

# EPON에서의 높은 대역폭 사용효율과 QoS 지원을 위한 효율적인 스케줄링 알고리즘

정희원 김준석\*, 연훈제\*, 김석규\*, 이재용\*

## Efficient Scheduling Algorithm for Supporting High Bandwidth Utilization and QoS In EPON

Junseog Kim\*, Hunje Yeon\*, Seoggyu Kim\*, Jaiyong Lee\* *Regular Members*

### 요약

EPON은 널리 퍼져있는 이더넷(Ethernet) 기술을 사용하고, 낮은 이더넷 장비비용과 낮은 광(fiber) 기반비용을 제공하기 때문에, 광대역 고속 가입자 망에서 점점 더 매력적인 해법으로 관심을 끌고 있다. EPON에서는 서로 다른 ONU들이 데이터를 보내기 위해서 상향 채널을 공유해야 하기 때문에 상향 트래픽을 제어하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 높은 대역폭 사용효율을 제공하며, 서비스 클래스 별로 서로 다른 QoS를 지원하는 스케줄링 알고리즘인 HUHG(High Utilization and Hybrid Granting) 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 고정된 EF(Expedited Forwarding) sub-cycle의 특성을 이용하여, 다음 cycle의 EF sub-cycle을 미리 할당하여 idle time을 제거 또는 줄임으로써 높은 대역폭 사용효율을 얻을 수 있을 뿐만 아니라, EF 클래스에 대한 패킷 delay와 delay variation을 최소화 할 수 있다. 본 논문에서는 제안된 알고리즘의 효과를 확인하기 위해서 기존 연구를 바탕으로 대역폭 사용효율을 분석하고, OPNET을 통한 모의실험 결과를 통해서 성능분석을 기술한다.

**Key Words** : Ethernet, PON, DBA, Scheduling, QoS, Bandwidth Utilization

### ABSTRACT

In recent year, EPON(Ethernet PON) system is expected to be more attractive solutions for high speed, broadband access networks in next generation access networks due to the conversion of low-cost ethernet equipment and low-cost fiber infrastructure. Upstream channel control algorithm is essential to have upstream bandwidth in EPON. In this paper, we suggest HUHG(High Utilization and Hybrid Granting) algorithm for supporting high bandwidth utilization and QoS for different service class. This algorithm improves bandwidth utilization as removing or diminishing idle time of upstream channel using characteristics of fixed EF(Expedited Forwarding) sub-cycle. The proposed algorithm also minimizes the packet delay and delay variation of EF class. We conduct detailed simulation experiments using OPNET to study the performance and validate the effectiveness of the proposed algorithm.

### I. 서론

최근에 인터넷을 기반으로 하는 다양한 응용프로

그램들은 인터넷 사용인구의 급격한 증가와 동시에 요구 대역폭의 증가 및 질적인 향상을 초래하고 있다. 과거의 응용프로그램들(음성, 저속 데이터 서비

※ 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 육성·지원사업의 연구결과로 수행되었음.(IITA-2005- C1090-0502-0012).

\* 연세대학교 전기전자공학부 UbiNet 연구실(ljskim8844, hjmirror, sakion, jy1}@nasla.yonsei.ac.kr)  
논문번호 : KICS2006-01-032, 접수일자 : 2006년 1월 16일

스)은 높은 대역폭을 요구하지 않지만, 최근 HDTV, 고화질 VOD, CATV 등과 같은 다양한 광대역 서비스에 대한 가입자들의 수요가 증가하고, 양방향 멀티미디어 트래픽이 폭발적으로 증가하고 있다. 이러한 추세는 비즈니스 가입자 영역에 국한되지 않고, 일반 가입자 영역까지 확대되고 있다. 또한, 최선형 서비스에 기인한 단순한 접속기능의 한계를 벗어나 응용 서비스 별로 차별화된 품질을 제공하는 보장형 서비스에 대한 요구도 점점 더 증가되고 있다. 따라서 빠르게 증가하는 광대역 서비스와 차별화 된 품질을 가입자에게 경제적이고, 효율적으로 제공하는 가입자 망의 구축이 요구되고 있다.

이러한 요구사항들을 위한 여러 가지 가입자 망의 구축 방법들 중에서도 가장 주목을 받고 있는 것이 차세대 광 가입자 전송기술 중의 하나인 PON (Passive Optical Network)이다. PON은 전체적인 광선로의 길이를 줄이고 수동 광소자만을 사용함으로써 신뢰성이 높고, 저렴한 가입자망을 구축할 수 있다. PON의 여러 가지 기술 방식 중에서 EPON (Ethernet PON)은 이더넷 기반의 PON기술을 사용하는 방식으로 이더넷 기술을 사용하고, 낮은 이더넷 장비비용과 낮은 광 기반비용을 제공하기 때문에 광대역 고속 가입자 망에서 점점 더 매력적인 해법으로 관심을 끌고 있다.

EPON에서는 서로 다른 ONU들이 데이터를 보내기 위해서 상향 채널을 공유해야 하기 때문에 상향 트래픽을 제어하는 알고리즘이 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서는 EPON에서 상향 트래픽의 대역폭 사용효율을 감소시키는 idle time 문제에 대해서 상기시키며, 높은 대역폭 사용효율과 서비스 클래스별로 서로 다른 QoS를 지원하는 HUHG(High Utilization and Hybrid Granting) 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 고정된 EF(Expedited Forwarding) sub-cycle의 특성을 이용하여, 다음 cycle의 EF sub-cycle을 미리 할당함으로써 idle time을 제거 또는 줄임으로써 높은 대역폭 효율을 얻을 수 있을 뿐 아니라, EF 클래스에 대한 패킷 delay와 delay variation을 최소화 할 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 제 2장에서는 EPON의 구조와 이전 연구되었던 알고리즘들에 대해 살펴보고, 제 3장에서는 제안한 HUHG 알고리즘에 대해 기술한다. 제 4장에서는 모의실험을 통해 제안한 알고리즘의 성능평가를 수행한다. 제 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. EPON의 구조와 이전 연구들

### 2.1 EPON의 구조

EPON은 수동형 광분배기(Passive optical splitter)와 OLT(Optical Line Termination), ONU(Optical Network Unit)으로 구성된다. OLT와 ONU사이의 거리는 최대 20km, ONU의 개수는 최대 32개를 지원하고, 하나의 OLT는 다수의 ONU들을 트리 모양으로 분기 구조로 연결하여, 이더넷 프레임을 전달 단위로 사용하는 고속 광 가입자 망 구성 기술이다.

그림 1에서 보여주는 것처럼, 트리 모양의 물리적 연결 특성으로 인해 외부 망에서 가입자로의 하향 전송 흐름은 점 대 다점(point to multi-point) 방식으로 OLT로부터 모든 ONU에 방송(broadcasting)된다. 반면에, 가입자로부터 외부 망으로의 상향 전송 흐름은 각각의 ONU와 OLT간의 점 대 점(point to point)방식으로 이루어지므로 분산된 각각의 ONU가 하나의 OLT에 충돌 없이 데이터를 전달하여야 한다. EPON에서는 다수의 ONU가 하나의 OLT로 상향 대역 접근을 위한 대역 할당 방식으로 그림 2에서 보는 것처럼 TDMA 방식을 사용한다.

TDMA 방식을 위해 각 ONU에게 고정된 타임 슬롯(Time Slot)을 할당하는 SBA(Static bandwidth allocation)를 사용할 수 있다. SBA는 구현이 간단하지만 비효율적으로 대역폭을 사용하는 단점이 있다. 따라서 EPON구조에서 효율적인 통계적 다중화

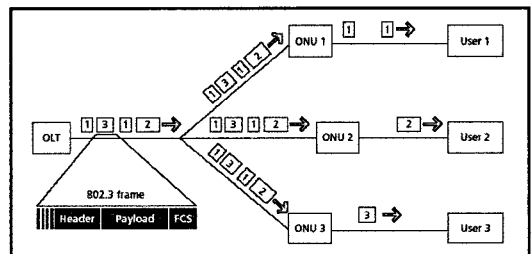


그림 1. EPON의 하향 트래픽 흐름

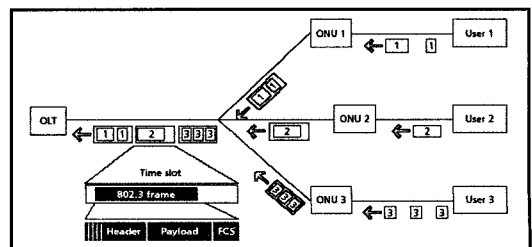


그림 2. EPON의 상향 트래픽 흐름

(statistical multiplexing)를 얻기 위해서 IEEE 802.3ah EFM(Ethernet in First Mile Task)은MPCP(Multi Point Control Protocol)를 정의하였다. 이러한 MPCP를 이용하여, OLT는 DBA(Dynamic Bandwidth Allocation) 알고리즘을 사용하여 ONU간의 상향 전송흐름을 스케줄링 할 수 있다.

### 2.2 이전의 연구들

현재까지 다양한 DBA 알고리즘이 EPON을 위해 제안되었다. Interleaved polling scheme with adaptive cycle time(IPACT)<sup>[2]</sup>는 현재 ONU로부터 전송이 완료되기 이전에 다음 ONU로 폴링(polling)을 시작하는 방법이다. IPACT는 높은 대역폭 사용 효율을 얻을 수 있지만, 할당 받은 대역폭에 따라 한 주기의 시간이 가변적이기 때문에 delay에 민감한 트래픽에는 적합하지 않다.

[5]는 주기적인 폴링(cyclic polling)을 사용하면, ONU에 세 개의 우선 클래스(priority class)를 두어서 REPORT를 하고, 이에 대해서 GATE하는 방식을 사용하며, 주기적인 폴링의 문제점인 idle time을 줄이기 위해서, 최소 대역폭(minimum bandwidth)보다 적은 양을 요구한 ONU는 다른 ONU의 REPORT를 기다리지 않고 GATE하는 방법을 사용하였다. 그러나, 높은 우선순위 트래픽에 대한 우선 지원을 제공하지 못하고, 높은 부하(high load)의 상태에서는 idle time을 줄이지 못하였다.

EPON에 대한 연구가 계속 진행됨에 따라, QoS 지원에 대한 관심이 증가하면서, 패킷의 우선순위와 delay에 민감한 패킷의 전송에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

[6]은 트래픽을 HP(High Priority)와 BE(Best Effort) 클래스로 분류하고, HP 클래스와 BE 클래스에 대한 대역폭 할당을 분리하여, HP 클래스 트래픽에 대한 delay와 delay variation을 최소화 하였다. 그러나, 최소 대역폭에 대한 보장이 없어, ONU간의 공정성(fairness)이 보장되지 않으며, HP클래스와 BE클래스에 대한 대역폭 할당을 분리함으로써, 보호대역(Guard Time)이 두 배로 많아지는 단점이 있다.

[7]은 트래픽을 EF(Expedited Forwarding), AF(Assured Forwarding), BE(Best Effort) 클래스로 나누고, 상향 전송 흐름을 EF와 AF sub-cycle로 나누었다. EF sub-cycle에서는 고정된 양의 EF 클래스의 트래픽을 전송하고, AF sub-cycle에서는 AF와 BE 클래스들의 트래픽을 전송한다. OLT에서는 각

ONU별로 최소 대역폭을 보장하여, ONU간의 공정성을 보장하며, GBR(Grant-before-report) fashion을 이용하여, ONU에 대한 OLT의 정보 지연(information latency)을 줄였다. 하지만 낮은 load에서의 EF 클래스의 평균 패킷 delay의 증가와 HSSR처럼 보호대역이 두 배로 많아지는 단점이 있다.

[6]과 [7]은 모두 주기적인 폴링을 사용하기 때문에 idle time이 존재하며 이로 인해서 높은 대역폭 사용효율을 얻을 수 없다.

### III. 제안 알고리즘

Idle time, 보호대역, REPORT 메시지는 주기적인 폴링을 사용하는 알고리즘에서 상향 전송 흐름의 대역폭 사용효율을 낮게 하는 요인들이다. 그중에서 가장 큰 주요 원인은 그림 3에서 보는 것처럼 REPORT와 GATE사이에 발생하는 idle time이다. Idle time은 RTT(Round Trip Time)와 DBA\_TIME의 합으로 표현된다<sup>[4]</sup>. DBA\_TIME은 OLT에서의 DBA를 처리하는데 걸리는 시간을 의미하며, CPU의 속도에 따라 값이 달라진다. 따라서, 고속의 CPU를 사용하게 되면, DBA\_TIME은 매우 작아지므로 무시할 수 있지만, RTT의 경우는, EPON에서 OLT와 ONU사이의 거리는 최대 20km이므로, RTT의 최대값은 200us가 된다. Cycle 주기가 2ms라고 할 때, 200us는 10%에 해당되는 것으로, 대역폭 사용효율을 저하시키는데 idle time이 차지하는 비중은 굉장히 높다고 할 수 있다. 본 논문에서는 idle time을 제거하기 위해서, HUHG(High Utilization and Hybrid Granting) 알고리즘을 제안한다.

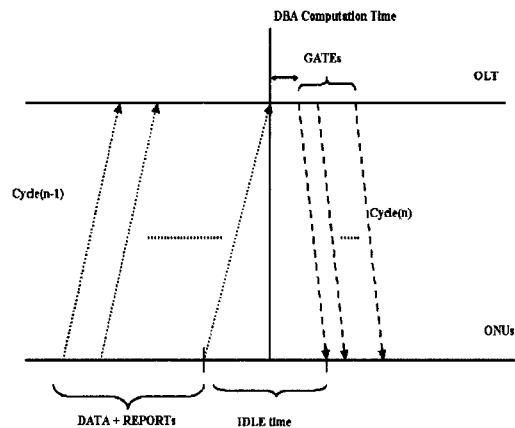


그림 3. Cyclic Polling 방식에서의 idle Time

### 3.1 HUHG 알고리즘

서로 다른 delay와 delay variation 특성을 가진 클래스들을 지원하기 위해서 HUHG 알고리즘은 트래픽을 EF(Expedite Forwarding), AF(Assured Forwarding), BE(Best Effort) 세 개의 클래스로 분류하였다. EF 클래스는 CBR 음성 트래픽(voice traffic)처럼 delay에 민감한 서비스를 위한 최상위 클래스이고, AF 클래스는 VBR처럼 delay에 민감하지 않은 중간 우선순위의 클래스이고, BE 클래스는 FTP, Web browsing, e-mail 응용프로그램(application) 같은 서비스를 위한 가장 낮은 우선순위의 클래스이다.

HUHG 알고리즘은 EF, AF, BE 클래스를 지원하기 위해서 two-cycle 할당(allocation) 방식을 사용한다. EF sub-cycle은 EF 클래스를 위한 cycle이고, AF sub-cycle은 AF와 BE 클래스를 위한 cycle이다. 이렇게 2개의 sub-cycle로 나눈 것은 보호 대역(guard time)이 2배로 증가하는 단점이 있지만, EF 클래스의 delay와 delay variation을 줄여주는 장점이 더 크기 때문이다.

[7]에서 언급한 것처럼, DBA의 중요한 동기는 AF/BE 클래스의 트래픽이 non-deterministic 하다는 것이다. 바꾸어 말하면, EF 클래스의 트래픽은 deterministic 한 특성 때문에, ONU에서 OLT로 별도의 REPORT가 없이도 EF sub-cycle에 대한 GATE가 가능하다. 이러한 특성 때문에 B-PON 또는 G-PON에서도 EF 클래스에 해당하는 T-CONT1(Transmission Container type 1)을 동적(dynamic)인 방법을 사용하지 않고 고정된(fixed)된 방식으로 사용하는

것을 참조할 수 있다<sup>[10]</sup>. 따라서, HUHG 알고리즘에서는 ONU가 OLT로 REPORT를 할 때 에 EF 클래스에 대한 queue length는 보내지 않고, AF와 BE 클래스에 대한 queue length의 합을 보내게 된다. OLT는 SLA(Service Level Agreement)시 또는 Provision에 의해 설정된 EF 클래스의 대역 정보(bandwidth information)와 REPORT된 AF/BE 클래스의 queue length 정보를 이용하여 DBA를 수행한다.

Idle time을 줄이기 위해서, 고정된 EF sub-cycle의 특성을 이용하여, 그림 4에서 보는 것처럼, 다음 EF sub-cycle을 미리 할당하는 방법을 이용한다. 미리 할당된 EF sub-cycle의 크기가 idle time 보다 큰 경우에는 idle time이 완전히 제거가 되고, EF sub-cycle의 크기가 idle time 보다 작은 경우는 idle time에서 EF sub-cycle을 뺀 만큼의 시간이 idle time이 된다.

Auto Discovery과정이 끝난 후 OLT는 ONU에게 REPORT를 위한 GATE를 전송한다. ONU는 AF와 BE 클래스의 queue length정보를 REPORT에 실어 OLT에게 전송한다. REPORT를 받은 OLT는 이미 설정된 EF 클래스에 대한 대역폭정보와 REPORT된 queue length를 이용하여 첫 번째 DBA 과정을 수행한다. 자세한 DBA 과정은 뒤에서 설명을 하도록 한다. DBA를 수행하면, EF sub-cycle(1), AF sub-cycle(1)을 구할 수 있다. HUHG 알고리즘은 고정 EF sub-cycle을 사용하므로, EF sub-cycle(2)에 대한 값도 허락할 수 있다. 따라서, 첫 번째 DBA의 수행 결과로 GATE에는 EF sub-cy-

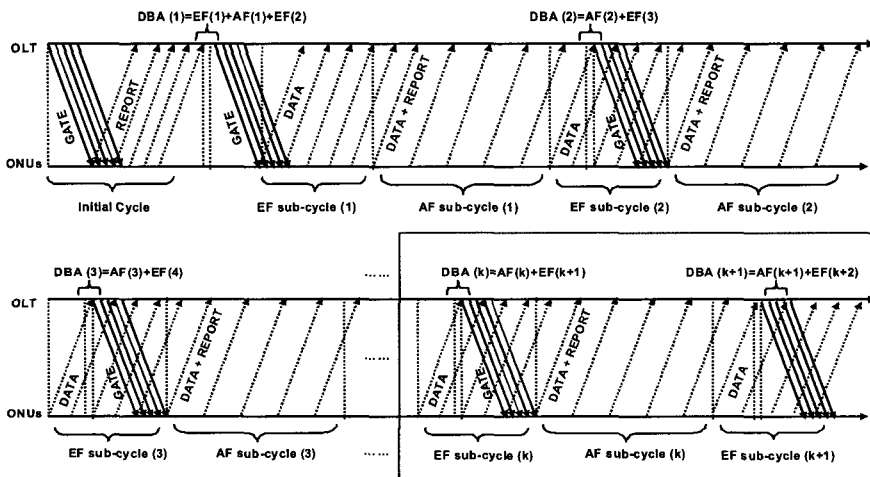


그림 4. HUHG 알고리즘의 동작

cle(1), AF sub-cycle(1), EF sub-cycle(2)에 대한 정보를 실어 보낸다. GATE를 받은 ONU들은 할당 받은 타임슬롯만큼의 EF, AF/BE 트래픽을 전송하며, AF sub-cycle(1)에 현재의 queue length를 REPORT한다. AF sub-cycle(1)을 마친 후에는 EF sub-cycle(2)의 GATE 정보를 이용하여, ONU별로 할당 받은 양만큼의 EF 트래픽을 전송한다.

한편, ONU들로부터 REPORT를 받은 OLT는 ONU들이 EF sub-cycle(2)을 수행하고 있는 동안에, ONU들로부터 REPORT를 이용하여 두 번째 DBA를 수행한다. 두 번째 DBA는 REPORT된 AF/BE 클래스 queue length 정보와 고정된 EF 클래스의 대역폭 정보를 이용하여, AF sub-cycle(2)와 EF sub-cycle(3)에 대한 정보를 GATE에 실어 ONU들에게 전송한다. GATE를 받은 ONU들은 AF sub-cycle(2)에 AF/BE 트래픽과 REPORT를 전송하며, EF sub-cycle(3)에 EF 트래픽을 전송한다. ONU들로부터 REPORT를 받은 OLT는 ONU들이 EF sub-cycle(3)을 수행하는 동안에, ONU들로부터 받은 REPORT를 이용하여 세 번째 DBA를 수행한다. 이후의 과정은 두 번째 DBA 이후의 과정을 반복한다.

HUHG 알고리즘은 위에서 언급한 것처럼, 고정된 EF sub-cycle의 크기가 idle time보다 큰 경우에는 idle time이 전혀 발생하지 않게 된다. 예를 들면, OLT와 ONU의 거리가 20 km, ONU의 개수는 16개, DBA 주기가 2 ms이고, DBA\_TIME을 무시하고 RTT만을 고려한 상황에서는, 전체 ONU에 대한 EF 클래스의 트래픽 부하(Traffic Load)가 약 10.2% 이상인 경우에는 idle time을 완전히 없앨 수 있다.

### 3.2 이론상의 최대 Throughput

HUHG 알고리즘은 idle time을 제거하거나 줄임으로써 대역폭 사용효율의 향상을 거둘 수 있다. EPON에서 Cyclic Polling 방법을 사용하는 알고리즘의 상향 전송흐름에 대한 이론상의 최대 throughput은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\phi_{max} = \frac{BW^C - BW^{OH}}{TC} \quad (1)$$

여기서  $BW^C$ 는 한 주기에 보낼 수 있는 대역폭,  $BW^{OH}$ 는 한 주기에 발생되는 overhead의 대역폭을 의미하며,  $TC$ 는 주기(cycle time)를,  $\phi_{max}$ 는 이론상 상향 전송흐름의 최대 throughput을 의미한다.  $BW^{OH}$ 에는 ONU간의 보호 대역(guard time),

REPORT 메시지 그리고, idle time을 포함한다.

위의 식에서 설명한  $BW^{OH}$ 을 기존의 스케줄링 방법들, 즉 전통적인 Cyclic Polling 방법을 사용하는 알고리즘(Regular 알고리즘)과 [7]에서 제안된 알고리즘(HG 알고리즘), 그리고 새롭게 제안된 HUHG 알고리즘에 적용을 해보면 다음과 같다.

$$BW_{Regular}^{OH} = (BW^G + BW^R) \times N + BW^I \quad (2)$$

$$BW_{HG}^{OH} = (2 \times BW^G + BW^R) \times N + BW^I \quad (3)$$

$$BW_{HUHG}^{OH} = (2 \times BW^G + BW^R) \times N \quad (\text{단, EF sub-cycle} \geq BW^I) \quad (4)$$

$BW^G$ 은 보호 대역(guard time)을 위한 대역폭,  $BW^R$ 은 REPORT 메시지를 위한 대역폭,  $BW^I$ 는 idle time에 대한 대역폭을 의미한다. (3)번식의 HG 알고리즘과 (4)번식의 HUHG 알고리즘은 2개의 대역폭 할당 주기(bandwidth allocation cycle)를 가지기 때문에 (2)번식의 Regular 알고리즘에 비해 2배의 보호 대역(guard time)이 필요하다. 대역폭 사용효율에 큰 비중을 차지하는 idle time이 Regular 알고리즘과 HG 알고리즘은 항상 발생하지만, HUHG 알고리즘의 경우에는 EF sub-cycle이  $BW^I$ 보다 큰 경우에는 idle time이 전혀 발생하지 않는다.

그림 5는 주기에 따른 이론상 최대 throughput을 비교한 그림이다. ONU의 전체 개수는 16개, ONU와 OLT의 거리가 20 km, 즉 RTT는 200 us, idle time의 요소 중 DBA\_TIME을 무시하고 RTT만을 고려하였으며, EF sub-cycle이  $BW^I$ 보다 큰 상황이라 가정하고, 이 상황에서 주기를 변경하면서 위의 식들에 값을 적용하여 얻은 결과를 나타낸 그림이

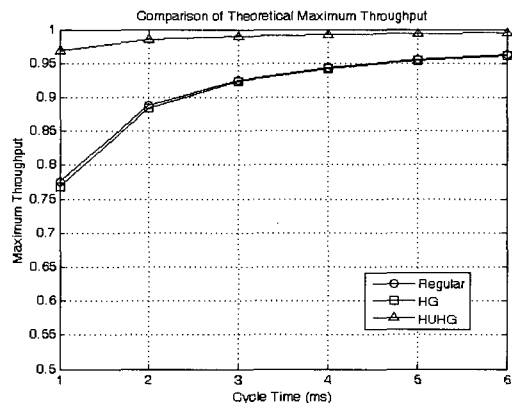


그림 5. 이론상의 최대 throughput 비교

다. HUHG 알고리즘은 다음 EF sub-cycle을 미리 할당하는 방법을 사용하여 idle time을 제거하였기 때문에, 다른 알고리즘들에 비해서 주기가 1 ms인 경우에는 약 15%정도, 2 ms인 경우에는 약 10%정도의 대역폭 사용효율이 향상되는 것을 보여주고 있다.

### 3.3 DBA 알고리즘

EF와 AF/BE클래스에 대한 대역폭 할당을 두 개로 분리하고, 다음 주기의 EF sub-cycle을 미리 할당하기 위해서는 이를 지원하는 새로운 DBA 알고리즘이 필요하다. HUHG 알고리즘을 지원하는 DBA 알고리즘을 다음과 같이 제시한다.

$$BW^{Avail} = BW^C - BW^{OH} \quad (5)$$

상향 전송흐름을 위한 한 주기에 사용 가능한 대역폭( $BW^{Avail}$ )은 한 주기에 해당하는 대역폭( $BW^C$ )에서 overhead의 대역폭( $BW^{OH}$ )을 뺀 것과 같고, overhead 대역폭은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$BW^{OH} = (2 \times BW^G + BW^R) \times N \quad (6)$$

$BW^G$ 은 보호간격을 위한 대역폭,  $BW^R$ 은 REPORT 메시지를 위한 대역폭,  $N$ 은 ONU의 개수를 의미한다. (6)은 전체 EF 클래스의 대역폭이 idle time의 대역폭보다 큰 경우이고, 만약 전체 EF 대역폭의 크기가 idle time의 대역폭보다 작다고 한다면, 아래의 식을 적용한다.

$$BW^{OH} = (2 \times BW^G + BW^R) \times N + (BW^I - \sum_{i=1}^N BW_i^{EF}) \quad (7)$$

$BW^I$ 는 idle time에 대한 대역폭이고,  $BW_i^{EF}$ 는  $i$ 번째 ONU에 대한 EF 클래스를 위한 대역폭이다.

ONU간의 공평성을 위해서 각 ONU별로 최소 보장 대역( $BW_i^{Min}$ )을 할당하여야 하는데, 이것은 ONU간의 weight에 비례하여  $BW^{Avail}$ 를 각 ONU에게 할당 한다.  $i$ 번째 ONU의  $BW_i^{Min}$ 은 아래와 같다.

$$BW_i^{Min} = \omega_i \times BW^{Avail}, \left( \sum_{i=1}^N \omega_i = 1 \right) \quad (8)$$

고정된 EF 클래스의 특성을 이용하여, EF 클래스를 위한 대역폭은 SLA 또는 Provision을 통하여 고정된 대역폭을 사용한다.

$$G_{i,k}^{EF} = BW_i^{EF}, G_{i,k+1}^{EF} = BW_i^{EF} \quad (9)$$

$BW_i^{EF}$ 은  $i$ 번째 ONU에 대한 EF 클래스를 위한 대역폭이고,  $G_{i,k}^{EF}, G_{i,k+1}^{EF}$ 은  $i$ 번째 ONU의  $k, k+1$  cycle에 대한 대역폭 승인(Grant)를 의미한다.

AF와 BE 클래스를 위해서는  $i$ 번째 ONU의  $k$ 번째 cycle을 위한 ONU의 REPORT( $R_{i,k}$ )에 대한 정보를 이용하여, 상향 전송흐름의 대역폭을 최대한 이용하여야 한다. 이를 위해서  $k$ 번째 cycle에서  $BW_i^{Min}$  보다 많이 요구한 ONU들의 초과로 필요한 양( $V_k^{Dem}$ )과  $BW_i^{Min}$  보다 적게 요구한 ONU들에 의해서 남은 양( $V_k^{Ex}$ )은 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$V_k^{Ex} = \sum_{j \in J} (BW_j^{Min} - G_{j,k}^{EF} - R_{j,k}) \quad (J: G_{j,k}^{EF} + R_{j,k} < BW_j^{Min}) \quad (10)$$

$$V_k^{Dem} = \sum_{l \in L} (G_{l,k}^{EF} + R_{l,k} - BW_l^{Min}) \quad (L: G_{l,k}^{EF} + R_{l,k} > BW_l^{Min}) \quad (11)$$

$V_k^{Ex}$ 가  $V_k^{Dem}$ 보다 큰 경우 또는  $R_{i,k}$ 의 양이  $BW_i^{Min}$ 에서  $G_{i,k}^{EF}$ 를 뺀 것 보다 작은 경우에는  $R_{i,k}$ 만큼 그대로 할당 승인한다. 그 밖의 나머지 경우에는  $V_k^{Ex}$ 의 대역을  $L$ 의 집합에 속하는 ONU들에게, 요구한 양에 비례하여 추가로 할당 승인을 한다.

$$G_{i,k}^{Add} = V_k^{Ex} \times \frac{V_{i,k}^{Dem}}{V_k^{Dem}} \quad (12)$$

$G_{i,k}^{Add}$ 는  $k$ 번째 cycle에서  $L$ 의 집합에 속하는 ONU에게 추가로 할당 승인되는 대역폭을 의미한다.

따라서, 위의 내용을 정리하면, 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\therefore G_{i,k}^{AF} = \begin{cases} R_{i,k} & , V_k^{Dem} \leq V_k^{Ex} \text{ or} \\ BW_i^{Min} - G_{i,k}^{EF} + G_{i,k}^{Add} & , R_{i,k} + G_{i,k}^{EF} \leq BW_i^{Min} \\ & , \text{Otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

$$\therefore G_{i,k}^{EF} = BW_i^{EF}, G_{i,k+1}^{EF} = BW_i^{EF} \quad (14)$$

### 3.4 Intra-ONU 스케줄러

HUHG 알고리즘이 보다 다양한 클래스의 QoS를 만족시키기 위해서는 각 ONU안에 서로 다른 클래스에게 차별화된 서비스를 제공해주는 스케줄러가

필요하다. HUHG 알고리즘에서 AF sub-cycle은 AF 클래스와 BE 클래스를 위한 주기이다. ONU들은 AF클래스와 BE 클래스에 해당하는 queue length의 합을 OLT에게 REPORT 메시지를 통해서 전달하고, REPORT를 받은 OLT는 DBA 알고리즘을 수행하여 AF 클래스와 BE 클래스 전체에 대해서 대역폭 할당 승인을 한다. 따라서, 각 ONU안에서는 AF클래스와 BE클래스를 차별화 하는 기능을 제공하는 스케줄러가 필요하다. [4] 또는 [12]에서 제시한 것처럼 클래스 간의 차별화 서비스를 제공하는 ONU 스케줄러가 HUHG 알고리즘과 같이 사용되어야 한다. 추후 ONU안의 스케줄러에 대한 보다 자세한 연구가 필요할 것으로 생각한다.

#### IV. 모의실험

본 논문에서 제안한 HUHG 알고리즘에 대한 분석과 성능을 확인하기 위해서, OPNET(version 10.5)을 이용하여 시뮬레이터를 구성하고, 기존의 알고리즘들과의 성능을 비교 분석하였다. 사용된 네트워크 구성도는 그림 6과 같다. OLT 1개와 20개의 ONU로 망을 구성하고 있으며, OLT와 ONU 사이의 상하향 전송 속도는 1 Gbps이고, OLT와 ONU들 사이의 거리는 20 km로, 이때의 RTT는 200 us가 된다. 모의실험에 사용된 환경변수들은 표 1과 같다.

좀더 WAN 상의 트래픽 환경을 모방하기 위해서, AF와 BE 클래스의 트래픽을 위한 패킷 사이즈의 분포는 [9]에서처럼 64, 570, 1518 bytes를 각각 60% 25%, 15%의 확률로 발생을 시켰다. 트래픽 분포(traffic distribution)는 exponential 분포를 사용하였으며, EF 클래스를 위해서는 고정된 64 byte의 CBR 트래픽을 사용하였다.

EF 클래스는 협대역(narrow band)이기 때문에, 전

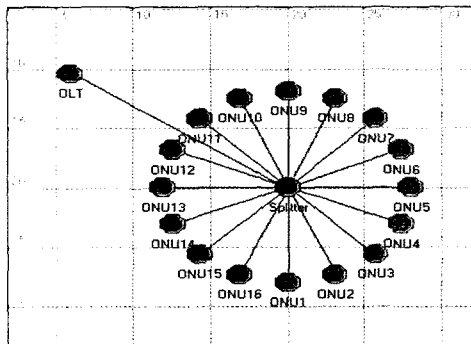


그림 6. 모의실험의 네트워크 구성도

표 1. 모의 실험 환경 변수들

Item	Value
EPON 링크 속도	1Gbps
ONU의 개수	16
OLT와 ONU의 거리	20km(RTT=200us)
보호대역(Guard Time)	1us
주기	2ms
REPORT 크기	64 bytes
EF 클래스의 트래픽 분포 및 크기	CBR, 64 bytes
AF/BE 클래스의 트래픽 분포 및 크기	64 bytes(60%), 570 bytes(25%), 1518 bytes(15%)
모의실험 시간	100(sec)

체 트래픽 부하의 20%를 EF 클래스 서비스를 위해 할당하였고, 나머지 80%는 AF, BE 클래스 서비스를 위해, 즉 AF 40%, BE 40%로 할당하였다. 따라서, 위의 상황에서는 EF sub-cycle이 idle time보다 크게 되기 때문에, HUHG 알고리즘에서는 idle time이 발생하지 않는다.

모의실험을 단순하게 하기 위해서, ONU간의 우선순위는 모두 같고, 모든 ONU가 똑같은 트래픽 부하가 발생한다고 가정하였고, ONU안의 스케줄러는 AF와 BE 트래픽을 6:4의 비율로 우선스케줄링을 하도록 하였다.

전체 트래픽 부하를 변화시키면서 network throughput, 각 클래스의 queueing delay, 그리고 EF 클래스의 delay variation을 측정하였다.

##### 4.1 Network Throughput

그림 7은 throughput에 대한 결과를 보여준다. 전체 트래픽 부하 0.8까지는 기존 알고리즘과 HUHG 알고리즘의 throughput이 서로 같으나, 트래픽 부하 0.9 이후부터는 HUHG 알고리즘이 더 많은 throughput을 제공함을 알 수 있다. HG알고리즘의 최대 throughput은 0.843, Regular 알고리즘은 약 0.846 인데 반해서, idle time을 제거한 HUHG 알고리즘의 최대 throughput은 0.937까지 지원할 수 있음을 알 수 있다. 따라서, HUHG알고리즘이 기존의 알고리즘들에 비해 약 10%의 throughput 향상을 제공할 수 있다.

표 2는 모의 실험결과와 이론상의 결과를 비교하였다. HUHG 알고리즘의 이론상의 throughput과 모의 실험 결과의 throughput의 결과를 비교해 보면,

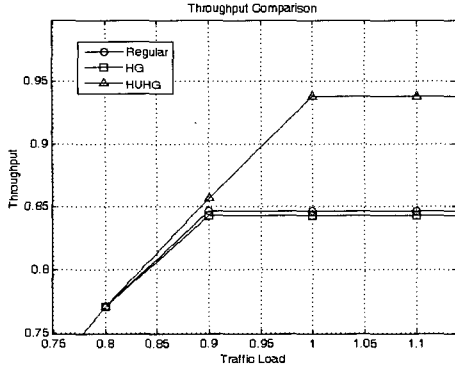


그림 7. 트래픽 부하에 따른 throughput의 변화 비교

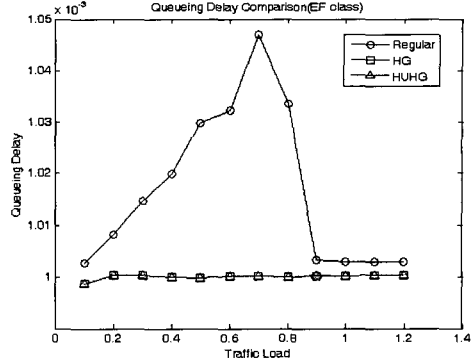


그림 8. EF 클래스의 평균 Queueing delay 비교

표 2. 이론상의 값과 실험결과의 값 비교

	HUHG	Regular	HG
Theoretical Results	0.984	0.888	0.884
Simulation Result	0.937	0.846	0.843
Difference	0.047	0.042	0.041

그 차이가 4.7% 발생하는 것을 볼 수 있다. 이것은 트래픽 부하가 높을 때 OLT가 ONU들이 요구한 만큼의 대역폭을 다 할당해주지 못해서 발생하는 fragmentation과 ONU안의 스케줄러가 AF 클래스와 BE 클래스에 대해서 6:4의 비율로 서비스를 하면서 발생하는 fragmentation 때문이다. EPON에서 GPON과는 달리 fragmentation을 지원하지 않는다.

#### 4.2 평균 패킷 Queueing Delay

그림 8은 EF 클래스의 queueing delay를 비교한 그림이다. Regular 알고리즘은 트래픽 부하가 증가함에 따라 queueing delay도 함께 증가를 하다가, 트래픽 부하 0.7 이후부터는 감소하다가 0.9이후로는 거의 일정한 모습을 보여준다. 이러한 현상은 AF와 BE클래스의 트래픽이 증가 되면서, EF 클래스에 대한 서비스 시작시간에 대한 변화가 많이 발생되지만, 트래픽이 포화된 상태에서는 EF 클래스에 대한 서비스 시작시간이 일정하게 되기 때문이다. 이렇게 트래픽 부하에 따라서 변하는 Regular 알고리즘에 비해 HG 알고리즘과 HUHG 알고리즘은 거의 변화가 없이 일정하게 EF 클래스를 서비스 하고 있음을 보여준다.

그림 9는 AF와 BE 클래스의 queueing delay를 비교한 그림이다. 트래픽 부하가 증가 할수록 AF와 BE의 클래스의 delay 간격이 더 벌어지는 현상을 볼 수 있는데, 이것은 ONU안의 스케줄러가 AF와

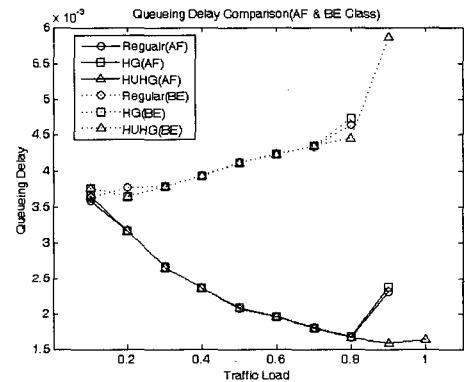


그림 9. AF/BE 클래스의 평균 Queueing delay 비교

BE 클래스를 6:4의 비율로 서비스하기 때문이다. Regular 알고리즘과 HG 알고리즘의 BE클래스는 트래픽 부하 0.9이상에서 무한히 증가하게 되지만, HUHG 알고리즘은 idle time을 제거함으로써 더 많은 트래픽을 서비스 할 수 있으므로, 트래픽 부하 0.9에서도 안정적으로 서비스되고 있음을 보여준다. AF클래스에서도 역시 HUHG 알고리즘이 더 높은 트래픽 부하(0.9, 1.0)에서도 안정적으로 서비스되고 있음을 보여준다.

#### 4.3 EF클래스의 Delay Variation

그림 10은 트래픽 부하 0.7인 상황에서 ONU8의 EF 클래스의 queueing delay의 시간에 따라 변하는 모습을 보여준다. Regular 알고리즘은 시간에 따라 delay가 변하지만, HG 알고리즘과 HUHG 알고리즘은 거의 변동이 없을 보여 준다. 이러한 현상의 이유는 HG 알고리즘과 HUHG 알고리즘의 EF 클래스를 위한 분리된 EF sub-cycle 때문이다.

그림 11은 트래픽 부하 0.7인 상황에서 ONU8의 EF 클래스의 delay variation을 비교한 그래프이다.



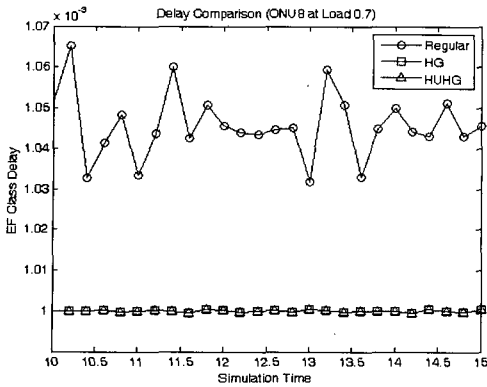


그림 10. 트래픽 부하 0.7에서 시간에 따른 EF 클래스의 delay 변화 비교

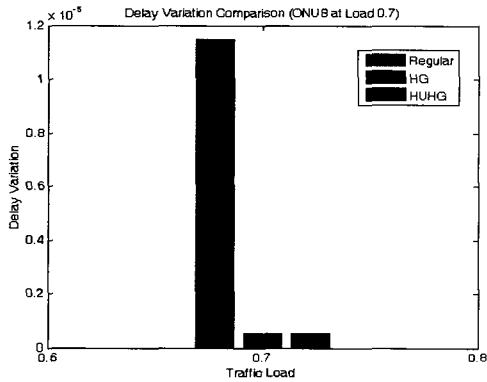


그림 11. 트래픽 부하 0.7에서의 EF클래스의 delay variation 변화

Regular 알고리즘은 queueing delay가 시간에 따라 변동하기 때문에, 높은 delay variation 값을 가지게 된다. 반면에 HG 알고리즘과 HUHG 알고리즘은 분리된 EF sub-cycle 때문에 Regular 알고리즘에 비해 매우 적은 delay variation을 보여준다.

### V. 결론

본 논문에서는 idle time을 제거하여, 높은 대역폭 사용효율을 얻을 수 있을 뿐만 아니라, EF 클래스의 서비스를 향상 시키는 HUHG 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 EF와 AF/BE 클래스에 대한 대역폭 할당 주기를 분리하여, EF 클래스의 패킷 delay와 delay variation에 대한 보장을 강화하였다. OLT에서는 ONU 간의 우선 비율에(weight)에 따른 최소 대역폭(minimum rate)를 보장하여 ONU 간의 공평성을 보장하였고, AF와 BE 클래스간의 서비스 우선순위는 intra-ONU Scheduler에 의해서 구

현이 되었다. 고정된 EF sub-cycle의 특성을 이용하여, 다음 주기의 EF sub-cycle을 미리 할당하여 idle time을 제거하거나 또는 줄일 수 있었다. Idle time의 제거로 인해서 높은 network throughput을 얻을 수 있고, 기존의 HG 알고리즘의 특성을 그대로 이어받아서, Regular 알고리즘에 비해 EF 클래스의 패킷 delay 및 delay variation도 향상되었을 확인해 보았다.

서로 다른 클래스에 대한 Qos 지원, ONU간의 공평성 보장, 그리고 대역폭 사용효율은 EPON 네트워크를 설계하고 운영할 때에 있어서 중요한 위치를 차지하고 있다. 제안된 알고리즘은 위의 세 가지 요건을 모두 고려한 알고리즘으로 EPON이 적용되는 광대역 가입자 망에서 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

실험결과에서 볼 수 있듯이, EPON에서는 fragmentation을 지원하지 않기 때문에 ONU안의 스케줄러가 클래스별로 차별화 서비스를 하면서 overhead가 발생되는데, 추후 이 부분에 대한 연구와 ONU안의 스케줄러에 대한 연구가 필요할 것으로 생각한다.

### 참고 문헌

- [1] M. P. McGarry, M. Maier, M. Reisslein, "Ethernet PONs: A Survey of Dynamic Bandwidth Allocation (DBA) Algorithms", IEEE Optical Communications, pp. 8-15, Aug. 2004.
- [2] G. Kramer, B. Mukherjee, and G. Pesavento, "Interleaved polling with adaptive cycle time(IPACT): a dynamic bandwidth distribution scheme in an optical access network", IEEE Communications Mag., vol. 40, pp. 74-80, Feb. 2002.
- [3] IEEE 802.3ah Task Force Home Page. [Online] Available: <http://www.ieee802.org/3/efm>
- [4] N.Ghani, A.Shami, C.Assi, and M. Y. A. Raja, "Intra-ONU bandwidth scheduling in ethernet passive optical networks," IEEE Commun. Lett. vol. 8, no. 11, pp. 683-686, Nov. 2004.
- [5] C.Assi et al., "Dynamic bandwidth allocation for quality-of-service over ethernet PONs," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 21, pp.

1467-1477, Nov. 2003.

[6] F. An et al., "A new dynamic bandwidth allocation protocol with quality of service in ethernet-based passive optical networks," in Proc. International Conference on Wireless and Optical Communication (WOC 2003), Banff, Canada, Jul. 2003.

[7] Shami A., Xiaofeng Bai, Assi C.M. and Ghani N., "Jitter performance in ethernet passive optical networks", JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, vol. 23, no. 4, April. 2005.

[8] Miyoshi, H., Inoue, T. and Yamashita, K., "QoS-aware dynamic bandwidth allocation scheme in Gigabit-Ethernet passive optical networks", IEEE International Conference, vol. 1, pp.90-94, June. 2004.

[9] WAN packet size distribution (<http://www.nlanr.net/NA/Learn/packetsizes.html>)

[10] ITU-T Recommendation G.983.4, "A broadband optical access system with increased service capability using dynamic bandwidth assignment", Nov. 2001.

[11] Kye-Hyun Ahn, Kyeong-Eun Han and Young-chon Kim, "Hierarchical Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm for Multimedia Services over Ethernet PONs", ETRI Journal, vol. 26, no.4, pp.321-330, Aug. 2004.

[12] K. S. Kim, "On the Evolution of PON-based FTTH Solutions," Info. Sci., vol. 149, no. 1-3, pp. 21-30, Jan. 2003.

[13] G. Kramer et al., "Supporting Differentiated Classes of Service in Ethernet Passive Optical Networks," J. Opt. Net., vol. 1, no. 8, pp. 280-98, Aug. 2002.

[14] L. Zhang et al., "Dual DEB-GPS Scheduler for Delay-Constraint Applications in Ethernet Passive Optical Networks," IEICE Trans. Commun., E86-B, no. 5, pp. 1575-84, May 2003.

[15] S.-I. Choi and J.-D. Huh, "Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm for Multimedia Services over Ethernet PONs," ETRI J., vol. 24, no. 6, pp. 465-68, Dec. 2002.

[16] A. Shami, X. Bai, C. Assi, and N. Ghani, "Quality of service in two stage ethernet

passive optical access networks," in Proc. IEEE ICCCN, Chicago, IL, Oct. 2004.

[17] Jing Xie, Yuming Jiang, "A Dynamic Bandwidth Allocation scheme for Differentiated Service in EPONs", IEEE Optical Communications, pp.32-39, August 2004.

[18] Glen Kramer, "Ethernet Passive Optical Networks", McGraw-Hill

김 준 석 (Junseog Kim)

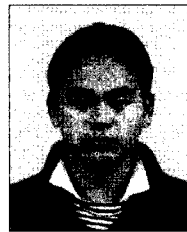
정회원



1997년 2월 전국대학교 전자공학  
학과 졸업  
2004년 2월~현재 연세대학교  
전기전자공학부 석사과정  
1997년~2005년 삼성전자(주)  
책임연구원  
<관심분야> Scheduling Algorithm,  
PON, Network Management, QoS Management

연 훈 재 (Hunje Yeon)

정회원



2002년 8월 연세대학교 전자공  
학과 졸업  
2004년 8월 연세대학교 전자공  
학과 석사  
2004년 9월~현재 연세대학교  
전기전자공학부 박사과정  
<관심분야> Wireless MAC Pro-  
tocol, Packet Scheduling, Wireless Mesh  
Networks

김 석 규 (Seoggyu Kim)

정회원



1990년 2월 연세대학교 전자공  
학과 졸업  
1992년 8월 연세대학교 전자공  
학과 석사  
1997년 8월 연세대학교 전자공  
학과 박사  
1997년 9월~2004년 3월 SK 텔  
레콤 선임연구원

2004년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학과 IT연구  
단 연구 교수  
<관심분야> 유,무선 통합망에서 QOS Architecture,  
B3G Convergence Network, TCP 성능 분석, 무선  
링크상의 TCP 성능 향상 방안, IP기반 유무선 통합  
네트워크

이재용 (Jaiyong Lee)

정회원



1977년 연세대학교 전자공학과  
졸업

1984년 미국 Iowa 주립대 컴퓨터  
공학 석사

1987년 미국 Iowa 주립대 컴퓨터  
공학 박사

1977년~1982년 국방과학연구소

연구원

1987년~1994년 포항공과대학교 전자계산학과 부교  
수

1994년 8월~현재 연세대학교 전기전자공학부 교수  
<관심분야> QoS Management/Protocol, 차세대 이동  
통신망 프로토콜 : MAC, Mobility Management,  
WTCP, Sensor Network