

論文97-34S-9-4

수동 이중성형 광통신망에서 노드 그룹화를 이용한 WDM 다중접속 프로토콜

(WDM Channel Access Protocol Using Node Grouping for Passive Double Star-Based Optical Network)

李相綠*, 劉鎮泰*, 朴鎮雨*

(Sang Rok Lee, Jin Tae Yu, and Jin Woo Park)

요 약

본 논문에서는 수동 이중성형구조의 WDM 고속광통신망을 위한 혼합형 WDM/TDM 다중접속 프로토콜을 제안하였다. 제안된 방식에서는 망내의 노드들을 그룹단위로 분할하여 이중성형구조를 통해 연결하고, 각각의 노드는 가변파장 송신기와 고정파장 수신기로 구성된다. WDM 채널은 각각의 그룹에게 데이터패킷과 제어패킷을 송수신하기 위한 home 채널로 할당된다. WDM 채널의 TDM 프레임은 그룹수와 같은 수의 슬롯으로 구성되어, 각 슬롯에서 그룹내의 노드들이 전송할 기회를 갖는다. 제안된 방식은 노드 그룹화를 통해 요구되는 WDM 채널수를 줄이고 시스템 구성이 단순하다. 또한, 제안된 방식은 수동 이중성형구조를 이용한 효율적인 전송방식을 통해 전파지연시간에 덜 민감하고 전송성능이 우수하다.

Abstract

This paper presents a hybrid WDM/TDM channel access protocol for high speed WDM networks based on passive double star topology. In the proposed scheme, all nodes in a network are splitted into groups forming passive double star topology and each node has a tunable transmitter and a fixed receiver. WDM channels are allocated to the groups, which are used as home channels to transmit or receive packets. TDM frames of the WDM channel are composed of the same number of slots as that of groups, and all nodes in a group transmit packets simultaneously at each slot. The proposed scheme reduces the system complexity and the number of the required WDM channels. It was proved that the proposed protocol is less sensitive to the propagation delay and maintaining its superior transmission performance by employing the efficient transmission schedule based on passive double star topology.

I. 서 론

최근 고속광통신망을 위한 다양한 혼합형 WDM/TDM 다중접속 프로토콜이 제안되어 왔다^[1,4,5]. 고속광통신망을 위한 WDM 다중접속 프로토콜은 크게

고정할당방식과 예약방식 등으로 구분된다. 예약방식은 예약을 위한 전용 제어채널을 활용하는 방식으로 데이터패킷 전송을 위한 데이터채널을 망내의 모든 노드들이 공유한다. 망내의 모든 노드들이 데이터채널을 공유하여 전송하므로 충돌이 발생하는데 이를 해결하기 위해 데이터패킷을 전송하기 전에 데이터패킷에 대한 정보인 제어패킷을 전송한다. 그리고, 제어패킷을 모든 노드들이 수신한 후에 중재알고리즘을 통해 충돌을 해결하여 데이터채널을 할당받은 후에 데이터패킷을 전송하는 방식이다. 고속광통신망에서는 패킷의 전송속도

* 正會員, 高麗大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Korea University)

接受日字: 1997年4月11日, 수정완료일: 1997年8月7日

가 증가하여 패킷의 전파지연시간에 대한 전송지연시간의 비가 매우 크다^[8]. 따라서 전파지연시간이 패킷의 평균지연시간을 결정하는 지배적인 요소이므로 제어패킷을 이용한 예약방식에서는 제어패킷의 전송에 따른 고정된 전파지연시간은 주된 성능열화 요소가 된다.

고정할당방식은 데이터패킷 전송을 위한 고정된 채널과 시간슬롯을 망내의 모든 노드에게 할당하여 정해진 채널과 시간슬롯을 통해서만 전송이 이루어지므로 시스템의 구성이 단순한 장점을 갖는다. 그러나, 고속 광통신망에서 사용 가능한 WDM 채널수가 제한되므로 시스템 확장성이 우수하지 못하며 망내의 노드수가 증가함에 따라 할당된 슬롯을 기다리기 위한 고정된 지연시간이 선형적으로 증가하여 저부하에서도 패킷지연시간이 매우 큰 단점을 갖는다. 또한, 패킷발생 분포가 비균일한 경우에 패킷발생률이 큰 노드는 패킷지연시간이 더욱 커진다. Bogineni^[6]가 제시한 I-TDMA 방식은 사용 가능한 WDM 채널들을 TDM 다중화하고 망내의 노드수만큼의 슬롯으로 프레임 구성하는 방식으로 단일노드의 하드웨어가 간단하면서도 성능이 우수한 것으로 알려져 있다. 그러나, I-TDMA 방식은 노드수가 증가함에 따라 프레임의 크기가 커져 프레임 동기화를 위한 시간이 증가하므로 저부하에서도 패킷의 평균지연시간이 크게 증가하고 패킷발생 분포가 비균일한 환경에서는 적용하기 힘들다. 그리고 Rouskas^[7]가 제시한 방식은 I-TDMA의 단점을 보완하기 위하여 트래픽 발생이 많은 노드에게 슬롯을 보다 많이 할당함으로써 패킷의 평균지연시간을 줄이는 방식이다. 그러나, 모든 노드들의 트래픽 발생분포를 미리 분석해야 프레임을 구성할 수 있으므로 트래픽 발생분포를 알기 어려운 실제 상황에서는 적용하기 힘들다.

본 논문에서는 WDM/TDM 혼합방식을 기본으로 하면서 하드웨어 구조가 단순하고 제어 알고리즘이 단순한 WDM 다중접속 프로토콜을 제안한다. 제안된 방식은 광통신을 위한 망구조로 성능이 우수한 수동 이중성형구조를 통해 모든 노드들을 연결하고, 부허브에 연결된 노드들을 하나의 그룹으로 형성한다. 따라서 제안된 방식은 노드 그룹화와 수동 이중성형 망구조를 활용한 효율적인 전송방식을 통해 전파지연시간에 덜 민감하고 성능이 우수하다.

논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 제안된

WDM 다중접속 프로토콜을 위한 망구조, 전송방식, 그리고 충돌해결방법에 대해 기술한다. III 장에서는 제안된 WDM 다중접속 프로토콜의 성능을 분석하기 위하여 semi-Markov 프로세스를 이용한 해석적 모델과 discrete-event 시뮬레이션 모델을 구현한 후 다양한 매개변수들을 변화하면서 성능을 평가한다.

II. WDM 다중접속 프로토콜

본 절에서는 제안된 WDM 다중접속 프로토콜을 위한 망구조, 전송방식 및 충돌해결방법을 설명한다.

1. 망구조

제안된 WDM 다중접속 프로토콜은 그림 1의 수동 이중성형 망구조를 전제로 한다. 수동성형커플러(passive star coupler)를 이용한 수동 이중성형구조는 경제적, 유지보수적 측면에서 매우 유리한 망구조로 알려져 있다^[9]. 그림 1은 망내의 전체 노드수가 $N(=MG)$ 이고 사용 가능한 WDM 채널수가 G 인 경우의 예로 중앙허브(central hub)에 G 개의 부허브(sub-hub)가 연결되고, 각각의 부허브에 M 개의 노드들이 연결되어 이중성형구조를 형성한다. 제안된 방식에서는 하나의 부허브에 연결된 노드들이 하나의 그룹을 형성하고, G 개의 WDM 채널들을 각 그룹에 home 채널로 할당한다. 각 그룹에 할당된 home 채널은 데이터패킷과 제어패킷을 수신하기 위한 WDM 채널을 의미하며 그룹내의 모든 노드들이 공유한다. 전송할 패킷을 가진 송신노드들은 목적지노드에게 패킷을 전송할 때 목적지노드가 속한 그룹의 home 채널을 통해 데이터패킷을 전송하고, 목적지 노드는 자신의 home 채널을 통해 데이터패킷을 수신한다.

제안된 WDM 다중접속 프로토콜에서 단일 노드는 그림 2와 같이 하나의 가변파장 송신기와 고정파장 수신기로 구성한다. 송신기는 자신의 그룹으로 전송할 제어패킷과 임의의 home 채널을 갖는 그룹의 노드들에게 데이터패킷을 전송하기 위해 파장 가변이 가능하고, 수신기는 자신에게로 전송되는 제어패킷과 데이터패킷을 수신하기 위해 그룹의 home 채널로 파장이 고정된다. 따라서 제안된 방식은 다음절의 전송방식을 사용함으로써 전용 제어채널을 이용하는 예약방식에서 처럼 제어패킷 전송을 위한 전용 송수신기를 필요로 하지 않으므로 시스템 구성이 보다 단순하다.

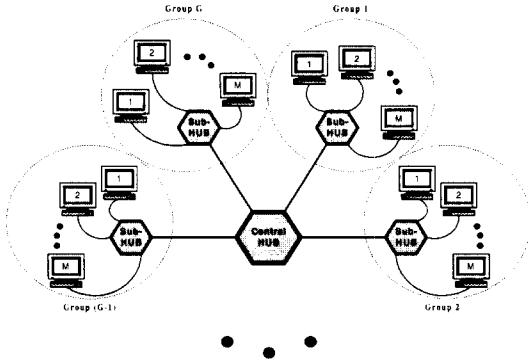


그림 1. 수동 이중 성형 구조를 이용한 망 구조
Fig. 1. Network architecture based on passive double star topology.

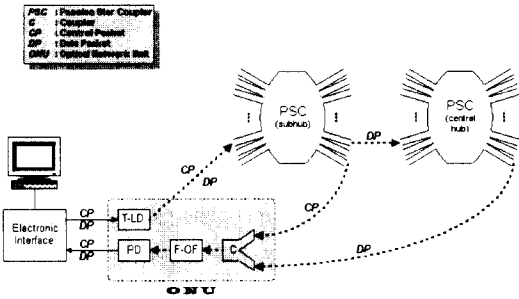


그림 2. 제안된 다중접속 프로토콜의 노드 구성
Fig. 2. Node organization for the proposed protocol.

2. 프레임 구조

제안된 WDM 다중접속 프로토콜은 노드수가 증가함에 따라 프레임의 크기가 커져 프레임 동기를 위한 지연시간이 커지는 고정할당 방식의 단점을 보완하기 위해 망내의 전체 노드수가 아닌 그룹수만큼의 슬롯으로 프레임을 구성한 후 각 슬롯을 그룹에 할당한다. 제안된 각각의 WDM 채널을 그림 3과 같은 TDM 다중화된 프레임으로 구성한다. 하나의 프레임은 망내의 그룹수인 G 개의 슬롯으로 구성되고 각 슬롯은 모든 그룹에 하나씩 고정할당한다. 각 그룹의 노드들은 고정 할당된 슬롯에서 패킷을 전송하므로 망내의 모든 노드들은 하나의 프레임에서 1 회의 전송기회를 갖는다. 하나의 슬롯은 제어패킷을 전송하기 위한 제어슬롯과 데이터패킷을 전송하기 위한 데이터슬롯으로 구성된다. 또한, 제어슬롯은 그룹내의 노드수인 M 개의 미니슬롯으로 구성되고 그룹내의 모든 노드들은 할당된 미니슬롯에서 제어패킷을 전송한다. 제어패킷은

그룹내에서 발생하는 채널충돌을 해결하기 위해 데이터패킷의 정보를 담고 있으며 송신노드번호, 목적지그룹번호, 그리고 발생슬롯번호 등으로 구성된다. 목적지그룹번호는 송신노드가 데이터패킷을 전송하기 위해 사용할 WDM 채널의 번호를 의미하므로 채널 충돌 여부를 판단하기 위해 사용되고, 발생슬롯 번호는 채널 충돌이 발생할 경우에 패킷의 발생시간이 가장 빠른 노드에게 WDM 채널을 할당하기 위해 사용된다.

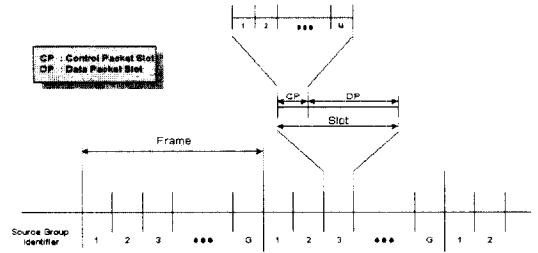


그림 3. 제안된 다중접속 프로토콜의 프레임 구조
Fig. 3. Frame structure of the proposed protocol.

3. 전송 방식

그룹내의 노드들은 할당된 슬롯에서 목적지 그룹의 home 채널을 통해 데이터패킷을 동시에 전송하므로 채널충돌이 발생할 수 있는데 이를 해결하기 위해 데이터패킷을 전송하기 전에 제어패킷을 송수신함으로써 채널충돌을 방지한다. 즉, 동일 송신 그룹내의 노드들은 데이터패킷을 전송하기 전에 송신그룹의 home 채널을 통해 제어패킷을 전송한다. 그룹내의 모든 노드들은 송신그룹내의 노드와 송신그룹의 부허브간의 전파지연시간 후에 home 채널에 동조된 자신의 고정과장 수신기를 통해 그룹내의 노드들로부터 전송된 제어패킷을 수신할 수 있다. 그러나, 다른 그룹의 노드들은 고정과장 수신기의 동조된 파장이 다르기 때문에 송신 그룹에서 전송한 제어패킷을 수신할 수 없다. 따라서, 제안된 WDM 다중접속 프로토콜은 제어패킷 전송을 위한 전용 WDM 채널이나 전용 송수신기를 필요로 하지 않는다. 또한, 채널 충돌은 동일 그룹내의 노드들 간에만 발생하므로 제어패킷은 동일 그룹내의 노드들만 공유하면 된다. 따라서, 단일 성형구조 대신 그림 1의 이중 성형 망구조를 이용함으로써 그림 2에서 보듯이 제어패킷의 전송경로를 줄일 수 있다. 단일 성형 구조를 이용한 기존의 예약 방식에서는 제어패킷을 송신노드와 중앙 허브간의 왕복 전파지연시간을 거쳐 수신할 수 있지만, 이중 성형구조를 이용한 제안된 방식

은 송신노드와 부허브간의 왕복 전파지연시간을 거쳐 수신할 수 있다. 따라서, 제어패킷의 전송 경로가 짧아져 제어패킷을 이용하지만 제어패킷 전송에 따른 부가적인 전파지연시간을 줄일 수 있다.

그림 4 는 제안된 WDM 다중접속 프로토콜에서 채널 충돌을 피하기 위한 중재알고리즘과 패킷 전송절차의 순서도이다. 먼저, 전송할 패킷을 가진 모든 송신노드들은 그룹의 할당된 슬롯에서 데이터패킷을 전송하기 전에 송신그룹과 부허브간의 왕복 전파지연시간을 고려하여 제어슬롯의 할당된 미니슬롯을 통해 제어패킷을 전송한다. 동일그룹내의 노드들은 동시에 패킷을 전송하므로 제어패킷을 수신한 후에 중재알고리즘을 적용하여 채널의 충돌여부를 판단한다. 중재알고리즘을 통해 데이터채널을 할당받은 송신노드들은 그룹의 할당된 슬롯에서 데이터패킷을 전송하고 충돌이 발생한 송신노드들은 다음 프레임의 할당된 슬롯까지 기다린 후에 이전의 과정을 반복한다.

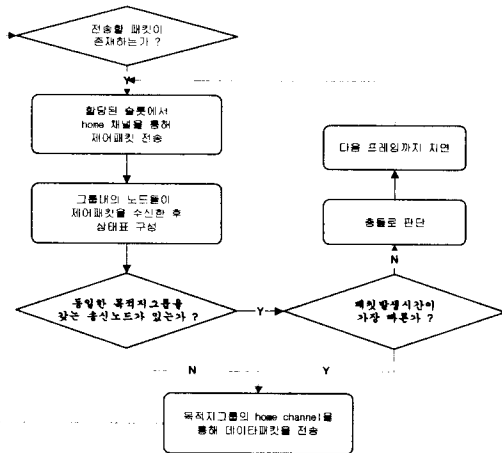


그림 4. 제안된 다중접속 프로토콜의 전송절차
Fig. 4. Transmission procedure of the proposed protocol.

제안된 WDM 다중접속 프로토콜에서 채널충돌을 해결하기 위한 중재알고리즘은 다음과 같다. 망내의 모든 노드들중 그룹내의 노드들만 동일 슬롯에서 동시에 전송하므로 다른 그룹의 노드들과는 충돌이 발생하지 않는다. 따라서 그룹내의 송신노드중 자신과 목적지그룹이 동일할 때만 채널충돌이 발생하므로 그룹내의 송신노드들은 자신과 동일한 목적지그룹을 갖는 노드가 존재하는 지를 판단한다. 동일한 목적지그룹을 갖는 노드가 존재하지 않으면 충돌이 발생하지 않으므로

로 목적지노드의 home 채널을 통해 데이터패킷을 전송한다. 그렇지 않으면 채널충돌을 의미하므로 동일한 목적지그룹을 갖는 노드들중 데이터패킷의 발생시간이 가장 빠른 송신노드만 목적지노드의 home 채널을 통해 데이터패킷을 전송함으로써 채널충돌을 피할 수 있다.

4. 제안된 WDM 다중접속 프로토콜의 특징

제안된 다중접속 프로토콜의 특징은 다음과 같다. 첫째, 기존에 제시된 I-TDMA 방식은 망내의 전체 노드수인 N 개의 슬롯으로 하나의 프레임이 구성되지만, 제안된 방식은 G 개의 슬롯으로 구성되므로 I-TDMA 방식보다 M 배만큼 적은 수의 슬롯을 필요로 한다. 따라서, I-TDMA 방식은 사용 가능한 WDM 채널수 G 가 일정할 때 망내의 전체 노드수가 증가하면 프레임 크기가 노드수에 비례적으로 증가하여 저부하에서도 고정된 패킷지연시간이 증가하지만 제안된 방식은 일정하다. 둘째, 전용 제어채널을 이용한 예약방식은 채널충돌을 해결하기 위해 제어패킷을 전송하기 위해서는 전용 WDM 채널과 전용 송수신기를 필요로 하므로 시스템구성이 복잡하다. 그러나, 제안된 방식은 제어패킷을 사용하지만 송신그룹의 home 채널을 통해 제어패킷을 송수신하므로 제어패킷 전송을 위한 전용 WDM 채널과 송수신기를 필요로 하지 않는다. 셋째, 제어패킷을 이용한 예약방식은 충돌해결을 위한 제어패킷의 전송이 송신노드와 중앙허브간의 고정된 전파지연시간을 거쳐야 하는데 제안된 방식에서는 수동 이중성형 망구조를 이용함으로써 송신노드와 부허브간의 전파지연시간으로 단축하였다. 넷째, 기존에 제시된 제어채널을 이용한 단일 성형구조의 다중접속 프로토콜들은 충돌을 해결하기 위해 망내의 모든 노드에 대한 정보를 필요로 한다. 그러나, 제안된 방식은 그림 2의 수동 이중성형 망구조를 이용함으로써 망내의 모든 노드에 대한 정보가 아닌 동일 그룹내 노드들의 정보만 필요로 하므로 충돌해결이 보다 단순하다.

III. 성능분석 및 평가

본 절에서는 제안된 다중접속 프로토콜의 성능을 분석하기 위해 semi-Markov 프로세스를 이용한 해석적 모델과 discrete-event 시뮬레이션 모델을 제시한다. 그리고, 제시한 모델을 이용하여 망의 다양한 구성

요소 변화에 따른 망의 수용, 패킷의 평균지연시간 등의 성능을 분석하였다.

1. 해석적 모델

제안된 다중접속 프로토콜의 성능을 해석적으로 평가하기 위하여 사용된 가정조건은 다음과 같다. 첫째, 망내에는 N 개의 노드가 존재하고 망에서 사용 가능한 WDM 채널수는 G 이고, 망내의 노드들은 G 개의 그룹으로 분할된다. 각 그룹은 M 개의 노드들로 구성되고, 각 노드는 B 개의 패킷 버퍼를 갖는다. 둘째, 하나의 프레임은 G 개의 슬롯으로 구성되고, 단위슬롯은 하나의 패킷을 전송하는데 소요되는 시간으로 정한다. 셋째, 패킷발생은 단위시간당 λ 의 발생률을 갖는 포아송(Poisson) 프로세스를 따른다. 또한, 임의의 송신노드에서 발생된 패킷들의 수신노드는 균일하게 분포하고 자신으로의 패킷은 발생하지 않는다. 넷째, 모든 노드의 동작은 독립적이고 통계적으로 동일한 프로세스로 모델링된다.

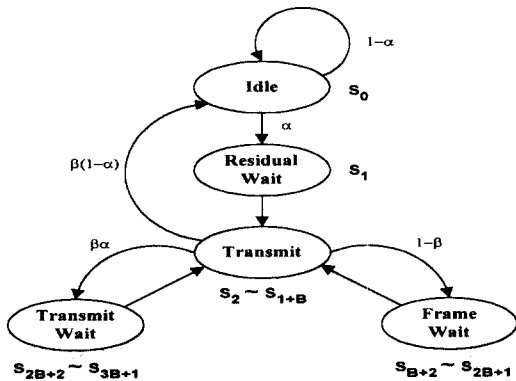


그림 5. 성능분석을 위한 semi-Markov 모델의 상태도

Fig. 5. State diagram of the semi-Markov model for analyzing the performance.

이상의 가정 하에서 제안된 다중접속 프로토콜의 성능을 분석하기 위해 단일노드에서 송신기의 동작을 semi-Markov 프로세스로 모델링하였다. 그림 5 는 semi-Markov 모델의 상태도를 나타내고, 표 1 은 각 상태에서 가능한 천이상태와 천이확률을 나타낸다. 그림 5 에서 보듯이 가능한 상태는 “Idle” 상태, “Residual Wait” 상태, “Transmit” 상태, “Transmit Wait” 상태, 그리고 “Frame Wait” 상태 등으로 구분된다. 또한, “Transmit” 상태, “Transmit Wait”

상태, 그리고 “Frame Wait” 상태는 버퍼에 대기중인 패킷의 수에 따라 버퍼의 수인 B 개의 상태로 구분되므로 $(3B+2)$ 개의 상태를 갖는다.

표 1. Semi-Markov 모델의 상태간 천이확률

Table 1. Transition probabilities between states of the semi-Markov model.

State	Transition Probability
Idle S_0	$\begin{cases} S_0 = 1 - \alpha \\ S_1 = \alpha \end{cases}$
Residual Wait S_1	$\begin{cases} S_{1+i} = p\alpha[i-1] & \text{for } 1 \leq i < B \\ S_{1+B} = 1 - \sum_{j=0}^{B-2} p\alpha[j] & \text{for } i = B \end{cases}$
Transmit S_{1+i}	$\begin{cases} S_0 = \beta(1-\alpha) \\ S_{(B+1)+i} = \beta\alpha \\ S_{(2B+1)+i+1} = (1-\beta)\alpha & \text{for } i = 1 \\ S_{(2B+1)+i} = (1-\beta)(1-\alpha) \\ S_{(B+1)+i-1} = \beta(1-\alpha) \\ S_{(B+1)+i} = \beta\alpha \\ S_{(2B+1)+i+1} = (1-\beta)\alpha & \text{for } 2 \leq i < B \\ S_{(2B+1)+i} = (1-\beta)(1-\alpha) \\ S_{(B+1)+i-1} = \beta(1-\alpha) \\ S_{(B+1)+i} = \beta\alpha & \text{for } i = B \\ S_{(2B+1)+i} = (1-\beta) \end{cases}$
Transmit Wait $S_{(B+1)+i}$	$\begin{cases} S_{1+j} = p\alpha[j-i] & \text{for } 1 \leq i < B, \\ & i \leq j < B \\ S_{1+j} = 1 - \sum_{k=0}^{B-1-i} p\alpha[k] & \text{for } 1 \leq i < B, \\ & j = B \\ S_{1+j} = 1 & \text{for } i = B, \\ & j = B \end{cases}$
Frame Wait $S_{(2B+1)+i}$	$\begin{cases} S_{1+j} = p\alpha[j-i] & \text{for } 1 \leq i < B, \\ & i \leq j < B \\ S_{1+j} = 1 - \sum_{k=0}^{B-1-i} p\alpha[k] & \text{for } 1 \leq i < B, \\ & j = B \\ S_{1+j} = 1 & \text{for } i = B, \\ & j = B \end{cases}$

“Idle” 상태 S_0 는 전송할 패킷이 발생하지 않은 상태이다. “Residual Wait” 상태 S_1 는 하나의 패킷이 발생하여 할당된 슬롯까지 기다리는 상태이다. “Transmit” 상태 S_{1+i} ($1 \leq i \leq B$) 는 할당된 슬롯에서 제어패킷을 전송하는 상태이다. “Transmit Wait” 상태 $S_{(B+1)+i}$ ($1 \leq i \leq B$) 는 데이터패킷을 전송한 후에 다음 프레임의 할당된 슬롯까지 기다리는 상태이다. “Frame Wait” 상태 $S_{(2B+1)+i}$ ($1 \leq i \leq B$) 는 충돌이 발생하여 다음 프레임의 할당된 슬롯까지 기다리는 상태이다.

그림 5 의 상태도와 표 1 에 나타난 기호들은 아래와 같이 정의된다. α 는 단위시간동안 하나의 패킷이

발생할 확률을 나타내며 $\alpha = 1 - e^{-\lambda}$ 이다.

β 는 제안된 다중접속 프로토콜에서 충돌이 발생하지 않고 데이터채널을 할당받을 확률을 의미하며 그림 4 의 전송절차와 중재알고리즘에서 보듯이 다음 두 가지 경우에 의해 결정된다. 첫째, 전송할 패킷을 가진 송신그룹내의 노드들중 자신을 제외한 모든 송신노드들의 목적지 그룹이 자신의 목적지그룹과 동일하지 않을 경우다. 둘째, 목적지 그룹이 동일할 경우 동일한 WDM 채널을 통해 데이터패킷을 전송하므로 데이터 채널 충돌이 발생하는데 이 경우에는 패킷발생시간이 가장 빠른 송신노드에게 채널을 할당하는데 자신의 패킷이 발생시간이 가장 빠른 경우이다. 목적지 그룹의 충돌이 발생하지 않을 확률은 다음과 같다. 임의의 송신노드가 “Transmit” 상태에 있을 확률은 $P_{tr} = \sum_{i=1}^B \eta_{1+i}$ 이고, 자신을 제외한 전송상태에 있는 송신노드의 수는 $(M-1)P_{tr}$ 이다. 따라서 자신을 제외한 모든 송신노드들이 자신이 지칭한 목적지 노드 이외의 목적지 노드로 전송할 확률은 $P_{oth} = (1 - \frac{1}{G})^{(M-1)P_{tr}}$ 이고, 특정 송신노드가 특정 목적지 노드로의 송신을 성공할 확률은 $\beta_l = 1 - P_{oth}$ 이다. 또한, 목적지 그룹의 충돌이 발생하는 노드들중 자신의 패킷이 발생시간이 가장 빠른 경우일 확률은 $\beta_{ll} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^B \eta_{1+i}$ 이므로 데이터채널을 할당받을 확률 β 는 $\beta_l + (1 - \beta_l)\beta_{ll}$ 으로 표현된다.

$pr[k]$, $pl[k]$, $pf[k]$ 는 각각 “Residual Wait” 상태, “Transmit Wait” 상태, 그리고 “Frame Wait” 상태에 머무르는 동안 k 개의 패킷이 발생할 확률을 의미한다.

$$pr[k] = \frac{1}{k!} e^{-\lambda t_r} (\lambda t_r)^k \quad t_r = \frac{G}{2} \quad (1a)$$

$$pl[k] = \frac{1}{k!} e^{-\lambda t_l} (\lambda t_l)^k \quad t_l = (G-1) \quad (1b)$$

$$pf[k] = \frac{1}{k!} e^{-\lambda t_f} (\lambda t_f)^k \quad t_f = (G-1) \quad (1c)$$

그림 5 의 semi-Markov 모델로부터 제안된 다중접속 프로토콜의 성능을 분석하기 위해서는 프로세스가 정상상태(steady-state)에 도달하였다고 가정한 후 다음과 같은 3 단계를 거쳐 망의 수율과 패킷의 평균 지연시간을 계산한다.

1 단계에서는 식(2) 의 정상상태 방정식을 이용하여 semi-Markov 프로세스의 Embedded Markov Chain 에서 각 상태에서의 한계확률(limiting probability) π_i ($0 \leq i \leq 3B+1$) 를 구한다.

$$\pi_i = \sum_j p_{ij} \pi_j, \quad \{0 \leq i, j \leq (3B+1)\} \quad (2a)$$

$$\sum_i \pi_i = 1, \quad \{0 \leq i \leq (3B+1)\} \quad (2b)$$

여기서, p_{ij} 는 상태 i 에서 상태 j 로의 전이확률을 의미한다.

2 단계에서는 1 단계에서 구한 semi-Markov 프로세스의 Embedded Markov Chain 에서 각 상태에서의 한계확률 (limiting probability) π_i ($0 \leq i \leq 3B+1$) 과 각 상태에서 대기하는 머무름 시간(sojourn time) 을 이용하여 semi-Markov 프로세스의 각 상태에서의 한계확률 P_i 와 각 상태를 떠날 확률 η_i 를 구한다.

$$P_i = \frac{\pi_i \tau_i}{\sum_{j=0}^{3B+1} \pi_j \tau_j}, \quad \{0 \leq i \leq (3B+1)\} \quad (3a)$$

$$\eta_i = \frac{P_i}{\tau_i}, \quad \{0 \leq i \leq (3B+1)\} \quad (3b)$$

식 (3) 에서 각 상태에서의 머무름시간 τ_i ($0 \leq i \leq 3B+1$) 은 $\tau_0 = 1, \quad \tau_1 = \frac{G}{2}, \tau_{1+i} = 1, (1 \leq i \leq B), \quad \tau_{(B+1)+i} = G-1, (1 \leq i \leq B),$ 그리고 $\tau_{(2B+1)+i} = G-1, (1 \leq i \leq B)$ 이다.

3 단계에서는 2 단계에서 구한 semi-Markov 프로세스의 각 상태에서의 한계확률인 식 (3) 을 이용하여 망의 성능평가요소인 망의 수율과 패킷의 평균지연시간을 계산한다. 망의 수율은 망내에서 발생하는 패킷이 단위시간당 성공적으로 전송되는 패킷의 양을 의미한다. 수율 T 은 식 (4) 와 같이 송신노드가 “Transmit” 상태를 떠날 확률 $\sum_{i=1}^B \eta_{1+i}$, 데이터채널을 할당받을 확률 β , 그리고 사용 가능한 WDM 채널 수 G 의 곱으로 표현된다. 패킷의 평균지연시간 D 는 식 (5) 와 같이 패킷이 송신노드에서 발생하여 버퍼에서 전송기회를 기다린 후 수신노드까지 성공적으로 전송되는데 걸리는 평균시간을 의미하므로 큐잉지연시간, 패킷의 전송지연시간, 그리고 패킷의 전파지연시간에 의해 결정된다.

$$T = G\beta \sum_{i=1}^B \eta_{1+i} \quad (4)$$

$$D = D_Q + D_{CF} + D_{CT} + D_{DP} + D_{DT} \quad (5a)$$

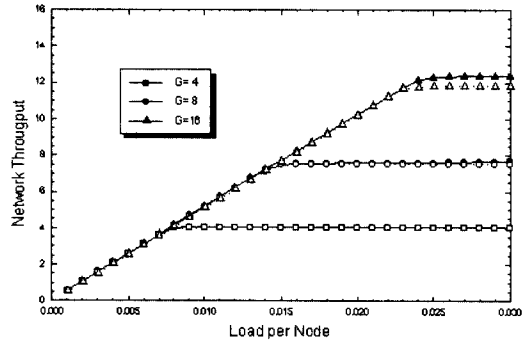
$$D \approx E[N] / T + D_{DP} \quad (5b)$$

식 (5) 에서 D_{CF} 와 D_{CT} 는 각각 제어패킷의 전파 지연시간과 전송지연시간을 의미하고, D_{DP} 와 D_{DT} 는 각각 데이터패킷의 전파지연시간과 전송지연시간을 의미한다. 그리고, 큐잉지연시간 D_Q 는 망의 수율 T , 평균지연시간 $E[T]$, 그리고 버퍼에 대기중인 패킷의 수 $E[N]$ 간의 관계를 나타내는 리틀의 법칙(Little's Law) $E[T] = E[N] / T$ 에 의해 결정된다. 버퍼에 대기중인 패킷의 수는 $E[N] = \sum_{i=0}^{3B+1} E[N_i] P_i$ 로 정의되고, 각 상태에 머무르는 패킷의 수는 $E[N_0] = 0$, $E[N_1] = 1 + \sum_{j=0}^{B-1} jpb^j$, $E[N_{1+i}] = i$, $1 \leq i \leq B$, $E[N_{(B+1)+i}] = i + \sum_{j=0}^{B-i} jpb^j$, ($1 \leq i \leq B$), 그리고 $E[N_{(2B+1)+i}] = i + \sum_{j=0}^{B-i} jpb^j$, ($1 \leq i \leq B$) 이다. 식 (5.a) 에서 D_{CF} , D_{CT} , D_{DT} 는 D_{DP} 에 비해 매우 적은 양이므로 패킷의 평균지연시간은 식(5.b) 로 간략화될 수 있다.

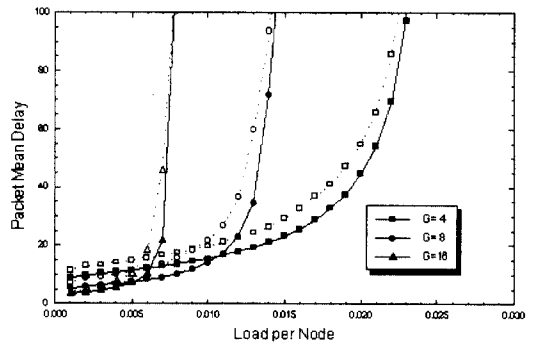
2. 성능평가 및 비교분석

성능평가는 제시한 해석적 모델과 discrete-event 시뮬레이션 모델을 통해 수행하였다. Discrete-event 시뮬레이션 모델은 몬테카를로 방식의 시뮬레이터를 사용하였고 batch mean 방식을 통해 결과를 얻었다. 성능분석에 사용된 변수는 다음과 같다. 1) N : 망내에서 노드의 수, 2) G : 사용 가능한 WDM 채널수 또는 망내에서 그룹의 수, 3) M : 단일 그룹내의 노드수, 4) B : 단일 노드에서 버퍼의 수, 5) D_{DP} : 데이터패킷의 노드간 전파지연시간 등이다. 성능분석 과정에서 $B = 30$ 으로 하고, D_{DP} 는 모든 경우에 동일하게 포함되므로 0 으로 하였다.

그림 6 은 semi-Markov 프로세스를 이용한 해석적 모델과 discrete-event 시뮬레이션 모델의 성능을 비교한 것으로 $N = 512$ 이고 각 노드에서 발생하는 트래픽분포가 균일한 경우 사용 가능한 WDM 채널수 G 를 {4, 8, 16} 으로 변화하면서 망의 수율과 평균 패킷지연시간의 성능변화를 보이고 있다. 그림에서 점선은 해석적 모델에 의한 결과이고 실선은 시뮬레이션



(a) Network Throughput vs. Load per Node



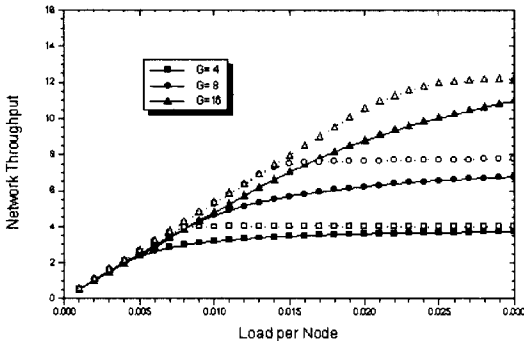
(b) Packet Mean Delay vs. Load per Node

그림 6. 해석적 모델과 시뮬레이션 모델의 비교 (점선 : 해석적 모델, 실선 : 시뮬레이션 모델)

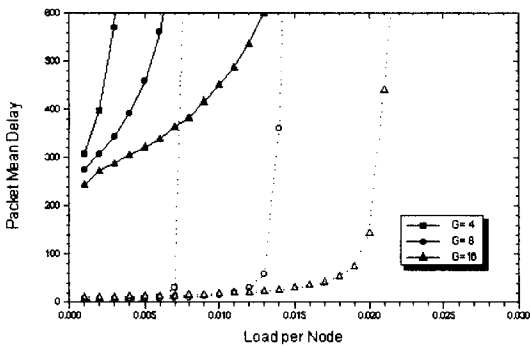
Fig. 6. Comparison of the analytic model to simulation model with varying G. (dotted line : analytic model, solid line : simulation model)

결과이다. 그림 6(a) 는 단위노드당 부하의 변화에 따른 망의 수율 변화를 나타내는 결과로 해석적 결과가 시뮬레이션 결과와 2% 이내에서 일치함을 볼 수 있다. 또한, 망의 수율은 그룹내의 부하가 1 이 될 때까지 선형적으로 증가하다가 그룹내의 부하가 1 이 되면 채널수만큼의 망의 수율에서 포화상태가 되므로 제안된 프로토콜은 채널활용도가 100% 임을 알 수 있다. 즉, 단일노드의 부하가 $1/M$ 이 되면 그룹내의 부하가 1 이 되어 망의 수율은 최대가 된다. 예를 들면, $G=8$ 인 경우 $M=64$ 이므로 단일노드의 부하가 $1/64(=0.0156)$ 일 때까지 망의 수율은 선형적으로 증가하고 단일노드의 부하가 0.0156 부터는 망의 수율이 채널수인 8 로 포화상태가 된다. 그림 6(b) 는 부하의 변화에 따른 패킷의 평균지연시간을 나타내는 결과로

망의 수율이 선형적으로 변하는 동안은 채널충돌이 적절하게 해결되므로 패킷의 평균지연시간이 거의 증가하지 않는다. 그러나, 망의 수율이 포화상태에 도달하면 채널충돌의 횟수가 보다 많아지므로 평균지연시간은 급격히 증가한다. 그림 6(b) 에서 시뮬레이션 결과가 해석적 결과보다 다소 적고 망의 수율이 포화상태에 도달하는 경우에는 최대 10% 의 차이를 보이고 있다. 이는 제안된 프로토콜의 충돌해결과정에서 목적지그룹의 충돌이 발생하는 경우 패킷발생시간이 가장 빠른 노드에게 채널을 할당하도록 설계되었는데 해석적 분석과정에서는 우선 순위에 대한 영향을 고려하지 않았기 때문이다.



(a) Network Throughput vs. Load per Node



(b) Packet Mean Delay vs. Load per Node

그림 7. WDM 채널수 변화에 따른 I-TDMA 프로토콜과 성능비교 (점선 : I-TDMA 프로토콜, 실선 : 제안된 프로토콜)

Fig. 7. Comparison of performance to the I-TDMA protocol with varying G. (dotted line : I-TDMA protocol, solid line : the proposed protocol)

그림 7 은 패킷발생의 트래픽분포가 비균일한 경우 성능변화를 분석하기 위하여 $N=512$ 이고 사용 가능

한 WDM 채널수 G 를 $\{4, 8, 16\}$ 으로 변화하면서 제안된 프로토콜과 I-TDMA 프로토콜의 성능을 비교한 결과이다. 그림에서 실선은 제안된 방식을 나타내고 점선은 I-TDMA 방식을 나타낸다. 그림 7(a) 는 단위노드당 부하의 변화에 따른 망의 수율 변화를 나타내는 결과로 제안된 방식이 I-TDMA 방식보다 성능이 다소 우수함을 볼 수 있다. 그림7(b) 는 부하의 변화에 따른 패킷의 평균지연시간을 나타내는 결과로 제안된 방식은 망의 수율이 포화상태에 이를 때까지 패킷의 평균지연시간이 거의 일정하지만 I-TDMA 방식은 부하의 변화에 따라 거의 선형적으로 증가한다. 특히, 제안된 방식은 저부하에서 패킷의 평균지연시간이 매우 적지만 I-TDMA 방식은 저부하에서도 크다. 저부하에서의 평균지연시간은 프레임동기를 위한 최소한의 시간을 나타내는 값으로 제안된 방식은 프레임이 G 개의 슬롯으로 구성되지만 I-TDMA 방식은 MG 개의 슬롯으로 구성되기 때문이다. 또한, 제안된 프로토콜의 패킷발생의 트래픽분포에 의한 영향은 그림 7 과 그림 6 을 비교함으로써 알 수 있다. 그림 6 은 트래픽분포가 균일한 경우이고 그림 7 은 트래픽분포가 비균일한 경우로 트래픽분포가 비균일한 환경에서도 성능연화가 거의 없음을 볼 수 있다.

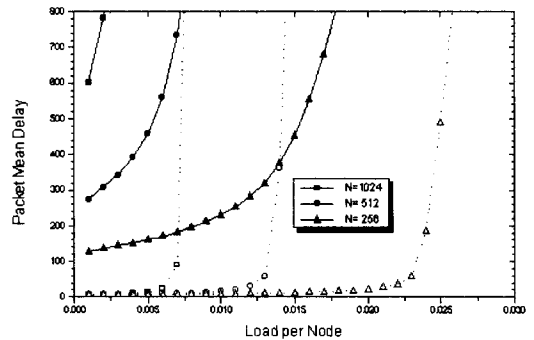


그림 8. 망내의 노드수 변화에 따른 I-TDMA 프로토콜과 성능비교 (점선 : I-TDMA 프로토콜, 실선 : 제안된 프로토콜)

Fig. 8. Comparison of performance to the I-TDMA protocol with varying N. (dotted line : I-TDMA protocol, solid line : the proposed protocol)

그림 8은 사용 가능한 WDM 채널수가 일정할 때 망내의 노드수 변화에 따른 성능을 분석하기 위해 $G=8$ 이고 망내의 노드수 N 을 $\{256, 512, 1024\}$ 으로 변화하면서 제안된 프로토콜과 I-TDMA 프로토

콜의 성능을 비교한 결과이다. 그림에서 실선은 제안된 방식을 나타내고 점선은 I-TDMA 방식을 나타낸다. 그림에서 보듯이 제안된 방식은 망내의 노드수가 증가하더라도 저부하에서의 패킷 평균지연시간은 일정하지만 I-TDMA 방식은 저부하에서도 망내의 노드수가 증가함에 따라 평균지연시간이 선형적으로 증가함을 볼 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 수동 이중 성형구조의 WDM 고속광통신망을 위한 혼합형 WDM/TDM 방식의 다중접속 프로토콜을 제안하였다. 제안된 방식은 망내의 노드들을 그룹단위로 분할하여 home 채널을 부여함으로써 요구되는 WDM 채널수를 줄이고, WDM 채널을 그룹수의 슬롯으로 프레임을 구성한 후 할당된 슬롯을 통해 그룹의 노드들이 전송한다. 따라서 home 채널과 고정할당된 슬롯을 통해 패킷을 전송하므로 시스템이 단순하고 제어패킷 전송을 위한 부가적 송수신기와 WDM 채널을 필요로 하지 않는다. 제안된 방식은 망내의 노드들을 이중 성형구조를 통해 연결하므로 예약을 위한 제어패킷의 전송이 송신노드에서 중앙허브간의 전파지연시간이 아닌 송신노드와 송신그룹의 부허브간의 전파지연시간만을 필요로 하므로 예약방식의 단점인 전파지연시간에 민감하지 않으면서 패킷발생 분포가 비균일한 환경에서도 패킷지연시간이 거의 증가하지 않는다. 제안된 WDM 다중접속 프로토콜은 망내의 노드들을 그룹단위로 분할하고 이중 성형구조를 사용함으로써 전파지연시간이 매우 크고 트래픽 발생분포가 비균일한 환경에서도 성능이 우수하다.

※ 이 연구는 '96년도 한국과학재단 연구비지원에 의한 결과임.(과제번호:95-0100-17-01-3)

참 고 문 헌

- [1] K.M.Sivalingam and P.W.Dowd, "A Multilevel WDM Access Protocol for an Optically Interconnected Multiprocessor System," *Journal of Lightwave Technology*, Vol.13, No.11, pp.2152-2167, Nov. 1995.
- [2] P.A.Humblet, R.Ramaswami, and K.N. Sivarajan, "An Efficient Communication Protocol for High-Speed Packet-Switched Multichannel Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.11, No.4, pp.568-578, May 1993.
- [3] R.Chipkatti, Z.Zhang, and A.S.Acampora, "Protocols for Optical Star-Coupler Network Using WDM : Performance and Complexity Study," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.11, No.4, pp.579-589, May 1993.
- [4] M.S.Borella and B.Mukherjee, "Efficient Scheduling of Nonuniform Packet Traffic in a WDM/TDM Local Lightwave Network with Arbitrary Transceiver Tuning Latencies," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.14, No.5, pp. 923-934, Jun. 1996.
- [5] 이상록, 이성근, 박진우, "고속광통신망용 새로운 WDM/TDM 프로토콜," *전자공학회 논문지-A*, 제33권, 제2호, pp.50-58, 1996
- [6] K.Bogineni, K.M.Sivalingam, and P.W. Dowd, "Low-Complexity Multiple Access Protocols for Wavelength-Division Multiplexed Photonic Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.11, No.4, pp.590-603, May 1993.
- [7] G.N.Rouskas and M.H.Ammar, "Analysis and Optimization of Transmission Schedules for Single-Hop WDM Networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol.13, No.2, pp.211-221, Apr. 1995.
- [8] B. Hajek, N.B.Likhanov, and B.S.Tsybakov, "On the Delay in a Multiple-Access System with Large Propagation Delay," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol.40, No.4, Jul. 1994.
- [9] K.Kumozaki, "A Fiber-Optic Passive Double Star Network for Microcellular Radio Communication Systems Applications," *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E76-B, No.9, Sep. 1993.
- [10] S.M.Ross, *Stochastic Process*. Wiley & Sons, 1983.

 저 자 소 개

李 相 綠(正會員)

1991년 2월 : 고려대학교 전자공학과 학사. 1993년 2월 : 고려대학교 전자공학과 석사. 1993년 3월부터 현재 : 고려대학교 전자공학과 박사과정. 주관심분야는 광전송망 및 광통신망 다중접속 프로토콜 등

劉 鎭 泰(正會員)

1996년 2월 : 고려대학교 전자공학과 학사. 1996년 3월부터 현재 : 고려대학교 전자공학과 석사과정. 주관심분야는 광전송망 및 무선통신망 등

朴 鎭 雨(正會員)

1979년 2월 : 고려대학교 전자공학과 학사. 1983년 8월 : 클렘슨대학교 전기 및 전자공학과 석사. 1987년 11월 : 버지니아 주립공과대학교 전기공학과 박사. 1989년 3월부터 현재 : 고려대학교 전자공학과 부교수. 주관심분야는 광전송망, 광교환, 통신시스템 등