

# 시분할 다중합 방식과 멀티 홉 구조를 적용한 새로운 광 공간 스위치의 성능 분석

준회원 전 인 중\*, 정 준 영\*, 김 세 환\*\*, 정회원 정 제 명\*, 신 서 용\*\*\*

## The Performance Analysis of a Novel Optical Space Switch Employing Multihop Structure and Time Division Multiplexing

In-jung Jeon\*, Jun-young Jeong\*, Se-hwan Kim\*\*, Je-myung Jeong\*, Seo-yong Shin\*\*\*

*Regular Members*

### 요 약

본 논문에서는 스위칭 시스템의 대용량화를 위해 시분할 다중합 방식과 멀티 홉 구조를 적용한 새로운 형태의 모듈화된 광 공간 스위치를 제안하였다. 그리고 기존 광 공간 스위치와의 비교를 통해 전력 손실, 사용 소자의 수, 신호대 누화비 등의 성능이 더 우수함을 보였다. 또한, 그 구조에서의 모듈 수,  $M$ 에 따른 포화 처리율을 해석한 결과, 한 모듈의 입력 포트 수( $M$ )가 매우 클 때,  $M$ 개의 모듈을 가진 스위칭 시스템의 포화 처리율은  $M+1-\sqrt{M^2+1}$ 이 됨을 알 수 있었다. 마지막으로, 제안한 스위치에서의 셀 손실율 특성을 시뮬레이션을 통해 알아 보았다. 예를 들어,  $\rho=0.9$ ,  $M=8$ ,  $N=32$ 일 경우,  $10^{-6}$  이하의 셀 손실율을 얻기 위해서는 입력 버퍼의 저장 유닛의 수가 6개, 출력 버퍼의 저장 유닛의 수가 52개 이상이어야 함을 알 수 있었다.

### ABSTRACT

In this paper, we propose the novel module-type optical space switch, employing time division multiplexing (TDM) method and multihop structure, in order to enlarge the capacity of the switching system. And we show that the proposed structure is superior over conventional ones, in terms of power loss, the number of the devices used, and signal to crosstalk (SXR). We also analyze the saturation throughput with the number of module  $M$ . As a result, the saturation throughput of the switching system with  $M$  modules is  $M+1-\sqrt{M^2+1}$ , when the number of input port in a module ( $N$ ) is large. Finally, we confirmed the cell loss rate (CLR) performance with the proposed switch through simulation. For example, when  $\rho=0.9$ ,  $M=8$  and  $N=32$ , to get the CLR that is less than or equal to  $10^{-6}$ , the number of input buffers storage unit is greater than or equal to 6 and output buffers storage unit is greater than or equal to 52.

### I. 서론

21세기에 전개될 정보 통신 서비스의 양적, 질적 확대는 매우 급속히 이루어질 전망이다. 통신 대역 폭 수요의 증가(수백Mbps ~ 수Gbps)로 인한 망 사

용자 트래픽의 양적인 증가(수Tbps ~ 수십Tbps)와 음성, 데이터, 동영상, 전자비서, 컴퓨터/전화 통합, 가상 현실/입체, 원격 검진/교육 서비스 등과 같은 다양한 서비스에서의 높은 품질(QoS)에 대한 요구를 실현시키기 위해서는 교환기술이 초고속/대용량

\* 한양대학교 전자통신전공학과 광통신연구실(jeon305@ece.hanyang.ac.kr), \*\* (주)아이텍 테크놀러지(sehwan77@chollian.net), \*\*\* 명지대학교 전자정보통신공학과 광통신연구실(sshin@wh.myongji.ac.kr)

논문번호 : 020249-0524, 접수일자 : 2002년 5월 24일

※ 본 연구는 광주과학기술원 초고속 광 네트워크연구센터를 통한 한국과학재단의 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

화 되어야 한다. 이를 위해 정보전달의 광대역 및 저손실성, 스위칭의 고속성, 신호간의 무유도성, 상호 불간섭성, 병렬성 등과 같은 광의 여러 특성들을 이용한 광 통합망의 구성이 필요하다. 그러나 현재의 통신 시스템은 광의 활용을 위해 전/광 및 광/전 변환이 요구되며, 이러한 변환은 신호 전송에 있어서 병목현상을 일으킬 수 있으므로, 교환기술의 초고속/대용량화를 이루는데 어려움이 있다. 따라서 앞으로는 전광(all-optical) 영역에서의 광 교환기술 개발이 필요할 것이다<sup>1,2)</sup>. 한편, 지금까지의 광 교환 기술은 초고속/대용량화를 이루기 위해 파장 분할 다중합(Wavelength Division Multiplexing: WDM) 방식<sup>3-6)</sup>, 시분할 다중합(Time Division Multiplexing: TDM) 방식<sup>7,8)</sup> 등 다양한 다중합 방식을 활용하고 있다. 그러나 이러한 다중합 방식들은 각각 용량을 키우는데 한계가 존재한다. WDM의 경우, 광 교환시스템 구현을 위해 AWG 같은 파장 라우터(Wavelength Router)<sup>6)</sup> 와 가변 파장 변환기(Tunable Wavelength Converter: TWC)<sup>4)</sup> 등이 필요하다. 그런데 이러한 소자들에 사용되는 파장의 수를 증가시키는 데에는 한계가 있기 때문에 전체 시스템의 용량 증가에도 한계가 따른다. TDM의 경우, 광 교환시스템 구현을 위해 셀 압축기와 셀 확장기가 필요하다. 이때 셀 압축기의 압축 정도에는 한계가 있고, 과하게 압축된 신호 셀의 경우 제어하기가 어렵기 때문에 전체 시스템의 용량을 증가시키기가 어렵다. 따라서 최근에는 이러한 한계를 극복하고 대용량화를 실현하기 위하여 다단 구조 혹은 멀티 홉 구조<sup>3,5,9)</sup>를 사용하거나, 두 가지 이상의 다중합 방식을 하이브리드 형태로 혼합 사용하는 방식<sup>7, 10)</sup>이 연구되고 있다. 이에 본 논문에서는 초고속/대용량화의 실현을 위해 TDM 방식과 멀티 홉 구조를 적용한 새로운 광 공간 스위치를 제안하고 그 특성을 분석하였다(지금부터는 본 논문에서 제안한 새로운 광 공간 스위치를 멀티 홉 광 공간 스위치로 명명하겠다). 제안한 멀티 홉 광 공간 스위치는 스위치를 모듈로 나누어 구성하고 멀티 홉을 적용시킴으로써, 사용되는 방향성 결합기의 수를 줄이고 신호간에 블로킹(blocking)이 발생할 확률을 줄일 수 있다. 한편, 제안한 멀티 홉 광 공간 스위치의 신호대누화비(Signal to Crosstalk Ratio: SXR)를 기존의 광 공간 스위치와 비교하여 보았으며, 모듈 수에 따른 포화 처리율(throughput)의 변화를 해석하였다. 그리고 입력 부하( $\rho$ )와 출력 포트 활용율 사이의 관계와 광 입/출력 버퍼의 저장 유닛 수에 따른 셀

손실율(Cell Loss Rate: CLR)의 변화를 시뮬레이션을 통해 알아보고, 이에 따라 입력 부하가 일정할 때 원하는 CLR을 보장 받을 수 있도록 모듈 수, 입/출력 버퍼의 용량 등을 결정하는 방법을 알아보았다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안한 멀티 홉 광 공간 스위치의 구조 및 동작원리를 알아보고, 모듈 수에 따른 포화 처리율을 해석하였다. 3장에서는 멀티 홉 광 공간 스위치와 기존의 광 공간 스위치의 성능을 SXR, 사용 소자의 수, 전력 손실 측면에서 비교 분석하였고, 시뮬레이션을 통해 멀티 홉 광 공간 스위치의 CLR을 알아보았다. 그리고 기존의 WDM 다단 구조인 FRONTIERNET<sup>4)</sup>과 CLR 특성을 비교 분석하였다. 마지막으로 4장에서는 2장과 3장의 내용을 토대로 본 논문의 결론을 내렸다.

## II. 멀티 홉 광 공간 스위치

### 1. 멀티 홉 광 공간 스위치의 구조 및 동작 원리

그림 1은 본 논문에서 제안하는 TDM 방식과 멀티 홉 구조를 적용시킨 새로운 형태의 모듈화된 멀티 홉 광 공간 스위치 구조이다. 그림 1에서 알 수 있듯이 멀티 홉 광 공간 스위치의 구조는 M개의 N

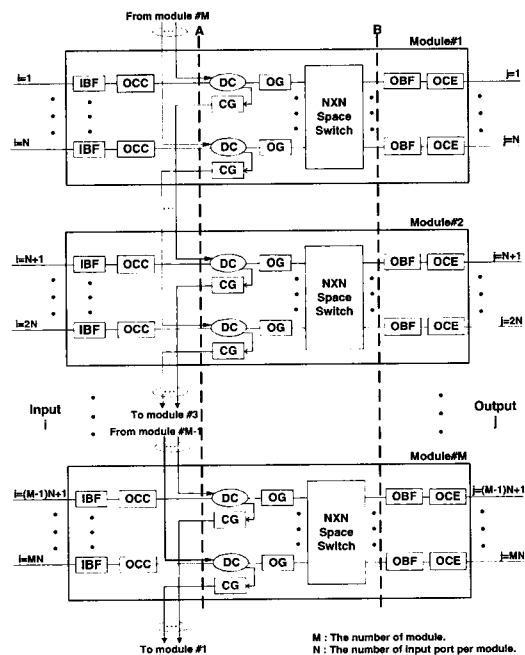


그림 1. MN x MN 멀티 홉 광 공간 스위치 구조

×N 스위칭 모듈로 구성되어 있으며, 따라서 전체 구조는 MN×MN의 형태로 확장된다. 각 스위칭 모듈은 N개의 광 입력 버퍼(Input Buffer: IBF), N개의 광 신호 셀 압축기(Optical Cell Compressor: OCC), N개의 2×2 방향성 결합기(Directional Coupler: DC), N개씩의 출력 게이트(Output Gate: OG)와 순환 게이트(Circular Gate: CG), 1개의 N×N 광 공간 스위치, N개의 광 출력 버퍼(Optical Output Buffer: OBF), N개의 광 셀 확장기(Optical Cell Expander: OCE) 등으로 구성된다.

각 입력 포트에 들어오는 신호 셀들은 먼저 광 입력 버퍼로 전송되게 된다. 광 입/출력 버퍼의 경우 다양한 종류의 버퍼가 사용될 수 있으나, 크게 그림 2와 같이 직렬형 구조<sup>[5]</sup>와 병렬형 구조<sup>[11]</sup>로 분류된다. 본 논문에서는 임의로 가장 기본적인 구조인 그림 2(a)의 직렬형 버퍼를 고려하여 해석하였으며, 뒤에서 보일 시물레이션을 실행하는 데에도 직렬형 버퍼를 고려하였다. 만약 동일 모듈 내의 광 입력 버퍼들로부터 출력될 예정인 2개 이상의 신호 셀들이 동일 모듈의 동일한 출력 포트에 전송되고자 할 경우, 신호 셀들 간의 충돌이 발생할 수 있다. 따라서 충돌을 방지하기 위해 목적지가 동일한 여러 광 신호 셀들 중 하나의 신호 셀만을 전송시키고, 나머지 신호 셀들은 광 입력 버퍼에 계속 저

장시킨다. 이때 우선권은 저장되어 있는 신호 셀의 양이 가장 많은 광 입력 버퍼로부터 출력되고자 하는 신호 셀에게 주어진다. 그리고 2개 이상의 광 입력 버퍼에 동시에 우선권이 할당될 경우 신호 셀을 전송할 권리는 랜덤 하게 배정된다. 한편, 서로 다른 모듈의 광 입력 버퍼들로부터 출력될 예정인 여러 신호 셀들이 동일한 출력 포트에 전송되고자 할 때에는 신호 셀들 간의 충돌이 발생하지 않는다. 이는 TDM 특성을 모듈 단위로 적용시켰기 때문에 가능하며, 그 예를 그림 3의 동작 설명에서 보이겠다.

광 입력 버퍼에서 출력된 신호 셀들은 광 셀 압축기에서 압축되며, 압축되는 정도는 모듈 수에 의해 결정된다. 즉, 각 압축된 신호 셀들의 셀 지속 시간(cell duration)은 원래의 셀 지속 시간, T의 1/M로 압축된다. 여기서 M은 모듈 수 이다. 압축된 광 신호 셀들은 방향성 결합기, DC를 통해 분기되고, 분기된 각 신호 셀들은 OG와 CG로 전송된다. 이중 원하는 출력 포트가 해당 모듈에 속하는 신호 셀은 OG가 ON 상태가 되어 공간 스위치부를 통해 원하는 출력 포트에 전송되고, 나머지 신호 셀들은 OG가 OFF 상태가 되어 공간 스위치로 전송되지 못한다. 그리고 DC를 통해 분기된 각 신호 셀들은 CG를 통해 다음 모듈로 전송(홉)되며 T/M만큼 지연을 겪게 된다. 이때 각 게이트는 각 신호 셀들이 DC를 통과하며 잃어버린 전력을 보상해 준다. M개의 모듈로 구성된 멀티 홉 광 공간 스위치의 경우, 광 신호 셀들이 겪게 되는 최대 홉 수는 M-1 이 된다. M-1번째 홉이 끝나면 모든 CG는 OFF 상태가 되어 기존의 신호 셀과 새로 입력되는 신호 셀 사이의 충돌이 일어나지 않게 해 준다.

멀티 홉 광 공간 스위치의 간단한 동작 예를 그림 1과 3을 통해 알아보자. 그림 1에서 보이는 점선 A, B는 DC를 통해 분기된 각 신호 셀들의 진행상태를 살펴보기 위해 임의로 정해진 위치로서, 그림 3의 멀티 홉 광 공간 스위치 동작 설명의 각 홉 과정에서 각 신호 셀들의 진행상태를 설명하기 위해 활용되었다. 모듈이 4개(M=4)이고, 각 모듈에 입력되는 광 신호 셀이 2개(N=2)이며, 최대 세 번의 홉(hop)을 거치는 광 공간 스위치를 가정하여 타이밍도와 함께 동작을 살펴보았다. 그림 3(a)는 각 모듈에 입력되는 광 신호 셀과 그 셀들의 압축 정도를 보인다. 각 입력 신호 셀  $D_{ij}$ 에서  $i(=1, 2, \dots, MN)$ 는 입력 포트,  $j(=1, 2, \dots, MN)$ 는 전송되고자 하는 출력 포트를 표시하고 있으며,  $Mx$ 는  $x(=1, 2, \dots, M)$ 번째 모듈을 의미한다. 이 경우

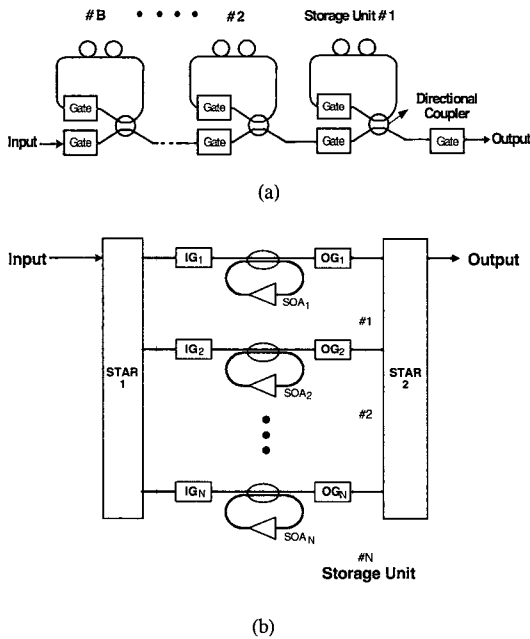


그림 2. 일반적인 광 입/출력 버퍼 구조 (a) 직렬형 버퍼, (b) 병렬형 버퍼

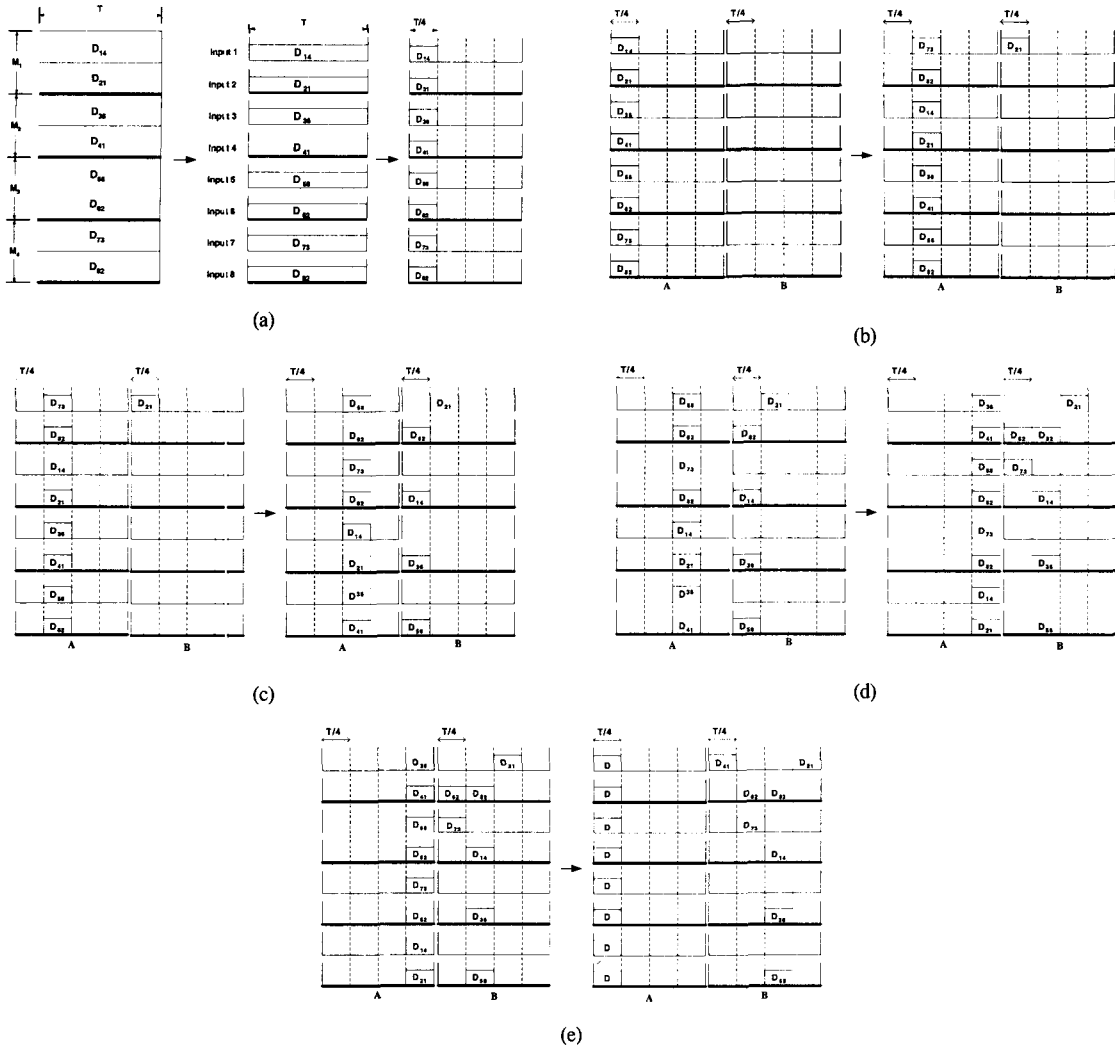


그림 3. 멀티 홉 광 공간 스위치 동작 설명( $M=4, N=2$ ). (a) 데이터 입력 및 셀 압축( $1/M$ ), (b) 1st hop 과정, (c) 2nd hop 과정, (d) 3rd hop 과정, (e) 다음 데이터의 입력.

$x = [(i-1)/N] + 1$ 이고 ( $\lfloor y \rfloor$ 는  $y$ 보다 작거나 같은 최대 정수),  $\{(i-1) \bmod N\} + 1$ 은  $D_{ij}$ 가  $x$ 번째 모듈에서 몇 번째 입력 포트에 들어오는가를 나타내며, 출력 포트  $j$ 에 대해서도 위와 같은 방법이 적용된다. 예를 들어, 그림 3(a)처럼  $M=4, N=2$ 인 경우,  $D_{21}$ 은 1번 모듈의 2번째 입력 포트로부터 1번 모듈의 1번째 출력 포트에 출력되는 광 신호 셀을 의미한다. 광 입력 버퍼에서 출력된 신호 셀은 광 셀 압축기에서  $T/4$ 로 압축된다. 그림 3(b)는 첫 번째 홉의 결과이다. 압축된 광 신호 셀들은 방향성 결합기 DC를 통해 나뉘어 OG와 CG로 전송되고, 이중 원하는 출력 포트가 해당 모듈에 속하는  $D_{21}$ 만이 출력 게이트 OG를 거쳐 공간 스위치부에서 1번 출력 포

트로 출력된다. 그리고 나머지 광 신호 셀들은 OG가 OFF되어 공간 스위치부로 전송되지 못한다. 나뉘어진 모든 광 신호 셀들은 CG를 통해 다음 모듈로 전송되며  $T/4$ 만큼 지연을 겪게 된다. 그림 3(c)는 두 번째 홉의 결과이다. 첫 번째 홉을 거쳐 다음 모듈로 전송된 신호 셀들 중 원하는 출력 포트가 해당 모듈에 속하는  $D_{82}, D_{14}, D_{36}, D_{58}$ 의 해당 출력 게이트 OG는 ON 상태가 되고, 각 신호 셀들은 공간 스위치부에서 교환되어 해당 모듈의 원하는 목적지로 출력된다. 그리고 DC를 통해 나뉘어진 광 신호 셀들은 두 번째 홉을 한다. 그림 3(d)는 세 번째 홉 과정의 결과로서, 앞서서와 마찬가지로  $D_{62}, D_{73}$ 이 출력되고, 각 광 신호 셀들은 CG

를 통해 다음 모듈로 전송된다. 그림 3(e)에 나타내었듯이 세 번째 홉 후 마지막으로 D41이 출력되고, 모든 순환 게이트 CG가 다시 OFF 상태가 되어 기존의 신호 셀과 새로 입력되는 신호 셀 사이의 충돌을 방지해 준다. 그림 3(e)의 마지막 타이밍도를 보면 첫 번째 모듈의 1번 출력으로 D21과 D41이 순차적으로 출력됨을 볼 수 있다. 이처럼 서로 다른 모듈에 입력된 신호 셀들이 동일한 출력 포트에 전송되고자 할 경우 블록킹(blocking)이 발생하지 않는데, 본 논문에서는 이를 모듈간 논블록킹(inter-module nonblocking)이라 칭하였다. 기존의 광 공간 스위치는 이러한 경우 블록킹이 발생하고, 이 블록킹은 입력 버퍼를 이용해 해결해야만 하였으나 멀티 홉 광 공간 스위치에서는 멀티 홉 과정으로 인해 이 블록킹이 발생하지 않는다는 장점이 있다. 따라서 입력 버퍼의 Head of Line(HOL) 문제가 개선될 수 있다. 압축된 광 신호 셀들을 다시 확장시킬 때 서로의 신호가 겹치지 않게 하기 위해서 출력 버퍼를 사용하였다. 광 출력 버퍼에 저장된 신호 셀들은 FIFO 특성에 따라 압축되기 전 신호 셀들의 셀 지속시간에 맞추어 하나씩 출력되고, 이어지는 광 셀 확장기를 통해 원래의 셀 지속 시간으로 확장된다<sup>[2]</sup>.

2. 멀티 홉 광 공간 스위치의 모듈 수에 따른 포화 처리율 해석

이제 그림 1의 MN×MN 대용량 스위칭 시스템의 모듈 수에 따른 포화 처리율에 대해 해석해 보자. 본 논문에서의 해석 방식은 일반적인 입력 버퍼의 포화 처리율 해석 방식을 확대 적용시킨 것이다<sup>[13]</sup>. 먼저 광 입력 버퍼는 포화되어 있다고 가정하자. 즉, 모든 광 입력 버퍼에서는 항상 신호 셀들이 전송되기 위해 대기하고 있다고 가정한다. 그리고 하나의 신호 셀이 스위치를 통해 출력되면, 그 공백을 메우기 위해 새로운 신호 셀이 광 입력 버퍼의 가장 앞 단으로 즉시 이동한다고 가정하자. 또한 각각의 신호 셀들이 특정 출력 포트에 전송될 확률은 각각의 출력 포트에 대해 1/MN로 모두 동일하다고 가정하자. 어느 한 모듈 내의 N개의 입력 버퍼에서는 각 타임 슬롯에 각각 하나씩의 신호 셀을 MN개의 출력 포트 중 하나로 전송하고자 할 것이며, 이 신호 셀들 중 2개 이상의 신호 셀이 동일한 출력 포트에 전송되고자 하는 경우, 그 중 하나의 신호 셀만이 출력 포트에 전송되고, 나머지 신호 셀들은 광 입력 버퍼에 계속 남게 된다. 이와 같이 m번째

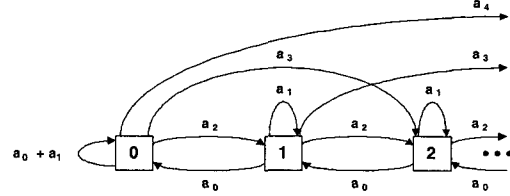


그림 4. 출력 버퍼의 discrete-time Markov chain 상태 전이도

타임 슬롯의 중단에, 하나의 스위칭 모듈 내의 광 입력 버퍼들로부터 출력될 수 있는 N개의 신호 셀들 중, j(=1, 2, ..., MN)번째 출력 포트에 전송되고자 하는 신호 셀들 가운데 전송되지 못하고 광 입력 버퍼에 저장되는 신호 셀의 수를  $B_m^j$ 라고 정의하자. 그리고 m번째 타임 슬롯 동안, 하나의 스위칭 모듈 내의 비어 있는 광 입력 버퍼의 가장 앞 단으로 이동하고, j번째 출력 포트에 전송되고자 하는 신호 셀의 수를  $A_m^j$ 라고 정의하자. 또한, m번째 타임 슬롯의 중단에, 하나의 스위칭 모듈 내의 광 입력 버퍼들로부터 출력되는 신호 셀의 수를  $F_m$ 이라고 정의하자. 이러한 정의들에 의해 하나의 스위칭 모듈 내에서  $F_m$ 과  $A_m^j$ ,  $B_m^j$  사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$F_{m-1} \equiv N - \sum_{j=1}^{MN} B_{m-1}^j = \sum_{j=1}^{MN} A_m^j \tag{1}$$

하나의 스위칭 모듈 내의 광 입력 버퍼로부터 출력되는 신호 셀의 수에 대한 안정-상태(steady-state)에서의 평균값을  $\bar{F}$ 하고, 임의의 출력 포트에서 하나의 모듈로부터 전송되는 신호 셀의 활용율을  $\rho_0$ 라 할 때, 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\rho_0 = \frac{\bar{F}}{MN} \tag{2}$$

$B_m^j$ 의 안정-상태에서의 평균값은 (1), (2)식에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$\bar{B}^j = \frac{N}{MN} - \frac{\bar{F}}{MN} = \frac{1}{M} - \rho_0 \tag{3}$$

한편,  $N \rightarrow \infty$ 일 때,  $A_m^j$ 의 안정-상태에서의 신호 셀 수,  $A^j$ 는  $\rho_0$ 를 패러미터로 갖는 Poisson 분포

로 근사 된다<sup>[13]</sup>. 즉,

$$a_k \equiv \lim_{N \rightarrow \infty} \Pr[A^j = k] = e^{-\rho_0} \frac{\rho_0^k}{k!} \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

이다. 따라서  $A^j$ 에 대한 확률 생성 함수(Probability Generating Function PGF)는 다음과 같이 얻어진다.

$$A^j(z) \equiv \sum_{k=0}^{\infty} z^k \Pr[A^j = k] = e^{-\rho_0(1-z)} \quad (5)$$

한편,  $B_m^j$ 와  $A_m^j$  사이의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$B_m^j = \max(0, B_{m-1}^j + A_m^j - 1) \quad (6)$$

여기서,  $B_m^j$ 는 discrete-time Markov chain의 형태로 모델링된다<sup>[5,13]</sup>. 그림 4는 이에 대한 상태 전이도이다. 안정-상태에서  $B^j = k$ 일 확률을  $b_k$ 로 정의하고, 그림 4를 참고하면 다음과 같은 관계식들을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} b_0 &= b_0(a_0 + a_1) + b_1 a_1 \\ b_{n-1} &= b_n a_0 + b_{n-1} a_1 + \sum_{k=2}^n a_k b_{n-k}, n \geq 2 \end{aligned} \quad (7)$$

한편, 어떤 특정 출력 포트의 활용율  $\rho_0$ 에는 이전 타임 슬롯의 중단에서 그 출력 포트에 향하지 못하고 블록 되어 광 입력 버퍼에 저장되어 있는 신호 셀도 없고( $b_0$ ), 해당 타임 슬롯 동안 그 출력 포트를 목적지로 하여 새로 전송되어 들어온 신호 셀도 없는( $a_0$ ) 경우를 제외한 모든 경우가 해당되므로, 이를 수식으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_0 = 1 - a_0 b_0 \quad (8)$$

다시 (7), (8)식을 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} b_0 &= \Pr[B^j = 0] = \frac{1 - \rho_0}{a_0} \\ b_1 &= \Pr[B^j = 1] = \frac{1 - a_0 - a_1 b_0}{a_0} \\ b_n &= \Pr[B^j = n] = \frac{1}{a_c} b_{n-1} - \sum_{k=1}^n \frac{a_k}{a_0} b_{n-k}, n \geq 2 \end{aligned} \quad (9)$$

(9)식을 이용하여  $B^j$ 에 대한 PGF를 구하면 다음과 같다.

$$B^j(z) = \sum_{n=0}^{\infty} z^n \Pr[B^j = n] = \frac{a_0 b_0 + z(a_1 b_0 + a_0 b_1 - b_0)}{A^j(z) - z} = \frac{a_0 b_0(1-z)}{A^j(z) - z} \quad (10)$$

(10)식에 (5), (8)식을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$B^j(z) = \frac{(1 - \rho_0)(1 - z)}{e^{-\rho_0(1-z)} - z} \quad (11)$$

안정-상태에서의  $B_m^j$ 의 평균값은, PGF 특성과 로피탈의 정리를 이용하여 정리하면,  $A(1) = 1$ ,  $A'(1) = \rho_0$ ,  $A''(1) = \rho_0^2$ 이므로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\overline{B^j} = \frac{\rho_0^2}{2(1 - \rho_0)} \quad (12)$$

(3)식과 (12)식을 연립하여 풀면, 다음과 같이 활용율을 구할 수 있다.

$$\rho_0 = \frac{M + 1 - \sqrt{M^2 + 1}}{M} \quad (13)$$

전체 시스템은 M개의 모듈로 이루어져 있고 (13)식은 하나의 모듈에서 j번째 출력 포트에 신호 셀이 전송될 확률이므로, 하나의 출력 포트(출력 버퍼)로 신호 셀이 들어올 확률은 다음과 같이 계산된다.

$$\rho' = M \rho_0 = M + 1 - \sqrt{M^2 + 1} \quad (14)$$

안정-상태에서 출력 버퍼의 처리율은 일반적으로 신호 셀이 들어올 확률과 동일하므로 (14)식의 값은 출력 버퍼의 처리율이 된다. 따라서 전체 시스템의 처리율은 (14)식과 같으며, 모듈 수 M을 충분히 키우면 그 값은 1에 근사하게 됨을 알 수 있다.

그림 5는 (14)식의 결과에 따라 포화 상태에서의 전체 시스템의 처리율을 모듈 수, M에 따라 알아본 것이다. 예를 들어 모듈 구조를 사용하지 않은 경우 (M=1), 58.5%<sup>[13]</sup>에 불과하던 포화 처리율이, M이 2만 되어도 76.4%로 증가하고, 5 이상의 값을 갖게 되면, 90%이상으로 증가함을 알 수 있다.

표 1. 기존 광 공간 스위치 구조별 특징

	신호대 누화비(SXR)[dB]	사용 소자의 수	전력 손실( $L_T$ ) [dB]
Crossbar	$-X_C - 10\log\left[\frac{1-10^{(1-N)L_C/10}}{10^{L_C/10}-1}\right]$	$N^2$	$2L_F + (2N-1)L_C$
Double Crossbar	$-2X_C - 10\log\left[\frac{1-10^{(1-N)L_C/10}}{10^{L_C/10}-1}\right]$	$2N^2$	$2L_F + 2NL_C$
3-Clos	$-X_C - 10\log[4\sqrt{N}-4]$	$6N(\sqrt{N})-3N$	$2L_F + (8\sqrt{N}-5)L_C$
Benes	$-X_C - 10\log(2\log_2 N - 1)$	$N\log_2 N - N + 1$	$2L_F + (2\log_2 N - 1)L_C$
Dilated benes	$-2X_C - 10\log[(2\log_2 N - 1) \cdot \log_2 N]$	$2N\log_2 N - \frac{N}{2}$	$2L_F + (2\log_2 N)L_C$
Router/selector	$-2X_C - 10\log(\log_2 N)$	$2N(N-1)$	$4L_F + (2\log_2 N)L_C$
Splitter/combiner	$-C_g - 10\log(N-1)$	$N^2$	$2L_F + 20\log N$

$N$  : The number of input/output port,  $L_T$  : Total loss[dB],  $L_F$  : Loss at the fiber-waveguide interface,  $C_g$  : Contrast ratio,  $X_C$  : Crosstalk per coupler[dB],  $L_C$  : Loss suffered traversing a directional coupler and its connecting waveguides

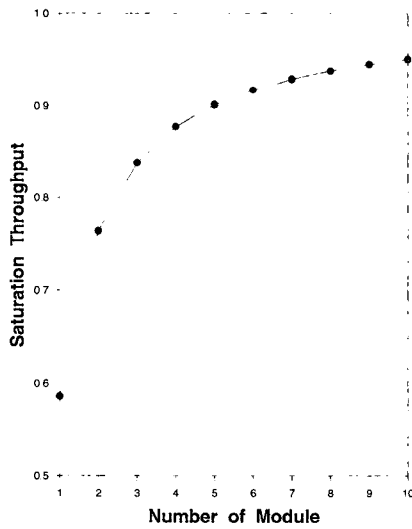


그림 5. 모듈 수에 따른 포화 처리율의 변화

### III. 시뮬레이션을 통한 멀티 홉 광 공간 스위치의 성능 분석

#### 1. 멀티 홉 광 공간 스위치와 기존의 광 공간 스위치의 성능 비교 분석

일반적으로 광 공간 스위치는 그 구조에 따라 여러 종류로 나뉜다<sup>[14-16]</sup>. 각 구조는 수동 소자인 방향성 결합기와 능동 소자인 반도체 증폭기(SOA)로 구성되어질 수 있다. 이 장에서는 멀티 홉 광 공간 스위치와 기존의 광 공간 스위치의 성능을 수치해

석을 통해 신호대 누화비, 사용 소자의 수, 전력 손실 측면에서 비교 분석하였다. 표 1은 기존 광 공간 스위치들에서의 신호대 누화비, 사용 소자의 수, 전력 손실에 대한 수식을 정리해 놓은 것이다<sup>[17]</sup>. 뒤에 보일 수치해석을 위해 기존의 광 공간 스위치는 Ti:LiNbO3를 모재(substrate)로 하는 광 도파로를 이용한 2×2 방향성 결합기로 구성되었다고 가정하였으며, 그 스위치에서의 손실 인자 즉, 신호 셀이 방향성 결합기와 그들 사이의 연결된 도파로들에서 겪게되는 전력 손실(LC)은 -0.5dB, 광 섬유와 도파로의 경계면에서 신호 셀이 겪는 전력 손실(LF)은 -1dB로 가정 하였으며(LF는 광 섬유 도파로와의 인터페이스 손실이므로 주로 pigtail이 되는 입력과 출력단의 두 부분에서 고려된다), 기존의 광 공간 스위치를 구성하는 한 개의 방향성 결합기에서 발생하는 누화(XC)는 -30dB로 가정하였다<sup>[17]</sup>. 그리고 제안한 멀티 홉 광 공간 스위치는 4개의 모듈로 구성되었다고 가정하였다.

그림 6은 기존의 다양한 종류의 광 공간 스위치 구조와 그 구조들을 우리가 제안한 멀티 홉 광 공간 스위치의 공간 스위치부에 적용시켰을 때의 SXR을 수치해석을 통해 비교해 본 결과이다. 실선(—)은 기존의 광 공간 스위치에 대한 SXR이며, 점선(---)은 멀티 홉 광 공간 스위치의 공간 스위치부에 기존의 광 공간 스위치를 각각 적용시켰을 경우 SXR에 대한 수치해석 결과이다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 멀티 홉 광 공간 스위치의 공간 스위치부에 Crossbar 구조를 적용시켰을 경우 SXR에 있어서

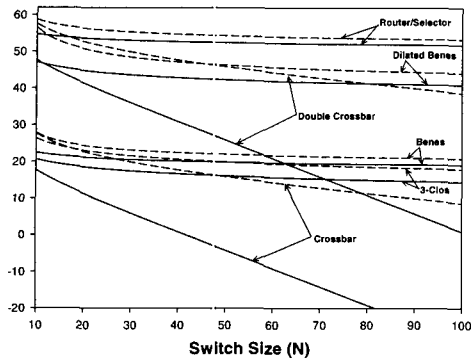


그림 6. 멀티 홉 광 공간 스위치와 기존의 구조의 SXR 비교 ( $M=4$ ,  $L_c=-0.5dB$ ,  $X_c=-30dB$  가정)

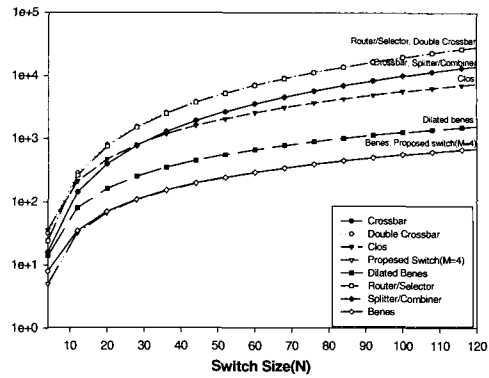


그림 7. 사용 소자( $2 \times 2$  방향성 결합기+SOA)수의 비교 (공간 스위치부에는 Benes 적용,  $M=4$  가정)

Crossbar 스위치 구조보다 최소 10dB 이상의 누화가 감소되었다. 멀티 홉 광 공간 스위치는 모듈화를 통해 누화를 감소시킬 수 있었고, 능동 소자인 SOA를 순환 게이트와 출력 게이트로 사용함으로써 방향성 결합기에서 겪게되는 손실을 보상에 주었기 때문에 전력 손실도 상당히 개선시킬 수 있었다. 그리고 표 1에서 볼 수 있듯이 Benes 구조는 다른 구조들에 비해 사용 소자의 수, 전력 손실에 있어서 대체로 우수한 구조이다<sup>[17]</sup>. 따라서 본 논문의 멀티 홉 광 공간 스위치의 모듈 내 공간 스위치부에 Benes 구조를 적용시킨 후 수치해석을 통해 기존의 구조들과 성능을 비교 분석하였다.

그림 7은 공간 스위치부에 Benes 구조를 적용시킨 후 수치해석을 통해 기존의 광 공간 스위치와 사용 소자의 수를 비교해 본 결과이다. 본 논문에서 제안한 멀티 홉 광 공간 스위치는  $N \log_2(M/N) - N + M$  개의  $2 \times 2$  방향성 결합기와  $2MN$ 개의 SOA 게이트가 사용된다. 이는 소자의 수가 적게 사용되는 Benes 스위치 구조보다  $N \log_2 M - M + 1$  만큼 방향성 결합기의 사용이 절약된 것이다.

그림 8은 공간 스위치부에 Benes 구조를 적용시킨 후 수치해석을 통해 기존의 광 공간 스위치와 전력 손실을 비교해 본 결과이다. 이때 SOA gain=12dB로 가정 하였다<sup>[18,19]</sup>. 멀티 홉 광 공간 스위치는 수동 소자를 사용한 기존의 다른 광 공간 스위치 구조들에 비해 전력 손실에 있어서 월등히 개선되었으며, 모든 구성 소자를 능동 소자인 SOA만을 사용하는 Splitter/combiner 구조와 거의 비슷한 손실 폭선을 보인다. 이는 수동 소자를 사용함으로써 발생되어지는 전력 손실을 능동 소자인 SOA의 이득을 이용해 보상에 주었기 때문이다.

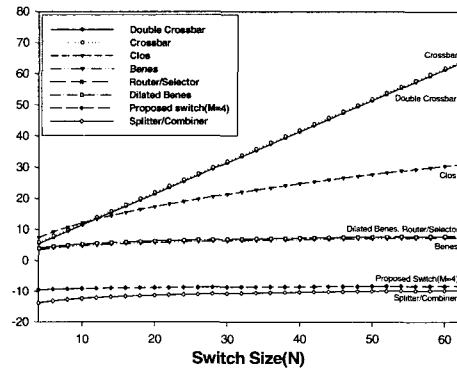


그림 8. 멀티 홉 광 공간 스위치와 기존 구조의 전력 손실 비교 (공간 스위치부에 Benes 적용,  $M=4$ ,  $L_c=-1dB$ ,  $L_c=-0.5dB$ , SOA gain=12dB 가정)

## 2. 모듈 수 및 입력 부하에 따른 출력 포트의 활용율과 셀 손실을 변화

먼저 시뮬레이션을 통해 입력 부하( $\rho$ , 신호가 입력 포트에 전송되어 들어올 확률)와 출력 포트 활용율 사이의 관계를 알아보았다. 수행된 시뮬레이션에는 2장에서 이미 언급된 바 있는 가정들과 시스템의 동작 원리가 활용되었다. 즉,  $MN \times MN$  시스템에서 매 타임 슬롯, 각 입력 포트에  $\rho$ 의 확률로 전송되어 들어오는 각각의 신호들의 전송 목적지를  $MN$ 개 중 하나의 출력 포트에 랜덤하게 배정시킨 후, 2장에서 설명한 광 입/출력 버퍼와 전체 시스템의 동작 원리에 따라 신호들을 저장 및 전송시키는 과정을 반복 수행하였다. 이와 같은 일련의 시뮬레이션 과정을 충분히 반복 수행한 후, 일정 타임 슬롯 동안 출력 포트에 전송될 수 있는 신호의 최대 개수와 시뮬레이션을 통해 실제로 전송된 신호의 총 개수를 비교하여 출력 포트 활용율을 구하였다.



한편, 시스템에서 신호 전송 중 발생하는 신호 손실이 출력 포트 활용율에 미치는 영향을 최소화하기 위해 광 입/출력 버퍼의 저장 유닛의 수는 충분히 큰 값을 선택하여야 한다.

그림 9는 다양한 모듈 수(M=1, 2, 4, 8)를 갖는 256×256 시스템에 대해 앞에서 설명한 방식의 시뮬레이션을 통해  $\rho$ 를 변화시켜 가면서 출력 포트의 활용율을 구한 결과이다. 이를 통해  $\rho$ 가 그림 5와 (14)식에서 알아본 모듈 수에 따른 포화 처리율보다 작은 경우, 출력 포트의 활용율이  $\rho$ 와 거의 동일한 값을 갖게 되고, 반면에,  $\rho$ 가 포화 처리율보다 커지면, 출력 포트에서의 활용율이 더 이상 증가하지 못하고, 포화 처리율과 거의 같은 값을 유지하게 됨을 알 수 있었다. 이는  $\rho$ 가 포화 처리율보다 큰 경우, 포화 처리율만큼의 신호만 출력 포트에 전송되고, 그 이상의 입력 신호는 출력되지 못하여 시스템 내의 광 입/출력 버퍼에 저장되어야 함을 뜻하는 것으로, 시간이 지남에 따라 저장되어야 하는 신호의 양은 계속 증가하여 마침내는 시스템 내의 광 입/출력 버퍼들이 포화되게 될 것이며, 결국에는 신호의 손실이 발생하게 됨을 보이고 있다. 따라서 고정된  $\rho$ 에 대해 어떤 기준치 이하의 CLR을 보장 받을 수 있게 하기 위해서는 모듈 수에 따른 포화 처리율이  $\rho$ 보다 커지도록 모듈 수를 결정해야 함을 알 수 있다.

이제 어떤 기준치 이하의 CLR을 보장 받을 수 있도록 모듈 수와 광 입/출력 버퍼의 저장 유닛의 수를 결정하는 방법에 대해 알아보도록 하자. 먼저

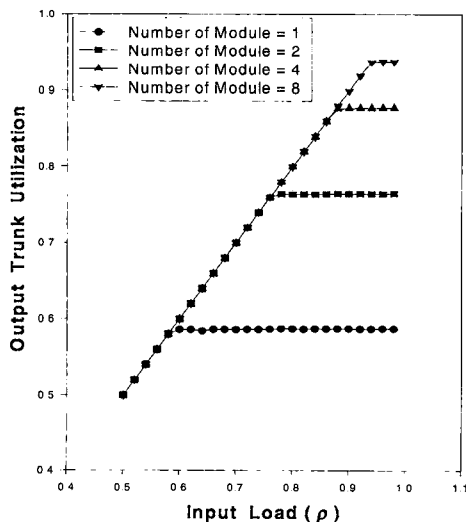


그림 9. 모듈 수에 따른 출력 포트 활용율의 변화

앞에서도 설명했듯이 모듈 수에 따른 포화 처리율이  $\rho$ 보다 커야 한다는 조건에 따라 (14)식을 통해 모듈 수를 결정할 수 있다. 모듈 수가 결정되면 광 입/출력 버퍼의 저장 유닛의 수는 시뮬레이션의 반복 수행을 통해 결정한다. 먼저 광 출력 버퍼의 영향을 최소화하기 위해 광 출력 버퍼의 저장 유닛의 수를 매우 크게 선택한 후, 광 입력 버퍼의 저장 유닛의 수를 변화시켜 가면서 CLR을 구한다. 이때 광 입력 버퍼의 저장 유닛의 수는 구한 CLR 값이 기준치보다 작아질 때의 값으로 선택한다. 다음으로는 광 입력 버퍼의 저장 유닛의 수를 앞에서 구한 값으로 고정시킨 후, 광 출력 버퍼의 저장 유닛의 수를 변화시켜 가면서 CLR을 구하고, 이 값이 기준치보다 작아질 때의 광 출력 버퍼의 저장 유닛의 값을 선택함으로써 모든 과정을 마치게 된다.

앞에서 설명한 과정에 따라  $\rho$ 가 0.7인 128×128 시스템에서 10-6이하의 CLR을 보장 받기 위해 필요한 모듈 수와 광 입/출력 버퍼의 저장 유닛의 수를 결정해 보도록 하자. 모듈 수에 따른 포화 처리율이 ( $\rho=0.7$ )보다 커야 함으로 (14)식에 의해 모듈 수는 2 이상이어야 한다. 한편, 모듈 수는 한 타임 슬롯 동안 하나의 출력 버퍼로 집중되어 전송되어 들어오는 신호 개수의 최대값과 동일하다. 따라서 모듈 수가 증가할수록 광 출력 버퍼가 포화될 가능성 또한 증가하게 될 것이며, 그에 따라 광 출력 버퍼에서의 신호 손실 역시 증가하게 될 것이다. 반면에 모듈 수가 감소하면 각 모듈 당 입력 포트의 수는 늘어나게 되고, 그만큼 신호간에 블로킹 현상이 발생할 확률 및 광 입력 버퍼에 신호가 저장되고 포화될 확률 또한 증가하게 될 것이며, 그에 따라 광 입력 버퍼에서의 신호 손실 역시 증가하게 될 것이다. 이러한 현상은 그림 10의 결과와도 일치한다. 그림 10은 시뮬레이션을 통해 모듈 수가 각각 2와 4인 경우에 대해 광 입/출력 버퍼의 저장 유닛의 수에 따른 CLR의 변화를 알아본 것이다. 이를 통해 주어진 조건을 만족시키기 위해 필요한 광 입/출력 버퍼의 저장 유닛의 수는, 모듈 수가 2인 경우 각각 6과 14 이상이어야 하고, 모듈 수가 4인 경우 각각 4와 16 이상이어야 함을 알 수 있다.

### 3. 멀티 홉 광 공간 스위치와 WDM 다단 스위치에서의 CLR 특성 비교 분석

그림 11은 시스템의 초고속/대용량화를 실현하기 위해 NTT에서 제안한 WDM 다단 구조인 MN×MN FRONTIERNET 스위치 구조이다<sup>[5]</sup>.

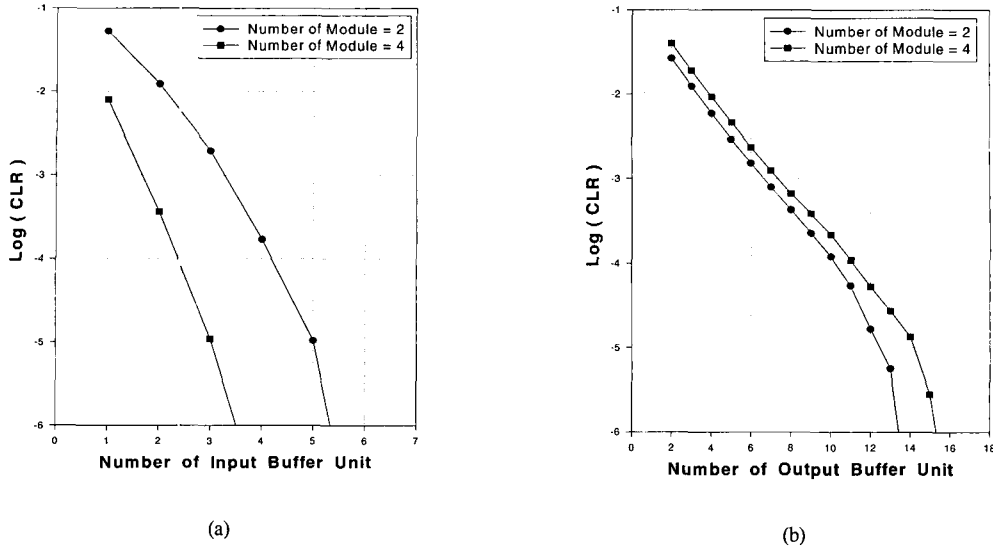


그림 10. 모듈 수와 광 입/출력 버퍼의 저장 유닛의 수에 따른 CLR의 변화(128×128스위칭 시스템, ρ=0.7). (a) 출력 버퍼의 저장 유닛의 수가 매우 클 때, 입력 버퍼의 저장 유닛 수에 따른 CLR 변화. (b) 입력 버퍼의 저장 유닛의 수가 고정되었을 때, 출력 버퍼의 저장 유닛 수에 따른 CLR 변화

FRONTIERNET 스위치의 경우 주파수 스위치와 FDM 출력 버퍼에서 셀 손실이 발생한다. 주파수 스위치에서 발생하는 셀 손실 특성은 아웃 스위치<sup>[20]</sup>에서 발생하는 셀 손실 특성과 동일하다.

그림 12는 M=16, N=16인 그림 11의 구조에 대해, 입력 부하 ρ(=0.9)와 주파수 스위치의 수 k(=2, 4, 6, 8)를 고정시키고, WDM 출력 셀 버퍼의 루프 유닛의 수를 증가 시키면서 CLR의 변화를 시뮬레이션 한 결과이다. 시뮬레이션 결과를 보면, WDM 출력 셀 버퍼의 루프 유닛의 수를 증가시킴에 따라 CLR이 감소하다가 어느 특정한 값 이상이 되면 거의 일정한 값을 보이는 경향이 있다. 이는 그 특정한 값을 전후하여 셀 손실의 주 요인이 변화함을

말해주는 것이다. 즉, 그 특정한 값이 나타나기 전까지는 WDM 출력 셀 버퍼에서의 셀 손실이 주 원인이었다가, 일정한 값으로 고정된 후에는 주파수 스위치에서의 셀 손실이 주 원인이 됨을 말해주는 것이다<sup>[5,21]</sup>.

이제 그림 1의 대용량 멀티 홉 광 공간 스위치 구조에서의 CLR 특성을 알아보자. 그림 12의 결과와 비교하기 위해 시뮬레이션 조건을 FRONTIERNET의 조건과 거의 유사하게 하였다. 먼저 입력 부하, ρ(=0.9)를 동일하게 하였으며, 전체 입/출력 포트 수(256)도 동일하게 하였다. 입력 부하 값이 0.9일 때, 그림 5에 의해 모듈 수(M)는 5 이상이어야 하는데, 모듈 수가 전체 입/출력 포트 수의 약수가 되어야 시뮬레이션이 용이하므로, 모듈 수를 8로 정하였다. 따라서 각 모듈의 입/출력 포트의 수(N)는 32이다. 그림 13은 이러한 조건 하에서 입력 광 버퍼의 저장 유닛의 수를 FRONTIERNET의 주파수 스위치의 수처럼 고정(k=2, 4, 6)시킨 후 출력 광 버퍼의 저장 유닛의 수에 따른 CLR의 변화를 알아본 것이다.

시뮬레이션 결과, 대용량 멀티 홉 광 공간 스위치도 FRONTIERNET과 마찬가지로 광 출력 버퍼의 저장 유닛의 수가 증가함에 따라 CLR이 감소하다가 어느 특정한 값 이상이 되면 거의 일정한 값을 갖는 경향을 보여주고 있다. 이는 특정한 값을 전후하여 셀 손실의 주 요인이 변화함을 말해주는 것

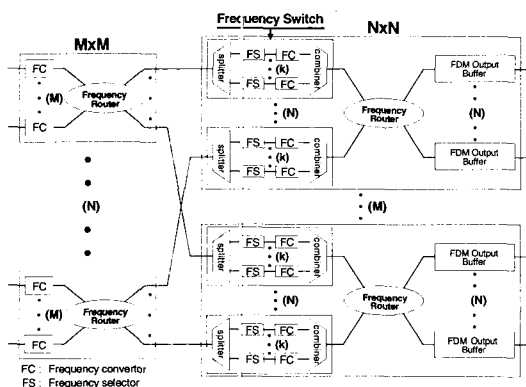


그림 11. MN×MN FRONTIERNET 스위치 구조

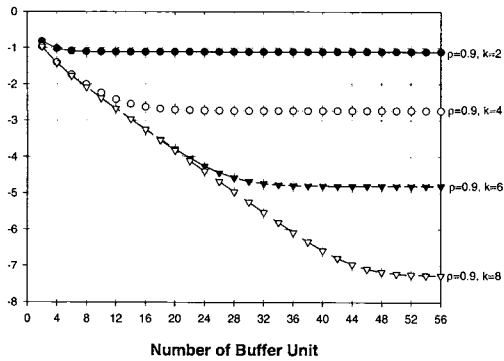


그림 12. FRONTIERNET 스위치의 WDM 출력 셀 버퍼와 주파수 스위치 용량에 따른 CLR 변화

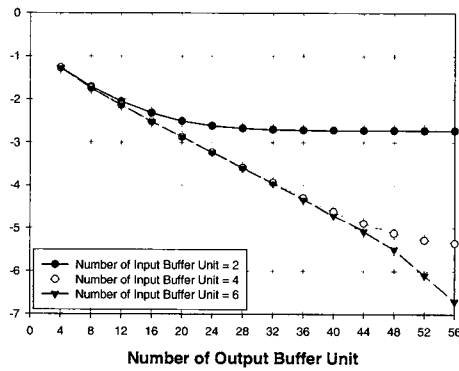


그림 13. 멀티 홉 광 공간 스위치의 입/출력 버퍼 용량에 따른 CLR의 변화

로 그 특정한 값이 나타나기 전까지는 광 출력 버퍼에서의 셀 손실이 주 원인이었다가, 일정한 값으로 고정된 후에는 광 입력 버퍼에서의 셀 손실이 주가 됨을 말해주는 것이다.

한편, 그림 12와 그림 13의 결과를 비교해 보면, 버퍼 유닛의 증가에 따른 셀 손실의 감소 비율이 FRONTIERNET의 경우가 훨씬 가파른 변화를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 멀티 홉 광 공간 스위치에 사용된 광 입/출력 버퍼의 활용 파장이 하나로 고정되어 있어서 WDM 출력 셀 버퍼와는 달리 저장 버퍼 유닛에 단 하나의 신호만을 저장시킬 수 있고, 이로 인해 버퍼 유닛의 활용율이 WDM 출력 셀 버퍼에 비해 상대적으로 낮기 때문일 것이다. 따라서 대용량 멀티 홉 광 공간 스위치 구조의 경우 같은 조건 하에서 FRONTIERNET과 동일한 CLR 특성을 얻기 위해서는 더 많은 버퍼 유닛이 필요할 것이다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 스위칭 시스템의 대용량화를 위해 TDM 방식과 멀티 홉 구조를 적용시킨 새로운 형태의 모듈화된 광 공간 스위치 구조를 제안하고, 기존의 광 공간 스위치와 전력 손실, 신호대 누화비, 사용 소자의 수 등을 비교해 보았으며, 모듈 수에 따른 포화 처리율을 해석하고, 시뮬레이션을 통해 셀 손실율을 분석하였다. 먼저 멀티 홉 광 공간 스위치와 기존의 구조들을 비교한 결과, 멀티 홉 광 공간 스위치의 공간 스위치부에 Crossbar 구조를 적용시켰을 경우 SXR에 있어서 Crossbar 스위치 구조보다 최소 10dB 이상의 누화가 감소되었다. 멀티 홉 광 공간 스위치는 모듈화를 통해 누화를 감소시킬 수 있었고, 능동 소자인 SOA를 순환 게이트와 출력 게이트로 사용함으로써 방향성 결합기에서 겪게되는 손실을 보상해 주었기 때문에 전력 손실도 상당히 개선되어, 모든 구성 소자를 능동 소자인 SOA만을 사용하는 Splitter/combiner 구조와 거의 비슷한 손실 곡선을 보였다. 또한 멀티 홉 광 공간 스위치는 서로 다른 모듈에 입력된 신호들이 동일한 출력 포트에 전송되어질 경우 멀티 홉 과정으로 인해 블로킹이 발생하지 않는 장점이 있으며 이로 인해 필요한 입력 버퍼의 용량이 감소되었고, 따라서 HOL의 문제를 개선시킬 수 있었다.

대용량 스위칭 시스템의 모듈 수에 따른 포화 처리율을 해석한 결과, 모듈 구조를 사용하지 않는 경우(M=1), 58.5%에 불과하던 처리율이 M이 2만 되어도 76.4%로 증가하고, 5이상으로 증가하면, 90% 이상의 값을 얻을 수 있게 됨을 알 수 있다.

멀티 홉 광 공간 스위치의 CLR 특성을 시뮬레이션해 보았다. 셀 손실율은 광 출력 버퍼의 저장 유닛의 수가 증가함에 따라 CLR이 감소하다가 어느 특정한 값 이상이 되면 거의 일정한 값을 갖는 경향을 보여준다. 이는 그 특정한 값을 전후하여 셀 손실의 주 요인이 변화함을 말해주는 것으로 그 특정한 값 이전까지는 광 출력 버퍼에서의 셀 손실이 주 원인이었다가, 특정한 값 이후에서는 광 입력 버퍼에서의 셀 손실이 주 원인이 됨을 말해주는 것이다.

WDM 다단 구조인 FRONTIERNET과 CLR 특성을 비교해 본 결과, 입력 부하 값,  $\rho$ 가 0.9이고, 10-6이하의 CLR을 얻고자할 때, FRONTIERNET의 경우 주파수 스위치 k=8, WDM 출력 버퍼 유

넷의 수는 36개 이상이어야 하지만, 제한한 멀티 홉 광 공간 스위치에서는 입력 버퍼 유닛의 수는 6개, 출력 버퍼 유닛의 수는 52개 이상이어야 함을 알 수 있었다. 여기서 멀티 홉 광 공간스위치의 경우 사용된 광 입/출력 버퍼의 활용 파장이 하나로 고정되어 있어서 WDM 출력 셀 버퍼와는 달리 저장 버퍼 유닛에 단 하나의 신호만을 저장 시킬 수 있고, 이로 인해 버퍼 유닛의 활용율이 WDM 출력 셀 버퍼에 비해 상대적으로 낮기 때문에 더 많은 버퍼 유닛이 필요함을 알 수 있다. 따라서, 본 구조를 WDM 방식과 하이브리드하게 연결하여 사용하고, 광 출력 버퍼로서 WDM 출력 셀 버퍼를 활용한다면 보다 대용량의 효율적인 스위칭 시스템을 구현할 수 있을 것이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] L. Thylen, G. Karlsson, and O. Nilsson, "Switching Technologies for Future Guided Wave Optical Networks: Potentials and Limitations of Photonics and Electronics," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 34, no. 2, pp. 106-113, Feb. 1996.
- [2] S. C. Chan, L. Minghua, S. S. Udpa, L. Udpa and D. W. Jacobsen, "All-optical dense WDM wide-area communication networks," *IEEE 39th Midwest symposium.*, vol. 3, pp. 1157-1160, 1996.
- [3] C. A. Brackett, A. S. Acampora, J. Sweitzer, G. Tangonan, M. T. Smith, W. Lennon, K. C. Wang, and R. H. Hobbs, "A Scalable Multiwavelength Multihop Optical Network: A Proposal for Research on All-Optical Networks," *IEEE J. Light. Tech.*, vol. 11, no. 5/6, pp. 736-753, May/June 1993.
- [4] S. J. B. Yoo, "Wavelength Conversion Technologies for WDM Network Applications," *IEEE J. Light. Tech.*, vol. 14, no. 6, pp. 955-966, June 1996.
- [5] K. Sasayama, Y. Yamada, K. Habara, and K. Yukimatsu, "FRONTIERNET: Frequency-Routing-Type Time-Division Interconnection Network," *IEEE J. Light. Tech.*, vol. 15, no. 3, pp. 417-429, March 1997.
- [6] W. D. Zhong and R. S. Tucker, "Wavelength-Routing Based Photonic Packet Buffers and Their Applications in Photonic Packet Switching," *IEEE J. Light. Tech.*, vol. 10, pp. 1737-1745, Oct. 1998.
- [7] M. Tsukada and H. Nakano, "Ultrafast Photonic ATM (ULPHA) Switch and a Video Distribution Experiment," *IEEE J. Light. Tech.*, vol. 14, no. 10, pp. 2154-2161, Oct. 1996.
- [8] A. Jajszczyk and H. T. Mouftah, "Tree-Type Photonic Switching Networks," *IEEE Network*, vol. 9, no. 1, pp. 10-16, Jan./Feb. 1995.
- [9] 김세환, 전인중, 정제명, 송용훈, 신서용, "다중합 개념을 적용한 새로운 광 공간 스위치의 제안과 성능분석," *제 8회 광전자 및 광통신 학술회의 논문집*, pp. 91-92, May. 2001.
- [10] W. D. Zhong, M. Tsukada, K. Yukimatsu, and Y. Shimazu, "Terahipas: A Modular and Expandable Terabit/second Hierarchically Multiplexing Photonic ATM Switch Architecture," *IEEE J. Light. Tech.*, vol. 12, no. 7, pp. 1307-1315, July 1992.
- [11] 광용석, 송용훈, 전창훈, 정제명, 신서용, "새로운 구조의 전광학적 WDM 출력 버퍼," *한국통신학회논문지*, vol. 25, no. 6A, pp. 862-869, June. 2000.
- [12] Kicheol Lee, Sungchul Lee, and Jinwoo Park, "A New Architecture of Optical Cell Compressor and Expander for WDM/TDM Switching Systems," *IEEE, CLEO99*, FE3, 1999.
- [13] M. J. Karol, et al, "Input Versus Output Queueing on a Space-Division Packet Switch," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-35, no. 12, pp. 1347-1356, Dec. 1987.
- [14] Max Ming-Kang Liu, "Principles and Applications of Optical Communications," Richard D. Irwin, Inc., 1996.
- [15] A. Ehrhardt, M. Eiselt, G. Grobkopf, R. Ludwig, R. Schnabel, and H. G. Weber, "Semiconductor Laser Amplifier as Optical Switching Gate," *IEEE J. Light. Tech.*, vol. 11, no. 8, pp. 1287-1295, 1993.
- [16] Yang dong Jin and M. Kavehrad, "An Optical Cross-Connect System as a High-Speed Switching Core and Its Performance Analysis," *IEEE J. Light. Tech.*, vol. 14, no. 6, pp.

- 1183-1197, 1996.
- [17] H. Scott Hinton, "An Introduction to Photonic Switching Fabrics," Plenum Press, pp. 83-113, 1993
- [18] Mehdi Asghari, Ian H. White, and Richard V. Penty, "Wavelength Conversion Using Semiconductor Optical Amplifiers," *IEEE J. Light. Tech.*, vol. 15, no. 7, pp. 1181-1190, July. 1997.
- [19] K. Obermann, S. Kindt, D. Breuer, and K. Petermann, "Performance Analysis of Wavelength Converters Based on Cross-Gain Modulation in Semiconductor-Optical Amplifiers," *IEEE J. Light. Tech.*, vol. 16, no. 1, pp. 78-85, Jan. 1998.
- [20] Y. S. Yeh, M. G. Hluchyj, and A. S. Acampora, "The Knockout Switch: a simple, modular architecture for high-performance packet switching," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. SAC-5, pp. 1274-1283, Oct. 1987.
- [21] 김 호, 전창훈, 김성순, 정준영, 정제명, "다단 광 스위치의 셀 손실 확률," 제16회 광학 및 양자전자 학술발표회, 한국광학회, 부산, 1999, p 100.

전 인 중(In-jung Jeon) 준회원



2001년 2월 : 호남대학교  
전기공학과 졸업  
2001년 3월~현재 : 한양대학교  
전자공학과 석사과정  
<주관심 분야> 광 네트워크,  
WDM네트워크

정 준 영(Jun-young Jeong) 준회원



1997년 2월 : 한양대학교  
전파공학과 졸업  
1999년 8월 : 한양대학교  
전자통신전파공학과  
석사졸업  
2000년 3월~현재 : 한양대학교  
전자통신전파공학과  
박사과정

<주관심 분야> 광 버퍼, 광 스위칭 시스템, 광 네트워크

정 제 명(Je-myung Jeong) 정회원



1978년 2월 : 서울대학교  
전기공학과 (학사)  
1980년 6월 : KAIST 전기 및  
전자공학과 (석사)  
1980년~1992년 : 한국전자통신  
연구원 선임연구원

1992년 2월 : Northwestern Univ. 전기공학과 (박사)  
1994년~현재 : 한양대학교 전자전기공학부 부교수  
<주관심 분야> 광통신 시스템, 광 다중접속 네트워크, 광 신호처리

김 세 환(Se-hwan Kim) 준회원



1998년 2월 : 충북대학교  
정보통신공학과 졸업  
2001년 8월 : 한양대학교  
전자통신전파공학과  
석사졸업  
2001년 8월~현재 : (주) 아이텍  
테크놀러지

<주관심 분야> 광통신 시스템, 광 스위칭 시스템

신 서 응(Seo-yong Shin) 정회원



1987년 2월 : 서울대학교 제어  
계측공학과 (학사)  
1989년 8월 : Florida 공과대학교  
(석사)  
1992년 12월 : Texas A&M Univ.  
(공학박사)

1994년 : 한국전자통신연구원 선임연구원  
1994년 9월~현재 : 명지대학교 전자정보통신공학부  
부교수  
<주관심 분야> 광스위칭 시스템 구조 및 구현 기술,  
자동 편광제어 시스템, 편광모드분산 보상