

WDM 메트로 링에서 공정한 전송을 위한 확률기반 MAC 프로토콜에 대한 성능 평가

정희원 소원호*, 종신회원 김영천**

Performance Evaluation of the Probability based MAC Protocol for Fair Transmission in WDM Metro Ring

Won-ho So* *Regular Member*, Young-chon Kim** *Lifelong Member*

요약

본 논문에서는 FT-TR(Fixed Transmitter-Tunable Receiver) 형 액세스 노드를 사용하여 광대역 액세스 망을 연결하는 파장 분할 다중화(Wavelength Division Multiplexing; WDM)기반의 메트로(metro) 링에서 공정한 전송을 위한 MAC 프로토콜을 제안한다. 기본적인 채널 액세스 방식은 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)이며 메트로 링을 순환한 전송된 슬롯은 SS(Source-Stripping) 방식으로 패킷이 제거되어 빈 슬롯이 된다. 빈 슬롯은 바로 패킷 전송에 이용되거나 다음 액세스 노드에 그대로 전송될 수 있는데, 전자는 망의 처리율은 향상되나 공정성에 문제가 발생되며 후자는 공정성은 향상되나 처리율이 낮은 단점을 갖는다. 따라서 제안된 MAC 프로토콜은 전자와 후자의 장점을 이용한다. 제안된 프로토콜은 p-Persistent MAC 프로토콜로서 파장 채널을 공유하는 액세스 노드는 하향 액세스 노드에게도 빈 슬롯을 이용하도록 확률적으로 전송 기회를 주고, 상향 액세스 노드의 무조건적인 빈 슬롯 사용을 확률적으로 억제하는 방식이다. 수치적 분석을 통하여 제안된 프로토콜에 대한 대역 효율성과 최대 노드 처리율을 분석하고 시뮬레이션을 통하여 확률에 따른 노드 처리율, 전송 공정성, 전송 지연 등의 다양한 결과를 분석한다. 또한 FT-TR 형 액세스 노드인 FT-FRn (Fixed Transmitter-n Fixed Receivers)과 FT-TR 구조로 메트로 망을 구성하여 제안된 MAC 프로토콜을 비교·평가한다.

Key Words : Fair MAC protocol, Optical ring networks, CSMA/CA, WDM, MAN

ABSTRACT

In this paper, we consider a WDM based metro ring connecting broadband access networks by using FT-TR (Fixed Transmitter-Tunable Receiver) type access nodes and a new MAC protocol for fair transmission is proposed. The basic channel access scheme is CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) and the transferred optical slot is changed to be empty slot by SS(Source-Stripping) which drops a packet from ring-rotated slot. This empty slot can be either used to send head-of-line packet in buffer or transmitted to next access node. In former cases, there is the improvement of network throughput, but latter case leads unfairness problem of transmission. Thus the proposed MAC protocol exploits the advantages from two cases. It gives downstream access nodes chance to use empty slots and limits the unconditional usage of empty

※ 이 논문은 2005년 순천대학교 학술연구비 공모과제로 연구되었음.

* 순천대학교 컴퓨터교육과 컴퓨터네트워크연구실 (whso@sunchon.ac.kr),

** 전북대학교 컴퓨터공학과 차세대통신망연구실 (yckim@chonbuk.ac.kr)

논문번호 : KICS2005-08-337, 접수일자 : 2006년 8월 17일, 최종논문접수일자 : 2006년 4월 10일

slots at upstream access nodes with probability as called p-Persistent MAC protocol. We use a numerical analysis to evaluate bandwidth efficiency and maximum node throughput and compares simulation results in terms of node throughput, fairness factor, transfer delay depending on probability. Under two different FT-TR type architectures for metro ring network the proposed MAC protocol is evaluated and compared.

I. 서론

인터넷의 급속한 보급과 사용자의 지수적 증가로 인하여 대용량의 IP/WDM(IP over WDM) 기반의 광 통신 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 First 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 발생하는 병목현상인 metro-gap으로 정의되며 국내외적으로 이를 해결하기 위하여 적합한 메트로 MAN 구조와 프로토콜에 대한 연구가 진행되고 있다. 차세대 통신망으로 연구되고 있는 BcN(Broadband convergence Network)에서도 유무선 통합, 방송 통신 융합을 위하여 인터넷을 통하여 사용자 중심의 요구 서비스 품질을 효과적으로 종단간에 제공할 것이다. 이에 광대역 메트로 망 구조와

이에 적합한 공정성 보장, QoS 지원 등을 위한 MAC 프로토콜이 연구되고 있다³⁾.

국내외적으로 연구되었던 WDM 기반 메트로 망은 방송-선택(broadcast-and-select) 망이 대부분이었으나 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 Rogin 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)}.

FT-FRⁿ의 전송 공정성은 각 액세스 노드가 SS(Source-Stripping) 방식으로 전송된 슬롯을 빈 슬롯으로 만든 후 그 노드에서 패킷 전송에 바로 이용하지 않는 단순한 방식이다. 따라서 동일한 과장을 공유하는 액세스 노드가 망에 분산된 경우에는 패킷을 전송하지 않는 빈 슬롯이 발생되어 망의 성능이 낮아지는 문제점이 발생한다. 반면에 액세스 노드가 빈 슬롯을 바로 이용하면 하향 액세스 노드의 전송 기회가 감소하여 불공정한 전송이 발생한다. 따라서 본 논문에서는 무조건적인 빈 슬롯의 전송이 아닌 확률적으로 빈 슬롯을 이용하여 망의 성능을 향상시키면서 기존의 전송 공정성을 유지하는 확률기반 MAC 프로토콜을 제안한다. 제안된 프로토콜은 수치적 분석과 시뮬레이션을 통하여 비교·평가한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 슬롯-

링 기반의 메트로 망과 관련 연구를 분석한다. 3장에서는 확률기반 MAC 프로토콜을 제안하고 수치적 분석을 수행한다. 제안된 프로토콜의 다양한 평가를 네트워크 시뮬레이션을 통하여 4장에서 수행하고 5장에서 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. 하나의 WDM 링크가 3개의 파장 채널로 구성된 경우로서 망에 분산된 액세스 노드가 하나의 파장 채널을 공유하는 구조이다. 이때 같은 파장을 공유하는 액세스 노드들을 파장 그룹으로 정의한다. 예를 들면 AN-1, AN-4, AN-13 등이 파장 λ_1 을 공유하는 파장 그룹이된다. 본 논문에서 고려하는 AN은 FT-TR 형태의 액세스 노드는 수신측 충돌이 없는 FT-FRⁿ과 수신측 충돌이 발생하는 FT-TR로 분류하여 MAC 알고리즘을 분석한다. AN은 3개의 포트가 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.

본 논문에서 고려하는 WDM 메트로 링 망에 이용될 수 있는 광 통신 핵심 기술은 서브 캐리어 다중화, 고속 광교환 소자, 그리고 수동형 다중화기/역다중화기이다. 서브 캐리어 다중화는 TT-FR 방식의 HONET에서 이용하는 방식으로 데이터 전송외에 제어 정보를 전송하기 위하여 사용한다^[7]. 고속 광교환 소자는 차세대 전광 망(all-optical network) 구성에 필수 요소로서 요구 광교환 시간은 1 μ s이하이다^[8]. 또한 멀티캐스팅의 지원과 복구 기능 및 신호의 저손실 등의 요구 사항을 만족해야 한다. 특히 링구조 망에서는 확장이 용이한 2x2 광 스위치를 이용하여 광슬롯의 전송과 수신을 한다. 다중화와 역다중화는 파장 경로 배정 기능, 파장 재사용, 신호 분배 손실 등에서 우수한 AWG(Arrayed-Waveguide

Grating)를 이용하여 구성될 수 있다^[9]. 그림 2(a)와 2(b)는 4x4 AWG를 이용한 다중화와 역다중화를 나타낸다. 이와 같은 핵심 기술의 기능과 특징을 이용하여 다음 장에서 FT-FRⁿ 기반의 WDM 액세스 노드의 기능 모델을 제시한다.

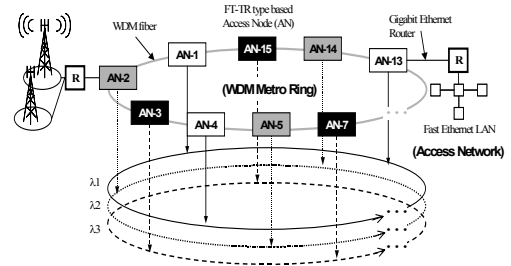


그림 1. WDM Metro Ring Network
Fig. 1. WDM 메트로 링 망

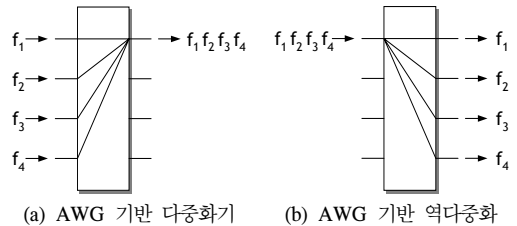


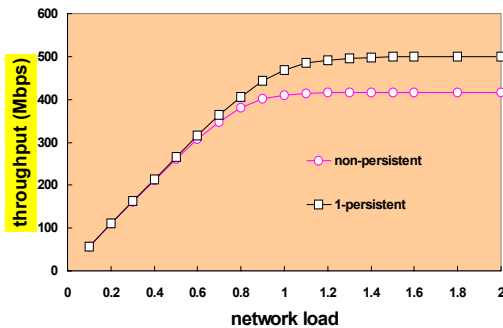
그림 2. 액세스 노드의 요소 기술
Fig. 2. Core technologies of access node

FT-TR 방식의 FT-FRⁿ은 하나의 파장을 여러 개의 액세스 노드가 공유하기 때문에 적합한 MAC 프로토콜이 요구된다. MAC 프로토콜은 전송된 슬롯을 제거하는 방식 즉, 송신자가 전송된 슬롯을 제거하는 source-stripping(SS) 방식과 슬롯의 수신자가 제거하는 destination-stripping(DS) 방식으로 분류된다. 슬롯이란 GbE 링크에서 입력된 패킷을 전송하는 고정시간 광신호 데이터 프레임으로 정의된다. 따라서 각 액세스 노드는 전송할 패킷이 큐에 있고 자신의 파장에 빈 슬롯(external empty slot; EES)이 입력 포트로부터 감지되면 패킷을 전송할 수 있다. 또한 SS와 DS 방식으로 패킷이 제거된 빈 슬롯을 이용하여 패킷을 전송할 수 있는데 링을 순환하여 전송된 슬롯이 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.

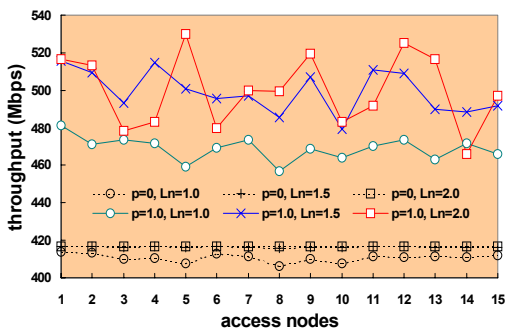
FT-FRⁿ의 MAC 프로토콜인 Non-Persistent 방식은 CSMA/CA 방식을 기반으로 송·수신 충돌 회피

뿐만 아니라 간단한 전송 제한(transmission restriction) 기법을 이용하여 액세스 노드간의 전송 공정성을 제공한다. IES를 액세스 노드에서 이용하지 않는 방식으로 같은 파장을 공유하는 다운스트림 노드에 전송 기회를 주는 방식이다. 반면에 1-Persistent 방식은 IES를 모두 패킷 전송에 사용한다. 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 3는 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 3(b)에서 볼 수 있는 것처럼 인가되는 부하에 관계없이 15개의 액세스 노드가 균등하게 처리율을 보이고 있다.



(a) 처리율



(b) 공정성

그림 3. SS 기반 MAC 프로토콜의 성능
Fig. 3. Performance of source-stripping based MAC protocol

III. 확률기반 MAC 프로토콜 설계

BcN의 유무선 통합, 방송·통신 융합은 다중의 광대역 액세스 망, 즉 GbE, HFC, 광대역 무선 인터넷 등을 효과적으로 연결함으로써 이루어진다. 따라서 WDM 슬롯-링으로 다중 광대역 액세스 망을 연결하기 위한 FT-FRⁿ 액세스 노드는 다음과 같은 요구 사항을 만족해야 한다.

- 서버캐리어 다중화를 이용한 제어 정보 송수신
- 단파장 슬롯 전송과 다파장 슬롯 동시 수신
- 슬롯의 제거 및 삽입

첫 번째 요구는 액세스 노드에서 MAC 프로토콜을 수행하기 전에 필요한 제어 정보를 미리 확인하기 위한 광링크 탭(tap)을 이용함으로써 가능하다. 또한 수신된 제어 정보를 처리하는 시간동안 서버캐리어와 같이 입력되는 데이터(패킷)정보를 지연하기 위해서는 광 지연선(fiber loop line)이 액세스 노드 전단에 필요하다. 두 번째 조건을 만족시키기 위해서는 고정 광송신기와 망에서 사용하는 파장의 개수만큼 광수신기가 요구된다¹⁰⁾. 또한 액세스 노드마다 공유하는 파장이 서로 다르기 때문에 다중화된 신호가 아닌 단일 파장단위로 노드에서 취급되어야 한다. 따라서 액세스 노드의 전후단에 파장 다중화기와 파장 역다중화기가 요구되며 다중화기의 경우에는 광 지연선 다음에 구성되어야 한다. 세 번째 조건은 링을 순환한 슬롯의 제거와 제거된 슬롯으로 발생한 빈 슬롯을 효과적으로 이용하기 위한 모듈로서 광 스위치 모듈이 요구된다¹¹⁾.

3.1 p-Persistent MAC 프로토콜

앞 절에서 살펴본 바와 같이 기존에 제시된 MAC 프로토콜의 성능 분석에 의하면 non-Persistent 방식과 1-Persistent 방식의 차이는 빈 슬롯인 IES의 사용여부에 의해서 발생된다. 본 논문에서는 주어진 확률값에 의해서 IES의 이용을 결정하는 p-Persistent 방식을 이용한 CSMA/CA MAC 프로토콜을 제안한다(그림 4).

제안된 프로토콜은 입력 포트에 도착하는 EES에 대해서는 CSMA/CA 방식을 그대로 사용하여 패킷 전송에 이용한다. 반면에 패킷 전송이 완료된 슬롯 중에서 자신이 보낸 슬롯은 패킷을 제거하여 IES를 만들면서 동시에 확률 p 로 이 IES에 패킷을 전송할 것인지를 랜덤 함수를 이용하여 결정한다. 만일 1과

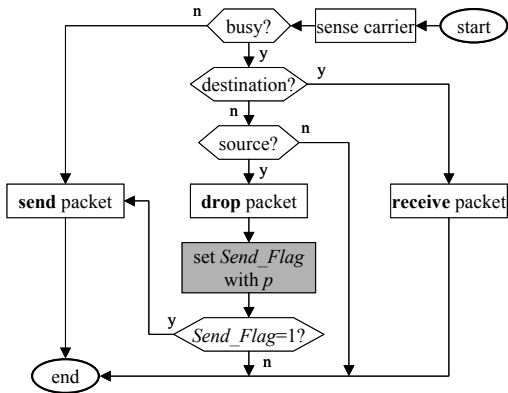


그림 4. 제안된 확률기반 CSMA/CA MAC 프로토콜
Fig. 4. Probability based CSMA/CA MAC protocol

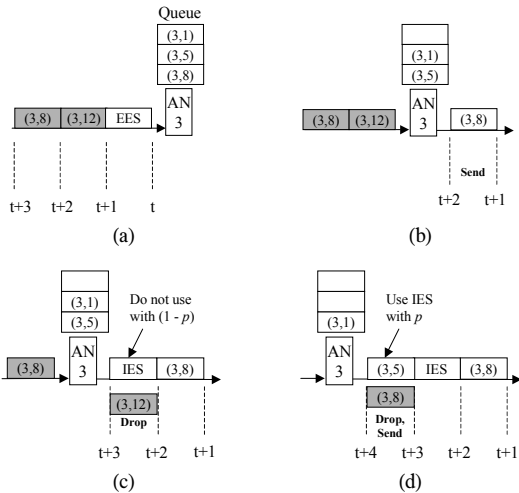


그림 5. 0.5-Persistent MAC 프로토콜에 의한 IES의 사용
Fig. 5. Usage of IESs on 0.5-Persistent MAC protocol

100사이의 균등 랜덤함수를 사용한다면 $U(1,100)/100 \leq p$ 을 만족하는 경우만 $Send_Flag = 1$ 로 설정한다. 따라서 IES가 발생하는 경우에 액세스 노드는 p 의 확률로 패킷을 전송하며 $(1-p)$ 의 확률로 지속적인 IES 점유를 막을 수 있다. 예를 들어 그림 5로 제안된 프로토콜의 동작을 설명하면 다음과 같다. 슬롯의 송신지와 수신지의 표기는 (source ID, destination ID)로 표기하고 상위 액세스 노드에서 전송된 빈 슬롯은 EES로 표기하고 패킷 전송을 완료하여 송신지에서 패킷이 제거된 빈 슬롯은 IES로 표기한다. 그림 5(a)를 보면 시간 t 에 EES가 액세스 노드 3의 입력포트로 입력되며 다음 슬롯에는 (3,12)과 (3,8) 슬롯이 차례대로 입력됨을 가정한다. 버퍼에는 수신지 8, 5, 1번 노드로 전송될 패킷이 대기하고 있다. 시간 t 에 빈 슬롯을 감지했기 때문

에 그림 5(b)에서 AN-3은 (3,8) 패킷을 빈 슬롯에 채워서 $t+1$ 에 전송(send로 표기)을 한다. 그림 5(c)에서는 AN-3이 링을 순환한 (3,12) 슬롯에서 패킷을 제거(drop)하고 빈 슬롯인 IES를 생성하여 $(1-p)$ 의 확률로 이용하지 않은 경우를 나타낸다. 확률 $p=0.5$ 인 경우라면 생성된 IES의 50%는 패킷을 전송하지 않는 빈 슬롯으로 전송하게 된다. 그림 5(d)는 역시 망을 순환한 (3,8) 슬롯을 제거(drop)하고 확률 p 에 의해서 패킷 (3,5)를 시간 $t+3$ 에 전송(send)하는 경우를 나타낸다. 따라서 망을 순환한 두 개의 슬롯에 대하여 무조건적인 패킷 전송의 여제가 아닌 확률에 의해서 빈 슬롯의 이용을 결정한다.

3.2 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 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 WDM 슬롯-링 망에 관련된 파라미터를 살펴본다. 표 1은 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 1. WDM 슬롯-링 망의 파라미터
Table 1. Parameters of WDM slotted-ring networks

Definition of Symbol	Value
Ring length: L_R	144Km
Light velocity in fiber: V	$2 \times 10^5 \text{ Km/s}$
Propagation delay: $D=L_R/V$	720s
# of wavelengths per fiber: N_W	3
Slot Size: S	12,000bits
Wavelength rate: R_W	2.5Gb/s
Total network rate: $R_N=R_W \times N_W$	7.5Gb/s
# of access nodes: N_T	15
Bandwidth-delay product: $B_{DP}=R_W \times D$	1.8Mbits
Slots per wavelength: $S_W=B_{DP}/S$	15

그림 6은 각 MAC 프로토콜에 따른 슬롯의 재사용성(SRF)을 그림으로 나타낸다. 먼저 슬롯이 링을 완전히 한 바퀴 순환한 거리를 1로 가정하여 이때의 전송 거리를 $d=1$ 로 정의한다. 또한 분석을 단순화하기 위하여 링에 인가되는 트래픽이 항상 존재하며 패킷의 목적지는 균등분포(uniform distribution)

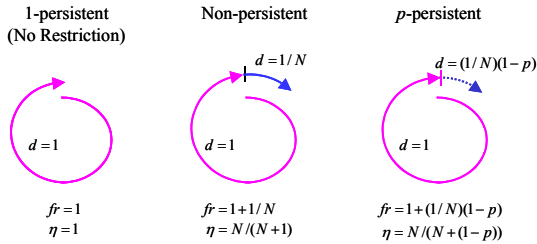


그림 6. 슬롯 재사용성의 계산을 위한 슬롯 재사용성
Fig. 6. Slot normalized distance to compute slot-reuse factor

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 6(a)의 1-Persistent의 경우에 슬롯이 전송에 이용되고 링을 완전히 순환하여 근원지 노드에서 제거된다. 제거된 슬롯은 빈 슬롯이 되며 $p=1$ 이기 때문에 빈 슬롯 (IES)은 바로 재사용된다. 따라서 이 프로토콜의 경우에는 $f_r=1$ 이 된다.

Non-Persistent의 경우에는 슬롯을 제거한 후 바로 사용하지 않고 다음 액세스 노드에게 전송의 기회를 준다. 따라서 동일한 파장을 사용하는 파장 그룹의 액세스 노드들이 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.

제안된 MAC 프로토콜인 p -Persistent MAC 프로토콜의 경우에는 p 에 의해서 재사용성이 결정된다. 그림 6(c)에서 패킷 전송이 끝난 슬롯이 송신지 노드에 도착한다. 도착한 슬롯은 패킷이 제거되고 확률 p 에 의해서 슬롯이 이용된다. 따라서 IES가 이용된 확률은 p 이고 빈 슬롯으로 다음 노드까지 전송될 확률은 $1-p$ 이기 때문에 슬롯 재사용에 이용되는 거리 d 는 링 순환 거리 1에 $(1/N)(1-p)$ 의 추가 거리가 더해진다.

지금까지 결정된 슬롯 재사용성으로 대역 효율성을 계산할 수 있다. 대역 효율성은 링 망을 한 바퀴 순환하는 동안 슬롯이 전달할 수 있는 최대 패킷의 개수를 의미하는 것으로서 $\eta=1/f_r$ 로 정의되며 다음과 같다.

$$\eta = \begin{cases} \frac{1}{N} & 1\text{-persistent} \\ \frac{N}{N+1} & \text{non-persistent} \\ \frac{N}{N+(1-p)} & p\text{-persistent} \end{cases} \quad (1)$$

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.

$$T_{max} = \frac{\eta R_W}{N} \quad (2)$$

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 7은 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 확률 $p=0.4, 0.9$ 에 의한 제안된 프로토콜의 대역 효율성과 기존 프로토콜의 값을 비교한다. 확률값이 작으면($p=0.4$) IES의 사용 빈도가 낮아져 슬롯 재사용

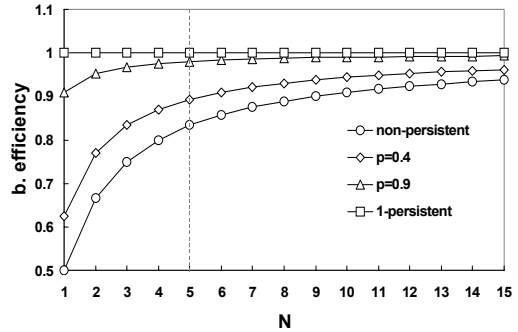


그림 7. MAC 프로토콜의 대역 효율성
Fig. 7. Bandwidth efficiency of MAC protocols

성의 거리가 증가하여 대역 효율성이 낮아지게 된다. 반면에 $p=0.9$ 인 경우는 IES를 패킷 전송에 90% 사용함으로써 대역 이용률을 1-Persistent MAC 프로토콜에 가깝게 유지할 수 있다.

IV. 성능 평가

4.1 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 전송 지연,

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 이때 사용된 Hurst 파라미터는 실제 인터넷 트래픽에서 나타나는 0.8이다^[11]. 또한 패킷의 크기는 인터넷 MTU(Maximum Transfer Unit)를 고려한 고정 크기로 가정하며 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. 이때 L_N 에 대한 비율을 망 인가 부하(normalized network load)로 정의한다. 특히 전송 공정성(fairness factor)는 각 노드 처리율의 평균 분석으로 정의한다.

4.2 시뮬레이션 결과

그림 8은 세 가지 서로 다른 MAC 프로토콜, non-Persistent, 0.4-, 0.9-Persistent, 그리고 1-Persistent을 15개의 액세스 노드와 3개의 파장을 사용하는 WDM 슬롯-링 망의 시뮬레이터에 적용한 처리율 결과이다. 3장의 수치적 분석에 의하면 각 프로토콜의 최대 처리율은 식 (3)에 의하여 $\eta \cdot 2.5 Gbps/s$ 으로 결정된다. 각 프로토콜에 따라서 $\eta = 0.833, 0.89, 0.98, 1.0$ 을 적용하면 최대 처리율은 각각 416.5Mbps, 445Mbps, 490Mbps, 500Mbps이 된다. 이러한 수치적 분석결과는 시뮬레이션의 결과와 일치하는 것으로서 $p = 0.9$ 일 때 제안된 프로토콜은 1-Persistent의 결과와 거의 유사한 결과를 보인다. 망에 인가되는 입력 부하가 1이하인 경우는 파장 그룹의 각 액세스 노드가 최대 500Mbps로 데이터를 망에 인가하는 경우로서 그 이상의 트래픽이 발생하는 경우도 고려할 수 있다. 하지만 균등분포로 가정했기 때문에 액세스 노드이 평균 노드 처리율은 최대 처리율을 넘지 않으며 제안된 프로토콜의 경우에는 확률값에 의해서 처리율이 결정된다.

그림 9는 전송 공정성을 각 프로토콜에 따라 나타낸 결과다. 인가 부하 0.6부터 프로토콜에 따른 차이가 발생되며 1-Persistent MAC의 경우에는 인가 부하가 1.0이후부터는 공정성이 급격하게 증가됨

을 알 수 있다. 이것은 같은 파장 그룹의 상위 액세스 노드가 하위 액세스 노드에 비해서 빈 슬롯을 더 많이 사용하여 패킷을 전송하기 때문이다. 이것은 망에 인가되는 트래픽이 증가될수록 IES를 하위 액세스 노드에게 전송하지 않고 바로 사용하기 때문으로 특정 액세스 노드의 처리율은 향상되지만 상대적으로 같은 파장 그룹의 다른 노드의 처리율은 낮아지는 문제점을 갖는다. Non-Persistent MAC의 경우에는 인가 부하가 증가되면서 더욱 균등하게 모든 노드가 전송기회를 갖는다. 그림 8과 비교해서 보면 각 노드의 처리율은 낮지만 동일한 기회를 보장받는다. 반면에 제안된 p -Persistent MAC의 경우를 보면 노드의 평균 처리율은 증가하면서 전송 공정성도 보장함을 알 수 있다. $P=0.4$ 인 경우는 non-Persistent MAC과 유사한 결과를 유지하며 $p=0.9$ 인 경우는 인가 부하가 1.0 이상일 때 non-Persistent MAC과 다소 차이를 보이지만 감소되는 경향을 유지한다. 따라서 SS 방식으로 전송 패킷의 제거로 발생되는 IES의 90%는 다시 버퍼에 있는 패킷 전송에 이용하고 나머지 10%만을 다음 액세스 노드에 전송하더라도 제안된 0.9-Persistent 방식은 non-Persistent와는 3Mbps이내의 공정성의 차이를

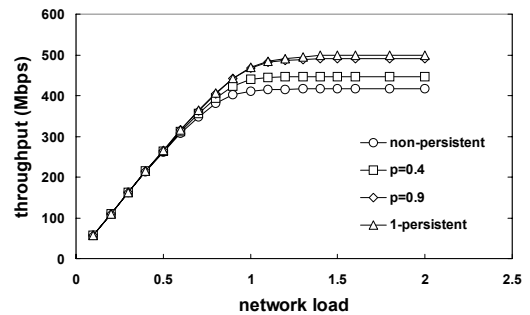


그림 8. 평균 노드 처리율
Fig. 8. Average node throughput

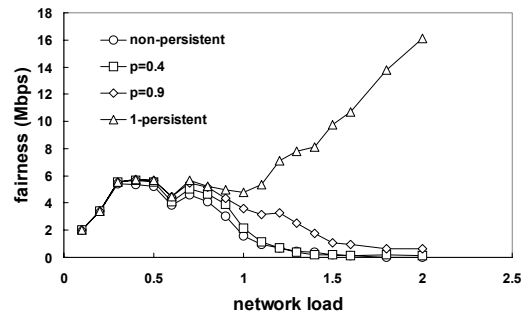


그림 9. 전송 공정성
Fig. 9. Fairness factor

를 보이며 1-Persistent MAC을 사용하는 경우 처리율에 98%까지 접근하는 성능을 보임을 알 수 있다.

그림 10은 슬롯-링을 구성하는 15개의 액세스 노드의 처리율을 각 프로토콜에 따라서 나타낸 결과이다. 실선으로 표시된 것은 망의 인가 부하가 1.0 일 때, non-Persistent MAC, 0.9-Persistent MAC, 그리고 1-Persistent MAC을 나타낸 것으로서 노드간의 전송 공정성은 일정한 범위 안에서 변동이 있음을 알 수 있으며 처리율은 non-Persistent MAC에 비해서 0.9-와 1-Persistent MAC가 상대적으로 높음을 알 수 있다. 하지만 점선으로 표기된 망에 인가된 부하가 1.5인 경우를 보면, non-Persistent MAC의 경우는 수치적 분석에 의한 최대 처리율(약 416Mbps)을 넘지 못하는 반면에 0.9-Persistent MAC는 490에서 모든 액세스 노드가 균등한 분포를 갖는다. 1-Persistent MAC의 경우는 노드간에 불균등한 처리율의 차이를 확인할 수 있으며 인가 부하가 증가할수록 더욱 큰 변동을 보인다.

그림 11는 패킷이 액세스 링크에서 액세스 노드로 입력된 후부터 WDM 슬롯-링 망에 전송되어 목적지까지 전송되는 평균시간을 나타낸다. 그림 9의 처리율이 선형적으로 증가하다 감소하는 시점에서 지연이 급속하게 증가함을 알 수 있다. Non-Persistent

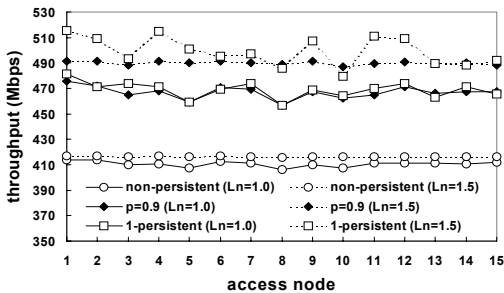


그림 10. 15개 액세스 노드의 처리율
Fig. 10. Node throughput of 15 access nodes

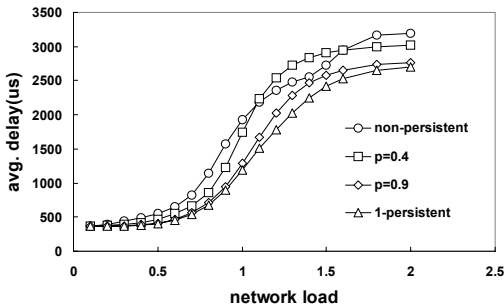


그림 11. Transfer delay
Fig. 11. 전송 지연

MAC의 경우는 인가된 부하가 0.0부터 1000us 을 넘어서고 있으며 0.9-와 1-Persistent의 경우는 인가 부하가 1.0부터 급격하게 지연이 증가됨을 알 수 있다. 빈 슬롯의 사용 여부에 따라서 버퍼에서 대기하는 지연 시간이 결정되기 때문에 확률값이 높을 수록 낮은 전송 지연을 가짐을 알 수 있다. 하지만 non-Persistent MAC의 결과를 보면 인가된 부하 1.2에서 1.8사이에서 다소 감소하는 특성을 보이는데 이것은 non-Persistent MAC방식이 제한된 100개의 패킷을 수용하는 큐, 그리고 균등 분포의 가정에서 프로토콜의 특성상 큐에 대기중인 패킷이 모든 노드에서 공정하게 전송이 보장되는 특징을 보이기 때문이다. 그러나 결과적으로 IES의 사용이 패킷 전송에 많이 이용되는 경우의 전송 지연이 낮은 결과를 보인다.

지금까지 결과는 액세스 노드가 FT-FR^a 구조인 경우를 대상으로 시뮬레이션 결과를 보였다. 이 구조는 파장 개수만큼 수신기를 두고 있기 때문에 수신측 충돌이 없는 장점을 갖는다. 따라서 처리율이 높은 장점을 갖는다. 그러나 현실적으로 광소자의

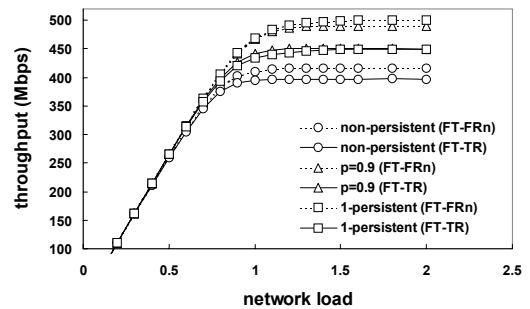


그림 12. 액세스 노드 구조에 따른 처리율 비교
Fig. 12. Comparison of node throughput between two access node architectures

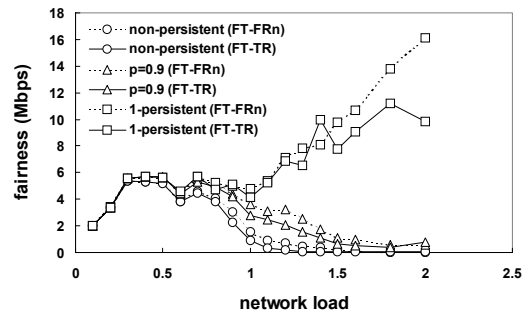


그림 13. 액세스 노드 구조에 따른 공정성 비교
Fig. 13. Comparison of fairness factor between two access node architectures

구성비용이 높기 때문에 본 논문에서는 제안된 프로토콜을 수신기가 하나이고 튜닝가능한 소자를 사용하는 FT-TR 구조의 액세스 노드를 고려한 실험도 진행한다.

MAC 프로토콜의 기본 방식은 동일하며 단지 동시에 수신할 수 없기 때문에 round-robin 방식으로 수신 파장을 액세스하여 패킷을 수신한다. 또한 송신지 액세스 노드에서 패킷을 제거하며 빈 슬롯을 패킷 전송에 이용하는 것은 동일하다. 그림 12과 13는 액세스 노드가 FT-FR²과 FT-TR일 때 평균 노드 처리율과 전송 공정성을 나타낸다. 처리율의 경우에는 실선으로 FT-TR 구조 결과를 나타내며 전체적인 성능은 FT-FR²에 비하여 낮지만 0.9-Persistent MAC의 경우는 1-Persistent MAC보다 좋은 성능을 나타내기도 한다. 뿐만 아니라 전송 공정성에 있어서도 1-Persistent는 구조에 관계없이 증가되지만 제안된 프로토콜은 0.9-Persistent MAC에서 낮은 노드 처리율의 평균 편차를 보인다. 따라서 FT-TR 구조 기반의 WDM 슬롯-링에서도 제안된 프로토콜이 처리율과 전송 공정성에서 좋은 결과를 보임을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 빈 슬롯에 의한 낮은 처리율을 높이고 공정성을 보장하기 위하여 확률적으로 빈 슬롯의 사용을 결정하는 MAC 프로토콜을 제시한다. 제안된 프로토콜은 p -Persistent MAC 프로토콜로서 입력되는 EES에 대해서는 CSMA/CA 방식을 따르며 IES에 대해서는 확률 p 값에 의해서 빈 슬롯의 이용을 결정한다. 따라서 제안된 프로토콜은 빈 슬롯의 낭비를 확률 p 로 제한할 수 있어 액세스 노드의 성능을 향상시킬 수 있다. 또한 $1-p$ 의 확률로 상위 액세스 노드의 계속적인 빈 슬롯의 사용을 랜덤화 시킴으로써 하위 액세스 노드에게 전송을 보장한다. 수치적 분석에 의해서 최대 대역 효율성이 98%가 되도록 p 값을 결정하였으며 non-Persistent MAC과 1-Persistent MAC으로 비교한다. 시뮬레이션 결과에 의하면 $p=0.9$ 인 p -Persistent MAC 프로토콜을 사용할 때, 1-Persistent MAC 프로토콜에 의한 최대 처리율의 98%까지 성능을 유지시키면서 전송 공정성도 보장됨을 알 수 있다. 두 종류의 FT-TR 형 액세스 노드 구조를 고려하여 성능 평가를 수행하여 제안된 프로토콜의 성능을 비교한다.

참고 문헌

- [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, Jul./Aug. 2002, pp. 29-35.
- [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. Elmirghani, "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, pp. 1303-1307, 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] 소원호, 김영천, “광대역 액세스 망을 연결하는 파장 공유 노드기반 WDM 메트로 링의 MAC 프로토콜 성능평가,” *전자공학회논문지* 제 43권 TC편 제1호 pp. 111-120, 2005. 7.

소원호 (Won-ho So)

정회원

한국통신학회 논문지 제25권 1A호 참조

현재 순천대학교 컴퓨터교육과 조교수

<관심분야> 광 버스트 스위칭, QoS 제어 및 트래픽 엔지니어링, 통신 프로토콜 설계

김영천 (Young-chon Kim)

중신회원

한국통신학회 논문지 제19권 제2호 참조

현재 전북대학교 컴퓨터공학과 교수