

# WDM 광 버퍼 기술

## WDM Optical Buffer Technologies

신 서 용

명지대학교 전자정보통신공학부

sshin@wh.myongji.ac.kr

### 요약

오늘날 광전송 시스템 및 광 네트워크는 WDM을 기반으로 형성되어 가고 있으며 따라서 광 스위칭 역시 WDM 기술에 기반을 둘 것이고 광 스위칭을 위해 필수적인 광 버퍼도 WDM 신호를 처리할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 현재까지 발표된 주요 WDM 광 버퍼를 기능과 구조에 따라 분류하고 각 버퍼의 특징과 장단점을 분석하며 이를 바탕으로 새롭게 제안한 전광학적 WDM 출력버퍼 및 WDM 다채널 동시처리 광 버퍼에 대해 소개하고자 한다.

### I. 소개

광대역 정보통신 서비스의 확충으로 통신용량은 하루가 다르게 증가하고 있으며 이에 따른 교환기의 용량도 증가하고 있다. 가까운 장래에 교환 처리해 주어야 할 용량은 기존의 전자식 교환 방식에 의한 최대 용량을 초과할 것이고 이에 대한 대책으로 광 스위칭 기술의 등장이 불가피할 것으로 예상된다. 광 스위치의 장점을 십분 발휘하기 위해서는 스위칭 과정에 필수적으로 수반되는 버퍼링 역시 광적으로 이루어질 필요가 있다. 이러한 취지 하에 지금까지 다수의 전광학적 광 버퍼가 발표되어 왔다<sup>[1] [6]</sup>. 본 논문에서는 지금까지 발표된 대표적인 버퍼들의 동작원리에 대한 소개 및 비교를 하며 각 버퍼의 기본적인 한계점과 구현시의 문제점, 그리고 성능 및 장점에 대해 논하고자 한다. 그리고 이러한 분석을 바탕으로 새롭게 제안한 전광학적 WDM 출력버퍼 및 WDM 다채널 동시처리 광 버퍼에 대해 소개를 하며 또한 특정 시스템에 적합한 버퍼를 디자인하기 위해 필요한 버퍼 분석방법에 대해 소개하고자 한다.

### II. 광 버퍼의 분류

광 버퍼는 버퍼가 사용되는 위치, 기능, 목적, 단위 버퍼(unit buffer)의 구조에 따라 분류되며 또한 단위 버퍼의 조합으로 전체 버퍼가 구성될 때, 전체 버퍼를 구성하는 단위 버퍼의 배열 방식에 따라 각각 다르게 분류된다. 먼저 사용되는 위치에 따라 입력버퍼, 출력버퍼, 및 입출력 버퍼로 구별된다. 입력버퍼는 공간 스위치의 출력단에서 신호간 충돌이 발생하지 않도록 스위치로 입력되는 신호를 임시 저장한 후 적절한 스케줄링 알고리즘에 따라 순차적으로 전송하는 역할을 하며 출력버퍼는 공간 스위치를 통해 전송되어온 다중 신호가 한 타임 슬롯에 하나씩만 전송되도록 신호를 임시 저장하는 역할을 한다. 버퍼의 기능에 따라서는 전용 버퍼(dedicated buffer)와 공유 버퍼(shared buffer)로 구별되며 목적에 따라 TDM 버퍼와 WDM 버퍼로 구별된다. 단위버퍼의 구조에 따라서는 회전형 버퍼(circulating buffer), 진행파형 버퍼(traveling buffer), 및 적체형 버퍼(staggering buffer)로 구분된다. 적체형 버퍼는 넓은 의미에서 진행파형 버퍼에 포함되어 구별되기도 한다. 회전형 버퍼의 경우, 루프 내에 광증폭기를 필요로 하기 때문에 버퍼 저장 시간에 따라 증폭기에서의 ASE로 인해 신호의 SNR 특성이 나빠지는 단점이 있으나, 버퍼 구현에 요구되는 하드웨어가 저장용량에 무관하게 일정하다는 장점이 있다. 진행형 버퍼

는 단위 버퍼 내에 증폭기를 필요로 하지는 않지만 저장 시간이 길어짐에 따라 하드웨어의 양이 증가하는 단점이 있으며 현대 광통신에서 요구하는 WDM 형태로 확장하는데 어려움이 있다. 광 버퍼는 또한 전체 버퍼를 구성하는 단위버퍼의 배열에 따라 직렬형 버퍼(serial-type buffer)와 병렬형 버퍼(parallel-type buffer)로 구분된다. 직렬형 버퍼의 경우, 모든 단위 버퍼를 동기를 맞추어 동시에 제어해야 하므로 구현에 많은 어려움이 따르며 전체 버퍼의 용량 증대를 위해 단위 버퍼의 단수를 증가시키면 손실과 잡음이 증가하여 신호의 SNR 특성이 악화되는 단점이 있다. 반면에, 병렬형 버퍼의 경우, 입력측과 출력측을 각각 한 번씩만 제어하므로 제어가 비교적 간단하며 버퍼의 용량은 병렬로 배열된 단위 버퍼의 단수에 의해 결정되고 병렬 형태로의 단수 증가는 신호의 SNR에 영향을 미치지 않는 장점이 있다. 이상과 같이 광 버퍼를 분류하는 것은 버퍼에 대한 이해 및 분석을 체계적으로 수행하기 위해 분류한 것으로 버퍼가 사용되는 시스템의 목적에 따라 다양하게 적용될 수 있다. 예를 들어, WDM 스위칭 시스템의 출력단에 적용되는 광 버퍼의 경우, 위치에 따라 출력버퍼에 해당되며, 각 채널당 하나씩의 버퍼가 할당된다면 기능에 따라 전용버퍼이며(단, 여러 채널을 동시에 버퍼링해 줄 수 있는 기능이 있다면 공유버퍼), 목적에 따른 구분으로 WDM 버퍼로 분류될 수 있다. 또한 WDM 신호에 대한 효과적인 버퍼링을 위해 단위버퍼를 회전형으로 구분한 경우, 회전형 버퍼에 해당되며, 전체 버퍼의 구성이 다수의 단위버퍼로 구성될 때, 효과적인 누화성분 제어를 위해 단위버퍼를 병렬형으로 구성한 경우, 병렬형 버퍼에 해당된다.

### III. 대표적인 광 버퍼

지금까지 발표된 대표적인 WDM용 광 버퍼의 종류 및 특성에 대해 표 1에 종합적으로 정리해 놓았다<sup>[1][6]</sup>. 본 논문에서는 이 가운데 WDM 신호처리에 가장 적합하면서 대용량의 저장능력을 갖고 있는 세 가지의 대표적인 버퍼의 동작원리 및 특성에 대해 자세히 논하고자 한다.

#### A. WDM 입력버퍼

그림 1은 1998년에 발표된 것으로 도파로열 격자(AWG)를 이용하여 WDM 버퍼를 구성한 예이다<sup>[5]</sup>. 이 구조는 전체적으로 병렬형태를 취하고 있으며, 단위 버퍼는 진행파형 버퍼로 AWGM 쌍으로 구성되어 있고 M개의 광 파이버 지연선이 연결되어 있다. 이 구조는 N개의 입력포트와 N개의 출력포트 그리고 N개의 패킷 열을 동시에 버퍼에 접속할 수 있다. 여기서 사용된  $K \times K$  AWGM은 K개의 입력과 K개의 출력을 갖고 있으며 K는  $K = \max(N, M)$ 이다. 버퍼의 동작원리를 보면 먼저 입력포트로 들어온 파장들은 가고자 하는 파장으로 변환된 후 AWGM으로 들어간다. 입력된 파장은  $K \times K$  AWGM의 Frequency Spectral Range(FSR) 파장이  $\lambda_0 \sim \lambda_{K-1}$ 일 때 i번째 입력이 j번째 출력으로 연결된다. 이때의 파장은  $\lambda(i, j) = \lambda_q$ 로 표현할 수 있으며 q는 " $q = (i+j) \text{ modulo } K$ "로 정의된다. 이러한 파장들은 AWGM에 의해 자동적으로 출력포트가 할당된다. 포트에 따라 서로 다른 지연선을 또는 같은 지연선을 겪고 난 후의 파장들은 AWGM에 의해서 다시 결합 또는 분리된 후 스위칭 단의 가변파장변환기(TWC)에 의해 파장이 변환된 후 최종적으로 가고자 하는 출력포트로 출력된다. 또한 그림 1의 구조에서 스위칭 단에 가변파장변환기를 사용함으로써 하나의 도파로열 격자로 스위칭 단을 대체할 수 있으므로 이로 인하여 스위칭 단의 복잡성을 현격히 줄일 수 있다.

#### E. 대용량 WDM 출력버퍼

그림 2는 파장다중 광 출력 버퍼로서 병렬형태를 취하면서 단위 버퍼는 루프형 버퍼 형태이고, 기존의 광 버퍼에 비해 실현성이 높은 대용량 광 버퍼이다<sup>[4]</sup>. 버퍼의 대략적인 동작과정을 설명하면 다음과 같다. 처음 1

$\times M$  스타커플러(STAR1)를 통과한 후 광신호는  $M$ 개로 분리되어  $M$ 개의 입력 게이트(GF1,GF2,...GFM)로 들어가는 데 이중 첫 번째 입력 게이트(GF1)를 ON시켜 광신호를 통과시킨 후  $2 \times 2$  커플러(CP1)를 거쳐 2개의 광신호로 분리된다. 그중 한 광신호는 지연선을 거쳐 저장되고 다른 한 광신호는 출력 게이트(GB1)를 통해 출력된다. 여기서 지연선 내에 있는 광 증폭게이트(SOA1)의 역할은 광신호가  $2 \times 2$  커플러(CP1)와 광 지연선을 거치면서 감쇠하므로 이를 증폭시키는 역할을 하며 파장다중화된 광신호가 모두 출력되어 새로 광신호를 받아들여야 할 경우에는 OFF로 되어 지연선에 남아있던 이전의 광신호를 제거하는 역할을 수행한다. 광 출력게이트(GB1)를 통과한 파장 다중화된 광신호는  $1 \times L$ 스위치를 통해 해당되는 파장 라우팅 부의 입력포트에 입력된 후 파장 라우팅 된 후 출력된다. 파장 라우팅 부에서는 특정 입력포트에 입력되는 특정 파장에 따라 출력되는 파장이 결정된다.

### C. 다채널 동시처리 WDM 광 버퍼

그림 3은 다수의 WDM 채널을 하나의 버퍼로 동시에 버퍼링할 수 있는 다채널 동시처리 광 버퍼이다<sup>[6]</sup>. 버퍼의 구조를 보면  $N$ 개의  $1 \times L$  역다중화기(Demux),  $N$ 개의  $L \times 1$  다중화기(Mux), 1개의  $P \times P$  광도파로 열 격자(AWG),  $M=(L-1)$ 개의 Delay Line으로 구성 되어있으며 동작원리는 다음과 같다. 입력포트  $N$ 개로부터 각각  $L$  개의 다중화된 셀들이 들어오고 Demux에 입력되어 신호가 분리된 후 가변 파장변환기(TWC)에 의해 가고자 하는 파장으로 변환된다. 그 후 셀들은 Mux에 의해 다시 다중화되어 AWGM에 입력된다. AWGM에 입력된 셀들은 해당 라우팅 테이블에 의해 가고자 하는 출력포트로 라우팅 되고, 지연선을 거쳐 입력포트로 케환(feedback)되어 최종적으로 가고자 하는 출력포트로 순차적으로 출력된다. 또한 다른 입력포트에서 입력된 셀들도 라우팅 테이블에 의해 해당 출력포트로 라우팅 되는데 이때 동일 지연선을 통과하는 셀들은 서로 다른 파장을 갖고 있어 셀들 간의 충돌이 발생하지 않는다. 그림 3과 같은 구조는 그림 1에 비해 하나의 AWGM을 통해 여러 채널을 동시에 처리해준다는 장점을 갖는다. 즉, 적은 하드웨어로 버퍼를 구성할 수 있게 된다. 버퍼부 다음으로 스위칭 단을 그림 1과 같이 가변파장 변환기와 AWGM을 사용하여 구성함으로써 스위칭의 복잡성 또한 해결 할 수 있다.

## IV. 버퍼의 성능분석 및 디자인 방법

광 버퍼의 주요 사용 분야는 광 스위칭 시스템이 될 것이며 광 셀 스위칭(혹은 패킷 스위칭) 시스템의 성능은 시스템의 셀 손실률(Cell Loss Ratio : CLR)로 결정된다. 이러한 CLR은 시스템에 사용되는 버퍼의 저장 용량에 의해 결정된다. 역으로 말해, 시스템에서 요구하는 특정의 CLR을 만족시키기 위해서는 일정 수준 이상의 저장 능력이 있는 버퍼가 반드시 요구된다. 예를 들어, CLR  $10^{10}$ 을 만족시키기 위해서는 100셀 이상의 데이터를 저장할 수 있는 버퍼가 사용되어야만 한다고 가정할 수 있다. 여기까지는 광 스위칭 시스템 차원에서의 요구사항이고, 문제는 사용되는 버퍼가 과연 일정 수준 이상의 데이터를 저장할 수 있는가 하는 점이다. 이러한 버퍼의 물리적인 능력 한계 여부는 버퍼의 신호대 잡음비(SNR) 분석을 통해 가능할 수 있다. 즉, 시스템에서 요구하는 버퍼의 저장 용량은 시스템의 CLR에 의해 결정되며, 결정된 버퍼 용량을 시스템에 사용되는 버퍼가 만족하는지의 여부는 버퍼의 SNR 분석을 통해 알 수 있게 된다. 다시 말해, 버퍼를 디자인할 때에는 시스템에서 요구하는 CLR을 만족시킬 수 있는 저장능력을 갖게끔 버퍼의 SNR을 고려하면서 최적의 구조를 도출해야 한다는 것이다. 광 스위칭 시스템의 CLR을 분석하는 방법은 참고문헌 [7]을 참고할 수 있으며 참고문헌 [4]와 같은 광 버퍼의 경우, SNR 분석 방법은 다음과 같다.

먼저 누화 잡음 성분이 발생하는 기본적인 이유를 보면 이는 반도체 광 증폭기(게이트, 스위치 등)를 완전히

OFF시킨 경우라도 입력 파워가 완전히 차단되지 않음으로 생기는 잡음이다. 이러한 누화 잡음 성분은 크게 IC (incoherent crosstalk), BNC (beat-noise crosstalk = homowavelength (homodyne) crosstalk)로 구분할 수 있다. 먼저 IC를 보면 이는 서로 다른 포트로부터 서로 다른 파장 성분들이 흘러 나와 하나의 출력포트에 자신의 본 신호와 각각 다른 파장의 누화 성분이 존재하는 경우의 잡음이다. 다음으로 BNC는 버퍼내의 모든 입력들이 모두 같은 파장일 경우 원래 신호와 같은 파장을 갖는 누화 성분들이 재차 누화 성분으로 나타나 bandpass 필터로도 제거할 수 없는 잡음들이다. 이러한 BNC는 잡음의 편광이 본 신호의 편광과 orthogonal하면 서로 간의 beating이 존재하지 않게 된다. 하지만 누화성분들이 본 신호와 같이 랜덤한 편광일 경우는 누화 성분과 본 신호간의 beating이 발생된다. 즉, 일반적으로 optical carrier 들의 위상은 불규칙적이므로 이런 beating 성분은 carrier phase noise를 일으키게 되는데 이것을 signal-crosstalk beat noise라 한다. 이러한 누화 성분을 분석하기 위하여 우리는 그림 2에서 신호가 터퍼를 빠져나가는 경우 중 최악의 경우를 가정하였고 이 때의 출력되는 신호의 전계  $E_s$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>[8],[9]</sup>.

$$E_s = d\sqrt{2P_{in}} \exp(i\omega_s t + i\phi_s) \sum_{n=0}^{MN-1} \sqrt{G_n}$$

여기서  $d$ 는 버퍼 입력 신호이고 0과 1이 동일하게 발생하며,  $\omega_s$ 는 신호의 파장,  $\phi_s$ 는 신호의 위상으로 0과  $2\pi$  사이에서 균일하게 발생한다.  $G_n$ 은  $n$ 번째 회전의 SOA 이득이다. 여기서 우리는 루프 이득  $G_n$ 을 다음과 같이 가정하였다. 루프 이득  $G_n$ 은  $n = 2, \dots, N$ 에 대하여  $G_n = 1(0dB)$ 의 값을 갖는다. 이는 첫 번째 회전에서  $G_n$  값이 포화됨을 나타내고,  $G_1$ 의 값은 15.85(12dB)이다<sup>[8]</sup>. 그리고 신호가 버퍼 유닛을 회전하는 동안에 광 입력 게이트 GF가 OFF 상태임에도 불구하고 감쇄 잡음 값이 루프 속으로 들어오게 되면서 누화 전계는 두 가지 성분으로 발생되는데 다음과 같다.

$$E_{CT,1} = \sqrt{2P_{in}G_o/R_c} \sum_{k=2}^{MN-1} d_k \cdot \exp(i\omega_s t + i\phi_k) \prod_{n=k}^{MN-1} \sqrt{G_n} + d_{MN} \sqrt{2P_{in}G_o/R_c} \exp(i\omega_s t + i\phi_{MN})$$

$$E_{CT,2} = \sqrt{2P_{in}G_o/R_c} \sum_{m=1}^{M-1} d_m \cdot \exp(i\omega_s t + i\phi_m) \prod_{j=1}^{MN-1-mN} \sqrt{G_j}$$

여기서 신호는 반도체 광 증폭기의 ON, OFF에 따라서 fiber-to-fiber 이득  $G_{on}$  또는  $G_{off}$ 를 갖게 되고, 이득 ON-OFF 비율  $R_c$ (contrast ratio) =  $\frac{G_{on}}{G_{off}}$  만큼의 감쇄 잡음이 생긴다.  $E_{CT,1}$ 은 신호를 저장하고 있는 버퍼 유닛이 광 입력 게이트 GF를 OFF 시켰음에도 불구하고 계속해서 들어오는 다른 신호로부터 생기는 누화 전계가 증첩되는 것을 표현하고 있고,  $E_{CT,2}$ 는 광 출력 게이트 GB를 OFF 시켰음에도 자신을 제외한  $M-1$ 개의 다른 버퍼 유닛을 통하여  $N$ 번씩의 회전 차이가 나는 누화 전계가 겹쳐 들어오는 것을 표현한다. 버퍼 출력 단에서의 광 전계  $E_{out}$ 은 신호와 누화 전계 1,2로 구성되고 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>[9]</sup>.

$$E_{out} = E_s + E_{CT1} + E_{CT2}$$

그리고 반응도  $R_e$ 를 갖는 PD(photo diode)와 정합 여파기를 통과한 출력 전류  $i_{out}$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$i_{out}(t) = \frac{1}{2} R_e \frac{1}{T} \int_{t-T}^t (E_s + E_{CT1} + E_{CT2})^2 dt'$$

여기서 누화 광 전류  $i_{CT}$ 는 위의 식에서 신호 성분을 제외시킨 나머지고 다음과 같다.

$$i_{CT} = \frac{1}{2} R_e \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \{E_{CT1} E_{CT1}^* + E_{CT2} E_{CT2}^* + 2E_s E^* E_{CT1} + 2E_s E^* E_{CT2} + 2E_{CT1} E_{CT2}^*\} dt'$$

여기서  $T$ 는 비트의 길이(duration)이다. 위의 누화 광 전류를 이용하여 누화 분산 값을 계산 할 수 있고 이러한

누화 값을 이용하여 가우스 근사법에 적용하여 SNR(signal to ratio)을 구할 수 있고, SNR을 이용하여 BER을  $\text{erfc}(\text{error function})$ 에 적용하여 구할 수 있다.

$$SNR = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad BER = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{SNR}{\sqrt{2}}\right)$$

그림 4는 버퍼의 저장 용량 즉, 버퍼 내 셀의 회전수와 시스템의 신호대 잡음비(SNR) 간의 관계를 SOA 광 게이트의 서로 다른 Contrast Ratio에 대해 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 BER  $10^{-9}$  (이는 SNR 7.75dB에 해당)을 기준으로 SOA 광 게이트의 Contrast Ratio가 약간만 개선되더라도 버퍼의 저장 용량이 매우 크게 증가하는 것을 알 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 일반적으로 광 버퍼를 분류하는 방법에 대해 논하였으며 이 분류 기준에 따라 지금까지 발표된 대표적인 WDM 광 버퍼들을 종합적으로 비교, 분석하였으며 이 가운데 대용량 WDM 시스템에 적합한 광 버퍼에 대해 소개하였다. 특히, 새롭게 제안한 전광학적 구조의 WDM 출력버퍼는 기존의 유사한 출력버퍼에 비해 구조적인 측면에서 파장 선택부를 공유함으로써 하드웨어의 양이 현저히 감소됨을 보였다. 또한 SNR 성능분석을 통해 255개의 WDM 셀을 저장할 수 있는 능력이 있음을 입증함으로써 제안한 광 버퍼가 대용량 WDM 시스템에 매우 적합함을 보였다. 본 논문에서는 또한 시스템에서 요구하는 버퍼를 디자인하기 위해 필요한 스위칭 시스템의 CLR 분석 방법 및 버퍼의 물리적인 특성을 밝혀주는 SNR 분석 방법에 대해 논하였다.

## 참고문헌

- [1] K.Sasayama, et al., "Frequency-Routing-Type Time-Division Interconnection Network," *J. of Lightwave Technol.*, vol.15, no.3, 417-429, 1997
- [2] A. Misawa, et al., "Broadcast-and-Select Photonic ATM Switch with Frequency Division Multiplexed Output Buffers," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 10, pp. 1769-1777, 1997.
- [3] F. Masetti, et al., "High Speed, High Capacity ATM Optical Switches for Future Telecommunication Transport Networks," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 14, no. 5, pp. 979-998, June. 1996.
- [4] 광용석, 송용훈, 정창훈, 정제명, 신서용, "새로운 구조의 전광학적 WDM 출력버퍼," 한국통신학회 논문지, 제 25 권, 제 6 호, 2000년 6월.
- [5] Wen De Zhong et al., "Wavelength Routing-Based Photonic packet Buffers and Their Applications in Photonic Packet Switching System," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 16, no. 10, pp. 1737-1745, Oct. 1997.
- [6] 광용석, 송용훈, 이혁재, 신서용, "파장분할 다중 방식의 다 채널 동시 처리 광 버퍼," COOC '99, pp. 221-222, 1999년 5월 13일.
- [7] Soeren Lykke Danielsen, et al., "WDM Packet Switch Architectures and Analysis of the Influence of Tuneable Wavelength Converters on the Performance," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 2, pp. 219-227, Feb. 1997.
- [8] R. Langenhorst, et al., "Fiber Loop Optical Buffer," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 3, pp. 324-335. 1996.
- [9] 정창훈, 정준영, 정제명, 신서용, "병렬 광섬유 루프 버퍼에서의 누화 영향," 16회 광학 및 양전전자 학술발표회, 1999년 7월 8일.

표 1. 대표적인 WDM 광 버퍼 특성 비교

| 구분                   | Fujitsu 's 1996                     | ATMOS I 1996<br>(fiber delay line)        | ATMOS II 1996<br>(fiber loop)                                | FRONTIERNET<br>(NTT) 1997           | NTT's (A.<br>Misawa) 1997           | ARC's 1998                                 | Myongji Univ.'s<br>2000            |
|----------------------|-------------------------------------|---|--|-------------------------------------|-------------------------------------|--|------------------------------------|
| 종류                   | WDM                                 | WDM                                       | WDM  | WDM                                 | WDM                                 | WDM  | WDM                                |
| 저장방식                 | Output                              | Output                                    | Output   | Output                              | Output                              | Input                                      | Output                             |
| 공유유무<br>(입출력 노드수 기준) | Dedicated<br>/shared (1 x 1)        | shared (N x N)                            | Completely<br>shared (N x N)                                 | Dedicated<br>(1 x 1)                | Dedicated (1<br>x 1)                | Dedicated<br>/shared (N x N)               | Dedicated<br>(N x N)               |
| 배열 방식                | serial                              | Parallel                                  | Single loop  | serial                              | Parallel                            | Parallel                                   | Parallel                           |
| 저장 방식                | Travelling                          | Staggering                                | Circulating  | Circulating                         | Staggering                          | Staggering                                 | Circulating                        |
| 사용 파장수               | Single $\lambda$                    | Multi $\lambda$                           | Multi $\lambda$  | Single $\lambda$                    | Single $\lambda$                    | Multi $\lambda$                            | Single $\lambda$                   |
| 제어 방식 / 복잡성          | Electrical(cent-<br>ralized) / high | Electrical(cent-<br>ralized) / high       | Electrical(cent-<br>ralized) / high                          | Electrical(cent-<br>ralized) / high | Electrical(cent-<br>ralized) / high | Electrical(cent-<br>ralized) / low         | Electrical(cent-<br>ralized) / low |
| 하드웨어 복잡성             | High                                | Medium                                    | High   | High                                | High                                | Medium                                     | Medium                             |
| 핵심 구성 소자             | Coupler, Filter                     | Optical gate,<br>Coupler,<br>Fixed filter | Optical gate,<br>Coupler,<br>Fixed filter,<br>Tunable filter | Optical gate,<br>WDM DEMUX          | Optical gate,<br>WDM DEMUX          | Tunable<br>Wavelength<br>Converter,<br>AWG | Optical gate,<br>Switch,<br>AWG    |
| 지연선 길이               | (M-1)T                              | {M(M-1)/2}T                               | T  | MT                                  | {M(M-1)/2}T                         | (M-1)T                                     | MT                                 |

T : unit delay length  
L : number of wavelengths  
M : buffer capacity  
n : number of channels  
N : time compression factor

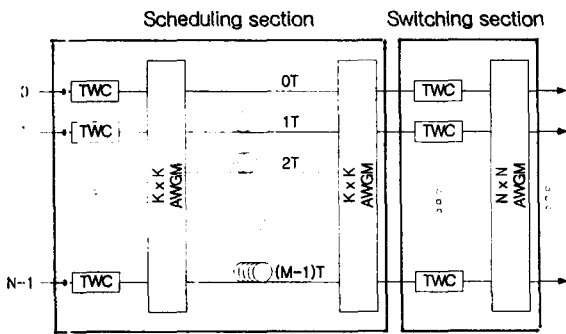


그림 1. WDM 입력버퍼

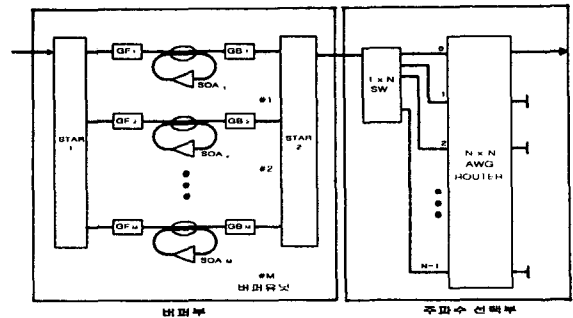


그림 2. 대용량 WDM 출력버퍼

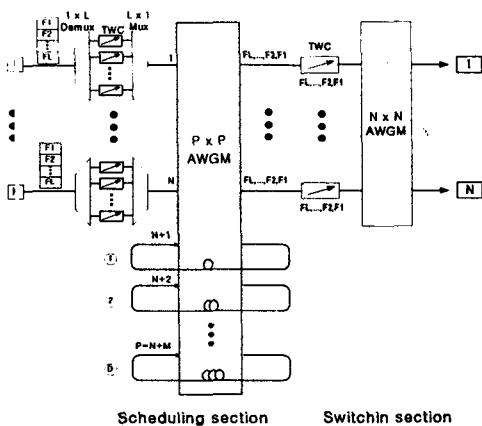


그림 3. 다채널 동시처리 WDM 광 버퍼

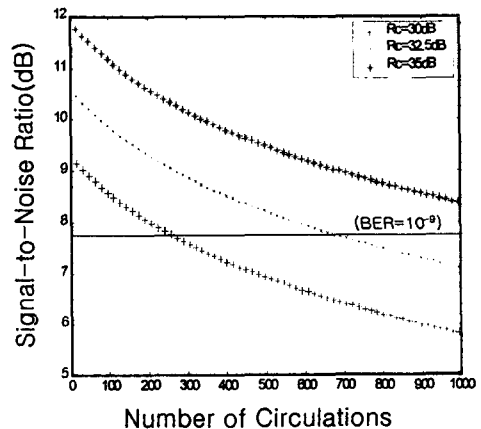


그림 4. 서로 다른 Rc 값에 따른 버퍼 내 셀의 회전수 대 SNR 간의 관계