

論文96-33A-2-8

# 수동 성형 구조의 고속 광통신망을 위한 WDMA 프로토콜 및 성능 평가에 관한 연구

## (Design and Performance Evaluation of WDMA Protocols for High-Speed Optical Network)

李 湖 淑 \*, 崔 馨 允 \*, 李 南 宰 \*, 朴 聖 宇 \*\*, 金 永 川 \*

(H.S. Lee, H.Y. Choi, N.J. Lee, S.W. Park, and Y.C. Kim)

### 요 약

과장 분할 다중화(WDM)는 고속 광통신망의 구축시 광섬유의 방대한 대역폭을 효율적으로 이용할 수 있도록 하는 기법이다. 수동 성형 구조를 가지는 WDM 단일홉망에서는 임의의 송신기와 수신기가 같은 과장으로 튜닝하기 위한 프로토콜이 필요하다.

본 논문에서는 전용의 제어 채널을 가지는 다중 과장망을 위한 2가지 WDMA 프로토콜을 제안하였다. 프로토콜 유형 I 은 한 슬롯 타임 당 미니슬롯의 수가 전체 노드의 수보다 작은 경우( $L_a < M$ )에 적용되는 변형된 ALOHA 기반 프로토콜이다. 이 프로토콜에서는 송신측 노드를 그룹화함으로써 주어진 타임 슬롯 상에서 보다 많은 미니슬롯을 제공할 수 있도록 하고, 이에 대한 채널 할당 프로토콜을 제안하였다. 한 슬롯 타임 당 미니슬롯의 수가 많을 수록 미니슬롯에서의 제어 패킷 충돌 확률이 줄어들게 되므로 높은 처리율을 얻을 수 있다. 프로토콜 유형 II 는 한 슬롯 타임 당 미니슬롯의 수가 전체 노드의 수보다 크거나 같은 경우( $L_a \geq M$ )에 적용되는 프로토콜로 미니슬롯 고정 할당 방식을 사용하였다. 또한 제안된 프로토콜들은 채널 할당 과정에서 공정성을 부여하기 위해 에이징 기법을 적용하였다. 제안된 프로토콜의 성능을 평가하기 위하여 해석적 분석 및 시뮬레이션을 실시하고 기존의 프로토콜과 비교 분석 하였다. 성능 평가 결과 제안된 프로토콜은 기존의 WDMA 프로토콜에 비해 채널당 처리율과 평균 전송 지연 시간의 측면에서 좋은 성능을 보였다.

### Abstract

In this paper, we propose two types of WDMA protocol for multi-wavelength optical networks that have a dedicated control channel. Protocol type I is designed for the case that the number of minislots is less than the number of nodes ( $L_a < M$ ). It is a modified version of ALOHA protocol. To improve the performance, it can provide more minislots by grouping of source nodes in a given time slot. Thus we can obtain better throughput since more minislots can reduce the probability of minislot collision. Protocol type II is designed for the case that the number of minislots is greater than or equal to the number of nodes ( $L_a \geq M$ ). Proposed protocols employ the aging scheme to guarantee a fairness in the process of channel allocation.

The performance of proposed protocols are evaluated in terms of throughput and delay with variations in offered load. Simulation results show that the proposed protocols have superior performance to conventional protocols.

\* 正會員, 全北大學校 컴퓨터工學科  
(Dept. of Computer Eng., ChonBuk National Univ.)

(Dept. of Info. and Comm. Eng., HanNam Univ)

\*\* 正會員, 韓南大學校 情報通信工學科

接受日字: 1995年3月24日, 수정완료일: 1996年1月9日

## I. 서 론

광섬유를 이용한 통신기술의 발전으로 동화상이나 HDTV, 멀티 미디어 등 사용자가 요구하는 다양한 정보를 고속 전송 매체를 통해 서비스 할 수 있게 되었다. 광섬유의 특징은 빠른 전송 속도와 신뢰성에 있다. 단일 모드 광섬유의 경우 수십 Tbps 정도의 방대한 대역폭을 제공할 수 있으나 사용자가 요구하는 전송 서비스의 대역폭은 대체로 수 Gbps 정도로 광섬유의 대역폭에 비해 약  $10^4$ 배 정도의 차이가 생긴다. 즉 사용자와 관련된 전자적 처리장치의 최고 속도가 전송 매체의 속도를 따라가지 못하므로 전자적 인터페이스 부분에서 심한 병목현상이 발생하게 된다.<sup>[1,2]</sup> 이를 해결하기 위하여 광섬유의 방대한 대역폭을 여러 개의 채널로 다중화하는 기법중의 하나인 파장 분할 다중화(Wavelength Division Multiplexing : WDM) 기법이 최근 활발히 연구되고 있다.<sup>[1,3,4]</sup> 파장 분할 다중화 기법은 단일 모드 광섬유의 빛의 파장 영역중 손실 및 간섭이 적은 영역을 조밀하게 분할하여 채널을 다중화하는 방법으로, 각 채널은 전자적 처리 장치의 최고 속도로 동작한다.

일반적으로 쓰이는 WDM망의 물리적 구조로 수동 성형(Passive Star)구조를 들 수 있다. 이 구조는 전력 분배적 측면에서 손실이 작고 탭핑(tapping)에 따른 부가적 손실이 없어 커플러에 따로 전원이 필요치 않으므로 망에 신뢰성을 높여준다. 또한 Passive한 특성은 중간에 어떤 전기-광 신호(또는 그 반대)의 변환도 요구하지 않으므로 WDM 망의 물리적 토폴로지로서 적절한 구조로 제시되고 있다.<sup>[1,4,6]</sup> 수동 성형 구조를 가지는 WDM 단일홉 망은 튜닝 가능한 송/수신기 쌍을 이용하여 동적으로 파장을 액세스하므로써 한 홉만으로 통신이 가능한 구조이다.<sup>[1,3,6,7]</sup> 이러한 망구조에서는 송/수신측 노드가 통신할 채널을 할당받고 송/수신기를 같은 파장으로 튜닝하기 위한 프로토콜이 필요하다.

기존에 제시된 프로토콜은 전용 제어 채널을 두어 사전에 전송 관계를 설정한 뒤 데이터를 전송하는 방식으로 Slotted ALOHA에 근거하여 제어 채널을 액세스하고 전송할 데이터 채널을 예약한다.<sup>[9,10,14]</sup> 이때 각 채널은 모두 슬롯화 되어 동기되며, 특히 제어 채널은 한 타임 슬롯 안에 여러 개의 미니슬롯을 제공하여 제어 패킷을 전송할 수 있도록 한다. 이러한 구조

는 I-TDMA<sup>[9]</sup>, DT-WDMA<sup>[14]</sup>와 같은 TDMA에 근거한 방식들에 비해 비교적 좋은 채널 이용률을 보이고 전송 지연 성분도 짧다.<sup>[8,11]</sup> 그러나 미니슬롯 액세스시의 제어 패킷 충돌 현상과 한 슬롯 안에 같은 수신측 주소가 2개 이상 할당되어 일어나는 수신측 충돌 현상은 망의 성능을 저하시키는 요인이 된다. 따라서 미니슬롯 충돌 확률을 줄이고 수신측 충돌 발생시 전송의 공정성을 보장해줄 수 있도록 하는 효율적인 프로토콜이 필요하다.

본 논문에서는 이와같은 요구사항을 기반으로 수동 성형 구조의 고속 광통신망을 위한 두 종류의 WDMA 프로토콜을 제안하였다. 제안된 프로토콜은 제어 채널의 한 슬롯 타임 당 미니슬롯의 수( $L_a$ )와 전체 노드 수( $M$ )의 관계에 따라 유형이 나뉘어진다. 프로토콜 유형 I은 미니슬롯 수가 노드 수보다 작은 경우( $L_a < M$ )에 적용되는 프로토콜이다. 이 프로토콜은 송신 노드를 그룹화하므로써 송신 노드를 위한 주소 비트 수를 줄여 제한된 데이터 패킷 길이 내에서 더 많은 미니슬롯을 생성할 수 있도록 하였다. 따라서 제어 패킷의 충돌 발생 확률을 줄여 성능을 향상시킬 수 있다. 프로토콜 유형 II는 미니슬롯 수가 노드 수보다 크거나 같은 경우( $L_a \geq M$ )에 대한 프로토콜이다. 이 프로토콜은 각 노드에 미니슬롯을 고정 할당하여 미니슬롯에서의 충돌을 제거하고, 전송을 시도한 횟수가 많은 노드에 우선 순위를 부여할 수 있도록 에이징(aging) 기법을 사용하여 전송 순서의 공정성을 보장할 수 있도록 하였다.

제안된 프로토콜의 성능 분석을 위하여 확률 모델을 이용하여 해석적 분석을 실시하고, 다양한 시뮬레이션을 통해 기존 프로토콜과의 성능을 비교하였다. 시뮬레이션 결과로 offered load에 따른 채널당 패킷 처리율, 채널당 처리율 대 전송 지연 시간, 그리고 재전송 확률에 따른 채널당 패킷 처리율 및 전송 지연 시간을 구하였다.

본 논문은 모두 5장으로 이루어져 있다. 2장에서는 본 논문에 사용된 WDM 망의 구조에 대하여 서술하고, 3장에서는 본 논문에서 제안한 두 종류의 프로토콜을 기술하였다. 4장에서는 해석적 방법과 시뮬레이션을 통하여 제안한 프로토콜의 성능을 검증하고 기존 프로토콜과의 비교 및 분석 결과를 보였으며, 5장에서 결론을 맺었다.

## II. 수동 성형 WDM 망의 구조

본 논문에서 사용하는 망의 물리적 구조는 그림 1과 같은 수동 성형 구조를 사용한다. 모든 노드는 두개의 광케이블을 통하여 스타 커플러(star coupler)에 연결되고, 각 케이블은 노드의 송신기와 수신기측에 각각 연결된다. 송신기와 수신기측이 독립된 케이블을 사용하므로 데이터의 송/수신이 동시에 이루어질 수 있다. 각 노드는 두 쌍의 송/수신기를 갖고 있다. 한 쌍은 제어 채널의 파장에 튜닝되어 있으며, 다른 한 쌍은 데이터 채널을 동적으로 액세스하기 위한 송/수신기 쌍으로 임의의 파장으로 튜닝이 가능하다.

본 논문에서는 수동 성형 구조의 WDM 단일홉망에서 그림 2와 같은 슬롯화된 채널 구조를 사용하였다. [7] [8] 등에서 제시된 위 구조는 사전 전송 관계 설정 과정과 데이터 전송 과정이 파이프 라인 식으로 오버랩되므로 높은 채널당 처리율을 얻을 수 있다. 각 케이블은  $N+1$ 개의 파장( $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_N$ )으로 나누어지며, 각 파장은 하나의 독립된 채널이 된다.  $\lambda_0$ 는 제어 채널로 사용되고  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ 은 데이터 채널로 사용된다. 각 노드는  $\lambda_0$ 에 고정된 송/수신기(transceiver)를 통해 제어 채널을 액세스하고,  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ 의 범위로 튜닝할 수 있는 송/수신기를 통해 데이터 패킷을 송수신한다.

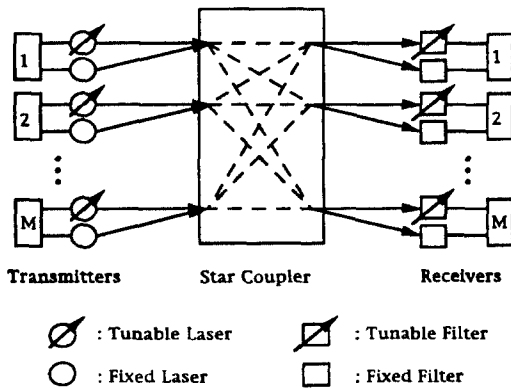
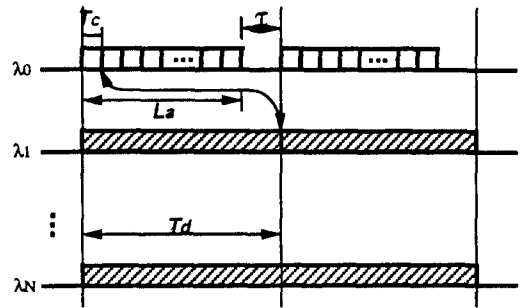


그림 1. Passive star topology를 갖는 망의 구조  
Fig. 1. Network architecture with passive star topology.

데이터 채널과 제어 채널은 데이터 패킷 전송 시간( $T_d$ )과 같은 일정한 크기의 타임 슬롯으로 나뉘어져

동기된다. 제어 채널의 한 타임 슬롯은 다시 제어 패킷 전송 시간( $T_c$ )과 같은 여러개의 미니슬롯( $L_u$ )으로 나뉘어져 동기되며, 타임 슬롯마다 끝 부분에는 전파 지연 시간( $\tau$ )을 포함하고 있다. 데이터 패킷은 한 타임 슬롯의 시작시점에서 전송을 시도하고 제어 패킷은 미니슬롯의 시작시점에서 전송을 시도하게 된다. 모든 노드는 제어 채널에 할당된 전용의 송/수신기를 가지고 있으므로 항상 제어 채널을 감시하게 된다. 따라서 어느 미니슬롯이나  $\tau$  시간 후에는 제어 패킷의 성공적인 송/수신 여부를 알 수 있다.



- $L_u$  : 미니슬롯 수
- $\lambda_0$  : 제어 채널
- $\lambda_1 - \lambda_N$  : 데이터 채널
- $T_d$  : 데이터 패킷 전송 시간
- $T_c$  : 제어 패킷 전송 시간
- $\tau$  : 전파 지연 시간

그림 2. 채널 구성과 전송 과정  
Fig. 2. Channel architecture and trans-

위 구조를 갖는 WDM 망의 전송은 다음과 같은 과정을 통해 이루어진다. 먼저 전송을 하고자 하는 노드는 제어 채널의 미니슬롯에 송/수신측 주소를 신고 전파 지연 시간이 지난 후 모든 노드가 제어 정보를 수신하게 되면 성공한 제어 패킷에 대해 채널을 할당받아 다음 타임 슬롯에서 데이터 패킷을 전송한다. 이 때 2개 이상의 노드가 같은 미니슬롯을 액세스하면 제어 패킷의 충돌이 일어나게 되고 제어 패킷의 전송에 실패한다. 또한 한 타임슬롯 내에 같은 수신측 주소가 2개 이상 나타나면 한 노드에서 수신 가능한 수신기는 1개 뿐이므로 나머지 패킷의 전송은 실패하게 되는데 이를 수신측 충돌이라 한다.

### Ⅲ. 파장 분할 다중 액세스 프로토콜

#### 1. 프로토콜 유형 I

제안된 프로토콜 유형 I은 한 타임 슬롯 동안의 미니슬롯 수( $L_n$ )가 전체 노드 수( $M$ ) 보다 작은 경우( $L_n < M$ )에 적용되는 프로토콜이다. 높은 채널 이용률을 얻기 위해서는 매 타임 슬롯마다 전체 채널 수( $N$ )보다 크거나 같은 수의 제어 패킷이 미니슬롯에서 충돌을 일으키지 않고 전송에 성공해야 한다. 이 경우 한 타임 슬롯내에 보다 많은 수의 미니슬롯이 제공될수록 제어 패킷의 충돌 확률이 줄어들게 되어 좋은 성능을 기대할 수 있다. 따라서 본 프로토콜에서는 미니슬롯의 갯수를 늘리기 위한 방법으로 망내 노드를 그룹화하였다.

사전 전송 관계 설정을 위한 제어 패킷은 송신측의 주소와 수신측의 주소를 내용으로 하며, 그룹화하지 않았을 경우에 제어 패킷의 전송을 위해 필요한 미니슬롯의 크기는 각 송/수신측 주소를 나타내기 위해 필요한 최소의 비트수로 다음과 같다.

$$B_c = 2 \times \lceil \log_2 M \rceil \quad (1)$$

여기서  $\lceil x \rceil$ 는  $x$ 보다 작지 않은 정수를 나타낸다. 위와 같은 제어 패킷의 크기를 가질 때 한 타임 슬롯당 미니슬롯의 수가  $L_n$  라면 타임 슬롯 당 필요한 전체 비트 수는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$B_s = B_c \times L_n \quad (2)$$

프로토콜 유형 I은 노드를 그룹화하여 각 그룹을 미니슬롯에 고정 할당하므로써 송신 노드 주소에 필요한 비트 수를 줄여 더 많은 미니슬롯을 만들 수 있다. 이 경우 송신측의 주소를 표시하기 위해서는 그룹내에서만 노드 구분을 할 수 있으면 되므로 송신측 노드의 주소를 표시하기 위한 비트수가 줄어들게 된다. 이렇게 하여  $L_n$  개의 미니슬롯을 만들 수 있다면  $M/L_n$  개의 노드가 한 그룹을 이루게 되고, 같은 그룹에 속한 노드는 특정 미니슬롯을 공유한다. 즉, 미니슬롯에는 고유한 그룹이 고정 할당되어 있어 임의의 노드가 전송을 하고자할 경우 자신이 속한 그룹의 미니슬롯까지 기다렸다가 제어 패킷을 전송한다. 이 때 그룹당 최대 노드 수는 식(3)과 같이 나타낼 수 있고,

$$m = \lceil M/L_n \rceil \quad L_n > 0 \quad (3)$$

제어 패킷 크기는 식(4)와 같다.

$$B_{gc} = \lceil \log_2 m \rceil + \lceil \log_2 M \rceil \quad (4)$$

따라서 한 타임 슬롯당 필요한 전체 비트 수는 식(5)와 같이 구성할 수 있다.

$$B_{gt} = B_{gc} \times L_n \quad (5)$$

만약 식(2)와 식(5)가 같다면  $B_c > B_{gc}$ 이기 때문에  $L_n < L_n'$ 인 관계가 성립하여 결과적으로 더 많은 미니슬롯을 만들 수 있다. 한 타임 슬롯 내에 제공되는 미니슬롯 수가 많아지고 각 미니슬롯마다 접근할 수 있는 노드가 정해져 있으므로 미니슬롯에서의 충돌 확률이 감소되어 성능을 향상시킬 수 있다. 같은 그룹에 속한 2 개 이상의 노드가 동시에 제어 패킷 전송을 시도할 경우에는 미니슬롯에서 충돌이 발생하는데 이 때에는 다음 타임 슬롯에서 확률적( $Pr$ )으로 재시도하여 충돌을 회피할 수 있도록 했다.

프로토콜 유형 I에서 데이터 패킷의 전송 과정은 다음과 같다.

전송을 원하는 노드는 자신이 속한 그룹에 할당된 미니슬롯에 송신측 노드의 그룹내 주소와 목적지 노드의 주소를 내용으로 하는 제어 패킷을 싣는다. 모든 노드는 제어 채널을 감시하고 있기 때문에 제어 패킷이 실린 후  $\tau$  시간 후에는 제어 패킷을 수신한다. 수신한 미니슬롯에 그룹내 2 개 이상의 노드가 제어 패킷의 전송을 시도하였으면 충돌이 발생하여 제어 패킷의 전송에 실패하게 된다. 그 그룹에 속한 노드는 다음 타임 슬롯에서 정해진 재전송 확률에 따라 제어 패킷의 재전송을 시도한다. 충돌이 발생하지 않고 제어 패킷의 전송에 성공하였으면 채널 할당 알고리즘을 통해  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$  순으로 데이터 패킷을 전송할 채널을 할당한다. 각 미니슬롯은 우선 순위를 위한 카운터를 관리하는데 카운터 값이 큰 패킷이 우선적으로 할당되고 카운터 값이 같을 경우 먼저 전송된 제어 패킷의 노드가 할당된다. 만일 성공적으로 수신된 제어 패킷이 이전에 수신된 제어 패킷과 중복되는 수신측 주소를 갖고 있어 수신측 충돌이 발생하면 카운터 값이 큰 미니슬롯에 할당된 노드가 전송할 채널을 할당받으며, 카운터 값이 같을 때는 먼저 도착한 미니슬롯에 할당된 노드가 선택된다. 수신측 충돌 발생으로 채널을 할당 받지 못한 경우나 성공한 제어 패킷의 수가 전체 채널의 수보다 많아 채널을 할당 받지 못한 경우 해당 미니슬롯의 카운터 값을 증가시켜 주어 다음 타임 슬롯에서 채널 할당시 높은 우선 순위를 갖도록 한다. 이와 같이

카운터를 사용한 에이징(aging) 개념의 채널 할당 알고리즘을 적용하면 전송을 시도한 횟수가 많은 노드에 우선 순위가 부여되므로 채널 할당시 공정성을 부여할 수 있다. 채널 할당이 완료되면 다음 타임 슬롯의 시작 시점에서 전송을 시작한다. 제어 패킷의 전송과 데이터 패킷의 전송 과정은 그림 2와 같이 오버랩되어 동시에 수행된다. 그림 3에 채널 할당 알고리즘을 의사 코드로 기술하였다.

```

begin
  initialize C# ;
  initialize M# ;
while M# ≤ La do begin
  if minislot[M#] = valid then begin
    if MCB[M#] = 1 then minislot collision detect ;
    else begin
      if C# < N then begin
        if destination collision occurred = true then begin
          if MC[allocated minislot number] < MC[M#] then
            begin
              allocate minislot M# to channel number of allocated
                minislot ;
              increase MC[allocated minislot number] ;
            end
          else increase MC[M#] ;
        end
      else begin
        allocate minislot M# to channel C# ;
        increase C# ;
      end
    end(if)
  else begin
    if smallest MC of allocated minislots < MC[M#] then
      begin
        if destination collision occurred = false then begin
          allocate minislot M# to the channel that has the
            smallest MC and largest minislot number ;
          increase MC of smallest MC and largest minislot
            number ;
        end
        else increase MC[M#] ;
      end
    else increase MC[M#] ;
  end(else)
end(if)
increase M# ;
end(while)

start transmission
endmain

MCB : Minislot Collision Bit
C# : Channel Number
M# : Minislot Number
MC : Minislot Counter
N : total number of channels
La : total number of minislots in one time unit
    
```

그림 3. 프로토콜 유형 I의 채널 할당 알고리즘  
 Fig. 3. Channel allocation algorithm for protocol I.

2. 프로토콜 유형 II

제안된 프로토콜 유형 II는 한 타임 슬롯 동안의 미

니슬롯 수가 전체 노드 수보다 크거나 같을 경우( $L_a \geq M$ )에 적용되는 프로토콜이다.  $L_a$  가  $M$  보다 크거나 같을 경우에는 각 노드에 하나의 미니슬롯을 고정적으로 할당할 수 있다. 미니슬롯 고정 할당 방법은 미니슬롯에서 제어 패킷의 충돌이 일어나지 않으므로 충돌로 인한 재전송을 제거하여 전송 지연을 줄이고 처리율을 향상시킬 수 있다. 이 프로토콜에서의 전송 지연은 수신측 충돌이 발생했거나, 전송에 성공한 제어 패킷의 수가 채널 수보다 많아 채널을 할당받지 못한 경우에 발생한다. 전송이 지연된 노드에 대해서는 에이징 기법을 사용하여 채널 할당에 우선 순위를 부여함으로써 전송의 공정성을 유지할 수 있도록 하였다.

프로토콜 유형 II에서 각 노드는 고정 할당된 미니슬롯과 전송의 공정성 유지를 위한 카운터(M개)를 관리하며, 카운터의 초기상태는 0으로 설정하였다. 미니슬롯을 각 노드에 고정적으로 할당하기 때문에 각 노드는 미니슬롯으로부터 송신 노드의 주소를 알 수 있다. 따라서 사용되는 제어 패킷에는 수신 노드의 주소만이 포함된다.

이를 기반으로 프로토콜 유형 II는 다음과 같은 데이터 패킷 전송 과정에 의해 전송된다.

전송을 원하는 노드는 자신에게 할당된 미니슬롯에 제어 패킷을 실는다. 모든 노드는 제어 채널을 감시하고 있기 때문에 제어 패킷이 실린 후 전파 지연 시간( $\tau$ ) 후에는 제어 패킷을 수신하게 된다. 성공적으로 수신된 제어 패킷에 대하여 채널 할당 알고리즘을 통해  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$  순으로 채널을 할당한다. 이 경우 카운터 값이 큰 노드가 우선적으로 할당되며 카운터 값이 같은 경우는 먼저 도착한 노드가 채널을 할당받는다. 수신된 제어 패킷이 이전에 수신된 제어 패킷과 중복되는 수신측 주소를 가질 경우에는 수신측 충돌이 발생한다. 이 때는 카운터 값이 큰 노드가 우선적으로 선택되며, 카운터 값이 같을 때는 먼저 도착한 미니슬롯에 할당된 노드가 선택된다.

이와 같은 방식으로 한 타임 슬롯 내의 모든 제어 패킷에 대하여 수신측 충돌과 카운터 값을 감안하여 순차적으로 최대 N개의 채널을 할당할 수 있다. 수신측 충돌로 전송되지 못했거나, 채널 수보다 전송에 성공한 제어 패킷의 수가 많아서 채널을 할당받지 못한 제어 패킷에 대해서는 해당 미니 슬롯의 카운터 값을 증가시키는 에이징(aging) 기법을 적용한다. 따라서 다음 타임 슬롯에서 채널 할당시 높은 우선 순위로 참

여하게 되므로 전송의 공정성을 유지할 수 있다.

채널 할당이 끝나면 다음 타임 슬롯의 시작 시점에 서 할당된 채널을 통해 데이터 패킷의 전송을 시작한다. 성공적으로 채널을 할당받은 노드의 카운터는 다시 초기화된다. 제어 패킷과 데이터 패킷의 전송 과정은 앞의 그림 2와 같이 수행된다.

#### IV. 성능 분석

##### 1. 해석적 분석

###### 1) 프로토콜 유형 I

프로토콜 유형 I은 한 타임 슬롯당 미니슬롯의 수  $L_i$ 가 망내 전체 노드의 수  $M$ 보다 작은 경우로 노드를  $L_i$  개의 그룹으로 나누었을 때 한 그룹안의 노드의 수  $m$ 은  $M/L_i$  이다.

각 노드가 전송을 시도할 확률을  $P_m$  라고 하면 망내의 전체 offered load는 식(6)과 같다.

$$TL_m = P_m \cdot M \tag{6}$$

임의의 송신측 노드가 망의 주어진 offered load에 서 제어 패킷 전송에 성공할 확률은 그룹내의 노드 중 오직 하나의 노드만이 전송을 시도할 확률과 같다. 충돌이 발생하지 않고 미니슬롯 액세스에 성공할 확률은 식(7)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_m = \binom{m}{1} P_m (1 - P_m)^{m-1} \tag{7}$$

전체  $L_i$  개의 미니슬롯 중  $i$  개가 제어 패킷의 전송에 성공할 확률은 식(8)과 같이 구해진다.

$$P_s = \binom{L_i}{i} P_m^i (1 - P_m)^{L_i - i} \tag{8}$$

미니슬롯 액세스에 성공한  $S$  개의 제어 패킷 중 특정 수신측 주소가  $i$ 번 할당받은 확률은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$P_{i|S}(S) = \binom{S}{i} \left(\frac{1}{M}\right)^i \left(1 - \frac{1}{M}\right)^{S-i} \tag{9}$$

여기에서 수신측 충돌이 발생하지 않으려면 특정 수신측 주소가  $S$  개의 슬롯 중 오직 하나에 할당되어야 한다. 그 확률  $P_{i|S}$ 은 식(10)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{i|S}(S) = \binom{S}{i} \left(\frac{1}{M}\right)^i \left(1 - \frac{1}{M}\right)^{S-i} \tag{10}$$

전체 수신측 충돌 확률은 식(11)과 같다.

$$P_{i|S}(S) = \sum_{i=0}^S \binom{S}{i} \left(\frac{1}{M}\right)^i \left(1 - \frac{1}{M}\right)^{S-i} \tag{11}$$

성공한  $S$  개의 미니슬롯 중 한 노드가 수신측 충돌로 인해 잃게 되는 평균 제어 패킷 수는 식(12)과 같다.

$$N_{i|S}(S) = \sum_{i=1}^S \binom{S}{i} \left(\frac{1}{M}\right)^i \left(1 - \frac{1}{M}\right)^{S-i} \cdot (i-1) \tag{12}$$

$S$  개의 성공한 미니슬롯 중 수신측 충돌이 발생한 전체 제어 패킷의 수는 식(13)과 같다.

$$TN_{i|S}(S) = M \cdot N_{i|S}(S) \tag{13}$$

타임 슬롯당 채널을 할당받을 수 있는 패킷의 수는 성공한 제어 패킷의 수  $S$ 에서 수신측 충돌이 발생한 패킷수를 뺀 값이다. 그 값이  $N$ 보다 크면  $N$  개의 제어 패킷만이 원하는 채널을 할당받을 수 있다. 따라서 전체 시스템 처리율  $T_i$ 는 (13)을 이용하여 식(14)과 같이 구할 수 있다.

$$T_i = \sum_{i=1}^a P_s (i - TN_{i|S}(i)) + \sum_{i=a+1}^{L_i} (P_s \cdot M) \tag{14}$$

여기서  $a$ 는 수신측 충돌을 고려하여 실제 성공한 미니슬롯의 수가  $N$ 과 같아지는 시점의  $i$ 값으로 수신측 충돌 확률이 적을 경우에는  $N$ 으로 근사화된다. 채널당 처리율  $T_m$ 은 식(15)과 같이 구할 수 있다.

$$T_m = \frac{T_i}{N} \tag{15}$$

###### 2) 프로토콜 유형 II

프로토콜 유형 II는  $L_i$ 가  $M$ 보다 크거나 같은 경우이다. 미니슬롯이 각 노드에 고정 할당되어 있으므로 제어 패킷의 충돌은 일어나지 않는다. 따라서 전체 처리율에 영향을 미치는 요소는 수신측 충돌이다.

망내의 전체 offered load가 앞의 식(6)과 같다고 할 때 전송을 원하는 노드가 미니슬롯의 액세스에 성공할 확률은 1이므로 주어진 타임 슬롯내에 들어오는 제어 패킷의 수는 평균  $TL_m$  개가 된다. 이 때 수신측 충돌이 일어날 확률은 앞 절의 식(11)에  $TL_m$ 를 대입하여 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$P_{i|TL_m}(TL_m) = \sum_{i=0}^{TL_m} \binom{TL_m}{i} \left(\frac{1}{M}\right)^i \left(1 - \frac{1}{M}\right)^{TL_m - i} \tag{16}$$

주어진 offered load 에서 노드당 수신측 충돌 발생

으로 손실되는 평균 제어 패킷의 수는 4.1.1절의 식 (12)에  $TL_o$ 를 대입하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$N_{dc}(TL_o) = \sum_{i=1}^{TL_o} \binom{TL_o}{i} \left(\frac{1}{M}\right)^i \left(1 - \frac{1}{M}\right)^{TL_o-i} * (i-1) \quad (17)$$

따라서 주어진 offered load에서 수신측 충돌이 발생한 전체 제어 패킷의 수는 식(18)과 같다.

$$TN_{dc}(TL_o) = M \times N_{dc}(TL_o) \quad (18)$$

주어진 offered load에서 수신측 충돌이 발생하지 않고 전송에 성공한 미니슬롯의 갯수를 이용하여 전체 망의 처리율을 구할 수 있다. 그러나 성공한 미니슬롯의 갯수가 N 이상이면 채널을 할당 받지 못하는 제어 패킷이 있으므로 이를 고려하여 다음 식과 같이 처리율을 구할 수 있다.

$$T_i = \begin{cases} TL_o - TN_{dc}(TL_o) & a < N \\ N & a \geq N \end{cases} \quad (19)$$

여기서  $a = TL_o - TN_{dc}(TL_o)$ 이다.

### 2. 시뮬레이션 결과

제한한 프로토콜들의 시뮬레이션을 위한 기본 가정은 다음과 같다. 각 노드는 타임 슬롯에 동기되어 트래픽을 발생시킨다. 한 타임 슬롯에 한 노드에서 발생할 수 있는 트래픽 양은 하나 이하이며, 트래픽 발생률은 포아송 분포를 따른다.  $L_o < M$ 의 경우, 미니슬롯에서 제어 패킷의 충돌이 발생할 수 있는데 미니슬롯 충돌로 제어 패킷 전송에 실패한 노드는 다음 타임 슬롯에 확률  $P_r$ 로 재전송을 시도한다. 제어 패킷의 충돌이나 수신측 충돌, 또는 채널 수보다 많은 제어 패킷 성공으로 인해 채널을 할당받지 못했을 때 전송 지연이 발생된다. 전송 지연 시간은 송신측 노드에 패킷이 발생한 시점까지를 계산하여 데이터 패킷 전송 시간으로 일반화하였다. 이 때 전송 신호의 전파 지연 시간은 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정하였다.

제한된 프로토콜과의 성능 비교를 위한 기존의 방법은 [8]에서 제안한 BRP(Basic Reservation Protocol)이다. 이 프로토콜은 ALOHA에 근거한 프로토콜로서 채널을 미리 예약하는 방식을 사용하여 기존의 ALOHA-Based 프로토콜에 비해 비교적 좋은 성능을 보이는 것으로 알려져 있다. BRP는 미니슬롯

수가 노드 수보다 작을 때 그룹화 방법을 사용하지 않았으며, 전송을 원하는 노드는  $L_o$  개의 미니슬롯 중 임의로 하나의 미니슬롯을 선택하여 제어 패킷을 전송한다.

그림 4와 그림 5에서는 4.1.1 절의 식(15)과 4.1.2 절의 식(19)의 N으로 정규화한 해석적 분석 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 두 결과값이 근소한 차이를 보이며 근접하므로 본 논문에서 사용된 시뮬레이터의 타당성을 확인하고 다양한 경우에 대한 시뮬레이션을 실시하였다.

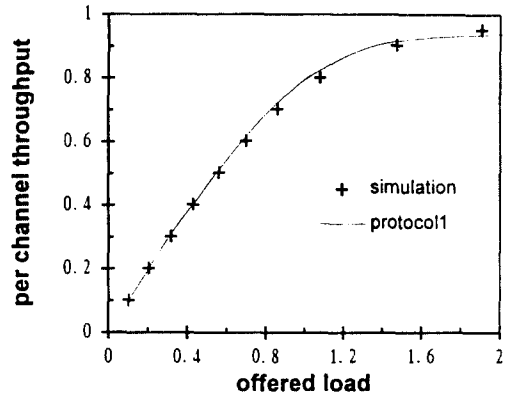


그림 4. 프로토콜 유형 I의 해석적 분석 결과와 시뮬레이션 결과

Fig. 4. Analysis and simulation results of protocol I.

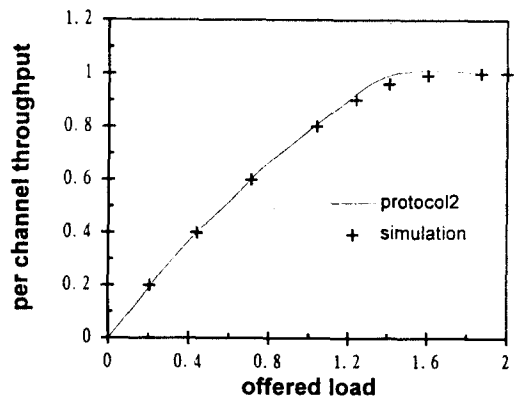


그림 5. 프로토콜 유형 II의 해석적 분석 결과와 시뮬레이션 결과

Fig. 5. Analysis and simulation results of protocol II.

그림 6은 프로토콜 I, 프로토콜 II, 기존 방법, 그리고 slotted ALOHA를 비교한 결과이고, 그림 7는 프로

도콜 I, 프로토콜 II, 그리고 기존 방법을 비교한 결과이다.  $M=70, N=10$ 으로 하고, 기존 방법의 미니슬롯 수를 30개로 했을 때 프로토콜 I은  $L_n=52$  를 생성할 수 있다. 또한 프로토콜 II는  $L_n=70$ 개로 설정하여 비교하였다. 기존 프로토콜과 제안된 프로토콜 I에서 제어 패킷 충돌 발생시 재전송 확률( $Pr$ )은 0.5로 하였다. 그림 4.3은 offered load에 따른 채널당 패킷 처리율이다. slotted ALOHA의 최대 처리율(약 0.37)에 비교해 볼 때 미니슬롯을 노드와 관련시켜 할당하는 제안된 프로토콜들과 기존의 프로토콜이 더 좋은 처리율을 보이고 있다. 기존 프로토콜의 최대 처리율이 0.9일 때 프로토콜 I과 프로토콜 II의 처리율은 0.98로 나타나 제안한 프로토콜이 기존의 방법에 비해 처리율이 향상되었음을 알 수 있다. 그림 7는 처리율에 따른 평균 전송 지연 시간을 비교한 결과이다. 기존 방법은 처리율이 0.89일 때 전송 지연 시간이 급격히 증가했다. 반면 프로토콜 I과 프로토콜 II의 전송 지연 시간은 기존 방법에 비해 짧은 전송 지연 시간을 보였다.

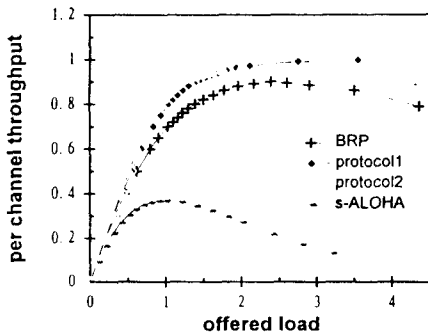


그림 6. Offered load에 따른 채널당 패킷 처리율  
Fig. 6. Per channel throughput v.s offered load.

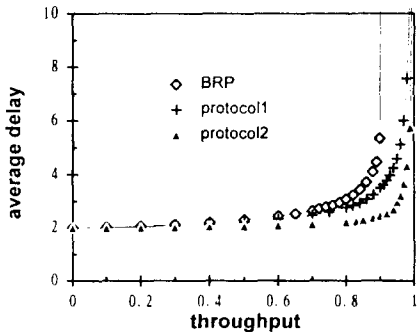


그림 7. 채널당 처리율에 따른 평균 전송 지연 시간  
Fig. 7. Average delay v.s throughput.

그림 8과 그림 9는  $M=90, La=30, N=10$ 이고, 재전송 확률을  $Pr=0.2, 0.33, 0.5$ 로 변화시켰을 때 프로토콜 I의 채널당 패킷 처리율과 평균 전송 지연 시간을 나타낸 그래프이다.  $L_n < M$ 이므로 그룹화에 의한 그룹당 노드수는 3개이며 각각의 그룹에 하나의 미니슬롯을 고정 할당하였다. 그림 8로부터  $Pr=0.33$ 일 때가 전 구간에서 가장 높은 처리율을 나타냄을 알 수 있다. Offered load가 낮을 때는  $Pr=0.2$ 와  $Pr=0.5$ 일 때 비슷한 처리율을 나타냈으나 offered load가 증가함에 따라  $Pr=0.5$ 일 때가 더 높은 처리율을 나타냈다.  $Pr=0.2$ 일 때는 미니슬롯 충돌이 적게 발생하나 낮은 재전송 시도로 인해 처리율이 낮음을 알 수 있다. 그룹당 노드의 수에 따라 최적의 성능을 보일 수 있도록 재전송 확률을 정의하는 것이 중요하다. 그룹당 노드의 수가 3일 때는 1/3의 재전송 확률에서 최적의 성능을 보임을 알 수 있었다.

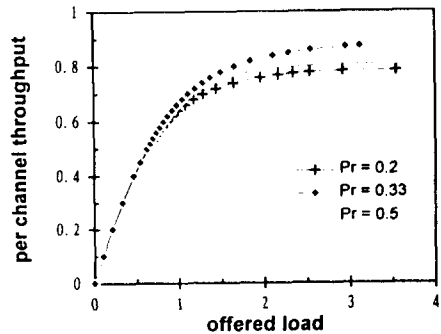


그림 8. 프로토콜 유형 I의 재전송 확률에 따른 채널당 패킷 처리율  
Fig. 8. Per channel throughput with various retransmission probability on protocol I.

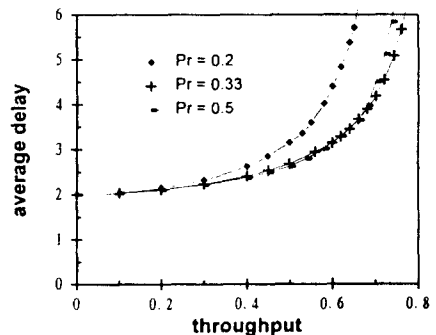


그림 9. 프로토콜 유형 I의 재전송 확률에 따른 전송 지연 시간  
Fig. 9. Average delay v.s throughput with various retransmission probability.



그림 9는  $P_r$ 이 변할 때 처리율에 따른 전송 지연 시간의 변화를 나타낸 그래프이다. 처리율 0.6 이하에서는  $P_r=0.5$ 일 때가  $P_r=0.33$ 일 때보다 작은 전송 지연 시간을 보였으나, 처리율이 높아질수록 전송 지연 시간이 커짐을 알 수 있다.  $P_r=0.5$ 일 때 낮은 처리율에서는 offered load가 작아 미니슬롯 충돌 발생 확률이 작으나 offered load가 증가함에 따라 미니슬롯 충돌 발생 확률이 커지기 때문이다. 그림 8와 그림 9의 결과로 볼 때 망의 offered load에 적합한 재전송 확률을 결정하는 것이 망의 설계시 중요한 요소임을 알 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 수동 성형 구조의 고속 광통신망을 위한 두 종류의 파장 분할 다중 액세스 프로토콜을 제안하였다. 제안된 프로토콜은 제어 패킷 전송을 위해 전용의 제어 채널을 사용하고 슬롯화된 채널 구조를 가지는 수동 성형망에 적용된다.

프로토콜 유형 I은 미니슬롯 수가 노드 수보다 작은 경우( $L_n < M$ )에 적용되는 프로토콜로 송신 노드를 그룹화하여 제어 패킷의 길이를 줄이므로써 한 타임 슬롯내에 더 많은 미니슬롯을 제공한다. 따라서 제어 패킷의 충돌 확률이 줄어들게 되어 망의 성능을 향상시킬 수 있다. 프로토콜 유형 II는 미니슬롯 수가 노드 수보다 크거나 같을 경우( $L_n \geq M$ )에 적용되는 프로토콜로 미니슬롯 고정 할당 방식을 통해 제어 패킷의 충돌을 제거하였다. 제안된 프로토콜들은 에이징 기법을 사용하여 전송이 지연된 노드에 대하여 높은 우선 순위를 부여하므로써 채널 할당시 공정성을 보장할 수 있다.

제안된 프로토콜의 성능 평가를 위하여 확률 모델을 사용한 해석적 분석 및 offered load에 따른 채널당 패킷 처리율, 채널 처리율에 따른 전송 지연 시간, 그리고 재전송 확률에 따른 채널당 패킷 처리율 및 전송 지연 시간을 시뮬레이션을 통하여 측정하였다.  $M=70$ ,  $N=10$ 일 때 성능 평가 결과 기존의 프로토콜 ( $L_a=30$ )에 비하여 프로토콜 유형 I ( $L_a=52$ )은 최고 8%, 프로토콜 유형 II ( $L_a=70$ )는 최고 12%의 처리율 향상을 보였으며, 전송 지연 시간의 급격한 증가 시점도 각각 4%, 7.2% 커졌다.

망이 고속화되어 감에 따라 전파 지연 시간 대 데이

타 패킷 전송 시간의 비율이 커져 전파 지연 시간이 망의 성능에 많은 영향을 미친다. 따라서 향후에는 전파 지연 시간을 고려한 채널 액세스 프로토콜의 연구가 필요하다고 사료된다.

## 감사의 글

\* 본 연구는 한국전기통신공사의 장기기초연구과제의 지원으로 수행되었습니다. 연구를 위해 협력해주신 한국통신 연구개발원 광통신기초연구팀과 정준, 이봉영 박사님께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] B. Mukherjee, "WDM based Local Lightwave Networks Part I : Single-Hop Systems," *IEEE Network*, May 1992.
- [2] B. Mukherjee, "WDM based Local Lightwave Networks Part II : Multi-Hop Systems," *IEEE Network*, July, 1992.
- [3] C. A. Brackett, "Dense Wavelength Division Multiplexing Networks : Principles and Applications," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol.8 pp.947-964, Aug. 1990.
- [4] I. M. I Habbab, M. Kavehrad and C. E. Wsundberg, "Protocols for very high-speed optical fiber Local Area Networks using a passive star topology," *IEEE J. Lightwave Tech.*, vol. LT-5, pp.1782-1794, Dec. 1987.
- [5] A. Ganz and B. Li, "Broadcast - Wavelength Architectures for a WDM Passive Star - based Local Area Network," *ICC '92*, pp. 330.4.1-330.4.6.
- [6] W. Dowd, K. Bogoneni, "Switching Latency overlap techniques for WDM star-coupled Media Access Protocols," *GLOBECOM '93*, pp. 1b.4.1-1b.4.10.
- [7] F. Jia & B. Mukherjee, "A High-Capacity, Packet-switched Single - Hop Local Lightwave Network," *ICC '93*, pp. 1110 -1114.

[8] H. B. Jeon. "Contention Based Reservation protocols in Multiwavelength optical networks with a Passive star topology." *ICC '92*, pp.1473-1477.

[9] K.Bogineni, K.M.Sivalingam. "Low-Complexity Multiple Access Protocols for Wavelength-Division Multiplexed Photonic Networks." *IEEE J. of Selected Areas in Commun.*, vol. 11, No.4, March, 1993.

[10] G.N.M.Sudhakar. "Slotted Aloha and Reservation Aloha Protocols for Very High Speed Optical Fiber Local Area Networks using a Passive star Topology." *IEEE J. of LT*, 9, 12, pp.1411-1422, 1991.

[11] G.I.Papadimitriou and D.G.Maritsas. "WDM Passive Star Networks: Receiver Collisions Avoidance Algorithms using Multifeedback Learning Automata." *IEEE 17th Conference on Local Computer Networks*, pp.13-16, Sept. 1992.

[12] Aura Ganz and Bo Li. "A Packet-Switched WDM Passive Optical Star Based Metropolitan Area Network." *IEEE INFOCOM'93* PP 57-63, 1993.

[13] B. Mukherjee, s. Ramamurthy, D. Banerjee. "Some Principles for Designing a Wide-Area Optical Network." *IEEE INFOCOM'94*, PP 110-119, June 1994.

[14] Kenneth a. Williams, Tru Q. Dam, and David H. Du. "A Media Access Protocol for Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Star Networks." *IEEE J. on Selec. Areas in Commu.* vol. 11, No. 4, PP 560-567, May 1993.

— 저 자 소 개 —

李 湖 淑(正會員)

1972년 7월 15일생. 1994년 전북대학교 컴퓨터공학과(공학사). 1996년 전북대학교 컴퓨터공학과 석사과정 재학 중.

崔 馨 允(正會員)

1972년 2월 14일생. 1995년 전북대학교 컴퓨터공학과(공학사). 현재 전북대학교 컴퓨터공학과 석사과정 재학 중.

李 南 宰(正會員)

1988년 전북대학교 전자계산기공학과(공학사). 1991년 전북대학교 전자계산학과(공학석사). 1991년~현재 전북대학교 컴퓨터공학과 박사과정 재학 중.

朴 聖 宇(正會員)

1962년 9월 13일생. 1985년 연세대학교 전자공학과(공학사). 1989년 Texas A&M Univ. 전기공학과(공학석사). 1991년 Univ. of California Irvine 전기 및 컴퓨터공학과(공학박사). 1985년~1986년 한국데이터통신(주) 연구원. 1992년~현재 한남대학교 정보통신공학과 조교수.

金 永 川(正會員) 第 32卷 A編 第 9號 參照

현재 전북대학교 컴퓨터공학과 부교수