

논문 2006-43TC-1-14

대역 액세스 망을 연결하는 파장 공유 노드 기반 WDM 메트로 링의 MAC 프로토콜 성능 평가

(Performance Evaluation of the MAC Protocols for WDM Metro Ring
with Wavelength-Sharing Nodes Connecting Broadband Access
Networks)

소 원호*

(Won-Ho So)

요약

본 논문에서는 유무선 통합을 위한 광대역 액세스 망의 연결을 지원하는 파장 분할 다중화 (Wavelength Division Multiplexing; WDM) 메트로(metro) 망을 위한 노드 구조를 제안한다. 또한 노드 구조의 기능과 망 요구 사항을 고려한 매체 접근 제어 (Medium Access Control: MAC) 프로토콜을 제안하고 성능을 비교·평가한다. 광통신 백본 망과 액세스 망 사이의 병목현상을 해결하기 위하여 WDM, 서브 캐리어 다중화 기술, 광소자 기술 등을 살펴보고 고비용 자원에 해당하는 파장 채널의 공유를 위한 액세스 노드 구조를 제안한다. 또한 제안된 기능 모델을 이용하여 기존 SS (Source-Stripping) MAC 프로토콜을 분석하고 슬롯 재사용성을 높이기 위한 DS+SS (Destination-Stripping and Source-Stripping)와 DS+IS (Destination-Stripping and Intermediate-Stripping) MAC 프로토콜을 제시한다. 제안된 프로토콜은 다른 파장 그룹의 목적지 노드로 슬롯이 전송되는 경우에 목적지에 따라서 슬롯의 제거를 중간 액세스 노드나 근원지 노드에서 수행한다. 따라서 전송된 슬롯의 불필요한 망 순환을 줄임으로써 슬롯 재사용성이 증가한다. 슬롯 재사용성에 의한 대역 효율성과 노드의 최대 처리율을 예측하기 위하여 수치적 분석을 수행하며 네트워크 시뮬레이션을 통하여 처리율 검증과 전송 지연, 전송 공정성 등의 다양한 성능 파라미터를 기준 프로토콜과 비교 평가한다.

Abstract

In this paper, a node architecture of WDM metro network for connecting broadband access networks to converge wire/wireless networks. In consideration of the proposed node architecture and network requirements we proposed and evaluated medium access control protocols. We review WDM related technologies of sub-carrier multiplexing and optical components in order to resolve the bottleneck between optical backbone networks and access networks, and a access node architecture sharing common wavelength is introduced. Source-stripping (SS) MAC protocol is evaluated under the proposed functional node architecture. DS+IS (Destination-Stripping and Source-Stripping) and DS+IS (Destination-Stripping and Intermediate-Stripping) MAC protocols are described to increase the slot-reuse factor which is low on SS MAC protocol. The key function of new MAC protocols regards the optical switch module of proposed node architecture and helps intermediate or source access nodes for dropping slots to destinations of different wavelength group. Thus, slot-reuse factor increases as the MAC protocols reduce the unnecessary ring-rotation of transferred slots. We use a numerical analysis to expect bandwidth efficiency and maximum throughput by slot-reuse factor. Throughput network simulation, the verification of throughput, queuing delay, and transmission fairness are compared among MAC protocols.

Keywords : MAC, WDM, Optical Ring, Access Node, Optical Metro Networks

* 정회원, 순천대학교 컴퓨터교육과

(Dept. of Computer Education, Sunchon National University, Korea)

※ 이 논문은 2005년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음 (KRF-2005-003-D00230)

접수일자 : 2005년7월22일 수정완료일 : 2006년1월10일

I. 서 론

인터넷의 급속한 보급과 사용자의 지수적 증가로 인하여 대용량의 IP/WDM (IP over WDM) 기반의 광통신 백본 망과 액세스 망에 대한 통신 시장의 관심과 투자가 집중되고 있다. 광통신 백본망의 경우에는 MEMS (Micro-Electro-Mechanical System)를 이용한 OXC (Optical Cross Connect)와 OADM(Optical Add-Drop Multiplexer)에 의한 교환 시스템을 기반으로 한 광 패킷 또는 광 버스트 교환 (Optical Packet/Burst Switching; OPS/OBS)기술이 활발히 연구되고 있다. 액세스 망의 경우에는 IEEE 802.3ae 10GbE 표준을 포함한 기가 비트 이더넷 (Ethernet)이 적어도 향후 몇 년은 충분한 대역을 제공할 것으로 예측되고 있다. 또한 xDSL(x-Digital Subscriber Line)과 IEEE 802.3ah EFM(Ethernet in the Frist Mile) 표준 등에 의해서 액세스 망의 병목 현상이 다소 해결될 것으로 전망되고 있다^{[1][2]}.

반면에 기존의 SONET/SDH (Synchronous Optical Network/ Synchronous Digital Hierarchy) 기반의 MAN (Metropolitan Area Network)에서는 일반적으로 다음과 같은 문제를 갖고 있다. 첫째, 망에서 회선을 제공받기 위해서는 수 주 이상의 시간이 소요되어 빠른 서비스 제공이 불가능하다. 둘째, IP 트래픽은 일반적으로 버스트한 특징과 비대칭성을 갖기 때문에 음성 서비스를 위한 TDM (Time Division Multiplexing) 방식은 데이터 전송에 효율성을 높일 수 없다. 셋째, 액세스 망의 다양한 서비스를 수용할 수 있는 QoS (Quality of Service) 제공과 관리 기법이 없다. 넷째, ARP (Automatic Protection Switching) 기법에 의한 1+1 장애 보호 기법은 매우 비효율적이다. 이와 같은 문제는 백본망과 액세스망 사이에서 발생되는 병목현상인 metro-gap으로 정의되며 국내외적으로 이를 해결하기 위하여 적합한 메트로 MAN 구조와 프로토콜에 대한 연구가 진행되고 있다. 특히 차세대 통신망으로 연구되고 있는 BcN (Broadband convergence Network)에서 유무선 통합, 방송 통신의 융합은 인터넷을 통하여 사용자 중심의 요구 서비스 품질을 효과적으로 종단간에 제공하는 것을 하나의 목표로 설정하고 있기 때문에 전달 망으로서의 광대역 WDM 메트로 망 구조와 이에 적합한 공정성 보장, QoS 지원 등을 위한 MAC 프로토콜이 연구되고 있다^[3].

국내외적으로 연구되었던 WDM 기반 메트로 망은

방송-선택(broadcast-and-select) 망이 대부분 이였으나 최근에는 라우팅 방식이 단순하고 망 자원의 제어와 관리가 용이하며 기존의 SONET/SDH의 망 토폴로지를 그대로 이용할 수 있는 링 구조에 대한 연구가 활발하다. 특히 MAC 프로토콜에 대한 연구는 링 망을 구성하는 노드 구조에 따라 TT-FR (Tunable Transmitter-Fixed Receiver)과 FT-TR (Fixed Transmitter-Tunable Receiver) 방식으로 분류할 수 있다. TT-FR의 대표적인 방식은 HONET (Hybrid Opto-electronic Ring Network)의 CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)와 MMR (Multi-MetaRing)의 SR3 (Synchronous Round Robin with Reservation)로서 각각 서브 캐리어 다중화 (sub-carrier multiplexing) 기술을 이용하고 노드간의 전송 공정성을 제공하는 특징을 갖는다. FT-TR 방식으로는 FT-FRⁿ (Fixed Transmitter-n Fixed Receivers) 노드 구조를 이용한 CSMA/CA 방식이 제시되었으며 이 방식은 이론적으로 TT-FR 방식과 처리율면에서 동일한 성능을 갖는 것으로 보고되었으며 망의 확장성과 전송·공정성 제공, 수신측 충돌이 없는 특징을 갖는다^{[4][6]}.

따라서 본 논문에서는 광통신 백본 망과 액세스 망 사이의 병목현상을 해결하기 위한 WDM 기반 FT-FRⁿ 노드 구조를 갖는 링 망을 소개한다. 또한 인터넷에 의한 통신망의 급속한 진화와 유무선 통합으로 인한 메트로 망의 광대역화와 멀티캐스팅, 전송 공정성 등을 고려한 MAC 프로토콜을 제안하고 성능을 평가한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 고려한 링 망의 구조와 FT-FRⁿ의 요구 사항을 보이고 노드 구조의 기능 모델 제시를 위한 관련 연구를 소개한다. III장에서는 액세스 노드의 기능 모델을 제시하고 다양한 MAC 프로토콜을 제안한다. 제안된 프로토콜은 수치적 분석과 네트워크 시뮬레이션에 의하여 IV장에서 평가되며 V장에서 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

WDM 기술을 이용한 광대역 MAN으로서 링 네트워크는 크게 TT-FR과 FT-TR 구조로 분류된다. Bononi^[5]에 의해서 제시된 결과에 의하면 이론적으로 TT-FR과 FT-TR의 망 성능은 유사하며 FT-FRⁿ 구조의 노드는 수신측 충돌을 해결한 FT-TR과 같은 구조로 분류된다.

본 논문에서 가정하는 광대역 메트로 망은 그림 1과

같은 WDM 슬롯-링(slotted-ring) 망이다. 링 망은 액세스 노드 (Access Node; AN)와 단방향 WDM 링크로 구성된다. 각 AN은 3개의 포트로 구성되며 그 중 2개의 포트는 단방향 광 링크를 연결하기 위하여 사용되며 나머지 1개는 기가 비트 이더넷 (Gigabit Ethernet; GbE)을 연결하는 링크에 연결된다. GbE에 연결된 액세스 망은 광대역 무선망, 무선 LAN, xDSL, HFC 등이 될 수 있다. 하나의 파장은 여러 개의 AN에 의해서 공유되며 각 AN은 고정 파장으로 슬롯을 전송하고 여러 개의 파장으로 전송된 슬롯을 동시에 수신하는 FT-FRⁿ 구조이다.

그림 2는 WDM 메트로 링 망에 이용될 수 있는 광통신 핵심 기술을 소개한다. TT-FR 방식의 HONET에서 이용하는 서브 캐리어 다중화는 데이터 전송외에 제어 정보를 전송하기 위하여 사용한다^[7]. 예를 들면 수신한 다중화 신호가 그림과 같이 f_1, f_2, \dots, f_n 의 서브 캐리어를 갖는다면 파장 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 으로 데이터가 전송됨을 의미한다 (그림 2(a)). 따라서 서브 캐리어가 감지되지 않는 파장은 데이터 전송에 이용된다. 차세대 전광망 (all-optical network)에서 요구하는 광 교환 소자의 교환 시간은 $1\mu s$ 이하이다^[8]. 또한 멀티캐스팅의 지원과 복구 기능 및 신호의 저손실 등의 요구 사항을 만족해야 한다. 그림 2(b)는 이러한 요구 사항을 만족하고 교환 시간이 $240ns$ 이하이며 확장성을 갖는 2×2 광 스위치로서 액세스 노드에서 슬롯의 전송과 수신 기능에 이용된다. 액세스 노드에서 신호의 다중화와 역다중화는 PSC (Passive Star Coupler)에 비하여 파장 경로 배정 기능, 파장 재사용, 신호 분배 손실 등에서 우수한 AWG (Arrayed-Waveguide Grating)를 이용하여 구성될 수 있다^[9]. 그림 2(c)와 2(d)는 4×4 AWG를 이용한 다중화기와 역다중화기를 나타낸다. 이와 같은 핵심 기술의 기능과 특징을 이용하여 다음 장에서 FT-FRⁿ 기반의 WDM 액세스 노드의 기능 모델을 제시한다.

FT-TR 방식의 FT-FRⁿ은 하나의 파장을 여러 개의 액세스 노드가 공유하기 때문에 적합한 MAC 프로토콜이 요구된다. 기존의 MAC 프로토콜은 전송된 슬롯을 제거하는 방식 즉, 송신자가 전송된 슬롯을 제거하는 source-stripping (SS)방식과 슬롯의 수신자가 제거하는 destination-stripping (DS)방식으로 분류된다. 따라서 각 액세스 노드는 전송할 패킷이 큐에 있고 자신의 파장에 빈 슬롯 (external empty slot; EES)이 감지되면 패킷을 전송할 수 있으며, 또한 SS 또는 DS 방식으로 제거된 빈 슬롯을 이용하여 패킷을 전송할 수 있다. 이때

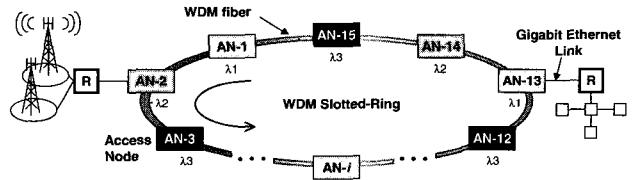
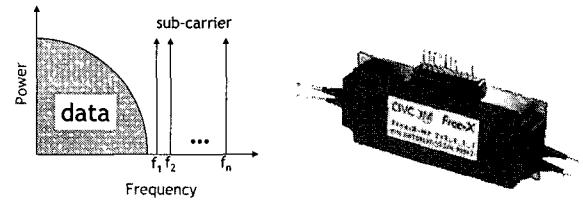


Fig. 1. WDM 메트로 링 망
그림 1. WDM Metro Ring Network.



(a) 서브 캐리어 다중화 (b) 2×2 광 스위치

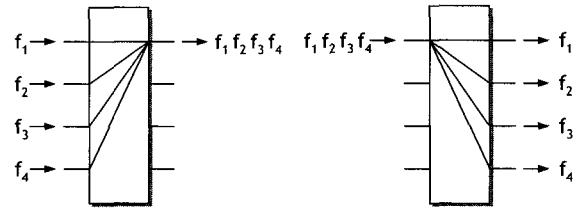


그림 2. 액세스 노드의 요소 기술
Fig. 2. Core technologies of access node

링을 순환하여 전송된 슬롯이 SS 또는 DS 방식으로 빈 슬롯이 되는데 이 슬롯을 내부 빈 슬롯 (internal empty slot; IES)으로 정의한다. 본 논문에서는 유니캐스팅뿐만 아니라 멀티캐스팅이 가능한 WDM 링 망을 고려하기 때문에 DS 방식은 논외로 한다.

다중 수신기를 고려한 기존 MAC 프로토콜은 CSMA/CA방식으로 송·수신 충돌 회피뿐만 아니라 간단한 전송 제한 (transmission restriction) 기법을 이용하여 액세스 노드간의 전송 공정성을 제공한다. 그림 3은 SS방식의 MAC 프로토콜에서 전송 제한 방식과 그렇지 않은 경우를 설명한다. 그림 3(a)는 시간 t 에 액세스 노드 3 (AN-3)에 전송되는 슬롯과 전송 큐에 있는 패킷 정보를 나타낸다. 시간 t 에는 빈 슬롯이 입력되며, 시간 $t+1$ 에는 (3,12) 즉, AN-3에서 전송되고 AN-12가 목적지인 링 순환 슬롯이, 시간 $t+2$ 에는 AN-3에서 전송되고 AN-8이 목적지인 링 순환 슬롯 (3,8)이 도착한다. Non-persistent 방식은 IES를 이용하지 않는 방식으로 AN-3에서 만들어진 IES를 같은 파장을 공유하는 다운스트림 노드에 전달하는 방식이다. 따라서 그림 3(b)와 같이 처음 EES만 전송에 이용하고 나머지 순환된 슬롯 (3,12)와 (3,8)은 SS방식으로 제거하고 빈 슬롯을

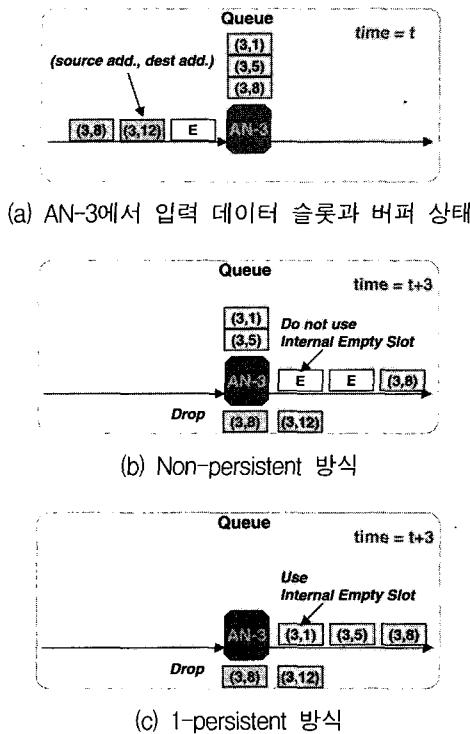


그림 3. CSMA/CA 프로토콜
Fig. 3. CSMA/CA protocols.

만들어 전송에 사용하지 않는다. 반면에 그림 3(c)는 1-persistent 방식으로 순환된 슬롯을 모두 AN-3의 패킷 전송에 사용하고 있다. 따라서 non-persistent 방식은 1-persistent 방식에 비해서 순환된 슬롯의 이용 권한을 분배하는 효과를 갖는다. 반면에 빈 슬롯이 더 발생되어 처리율이 낮은 문제점을 갖는다.

그림 4는 위의 2가지 CSMA/CA 프로토콜에 대한 성능 비교이다. 15개의 AN이 3개의 파장을 공유하며 WDM 슬롯-링을 구성할 때, 균등 분포로 트래픽을 발생하여 시뮬레이션을 수행하였다. 처리율의 경우에는 각 노드의 평균 처리율로서 망에 인가된 부하가 높을 때, 1-persistent ($p=1.0$) 방식은 빈 슬롯을 항상 사용하기 때문에 non-persistent ($p=0$) 방식에 비해 높은 결과를 보인다. 반면에 non-persistent 방식은 그림 4(b)에서 볼 수 있는 것처럼 인가되는 부하에 관계없이 15개의 액세스 노드가 균등하게 처리율을 보이고 있다.

III. 액세스 노드 구조와 MAC 프로토콜

BcN의 유무선 통합, 방송·통신 융합은 다중의 광대역 액세스 망, 즉 GbE, HFC, 광대역 무선 인터넷 등을 효과적으로 연결함으로써 이루어진다. 따라서 본 장에서는 WDM 슬롯-링으로 다중 광대역 액세스 망을 연

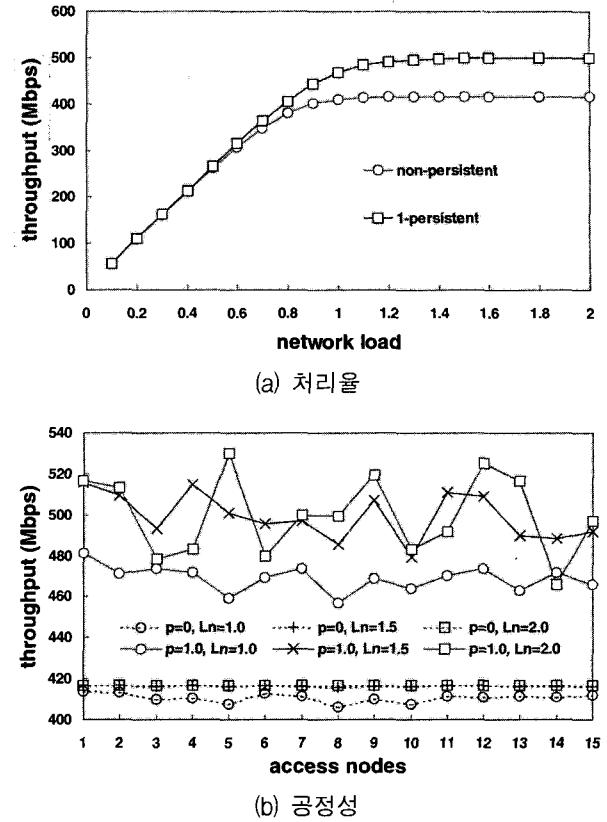


그림 4. SS 기반 MAC 프로토콜의 성능
Fig. 4. Performance of SS based MAC protocol.

결하기 위한 액세스 노드의 기능 모델을 제시한다. 또한 단순 source-stripping으로 지원하던 멀티캐스팅의 성능 향상을 위하여 제안된 노드의 기능 모델을 고려한 다양한 MAC 프로토콜을 제시한다.

1. 파장 공유 노드 구조의 기능 모델

본 논문에서 가정하는 FT-FRⁿ의 기능은 다음과 같은 요구 사항을 만족해야 한다.

- 서브캐리어 다중화를 이용한 제어 정보 송수신
- 고정파장 슬롯 전송과 다중파장 슬롯의 동시 수신
- 슬롯의 제거 및 삽입

첫 번째 요구는 액세스 노드에서 MAC 프로토콜을 수행하기 전에 필요한 제어 정보를 미리 확인하기 위한 팔링크 탭(tap)을 이용함으로써 가능하다. 또한 수신된 제어 정보를 처리하는 시간동안 서브 캐리어와 같이 입력되는 데이터(패킷)정보를 지연하기 위해서는 광 지연 선(fiber loop line)이 액세스 노드 전단에 필요하다. 두 번째 조건을 만족시키기 위해서는 고정 광송신기와 망에서 사용하는 파장의 개수만큼 광수신기가 요구된다^[10]. 또한 액세스 노드마다 공유하는 파장이 서로 다르기 때문에 다중화된 신호가 아닌 단일 파장단위로 노드

에서 취급되어야 한다. 따라서 액세스 노드의 전후단에 광 다중화기와 광 역다중화기 요구되며 다중화기의 경우에는 광 지연선 다음에 구성되어야 한다. 세 번째 조건은 링을 순환한 슬롯의 제거와 제거된 슬롯으로 발생된 빈 슬롯을 효과적으로 이용하기 위한 모듈로서 광 스위치 모듈이 요구된다.

그림 5는 본 논문에서 제시한 FT-FRⁿ 구조의 액세스 노드 기능 모델이다. WDM 슬롯-링에서 전송되는 고정 패킷이 1500바이트이고 광장의 전송율을 2.5Gbps으로 가정하면 패킷 전송시간은 48μs이다. [8]의 2×2 또는 1×2 광 스위치는 최대 240ns의 교환 시간을 요구하기 때문에 슬롯의 크기는 광 스위칭 교환 시간과 패킷 전송시간이 된다. 따라서 하나의 패킷을 전송할 때 요구되는 오버헤드 (교환 시간)를 계산하면 오버헤드는 약 0.5% (=240/(240+48000) × 100)인 적은 값을 갖는다.

2. MAC 프로토콜 설계

앞 절에서 제시된 액세스 노드의 기능 모델을 보면 광 스위치는 액세스 노드에 고정된 광장으로 전송된 슬롯의 삭제와 고정 광장으로 새로운 패킷을 동시에 삽입할 있다. 이것은 제어 정보를 확인함으로써 슬롯이 링 망을 완전히 순화하지 않더라도 목적지, 또는 중간 노드에서 제거되어 빈 슬롯으로 이용될 수 있음을 의미한다. 따라서 본 논문에서는 광 스위치의 기능을 최대로 활용하여 WDM 슬롯-링의 성능을 향상시킬 수 있는 MAC 프로토콜을 제시한다.

표 1은 기존의 MAC 프로토콜과 본 논문에서 제시한 MAC 프로토콜을 비교한다. 먼저 SS, IS (intermediate stripping), DS (destination-stripping)는 링을 순환한 슬롯을 제거하는 방법을 나타낸다. SS의 경우는 슬롯을 사용하여 패킷을 전송한 근원지 액세스 노드, IS는 제어 정보를 확인하여 더 이상 슬롯이 진행될 필요가 없는 경우에 같은 광장을 이용하는 중간 액세스 노드, DS는 목적지 액세스 노드가 슬롯을 제거함을 나타낸다. 본 논문에서는 WDM 슬롯-링 망의 경제성을 고려하여 액세스 노드가 한 개의 광 스위치 모듈을 이용함을 가정한다. 따라서 DS의 의미는 액세스 노드에 할당된 광장으로 전송된 슬롯을 같은 광장을 공유하는 목적지 액세스 노드에서 제거할 수 있음을 의미한다. R(receive), D(drop), 그리고 S(send)는 각 프로토콜이 수행될 때 목적지, 근원지, 그리고 중간 액세스 노드가 해당 슬롯을 이용하는 동작을 의미하는 것으로써 각각 슬롯 수신, 슬롯 제거, 그리고 빈 슬롯을 이용한 패킷 전송을 나타낸다.

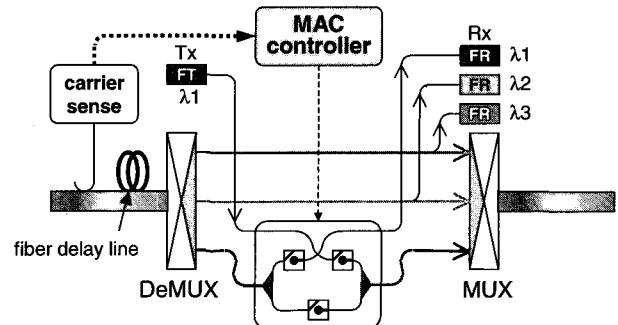


그림 5. FT-FRⁿ기반 액세스 노드의 기능 모델

Fig. 5. Access node functional model based on FT-FRⁿ.

표 1. 광 스위치와 제어 정보를 고려한 다양한 MAC 프로토콜

Table 1. Various MAC protocols considering optical switch and control information.

MAC protocols	destination	source	intermediate
SS(p=0)	R	D	×
SS(p=1)	R	D/S	×
DS+SS(1:0)	R/D/S	D	×
DS+SS(1:1)	R/D/S	D/S	×
DS+IS(1:0)	R/D/S	×	D
DS+IS(1:1)	R/D/S	×	D/S

제안된 프로토콜 DS+SS(1:0)의 경우, 그림 6(a)의 SS 방식과 그림 6(d)의 DS 방식을 혼합한 MAC 프로토콜이다. 그림 6(b)에서 볼 수 있는 것처럼 근원지 s에서 광장 λ_1 을 이용하여 목적지 d_1 으로 전송된 슬롯은 AN-1과 AN-3이 같은 광장을 공유하기 때문에 AN-3에서 수신되면서 광 스위치에서 제거되고 전송할 패킷이 있으면 빈 슬롯을 이용하여 패킷을 전송한다 (R/D/S). 그러나 d_2 로 전송되는 슬롯은 광장 λ_1 이 아니고 λ_2 에 대한 광 스위치를 갖는 액세스 노드의 FT-FRⁿ 구조 때문에 복사된 슬롯만 수신되며 원래 슬롯은 링을 순환하여 AN-1에서 제거된다(D). 즉, DS는 같은 광장 그룹으로 전송되는 슬롯에 적용되며 SS는 다른 그룹 광장을 사용하는 액세스 노드에 전송되는 슬롯에 적용된다. DS+SS (1:0)에서 (1:0)의 의미는 슬롯을 제거하고 난 후에 빈 슬롯을 패킷 전송에 이용하는 확률로서 DS와 SS에 각각 $p=1$ 과 $p=0$ 이 적용됨을 의미한다.

중간 노드를 이용하는 DS+IS(1:0)의 경우, DS+SS(1:0)에서 다른 광장 그룹으로 전송된 슬롯의 불필요한 망 순환을 제한함으로써 망의 성능을 향상시키기 위한 것이다. 그림 6(c)와 같이 s에서 d_1 으로 전송되는 슬롯은 같은 광장을 사용하기 때문에 목적지에서 제거되어 빈 슬롯은 전송에 이용된다 (R/D/S). 또한 d_2 로 전송

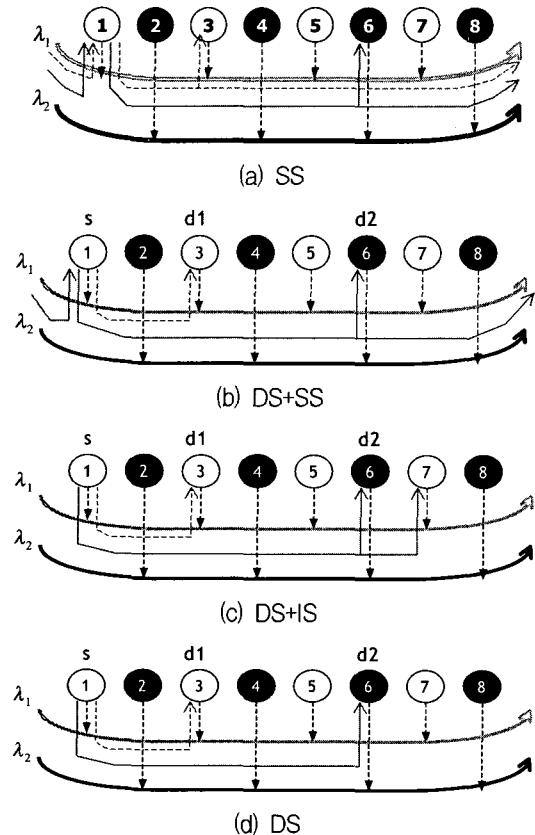


그림 6. MAC 프로토콜에 의한 다양한 슬롯 제거 방법
Fig. 6. Slot dropping of MAC protocols.

되는 슬롯은 AN-6에서는 수신되고 슬롯이 제거되는 곳은 같은 파장을 사용하는 다음 AN-7이다.

망에서 이용되는 슬롯의 이용률을 최대로 하기 위해서는 그림 6(d)와 같이 목적지에서 모든 슬롯을 재거하여 바로 전송에 이용하는 경우이다 ($p=1$). 하지만 망에서 이용하는 파장의 개수만큼 액세스 노드의 광 스위치 모듈이 필요하여 망구성 비용이 증가하는 단점을 갖는다.

3. 프로토콜의 수치적 분석

본 논문에서 고려하는 망이 링 구조를 갖기 때문에 패킷의 전송에 이용되는 슬롯의 재사용성 (slot-reuse factor; SRF)이 망 성능에 크게 영향을 준다. 슬롯의 재사용성은 제안된 FT-FRⁿ 액세스 노드 기능 모델의 대역 효율성 (bandwidth efficiency)을 계산하기 위하여 이용되며 대역 효율성으로 액세스 노드의 최대 처리율도 계산할 수 있다. 수치적 분석에 앞서 본 논문에서 고려하는 WDM 슬롯-링 망에 관련된 파라미터를 살펴본다. 표 2는 분석에 이용될 변수와 4장에서 이용될 네트워크 시뮬레이션의 가정을 포함한다. 추가로 수치적 분석에 이용되는 변수 N 은 전송을 위하여 파장을 공유하는 노드의 개수로서 N_T/N_W 로 결정된다.

표 2. WDM 슬롯-링 망의 파라미터

Table 2. Parameters of WDM slotted-ring networks.

Definition of Symbol	Value
Ring length : LR	144 Km
Light velocity in fiber : V	2×10^5 Km/s
Propagation delay : D=LR / V	720 s
Number of wavelengths per fiber : NW	3
Slot Size : S	12,000 bits
Wavelength rate : RW	2.5 Gb/s
Total network rate : RN=RW×NW	7.5 Gb/s
Number of access nodes : NT	15
Bandwidth-delay product : BDP=RW × D	1,800,000 bits
Slots per wavelength : SW=BDP / S	15

그림 7은 각 MAC 프로토콜에 따른 슬롯의 재사용성 (SRF)를 그림으로 나타낸다. 먼저 슬롯이 링을 완전히 한 바퀴 순환한 거리를 1로 가정하여 이때의 전송 거리를 $d=1$ 로 정의한다. 또한 분석을 단순화하기 위하여 망 망에 인가되는 트래픽이 항상 존재하며 패킷의 목적지는 균등분포(uniform distribution)에 의해서 결정되는 것으로 가정한다. 슬롯 재사용성은 빈 슬롯이 패킷을 포함하고 링에 삽입된 후 망을 순환하여 목적지에 패킷이 전송되고 다시 빈 슬롯으로서 패킷 전송에 이용되기까지 진행한 거리로 정의하며 f_r 로 표기한다. 예를 들면 그림 7(a)의 SS($p=1$)의 경우에 슬롯이 전송에 이용되고 링을 완전히 순환하여 근원지 노드에서 제거된다. 제거된 슬롯은 빈 슬롯이 되며 $p=1$ 이기 때문에 빈 슬롯은 바로 재사용된다. 따라서 이 프로토콜의 경우에는 $f_r=1$ 이 된다.

SS($p=0$)의 경우에는 슬롯을 제거한 후 바로 사용하지 않고 다음 액세스 노드에게 전송의 기회를 준다. 따라서 동일한 파장을 사용하는 액세스 노드가 링 망에서 같은 거리를 두고 연결된 것으로 가정하면 $1/N$ 만큼 지나서 빈 슬롯은 재사용될 수 있으며 이때 이 프로토콜의 재사용성은 $1+1/N$ 이 된다. DS ($p=1$)의 경우에는 목적지에서 슬롯이 제거되고 빈 슬롯이 바로 사용되며 목적지의 결정이 균등 분포를 따르기 때문에 평균적으로 슬롯이 진행하는 거리는 $1/2$ 이다. 따라서 DS($p=1$)에 대한 SRF도 $1/2$ 이 된다.

제안된 MAC 프로토콜인 DS+SS와 DS+IS는 2종류의 트래픽을 고려하여 슬롯을 전송한다. 첫 번째는 같은 파장을 사용하는 액세스 노드로 전송되는 슬롯으로서 목적지 액세스 노드에서 제거되거나 같은 파장을 사용하는 중간 액세스 노드에서 제거되는 트래픽이다. 두 번째는 서로 다른 파장을 사용하는 목적지로 슬롯을 전송

하는 경우로서 근원지 또는 중간 노드에서 제거되는 슬롯이다. 두 가지 경우에 대한 트래픽 비율은 $(N-1)/(N_T-1)$ 과 $1-(N-1)/(N_T-1)$ 이며 슬롯이 진행한 거리를 d_1 과 d_2 라 하면 식(1)과 같이 슬롯 재사용성을 정의할 수 있다.

$$f_r = \left(\frac{N-1}{N_T-1} \right) d_1 + \left(1 - \frac{N-1}{N_T-1} \right) d_2 \quad (1)$$

각 MAC 프로토콜 분석에 기본 가정은 같은 파장 그룹으로 전송되는 슬롯은 $p=1$ 로서 바로 재사용되며 다른 파장 그룹으로 전송되는 슬롯은 $p=0$ 로서 다음 액세스 노드에서 재사용 되는 것으로 가정한다. 먼저 DS+SS(1:0)의 경우에, 그림 7(b)의 첫 번째 그림과 같이 d_1 은 같은 파장을 사용하는 액세스 노드로 전송되는 경우로서 DS($p=1$)과 같고 d_2 는 다른 파장으로 전송되는 경우로 SS($p=0$)과 같다. 따라서 이 프로토콜의 SRF는 $((N-1)/(N_T-1))(1/2) + (1-(N-1)/(N_T-1))(1+1/N)$ 이 된다.

DS+IS(1:0)의 재사용성은 같은 그룹으로 전송되는 $(N-1)/(N_T-1)(1/2)$ 의 d_1 과 다른 파장 그룹으로 전송되는 d_2 에 합으로서 d_2 는 목적지 다음에 있는 같은 파장 그룹의 액세스 노드에 의해서 슬롯이 제거되고 그 다음에 있는 액세스 노드에 의해서 재사용되기 때문에 $(1-(N-1)/(N_T-1))(1/2+1/N)$ 이 된다.

지금까지 결정된 슬롯 재사용성으로 대역 효율성을 계산할 수 있다. 대역 효율성은 링 망을 한 바퀴 순환하는 동안 슬롯이 전달할 수 있는 최대 패킷의 개수를 의

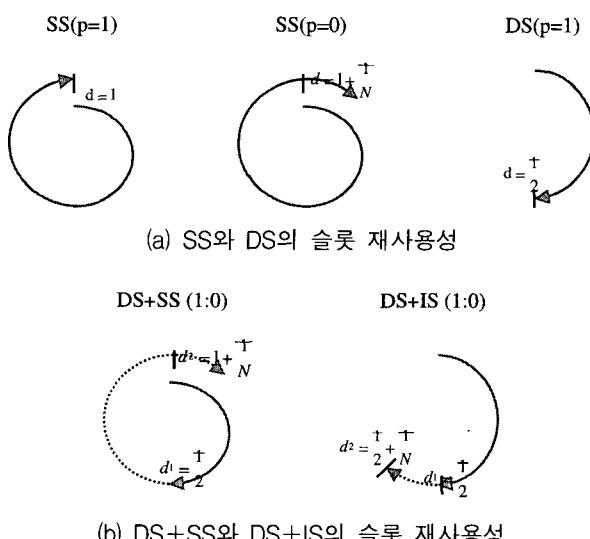


그림 7. 슬롯 재사용성의 계산을 위한 슬롯 재사용성
Fig. 7. Slot normalized distance to compute slot-reuse factor.

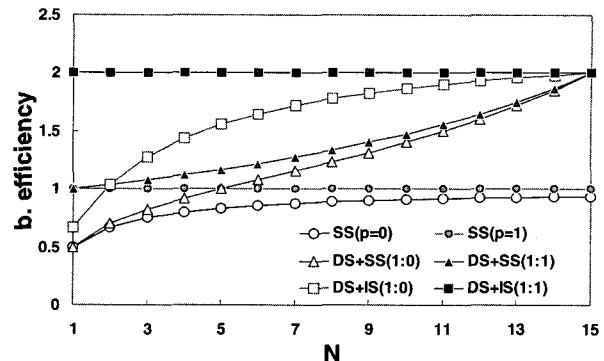


그림 8. MAC 프로토콜의 대역 효율성
Fig. 8. Bandwidth efficiency of MAC protocols.

미하는 것으로서 $1/f_r$ 로 정의되며 식(1)에 의하여 다음과 같다.

$$\eta = \frac{1}{f_r} = \frac{N_T-1}{(N-1)d_1 + (N_T-N)d_2} \quad (2)$$

또한 균등 분포상황에서 액세스 노드의 최대 처리율 (maximum throughput)은 대역 효율성을 이용하여 간단히 계산된다. 하나의 파장 채널이 N 개의 노드에 의해서 공유되고 각 파장의 데이터 전송률이 R_w 일 때 최대 처리율 T_{max} 은 다음과 같다.

$$T_{max} = \frac{\eta R_w}{N} \quad (3)$$

슬롯의 재사용성에 의해서 대역 효율성이 결정되며 이것은 결국 액세스 노드의 최대 처리율에 영향을 주게 된다. 따라서 제안된 MAC 프로토콜이 슬롯의 재사용성을 증가시킨다면 망의 성능을 향상시킬 수 있다.

그림 8은 제안된 MAC 프로토콜과 기존 프로토콜의 대역 효율성을 수치적 분석에 의해서 비교한 결과이다. 하나의 파장을 공유하는 액세스 노드의 개수 N 의 변화에 따른 결과를 보인 것으로서 슬롯 재사용성의 거리가 짧은 프로토콜일수록 높은 대역 효율성을 보인다. DS+SS(1:1)와 DS+IS(1:1)의 슬롯 재사용성은 DS+SS(1:0)와 DS+IS(1:0)의 d_2 에 각각 $1/N$ 을 더하면 얻을 수 있다.

IV. 성능 평가

1. 시뮬레이션 환경

본 논문에서 제안한 MAC 프로토콜의 성능 분석을 위하여 시뮬레이션을 수행한다. 앞 절에서 분석한 수치적 결과는 시뮬레이션의 결과를 검증하는데 이용되며 수치적 분석으로 얻을 수 없는 전송지연, 전송 공정성

등을 시뮬레이션을 통하여 분석한다. 시뮬레이션을 위한 네트워크 구성은 그림 1과 같으며 GbE 액세스 링크에서 입력되는 트래픽은 self-similar 프로세스를 따른다. Self-similar 트래픽은 On/Off Pareto 분포를 갖는 트래픽 소스 50개를 다중화함으로써 얻을 수 있으며 이 때 사용된 Hurst 파라미터는 실제 인터넷 트래픽에서 나타나는 0.8이다^[11]. 또한 패킷의 크기는 이더넷 MTU (Maximum Transfer Unit)를 고려한 고정 크기로 가정 하며 패킷의 목적지 결정은 균등 분포로 가정한다. 시뮬레이션은 안정상태(steady-state)에 도달될 수 있도록 충분한 시간동안 수행되었으며 시뮬레이션 동안 하나의 액세스 노드당 200~800만개의 패킷을 전송한다. 하나의 액세스 노드를 통하여 WDM 슬롯-링 망에 인가되는 트래픽 L_N 은 망 전송 용량 R_N 을 달성하기 위한 모든 액세스 노드의 트래픽의 합으로 가정한다.

2. 시뮬레이션 결과

그림 9는 세 가지 서로 다른 MAC 프로토콜, SS($p=0$), DS+SS(1:0), 그리고 DS+IS(1:0)을 15개의 액세스 노드와 3개의 파장을 사용하는 WDM 슬롯-링 망의 시뮬레이터에 적용한 처리율 결과이며 앞으로 표기의 단순화를 위하여 수치값이 없는 프로토콜 명을 사용한다. 3장의 수치적 분석에 의하면 SS, DS+SS, 그리고 DS+IS의 최대 처리율은 식 (3)에 의한 $\eta \cdot 2.5\text{Gbps}/5$ 으로 결정된다. 각 프로토콜에 따라서 $\eta=0.833, 1.0, 1.555$ 을 적용하면 최대 처리율은 416.5Mbps, 500Mbps, 777.5Mbps이 된다. SS와 DS+SS의 경우는 수치적 분석과 일치하는 결과보이는 반면에 DS+IS의 경우는 다소 낮은 결과를 보인다. 이것은 망에 인가되는 트래픽 부하를 시뮬레이션에 의해서 높일 수 없기 때문이다. 즉, 그림에서 인가된 부하 1의 의미는 파장 3개를 사용하는 7.5Gbps의 망 용량에 맞도록 self-similar 프

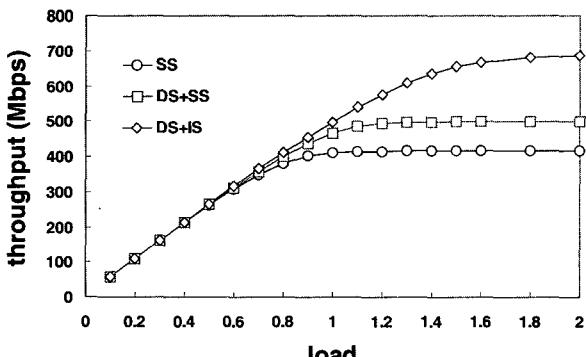


그림 9. 평균 노드 처리율

Fig. 9. Average node throughput.

로세스에 의해서 각 1G급 액세스 링크는 평균 500Mbps로 트래픽을 발생시킨다. 하지만 1G급 액세스 링크에 의한 인가된 부하 2를 만들기 위해서는 랜덤 프로세서의 특성상 특정 순간에 1Gbps 이상의 트래픽이 발생되기도 하는데 이것은 1G급 액세스 링크에서 발생될 수 있는 상황이 아니기 때문에 최대인 1Gbps로 설정함으로써 전체적인 평균 인가 트래픽이 감소하게 된다. 따라서 DS+IS의 경우는 더 높은 인가 트래픽 상황에서 실험을 해야 수치적 분석 결과를 얻을 수 있다. 하지만 제시된 결과만으로도 알 수 있듯이 SS와 동일한 FT-FRⁿ 구조의 액세스 노드에서 서로 다른 MAC 프로토콜을 사용함으로서 더 좋은 망 성능을 보일 수 있다. 본 연구에서는 멀티캐스팅을 고려하지 않기 때문에 DS+IS 방식은 슬롯의 재사용성을 최대로 높일 수 있는 장점을 갖는다. 즉, 슬롯이 같은 파장 그룹으로 전송되는 경우와 다른 파장으로 전송되는 경우에 관계없이 인접한 중간 노드에 의해서 제거되기 때문이다.

그림 10은 패킷이 액세스 링크에서 액세스 노드로 입력된 후 WDM 슬롯-링 망에 전송되기까지 큐에서 지연되는 평균시간을 나타낸다. 그림 9의 처리율이 선형적으로 증가하다 감소하는 시점에서 지연이 급속하게 증가함을 알 수 있다. SS의 경우는 인가된 부하가 0.7부터 500us를 넘어서고 있으며 DS+SS는 0.9, DS+IS는 1.4 부터임을 알 수 있다. 또한 최대 처리율을 갖는 시점의 지연을 보면 SS는 인가된 부한 1.2에서 2ms를 넘어서며 DS+SS의 경우는 1.4일때 2ms를 넘어선다. DS+IS의 경우는 망에 인가된 트래픽을 지속적으로 수용할 수 있는 상황이기 때문에 부하가 2인 경우에도 지연이 1.5ms를 넘지 않고 있다. SS의 결과를 보면 인가된 부하 1.2에서 1.8사이에서 다소 감소하는 특성을 보이는데 이것은 SS방식이 $p=0$ 이고 100개의 패킷을 수용하는 큐, 그리고 균등 분포의 가정에서 큐에 대기중인 패킷이 모

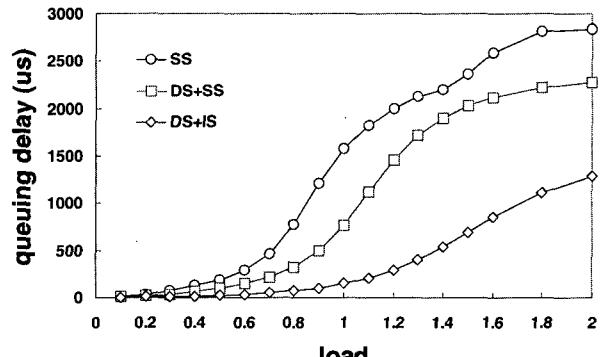


그림 10. 평균 큐 지연

Fig. 10. Average queuing delay.

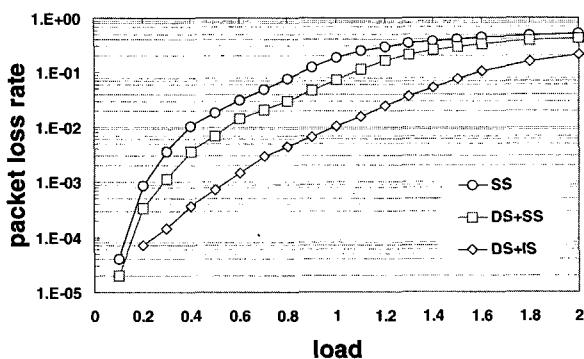


그림 11. 패킷 손실률

Fig. 11. Packet loss rate.

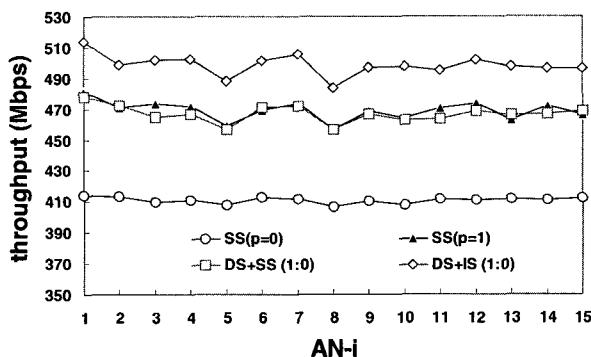


그림 12. 노드 처리율 비교에 의한 공정성

Fig. 12. Fairness in point of node throughput comparison.

는 노드에서 공정하게 전송이 보장되는 특징을 보이기 때문이다. 처리율과 마찬가지로 DS+IS 방식이 현저하게 낮은 지연을 보인 것이 특징적인 결과이다.

그림 11은 패킷이 액세스 링크에서 액세스 노드로 인가될 때, 액세스 노드 큐의 크기가 제한되기 때문에 발생되는 손실을 표현한다. 액세스 링크로 입력되는 self-similar 트래픽의 인가된 부하에 따라서 일반적으로 \log 함수에 대한 선형적인 변화를 보이고 있다. DS+IS 방식의 슬롯 재사용성이 가장 높기 때문에 큐에서 대기하는 패킷의 개수도 상대적으로 적어 큐가 넘치는 경우가 낮다. 따라서 앞에서 살펴본 처리율과 지연 특성과 관련된 결과로 볼 수 있다.

그림 12는 제안된 MAC 프로토콜을 사용할 때 같은 파장을 공유하는 액세스 노드간에 발생될 수 있 전송 공정성을 평가한 결과이다. WDM 슬롯-링 망에 인가된 부하가 1.0일 때 15개의 액세스 노드의 평균 처리율을 산출한 것으로서 각 MAC 프로토콜마다 조금씩 다른 결과를 보인다. 먼저 3장에서 분석한 수치적 결과에 의하면 SS($p=0$), SS($p=1$), DS+SS(1:0), 그리고 DS+IS(1:0)의 최대 처리율은 $N=5$ 이고 $N_w=3$ 이고 일 때, 각각 416.5Mbps, 500Mbps, 500Mbps, 그리고 777.5Mbps

이 된다. 또한 그림 12의 각 처리율의 절대 편차의 평균을 보면 각 프로토콜마다 1.6Mbps, 4.8Mbps, 3.4Mbps, 그리고 4.9Mbps의 값을 갖는다. 지면 관계상 다른 인가된 부하에서의 절대 편차 평균을 제시하지 않았지만 $p=0$ 을 SS 또는 IS에서 사용한 프로토콜의 공통적인 특징은 그렇지 않은 경우에 비해서 유사하거나 좋은 공정성을 갖는다. 뿐만 아니라 DS+SS(1:0) 와 DS+IS(1:0)의 경우에는 처리율에서도 향상된 결과를 보인다.

V. 결 론

본 논문에서는 유무선 통합을 위한 광대역 액세스 망을 연결하는 WDM 슬롯-링 망을 위한 액세스 노드의 기능 모델을 제시하고 기능 모델의 광 스위치 기능을 활용한 MAC 프로토콜의 제안한다. 먼저 기존 MAC 프로토콜인 SS 방식을 운용하기 위하여 광 스위치를 포함하는 액세스 노드의 기능 모델을 제시한다. 근원지에서 패킷 전송과 링을 순환한 슬롯의 제거, 그리고 전송 공정성을 위한 전송을 제한하는 SS 방식을 제안된 기능 모델을 통하여 분석한다. 다음으로 목적지로 패킷 전송이 끝나고 슬롯이 계속 망에서 순환되어 근원지에서 제거되기 때문에, 슬롯 재사용성이 낮은 SS 방식의 문제를 해결하기 위한 DS+SS와 DS+IS MAC 프로토콜의 제안한다. DS+SS와 DS+IS는 같은 파장 그룹으로 전송되는 슬롯과 다른 그룹으로 전송되는 슬롯을 구분한다. 같은 그룹으로 전송된 슬롯은 광 스위치에 의해서 바로 제거되며 다른 경우는 망 순환중에 중간 액세스 노드나 근원지 노드에서 슬롯을 제거하여 불필요한 순환을 줄여줌으로써 액세스 노드의 처리율을 향상시킨다. 또한 슬롯 제거 후에 빈 슬롯에 대한 전송의 제안을 부분적으로 허용함으로써 전송 공정성을 유지한다. 제안된 프로토콜은 유니캐스팅뿐만 아니라 멀티캐스팅에 적용될 수 있다. MAC 프로토콜에 대한 수치적 분석에 의해서 대역 효율성과 최대 처리율을 계산하여 망의 확장성을 예측할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] S. Yao, S. J. B. Yoo, and B. Mukherjee, "A Framework of Scalable Optical Metropolitan Networks for Improving Survivability and Class of Service," *IEEE Network*, vol. 16, no. 4, pp. 29-35, Jul./Aug. 2002
- [2] G. Kramer, B. Mukherjee, and G. Pesavento,

- "IPACT: A Dynamic Protocol for an Ethernet PON(EPON)," *IEEE Communication Magazine*, vol.40, no.2, pp.74-80, Feb. 2002
- [3] 서영민, 박현문, 장영민, "통신방송 융합 기술의 진화 방향," 한국통신학회지 제22권 4호, pp13-28, 2004
- [4] Martin Herzog, Martin Maier, Martin Reisslein, "Metropolitan Area Packet-Switched WDM Networks: A Survey on Ring Systems," *IEEE Communications Surveys and Tutorial*, 2nd Quarter, 2004
- [5] A. Bononi, "Scaling WDM Slotted Ring Networks," in *Proc. Conf. On Information Sciences and Systems*, Princeton, vol. 1, pp. 659, March 1998
- [6] C. S. Jelger, J. M. H. Elmighani, "A Simple MAC Protocol for WDM Metropolitan Access Ring Networks," in *Conference Proceedings, IEEE Globecom'01*, San Antonio, Nov. 2001
- [7] K. Shrikhande, et al, "CSMA/CA MAC Protocols for IP-HORNET: An IP over WDM Metropolitan Area Ring Network," *IEEE Globecom 2000*, no.1, pp1303-1307, Nov. 2000
- [8] R. Appleman, Z. Zalevsky, J. Vertman, J. Goede, "All-Optical Switches-The Evolution of Optical Functionality," Whitepapers at http://www.xlight.com/Technology/free_x.htm
- [9] H. Takahashi, K. Oda, H. Toba, and Y. Inoue, "Transmission Characteristics of Arrayed Waveguide N×N Wavelength Multiplexer," *IEEE/OSA journal of Lightwave Technology*, 13(3) : 447-455, 1995
- [10] W. H. So, Y. C. Kim, "MAC Protocols for WDM Slotted-Ring Network with Wavelength-Shared Node Architecture," *The Proc. OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2005)*, Seoul, July 2005
- [11] V. Paxson and S. Floyd, "Wide Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol.3, no.3, pp. 1512-1514, June 1995

 저 자 소 개



소 원 호 (정회원)

1996년 전북대학교 컴퓨터공학과 학사

1998년 전북대학교 컴퓨터공학과 석사

2003년 전북대학교 컴퓨터공학과 박사

현재 순천대학교 컴퓨터교육과 조교수

<주 관심분야 : 광통신망, 통신 프로토콜, 광교환 시스템, 트래픽 제어, 컴퓨터네트워크>