

Passive Star형 광상호연결망에서 광/전 변환을 고려한 최적의 전송 스케줄링

(Optimal Transmission Scheduling with Optical/Electronic Conversion Delay in Optical Passive Star Interconnections)

이 상 수[†] 위 규 범^{**} 홍 만 표^{**} 예 흥 진^{**}
(Sangsoo Lee) (Kyubum Wee) (Manpyo Hong) (Hong-Jin Yeh)

요약 본 논문은 N 개의 노드로 구성된 파장분할다중화(Wavelength Division Multiplexing)방식의 Passive Star형 광상호연결망에서 K 개의 파장이 사용가능 할 때 패킷 전송 스케줄링 문제를 다루고 있다. 모든 노드는 파장조율이 가능한 송신기와 특정 파장에 고정된 수신기를 각각 한 개씩 가지고 있으며, 하나의 패킷이 송신기로부터 수신기까지 전송되는 데에 걸리는 시간은 항상 일정하다고 가정한다. 최적의 패킷 전송 스케줄이란 송신노드 입장에서 임의의 파장에서 다른 파장으로 송신기를 조율하는 데에 따른 지연시간(tuning delay)을 고려하여 같은 시간에 최대한 많은 서로 다른 파장을 사용하도록 함과 동시에, 수신노드의 입장에서 수신된 패킷들의 광/전(光/電)변환에 따른 지연시간(conversion delay)을 고려하여 패킷의 수신간격을 일정하게 유지함으로써 모든 패킷이 최소시간 내에 전송될 수 있도록 언제 어떤 파장을 사용하여 패킷들을 전송할 것인지 결정하는 것을 말한다. 본 논문에서는 파장조율에 따른 지연시간을 δ 로 나타낼 때 모든 노드가 자기 자신을 제외한 다른 모든 노드에 주기적으로 전방송(all-to-all broadcast)을 반복하는 경우에 임의로 주어진 N, K, δ 의 값에 대하여 최적의 패킷 전송 스케줄을 구할 수 있는 알고리즘을 제안하고 있다. 또한, N 이 K 로 나누어 떨어지면 최적의 전방송 주기는 $\left\lceil \frac{NK(\delta+1)}{N^2 - N - NK + K^2 + K} \right\rceil (N-1)$ 임을 증명하였다.

Abstract This paper is concerned with packet transmission scheduling problem when K wavelengths are available between N nodes in WDM optical passive star interconnections. It is assumed that each node has one tunable transmitter and one fixed-tuned receiver respectively, and the duration time of each packet transmission is constant. An optimal schedule is to minimize the whole transmission time for all the packets. In order to find the optimal schedule, we have to consider the tuning delay as well as the optical/electronic conversion delay simultaneously. The former constraint requires that the different wavelengths are used at maximum in the same interval and the latter requires for each node to receive a set of packets in which the time interval is evenly spaced. In this paper, given any values of N, K and the tuning delay denoted by δ , we propose an algorithm to find optimal schedules for all-to-all broadcasts which are repeated periodically, where no node transmits packets to itself. And, it is proved that the optimal cycle length of all-to-all broadcast is $\left\lceil \frac{NK(\delta+1)}{N^2 - N - NK + K^2 + K} \right\rceil (N-1)$ when N is divisible by K .

* 이 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 대학교수 해외파견 연구지원에 의하여 연구되었음.

† 비 회 원 : (주)기산텔레콤 기술연구소 연구1실 연구원

sslee@kisantel.co.kr

** 중 신 회 원 : 아주대학교 정보통신전문대학원 교수

kbwee@madang.ajou.ac.kr

mphong@madang.ajou.ac.kr

hjyeh@madang.ajou.ac.kr

논문접수 : 2000년 5월 9일

심사완료 : 2001년 5월 14일

1. 서론

파장분할다중화(Wavelength Division Multiplexing)를 사용하는 광전송은 낮은 데이터 손실율과 함께 넓은 대역폭으로 대량의 고속 데이터 전송에 매우 효율적이다[1]. 그러나 일반적으로 네트워크에 연결된 노드의 수에 비해서 사용할 수 있는 파장의 수는 매우 적으므로 파장을 공유하여야만 하는데, 이 때 패킷들에 대한 송수

신 스케줄링이 무엇보다도 중요하게 된다.

본 논문은 광상호연결망의 구조중 송신노드와 수신노드 사이에 어떠한 중간 경로설정과정을 거치지 않는 passive star형 네트워크에서 하나의 광링크를 통하여 여러 개의 패킷들을 독립적으로 서로 다른 파장으로 동시에 전송할 수 있는 파장분할다중 방식을 사용할 때의 문제를 다루고 있다. 즉, N 개의 노드로 구성된 Passive star형 광상호연결망에서 모든 광링크는 K 개의 서로 다른 파장을 사용한다. 모든 패킷은 단위시간(unit time) 내에 전송이 완료되며 N 은 K 의 배수라고 가정한다. 또한, 모든 노드들이 자기 자신에게는 패킷전송을 하지 않는다. 즉, 동일 노드간의 패킷전송은 허용하지 않는다.

각 노드에는 [3]에 따라 파장을 임의로 변경할 수 있는 송신기(transmitter 또는 laser) 또는 수신기(receiver 또는 filter)가 적어도 하나는 갖추어져 있어야 하며, 여기에서는 모든 노드가 파장변환이 가능한 송신기(tunable transmitter)와 특정 파장으로 고정된 수신기(fixed tune receiver)를 각각 한 개씩 갖추고 있다고 가정한다. 또한 임의의 패킷이 송신기를 통해 수신기로 전송되는데 걸리는 시간을 단위(unit time)로 할 때, 송신기의 파장을 현재 사용중인 것을 다른 파장으로 조율하는 데에 따른 지연시간(tuning delay)을 $\delta (>0)$ 로 나타내기로 한다.

모든 노드가 자기 자신에게는 패킷을 전송하지 않으므로 한 번의 전방송을 위해 전송될 패킷의 개수는 $N(N-1)$ 이 된다. [7]에서는 앞에서와 마찬가지로 N 이 K 로 나누어 떨어진다고 가정하여 스케줄링 알고리즘을 제시하고, 여러 번의 전방송이 반복적으로 이루어질 때 최적의 전방송 주기(cycle length)는 $\max\left\{\frac{N(N-1)}{K}, K\delta + N - 1\right\}$ 임을 증명하였다. 또한, 예홍진 외[8, 10, 11]는 [7]과는 다른 방법으로 전방송에서 자기자신으로의 패킷전송을 허용하는 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 최적의 전방송 주기(cycle length)는 각각 $\max\left\{\frac{N^2}{K}, K\delta + N\right\}$, $\max\left\{\frac{N(N-1)}{K}, K\delta + N - 1\right\}$ 임을 증명하였으며, 임의로 주어진 N , K , δ 의 값에 대하여 이를 만족하는 패킷 전송 스케줄링 알고리즘을 제시하였다.

본 논문에서는 기존의 패킷 전송 스케줄링 알고리즘이 노드의 개수, 사용가능한 파장의 개수, 그리고 송신기의 파장조율에 따른 지연시간이라는 3가지 변수를 사용한 것에 비하여 광/전변환에 따른 지연시간이라는 새

로운 변수를 추가하여 최적의 전방송 주기를 보장하기 위한 새로운 패킷 전송 스케줄링 알고리즘을 제안하고 있다. 2장에서는 광/전 변환에 따른 지연시간을 추가적으로 고려하는 이유와 그에 따른 새로운 스케줄링 알고리즘의 필요성을 소개하고, 3장과 4장에서는 각각 최적의 전방송 주기와 이를 만족하는 패킷 전송 스케줄링 알고리즘을 제시한다.

2. 광/전(光/電) 변환에 따른 지연시간

현재의 패킷 전송은 광네트워크를 통해 고속으로 이루어지고, 패킷을 처리하는 노드는 이 패킷을 전기적인 신호로 바꾸어서 처리하고 있다. [2]에 따르면, 현재 광 전송 속도는 최대 5 Tbps지만 광신호를 전기적인 신호로 변환하는 속도는 10Gbps 정도이다. 즉, 전송 속도와 이를 전기적인 신호로 바꾸어 처리하는 시간(O/E Conversion) 사이에서 많은 오버헤드가 발생한다. 특히, passive star와 같은 구조의 네트워크는 한 노드가 다른 노드들에 의해 매 단위 시간 마다 연속적으로 패킷을 받을 수 있고, 이 때 전송 속도와 광/전(光/電) 변환 시간의 차이 때문에 패킷 손실이 발생할 수 있다. 하지만, 이전의 연구결과 [4, 5, 6, 7, 8, 10, 11]에서는 N , K , δ 값만을 고려해서 최적의 방송주기를 갖는 송수신 스케줄링 알고리즘을 제안함으로써, 주기적으로 전방송이 반복되는 광상호연결망에서 광링크를 통해 수신된 대량의 패킷을 전기적으로 처리하는 데에 충분한 시간을 보장할 수 없었다. 따라서, 그 결과 수신노드입장에서는 불규칙적으로 패킷들이 도착하므로, 효율적인 광/전(光/電) 변환을 수행하는 데에 추가로 지연시간이 발생할 가능성이 높아지게 되었다.

그림 1은 [8]에 의한 $N=9$, $K=3$, $\delta=7$ 일 때의 최적의 전방송 스케줄을 나타내고 있다. 그림에서 가로축은 시간을 나타내고 있으며, 세로축과 표 안의 숫자들은 (a)의 경우에는 각각 송신노드번호와 수신노드번호를 (b)위 경우에는 반대로 각각 수신노드번호와 송신노드번호를 나타내고 있다.

그림 1의 (a)에서 보면 각 송신 노드에서 패킷들이 규칙적으로 전송되는 것을 쉽게 확인할 수 있다. 하지만 (b)와 같이 동일한 스케줄을 수신노드 관점에서 재배치해보면 패킷의 수신 간격이 1부터 9까지 상당히 불규칙임을 발견할 수 있다. 즉, 수신된 패킷들을 광/전 변환하여 처리하는 작업이 최소의 패킷 수신 간격이내에 완료되지 못하면 전체 전방송 주기는 늘어날 수밖에 없다.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | | |
| 0 | 3 | 6 | | | | | | | | 2 | 5 | 8 | | | | | | | | 1 | 4 | 7 | | | | | | | | | |
| 1 | | | 0 | 3 | 6 | | | | | | | 2 | 5 | 8 | | | | | | | | 4 | 7 | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | 0 | 3 | 6 | | | | | | | | 5 | 8 | | | | | | | | 1 | 4 | 7 | | | | |
| 3 | 7 | | | | | | | | 0 | 3 | 6 | | | | | | | 2 | 5 | 8 | | | | | | | | 1 | 4 | | |
| 4 | | 1 | 7 | | | | | | | 0 | 3 | 6 | | | | | | | | | 2 | 5 | 8 | | | | | | | | |
| 5 | | | | 1 | 4 | 7 | | | | | | 0 | 3 | 6 | | | | | | | | | | 2 | 8 | | | | | | |
| 6 | | | | | | | 1 | 4 | 7 | | | | | | | | 0 | 3 | | | | | | | | 2 | 5 | 8 | | | |
| 7 | 5 | 8 | | | | | | | | 1 | 4 | | | | | | | | 0 | 3 | 6 | | | | | | | | | 2 | |
| 8 | | | 2 | 5 | | | | | | | | 1 | 4 | 7 | | | | | | | | | | 0 | 3 | 6 | | | | | |

(a) 송신노드 관점의 최적 스케줄

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | |
| 0 | | | 1 | | | | | | 3 | | 4 | | | | 5 | | | 6 | | 7 | | | 8 | | | | | | | |
| 1 | | 4 | | 5 | | 6 | | 7 | | 8 | | | | | | | | | | 0 | | | | | 2 | | | 3 | | |
| 2 | | | 8 | | | | | | 0 | | | 1 | | | | 3 | | | | 4 | | | 5 | | 6 | | | 7 | | |
| 3 | 0 | | | 1 | | | 2 | | | | 4 | | | 5 | | 6 | 7 | | | | | 8 | | | | | | | | |
| 4 | | | | | 5 | | | 6 | | | 7 | | 8 | | | | | | | 0 | | 1 | | | | 2 | | | 3 | |
| 5 | 7 | | | 8 | | | | | 0 | | | 1 | | 2 | | | | 3 | | | 4 | | | | | | 6 | | | |
| 6 | | 0 | | | 1 | | | 2 | 3 | | | 4 | | 5 | | | | | | 7 | | | | 8 | | | | | | |
| 7 | 3 | | 4 | | | 5 | | | 6 | | | | 8 | | | | | | | | | | 0 | 1 | | | 2 | | | |
| 8 | | 7 | | | | | | | | 0 | | 1 | | 2 | | | | | | 3 | | | 4 | | 5 | | | | 6 | |

(b) 수신노드 관점의 최적 스케줄

그림 1 [8]에 의한 최적의 전방송 스케줄

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
| 2 | 6 | | | | 7 | | | 8 | | | | 0 | | | 1 | | | | 3 | | | | 4 | | | | | 5 | | | | |
| 6 | 0 | | | 1 | | | | 2 | | | | 3 | | | 4 | | | | 5 | | | | 6 | | | | 7 | | | 8 | | |
| 7 | 3 | | | 4 | | | | 5 | | | | 6 | | | 7 | | | | 8 | | | 0 | | | 1 | | | | 2 | | | |
| 3 | 0 | | | | 1 | | | 2 | | | | 4 | | | 5 | | | | | 6 | | | 7 | | | | | 8 | | | | |
| 8 | 6 | | | | 7 | | | 0 | | | | 1 | | | 2 | | | | | 3 | | | 4 | | | | | 5 | | | | |
| 0 | | 1 | | | | 2 | | | 3 | | | | 4 | | | 5 | | | | | 6 | | | | 7 | | | | 8 | | | |
| 4 | | | 3 | | | 5 | | | 6 | | | | 7 | | | | 8 | | | | 0 | | | 1 | | | | 2 | | | | |
| 5 | | | | 7 | | | 8 | | | 0 | | | 1 | | | | 2 | | | | 3 | | | | 4 | | | | 5 | | | |
| 1 | | | | 4 | | | 5 | | | | 6 | | | 7 | | | | 8 | | | | 0 | | | 1 | | | 2 | | | | 3 |

그림 2 패킷 수신 간격을 일정하게 조정한 전방송 스케줄

그림 2는 그림 1의 경우에 비하여 전방송 주기가 3만큼 증가했지만 수신노드 관점에서의 패킷 수신 간격을 일정하게 조정할 결과를 나타내고 있다. 이와 같이 광/전 변환에 따른 지연시간을 고려하여 패킷 수신 간격을 일정하게 조정한다면 전체 전방송 주기가 조금 늘어나더라도 수신노드에서의 패킷수신을 예방할 수 있다. 광/전 변환에서 발생하는 오버헤드 시간을 확보할 수 있게 된다.

만일 모든 노드에서 일정한 간격으로 패킷을 수신한다고 가정할 때, 패킷 수신 간격을 상수 ρ 로 나타내면 모든 노드가 자기 자신을 제외한 $N-1$ 개의 노드로부터 패킷을 수신하게 되므로 전방송 주기가 $\rho(N-1)$ 이 된다. 즉, 전방송 주기는 항상 $N-1$ 의 배수가 된다. 다음 장에서는 이러한 특성에 알맞은 전방송 주기에 대하여 설명하고자 한다.

3. 전방송 주기의 하한(lower bound)

N 개의 노드로 구성된 파장분할 다중화 방식을 사용하는 passive star형 광상호연결망에서 K 개의 파장이 사용가능하고 N 이 K 의 배수 즉, $N=FK$ (단, F 는 상수)일 때, 노드들에 대하여 0부터 $N-1$ 까지 번호를 붙이고 노드 $s(0 \leq s \leq N-1)$ 의 수신기가 사용하는 파장 w_i (단, $0 \leq s \leq K-1$)는 $i=s \bmod K$ 와 같이 정의하자. 그리고, 송신기의 파장을 수신 노드의 파장에 일치시키기 위한 파장조율시간(tuning delay)을 δ 로 나타낸다. 패킷 전송 스케줄링 문제란 모든 노드가 자기 자신에게 패킷을 전송하지 않는다고 가정했을 때, 송신기의 파장조율 시간을 충분히 보장함과 동시에 수신기의 패킷 수신 간격을 일정하게 유지하면서 전방송의 주기를 최대한 단축시키기 위한 패킷 전송 스케줄을 구하는 것이다. 본

논문에서는 파장조정시간 δ 의 값이 작아서 전방송 주기에 영향을 주지 않는 경우에 최적의 패킷 전송 스케줄은 [8]과 같으므로 최적의 전방송 주기가 δ 의 값에 의해 결정되는 경우에 대해서만 설명하기로 한다.

먼저 수신기의 파장이 서로 같은 노드들의 집합을 $R_i = \{s \mid s \equiv i \pmod K\}$ 로 정의하면, $R_i(0 \leq i \leq K-1)$ 는 다음과 같은 성질을 만족한다.

- (1) $R_i \cap R_j = \emptyset$ (단, $i \neq j$)
- (2) $N = \sum_{i=0}^{K-1} |R_i|$
- (3) $|R_i| = \frac{N}{K} = F$

[정리 1] 임의로 주어진 N, K, δ 의 값에 대하여 모든 노드가 일정한 간격으로 패킷을 수신하기 위한 전방송 주기는 $C(N-1)$ 보다 크거나 같으며, 패킷 수신 간격 C 는 다음과 같이 정의된다.

$$C \geq \left\lceil \frac{NK(\delta+1)}{N^2 - N - NK + K^2 + K} \right\rceil$$

(증명) 간격조정시간이란 수신 노드에서 일정한 간격으로 패킷을 수신할 수 있도록 기존의 패킷 전송 스케줄에 강제적으로 간격조정을 위해 삽입하는 시간을 의미한다. 수신노드에서 일정한 간격으로 패킷을 받기 위해서는 송신노드의 패킷 전송 스케줄에서 같은 파장을 사용하는 집합 R_i 에 속한 노드들로 구성된 일정한 크기의 블록이 반복되어야 한다. 또한, 블록 구성시 간격조정시간을 R_i 에 속한 노드들 사이에 균등히 배분하여, 전방송 주기가 늘어나지 않도록 하면서 모든 송신 노드에서 파장조율시간을 충분히 확보하여야 한다. 이 때, 각 블록의 맨 우측에 있는 간격조정시간은 실제 패킷 전송에서 송신노드의 파장조율시간으로 사용될 수 있다.

한편, 전방송 주기에서 모든 간격조정시간들과 실제 패

킷 전송시간들의 합을 뺀 다음 파장의 개수 K 로 나누면 사용 가능한 파장 조율 시간의 상한을 얻을 수 있다. 정의에 의하여 각 송신노드의 스케줄에는 K 개의 블록이 존재하며, 총 블록의 크기인 $C \cdot K$ 에서 파장 조율 시간으로 사용될 가능성이 있는 간격 조정 시간 $\lfloor \frac{C-F}{F} \rfloor K$ 과 자기 자신에게 패킷전송을 하지 않는 부분에 대한 시간 $\lfloor \frac{C-F}{F} \rfloor - 1$ 을 빼면 순수하게 패킷 전송 시간들과 패킷의 수신간격을 일정하게 하기 위한 간격조정시간들의 합계를 구할 수 있다. 따라서, 전방송 주기 $C(N-1)$ 에서 이러한 패킷 전송 시간과 간격 조정 시간들의 합계를 뺀 다음 파장의 개수 K 로 나누면 파장 조율 시간은 $\delta = \left\lfloor \frac{C(N-1) - [CK - \lfloor \frac{C-F}{F} \rfloor (K+1) - 1]}{K} \right\rfloor$ 이 된다.

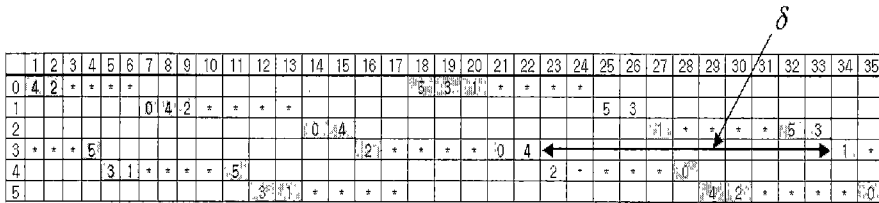
위의 식을 정리하면 부등식

$$\delta \leq \frac{C(N-1-K) + \lfloor \frac{C}{F} \rfloor (K+1) - K}{K} < \delta + 1$$

을 얻을 수 있으며, 이 식을 C 에 관하여 정리한 다음 최소값을 구하면 임의로 주어진 $N, K, \delta, N, K, \delta$ 의 값에 대하여 N 이 K 의 배수일 때, 패킷 수신 간격 C 에 대하여 부등식 $C \geq \left\lceil \frac{NK(\delta+1)}{N^2 - N - NK + K^2 + K} \right\rceil$ 이 성립한다. ■

4. 최적의 전송 스케줄링

일정한 패킷수신간격을 유지하는 최적의 전송 스케줄을 구성하기 위해서는 그림 3에서처럼 간격조정시간을 집합 $R_i(0 \leq i \leq N-1)$ 에 속한 노드들 사이에 적절하게 배치해야 한다. 이 때, 간격조정시간이 블록의 가장자리에 놓이게 되면 그 시간은 파장조율시간으로 사용될 수 있



(a) $N=6, K=2, \delta=11$



(b) $N=6, K=2, \delta=11$

그림 3 간격조정시간의 배치에 따른 최적의 전송 스케줄의 예

지만, 노드들 중간에 끼이게 되면 파장조율시간으로 사용이 불가능하게 된다. 또한, 모든 송신 노드가 자기 자신을 제외하고 패킷을 전송하기 때문에 한 파장으로 전송하는 패킷의 개수가 일정치 않으므로 노드들 중간에 끼이는 간격조정시간이 반드시 존재하게 된다. 따라서, 중간에 끼이는 간격조정시간들을 최소화하기 위해서는 그림 3의 (b)와 같이 각 노드 사이에 균등하게 간격조정시간을 삽입하여 블록을 구성해야 한다. 앞으로 알고리즘 설명을 위해 각 송신노드에서 사용할 파장의 순서는 w_0, w_{k-1}, \dots, w_1 (단, $w_0=w_K$)이라고 가정하자.

노드 $n_p(0 \leq p \leq N-1)$ 와 n_p 를 포함하는 노드들의 집합 $R_{k-1}(0 \leq i \leq K-1)$ 의 관계를 표현하기 위해 $N \times K$ 행렬 $M=(m_{pi})$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$m_{pi} = \begin{cases} 1 & \text{if } p+i \equiv 0 \pmod{K} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

여기에서 행렬의 인덱스는 0부터 시작한다. 예를 들어, $N=9, K=3$ 일 경우의 행렬 M 은 다음과 같다.

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

이 예제에서 m_{12} 는 노드 n_1 의 수신기가 파장 $w_{3-2}=w_1$ 로 고정되어 있음을 나타낸다.

[보조정리 1] $N \times K$ 행렬 $M=(m_{pi})(EKS, 0 \leq p \leq N-1, 0 \leq i \leq K-1)$ 에 대해서 항상 $\sum_{j=0}^{i-1} m_{pj} - \sum_{j=0}^{i-1} m_{(p+1)j} \geq 0$ 이 성립한다.

(증명) 행렬 M 의 정의에 의해서 $\sum_{j=0}^{i-1} m_{pj}$ 와 $\sum_{j=0}^{i-1} m_{(p+1)j}$ 의 값은 항상 0 또는 1이다. 만약, $\sum_{j=0}^{i-1} m_{pj} = 1$ 이면, $\sum_{j=0}^{i-1} m_{(p+1)j}$ 은 많아야 1이므로 위의 식이 성립하게 된다.

그리고 $\sum_{j=0}^{i-1} m_{pj} = 0$ 일 때는 $p+j \not\equiv 0 \pmod{K}, (0 \leq j \leq i)$ 이다. 이때, $(p+1)+(j-1) \not\equiv 0 \pmod{K}, (0 \leq j \leq i)$ 이고, $(p+1)+j \not\equiv 0 \pmod{K}, (0 \leq j \leq i-1)$ 을 의미하므로 $\sum_{j=0}^{i-1} m_{(p+1)j} = 0$ 이다. 따라서, $\sum_{j=0}^{i-1} m_{pj} - \sum_{j=0}^{i-1} m_{(p+1)j} = 0$ 이 되며, 따라서 항상 $\sum_{j=0}^{i-1} m_{pj} - \sum_{j=0}^{i-1} m_{(p+1)j} \geq 0$ 이 성립한다. ■

$K \times F$ 행렬 G 는 노드의 집합 $R_i(0 \leq i \leq K-1)$ 에서 노드들 사이에 삽입되는 간격조정시간을 표현한다. 행렬 $G=(g_{ij})$ 는 $0 \leq i \leq K-1, 0 \leq j \leq F-1$ 에 대하여 다음과 같이 정의한다. 먼저, 모든 g_{ij} 값을 $\lfloor \frac{C}{F} \rfloor - 1$ 으로 채워준다. 그리고, 각각의 i 에 대해서 $g_{i(F-2-i)}$ 부터 $C-F \lfloor \frac{C}{F} \rfloor$ 개를 왼쪽으로 순환하며 쉬프트(circular left

shift)하면서 1씩 더해준다. 여기에서 $g_{i(i-1)}$ 은 편의상 $g_{i(F-1)}$ 을 의미한다.

예를 들어, $N=9, K=3, \delta=7$ 일 때, 행렬 G 는 다음과 같이 구성된다.

$$G = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

이 논문에서 제안하는 스케줄링을 위해서 같은 파장을 공유하는 노드들의 집합 $R_i = \{s \mid s \equiv i \pmod{K}\}$ 를 사용하여 다음과 같이 블록 $B_j(0 \leq j \leq K-1)$ 를 만든다. 블록 $B_j(0 \leq j \leq K-1)$ 각각의 크기는 $\frac{\text{Cycle length}}{N-1}$ 가 된다. 먼저, R_i 의 원소 s 들을 노드 번호에 따라 내림차순으로 정렬해준다. 이후 간격조정시간을 행렬 G 의 값을 이용해서 각 R_i 의 노드 사이에 넣어준다. 예를 들어, $N=9, K=3, \delta=7$ 일 경우에는 [그림 4]과 같이 블록이 생성된다. 여기에서 간격조정시간은 *로 표시하기로 한다.

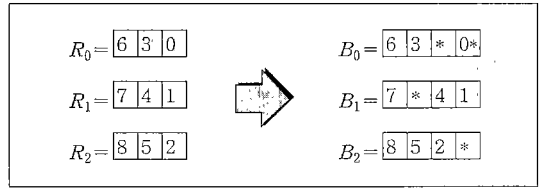


그림 4 $N=9, K=3, \delta=7$ 일 경우의 블록 구성

각 노드는 파장 w_{i-1} 을 사용하여 블록 B_{i-1} 을 보낸 후에 $\delta - \min_{0 \leq h \leq F-1} g_{(i-1)h}$ 만큼의 시간이 지나면 바로 w_i 를 사용하여 블록 B_i 를 보내게 된다. 그리고, 최적의 방송주기 L_{opt} 는 $C(N-1)$ 으로 정의되며, 다음의 $S_p(0 \leq p \leq N-1)$ 는 노드 n_p 가 파장 w_0 를 사용해서 처음 패킷을 보내는 시간을 나타낸다.

$$S_p = Cp - \sum_{j=0}^{\lfloor \frac{p}{K} \rfloor - 1} (g_{0(F-1-\delta)} + 1) + 1$$

알고리즘 1은 방송주기가 결정되어 수신측이 규칙적으로 패킷을 받는 경우의 송수신 스케줄링 알고리즘이다. 이 알고리즘에서 $T(n_p, t) = n_q$ 는 노드 n_p 가 t 시간에 n_q 로 패킷을 전송하는 것을 의미하며 ($0 \leq p, q \leq N-1$), C 는 한 노드가 한번에 전송할 블록의 크기, 즉 연속해서 송신할 패킷들의 개수와 간격조정시간의 합이다. 그리고 그림 5는 $N=9, K=3, \delta=7$ 일 때 알고리즘 1을 적용한 하나의 예로써 *는 간격조정시간을 나타낸다.

알고리즘 1 Transmission Scheduling Algorithm

```

periodic transmission schedule

For P=0 to N-1 do
    t ← Sp
    For r=K to 1 do
        i = r mod K
        For j=1 to C do
            if (p+jk+i)
                T(np, t)=njk+i
                t ← t+1
            for l=0 to g(p mod K)/(jk+i)
                T(np, t)=*
                t ← t+1
        t ← t+δ - min0≤h≤F(g(p mod K)h)
```

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | | | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

그림 5 N=9, K=3, δ=7일 때 패킷 전송 스케줄의 예

[보조정리 2] 알고리즘 1에 의해서 제시된 스케줄에서 서로 다른 노드가 동시에 동일한 파장을 사용하여 패킷을 전송하지 않는다.

(증명) 일정한 크기의 블록이 스케줄되어 있기 때문에 여기에서는 근접한 두 노드가 같은 파장을 사용하고 있지 않다는 것을 보이면 된다. 먼저, α를 노드 n_p(0 ≤ p ≤ N-1)가 파장 w_{K-i}(0 ≤ i ≤ N-1)를 사용하여 보낼 패킷을 모두 전송하고 파장 조정을 시작하는 시간이라고 정하고 β를 노드 n_p의 다음 노드가 동일한 파장을 사용하여 패킷들을 전송하기 시작하는 시간이라고 하자. 그러면 α와 β는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \alpha &= S_p + \text{전송된 블록의 크기} + \text{파장조율시간의 합} \\
 &\quad - \text{파장조율시간으로 사용 가능한 간격조정시간의 합} \\
 &= Cp - \left[\sum_{i=0}^{\lfloor \frac{p}{K} \rfloor - 1} (g_{0(F-1-\delta)} + 1) + 1 \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{j=0}^{i-1} \left\{ C - m_{p(K-j)} (1 + g_{(p \bmod K)(F-1 - \lfloor \frac{p}{K} \rfloor)}) \right\} \right] \\
 &\quad + \delta i - \sum_{e=0}^i \min_{0 \leq h \leq F} (m_{eh})
 \end{aligned}$$

이와 같은 방법으로,

$$\begin{aligned}
 \beta &= S_{p+1} + \text{전송된 블록의 크기} + \text{파장조율시간의 합} \\
 &\quad - \text{파장조율시간으로 사용 가능한 간격조정시간의 합} \\
 &= C(p+1) - \left[\sum_{i=0}^{\lfloor \frac{p+1}{K} \rfloor - 1} (g_{0(F-1-\delta)} + 1) + 1 \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{j=0}^{i-1} \left\{ C - m_{(p+1)(K-j)} (1 + \min_{0 \leq h \leq F-1} g_{(p \bmod K)h}) \right\} \right]
 \end{aligned}$$

$$+ \delta i - \sum_{e=0}^i \min_{0 \leq h \leq F} (m_{eh})$$

그러므로,

$$\begin{aligned}
 \beta - \alpha &= - \left[\sum_{i=0}^{\lfloor \frac{p+1}{K} \rfloor - 1} (g_{0(F-1-\delta)} + 1) \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{i=0}^{\lfloor \frac{p}{K} \rfloor - 1} (g_{0(F-1-\delta)} + 1) \right. \\
 &\quad \left. - \sum_{j=0}^{i-1} m_{(p+1)j} (1 + \min_{0 \leq h \leq F-1} g_{(p+1 \bmod K)h}) \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{j=0}^i m_{pj} (1 + g_{(p \bmod K)(F-1 - \lfloor \frac{p}{K} \rfloor)}) \right]
 \end{aligned}$$

이다.

[보조정리 1]에 의해서 $\sum_{j=0}^i m_{pj} - \sum_{j=0}^{i-1} m_{(p+1)j} \geq 0$ 이다.

따라서, p가 K의 배수가 아니라면 $\lfloor \frac{p}{K} \rfloor - \lfloor \frac{p+1}{K} \rfloor = 0$ 이므로 $\beta - \alpha \geq 0$ 이다.

이제, $p \equiv 0 \pmod{K}$ 인 경우에 대해서 알아보면

$$- \left[\sum_{i=0}^{\lfloor \frac{p+1}{K} \rfloor - 1} (g_{0(F-1-\delta)} + 1) + \sum_{i=0}^{\lfloor \frac{p}{K} \rfloor - 1} (g_{0(F-1-\delta)} + 1) \right]$$

은 $-g_0(F - \lfloor \frac{p+1}{K} \rfloor) - 1$ 이 된다. 그리고, 행렬 M의 정

의에 의해서, $p+0 \equiv 0 \pmod{K}$ 는 $m_{p0} = 1$ 이 p번째 행에서 유일하게 0이 아닌 수라는 것을 의미한다. 또한, $(p+1) + (K-1) \equiv 0 \pmod{K}$ 이므로 $m_{(p+1)(K-1)} = 1$ 이고 이것은 p+1번째 행에서 유일하게 0이 아닌 수이다. 따라서,

$$\sum_{j=0}^i m_{pj} = 1 \text{ 이고 } \sum_{j=0}^{i-1} m_{(p+1)j} = 0 \text{ 이 된다. 그런데 } p \equiv 0$$


```

else
    T(n_p, t-L_opt) = n_{jk+i}
else
    T(n_p, t) = n_{jk+i}
t ← t+1
for l=0 to g (p mod K)(h+1)
    if (t > L_opt)
        T(n_p, t-L_opt) = *
    else
        T(n_p, t) = *
t ← t+1
t ← t + δ - min_{0 ≤ h ≤ F} (g (p mod K)h)
    
```

그림 7의 (a)는 알고리즘 2에 의해 얻어진 광/전(光/電) 변환을 고려한 최적의 스케줄 결과를 보여주고 있다. 한편, 그림 7의 (b)와 같이 (a)에서 세로축의 송신노드를 수신노드로 바꾸어 재배열해보면 모든 노드의 패킷수신간격이 4임을 알 수 있다.

[정리 2] 임의의 N, K, δ의 값에 대해서 알고리즘 2에 의한 전방송 주기는 최적이다.

(증명) 여기에서는 $L_{opt} - \max_{0 \leq p \leq N-1} L_p$ 가 0 이상임을 보이면 된다.

$$\begin{aligned}
 L_{opt} - \max_{0 \leq p \leq N-1} L_p &= (N-1-K)C - (K-1)\delta + (K+1) \left\lfloor \frac{C}{F} \right\rfloor - K \\
 &\geq (N-1-K) \frac{NK(\delta+1)}{N^2 - N - NK + K^2 + K} - K\delta \\
 &\quad + (K+1) \frac{NK(\delta+1)}{N^2 - N - NK + K^2 + K} - K \\
 &= \frac{0}{N(N^2 - N - NK + K^2 + K)} = 0 \blacksquare
 \end{aligned}$$

수신 노드가 일정한 간격으로 패킷을 전송받을 때 확보할 수 있는 광/전 변환 시간을 α라고 하면, α는 하나의 패킷을 수신한 뒤에 다음 패킷을 수신하기 전까지의 시간을 의미하므로 다음과 같은 따름 정리가 성립한다.

[따름 정리 1]

네트워크 설계시 임의로 주어진 N, K, δ의 값에 대하여 광/전 변환 시간으로 확보할 수 있는 시간 α는 최대 $C-1 = \left\lfloor \frac{NK(\delta+1)}{N^2 - N - NK + K^2 + K} \right\rfloor - 1$ 을 넘지 못한다.

[따름 정리 2]

만일 수신기의 전기적 특성에 따라 광/전 변환 시간 α가 주어졌을 때, 네트워크 설계시 임의로 주어진 N, K, δ의 값에 대하여 파장변환시간 δ의 범위는 다음과 같이 정해진다.

$$\begin{aligned}
 &\frac{(N^2 - N - NK + K^2 + K)\alpha}{NK} - 1 < \delta \\
 &\leq \frac{(N^2 - N - NK + K^2 + K)(\alpha+1)}{NK} - 1
 \end{aligned}$$

이 때, 이 식을 이용해 얻어진 δ의 범위에서 가장 큰 값을 취하면 가장 효율적인 광상호연결망을 구축할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 모든 노드가 임의의 파장에 대해서 가변적인 송신기 하나와 고정적인 수신기 하나를 가지는 파장분할다중화 방식의 passive star형 광상호연결망에서, 송신 노드에서의 파장조율에 따른 지연시간과 수신 노드에서의 광/전 변환에 따른 지연시간을 함께 고려하여 각 노드의 패킷 수신 간격이 일정하면서도 전체적으로 전방송 주기를 가장 최적화 할 수 있는 패킷 전송 스케줄링 알고리즘을 제안하였다. 특히, N이 K로 나누어 떨어지는 경우에 제안된 알고리즘에 의해 얻어진 전송 스케줄은 최적의 전방송 주기를 갖는다는 것을 증명하였다.

제안된 알고리즘을 이용하면 수신노드의 입장에서 패킷 수신 간격이 일정하므로 광/전(光/電) 변환에 따른 지연시간을 확보할 수 있으므로 광상호연결망을 설계함에 있어서 임의로 주어진 N(노드의 개수), K(파장의 개수)의 값에 대하여 송, 수신기의 요구조건을 만족하는 δ(파장조율 시간)와 α(패킷 수신 간격)의 값을 미리 정할 수 있다는 장점이 있다. 즉, 네트워크를 설계할 때 N, K, δ 값이 주어지면 α 값을 구할 수 있으므로 수신 노드에서의 패킷의 도착 간격을 미리 알 수 있다. 또한, 광/전 변환을 위해 최소한 필요한 시간이 하드웨어적으로 미리 정해지면 주어진 N, K, α의 값에 대하여 적절한 δ의 범위를 구할 수 있다. 이 때, δ의 값이 작을수록 송신기의 하드웨어 비용이 크게 증가하므로 계산된 δ의 범위에서 가장 큰 값을 취하면 전체 광상호연결망의 성능을 유지하면서 최선의 비용절감 효과를 얻을 수 있다. 향후 연구 과제로는 제안된 알고리즘을 확장하여 N이 K로 나누어 떨어지지 않는 경우에 대해서도 적용할 수 있도록 최적의 전방송 주기를 갖는 패킷 전송 스케줄링 알고리즘을 개발하고자 한다.

참 고 문 헌

[1] C. A. Brackett, "Dense Wavelength Division Multiplexing Networks : Principles and Applications," *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, Vol. 8, No 6, pp.948-964, Aug. 1990

[2] Hirahara K, Fujii T, Ishida K, Ishihara S, "Optical Communication Technology Loadmap," *IEICE*

Transaction on Electronics, pp.1328-1341, Aug. 1998.

- [3] C. Tocci and H. J. Caulfield, *Optical Interconnection : Foundation and Application*, Artech House, Inc., 1994.
- [4] G. R. Pieris and G. H. Sasaki, "Scheduling Transmissions in WDM Broadcast-and-select Networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, Vol. 2, No. 2, pp.105-110, April, 1994.
- [5] H. Choi, H-A. Choi, and M. Azizoglu, "Efficient Scheduling of Transmissions in Optical Broadcast Networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, Vol. 4, No. 6, pp.913-920, Dec. 1996
- [6] H. Choi, H-A. Choi, and M. Azizoglu, "On the All-to-All Broadcast Problem in Optical Network," *Proceedings of Infocom '97*, 1997.
- [7] S-K. Lee, A. D. Oh, H. Choi, H-A. Choi, "Optimal transmission schedules in TWDM optical passive star networks," *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 75, No. 1, pp.81-91, Jan. 1997.
- [8] Hongjin Yeh, Kyubum Wee and Manpyo Hong. "Optimal Scheduling Algorithms in WDM Optical Passive Star Networks," *Proceedings of WOCSS99*, pp.887-896, 1999.
- [9] 이상수, 홍만표, 예홍진, "Passive Star형 광상호연결망에서 광/전(光/電) 변환을 고려한 최적의 방송 스케줄링", 정보과학회 추계학술대회 발표논문집, 제26권, 제2호, pp.771-773, 1999.
- [10] 이태중, 이상수, 예홍진, 위규범, 홍만표 "과장분할다중방식의 광상호연결망에서 광/전(光/電) 변환을 고려한 최적의 등간격 송수신 스케줄", 정보처리학회 추계학술대회 발표논문집, 제6권, 제2호, pp.96-99, 1999.
- [11] 장석문, 변광준, 예홍진, 위규범, 홍만표, "Passive Star형 광상호연결망에서의 All-to-all 방송을 위한 송수신 스케줄링 기법", 한국정보처리학회 논문지, 제5권, 제8호, pp.2013-2026, 1998.
- [12] 장종준, 박영호, 홍만표, 위규범, 예홍진, "수동적인 스타형 과장 분할 다중 방식의 광네트워크에서의 전방송을 위한 최적 전송 알고리즘", 한국정보과학회논문지: 시스템 및 이론, 제27권, 제1호, pp.44-52, 2000.



위 규 범

서울대학교 자연과학대학 수학과(1978) 석사 University of Wisconsin 전산학과(1984) 박사 Indiana University 전산학과(1992). 1993년 ~ 1999년 아주대학교 정보 및 컴퓨터공학부 조교수. 1999년 ~ 현재 아주대학교 정보통신전문대학원 조교수. 관심분야는 컴퓨터 이론



홍 만 표

서울대학교 자연과학대학 계산통계학과(1981) 석사 서울대학교 자연과학대학 계산통계학과(1983) 박사 서울대학교 자연과학대학 계산통계학과(1991) 1983년 ~ 1985년 울산공과대학 전자계산학과 전임강사. 1985년 ~ 1999년 아주대학교 정보 및 컴퓨터공학부 교수. 1993년 ~ 1994년 미네소타대학 전자공학 교원교수. 1999년 ~ 현재 아주대학교 정보통신전문대학원 교수. 2000년 ~ 2001년 조지워싱턴 대학교 컴퓨터과학 교원교수. 관심분야는 병렬처리 및 컴퓨터 보안



예 홍 진

서울대학교 사범대학 수학교육과(1986) 석사 아주대학교 대학원 전자계산학과(1988) G.E.A. 프랑스 Grenoble 1 대학 응용수학과(1990) 박사 프랑스 Lyon 1 대학 전자계산학과(1993) 1993년 ~ 1999년 아주대학교 정보 및 컴퓨터공학부 부교수. 1999년 ~ 현재 아주대학교 정보통신전문대학원 부교수. 관심분야는 컴퓨터 산술, 병렬 알고리즘과 구조, 정보보호 및 시스템 보안



이 상 수

1998년 2월 아주대학교 정보통신대학 정보 및 컴퓨터공학부 졸업(학사). 2000년 2월 아주대학교 정보통신전문대학원 정보통신공학과 졸업(석사). 2000년 2월 ~ 현재 (주)기산텔레콤 기술연구소 연구 1실 전임연구원. 관심분야는 High-Performance Network, 컴퓨터 네트워킹, 통신망 전송 시스템, 알고리즘 등