

이더넷 수동형 광가입자망에서의 동적 대역폭 할당에 관한 연구

Study on the dynamic bandwidth allocation over Ethernet Passive Optical Network

주 정 민*, 변 회 정**, 남 기 옥*, 임 종 태**
(Jung Min Joo, Hee Jung Byun, Gi Wook Nam, Jong Tae Lim)

*한국항공우주연구원, **한국과학기술원 전자전산학과

Abstract - Ethernet-based passive optical network(EPON) technology is being considered as a promising solution for next-generation broadband access network. It must have the property of high efficiency, low cost, and support quality of service(QoS). A major feature for this new architecture is the use of a shared transmission media between all connected optical network unit(ONU). Hence, medium access control(MAC) arbitration mechanisms are essential for the successful implementation of EPON. In this paper, we propose a simple dynamic bandwidth allocation(DBA) algorithm that improves the performance of network and supports IP-based multimedia applications with the bursty data traffic. In addition, we introduce analytic models of proposed algorithms and prove the system based on our algorithm to be asymptotically stable. Simulation results show the new DBA algorithm provides high bandwidth efficiency and low queueing delay of ONU in EPON.

Keywords : Ethernet Passive Optical Network(EPON), dynamic bandwidth allocation(DBA), medium access control(MAC), asymptotically stable, queueing delay

1. Introduction

최근 인터넷을 비롯한 광대역 멀티미디어 수요가 폭발적으로 증가함에 따라 가입자망의 고도화가 통신산업에서 가장 큰 이슈가 되고 있다. 가입자망 고도화는 FTTH 구축을 궁극적인 목표로 설정함과 동시에 현재는 그 기간동안 수요와 공급의 차이를 극복시켜 줄 대체기술들이 주목을 받고 있다. 지난 몇 년간 국가망의 전송용량은 WDM 등의 기술을 이용해 테라급까지 증가하고 있고, LAN 전송속도도 10M나 100M급에서 출발해서 기가급까지 향상되고 있다. 이에 반해 가입자망의 전송속도는 xDSL의 경우 수 Mbps에 그치고, 이론상 30Mbps까지 가능한 케이블 모뎀도 실제로는 0.4~1Mbps에 그친다.[1]

EPON(Ethernet Passive Optical Network)은 이러한 병목현상을 해결하는 것을 목표로 제안되었다. EPON은 다수의 ONU(Optical Network Unit)가 하나의 광섬유를 통해 OLT(Optical Line Terminal)를 공유하는 점대다점(Point to Multipoint) 망구조로 다른 가입자망 솔루션에 비해 단순하며 Ethernet이 갖는 가격 경쟁력을 이용하여 저렴한 비용의 서비스를 제공할 수 있는 장점을 가지고 있다.[2]

EPON에서의 데이터는 최대 1518Bytes까지의 가변길이 패킷으로 이루어져 있으며 백본 망으로부터 전달된 패킷은 OLT를 거쳐 Passive splitters를 통해 복사되어 연결된 모든 ONU로 브로드 캐스팅되며 각 ONU에서는 자신에게 해당되지 않는 패킷은 버린다. 반대로 상향 패킷 전송에서는 서로 다른 ONU의 패킷은 전송 충돌을 피하기 위해 TDM(Time division multiplexing)방식에 의해 OLT로부터 할당받은 Time slot 양 만큼만 전송되어

진다.[3]

따라서, EPON의 망 성능을 높이기 위해서는 효율적인 대역폭 할당(bandwidth allocation)이 중요하다. IPACT(Interleaved polling with adaptive cycle time)[3]은 대표적인 동적 대역폭 할당 알고리즘 중의 하나이지만 IP traffic과 같은 bursty data traffic에 대해서는 보다 정확한 대역폭 할당이 어렵고 delay 와 jitter에 민감한 패킷 전송에는 효율성이 떨어진다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하고자 각 ONU의 큐 길이 정보를 바탕으로 네트워크 환경에 따라 OLT에서 최적화된 대역폭 할당이 이루어지도록 하여 packet delay를 향상시키고 망의 효율을 보다 향상시키는 새로운 동적 대역폭 할당 제어 알고리즘을 제안하고 성능을 분석하였다.

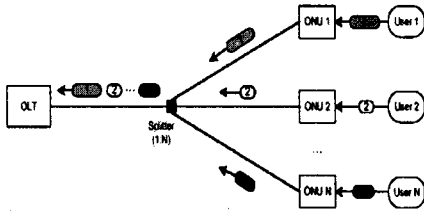
본 논문의 2장에서는 네트워크의 모델링과 새로운 동적 대역폭 할당 알고리즘을 제안하고 안정성을 수학적으로 증명하였다. 3장에서는 시뮬레이션을 통해 제안된 알고리즘의 성능을 분석하였고 4장에서 논문의 결론을 맺었다.

2. Network modeling and Proposed algorithm

2.1 Ethernet Passive Optical Network modeling

이더넷 수동형 광가입자망은 하나의 OLT와 다수의 ONU들로 이루어진 점대다점의 구조로 되어있다. [그림 1]은 이러한 EPON에서의 다수의 ONU들로부터 OLT로의 상향 트래픽의 흐름을 나타낸다. [그림 1]에서 알 수 있듯이 상향 트래픽 흐름에서는 splitter에서의 전송 데이터의 충돌을 피하는 대역폭 할당이 이루어져야 한다. 본 논문에서는 이러한 문제를 피하기 위해 상, 하향으로의 packet

전송에 따른 메카니즘은 Interleaved polling 알고리즘을 적용하였고 Control Message의 전송에 대해서는 IPACT 알고리즘에 사용된 방식을 이용하였다.[3]



[그림 1] EPON 망구조(상향 트래픽)

분석의 편의를 위해 네트워크 시스템은 하나의 OLT와 N개의 ONU들로 이루어져 있다고 가정하고 각각의 ONU i ($1 \leq i \leq N$)에 대해 n번째 cycle(모든 ONU가 한번의 전송을 마치는 데 걸리는 시간)에서의 상태를 다음과 같이 정의하였다[4].

- $q_i(n)$: cycle n에서의 ONU i 의 큐의 길이
- q_i^* : ONU i 에 대해 요구되는 큐의 길이
- $\lambda_i(n)$: $[n, n+1)$ cycle 동안 다수의 subscriber로부터 ONU i 에 도착하는 패킷의 양
- $Q_i(n)$: cycle n에서 OLT로부터 ONU i 에 할당된 윈도우 크기
- $\mu_i(n)$: cycle n에서 ONU i 로부터 전송되는 윈도우 크기
- $D_i(n)$: $q_i(n-1) - q_i^*$ 와 $q_i(n) - q_i^*$ 의 차

2.2 Proposed dynamic bandwidth allocation algorithm

먼저, OLT는 이전 cycle의 모든 ONU의 큐의 길이에 대한 정보와 round-trip time 정보를 가지고 있다고 가정한다.

위의 정의에 따라 ONU i 의 큐의 길이는 식(1)과 같이 표현된다.

$$q_i(n+1) = q_i(n) + \lambda_i(n) - \mu_i(n+1) \quad (1)$$

또한, 한 ONU로부터 OLT로 전송되는 윈도우의 크기가 할당량보다 클 수 없으므로 실제로 ONU i 로부터 전송되는 데이터 양은 식(2)와 같다.

$$\mu_i(n) = \min\{Q_i(n), q_i(n-1) + \lambda_i(n-1)\} \quad (2)$$

여기서 두개의 control gain k_1 와 k_2 을 사용하여 $D_i(n)$ 을 식(3)과 같이 다시 표현하였다.

$$D_i(n) = k_1\{q_i(n-1) - q_i^*\} - k_2\{q_i(n) - q_i^*\} \quad (3)$$

식(3)은 $D_i(n)$ 의 값이 이전 두 cycle에서의 ONU i 의 큐의 길이와 요구되는 큐 길이 간의 차이에 의해 구해짐을 보여준다. 이러한 $D_i(n)$ 의 값을 바탕으로 OLT에서는 $n+1$ 번째 cycle의 대역폭 할당량을 식(4)와 같이 결정한다.

$$Q_i(n+1) = Q_i(n) - D_i(n) \quad (4)$$

위의 식에서 보듯이 제안된 알고리즘에서는 다음 cycle의 대역폭 할당량이 이전 cycle에서의 대역폭 할당량에 대한 $D_i(n)$ 의 값에 의해 증가하기도 하고 감소하기도 한다. 즉, 사용자로부터 ONU i 에 전송되는 패킷의 양이 ONU i 로부터 OLT로 전송하는 패킷의 양보다 많을 경우 ONU i 의 큐에는 패킷이 쌓이게 되고 결국 큐의 길이가 길어지게 된다. 이러한 경우 ONU i 에서 원하는 큐의 길이보다 실제 큐의 길이가 증가하게 되어 $D_i(n)$ 의 값은 음이 되고 식(4)에 의해 OLT에서는 해당 ONU에 대해 다음 cycle에서는 더 많은 대역폭을 할당하게 된다. 반대로 ONU i 로 전송되는 패킷의 양이 적어 원하는 큐의 길이보다 짧아질 경우에는 다음 cycle의 대역폭 할당량을 줄임으로써 해당 오차를 보정해준다. 이러한 보정에 필요한 정보의 전송은 OLT와 ONU 간의 GATE message와 REPORT message에 의해 이루어진다.

이와 같이, OLT에서 각각의 ONU의 큐의 길이를 최소화 할 수 있도록 최적화된 대역폭 할당이 이루어지면 queue delay를 최소화 할 수 있고 따라서 delay나 jitter에 민감한 서비스에 유용하다고 할 수 있다. 그러므로 다음 절에서는 q_i^* 를 영으로 가정하고 제안한 알고리즘에 대한 안정성을 수학적으로 분석하였다.

2.3 Equilibrium point and Asymptotic stability

제안된 알고리즘의 안정성을 수학적으로 분석하기 위해 사용자로부터 각각의 ONU에게 고정된 크기의 패킷이 전송된다고 가정한다. ($\lambda_i(n) = \lambda_i, \forall n$)

우선, $Q_i(n) \leq q_i(n-1) + \lambda_i(n-1)$ 일 경우, 즉 ONU i 의 버퍼에 OLT로부터 할당받은 대역폭 보다 많은 양의 패킷이 있을 때, 식(1)~식(4)를 다시 표현하면 아래의 식(5)와 같은 상태방정식들로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} q_i(n+1) &= q_i(n) + \lambda_i(n) - \mu_i(n) \\ &= q_i(n) + \lambda_{is} - Q_i(n) + D_i(n) \\ D_i(n+1) &= k_1\{q_i(n) - q_i^*\} - k_2\{q_i(n+1) - q_i^*\} \\ &= k_1q_i(n) - k_2\{q_i(n) + \lambda_{is} - Q_i(n) + D_i(n)\} \\ Q_i(n+1) &= Q_i(n) - D_i(n) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 q_{is} , D_{is} 와 Q_{is} 를 각각 $q_i(n)$, $D_i(n)$ 과 $Q_i(n)$ 의 steady-state solution이라고 두고, 위의 식(5)로부터 q_i^* 가 0일 때의 시스템의 equilibrium point는 아래와 같다.

$$[q_{is} \ D_{is} \ Q_{is}] = [0 \ 0 \ \lambda_{is}] \quad (6)$$

여기서, ONU i 에 대한 state vector $X_i(n)$ 를 아래의 식(7)로 정의하고 state equation을 구하면 식(8)과 같다.

$$X_i(n) = [q_i(n) \ D_i(n) \ Q_i(n) - \lambda_{is}]^T \quad (7)$$

$$X_i(n+1) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ k_1 - k_2 & -k_2 & -k_2 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} X_i(n) \quad (8)$$

이로부터 시스템의 Characteristic polynomial $P_i(n)$ 은 식(9)과 같이 구해진다.

$$P_i(\lambda) = \lambda\{\lambda^2 + (k_2 - 2)\lambda + 1 - k_1\} \quad (9)$$

위의 $P_i(n)$ 에 Jury stability test method[5]를 적용하면 control gain k_1 와 k_2 가 다음의 조건(10)을 만족할 경우 시스템의 equilibrium point (6)이 asymptotically stable하다는 것을 알 수 있다.

$$0 < k_1 < 2, \quad k_2 > k_1, \quad k_1 + k_2 < 4 \quad (10)$$

두 번째로 $Q_i(n) > q_i(n-1) + \lambda_i(n-1)(\forall i)$ 일 경우, 즉, $\mu_i(n) = q_i(n-1) + \lambda_i(n-1)$ 일 때는 $n \geq 1$ 에 대해 식 (5)의 큐의 길이는 영이 될 것이다. 하지만 시스템의 equilibrium point는 (6)의 값과 같고, control gain이 $0 < k_2 < 2$ 을 만족하면 시스템의 equilibrium point가 asymptotically stable 해진다.

따라서, 전체 시스템의 equilibrium point (6)은 아래의 조건을 만족하는 control gain을 가질 경우 asymptotically stable 해진다.

$$0 < k_1, k_2 < 2, \quad k_2 > k_1 \quad (11)$$

위의 분석결과에서 알 수 있듯이 큐 길이 $q_i(n)$ 에 대한 equilibrium 값은 영이 되므로 ONU i 에 대한 큐의 길이를 최소화시킬 수 있고 따라서 packet delay를 줄이는 장점을 가진다.

3. Simulation results

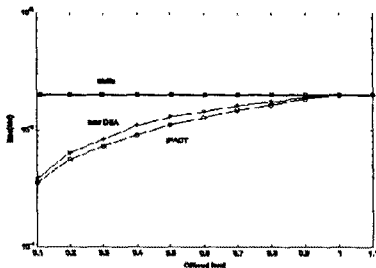
제안 알고리즘의 성능 분석을 위해서 static bandwidth allocation algorithm(SBA), IPACT 알고리즘과 비교하였으며 시뮬레이션 파라미터는 [표 1]과 같다.

Total number of ONUs (N)	16
Access link rate (R_D)	100 Mbps
Upstream link rate (R_U)	1 Gbps
Guard Time (G)	5 μ s
Maximum guaranteed window size (Q_i)	15000 bytes
Maximum cycle time (T_{MAX})	2ms
Control gains	$k_1 = 1, k_2 = 1.2$

[표 1] 시뮬레이션 파라미터

입력 트래픽으로 self-similar traffic[5]을 사용하였다

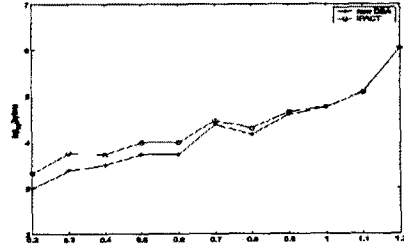
아래의 [그림 2]는 세 알고리즘의 average cycle time에 대해 비교한 것으로 SBA의 경우 정적 대역폭 할당 알고리즘이기 때문에 cycle time이 2ms로 고정되어 있다. 따라서, 상대적으로 전송할 패킷의 양이 적은 경우 망 효율성이 떨어지고 packet delay를 증가시키는 단점을 가진다.



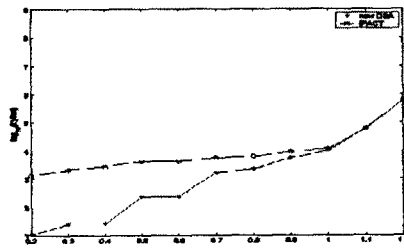
[그림 2] Comparison of average cycle time

제한한 알고리즘을 적용할 경우에는 IPACT 알고리즘에 비해 약간의 cycle time이 길지만 [그림 3, 4]에서 보듯이 큐의 길이는 오히려 짧음을 알 수 있다. 이는 제안된 알

고리즘이 각 ONU의 버퍼 상태의 변화를 대역폭 할당의 정보로 사용함으로써 보다 최적화된 대역폭 할당량이 정해지기 때문이다.



[그림 3] Comparison of maximum queue length



[그림 4] Comparison of packet delay

4. Conclusion

본 논문에서는 EPON의 동적 대역폭 할당을 위한 기존의 제안된 알고리즘이 가지는 단점을 개선하고 다양한 네트워크 서비스를 지원하기 위해 새로운 동적 대역폭 할당 알고리즘을 제안하고 그 성능을 분석하였다. 각 ONU의 큐의 길이를 바탕으로 트래픽의 변화를 대역폭 할당에 반영함으로써 기존의 대역폭 할당 알고리즘에 비해 망의 효율성을 향상시키고 packet delay를 감소시키는 결과를 보였다.

참고 문헌

- [1] G. Kramer, and G. Pesavento, "Ethernet passive optical network (EPON): Building a next-generation optical access network," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, No.2, pp.66-73, 2002.
- [2] G. Kramer, and B. Mukherjee, "Ethernet PON: design and analysis of an optical access network," *Photonic Network Commun.*, vol. 3, No.3, pp.307-319, July 2001.
- [3] G. Kramer, and B. Mukherjee, "IPACT: a dynamic protocol for an Ethernet PON (EPON)," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, No.2, pp.74-80, 2002.
- [4] H.Byun, J.Nho, and J.Lim, "Dynamic bandwidth allocation algorithm in Ethernet passive optical networks," *Electronics Letter*, vol. 39, No.13, pp.1001-1002, June 2003
- [5] G. Kramer, "Generator of Self-Similar Network Traffic," available at <http://www.csif.cs.ucdavis.edu/kramer/>.