

# CDMA 변조방식을 이용한 TDM-PON의 고장 ONU 검출

준희원 최병철\*, 박재욱\*, 정준희\*, 종신회원 박영일\*

## Detection of Fault ONUs in TDM-PON Using CDMA Modulation Scheme

Byungchul, Choi\*, Jaek Park\*, Junhoi Chung\* *Associate Members,*  
Youngil Park\* *Lifelong Member*

### 요약

TDM-PON에서는 ONU 중 한 개가 고장을 일으켜 신호를 계속 전송한다면 PON 전체의 통신이 불가능하게 된다. 본 논문에서는 이런 환경에서 고장 위치를 찾아내는 방식을 제안하였다. 고장 ONU가 계속하여 신호를 전송하면 TDM 신호전송이 불가능하게 되므로 본 연구에서는 잡음에 강한 CDMA 전송을 이용하여 정상동작 ONU와 고장 ONU를 분리하는 방법을 제안하고, 이를 위한 알고리즘을 검증하였다.

**Key Words** : TDM-PON, Fault detection, CDMA

### ABSTRACT

TDM-PON has a disadvantage that entire PON system gets into trouble when only one ONU is out of order and sends optical signal constantly. This paper suggests a scheme to find the fault location. TDMA is impossible when upstream traffic is interrupted by continuous wave signal from a troubled ONU. Therefore, CDMA coding is introduced in separating fault ONUs, and detection algorithm is verified.

### 1. 서론

Gigabit Ethernet Passive Optical Network (GE-PON), Broadband PON (BPON), Gigabit PON (GPON) 등 Time Division Multiplexing (TDM)-PON은 전 세계에서 사용자 수가 급격히 증가하고 있다. 우리나라에서도 2007년에만 GE-PON 약 100만 회선의 추가 설치가 예상되고 있다. 향후 IP-TV가 본격 서비스된다면 TDM-PON은 더욱 많이 이용될 것으로 예상된다. TDM-PON이 이처럼 많이 이용될 수 있었던 것은 모든 Optical Network Unit (ONU)이 같은 파장대를 이용하면서 시간을 나누어 사용하는 TDM 기반의 Multi-point Control Protocol

(MPCP) 방식이 설치비용을 최소화할 수 있었기 때문이다<sup>[1]</sup>. 그러나 트리(tree)구조의 PON에서 TDM 기반 통신의 신뢰성은 WDM 기반에 비해 취약하다. WDM-PON의 경우 각 ONU는 송수신에 고유 파장을 이용하기 때문에 특정 ONU에 고장이 발생하더라도 다른 ONU에 영향을 미치지 않는다. 그러나 TDM-PON의 경우 한 개의 ONU가 오동작을 하여 프로토콜을 무시하고 임의로 신호를 발생하는 경우 그림 1과 같이 다른 ONU 신호에 잡음이 됨으로써 모든 ONU는 전송이 불가능하게 된다. 또한 Optical Line Terminal (OLT)에서 각 ONU를 제어하는 기본 프로토콜인 MPCP 역시 고장 ONU가 전송하는 신호로 인해 사용이 불가능하다.

\* 본 연구는 국민대학교 교내연구비 지원으로 수행되었음.

\* 국민대학교 전자공학부 광대역통신실험실(ypark@kookmin.ac.kr)

논문번호: KICS2007-07-328, 접수일자: 2007년 7월 25일, 최종논문접수일자: 2007년 11월 16일

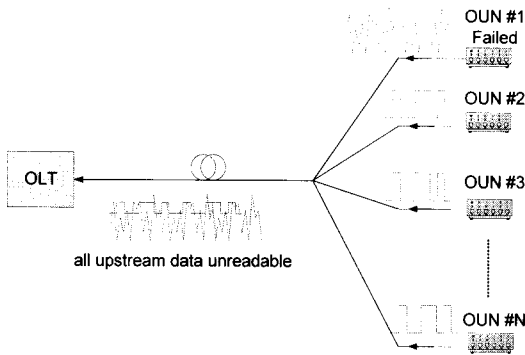


그림 1. ONU 고장 및 PON 전체 상황 통신의 중단

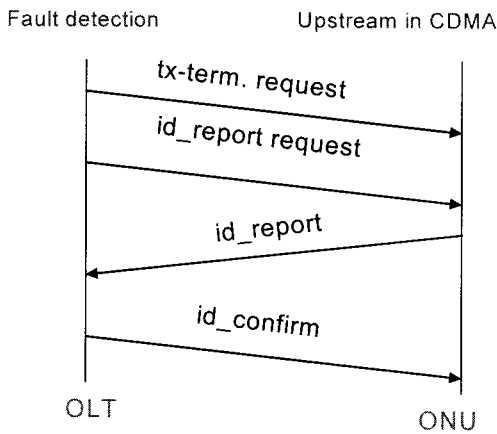


그림 2. 고장 ONU를 찾기 위한 알고리즘

PON 시스템에 위와 같은 고장이 발생하여 전체 PON 시스템이 동작 불능의 상태가 되는 경우 빠른 시간 내에 정상 ONU와 고장 ONU를 찾아내고, 고장 ONU를 PON 시스템에서 분리하는 작업이 필요하다. PON 시스템을 상시 감시하기 위해 파장가변 레이저를 이용한 Optical Time Domain Reflectometry (OTDR) 방법이 제안되었다<sup>2)</sup>. 그러나 이 방식은 각 OTDR의 선로 감시용이며 ONU의 동작 상태를 감시할 수는 없다. 또한 광대역 광원을 이용해서 WDM-PON의 사고를 감시하기 위한 방법이 제안되었다<sup>3)</sup>. 그러나 지금까지 TDM-PON에서의 ONU 사고를 감시하기 위한 방식은 연구된 적이 없다.

본 논문에서는 TDM 전송 방식이 사용될 수 없는 ONU 고장 상황에서 CDMA 접속 방식을 이용함으로써 고장 ONU를 발견하는 방법을 제안한다. TDM 전송에서는 한 ONU가 규칙을 어기고 신호를 연속적으로 전송할 때 다른 모든 ONU의 전송이 불가능해지나, CDMA 접속을 하는 경우 이러한 한

경에서도 신호 전송이 가능하다. 즉, CDMA 경우 수신단이 주위의 큰 잡음 환경에서도 신호를 정상적으로 수신할 수 있기 때문에 고장 ONU를 찾아내는데 효과적이다.

## II. 제안된 고장 검출 방식의 원리

TDM-PON의 특정 ONU에 고장이 발생하여 프로토콜을 무시하고 연속적으로 광신호를 발생하는 경우 다른 모든 ONU의 상향신호에 잡음이 더해지게 되므로 OLT는 다른 ONU의 신호 수신에 불가능하게 된다. 또한 신호 중에 포함된 차기 사이클의 전송패킷 'Request' 신호도 수신을 못하며 따라서 OLT는 각 ONU에 더 이상 'Grant' 신호를 할당할 수도 없고, 모든 상황 통신은 중단된다. 이런 상황이 되면 OLT는 이를 '고장 상황'으로 판단하고 그림 2와 같은 순서로 고장위치 판단 알고리즘을 시작한다. 첫 번째로 모든 ONU에 현재 대기 중인 패킷들의 송신 중단을 요청한 후, 각 ONU의 ID 전송을 요구한다. ONU 고장 상황에서 상향 전송은 불가능하지만 하향 신호의 경우 신호 전송이 가능하다. OLT의 요구에 따라 각 ONU는 자신의 고유 ID를 전송한다. 이때 ONU의 데이터 전송에는 CDMA 코딩을 이용하며, OLT는 CDMA 디코딩을 통해 정보를 얻는다. 모든 동작 ONU의 정보를 얻은 후 OLT는 확인 신호를 각 ONU에 알린다.

CDMA 인코딩을 위해 그림 3과 같이 각 ONU는 자신의 ID 데이터에 길이  $L=2^{42}-1$ 의 long-PN 코드를 곱하여 전송한다.

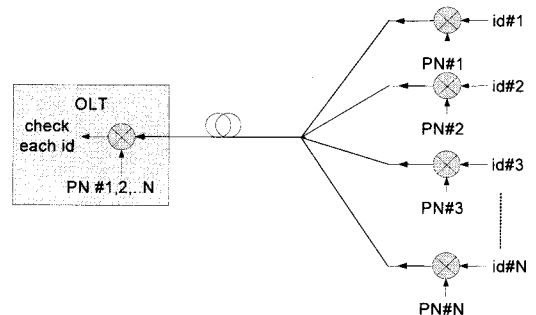


그림 3. CDMA 변조를 이용한 각 ONU의 ID 전송

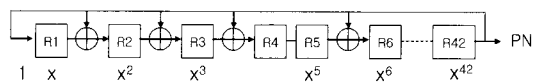


그림 4. Long-PN 발생을 위한 디지털회로 구성

본 연구에 이용한 long-PN 코드의 수식은 식 (1)과 같고 이의 구현을 위한 디지털 회로의 구성을 그림 4에서 보인다.

$$g(x) = x^{42} + x^{35} + x^{33} + x^{31} + x^{27} + x^{26} + x^{25} + x^{22} + x^{21} + x^{19} + x^{18} + x^{17} + x^{16} + x^{10} + x^7 + x^6 + x^5 + x^3 + x^2 + x^1 + 1 \quad (1)$$

이렇게 long-PN을 적용하는 이유는 다른 ONU가 임의로 ID를 도용하지 못하도록 하기 위함이다. 각 ONU는 동일한 수식의 PN 코드를 이용하되 고유의 PN-Mask를 이용함으로써 오프셋을 조정한다. PN-Mask에는 ONU의 ID를 이용함으로써 ONU를 상호 식별한다.

OLT는 각 ONU의 PN 오프셋을 이용해서 차례로 각 ONU의 PN 코드에 동기를 맞추는 후 ID를 수신한다. 이 과정을 식 (2)에서 나타내고 있다.

$$\begin{aligned} ONU(N,i) &= ID(N) \oplus PN(N,i) \\ UP(i) &= ONU(1,i) + ONU(2,i) + \dots + ONU(N,i) \\ OLT(k) &= \sum_{i=1}^n UP(i) \oplus PN(k,i) = ID(k) \end{aligned} \quad (2)$$

위 과정을 기 등록된 모든 ONU에 대해 수행을 하면 현재 정상 동작을 하고 있는 모든 ONU를 파악할 수 있고, 따라서 이를 제외하면 현재 등록되지 않은 ONU 혹은 고장 ONU를 판단할 수 있게 된다.

### III. 송수신 환경 및 SNR 분석

동시 전송 가능한 ONU의 개수는 여러 가지 요인에 의해 제한된다. OLT Photo-detector (PD)의 포화, CDMA 전송 시의 interference 잡음, optical beat 잡음 등이 그것이다. Optical beat 잡음의 경우 ONU에서 사용하는 laser diode (LD)의 파장이 넓은 영역에 걸쳐 랜덤하게 존재하기 때문에 문제가 될 가능성이 매우 낮으므로<sup>[4]</sup> 본 연구에서는 이 잡음의 영향은 생략하고, PD 포화 및 ONU간 간섭 잡음의 영향에 대해서만 분석한다.

낮은 광출력의 ONU를 사용 가능하도록 하기 위해 OLT 수신단에는 Avalanche PD (APD)를 이용하며 이의 overload 값은 약 -4.5 dBm 정도이다. 즉, 수신 광세기가 이 값을 초과하는 경우 신호는 포화되어 정상적으로 데이터를 읽을 수 없다. TDM-PON은 한 순간에 한 개의 ONU만 광신호를

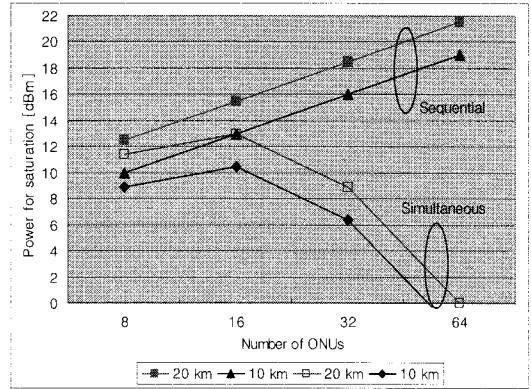


그림 5. OLT PD의 포화를 일으키는 고장 ONU 광세기

전송하도록 설계된 시스템이다. 따라서 여러 개의 ONU가 동시에 동작하고, 이에 더하여 고장 ONU가 큰 광신호를 전송하는 경우 다음 식 (3)을 만족하지 못하면 OLT PD는 포화되어 ONU 신호 수신 이 불가능하게 된다.

$$P_{OL} \geq [M \cdot P_{ONU} + P_{fault}] - L_{fib} - L_{conn} - L_{coup} \quad (3)$$

식에서  $P_{OL}$ 는 수신기의 overload 광세기,  $M$ 은 전체 ONU 개수,  $P_{ONU}$ 는 각 ONU의 광세기,  $P_{fault}$ 는 고장난 ONU에서 전송하는 광세기,  $L_{fib}$ 는 파이버 손실,  $L_{conn}$ 은 커넥터 손실,  $L_{coup}$ 은 커플러 손실을 의미하며, 커플러 손실은 분기손실 및 초과(excess) 손실의 합으로 구할 수 있다. 그림 5는 OLT의 APD가 포화되지 않기 위해서 허용 가능한 고장 ONU 최대 광세기를 보이고 있다. 계산에 사용한 조건은 APD overload=-4.5 dBm, 파이버 손실=0.25 dB/km, 총 커넥터 손실=2 dB, 커플러 초과손실=1.0 dB 등과 같다. 또한 커플러 분기수는 ONU 개수와 동일하며, ONU 광세기는 16분기에서 0 dBm을 기준으로 하고 분기수에 비례하여 증가한다고 가정하였다. 그림에서 'simultaneous'는 모든 ONU를 동시에 전송하도록 함을 의미하며, 'sequential' 검출은 ONU를 순서대로 동작시켜 정상동작 여부를 점검하는 방식을 의미한다. TDM-PON에서는 분기수가 늘어나면 ONU 광세기를 키움으로써 OLT에 도달하는 광세기는 분기수에 상관없이 일정한 크기에 도달하도록 해야 한다. 따라서 분기수가 증가하고 동시에 모든 ONU가 신호를 전송하면 OLT 도달 광세기는 분기수에 비례하여 증가하며, 'simultaneous' 상황에서는 상대적으로 적은 광세기의 고장 ONU가 포화

를 일으키게 된다.

그림 5의 결과를 보면 32분기 이상의 경우 고장 ONU 광세기가 6 dBm 이상이 되면 포화가 되는 것을 볼 수 있다. 따라서 고장 ONU가 보낼 수 있는 최대 광세기를 고려하여 순차적 전송 혹은 동시 전송을 결정해야 할 것이다. 한편, 각 ONU에서 전송하는 신호들은 다른 채널의 CDMA 수신에 간섭 (interference) 잡음으로 동작하며, 따라서 동시 전송 ONU 개수 및 이때의 파워효율을 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다<sup>5)</sup>.

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{(M-1)} \frac{W}{R} \quad (4)$$

이 때  $M$ 은 ONU 개수,  $W$ 는 chip rate,  $R$ 은 bit rate에 해당하며,  $W/R$ 은 처리이득 (processing gain) 이라 불린다. 위 파워 효율을 이용한 BER값은 다음 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$P_b = \text{erf} \left( \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi E_b/N_0}} e^{-E_b/2N_0} \quad (5)$$

그림 6에서는 ONU 개수 및 처리이득에 따른 BER의 변화를 보이고 있다. 이 때 모든 ONU의 광세기는 동일하다고 가정하였다. 식(4)와 같이 ONU 개수가 증가하면 SNR이 나빠지고, 이는 다시 식(5)의 BER 값을 나빠지게 한다. 그러나 처리이득이 클수록 BER 상승은 느려지는 것을 그림 6에서 확인할 수 있다. 즉, BER=10<sup>-4</sup>를 목표로 하는 경우 W/R=100인 경우 동시 전송 가능한 ONU 개수는 8개인 반면, W/R=400인 경우 ONU를 30개 정도까지 수용할 수 있다.

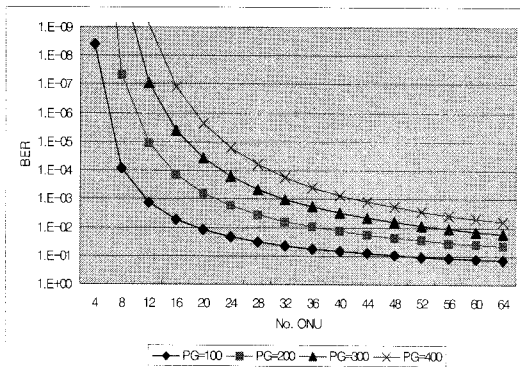


그림 6. ONU 개수 및 처리이득에 따른 BER 변화

#### IV. 모의실험 결과

본 연구에서 제안한 고장위치 검출 방식의 활용 가능성을 확인하기 위해 Matlab을 이용한 모의실험을 수행하였다. 즉, 처리이득(W/R) 및 ONU 개수를 변화시키면서 고장 ONU 존재 시 다른 ONU의 전송 데이터 복원 가능성을 살펴보았다.

그림 7은 16개 ONU가 각기 다른 오프셋을 갖는 주기 2<sup>42</sup>-1의 long-PN 코드를 전송하며, W/R=400인 경우 특정 ONU PN 코드의 자기상관 (autocorrelation) 값을 보이고 있다. 16개 ONU의 동시 전송 환경에서도 자기상관 값은 매우 크게 나타나고 있으며, 따라서 OLT 수신단에서 각 ONU의 동기검출에 문제가 없음을 알 수 있다.

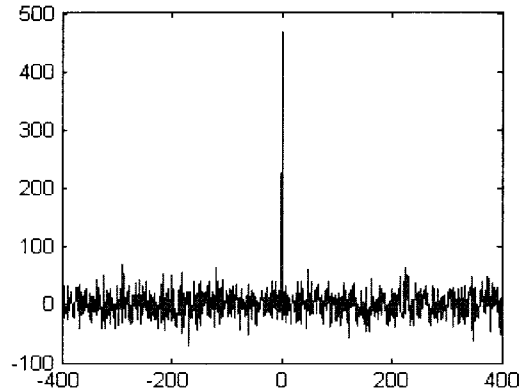


그림 7. 16개 ONU 전송, W/R=400 경우 long-PN 코드 자기상관값

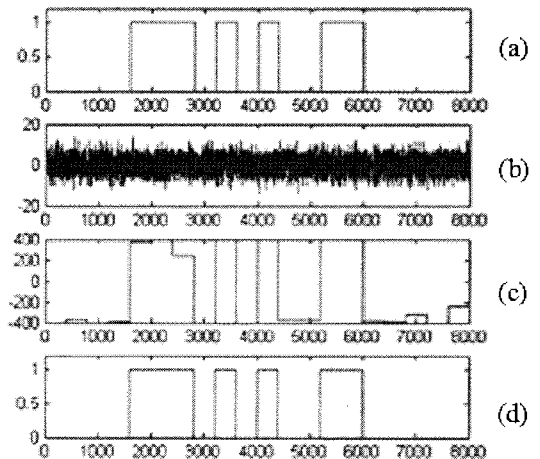


그림 8. PG=400, ONU개수=16인 경우 CDMA 번복조 과정 (a) ONU-1의 전송 ID (b) 16개 ONU 송신신호 합 (c) OLT PD에서의 CDMA 디코딩신호 (d) 복구된 ONU-1의 ID

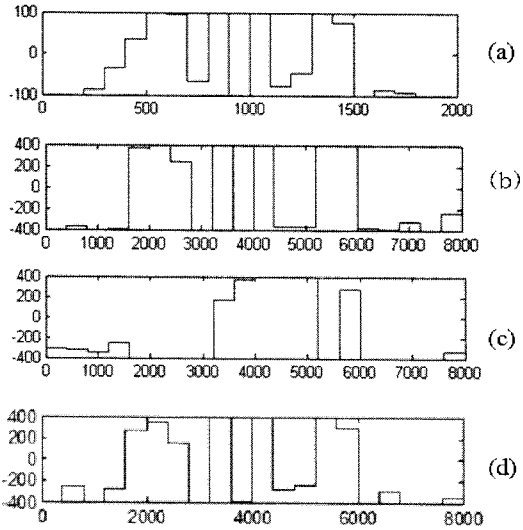


그림 9. 여러 전송 환경에서의 CDMA 디코딩 신호들  
 (a) PG=100, ONU개수=16 (b) PG=400, ONU개수=16  
 (c) PG=400, ONU개수=32 (d) PG=400, ONU개수=16, ONU 광세기 3배 크기의 펄스 잡음 존재

그림 8은 위 환경에서의 데이터 복원 과정을 보이고 있다. 그림 8(a)는 ONU-1에서 전송하는 2 byte의 2진 데이터를 나타내며, 16개의 ONU에서 전송하는 데이터에 각각의 PN-코드를 곱하고 이를 더한 값을 8(b)에서 보이고 있다. 한편, 8(c)에서는 ONU-1의 PN 신호와 동기가 맞는 PN을 OLT 수신 단에서 곱하고 이를 매 비트 구간마다 적분한 값을 나타내고 있다. 이 때 '0' 값을 decision level로 하여 최종 결정을 한 결과 송신한 ID와 동일한 값을 얻은 것을 8(d)에 보이고 있다. 그림 9에서는 환경 변화에 따른 CDMA 디코딩 신호를 보인다. 그림 9(a)는 W/R=100인 경우이며 ONU 개수 16인 경우 발생하는 잡음이 W/R=400의 경우(그림 9(b)) 에 비해 매우 큰 것을 볼 수 있다. 9(c)는 W/R=400의 경우 ONU 개수가 32까지 증가하더라도 크게 문제가 되지 않음을 보인다. 또한, 9(d)는 고장 ONU가 일반 ONU 3배 광세기의 펄스신호를 연속적으로 발생하는 상황에서도 제대로 신호가 수신되고 있는 것을 보이고 있다.

### V. 결 론

본 연구를 통하여 CDMA 코딩을 이용해서 PON의 고장 위치를 판단하는 방법을 제안하였다. Long-PN 코드를 각 ONU의 코딩에 활용함으로써 고장 ONU로 인해 TDMA 접속이 불가능한 상황에서 OLT는

각 ONU의 상태를 점검할 수 있었다.

처리이득을 증가할수록 더욱 많은 수의 ONU를 동시 전송할 수 있지만, 이 경우 데이터 전송률은 낮아진다. 고장위치 검출의 경우 각 ONU는 자신의 ID만을 전송하므로 요구 전송률은 매우 낮으며, 따라서 처리이득을 높임으로써 동시전송 ONU 개수 및 정확도를 높일 수 있었다. 처리이득을 400으로 하는 경우 약 30개의 ONU를 BER=10<sup>-4</sup>로 전송할 수 있음을 알았다.

본 연구에서 제안한 CDMA 접속을 제공하기 위해서는 각 OLT 및 ONU에서는 TDMA 접속방식과는 별개의 회로를 가지고 있어야 하므로 회로의 복잡도가 증가하게 된다. 그런데 CDMA 접속을 이용해서 전송하는 데이터는 각 ONU의 ID 및 연결 상태만을 포함하는 매우 낮은 속도의 신호이므로 동기 포착회로를 포함한 수신회로의 구현은 높은 전송 속도 CDMA 시스템에 비해서는 상대적으로 구현이 수월하다.

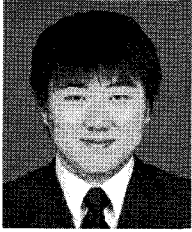
본 연구를 통해 제안된 CDMA 방식은 고장 ONU를 발견할 수 있도록 해주고, 고장 ONU 환경에서도 낮은 전송율의 상향 통신을 가능하게 함으로써 PON 시스템의 안정성을 높이는 데 기여할 수 있을 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] G. Kramer, "Mthernet Passive Optical Networks", McGraw Hill, 2005.
- [2] S. Hann, J. Yoo and C. Park, "Monitoring technique for a hybrid PS/WDM-PON by using a tunable OTDR and FBGs", Measurement Science and Technology, pp.1070-1074, 2006.
- [3] Park, D.K. Jung, H.S. Shin, D.J. Shin, S. Hwang, Y. Oh and C. Shim, "Optical fault monitoring method using broadband light source in WDM-PON", Electronics Letters, Vol. 14, No. 4, Feb. 2006.
- [4] 안병구, 조철희, 박영일, "CDMA -PON을 이용한 가입자 통신망에 관한 연구", 한국통신학회논문지 Vol. 26, No. 12B, pp. 1629-1636, 2001.12.
- [5] Samuel C. Yang, "CDMA RF System Engineering", Artech House Publishers, 1998.

**최 병 철 (Byungchul Choi)**

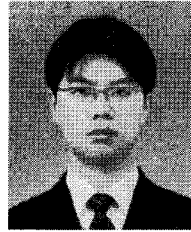
준회원



2007년 2월 국민대학교 전자정  
보통신공학부(학사)  
2007년 3월~현재 국민대학교 대  
학원 전자공학과(석사과정)  
<관심분야> 광가입자망, 광전송  
장치, WDM-PON, GPON, 이  
동 IP네트워크

**정 준 회 (Junhoi Chung)**

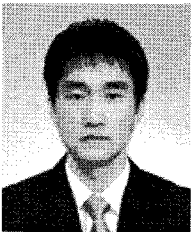
준회원



2006년 2월 국민대학교 전자정  
보통신공학부(학사)  
2006년 8월~현재 국민대학교 대  
학원 전자공학과(석사과정)  
<관심분야> 광가입자망, 광전송  
장치, WDM-PON, EPON,  
GPON, 이동 IP네트워크

**박 재 욱 (Jaek Park)**

준회원



2007년 2월 국민대학교 전자정  
보통신공학부(학사)  
2007년 3월~현재 국민대학교 대  
학원 전자공학과(석사과정)  
<관심분야> 광가입자망, 광전송  
장치, WDM-PON, EPON,  
GPON, 이동 IP네트워크

**박 영 일 (Youngil Park)**

종신회원

한국통신학회논문지 32권 7호 참고