가능한 필터(수신단)가 패킷 스위칭을 지원하기 위해 가정되었다.

그러나 Aloha에 기초한 위의 프로토콜에 대한 분석은 무한한 수의 사용자와 포아송(Poisson) 입력과 통계적인(statistical) 평형상태(equilibrium state)라는 가정에 기초하기 때문에, 이들 가정은 단순하게 실

제 상황에 대한 근사화 된 결과를 나타낸다. 사실, 통계적인 평형 상태라는 가정하에서 무한한 수의 사용자를 가진 슬롯화 된 Aloha의 처리율-지연시간 결과는 시스템이 포화 상태로 가기 이전의 어느 정도의 유한한 시간동안에만 이루어진다는 것이 다른 해석적인 방법에 의해 입증되었다. 즉 무한한 수의 사용자를 가진 Aloha 시스템은 사실상 유한한 수의 사용자를 가지고, 따라서 시스템은 안정하거나 불안정하다. 따라서, 유한한 수의 사용자에 대한 S-G(throughput-load) 분석은 안정성 문제를 표현할 수 없다. 따라서, 본 논문에서는 수동 스타 커플러를 사용하는 파장 분할 다중 접근 방식의 고속 광섬유 지역망에 대한 기본적인 형태의 프로토콜을 도입하고, 시스템을 무한한 수의 사용자와 유한한 수의 사용자 모두에 대해 분석하여, 제안하고 해석한 유한한 사용자를 갖는 프로토콜의 안정성, 정확성과 적합성을 보이고자 한다.

본 논문의 구성은 2절에서 본 논문에서 고려한 광 지역망 프로토콜을 보이고, 3절에서는 무한한 수의 사용자와 유한한 수의 사용자 경우에 대한 수학적 모델을 해석한다. 해석에서 얻은 산술적인 계산 결과와 이를 증명하기 위해 사용된 SLAM 프로그램을 이용한 시뮬레이션 과정과 결과는 4절에 보이고, 5절에서 결론 맺는다.

## II. 프로토콜

망 구조를 그림 1에 나타내었다. 망의 중앙에 위치한 수동 스타 커플러(passive star coupler)의 입력과 출력단에는 M명의 사용자들이 연결되어 있다. 스타 커플러는 이러한 형태의 망 구성에서 기본적인 통신 매체로써, 기본적으로 다중 접근 방송 채널로 동작하는 전력 분배기이다. 시스템은 하나의 독립적인 제어 채널을 가지고, 각 사용자는 데이터 채널에 동조가능한 광 송신단과 제어 채널에 고정된 광 송신단, 동조가능한 광 수신단과 고정된 광 수신단을 똑같이 가진다. 각 동조가능한 송신단과 수신단은 언제나 N개의 파장들  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$  중 모든 사용자에게 공통인 파장에서 동작하므로, 각 사용자는 어떤 특별한 파장  $\lambda_T$ 로 송신하고 동시에 파장  $\lambda_R$ 로 수신할 수 있다. 각 사용자는 데이터의 송신과 수신을 위해 하나의 동조가능한 송신단과 하나의 동조가능한 수신단을 가지므로, 전송을 원하는 사용자는 자신이 원하는 수신자에게 어떤 채널로 자신

의 메시지를 전송하려 하는지를 알려줘야 한다. 만약 이 정보가 올바르게 전달되면, 전송하기를 원하는 사용자는 그 정보에 명시된 채널로 자신의 메시지를 전송할 수 있고, 수신자도 또한 수신된 정보에 의해 올바른 채널로 동조할 수 있다. 이것은 파장  $\lambda_0$ 인 제어 채널에 고정된 각 사용자의 송, 수신단에 의해서 수행될 수 있다. 통신을 하지 않는 수신단은 이러한 제어 정보를 발견하기 위해 고정된 광 수신단으로 끊임없이 제어 채널을 감시한다. 제어 채널을 사용하고, 제어 패킷을 보내기 위해서는 어떻게 제어 채널을 사용하게 할 것인가에 관한 접속 방법을 먼저 고려해야 한다. 그리고 나서, 많은 데이터 채널  $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\}$ 중 사용자가 원하는 데이터 채널에 접속할 것인가를 고려해야 한다. 제어 패킷은 통신을 위해 세가지 정보로 구성되는데, 이 세가지 정보는 송신단 주소, 원하는 수신단 주소, 채널 번호이다. 통신을 하지 않는 수신단은 항상 제어 채널로 동조되어 있고, 이 정보가 자신의 주소를 가지는가를 알기 위해 제어 채널을 감시한다. 제어 패킷이 자신의 주소를 갖고 있음을 확인하자마자, 수신단은 전송 파장으로 동조된다. 이제 수신단은 제어 패킷에서 명시된 데이터 채널을 통해서 실제 데이터 패킷을 수신할 수 있다.

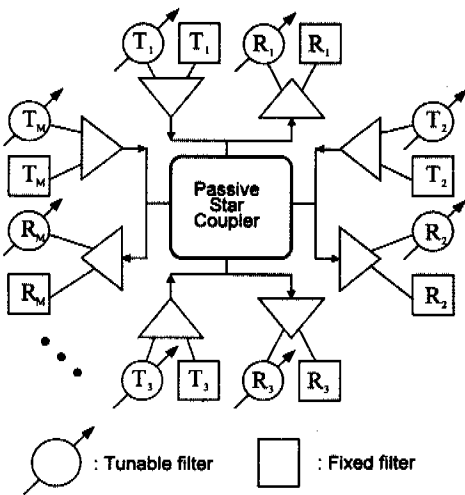


그림 1. 중앙 광 스타 망의 시스템 구조  
Fig. 1. System architecture of a passive optical star network

제어 채널로의 각 노드의 접근은 슬롯화 된 Aloha의 처리율이 순수한 Aloha의 처리율보다 좋으므로, 여기서는 하나의 제어 채널과  $N$ 개의 데이터

채널을 가진 슬롯화 된 Aloha 프로토콜을 고려하기로 한다. 모든 제어 패킷은 같은 길이를 가지고, 전송하는데 하나의 단위시간(제어 슬롯이라 불리는)이 필요하다. 모든 데이터 패킷은 같은 길이를 가지고, 전송하는데  $L$ 의 단위시간(데이터 슬롯이라 불리는)을 필요로 한다. 모든 경우에, 제어 패킷이 성공적으로 전송되면 데이터 패킷도 성공적으로 전송된다고 가정한다. 따라서 제어 패킷을 성공적으로 전송한다는 것은 데이터 패킷이 성공적으로 전송된다는 것을 의미한다.

시스템은 파장의 수와 같은  $N$ 개의 채널을 가지고, 이 채널들은  $N$ 개의 데이터 채널들과 한 개의 제어 채널로 구성된다. 모든 채널들은 그림 2에 나타난 바와 같이 다른 채널들과 같은 기준 시간을 사용해서 슬롯화 되어 있다. 이 기준 시간은 길이  $L$ 을 가지는 하나의 슬롯이라 부른다. 즉, 하나의 데이터 패킷의 크기는  $L$ 이고 하나의 제어 슬롯의 크기도 또한  $L$ 인데, 이 제어 슬롯은 다시  $N$ 개의 제어 미니슬롯으로 나누어진다.  $k$ 개의 패킷을 가지는 하나의 메시지를 보내기 위한 과정은 다음과 같다.  $[S, S+1)$  사이클에서부터 메시지를 전송하기를 원하는 사용자는 먼저 전송을 위해 채널을 결정해야 한다. 그리하여  $i$ 번째 채널을 선택한 사용자는  $[S-1, S)$  사이클에서  $i$ 번째 제어 미니슬롯으로 제어 패킷을 보내야 한다. 이  $i$ 번째 제어 미니슬롯에서,  $i$ 번째 데이터 채널을 사용하려는 많은 사용자들은 이 미니슬롯을 차지하기 위해 경쟁할 것이다. 많은 사용자들로 인해 이러한 시도가 실패하면,  $[S, S+1)$  사이클에서의 데이터 채널은 비게 되고, 사용자는 자신의 제어 패킷을 다음  $i$ 번째 제어 미니슬롯에 확률  $p$ 로써 재전송한다. 반면에 이 제어 미니 슬롯에 성공적으로 접속한 사용자는  $[S, S+1)$  사이클에서부터  $i$ 번째 채널,  $i$ 를 통해서 자신의 메시지의 마지막 패킷까지 계속해서 전송할 수 있다. 따라서, 하나의 제어 미니슬롯과 여러 데이터 슬롯들은 하나의 전송 사이클을 구성한다. 만약 사용자가  $i$ 번째 채널을 사용하고  $k$ 개의 패킷을 가지고 있다면,  $[S+k-1, S+k)$  사이클 까지 전송이 계속될 것이므로, 사용자는  $[S, S+k-1)$  사이클 동안 다른 제어 패킷의 접속을 금지해야 할 것이다. 따라서, 사용자는 다음  $i$ 번째 제어 미니 슬롯에서부터  $[S+k-2, S+k-1)$  사이클까지 계속해서 데이터 패킷의 전송과 함께 방해 신호(jam signal)를 보내야 할 것이다. 이 방해 신호에 의해  $i$ 번째 제어 미니슬롯에 접속하기를 원하는 사용자는

항상 충돌을 겪게 된다.

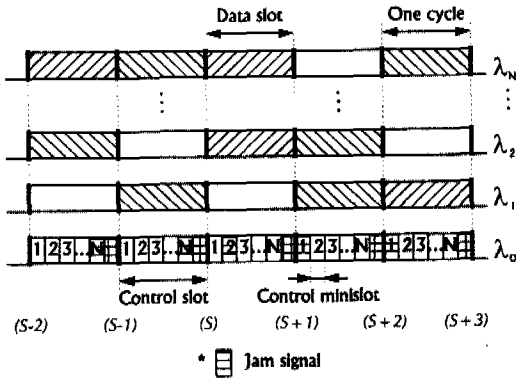


그림 2. 하나의 독립된 제어 채널을 갖는 채널 구조  
Fig. 2 Channel architecture with a separate control channel

### III. 처리율 분석

#### 1. 무한한 수의 사용자 경우 (S-G 해석)

모든 사이클의 각 채널(각 미니슬롯)에는 미니슬롯 당 평균  $G$ 의 포아송 분포를 갖는 트래픽이 주어진다 가정하자. 채널을 붙잡은 사용자는 평균 길이  $h$ (패킷 단위)의 메시지를 전송하고, 메시지 길이는 기하학적(geometric) 분포를 가진다고 가정한다. 어떤 사이클에서 모든 데이터 채널은 통신을 하고 있거나 통신을 하고 있지 않은 상태 중 한가지 상태에 있으므로, 시스템에서 어떤 특별한 데이터 채널을 관찰하면, 통신을 하고 있지 않은 기간은 이 채널 상의 통신을 하고 있는 기간들 사이에 끼어 있을 것이다. 통신을 하고 있는 기간은 메시지를 전송하고 있는 기간에 해당하고, 통신을 하고 있지 않은 기간은 사용자들이 경쟁을 하고 있지 않거나(채널에 도착하는 것이 없는 경우) 충돌이 발생한 기간이다. 만약  $G$ 를 슬롯 당 제공된 트래픽이라 할 때, 데이터 채널이 전송을 하지 않을 확률 =  $1 - S = 1 - Ge^{-G}$ 이고, 여기서  $S$ 는 슬롯화 된 Aloha의 처리율이다. 따라서, 통신을 하고 있지 않은 기간의 확률 분포는 아래와 같이 주어진다.

$$P[t_{idle} = k \text{ slots}] = (1-s)^k \cdot S, \quad k=0,1,2,\dots$$

$$E[t_{idle}] = \frac{1-S}{S}$$

만약 평균 메시지 길이가  $h$ 이면,

$$E[t_{busy}] = h$$

따라서, 처리율  $U$ 는

$$U = \frac{E[t_{busy}]}{E[t_{busy}] + E[t_{idle}]} = \frac{h}{h + \frac{1-S}{s}} \quad (1)$$

$P_s$ 를 제어 미니슬롯에 제공된 각 제어 패킷에 대해 데이터 채널을 얻는데 성공할 수 있는 확률이라 하자.  $h$ 가 각 패킷이 데이터 채널에 부가되는 평균 부하이므로,  $G$ 가 슬롯당 채널에 제공된 트래픽이므로,  $G \cdot h \cdot P_s = U$  라는 결과식을 얻을 수 있다. 이 식으로부터,  $P_s$ 를 얻을 수 있다.

$$P_s = \frac{U}{G \cdot h}$$

평균 전체 재전송 지연시간을 구하기 위해, 먼저 평균 재전송 횟수  $NR$ 을 구해야 한다.

$$NR = \frac{1}{P_s} - 1$$

메시지를 전송하기 위한 평균 시간  $d_i$ 와 메시지가 스테이션에서 발생되고 나서 다음 제어 미니슬롯이 시작할 때까지 평균적으로 기다려야 하는 시간  $d_w$ 는 아래와 같다.

$$d_i = h \cdot L$$

$$d_w = \frac{L}{2}$$

제어 슬롯에서 평균 제어 패킷 전송 시간은  $(N+1)/2$ 이다. 여기에 더해, 재전송 시간의 평균  $d_r$ 은 다음 제어 미니슬롯에 대한 재전송 확률로써 계산된다. 따라서 아래의 식을 얻을 수 있다.

$$d_r = NR \cdot \left( \frac{N+1}{2} + \frac{L}{P} \right)$$

여기서  $p$ 는 재전송 확률이다. 지연시간은 위의 세 가지 항의 합이므로, 아래와 같은 결과식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} D &= d_i + d_w + d_r \\ &= h \cdot L + \frac{L}{2} + NR \cdot \left[ \frac{N+1}{2} + \frac{L}{p} \right] \quad (2) \end{aligned}$$

2. 유한한 수의 사용자 수의 경우

이번 절에서는 시스템에서의 사용자의 수가 유한할 때의 경우를 분석한다. 시스템의 근사적인 모델은 그림 3에 나타나 있다. 채널과 트래픽 발생원은 다음의 가정을 채택한다.

- A1) 채널에는 충돌의 경우를 제외하고는 에러가 없다.
- A2)  $M$ 명의 사용자들은  $N$ 개의 채널을 공유한다.
- A3) 사용자의 메시지 도착 사이의 시간 간격(패킷의 전송 시간을 단위)은 평균  $1/\sigma$ 인 기하학적인 분포를 가진다. 다시 말하면, 사용자는 슬롯당 확률  $\sigma$ 로 메시지를 발생시킨다. (보통 트래픽의 돌발적인 성격으로 인해  $\sigma \ll 1$ 이다.)
- A4) A3에서의 가정에도 불구하고, 각 사용자는 현재 메시지의 모든 패킷들이 성공적으로 전송될 때까지 새로운 메시지를 발생시킬 수 없다.
- A5) 각 메시지는 여러 개의 패킷들로 구성되어 있는데, 이 패킷들의 수는 평균  $h=1/\gamma$ 로 기하학적인 분포를 가진다.

가정 A1은 사용되는 채널을 규정한 것이고 가정 A2에서 A5까지는 트래픽 발생원과 관계가 있다. 신술적인 결과를 얻기 위해서 사용자의 수  $M=100$ 이라고 가정 하자. 또한 패킷은 연속적으로 전송된다고 가정한다. 모델과 똑같은 전체적으로 재전송되는 패킷의 수를 결정하기는 어렵기 때문에 모델을 간단하게 하기 위해, 다음의 가정을 채택한다.

- A6) 충돌한 패킷은 다음 슬롯에 확률  $p$ 로써 재전송된다.

이 모델에서, 어떤 순간 각 사용자는 아래의 3가지 모드 중 어느 하나의 모드에 존재하게 된다 : T, RT, TX. 사용자는 각 슬롯의 시작에서만 한 모드에서 다른 모드로 건너갈 수 있다. 각 모드에서 사용자들은 아래와 같이 모드가 변할 수 있다 : T 모드(생각하고 있는 모드)에 있는 사용자는 슬롯의 끝에서 확률  $\sigma$ 로 패킷을 발생시킨다. 슬롯화 된 Aloha 제어 채널에서 충돌을 경험한 사용자는 RT 모드(재전송 모드)로 건너가게 되고, 다음 슬롯에서 확률  $p$ 로써 자신의 메시지를 재전송하려 한다. TX 모드는

데이터의 전송을 표시한다. TX 모드에서 사용자가 이전 슬롯에서 패킷을 성공적으로 전송했고,  $(1-\gamma)$ 의 확률로 아직 전송할 패킷이 남아있으면 그 송신자는 현재의 슬롯에 연속적으로 패킷을 전송한다. 만약 전송할 연속적인 패킷이 없으면  $\gamma$ 의 확률로 T의 모드로 들어간다. 이는 평균  $h=1/\gamma$ 로 기하학적인 분포를 갖는 메시지를 표현 한 것이다.

이제 시스템의 상태 벡터를 정의하자.  $n_{RT}$ 를 RT 모드에 있는 사용자의 수를 나타내는 랜덤 변수,  $n_{TX}$ 를 TX 모드에 있는 사용자의 수를 나타내는 랜덤 변수라 하자. 그리고 벡터  $\mathbf{n} \equiv (n_{RT}, n_{TX})$ 을 시스템의 상태 벡터라고 정의하자. 그러면, 벡터  $\mathbf{n}$ 은 유한한 상태 공간을 가진 이산시간 마코프 체인(discrete-time Markov chain)을 형성한다. 이제 이 체인을 분석하기 위해 평형점 해석(equilibrium point analysis : EPA) 방법 [11] 을 이용하자.

가. 수정된 모델

해석을 간단하게 하기 위해서 그림 3의 모델을 슬롯화 된 Aloha 채널의 (T 모드와 RT 모드로 부터의) 두 입력을 합치는 모델로 변형 하자. 돌발적인 성격을 가지는 사용자를 가정하였으므로,  $\sigma \leq p$ 인 경우로 제한하자. 수정된 모델은 그림 4와 같다.

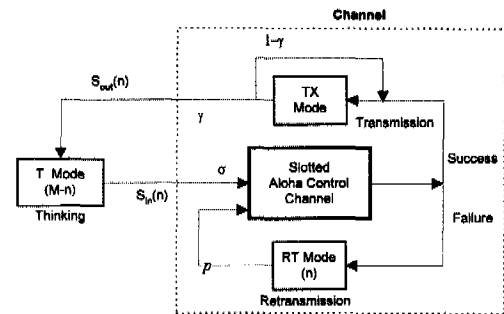


그림 3. 시스템의 근사 모델  
Fig. 3 An approximate model of the system.

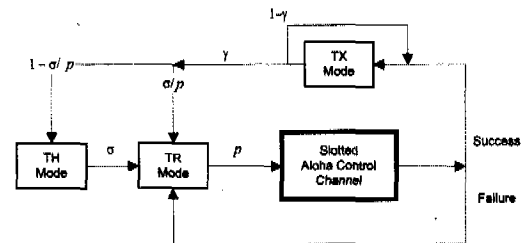


그림 4.  $\sigma \leq p$ 의 경우에서 그림 3의 수정된 모델.  
Fig. 4 A modified model of a Fig. 3 in the case of  $\sigma \leq p$ .

그림 3에서의 T모드는 TH와 TR의 두 모드로 나누어졌고, 그림 3에서의 RT 모드는 TR 모드의 일부분이 되었다. TX 모드에서  $\gamma$ 의 확률로 빠져 나온 사용자는 각각 확률  $(1-p)$ 와  $p$ 의 확률을 가지고 TH 모드와 TR 모드로 가게 된다. 확률론적인 관점에서 수정된 모델은 원래의 모델과 동등하다. 그림 4에 있는 수정된 모델에서  $n_{TR}$ 을 TR 모드에 있는 사용자의 수를 나타내는 랜덤 변수라 하자. 그러면, 수정된 상태 벡터  $\mathbf{n} (n_{TR}, n_{TX})$ 도 마코프 체인을 이룬다.

나. 평형점 해석

평형점 해석(EPA)은 정상 상태에만 적용이 되는 유동적인(fluid) 형태의 근사화 방법이다. 시스템은 항상 평형점에 있다고 가정한다. EPA 방법에서는 상태 전이 확률을 계산할 필요가 없다. 비선형 연립 방정식을 산술적으로 풀면 평형점이 쉽게 구해진다. 그림 4로부터 아래의 독립 방정식들을 구해낼 수 있다. 먼저  $\delta_{TH}(\mathbf{n})$ 를 시스템이 상태  $\mathbf{n} (n_{TR}, n_{TX})$ 에 있을 때, 어느 한 슬롯에서 TH 모드에 있는 사용자 수의 조건 증가치를 나타낸다고 하면, 이는 0 이 되어야 하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_{TH}(\mathbf{n}) = (M - n_{TR} - n_{TX})\delta - \gamma(1 - \frac{\sigma}{p})n_{TX} = 0$$

이 식의 첫 번째 항은 TH 모드로부터 나오는 사용자의 기대 값이 되겠으며, 두번째 항은 TX 모드로부터 TH 모드로 움직이는 사용자의 기대 값이 되겠다. 여기서  $n_{TX}$  는 다음과 같이 표현된다.

$$n_{TX} = (1 - \gamma)n_{TX} + n_{TR}P(1 - P)^{n_{TR}-1}$$

$$n_{TX} = \frac{S_{SA}(\mathbf{n})}{\gamma + S_{SA}(\mathbf{n})}$$

여기서  $S_{SA}(\mathbf{n})$  는 슬롯화된 Aloha control 채널의 처리율이며, 다음과 같다.

$$S_{SA}(\mathbf{n}) \equiv n_{TH}p(1 - p)^{n_{TH}-1}$$

결국 마지막으로 TX 모드를 통해 전송되는 트래픽의 처리율  $S(\mathbf{n})$ 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$S(\mathbf{n}) = (1 - \gamma)n_{TR} + S_{SA}(\mathbf{n})(1 - n_1) \quad (3)$$

시스템에 있는 사용자의 평균 수를 입력율로 나누면 지연시간을 구할 수 있는 Little의 공식을 이

용하여, 그림 4에 있는 모델에 Little의 공식을 적용하면, 평균 메시지 지연시간  $D$ 를 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$D = \frac{\bar{N}}{S_{input}} = \frac{M - \frac{S_{input}}{\sigma}}{S_{input}} = \frac{M}{\gamma} S(\mathbf{n}) - \frac{1}{\sigma}$$

그러나 이 식에는 슬롯화된 Aloha 제어 채널에서 경과되는 시간  $L$ 은 포함되어 있지 않으므로 이를 더하면 시스템의 지연 시간이 된다.

$$D = \frac{M}{\gamma S(\mathbf{n})} - \frac{1}{\sigma} + L \quad (4)$$

IV. 산술적인 해석과 시뮬레이션

시뮬레이션은 큐잉 이론을 시뮬레이션하기 편리한 범용 시뮬레이션 언어인 SLAM (Simulation Language for Alternative Modeling) [12] 을 이용하여 프로그래밍 하였다. 유한한 사용자의 경우와 같도록, 그림 3을 기초로 하여 시뮬레이션 모델을 만들었다. 주어진 변수는 사용자의 수  $M=100$ , 슬롯의 길이  $L=100$  으로 하고, 메시지의 길이인 한 번에 전송되는 연속적인 패킷의 전송을 의미하는  $r$  과 재 전송 확률  $p$ , 패킷 전송 시간을 변화 시켜, 전송 채널의 처리율과 지연 시간을 측정하였다. 시뮬레이션 시간은 모델 자체가 재 전송 확률에 따라 매우 불안정하므로 많은 시간이 요구되어 모두 1,000,000 슬롯 즉 100,000,000 단위 시간을 시뮬레이션 하여 결과를 얻었다. 실제로 시뮬레이션을 위해 걸린 시간은 한 값에 대해, SUN Enterprise 3000 컴퓨터 (2 CPU, 512M 메모리)를 이용하여 거의 2시간 정도가 소요되므로, 그림 6-9의 결과를 위해서는 그림 하나를 위해 거의 3일 정도가 소요되었다. 그러나 이러한 많은 시간도 시스템이 불안정 상태가 되면서 거의 패킷의 전송이 이루어 지지 않게 되면, 전송 채널을 통과하는 패킷이 없어 지연 시간과 처리율이 제대로 계산될 수 없는 문제점을 가지고 있었다.

유한한 사용자의 해석을 위해 도입한 평형점 해석 방법이 무한한 사용자의 해석에서 S-G 해석 방법을 사용함으로써 인해 불안정성을 표현할 수 없는 문제점을 해결하고자 한 것이므로 먼저 기존의 무한한 사용자의 해석으로 인한 결과와 유한한 사용자를 위해 이용한 평형점 해석 방법이 타당함을 보이기 위해 두개의 결과 식에 같은 변수 값을 주어

결과를 비교하여 보았다. 그림 5와 같이 처리율과 지연시간을 같이 나타내어 비교하여 보았으며, 각 변수 값은  $M=100, L=100, \sigma=0.001, r=0.1$ 로 고정하고 재전송 확률의 값  $p$ 를 0.05, 0.1, 0.15로 하여 두 해석 방법을 비교하여 보았다. 예상되는 것 처럼 유한한 사용자의 경우가 무한한 경우보다도 다소 작은 처리율과 다소 긴 지연 시간을 가지고 있다.

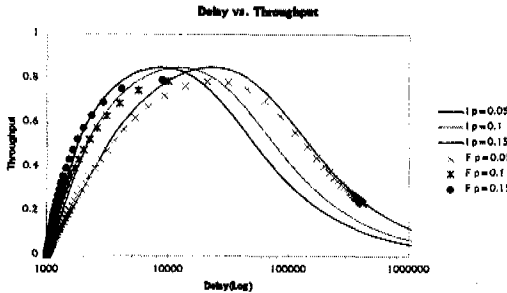


그림 5. 무한한 사용자와 유한한 사용자에 대한 지연시간 대 처리율  
 Fig. 5 Throughput vs. delay for the infinite and the finite user system.

결국 사용자의 수가 많아 지면, 처리율은 증가하게 되고 지연 시간은 감소하게 되는 즉 유한한 경우의 최대 한계를 의미함을 알 수 있다. 더욱이 0.01과 0.15처럼 다소 큰 재전송확률의 경우에는 무한한 경우와는 달리 유한한 경우의 해석에서는 최고의 처리율 이후에는 불안정 상태로 들어가서 더 이상의 값이 나타나지 않는, 처리율이 거의 0에 가까운 상태가 됨을 알 수 있다. 결국 두 경우의 해석 방법이 거의 비슷한 결과를 나타내며, 유한한 경우에 이용한 평형점 해석 방법은 무한한 경우에 사용하는 S-G 해석 방법이 보이지 못하는 불안정성을 보이고 있어 평형점을 이용한 무한한 경우의 해석 방법의 타당성을 기본적으로 나타낼 수 있다.

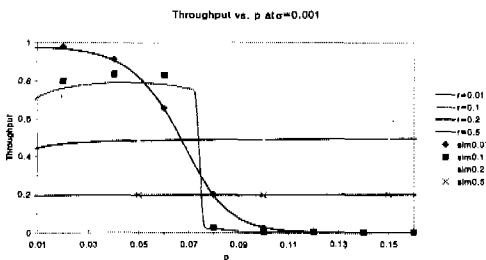


그림 6.  $s=0.001, M=100, L=100$ 인 경우의 재전송확률 대 처리율  
 Fig. 6 Throughput vs.  $p$  for  $s=0.001, M=100$  and  $L=100$ .

이제는 유한한 사용자를 갖는 경우에 대해서 평형점 해석 방법을 이용하여 프로토콜의 성능을 분석하여 보겠다. 아울러 이의 정확성을 보이기 위해 시뮬레이션의 결과를 함께 보이겠다. 그림 6은  $M=100, L=100, \sigma=0.001$ 인 경우에 재전송확률을 변화 시키면서 한 번에 전송되는 패킷의 수  $r$ 를 0.01, 0.1, 0.2, 0.5 즉 평균 100개, 10개, 5개, 2개의 패킷을 한번에 전송 시키도록 하여 성능의 변화를 알아 보았다. 먼저 시뮬레이션의 결과와 산술적인 결과를 비교하여 보면, 평형점 해석 방법이 보인 시스템의 불안정성도 시뮬레이션에서는 역시 보여 평형점 해석 방법이 정확하였음을 알 수 있다. 그림에서도 알 수 있듯이 불안정성이란 재전송 확률의 증가에 따라 처리율과 지연시간이 급격히 변화하는 경우를 의미하며, 안정성이란 재전송 확률의 변화에 거의 변화가 없이 일정한 처리율과 지연시간을 보이는 것을 의미한다. 물론 평균 10개의 패킷을 전송하는 경우의 처리율은 다소 오차를 보이나 다른 경우에는 거의 비슷한 결과를 보이고 있다.

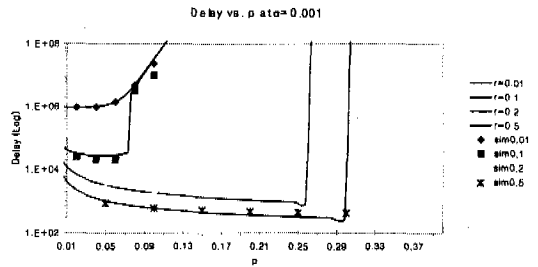


그림 7.  $s=0.001, M=100, L=100$ 인 경우의 재전송확률 대 지연시간  
 Fig. 7 Delay vs.  $p$  for  $s=0.001, M=100$  and  $L=100$ .

그림 7의 같은 변수의 지연시간에 대한 결과도 상당히 유사함을 알 수 있다. 처리율은 한번에 연속적으로 전송되는 패킷의 수가 많을수록 재전송 확률이 작은 경우 높은 처리율을 보이나 급격히 재전송 확률의 증가에 따라 감소됨을 알 수 있다. 그러나 연속적으로 전송되는 평균 패킷의 수가 감소함에 따라 처리율은 작아지나, 대신 재전송 확률의 증가에도 어느 정도 변화 없는 일정한 처리율을 보이고 있다. 지연 시간은 오히려 반대로서 평균 패킷의 수가 클수록 지연시간은 당연히 크나 급격히 이 값 역시 증가하며, 평균 패킷의 수가 작은 경우에는 처리율과 마찬가지로 재전송 확률의 변화에도 일정한 지연시간을 가짐을 알 수 있다. 처리율과 지연시간의 두 경우에서도 알 수 있듯이 갑작스러운 불안정

성이 나타나, 유한한 사용자의 경우에 대한 평형성 분석 방법의 정확성을 알 수 있다.

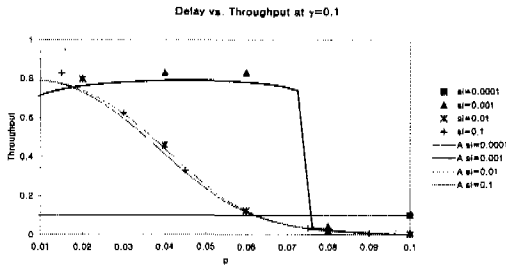


그림 8.  $h=10$  ( $=0.1$ ),  $M=100$ ,  $L=100$ 인 경우의 재전송 확률 대 처리율  
 Fig. 8 Throughput vs.  $\rho$  for  $h=10$  ( $=0.1$ ),  $M=100$  and  $L=100$ .

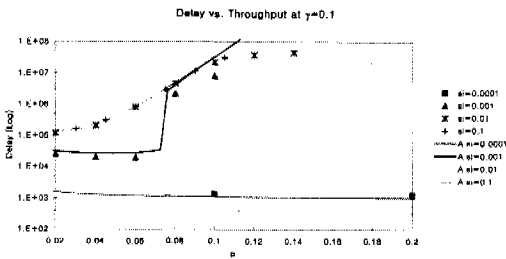


그림 9.  $h=10$  ( $=0.1$ ),  $M=100$ ,  $L=100$ 인 경우의 재전송 확률 대 지연시간  
 Fig. 9 Delay vs.  $\rho$  for  $h=10$  ( $=0.1$ ),  $M=100$  and  $L=100$ .

그림 8과 9에서는 메시지 도착 시간의 변화에 따른 성능 변화를 알아 보았다. 한 사용자에 의해 한 번에 연속적으로 전송되는 패킷들을 메시지라고 하자. 패킷의 앞서의 경우에서와 마찬가지로 시뮬레이션의 결과와 산술적인 결과는 거의 비슷함을 알 수 있다. 메시지의 도착율이 작은 경우에는 처리율은 매우 작으나 이의 증가에 따라 처리율은 커짐을 알 수 있다. 그러나 앞 서의 경우와 마찬가지로 불안정성은 나타난다. 처리율이 더욱 커지면 불안정성은 나타나지 않으나 처리율의 변화는 재전송확률의 값의 증가에 따라 계속적으로 감소함을 알 수 있다. 지연시간을 나타내는 그림 9의 경우에서도 도착율이 높으면 지연시간은 계속적으로 증가하나 감소함에 따라 불안정성이 마찬가지로 나타나나 재전송 확률의 증가에 따라 어느 정도 일정한 지연시간 값을 나타냄을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과에서는 재전송 확률의 증가에 따라 계산된 지연시간의 결과와는 매우 큰 차이를 나타냄을 알 수 있다. 이는 앞서도 언급한 바와 같이 처리율은 불안정한 경우 0 이되어 결과에서 나타나지 않으나 지연시간은 성공

적으로 전송된 패킷의 개수가 급격히 감소하므로 정확하게 결과를 구할 수 가 없어 이 같은 오차들이 나타나기 시작한다. 결국 시스템이 불안정한 상태가 됨을 처리율에서 알 수 있으면 이에 따른 시뮬레이션의 지연시간 결과는 무시하여야 한다.

### V. 결론

본 논문에서는 무한한 수의 사용자와 유한한 수의 사용자를 가지는 두 경우의 WDMA 시스템에 대한 해석 방법을 제시하였다. 일반적으로 사용되는 무한한 수의 사용자를 가지는 시스템 해석법으로 사용되는 S-G 해석법에서 나타낼 수 없는 불안정한 결과는 유한한 수의 사용자를 가지는 시스템에 대한 경우에서 사용한 평형점 해석(EPA) 방법에 의해서 보일 수 있었다. 유한한 사용자의 경우에 도입한 평형점 해석 방법은 무한한 수의 사용자를 가지는 시스템에 대한 S-G 해석에 의해서 얻은 성능과 유사하여 유도한 결과가 어느 정도 정확함을 알 수 있었다. 더욱이 시뮬레이션의 결과와 산술적 해석의 결과를 비교하여 유도한 결과가 정확함을 또 한번 입증하였다. 이제 제한한 시스템이 가장 좋은 성능을 내기 위해서는 적절한 변수들의 선택과 이에 따른 제한한 방식에 의한 계산 그리고 시뮬레이션을 통한 확인이 필요하겠다. 더욱이 평형점 해석 방법은 조금만 변형하면 여러 통신 시스템에서도 적용할 수 있으므로 지속적인 연구가 필요하겠다.

### 참고 문헌

- [1] B. Mukherjee, "WDM-Based Local Lightwave Networks Part I: Single-Hop Systems," *IEEE Network*, pp.12-27, May 1992.
- [2] B. Mukherjee, "WDM-Based Local Lightwave Networks Part II: Multihop Systems," *IEEE Network*, pp.20-32, July 1992.
- [3] J. C. Lu and L. Kleinrock, "A Wavelength Division Multiple Access Protocol for High-Speed Local Area Networks with a Passive Star Topology," *Performance Evaluation*, Vol.16, pp.223-239, Nov. 1992.
- [4] Rajiv Ramaswami, "Multiwavelength Lightwave Networks for Computer Communication," *IEEE Comm. Mag.*, pp.78-88, Feb. 1993.
- [5] I. M. I. Habbab, M. Kavehrad and C. W.



- Sundberg, "Protocols for Very High-Speed Optical Fiber Local Area Networks Using a Passive Star Topology," *IEEE J. Lightwave Technology*, Vol. 5, pp.1782-1794, Dec. 1987.
- [6] N. Mehravari, "Performance and Protocol Improvements for Very High Speed Optical Fiber Local Area Networks Using a Passive Star Topology," *IEEE J. Lightwave Technology*, Vol. 8, pp.520-530, April 1990.
- [7] G. N. M. Sudhakar, N. D. Georganas and M. Kavehrad, "Slotted ALOHA and Reservation ALOHA Protocols for High-Speed Optical Fiber Local Area Networks Using Passive Star Topology," *IEEE J. Lightwave Technology*, Vol. 9, pp.1411-1422, Oct. 1991.
- [8] I.Chlamtac and A.Ganz, "Design Alternatives of Asynchronous WDM Star Networks," *Proceedings of ICC '89*, pp.739-744, 1989.
- [9] A.Ganz and Z.Koren, "WDM Passive Star-Protocols and Performance Analysis," *Proceedings of INFOCOM '91*, Bal H., FL, pp.991-1000, April 1991.
- [10] M.S.Chen, N.R.Dono and R.Ramaswami, "A Media-Access Protocol for Packet-Switched Wavelength Division Multiaccess Metropolitan Area Networks," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, Vol. 8, pp.1048-1057, Aug. 1990.
- [11] S.Tasaka, Performance Analysis of Multiple Access Protocols, MIT Press, 1986.
- [12] A. Alan, Introduction to Simulation and SLAM II, third edition, Pritsker.
- 1995년 : 연세대학교 전자과 대학원 (석사)  
1995년 3월~현재 : 연세대학교 전자과 대학원 박사과정  
<주관심 분야> WDM 네트워크, 네트워크 분석
- 허 남 조(Nam-Jo Heo) 정회원  
1998년 : 연세대학교 전자과(학사)  
현재 : 연세대학교 전자공학과 대학원 석사과정  
<주관심분야> 광통신망
- 이 재 용(Jai-Yong Lee) 정회원  
1977년 : 연세대학교 전자공학과 공학사  
1984년 : Iowa State Univ. 컴퓨터공학과 공학석사  
1987년 : Iowa State Univ. 컴퓨터공학과 공학박사  
1987년 6월~1984년 8월 : 포항공과대학교 전자계산학과 부교수  
1994년 9월~현재 : 연세대학교 전자공학과 교수  
<주관심 분야> 프로토콜 공학, 고속/멀티미디어 통신 프로토콜, 망관리
- 이 삼 배(Sang-Bae Lee) 정회원  
1985년 : 공군사관학교 통신공학과 공학사  
1961년 : 서울대학교 전자공학과 공학사  
1964년 : Stanford Univ. 전기공학과 공학석사  
1975년 : 영국 Newcastle Univ. 전자공학과 공학박사  
1969년~1979년 : 서울대학교 공과대학 조교수  
1979년 3월~현재 : 연세대학교 전자공학과 교수  
<주관심 분야> 회로 및 시스템, 컴퓨터 네트워크
- 조 원 흥(Wonhong Cho) 정회원  
1985년 2월 : 연세대학교 전자과 (학사)  
1987년 2월 : 연세대학교 전자과 대학원(석사)  
1994년 2월 : 연세대학교 전자과 대학원(박사)  
1994년~현재 : 군산대학교 컴퓨터과학과 조교수  
<주관심 분야> WDM 광통신망, 네트워크 분석 및 모델링
- 오 영 열(Young-Yul Oh) 정회원  
1993년 : 연세대학교 전자과 (학사)