

WDM 수동성형망에서의 TDM 스케줄링시 최적파장수와 파장조정시간과의 관계

정희원 신 홍 섭*, 신 용 식*, 박 구 현*

Relationships Between Optimal Number of Wavelengths and Tuning Time in WDM/TDM Passive Star Networks

Hongseob Shin*, Yong Sik Shin*, Koohyun Park* *Regular Members*

*이 논문은 1998년 홍익대학교 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

요 약

본 논문에서는 WDM(wavelength division multiplexing) 수동 성형망(passive star network) 환경에서 TDM(time division multiplexing) 방법을 기반으로 한 타임슬롯 스케줄링시의 최적파장수와 파장조정시간(tuning time)과의 관계에 대해 분석한다. 여기서는 각 노드들이 한 개 씩의 파장조정 송신기(tunable transmitter)와 파장고정 수신기(fixed receiver)를 갖추고 있고, 전송 트래픽은 비균등(nonuniform)이며, 각 노드들은 자신을 제외한 나머지 모든 노드들로 패킷을 전송함을 가정한다. 기존의 스케줄링 방법[7, 8, etc.]에서는 주어진 파장수를 전부 이용하였으나, 본 논문에서는 부하균형(load balancing)을 포함한 순서 스케줄링(list scheduling) 사용시 프레임 길이를 최소로 하는 '최적 파장수'가 이용 가능한 파장수 이하의 범위에서 존재함을 실험을 통해 보이고, 파장조정시간과의 관계를 분석한다. 또한 각 노드의 송신기(transmitter)와 수신기(receiver) 수의 증가에 의한 프레임 길이 단축 가능성에 대해 분석한다.

ABSTRACT

This paper is concerned with the relationships between optimal number of wavelengths and tuning time in time division multiplexing(TDM) scheduling on wavelength division multiplexing(WDM) optical passive star networks. We assume that the traffic is nonuniform and each node has a tunable transmitter and a fixed receiver. Each node transmits packets to all other nodes. Most of the earlier protocols on TDM based scheduling for WDM star networks [7, 8, etc.] use whole given wavelength channels. But in this paper, we investigate the optimal number of wavelengths that yields minimum frame length when tuning time exists. It appears within the available number of wavelengths. We analyze the relationships between optimal number of wavelengths and tuning time by experiments. We also discuss on the possibility of reduction of frame length by increasing the number of nodes' transmitters and receivers.

* 홍익대학교 산업공학과
論文番號 : 98140-0326
接受日字 : 1998年 3月 26日

I. 서 론

WDM 성형망(optical star network)의 수동 성형결합기(passive star coupler)는 전원을 필요로 하지 않으므로 망의 신뢰성이 높고, bus구조 등에서 발생할 수 있는 태핑이나 삽입에 의한 손실이 없기 때문에, LAN/MAN 환경에서 가장 각광받는 망구조로 떠오르고 있다[1]. 그림 1은 한정된 수의 파장과 많은 수의 사용자 노드를 갖는 수동 성형망의 개념을 보여준다. 망의 모든 노드들은 송신기(transmitter)와 수신기(receiver)를 갖추고 있고, 각 노드에서 발생된 데이터는 단일 파장의 빛에 실려 성형결합기로 모여지며, 모여진 빛은 노드 수만큼 동일하게 나뉘어져서 모든 노드에 방송(broadcast)된다. 그러면 수신 노드는 자신에게 도착한 빛으로부터 자신이 원하는 파장의 빛만을 여과하여 받게 된다.

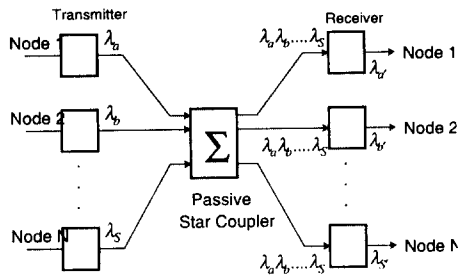


그림 1. WDM 수동성형망의 개념도

WDM 수동 성형망의 종류는 송신기와 수신기의 파장조정 가능 여부에 따라 다음의 4가지 조합이 가능한데[1], 본 논문에서는 *TT-FR* 시스템에 대해 다룬다.

- FT-FR* (Fixed Transmitter - Fixed Receiver)
- FT-TR* (Fixed Transmitter - Tunable Receiver)
- TT-FR* (Tunable Transmitter - Fixed Receiver)
- TT-TR* (Tunable Transmitter - Tunable Receiver)

파장조정시간(tuning time)은 송신기 혹은 수신기가 한 파장에서 다른 파장으로 전환하는데에 필요한 시간의 양을 말하는데, 파장조정 송신기(tunable trans-

mitter)나 수신기에서 조정해야 할 채널의 수가 많을수록 긴 파장조정시간이 필요한 것으로 알려져 있고 소자에 따라 차이가 있다[2]. 타임슬롯 단위로 표현되는 파장조정시간 T 는 bit 전송율 R (bits/sec)과 패킷 길이 L (bits), 실제 파장조정시간 d (seconds)에 의해 $T = \lceil dR/L \rceil$ (slots)로 결정된다. 광 디바이스 기술의 발전은 d 를 감소시키지만, R 은 증가하고 L 은 감소하는 추세이므로 R/L 이 증가하게 되어 미래의 파장조정시간의 범위를 정확히 예측하기란 쉽지 않다 [3]. 일반적으로 파장조정시간은 아무리 빠르다 하더라도 패킷 전송 시간의 수 배 이상이다[1]. 그렇기 때문에 WDM 수동 성형망에서의 스케줄링에서는 파장조정시간이 매우 중요한 요소 중의 하나이다.

TDM은 매체접근제어(media access control) 방식 중의 하나로서, 발생하는 트래픽의 평균적인 수요를 바탕으로 각 노드별 전송노드 순서와 타임슬롯을 할당하여 전체 프레임을 반복하는 방법이다. 따라서 하나의 주기 동안에는 모든 노드간의 트래픽을 포함해야 한다. 프레임 길이가 짧을수록 전송되어질 패킷이 각 노드의 버퍼에서 대기하는 시간이 적으므로 프레임 길이를 최소화하는 것이 가장 중요하다. TDM은 제어신호로 인한 overhead가 없고 스케줄링 계산시간이 요구되지 않는다는 이점을 갖고있다. 또한 한 노드가 한 타임슬롯 내에 같은 파장 상에서 두 노드로 동시에 전송하거나(송신 충돌), 두 노드로부터 동시에 수신하는 경우(수신 충돌), 또는 파장조정시간 이내에 한 파장에서 다른 파장으로 전환하여 전송하는 경우(파장 충돌)가 발생하지 않도록 고려하는 효율적인 방식이다[4].

WDM 성형망의 TDM 스케줄링은 발생하는 트래픽의 성격에 따라서 크게 균등 트래픽(uniform traffic)과 비균등 트래픽(nonuniform traffic)으로 구분하여 생각할 수 있다. 모든 노드간에 발생하는 트래픽의 양이 모두 같을 때를 균등트래픽이라 하고, 그렇지 않을 때 비균등 트래픽이라 한다. 컴퓨터 네트워크의 병렬처리를 위한 연구와 관련되어 균등 트래픽인 경우의 연구[5, 6]로부터 시작되어 최근에는 비균등 트래픽에 대한 연구[3, 7, 8]가 발표되고 있다.

균등트래픽은 각 노드간의 전송할 패킷의 수가 동일하다는 특성으로 인해 수학적 접근이 용이하다. [5]에서는 N 개의 송신노드와 N 개의 수신노드가 각각 1개씩의 파장조정 송신기와 파장고정 수신기를 갖

추고 있는 TT-FR all-to-all broadcasting 시스템에서의 스케줄링을 소개하였다. 송신노드들을 파장수인 W 개의 그룹 G_1, G_2, \dots, G_W 로 나누고, 각 그룹 내의 송신기는 파장 λ_i 로 초기 조정하여 차례로 λ_i 로 고정된 수신노드로 패킷을 전송한다. 전송을 마친 송신기들은 다음에 $\lambda_{(i \bmod W)+1}$ 로 파장을 조정하고 자신의 차례를 기다린다. 파장조정시간이 T 일 때 최소 프레임 길이는 튜닝-전송 분리 조건이 없는 경우 $(N + \alpha(N))\sqrt{T}$ 와 $(N + \alpha(N))(\sqrt{T} + 1)$ 사이의 값을 가지며, 튜닝-전송 분리 조건이 있는 경우는 $(2N + \alpha(N))\sqrt{T}$ 와 $(N + \alpha(N))(\lceil \sqrt{T} \rceil + \sqrt{T})$ 사이의 값을 가진다는 것을 증명하였다. 후에 [3]에서는 [5]에서 소개한 알고리즘이 최적 프레임 길이를 보장하는 방법임을 증명하기도 하였다. [6]은 [5]와 같은 환경인데, 총 N 개의 노드들이 자기 자신을 제외한 $N-1$ 개의 노드로 전송하는 상황이어서 [5]의 상황보다 복잡하지만, 최적의 스케줄 길이를 만족하는 스케줄링 방법을 소개하였다. 그리고 이용 파장수가 W 개 일 때의 최적 스케줄 길이는 $\max\{N(N-1)/W, WT + N - 1\}$ 이 됨을 보였다. 왼쪽 항은 파장조정시간이 프레임 길이에 영향을 미치지 않는 경우이고, 오른쪽 항은 파장조정시간에 따라 프레임 길이가 결정되는 경우이다. 파장조정시간 T 가 주어져 있을 때 파장수 W 에 대한 프레임 길이를 그래프로 그려보면, W 의 증가에 따라 프레임 길이가 감소하다가 어떤 시점 부터는 다시 증가하는 convex의 형태임을 알게 된다.

비균등 트래픽은 트래픽 패턴이 불규칙하기 때문에 최적(optimal)을 보장하는 스케줄 방법을 개발하기가 쉽지 않다. TT-FR 시스템에서의 스케줄링 알고리즘으로서 [7]에서는 수신노드 집합이 파장수로 분리되어 있을 경우, 모든 각 채널 내에서 송신하는 노드의 순서를 동일하게 정하고, 파장조정시간 조건을 만족하도록 파장의 순서대로 트래픽을 배열하는 방법을 소개하였다. 최근 TT-FR 시스템에서 비균등 트래픽에 대한 효율적인 TDM 스케줄링이 소개되었는데, MULTIFIT을 이용하여 수신노드 집합을 파장수에 해당하는 집합으로 구분하고 각각의 수신노드에 해당파장을 고정시킨 후 파장별로 다시 송신노드에서의 파장조정시간을 고려하여 슬롯별로 할당하는 방법으로서, 간단하면서도 상당히 효과적인 방법이다[8].

한편, TT-FR 시스템과 함께 주요 연구 대상이 되는 TT-TR 시스템에서의 TDM 스케줄링에 대한 연구는 많지 않다. Ganz와 Gao는 [4]에서 TT-TR 시스템에서의 TDM 스케줄링시 위성통신의 SS/TDMA(Satellite-Switched Time Division Multiple Access)[9] 원리를 응용하여, 모든 노드에서 일시에 파장조정을 실시하는 발견적 방법을 제시하고 있으나, 파장조정시간의 은닉에 의한 프레임 길이의 단축 효과를 얻을 수 없다는 단점을 가지고 있기 때문에 효율적이지는 못하다.

기존의 스케줄링 방법들은 대부분 주어진 파장을 모두 이용하여 스케줄하는 방법이었다. 그러나 본 논문에서는 TT-FR 시스템에서, 트래픽을 파장수(W)만큼으로 분할하는 부하균형(load balancing) 과정과, 각 파장별로 충돌과 파장조정시간(T slots)을 고려하여 트래픽을 할당하는 순서 스케줄링(list scheduling) 과정을 거치는 TDM 스케줄링시에 최적파장수가 존재함을 밝힌다. 최적파장수란 주어진 파장조정시간 하에서 최소의 프레임 길이를 얻을 수 있는 파장수를 말한다. 또한 송신기와 수신기 수의 증가가 프레임 길이에 어떠한 변화를 주는가를 이용가능 파장수가 최적 파장수보다 많은 경우와 적은 경우로 나누어 분석하였다. 우선 실험에 의해 밝혀진 4가지 사실들을 II절에 정리하였고, 부하균형을 포함한 순서 스케줄링 방법에 대해서는 III절에서, 실험 결과는 IV절에서 소개하였다. 결론은 V절이다.

II. 최적 파장수와 파장조정시간과의 관계

본 연구에서는 WDM 수동성형망에서 파장조정시간이 존재하고 각 노드는 파장조정 송신기와 파장조정 수신기로 구성된 TT-FR 구조를 가정한다. 각 노드간 트래픽은 비균등하며, 타임슬롯 단위로 주어진다. 스케줄링 방법은 부하균형을 포함한 순서 스케줄링을 사용한다. 노드간의 모든 트래픽을 전송하는 TDM 스케줄의 프레임길이는 중요한 성능의 척도가 된다. 다음에 소개하는 사실들은 실험에 의해 밝혀진 것들로서 구체적인 실험내용은 III절에서, 그 실험결과들은 IV절에서 소개한다.

Fact 1: 최소의 프레임길이를 보장하는 최적파장수가 존재한다. 파장조정시간이 존재할 때, 이용가

능 파장수가 최적파장수까지 증가될수록 프레임길이는 계속해서 감소하나, 최적파장수 이상에 대해서는 프레임 길이가 다시 증가한다. 파장조정시간이 없다면 이용가능 파장수가 증가될수록 프레임길이는 계속 감소한다. 즉 최적파장수는 이용가능 파장수가 된다.

Fact 2: 최적파장수는 파장조정시간에 따라 변화한다. 파장조정시간이 증가함에 따라 최적파장수는 감소한다. 파장조정시간이 매우 큰 값을 가지게 되면, 최적파장수는 1로 수렴한다.

Fact 3: 최적파장수가 이용가능 파장수보다 적을 때, 노드의 송신기 및 수신기의 수를 증가시키므로써 프레임길이를 감소시킬 수 있다. 특히 client/server 망에서는 server에만 송신기 및 수신기의 수를 증가시키므로써 프레임길이를 감소시킬 수 있다.

Fact 4: 최적파장수가 이용가능 파장수보다 클 때, 프레임길이는 이용가능 파장수에서 최소가 되며, client/server 망에서 server의 송신기 및 수신기의 수를 증가시키더라도 프레임길이는 거의 감소하지 않는다.

III. TDM 스케줄링 설계

TDM 스케줄링은 2단계로 구성된다. 먼저, 수신 노드의 트래픽을 파장의 수로 분할하여 부하균형을 시행하고, 분할된 트래픽을 각 파장내에서 송신충돌, 수신충돌 및 파장충돌이 일어나지 않도록 순서 스케줄링을 행한다. 각 노드간의 전송할 트래픽은 트래픽 행렬의 형태로 주어진다. 트래픽 행렬은 $N \times N$ 행렬로서 각 행렬의 원소는 행에 해당하는 노드에서 열에 해당하는 노드로의 트래픽 양을 의미하며, 타임슬롯 단위로 주어진다. 동일한 index의 송신기와 수신기는 동일노드이므로 트래픽은 0이 된다. 트래픽 행렬요소의 값은 트래픽 발생 빈도, 요구되는 전송속도 및 지속시간에 의해 결정되나 TDM 스케줄링 시에는 상대적인 크기로 시간 할당이 이루어지기 때문에 scaled시켜 정수형으로 변환시킬 수 있다. 노드수가 N 개인 일반적인 경우에 대해 부하균형 및 순서 스케줄링을 설명하기에는 너무 복잡하므로 쉽게 이해할 수 있도록 그림 2에 나와있는 노드수가 5개인 트래픽 행렬을 예로 들어 설명하고자 한다.

	r_0	r_1	r_2	r_3	r_4
t_0	0	2	1	1	3
t_1	2	0	1	1	1
t_2	1	1	0	3	3
t_3	2	3	1	0	1
t_4	1	1	1	2	0
sum	6	7	4	7	8

그림 2. 트래픽 행렬

1. 부하균형

$TT-FR$ 구조의 성형망에서는 수신노드 쪽의 파장을 고정시켜야 하므로, 트래픽 행렬상의 각 열의 합을 부하균형 시키면 된다. 부하균형이란 n 개의 task를 m 개의 bin에 균형있게 분할하는 과정을 말한다. n 개의 task는 트래픽 행렬상의 각 열의 합에 해당되고, m 개의 bin은 이용할 파장의 수에 각각 대응된다. 부하균형을 위해 본 연구에서는 LPT (Largest Processing Time first) 및 $MULTIFIT$ 의 두 가지 방법에 대해 실험하였다[10, 11].

LPT 는 task의 크기가 큰 것부터, 현재까지 채워진 크기가 작은 bin에 먼저 채워 넣는 방법이다[11]. 동일한 조건일 경우는 task와 bin의 index 순으로 한다. 그림 2의 트래픽 행렬을 부하균형 시켜보자. 각 열의 합은 6, 7, 4, 7, 8 slots 이다. 그림 3의 (a)에 나와있듯이, 가장 큰 8이 0번 파장에, 그리고 2개의 7이 1, 2번 파장에 차례로 채워진다. 남아있는 것 중 가장 큰 6은 현재까지의 makespan이 가장 작은 1, 2번 파장 중 index가 앞선 1번에 채워지고, 마지막으로 4는 2번 파장에 채워지게 된다.

$MULTIFIT$ 은 FFD (First Fit Decreasing)에 기초한 bin packing problem의 효율적인 근사해법으로서 부하균형에 응용된 것인데, 주어진 bound 내에서 bin의 index 순서대로 task의 크기가 큰 순서로 채워넣고, 현재 채워넣고 있는 bin에 남은 공간이 있으면 남아있는 task 중 이 공간에 들어갈 수 있는 것을 task 크기의 내림차순으로 검색하여 우선 채워넣는다. 그림 3의 (b)에서 0번 파장에 8 slot이 채워진 후, 남은 공간에 4 slot이 채워진 것을 볼 수 있다. 동일한 조건일 경우는 index 순으로 한다. 이때 채워지는 bin의 수에는 제한이 없다. 이 과정이 끝난 후에 소요된 bin

의 수가 이용가능한 bin의 수보다 크면 일정한 규칙에 의해 bound를 늘려주고, 그렇지 않으면 bound를 줄여주면서 위의 과정을 반복한다[10]. 이러한 과정의 반복 후에는 bound가 어떤 값에 수렴되면서 3개의 파장에 적당히 부하균형이 이루어질 것이다.

makespan = 13

w_0	r_4 (8 slot)	
w_1	r_1 (7 slot)	r_0 (6 slot)
w_2	r_3 (7 slot)	r_2 (4 slot)

(a) LPT에 의한 부하균형

makespan = 13

w_0	r_4 (8 slot)	r_2 (4 slot)
w_1	r_1 (7 slot)	r_0 (6 slot)
w_2	r_3 (7 slot)	

(b) MULTIFIT에 의한 부하균형

그림 3. LPT와 MULTIFIT에 의한 부하균형 결과

부하균형 문제는 NP-Complete 문제로 알려져 있는데, 위의 두 방법은 최적에 근사한 부하균형을 수행하는 훌륭한 휴리스틱 알고리즘이다[10]. 그림 2의 트래픽 행렬을 3개의 파장에 분할하는 경우, LPT와 MULTIFIT에 의한 부하균형 결과가 그림 3에 나와있는데 두 방법의 makespan은 모두 13이 된다.

n 개의 tasks를 m 개의 파장에 부하균형 시킬 때 LPT는 초기 내림차순 정리를 위해 $O(n \log n)$ 시간을, 할당 과정에서 $O(n \log m)$ 의 시간을 사용하므로 총 $O(n \log n) + (n \log m)$ 의 복잡도를 갖는다. MULTIFIT 역시 초기 내림차순 정렬을 위해 $O(n \log n)$ 시간을 사용하지만, 할당 과정을 위해 k 번의 반복이 이루어진다고 하면 총 $O(n \log n) + (k n \log m)$ 의 복잡도를 갖게 된다. 실제로 두 방법 간에는 큰 차이가 없으나 발견해와 최적해와의 근사 정도에 있어서는 worst case에서 MULTIFIT이 LPT보다 약간 우수하고, 복잡도 면에서는 $k > 1$ 일 때 LPT가 약간의 잇점을 갖는다고 할 수 있다[10].

2. 순서 스케줄링

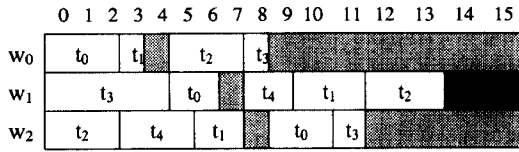
순서 스케줄링은 본래 일정 기준에 의해 작업의 순서를 list로 정해놓고, 이용 가능한 기계가 발견될

때 list의 순서에 따라 이 기계에 작업을 할당하는 스케줄방법이다[12]. 부하균형 단계에서 각 파장에 트래픽 양을 분리해 놓았기 때문에 여기서는 각 파장 내에서 우선순위를 정해주면 된다. 본 연구에서는 이 우선순위로써 lpt , spt 및 idx 의 3가지 방법에 대해 실험하였다. 부하균형 과정에서의 LPT, MULTIFIT 등과 구별하기 위해 순서 스케줄링 방법에는 소문자를 사용하였다. lpt 는 해당 파장에서 전송할 트래픽의 양이 많은 순서로, spt 는 트래픽의 양이 적은 순서로, 그리고 idx 는 송신기의 번호 순서로 우선순위를 둔 것이다. 순서 스케줄링방법으로 lpt 를 이용하면 [8]에서 소개한 'TAA pass 1'과정과 동일하다. 부하균형 과정에서 수신충돌은 제거되었기 때문에, 송신충돌과 파장 충돌만을 피하면 된다. 여기서 중요하게 고려해야 할 점이 바로 파장조정시간이다. 즉, 송신기가 한 파장으로 전송하다가 다른 파장으로 전환하여 전송하고자 할 경우 파장을 조정하기 위해 파장조정시간 만큼의 시간이 필요한 것이다.

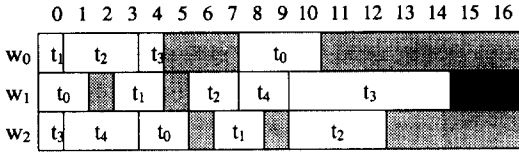
순서 스케줄링 과정은 0번 타임슬롯부터 시작하여 순서대로 진행한다. 해당 슬롯에 대해서 각 파장의 번호 순서대로 미리 정한 우선순위(lpt , spt , idx 등)에 의해 슬롯 단위로 트래픽을 할당하되 서로 다른 파장에서 동일 송신기 간에 파장조정시간 이상 이격되도록 해야 한다. 만일 임의의 슬롯에서 어떤 파장에 이 조건에 맞는 송신기가 남아있지 않다면 그 파장은 이 슬롯에서 비어있게 된다.

그림 4는 그림 2의 트래픽 행렬에 대해 부하균형 방법으로서 LPT를 사용한 후 (a) lpt , (b) spt , (c) idx 의 세가지 방법으로 순서 스케줄링을 수행한 결과이다. TDM 방법은 스케줄링 된 프레임의 계속 반복하여 사용하는 것이므로 스케줄된 프레임의 가장 끝부분과 처음 부분에 대해 파장조정시간 조건에 위배되지 않는지를 확인해야 한다. 그림 4의 (a)에서 파장조정시간이 2 slots일 때, 1번파장의 가장 끝에 할당된 2번 송신기는 2번 파장의 프레임 첫부분에서도 전송하게 되므로 파장조정시간 조건을 만족시키기 위해서는 2 slots의 추가적인 유휴 슬롯이 필요하게 된다. 그림에서는 이 부분을 진한 음영으로 나타내었다. 이 예에서 lpt 와 idx 는 16 slots, spt 는 17 slots의 프레임 길이를 갖게 되었다.

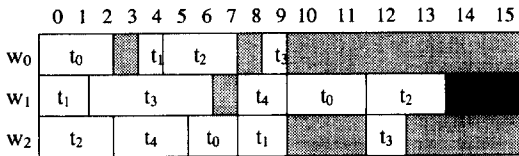
부하균형 및 순서 스케줄링 방법에 따라 6가지의 조합이 가능하다. 6가지 조합을 "LB/ls"와 같이 표현



(a) lpt에 의한 순서 스케줄링



(b) spt에 의한 순서 스케줄링



(c) idx에 의한 순서 스케줄링

다음 프레임과의 연결시 파장충돌을 피하기 위해 추가로 요구되는 슬롯

그림 4. lpt, spt, idx에 의한 순서 스케줄링 결과 (파장조정 시간 = 2 slots)

할 수 있다. 여기서 LB는 부하균형 방법을, ls는 순서 스케줄링 방법을 의미한다. 예를들어 LPT/lpt는 부하균형 방법으로 LPT를, 순서 스케줄링 방법으로 lpt를 선택한 TDM 스케줄링이다.

3. 트래픽 행렬

TDM 스케줄링을 위한 트래픽 패턴은 트래픽 행렬로 표현되며 본 연구에서는 트래픽 행렬은 주어진 것으로 가정한다. 행렬의 각 요소 값은 각 노드간에 발생하는 트래픽의 평균값 또는 트래픽의 burstiness를 고려하여 표준편차를 포함한 값으로 결정될 수 있으며, 실시간으로 발생하는 offered load와는 구별된다. 임의의 노드간에 실제로 발생한 트래픽의 양이 스케줄링과정을 통해 할당된 슬롯 수 이상이면, 전송되지 못하고 남은 트래픽은 노드의 버퍼에서 다음 전송을 위해 대기하게 된다.

본 연구에서는 2가지의 트래픽 패턴에 대해 실험

한다. 첫째는 트래픽 행렬에서 각 노드의 열의 합과 행의 합이 비슷한 balanced 트래픽 패턴이다. 두 번째는 client/server 트래픽 패턴으로서, 하나의 server에 트래픽의 양이 상대적으로 많은 경우로 server의 열의 합 및 행의 합이 다른 노드의 그것에 비해 2배 또는 3배인 경우이다. Balanced 트래픽 행렬의 각 요소(e)는 1부터 9까지의 자연수를 일양분포에 의해 생성하여 얻는다. client/server 트래픽의 경우는 balanced 트래픽 행렬을 생성한 후, server에 해당되는 노드의 열 및 행에만 2 또는 3을 곱하여 얻는다. 예를 들어 1번 노드가 서버라면, balanced 트래픽 행렬의 1번 행과 열에 2 또는 3을 곱하여 client/server 트래픽 행렬을 생성하는 것이다. 즉, $random[1, 9]$ 를 1에서 9까지의 자연수에 대한 random number generating function이라 할 때 balanced 트래픽 행렬의 요소는 $e_{balance} = random[1, 9]$ 가 되고, client/server 트래픽 행렬에서 서버 노드에 해당되는 행과 열의 요소 값은 $e_{server} = 2 * random[1, 9]$ 또는 $3 * random[1, 9]$ 이고, 그 외의 요소들은 클라이언트 노드간의 트래픽으로서 $e_{client} = random[1, 9]$ 가 된다.

4. 스케줄링 설계에 대한 예비 실험

순서 스케줄링의 우선순위 선정 방법을 비교하기 위해 트래픽 행렬을 랜덤하게 생성하고, LPT로 부하균형을 맞춘 후 순서 스케줄링을 수행하였고, 이것을 30회 반복하여 프레임길이의 평균을 구하였다. 표 1은 $N=8$ 인 경우 파장수가 1에서 8까지일 때 파장조정시간별 프레임길이의 평균을 계산한 결과이다. 전체적으로 LPT/lpt의 결과가 우수하였다. LPT/idx는 파장조정시간이 12에서 15까지는 일시적으로 LPT/lpt보다 우수하였지만 전체적으로는 LPT/lpt의 경우보다 프레임 길이가 약간 길었다. LPT/spt의 경우 LPT/lpt나 LPT/idx에 비해 프레임길이가 상당히 길었다. 결국 순서 스케줄링 방법으로는 lpt가 가장 우수하다고 할 수 있다.

LPT/lpt 및 MULTIFIT/lpt에 대해서도 거의 동일한 실험을 수행하였는데, 파장조정시간을 50 slots까지 확장하여 수행한 결과 LPT/lpt와 MULTIFIT/lpt간에 거의 차이가 없었다. 29 case에서 LPT/lpt가 우수했고, 18 case에서 MULTIFIT/lpt가 우수했으며 나머지는 동일하였다. LPT/lpt에 대한 MULTIFIT/lpt의 프레임길이가

차이는 최대 0.47% 미만이었다. 따라서 2절에서 소개한 Fact들에 대해 4절에서는 LPT/lpt 에 의한 실험결과를 소개한다.

표 1. 파장조정시간에 따른 LPT/lpt , LPT/spt , LPT/idx 의 평균 프레임길이 비교 ($N=8$, $e_{balance} = random[1, 9]$, $1 \leq W \leq 8$)

파장조정시간 (slots)	평균 프레임 길이 (slots)		
	LPT/lpt	LPT/spt	LPT/idx
1	75.1	84.1	77.8
2	77.7	87.0	80.8
3	80.2	89.6	83.3
4	83.3	92.8	85.4
5	86.9	96.4	88.6
6	90.2	99.8	92.7
7	94.2	103.9	95.7
8	98.1	108.1	99.4
9	102.3	112.5	103.2
10	106.3	116.8	106.3
11	114.3	121.1	110.9
12	118.4	125.4	114.6
13	122.5	129.6	118.9
14	126.8	134.0	122.7
15	131.0	138.5	126.8
16	135.3	143.0	135.7
17	139.3	147.6	140.1
18	143.6	152.1	144.7
19	148.1	156.7	149.2
20	152.4	161.3	153.9

5. 복수개의 송신기와 수신기를 설치할 때의 TDM 스케줄링

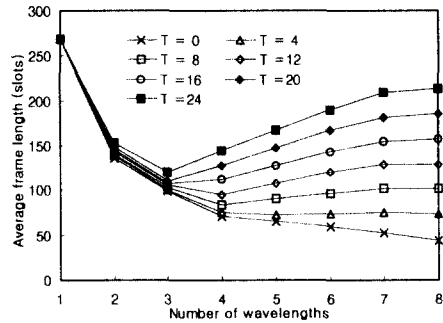
일부 노드에 복수개의 송신기와 수신기를 갖는 경우의 스케줄링은 트래픽 행렬을 수정하여 쉽게 적용할 수 있는데, 해당 노드의 행(열)의 트래픽 요소를 송신기(수신기)의 개수로 나누어주면 된다. 예를 들어 어느 노드에 송신기(수신기)가 2개라고 하면 해당 노드의 행(열)의 각 트래픽 요소를 2등분하여 얻은 수정된 트래픽 행렬에 대해 동일한 스케줄링을 적용한다. 이때 나누어진 트래픽 요소값이 정수값이 아니라면 scaled시켜 정수형으로 만든다. 트래픽 행렬을 위와같이 수정하여 적용하더라도 TDM 스케줄링 결과는 송신충돌, 수신충돌 및 파장충돌 모두를 피할 수 있음이 보장된다. 본 연구에서는 client/server 트래픽 패턴에서 server의 송신기 및 수신기를 2개, 3개씩으로 증가하는 경우에 대해 실험하였다.

IV. 실험 결과

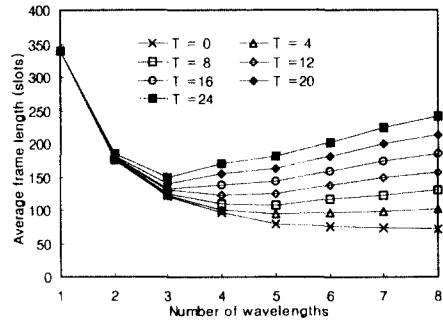
다음의 결과들은 모두 노드수가 8인 balanced 트래픽과 client/server 트래픽에 대해 LPT/lpt 스케줄링을 30회 반복 실험하여 얻은것이다.

Fact 1: 최소의 프레임길이를 보장하는 최적파장수가 존재한다.

최소의 프레임 길이를 보장하는 최적파장수가 존재함을 보이기 위해, 이용 파장수를 1부터 노드수인 8까지 변화시켰으며 파장조정시간은 0, 4, 8, 12, 16, 20, 24 slot일 때의 평균 프레임길이를 계산하였다. 그림 5에서 보이듯이 평균 프레임길이는 특정 파장수까지는 감소하다가 그 이후로는 다시 증가한다. 이러한 현상은 파장조정시간이 클수록 두드러지게 나타난다



(a) Balanced 트래픽 : $e_{balance} = random[1, 9]$



(b) Client/server 트래픽 : $e_{client} = random[1, 9]$
 $e_{server} = 2 * random[1, 9]$

그림 5. 이용 파장수에 따른 평균 프레임 길이

다. 그림 5의 (a)에서 $T=12$ 일 때 최소의 프레임 길이를 나타내는 최적파장수는 4이다. 이것은 파장조정 시간이 존재할 경우, 파장을 많이 이용할수록 반드시 프레임 길이를 줄일 수 있는 것은 아니라는 사실을 보여준다. 이용 파장수가 최적 파장수보다 적으면 파장이 부족하여 부하균형에 의한 makespan 자체가 길어지고, 최적 파장수보다 많으면 부하균형에 의한 makespan은 줄어든다 송신기가 파장충돌을 피하기 위해 고려해야 할 파장의 수가 많아 파장조정시간에 의한 지연이 길어지기 때문이다. (b)의 client/server 트래픽의 경우도 비슷한 형태를 보인다.

Fact 2: 최적파장수는 파장조정시간이 증가함에 따라 감소하며 결국 1로 수렴한다.

그림 6과 그림 7은 balanced 트래픽에 대한 그래프이다. 그림 6은 파장조정시간에 대한 각 파장별 평균 프레임 길이의 변화를 나타낸 것이다. 파장조정시간이 존재하지 않는다면 8개의 파장을 전부 이용할 때 최소의 프레임 길이를 얻는다. $W=1$ 인 경우를 제외한 경우 그래프가 양의 기울기를 가지므로 만일 파장조정시간이 충분히 큰 값을 갖게 된다면 최적파장수는 1이 될 것이다. 실험에 의하면 이 지점은 $T=113$ slot일 때였다. 그림 7을 보면 파장조정시간이 0 slot으로부터 24 slots까지 증가할 때 최소의 프레임 길이를 나타내는 최적파장수는 8, 5, 4, 3의 순으로 감소함을 알 수 있다.

Client/server 트래픽의 경우도 비슷한 결과를 보인다. 그림 8은 이용 파장수가 1, 3, 4, 5, 8개일 때 파장조정시간에 따른 평균 프레임길이를 나타낸 것이다. 그림 9

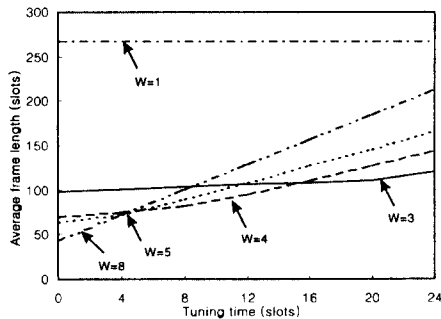


그림 6. Balanced 트래픽에서 파장조정시간에 따른 각 파장별 평균 프레임길이의 변화. ($e_{balance} = random[1, 9]$)

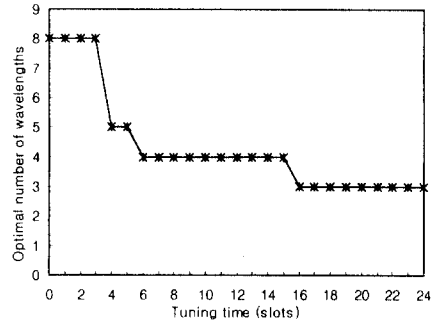


그림 7. Balanced 트래픽에서 파장조정시간에 따른 최적파장수의 변화. ($e_{balance} = random[1, 9]$)

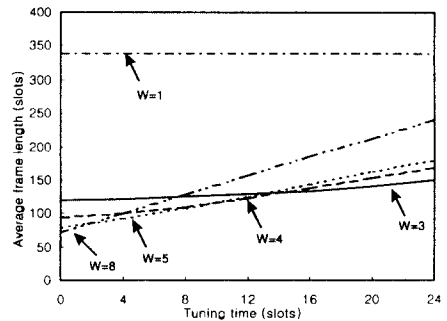


그림 8. Client/server 트래픽에서 파장조정시간에 따른 각 파장별 평균 프레임길이의 변화 ($e_{client} = random[1, 9]$, $e_{server} = 2 * random[1, 9]$)

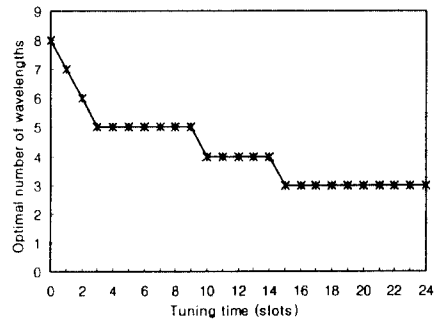


그림 9. Client/server 트래픽에서 파장조정시간에 따른 최적파장수의 변화 ($e_{client} = random[1, 9]$, $e_{server} = 2 * random[1, 9]$)

를 보면 파장조정시간이 0에서 24 slots 까지 증가함에 따라 최적파장의 수가 8에서 3까지 감소하였다.

Fact 3: 최적파장수가 이용가능 파장수보다 적을 때, 노드의 송신기 및 수신기의 수를 증가시킴으로써 프레임길이를 감소시킬 수 있다.

이용 파장수를 1부터 노드수인 8까지 변화시켜 가면서, server 트래픽이 client 트래픽의 2배 및 3배일 경우에 대해 III장의 5절에서 설명한 방법으로 실험하였다.

그림 10의 (a)와 (b)는 server 트래픽이 client 트래픽의 2배인 client/server 트래픽일 때, server의 송신기

와 수신기의 수를 2개로 증가시킬 경우 파장조정시간의 변화에 따른 평균 프레임 길이와 최적 파장수의 변화를 나타낸 것이다. 그림 10의 (a)에서 server의 송신기와 수신기가 1개일 때보다 2개를 설치하였을 때 최적파장에서의 평균 프레임길이가 훨씬 줄어든 것을 알 수 있다. 그림 10의 (b)를 보면, 동일 파장조정시간에 대해서 server의 송신기와 수신기 수를 2개로 증가시켰을 때의 최적파장의 수가 증가시키기 전보다 적어도 같거나 큰 것을 알 수 있다.

그림 11의 (a)와 (b)는 server 트래픽이 client 트래픽의 3배인 client/server 트래픽일 때, server의 송신기와 수신기의 수를 각각 2개와 3개로 증가시킬 경우

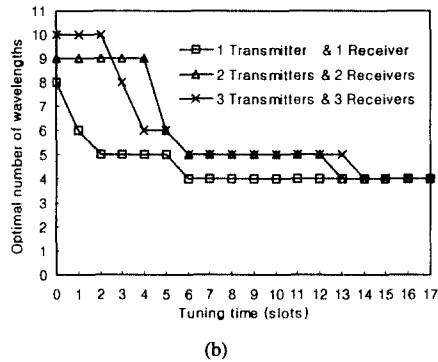
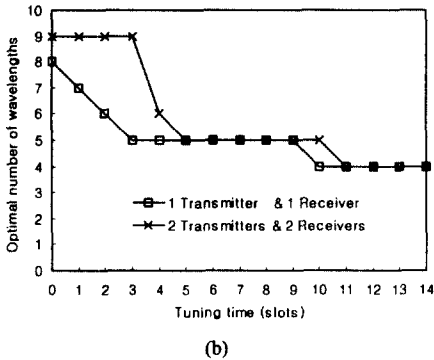
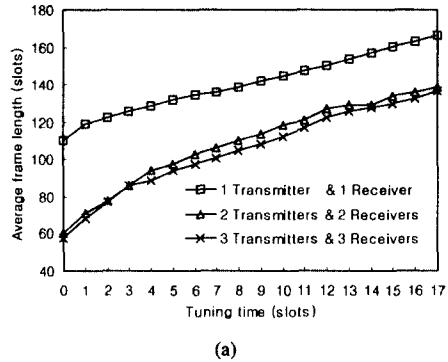
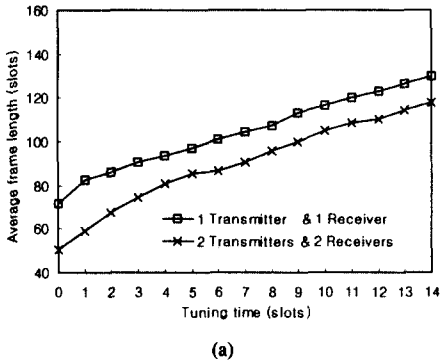


그림 10. 최적파장수가 이용 가능 파장수보다 적을 때 2개의 송신기와 수신기의 영향. (a) Server의 송신기와 수신기의 수를 2개로 증가시키기 전과 후의 파장조정시간에 따른 평균 프레임길이의 변화. (b) Server의 송신기와 수신기의 수를 2개로 증가시키기 전과 후의 파장조정시간에 따른 최적 파장수의 변화. ($e_{client} = random[1, 9]$, $e_{server} = 2 * random[1, 9]$)

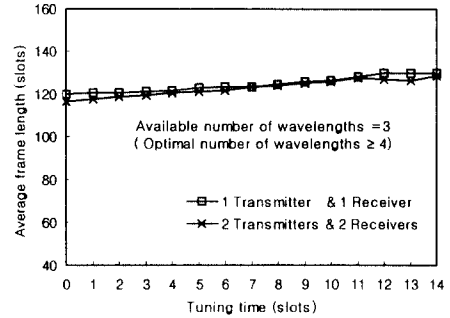
그림 11. 최적파장수가 이용 가능 파장수보다 적을 때 복수개의 송신기와 수신기의 영향. (a) Server의 송신기와 수신기의 수를 2개와 3개로 증가시키기 전과 후의 파장조정시간에 따른 평균 프레임길이의 변화. (b) Server의 송신기와 수신기의 수를 2개와 3개로 증가시키기 전과 후의 파장조정시간에 따른 최적파장수의 변화. ($e_{client} = random[1, 9]$, $e_{server} = 3 * random[1, 9]$)

파장조정시간의 변화에 따른 평균 프레임 길이와 최적파장수의 변화를 나타낸 것이다. 그림 11의 (a)에서는 server의 송신기와 수신기의 수를 각각 2개와 3개로 증가시켰을 경우 최적파장수에서의 평균 프레임 길이가 증가 전보다 훨씬 작게 나타나는 것을 보여주고 있고, 그림 11의 (b)에서는 주어진 파장조정시간에 대하여 server의 송신기와 수신기의 수를 증가시켰을 때 최적파장의 수가 증가하는 것을 보여주고 있다.

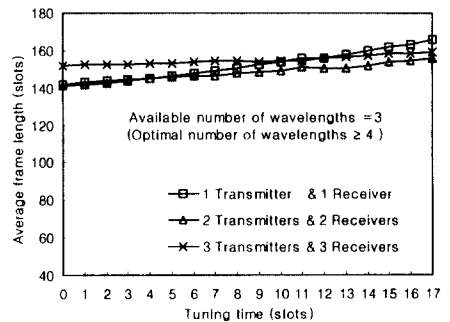
Fact 4: 최적파장수가 이용가능 파장수보다 클 때, 노드의 송신기 및 수신기의 수를 증가시키더라도 프레임 길이는 거의 감소하지 않는다.

Fact 3과는 달리 최적파장수가 이용가능 파장수보다 큰 경우에 대해, server의 송신기와 수신기의 수를 증가하였을 때의 평균 프레임 길이의 변화 효과에 대해 실험하였다. 그림 10의 (b)와 그림 11의 (b)에서 파장조정시간이 14까지 증가할 때 최적파장의 수는 4까지만 감소하므로, 같은 경우에 대해 이보다 적은 파장수인 3개만을 이용하여 실험하였다. 그림 12의 (a)와 (b)는 server 트래픽이 client 트래픽의 2배와 3배인 경우에 대해 server의 송신기와 수신기의 수를 증가시키기 전과 후의 평균 프레임 길이를 비교해 본 것인데, 송신기와 수신기의 수를 증가시키더라도 프레임 길이의 단축은 미미하며 더 길어지는 경우도 발생한다. 그림 12의 (b)의 경우는 server 트래픽이 client 트래픽의 3배 이므로 송신기와 수신기의 수를 2개, 3개까지 증가시켰으나 프레임 길이의 단축 효과는 거의 얻지 못하였다. 즉, 이용가능 파장수가 최적 파장수보다 적은 경우는 노드의 송신기 및 수신기의 수를 증가시키더라도 프레임 길이는 거의 감소하지 않는다.

한편 그림 5의 (a)와 (b)를 주의깊게 살펴보면, 주어진 파장조정시간에 대한 프레임 길이는 파장수에 대해 거의 unimodal(convex)의 형태를 가진다는 것을 알 수 있다. 즉, 최적 파장수 이내의 파장수를 고려할 때는 이 중 가장 큰 파장수에서의 프레임 길이가 가장 적게 나타난다는 것이다. 따라서 이용 가능한 파장의 수가 최적 파장의 수보다 적은 경우는 이용 가능한 파장을 모두 이용해야 프레임 길이를 최소화 할 수 있을 것이다.



(a)



(b)

그림 12. 최적파장수가 이용 가능 파장수보다 클 때 복수개의 송신기와 수신기의 영향. (a) 3개의 파장만을 이용할 때 server의 송신기와 수신기의 수를 2개로 증가시키기 전과 후의 파장조정시간에 따른 평균 프레임길이의 변화. ($e_{client} = random[1, 9]$, $e_{server} = 2 * random[1, 9]$) (b) 3개의 파장만을 이용할 때 server의 송신기와 수신기의 수를 2개와 3개로 증가시키기 전과 후의 파장조정시간에 따른 평균 프레임길이의 변화. ($e_{client} = random[1, 9]$, $e_{server} = 3 * random[1, 9]$)

V. 결 론

본 연구에서는 파장조정 송신기와 파장고정 수신기를 갖추고 있는 WDM 수동 성형망 하에서 비균등 트래픽에 대한 TDM을 기반으로 한 타임 슬롯 스케줄링 시의 최적파장수와 파장조정시간과의 관계에 대해 분석하였다. 먼저, 실험 결과 최소의 프레임의 길이를 보장하는 최적의 파장수가 존재함을 알 수 있었다. 즉, 이용 가능한 파장을 모두 이용하는 것이 프

입 길이의 면에서 항상 유리한 것은 아니라는 것이다. 또한 이 최적 파장수는 파장조정시간이 증가함에 따라 감소하며 결국 1로 수렴한다.

최적 파장수가 이용 가능한 파장수보다 적은 경우 client/server 트래픽에서 server의 송신기와 수신기의 수를 증가시키면 프레임 길이를 단축시킬 수 있으며, 이와 같은 경우 최적파장의 수는 증가될 수 있다. 한편 이용 가능한 파장수가 최적 파장수보다 적을 경우, 이용 가능한 파장 모두를 이용해야 최소의 프레임 길이를 얻을 수 있다.

참 고 문 헌

1. B. Mukherjee, "WDM-based local lightwave networks, part I: Single-hop systems", *IEEE Network*, pp. 12-27, May, 1992.
2. C. A. Brackett, "Dense wavelength division multiplexing networks: Principles and applications", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 8, No. 6, pp. 948-964, August 1990.
3. H. Choi and H.-A. Choi, "Efficient scheduling of transmissions in optical broadcast networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, December 1996.
4. A. Ganz and Y. Gao, "Time-wavelength assignment algorithms for high performance WDM star based systems", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 42, pp. 1827-1836, 1994.
5. G. R. Pieris and G. H. Sasaki, "Scheduling transmissions in WDM broadcast-and-select networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 2, No. 2, pp. 105-110, April 1994.
6. S.-K. Lee, A. D. Oh, H. Choi, and H.-A. Choi, "Optimal transmission schedules in TWDM optical passive star networks", *Discrete Applied Mathematics* 75, pp. 81-91, 1997.
7. G. N. Rouskas and V. Sivaraman, "On the design of optimal TDM schedules for broadcast WDM networks with arbitrary transceiver tuning latencies", *IEEE INFOCOM '96*, pp. 1217-1224, 1996.
8. 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, June 1996.
9. I. S. Gopal and C. K. Wong, "Minimizing the number of switchings in an SS/TDMA system", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-33, No. 6, pp. 497-501, June 1985.
10. E. G. Coffman, Jr., M. R. Garey, and D. S. Johnson, "An application of bin-packing to multi-processor scheduling", *SIAM J. Computing*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-17, February 1978.
11. M. Pinedo, *Scheduling: Theory, Algorithms and Systems*, Prentice Hall, 1995.
12. E. G. Coffman and P. J. Denning, *Operating systems theory*, Prentice Hall, 1973.

신 홍 섭(Hongseob Shin)

정회원

1973년 11월 15일생

1992년 3월~1996년 2월: 홍익대학교 산업공학과(학사)

1996년 3월~현재: 홍익대학교 산업공학과 석사과정

※주관심분야: 통신망스케줄링, 조합최적화, 광통신

신 용 식(Yong Sik Shin)

정회원

1971년 8월 24일생

1990년 3월~1994년 2월: 홍익대학교 산업공학과(학사)

1994년 3월~1996년 2월: 홍익대학교 산업공학과(석사)

1996년 3월~현재: 홍익대학교 산업공학과 박사과정

※주관심분야: 최적화, 통신망 설계 및 관리, 비선형
조합최적화, 광통신

박 구 현(Koohyun Park)

정회원

1957년 3월 19일생

1976년~1980년: 서울대학교 산업공학과(학사)

1980년~1982년: 한국과학기술원 경영학과(석사)

1985년~1989년: 미국 University of Wisconsin-Madison
(박사: 최적화분야)

1982년~1985년: 동아대학교 산업공학과, 전임강사

1989년 5월~1990년 1월: 미국 University of Wisconsin-
Madison, Post-Doc.

1990년 2월~1991년 3월: 한국전자통신연구소 지능망
연구부 선임연구원

1991년 3월~현재: 홍익대학교 산업공학과, 부교수

※주관심분야: 최적화, 통신망 분석 및 설계, 트래픽
제어 및 예측