

論文2001-38SD-9-7

수동이중성형 광통신망에서 노드 그룹핑을 이용한 WDM/SCM 다중접속 프로토콜 설계

(A WDM/SCM Multiple Access Protocol Using Node Grouping for Passive Double Star Optical Networks)

劉鎮泰*, 李明文*, 金容範*, 朴時佑**, 朴鎮雨*

(Jin-Tae Yu, Myung-Moon Lee, Yong-Bum Kim, Si-Woo Park,
and Jin-Woo Park)

요 약

본 논문에서는 수동이중성형 구조의 광통신망에 적합한 WDM/SCM 다중접속 프로토콜을 제안하였다. 제안된 망의 구조는 노드들을 그룹화하여 부허브(sub-hub)로 연결하고 부허브들은 다시 중앙허브(central hub)에 연결된 이중성형구조를 가지고 있다. 각 그룹에는 WDM 채널이 home 채널로 할당되어 있고, 각 노드는 패킷의 수신을 위한 고유의 SCM 채널이 할당되어있다. 제안된 프로토콜은 망내의 노드수가 아닌 그룹수 만큼의 슬롯으로 프레임의 구성하기 때문에 슬롯을 기다리기 위한 패킷의 평균지연을 줄일 수 있으며, 이중성형구조의 망구조를 이용하여 데이터 패킷의 전송을 위한 제어패킷의 전파지연을 중앙허브와 송신 노드 간의 전파지연이 아니라 부허브와 송신 노드간의 전파지연으로 제한하여 패킷의 전파지연을 줄였다. 해석적 모델과 시뮬레이션에 의한 성능 비교로부터 프로토콜 분석의 타당성을 검증하여 망의 수율 및 패킷의 평균 지연 성능이 우수하며 높은 채널 활용도를 가짐을 확인할 수 있었다.

Abstract

A WDM/SCM multiple access protocol suitable for optical double star networks is proposed. A node-grouping scheme is employed in the protocol, which is accomplished by connecting some nodes through passive star sub-hubs forming a group. The resulting multiple groups in a network are then connected through a central passive star hub resulting in a passive double star network. Each group is pre-assigned a WDM channel as its home channel, and SCM channels are used to identify the packet reception at each node. In the proposed protocol, the average packet delay is remarkably reduced since the frame consists of the number of groups rather than the number of network nodes. Furthermore, additional reduction of the average packet delay is achieved by limiting the propagation paths of control packets to the roundtrip between source nodes and sub-hub using a double star network. It is shown in the performance evaluations using analytic and simulation model that the proposed protocol has the advantages of the higher channel utilization and excellent network throughput and average packet delay characteristic.

* 正會員, 高麗大學校 電子工學科 光通信網研究室
(Korea University, Dept. of Electronics Engineering, Optical Networks Lab.)

** 正會員, 한국통신프리텔(주) 先行研究所
(Korea Telecom Freetel)

※ 본 연구는 한국통신프리텔(주) 위탁연구과제의 지원으로 수행되었음.

接受日字: 2001年 3月2日, 수정완료일: 2001年 7月20日

I. 서론

정보화 사회로의 본격적인 진입단계에서 인터넷 사용자와 광대역 신호전송을 기반으로 하는 다양한 멀티미디어 서비스가 구체적으로 가시화 되면서 가입자망에서 신호 전송의 광대역화를 위한 전송 및 망설계 기술이 일반화되고 있다. 미래의 광대역 서비스를 수용하기 위해 전광(all optical) 시스템을 통한 광대역 광통신망을 구성하기 위해서는 장거리 광대역 전송능력과 높은 전송품질을 유지하는 특징을 고려한 광전송 기술의 개발과 이를 이용한 새로운 개념의 광통신망 설계가 필수적이다. 광전송 기술은 전자소자의 처리속도 한계를 극복하면서 광의 고유한 특징을 최대한으로 활용하기 위한 WDM(Wavelength Division Multiplexing) 방식에 대한 연구로 진행되고 있다. 또한, 새로운 개념의 광통신망 설계는 광의 고유한 특징을 최대한으로 활용하면서 다양한 서비스를 수용하기에 적합한 망구조와 채널 활용도를 향상시키기 위한 WDM 다중접속 프로토콜을 개발하기 위한 방향으로 연구되고 있다^[1-2].

현재까지 고속 광통신망을 위한 다양한 WDM 다중접속 프로토콜이 제안되어 왔다^[3-6]. 고속 광통신망을 위한 WDM 다중접속 프로토콜은 크게 고정할당 방식(preallocation scheme)과 예약방식(reservation scheme) 등으로 구분된다. 예약방식은 예약을 위한 전용 제어 채널을 활용하는 방식으로 데이터 패킷 전송을 위한 데이터 채널을 망내의 모든 노드들이 공유한다. 망내의 모든 노드들이 데이터 채널을 공유하여 전송하므로 충돌이 발생하는데 이를 해결하기 위해 데이터 패킷을 전송하기 이전에 데이터 패킷에 대한 정보인 제어패킷을 전송한다. 그리고 제어 패킷을 모든 노드들이 수신한 후에 중재알고리즘을 통해 충돌을 해결하여 데이터 채널을 할당받은 후에 데이터 패킷을 전송하는 방식이다^[7]. 고속 광통신망에서는 패킷의 전송속도에 대한 패킷의 전파지연의 비가 매우 크다^[8]. 따라서 전파지연시간이 패킷의 평균지연시간을 결정하는 지배적인 요소이므로 제어패킷을 이용한 예약방식에서는 제어패킷의 전송에 따른 고정된 전파지연시간은 주된 성능열화 요소가 된다. 이에 비해 고정할당방식은 데이터 패킷 전송을 위한 고정된 채널과 시간슬롯을 망내의 모든 노드에게 할당하여 정해진 채널과 시간슬롯을 통해서만 전송이 이루어지므로 시스템의 구성이 단순한 장점을 갖는다^[9]. 그러나, 고속 광통신망에서 사용 가능

한 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, 패킷 발생 분포가 비균일한 경우에 패킷 발생률이 큰 노드는 패킷을 전송하기 위해 기다리는 지연시간이 큰 단점이 있어 실제 광통신망 설계에 적용은 힘들다.

본 논문에서는 수동이중성형 구조의 광통신망 구조를 채택함으로써 예약 방식의 주된 단점이 패킷의 전파지연에 의한 성능 열화를 감소시키고, 노드 그룹화를 이용함으로써 프레임의 망내의 전체 노드수가 아닌 그룹수로 구성되어 고정할당 방식의 단점으로 부각되는 슬롯을 기다리기 위한 고정된 패킷의 지연시간을 감소시켰다^[10-11]. 제안된 방식은 광통신망을 위한 망구조로 성능이 우수한 수동이중성형 구조를 통해 모든 노드들을 연결하고, 부허브에 연결된 노드들을 하나의 그룹으로 형성하며 하나의 WDM 채널을 SCM 다중화 하여 데이터 채널의 활용도를 높이는 구조를 가지고 있다. 따라서, 제안된 방식은 노드 그룹화와 수동이중성형 망구조, SCM 다중화 기법, 효율적인 전송방식 및 충돌해결 알고리즘을 활용한 효율적인 전송방식을 통해 데이터 채널의 활용도가 높고 망의 수율과 평균 패킷지연 성능이 우수하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 프로토콜을 위한 망구조, 프레임구조 및 전송방식에 대해 기술한다. 3장에서는 제안된 프로토콜의 성능을 분석하기 위해 semi-Markov 프로세스를 이용한 성능분석 모델링을 제시하고 4장에서 제안 프로토콜의 성능을 다양한 매개변수들을 변화시키면서 해석적 모델과 시뮬레이션 모델을 통해 평가한다.

II. 다중접속 프로토콜

1. 망구조

제안하는 WDM/SCM 프로토콜은 그림 1의 수동 이중성형 망구조를 가정한다. 망내의 노드들은 망의 반경, 트래픽 분포 등의 다양한 특성에 의해 그룹화된다. 그룹화 된 노드들은 부허브(sub-hub)에 연결되고, 부허브는 중앙허브(central hub)에 연결된다. 부허브는 $(M+1) \times (M+1)$ 성형커플러(star coupler), 중앙허브는 $G \times G$ 성형커플러로 구성되어 이중성형구조를 형성

한다. 각 그룹의 식별을 위해 특정 파장이 home 채널로 할당되며, 그룹내의 노드들을 구분하기 위해 SCM 채널이 각 노드에 할당된다. 각 노드들은 특정 채널 (λ_i, f_j) , $(1 \leq i \leq G, 1 \leq j \leq M)$ 을 자신의 고유한 home 채널로 가지고 있어 데이터패킷 수신을 위한 데이터채널로 사용한다. 그리고, 각 파장에서 하나의 SCM 채널 (λ_i, f_0) , $(1 \leq i \leq G)$ 은 채널충돌을 해결하기 위한 제어채널로 할당하고, 그룹내의 노드들은 제어채널을 공유한다.

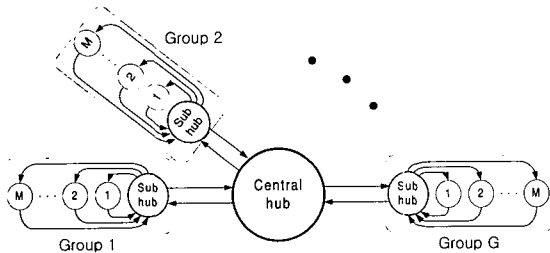


그림 1. 수동이중성형 구조를 이용한 광통신망 형태
Fig. 1. Optical network architecture using passive double star topology.

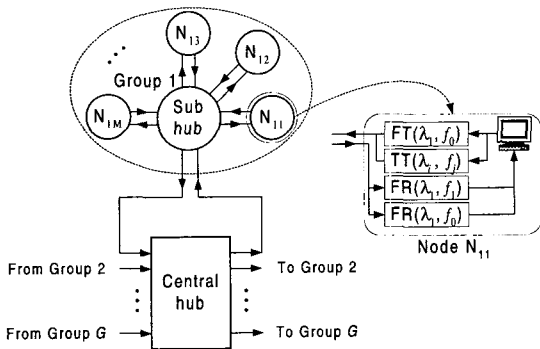


그림 2. 제안된 다중접속 프로토콜의 노드구성
Fig. 2. Node architecture of the proposed multiple access protocol.

제안하는 프로토콜의 노드 구조를 보기 위해 그림 2는 그룹 1의 첫 번째 노드 N_{11} 의 노드 구조를 보이고 있다. 각 노드들은 그림 2에서와 같이 두개의 송신기와 두 개의 수신기로 구성된다. 송신기는 그룹내의 노드들에게 제어패킷을 전송하기 위한 고정파장 송신기와 망내의 모든 노드에게 데이터 패킷을 전송하기 위한 가변파장 송신기로 구성된다. 수신기는 제어패킷과 데이

터패킷을 수신하기 위한 수신기로 구분되는데, 하나의 수신기는 그룹내의 제어패킷을 수신하기 위해 그룹내의 제어채널에 고정 동조되고, 다른 수신기는 임의의 노드로부터 전송된 데이터패킷을 수신하기 위해 자신의 home 채널에 고정 동조된다. 따라서, 그림 2에서 첫 번째 그룹의 첫 번째 노드 N_{11} 은 제어 패킷 송신을 위한 채널로 (λ_1, f_0) 를 사용하고, (λ_i, f_j) 를 이용해 i 번째 그룹의 j 번째 노드에게 데이터 패킷을 전송하며, 제어패킷 수신을 위해 (λ_1, f_0) , 데이터 패킷의 수신을 위해 (λ_i, f_j) 를 사용하고 있다.

2. 프레임 구조

제안된 WDM/SCM 다중접속 프로토콜은 노드수가 증가함에 따라 프레임 크기가 커져 프레임 동기를 위한 큐잉 지연 시간이 커지는 고정할당 방식의 단점을 보완하기 위해 망내의 전체 노드수가 아닌 그룹수 만큼의 슬롯으로 프레임을 구성한 후 각 슬롯에서 특정 그룹내 노드들만 패킷을 전송하도록 되어있다. 제안된 프로토콜에서 데이터채널과 제어채널은 그림 3의 TDM 프레임으로 구성되고, 프레임은 동기되어 있다고 가정한다. 데이터채널은 그룹수인 G 개의 슬롯으로 구성되고, 제어채널은 그룹내의 노드수인 M 개의 미니슬롯으로 구성된다. 데이터채널의 각 슬롯은 각 그룹에 할당되고, 할당된 슬롯에서 데이터패킷을 전송한다. 즉, 프레임의 첫 번째 슬롯에서는 그룹 1의 노드들이 전송하고, 두 번째 슬롯에서는 그룹 2의 노드들이 패킷을 전송함을 말한다. 각 그룹의 노드들은 고정 할당된 슬롯에서 패킷을 전송하므로 망내의 모든 노드들은 하나의 프레임에서 한번의 전송기회를 부여받는다.

그룹내의 노드들은 할당된 슬롯에서 목적지 노드의

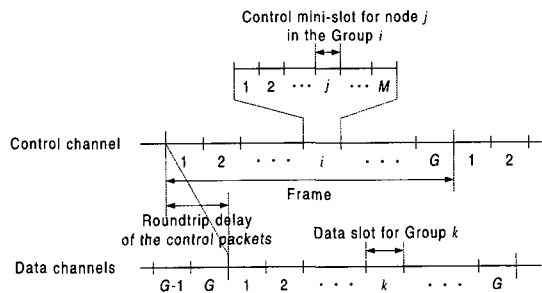


그림 3. 제안된 다중접속 프로토콜의 프레임 구조
Fig. 3. Frame structure of the proposed multiple access protocol.

home 채널을 통해 데이터패킷을 동시에 전송하므로 채널충돌이 발생할 수 있는데 이를 해결하기 위해 데이터패킷을 전송하기 전에 제어패킷을 송수신 함으로써 채널충돌을 방지한다. 즉, 동일 송신 그룹내의 노드들은 데이터패킷을 전송하기 전에 제어채널을 통해 제어패킷을 전송한다. 그룹내의 모든 노드들은 송신그룹내의 노드와 송신그룹의 부허브 간의 전파지연 시간 후에 제어채널에 고정 동조된 고정과장 수신기를 통해 그룹내의 노드들로부터 전송된 제어패킷을 수신할 수 있다. 그러나, 다른 그룹의 노드들은 SCM 과장이 다르기 때문에 송신그룹에서 전송한 제어패킷을 수신할 수 없다.

3. 전송방식

패킷의 전송절차는 다음과 같다. 전송할 패킷이 발생하면 할당된 제어슬롯까지 기다린 후 제어패킷을 전송한다. 제어패킷이 송신 그룹내의 노드와 송신그룹의 부허브 간의 전파지연 시간 후에 도착되면 제어패킷들의 정보를 이용해 충돌여부를 판단한다. 그룹내의 노드들만 동일 데이터슬롯에서 전송기회를 가지므로 충돌여부는 그룹내의 노드들만 판단하면 되고, 중재알고리즘은 모든 노드들이 제어패킷을 수신한 후 각 노드에서 독립적으로 적용된다. 충돌여부를 판단하기 위한 중재알고리즘은 다음과 같다. 그룹내의 노드들 중 자신과 동일한 목적지 노드를 갖는 노드가 존재하는지를 판단한다. 동일한 노드가 존재하면 패킷의 발생시간이 가장 빠른 노드가 우선권을 갖는다.

WDM/SCM 프로토콜의 장점은 다음과 같다. 노드 그룹화를 이용한 이중성형 구조를 적용함으로써 기존의 전용 제어채널을 이용하는 방식과 달리 제어패킷의 전파경로가 송신노드와 목적지노드간의 거리가 아닌 송신노드와 부허브의 거리로 단축되어 패킷의 평균지연시간이 감소한다. 또한, 기존의 고정할당 방식과 달리 TDM 프레임은 망내의 노드수가 아닌 그룹수로 구성함으로써 전송기회를 기다리기 위한 큐잉지연 시간이 감소된다.

III. 성능분석 모델링

본 절은 제안된 WDM/SCM 프로토콜의 성능을 분석하기 위한 모델을 제시한다. 성능분석은 해석적 모델과 시뮬레이션 모델을 적용하였다. 성능분석의 척도로

는 망의 수율(network throughput)과 패킷 평균 지연 시간(packet mean delay) 등이 있다. 해석적 모델에서 주어진 가정은 첫째, 망내의 모든 노드들의 동작 상태는 동일한 통계적 특성을 가지고 있고 둘째, 각 노드에서 발생한 패킷은 각 슬롯에서 λ 의 평균과 분산을 갖는 포아송(Poisson) 프로세스로 모델링되며 셋째, 망내의 모든 노드들은 프레임 단위로 동기 되어있다고 하였다.

그림 4는 성능분석을 위한 semi-Markov 프로세스 모델의 상태도를 나타내고 표 1은 각 상태에서 가능한 천이상태와 천이확률을 나타내고 있다^[12]. Semi-Markov 프로세스 모델은 송신기의 동작상태를 각 상태(state)로 묘사하고, 각 상태는 'Idle' 상태, 'Residual Wait' 상태, 'Transmit' 상태, 'Transmit Wait' 상태, 그리고 'Frame Wait' 상태로 구분된다. 또한, 'Transmit' 상태, 'Transmit Wait' 상태, 그리고 'Frame Wait' 상태는 버퍼에 대기중인 패킷의 수에 따라 B 개의 상태로 구분된다.

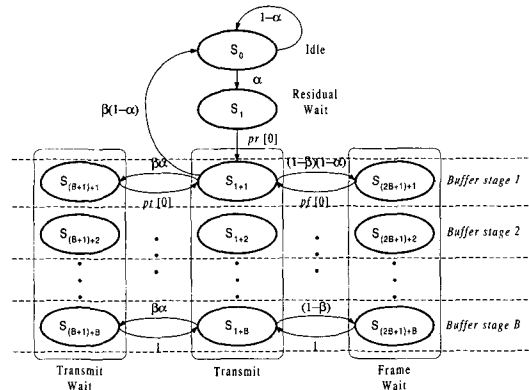


그림 4. 성능분석을 위한 semi-Markov 모델의 상태도
Fig. 4. State diagram of the semi-Markov model for analyzing the performance.

각 상태는 다음과 같이 정의된다. 'Idle' 상태 S_0 는 패킷이 발생되지 않는 초기의 상태이다. 'Residual Wait' 상태 S_1 은 하나의 전송할 패킷이 발생되고, 데이터패킷을 전송하기 위해 할당된 슬롯까지 기다리는 상태이다. 'Transmit' 상태 S_{1+i} ($1 \leq i \leq B$) 는 할당된 슬롯에서 데이터패킷을 전송하는 상태이다. 'Transmit Wait' 상태 $S_{(B+1)+i}$ ($1 \leq i \leq B$) 는 데이터채널을 할당받은 경우 목적지 노드의 home 채널을

표 1. Semi-Markov 모델의 상태간 천이확률
Table 1. Transition probabilities between states of the semi-Markov model.

상태	천이확률
Idle S_0	$S_0 \rightarrow \begin{cases} S_0 : 1-\alpha \\ S_1 : \alpha \end{cases}$
Residual Wait S_i	$S_i \rightarrow \begin{cases} S_{1+j} : pr[i-1], & \text{for } 1 \leq i < B \\ S_{1+B} : 1 - \sum_{k=0}^{B-2} pr[k] \end{cases}$
Transmit S_{1+i}	$S_{1+i} \rightarrow \begin{cases} S_0 : \beta(1-\alpha) \\ S_{(B+1)+1} : \beta\alpha \\ S_{(2B+1)+2} : (1-\beta)\alpha \\ S_{(2B+1)+1} : (1-\beta)(1-\alpha) \end{cases}$ $S_{1+i} \rightarrow \begin{cases} S_{(B+1)+i-1} : \beta(1-\alpha) \\ S_{(B+1)+i} : \beta\alpha \\ S_{(2B+1)+i+1} : (1-\beta)\alpha \\ S_{(2B+1)+i} : (1-\beta)(1-\alpha) \end{cases} \quad \text{for } 2 \leq i < B$ $S_{1+B} \rightarrow \begin{cases} S_{(B+1)+B-1} : \beta(1-\alpha) \\ S_{(B+1)+B} : \beta\alpha \\ S_{(2B+1)+B} : (1-\beta) \end{cases}$
Transmit Wait $S_{(B+1)+i}$	$S_{(B+1)+i} \rightarrow S_{1+j} : pt[j-i], \quad \text{for } 1 \leq i < B, i \leq j < B$ $S_{(B+1)+i} \rightarrow S_{1+B} : 1 - \sum_{k=0}^{B-1-i} pt[k], \quad \text{for } 1 \leq i < B$ $S_{(B+1)+B} \rightarrow S_{1+B} : 1$
Frame Wait $S_{(2B+1)+i}$	$S_{(2B+1)+i} \rightarrow S_{1+j} : pf[j-i], \quad \text{for } 1 \leq i < B, i \leq j < B$ $S_{(2B+1)+i} \rightarrow S_{1+B} : 1 - \sum_{k=0}^{B-1-i} pf[k], \quad \text{for } 1 \leq i < B$ $S_{(2B+1)+B} \rightarrow S_{1+B} : 1$

통해 데이터패킷을 전송하고, 다음 프레임의 할당된 슬롯까지 기다리는 상태이다. 'Frame Wait' 상태 $S_{(2B+1)+i}$ ($1 \leq i \leq B$)는 데이터채널을 할당받지 못한 경우 다음 프레임의 할당된 슬롯까지 기다리는 상태이다.

그림 4와 표 1에 사용된 표기는 다음과 같이 정의된다. 확률 α 는 단위슬롯동안 패킷발생확률을 의미하고, $\alpha = 1 - e^{-\lambda}$ 로 주어지며 β 는 패킷 전송을 성공할 확률이다. 확률 $pr[k]$, $pt[k]$, $pf[k]$ 는 각각 'Residual Wait' 상태, 'Transmit Wait' 상태, 그리고 'Frame Wait' 상태에 머무르는 시간동안 k 개의 패킷이 발생할 확률을 의미한다.

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

$$pt[k] = \frac{1}{k!} e^{-\lambda t_i} (\lambda t_i)^k, \quad t_i = (G-1) \quad (1.b)$$

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

성능의 척도인 망의 수율과 패킷의 평균 지연시간은 다음의 3단계에 의해 얻을 수 있다. 첫 번째 단계는 semi-Markov 프로세스의 embedded Markov chain에서 각 상태에 머무를 한계확률(limiting probabilities) π_i ($0 \leq i \leq 3B+1$)를 구한다. 한계확률은 다음의 정상상태(steady state) 방정식을 풀어서 구할 수 있다.

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

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

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

두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 구해진 embedded Markov chain에서 한계확률을 이용하여 semi-Markov 프로세스에서 각 상태에 머무는 한계확률 P_i ($0 \leq i \leq 3B+1$)을 구한다.

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

식 (3)에서 각 상태에서의 머무름 시간 τ_i ($0 \leq i \leq 3B+1$)는 다음과 같이 주어진다. $\tau_0 = 1$, $\tau_1 = G/2$, $\tau_{1+i} = 1$ ($1 \leq i \leq B$), $\tau_{(B+1)+i} = (G-1)$ ($1 \leq i \leq B$), 그리고 $\tau_{(2B+1)+i} = (G-1)$ ($1 \leq i \leq B$)로 주어진다.

β 는 제어패킷을 수신한 후 충돌이 발생하지 않고 데이터채널을 할당받을 확률을 의미하고, 다음과 같은 두 가지 경우에 의해 결정된다. 첫째, 전송할 패킷을 가진 송신그룹내의 노드들 중 자신을 제외한 모든 송신노드들의 목적지 노드가 자신의 목적지노드와 동일하지 않을 경우다. 둘째, 목적지 노드가 동일할 경우 패킷 발생시간이 가장 빠른 송신노드에게 채널을 할당하는데 자신의 패킷이 발생시간이 가장 빠른 경우이다.

세 번째 단계는 망의 수율과 패킷의 평균 지연시간과 같은 성능 척도요소를 얻는 과정이다. 망의 수율 T_{net} 는 망 내에서 단위 슬롯 당 데이터채널을 할당받아 성공적으로 전송된 패킷의 평균수로 정의된다. 망의 수율은 패킷을 전송하기 위해 'Transmit' 상태에 머무를 확률, 충돌이 발생하지 않고 데이터채널을 할당받을 확률, 그리고 전체 데이터채널 수의 곱으로 표현되고, 식(4.a)와 같다. 또한, 노드 당 수율은 단위노드의 수율로 식(4.b)와 같다.

$$T_{net} = GM\beta \sum_{i=1}^B P_{1+i} \quad (4.a)$$

$$T_{node} = \beta \sum_{i=1}^B P_{1+i} \quad (4.b)$$

패킷의 평균 지연시간은 패킷이 발생된 후 목적지 노드에 도달할 때까지 걸린 시간이다. 패킷의 평균 지

연시간은 제어패킷의 전송지연, 데이터 패킷의 전송지연, 제어패킷의 전파지연, 데이터 패킷의 전파지연, 큐잉지연으로 구성된다. 그런데 제어패킷 및 데이터 패킷의 전송지연시간은 전파지연 시간에 비해 매우 적으므로 무시할 수 있다면, 패킷의 평균지연 시간은 식(5)에서 보는 바와 같이 크게 큐잉 지연시간 D_Q 와 제어패킷의 전파지연시간 D_{CP} , 데이터 패킷의 전파지연시간 D_{DP} 의 합으로 주어진다^[8].

$$D = D_Q + D_{CP} + D_{DP} \quad (5)$$

큐잉 지연시간은 Litte's Law를 적용함으로써 구해진다^[12]. 즉, $D_Q = E[N]/T_{node}$ 로 주어지며 여기서 $E[N]$ 은 노드의 버퍼에 머무르고 있는 평균 패킷의 개수를 의미하며, T_{node} 는 노드 당 수율로 식(4.b)에서 주어진 것과 같다.

버퍼에 대기중인 패킷의 수 $E[N]$ 은 $E[N] = \sum_{i=0}^{3B+1} E[N_i]P_i$ 로 정의되고 각 상태에 머무르는 패킷의 수는 식(6)과 같이 주어진다.

$$E[N_0] = 0 \quad (6.a)$$

$$E[N_1] = 1 + \sum_{j=0}^{B-1} j\beta^j \pi_j \quad (6.b)$$

$$E[N_{1+i}] = i, \quad 1 \leq i \leq B \quad (6.c)$$

$$E[N_{(B+1)+i}] = i + \sum_{j=0}^{B-i} j\beta^j \pi_j, \quad 1 \leq i \leq B \quad (6.d)$$

$$E[N_{(2B+1)+i}] = i + \sum_{j=0}^{B-i} j\beta^j \pi_j, \quad 1 \leq i \leq B \quad (6.e)$$

IV. 성능분석 및 평가

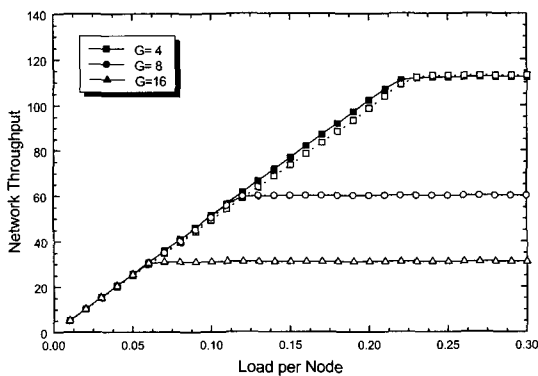
본 장에서는 제안된 프로토콜을 분석하기 위해 III장에서 제시된 성능분석 모델링의 타당성을 입증하기 위해 discrete-event 시뮬레이션을 통해 얻은 결과와 해석적 결과를 비교하였다. 시뮬레이션 모델은 Monte Carlo 방식의 discrete-event 모델을 바탕으로 하는 BONEs (Block Oriented Network Simulator) designer 시뮬레이터를 이용하여 이루어졌다.

성능분석을 위한 척도로는 망내의 전체 노드수 N , 망내의 그룹수 또는 WDM 채널수 G , 그룹내의 노드수 또는 SCM 채널수 M , 그리고 단위 노드에서 데이

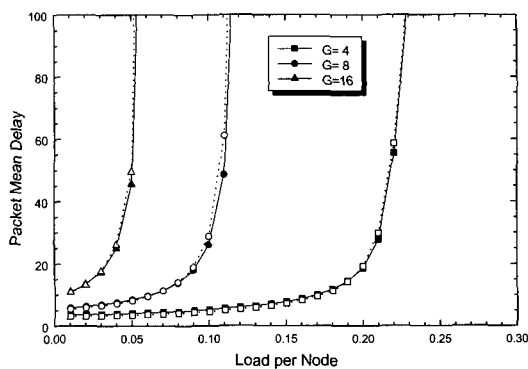
터패킷을 위한 버퍼수 B , 전파지연시간 D_{CP} , D_{DP} 등이 있다. 성능분석 과정에서 버퍼수는 B 는 30, 데이터 패킷의 전파지연 시간 D_{CP} , D_{DP} 는 모두 0이라고 가정하였다.

1. 균일 트래픽에서의 성능 분석

그림 5는 semi-Markov 프로세스를 이용한 해석적 모델과 discrete-event 시뮬레이션 모델의 타당성을 입증하기 위하여 $N = 512$ 이고 각 노드에서 발생하는 트래픽 분포가 균일한 경우 사용 가능한 WDM 채널 수 G 를 {4, 8, 16} 으로 변화하면서 망의 수율과 패킷의 평균 지연시간의 성능변화를 보이고 있다. 그림에서 점선은 해석적 모델에 의한 결과이고 실선은 discrete-event 시뮬레이션 결과이다.



(a) Network throughput vs. load per node



(b) Packet mean delay vs. load per node

그림 5. 해석적 모델과 시뮬레이션 모델의 성능비교 (점선 : 해석적 모델, 실선 : 시뮬레이션 모델)

Fig. 5. Comparison of the analytic model to simulation model(dotted line: analytic model, solid line : simulation model).

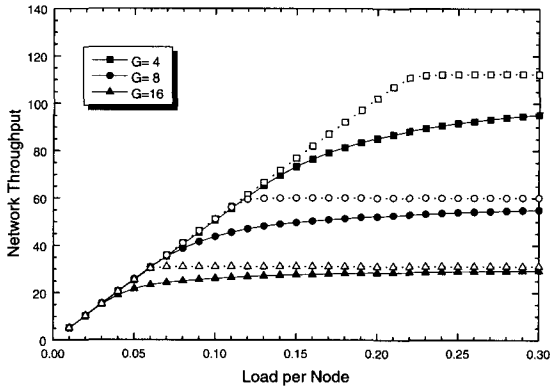
그림 5(a)는 단위 노드당 부하의 변화에 따른 망의 수율 변화를 나타내는 결과로 해석적 결과가 시뮬레이션 결과와 2% 이내에서 일치함을 볼 수 있다. 망의 수율은 그룹내의 부하가 1이 될 때까지 선형적으로 증가하다가 그룹내의 부하가 1이 되면 WDM/SCM 데이터 채널수 만큼의 망의 수율에서 포화상태가 되므로 WDM/SCM 다중접속 프로토콜은 채널 활용도가 거의 100% 임을 알 수 있다. 즉, 동일그룹내의 노드들은 동일 슬롯을 통해 패킷을 전송하므로 단일노드의 부하가 $1/G$ 이면 그룹내의 부하가 1이 되어 망의 수율은 최대가 된다. 예를 들면, $G=8$ 인 경우 단일노드의 부하가 $1/8(=0.125)$ 일 때까지 망의 수율은 선형적으로 증가하고 단일노드의 부하가 0.125 부터는 망의 수율이 그룹내의 노드수인 64로 포화상태가 된다.

그림 5(b)는 부하의 변화에 따른 패킷의 평균 지연시간을 나타내는 결과로 망의 수율이 선형적으로 변하는 동안은 채널충돌이 중재알고리즘에 의해 적절하게 해결되므로 패킷의 평균 지연시간이 거의 증가하지 않는다. 그러나, 망의 수율이 포화상태에 도달하면 채널충돌의 회수가 보다 많아지므로 평균 지연시간은 급격히 증가한다. 그림 5(b)에서 시뮬레이션 결과가 해석적 결과보다 다소 적고 망의 수율이 포화상태에 도달하는 경우에는 최대 5%의 차이를 보이고 있다. 이는 WDM/SCM 프로토콜의 중재알고리즘에서 목적지그룹의 충돌이 발생하는 경우 패킷 발생시간이 가장 빠른 노드에게 채널을 할당하도록 설계되었는데 해석적 분석과정에서는 우선 순위에 대한 영향을 고려하지 않았기 때문이다.

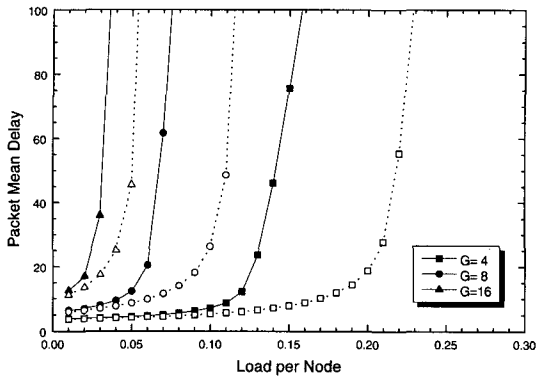
2. 비균일 트래픽에서의 성능분석

그림 6은 트래픽 분포가 비균일한 경우 WDM/SCM 방식의 성능열화 정도를 분석하기 위하여 $N = 512$ 이고 사용 가능한 WDM 채널수 G 를 {4, 8, 16} 으로 변화하면서 망의 수율과 패킷의 평균 지연시간의 성능변화를 보이고 있다. 본 논문에서의 비균일 트래픽 분포는 disconnected 형태의 트래픽 매트릭스를 사용하였다^[13]. 그림에서 점선은 트래픽 분포가 균일한 경우이고, 실선은 비균일한 경우이다. 그림 6(a)와 그림 6(b)에서 볼 수 있듯이 트래픽 분포가 비균일 하더라도 망의 수율이 포화상태에 도달하기 전까지는 망의 수율과 패킷의 평균 지연시간이 거의 열화되지 않음을 볼 수 있다. 그러나, 망의 수율이 포화상태에 가까이

도달하면 트래픽분포가 비균일한 경우에는 성능이 급격히 열화 되는데 이는 트래픽 분포가 비균일하여 특정 노드로 향하는 패킷이 많아지므로 충돌확률이 높아지고, 패킷 발생률이 높은 노드에서는 패킷의 큐잉지연 시간이 증가하기 때문이다.



(a) Network throughput vs. load per node



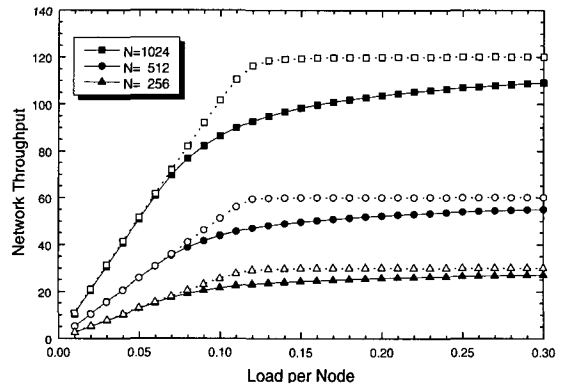
(b) Packet mean delay vs. load per node

그림 6. 비균일 트래픽에서 채널수 변화에 따른 성능 비교 (점선:균일트래픽, 실선:비균일트래픽)

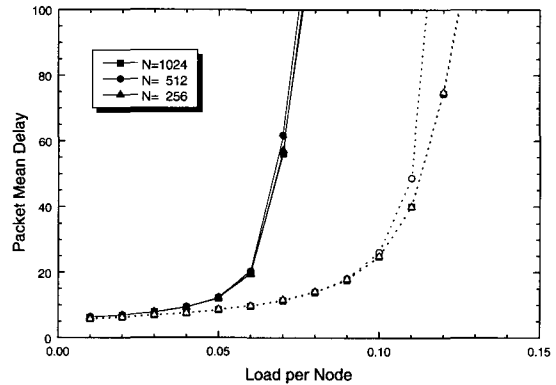
Fig. 6. Comparison of the performance under non-uniform traffic with varying the number of channel (dotted line : uniform traffic, solid line : non-uniform traffic).

그림 7은 망내의 전체 노드수를 변화하면서 성능변화를 분석하기 위한 것으로 사용 가능한 WDM 채널 수 $G = 8$ 이고 망내의 노드수 N 을 {256, 512, 1024} 으로 변화하면서 망의 수율과 패킷의 평균 지연시간의 성능변화를 보이고 있다. 그림 7(a)에서 보듯이 망의 수율은 각 노드의 부하가 $1/G$ 이 되어 그룹내의 부하가 1이 될 때까지 선형적으로 증가하다가 그룹내의 부

하가 1이 되면 망내의 노드수에서 망의 수율이 포화상태가 된다. 또한, 그림 7(b)에서 보듯이 패킷의 평균 지연시간은 망내의 노드수가 증가하더라도 그룹수 G 가 8로 동일하므로 프레임을 구성하는 슬롯의 크기가 동일하여 패킷의 평균 지연시간에 영향을 주는 큐잉지연이 거의 비슷하므로 망내 노드수에 관계없이 거의 유사한 경향을 볼 수 있다.



(a) Network throughput vs. load per node



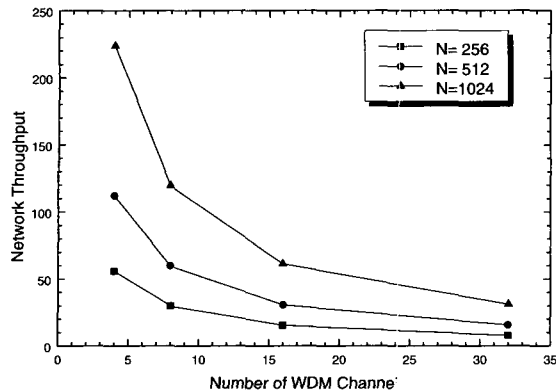
(b) Packet mean delay vs. load per node

그림 7. 비균일 트래픽에서 노드수 변화에 따른 성능 비교 (점선 : 균일 트래픽, 실선 : 비균일 트래픽)

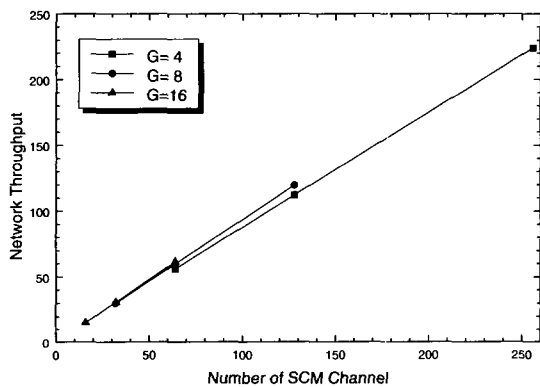
Fig. 7. Comparison of the performance under non-uniform traffic with varying the number of node (dotted line : uniform traffic, solid line : non-uniform traffic).

3. WDM 및 SCM 채널수 변화에 따른 성능분석

그림 8은 WDM 및 SCM 채널수의 변화에 따른 WDM/SCM 프로토콜의 성능변화를 보이고 있다. 그



(a) WDM 채널수 변화에 따른 성능



(b) SCM 채널수 변화에 따른 성능

그림 8. WDM 및 SCM 채널수 변화에 따른 성능분석
 Fig. 8. Performance analysis with varying the number of WDM and SCM channels.

림 8(a)는 WDM/SCM 방식에서 망내의 노드수 N 이 {256, 512, 1024}일 때 사용 가능한 WDM 채널수의 변화에 따른 망의 수율을 나타내고, 그림 8(b)는 WDM 채널수 G 가 {4, 8, 16}일 때 SCM 채널수의 변화에 따른 망의 수율을 보이고 있다. 그림 8(a)에서 보듯이 망내의 노드수가 일정할 때 WDM 채널수를 증가시키면 그룹 내 노드수는 상대적으로 감소하기 때문에 망의 수율이 감소하고, 그림 8(b)에서는 WDM 채널수가 일정할 때 SCM 채널수를 증가시킨다는 것은 망내에서 단위그룹에 속한 노드수의 증가를 의미하므로 망의 수율이 증가한다. 그림 8의 결과로부터 사용 가능한 WDM 채널수를 줄이고 SCM 채널수를 늘이는 것이 성능도 향상되고 보다 경제적인 판단할 수 있다. 그러나, WDM/SCM 방식은 SCM 방식에서 발생

할 수 있는 잡음이나 비선형 왜곡에 의해 SCM 채널수를 무한정 증가시킬 수 없는 단점이 존재한다. 따라서, 제안한 WDM/SCM 프로토콜을 효율적으로 설계하기 위해서는 시스템 구현 측면에서 요구되는 CNR을 만족하면서 사용 가능한 WDM 채널수가 주어질 때 망내에서 수용할 수 있는 전체 노드수 산출이 전제되어야 한다.

V. 결론

본 논문에서는 수동이중성형구조의 광통신망에서 효율적인 WDM/SCM 다중접속 프로토콜을 제안하여 해석적인 모델과 시뮬레이션으로부터 성능을 평가하였다. 제안된 프로토콜의 특징은 망내의 노드들을 그룹단위로 분할하여 이중성형구조를 통해 연결하고, 각각의 노드는 제어패킷과 데이터 패킷의 송수신을 위한 고유의 WDM/SCM 채널이 할당되어 있다.

본 논문에서는 WDM 채널수가 제한되어 수용 가능한 망내의 노드수가 제한되는 기존 방식들의 단점을 보완하기 위해서 하나의 WDM 채널을 SCM 다중화하여 채널의 활용도를 높이고, 노드 그룹핑을 통해 사전 할당방식의 단점을 그룹수 만큼의 슬롯으로 프레임 구성하여 보완하고, 예약방식의 단점인 제어패킷의 전파지연을 이중성형 구조의 망구조를 통해 부히브와 노드간의 전파지연으로 감소시켰으며 특히 비균일 트래픽 분포를 갖는 망에서도 패킷의 평균지연시간이 거의 증가하지 않는 특성을 확인할 수 있었다.

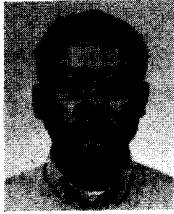
본 논문에서 제안된 프로토콜은 망내 노드수가 많고 전파지연시간에 영향을 많이 받으며 트래픽 발생분포가 비균일한 LAN(Local Area Network), WAN(Wide Area Network) 설계에 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

VI. 참고문헌

- [1] P. A. Humblet, R. Ramaswami, and K. N. Sivarajan, "An Efficient Communication Protocol for High-Speed Packet-Switched Multichannel Networks," *IEEE Journal on Select. Areas in Commun.*, vol.11, no.4, pp.568-578, May 1993.

- [2] 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 Select. Areas in Commun.*, vol.14, no.5, pp.923-934, Jun. 1996.
- [3] R. Chipalkatti, Z.Zhang, and A.S.Acampora, "Protocols for Optical Star-Coupler Network Using WDM: Performance and Complexity Study," *IEEE Journal on Select. Areas in Commun.*, vol.11, no.4, pp.579-589, May 1993.
- [4] K. M. Sivalingam and P. W. Dowd, "A Multilevel WDM Access Protocol for an Optically Interconnected Multiprocessor System," *Journal of Light. Technol.*, vol. 13, no.11, pp. 2152-2167, Nov. 1995.
- [5] M. W. Janoska and T. D. Todd, "Coupled reservation protocols for hierarchical single-hop photonic networks," *IEE Proc-Commun.*, vol.144, no.4, pp.247-255, Aug. 1997.
- [6] Chen-Ken Ko and Sy-Yen Kui, "Multiaccess Processor Interconnection Using Subcarrier and Wavelength Division Multiplexing," *Journal of Light. Technol.*, vol.15, no.2, pp. 228-241, Feb. 1997.
- [7] K. Bogineni, K.M.Sivalingam, and P.W.Dowd, "A Collisionless Multiple Access Protocol for a Wavelength Division Multiplexed Star-Coupled Configuration: Architecture and Performance Analysis," *Journal of Light. Technol.*, vol.10, no.11, pp.1688-1699, Nov. 1992.
- [8] B. Hajek, N. B. Likhanov, and B. S. Tsybakov, "On the Delay in a Multiple-Access System with Large Propagation Delay," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol.40, no.4, pp. 1158-1166, Jul. 1994.
- [9] K. Bogineni, K.M.Sivalingam, and P.W.Dowd, "Low-Complexity Multiple Access Protocols for Wavelength-Division Multiplexed Photonic Networks," *IEEE Journal on Select. Areas in Commun.*, vol.11, no.4, pp.590-603, May 1993.
- [10] S. Lee, J. Yu and J. Park, "WDM Multiple Access Protocol using Node Grouping Scheme for Passive Double Star Networks," *IEE Proc-Commun.*, vol. 146, no. 5, pp.319-324, Oct. 1999.
- [11] 이상록, 유진태, 박진우, "수동이중성형 광통신망에서 노드 그룹화를 이용한 WDM 다중접속 프로토콜," 대한 전자공학회 논문지, 제34권 S편, 제9호, pp. 923-932, 1997년 9월
- [12] S. M. Ross, *Stochastic Process*, Wiley & Sons, 1983.
- [13] G. N. Rouskas, M. H. Ammar, "Analysis and optimization of transmission schedules for single-hop WDM networks," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol.13, no.2, pp.211-221, 1995.

저 자 소 개



劉 鎮 泰(正會員)

1971년 9월 14일생. 1996년 2월 : 고려대학교 전자공학과, 학사. 1998년 2월 : 고려대학교 전자공학과, 석사. 1998년 3월~현재 : 고려대학교 전자공학과 박사과정. <주관심 분야>

WDM 광통신망 설계, 광/무선 통신망 설계



李 明 文(正會員)

1969년 6월 9일생. 1991년 2월 : 고려대학교 전자공학과, 학사. 1993년 2월 : 고려대학교 전자공학과, 석사. 1997년 3월~현재 : 고려대학교 전자공학과 박사과정. 1993년 2월~

1996년 10월 : LG전자 멀티미디어 연구소 주임연구원. <주관심분야> 광통신망 설계, 광통신망 관리



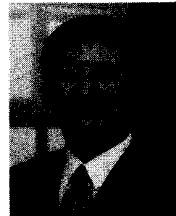
金 容 範(正會員)

1963년 3월 26일생. 1985년 2월 : 고려대학교 전자공학과, 학사. 1987년 2월 : 서울대학교 전자공학과, 석사. 2001년 8월 : 고려대학교 통신시스템 기술학과, 박사. 1987년 7월~현재 :

한국통신 선임연구원. <주관심분야> 초고속 광전송시스템, 광섬유 분산보상

朴 時 佑(正會員)

1961년 10월 1일생. 1989년 2월 : 고려대학교 전자공학과, 학사. 1991년 8월 : 고려대학교 전자공학과, 석사. 1996년 2월 : 고려대학교 전자공학과, 박사. 1994년 3월~1995년 12월 : 경희대학교 전파공학과 강사. 1995년 1월~1996년 3월 : 부혜정보통신 책임연구원. 1996년 4월~2001년 6월 : 한솔PCS(주) 엔지니어링본부 RF 그룹(선임연구원). 2001년 7월~현재 : 한국통신프리텔(주) 선형연구소 수석연구원. <주관심분야> RF 이동통신, CDMA 이동통신



朴 鎮 雨(正會員)

1955년 7월 5일생. 1979년 3월 : 고려대학교 전자공학과, 학사. 1983년 8월 : 클렘슨대학교 전기공학과, 석사. 1987년 11월 : 버지니아 주립대학교, 박사. 1988년 3월~1989년 2월 : 명지대학교 전자공학과. 1989년 3월~현재 : 고려대학교 전자공학과 교수. <주관심분야> 광전송시스템, 광교환시스템, 광통신망