

# 가우스 및 원단누화 잡음환경에서의 디지털가입자라인의 성능에 관한 연구

정희원 김 용 환\*, 조 평 동\*\*, 강 영 흥\*\*\*

## A Study on the Performance of Digital Subscriber Line in Gaussian and Far-end Crosstalk Noises Environment

Yong-Hwan Kim\*, Pyung-Dong Cho\*\*, Young-Heung Kang\*\*\* *Regular Members*

### 요 약

최근 전송용량의 증대 및 가입자 수용용량의 증대에 따른 초고속 가입자선로 구현의 한 방안으로서 디지털가입자라인의 도입이 국내외적으로 추진되고 있는 실정이다. 이에 디지털가입자라인에 대한 국내표준화가 이루어지고 있지만, 이에 대한 성능분석은 주로 측정치에 의한 실험치에 국한되고 있다. 따라서 본 연구에서는 이론해석과 시뮬레이션 기법 등을 제시하여 디지털가입자라인의  $S/N$  성능 및  $BER$  성능 등을 분석하였으며, 특히  $S/N$  성능으로부터 채널용량을 구해 일본에서 측정된 실험치와 비교하였다. 본 해석결과 이론치는 측정치의 상한 및 하한의 중심에 놓여 그 타당성이 입증되었으며,  $S/N$  성능은 전송거리가 길어지면 원단누화의 영향보다는 가우스잡음에 의해 지배적이고, 주파수가 높아지거나 전송거리가 길어짐에 따라  $BER$  성능은 상당히 열화함을 알 수 있었다.

한편, 본 해석의 결과는 향후 국내 디지털가입자라인의 표준화 제정에 기본적인 데이터로서 활용될 수 있을 것이다.

### ABSTRACT

A digital subscriber line(DSL) has been introduced recently in home and abroad to deliver high speed Internet access services with the large channel capacity and the sheer number of subscribers. It has been processed to standardize the DSL in our country, but the analysis on the DSL is limited to the field trials. Therefore, in this paper we have proposed the techniques related to analysis on the performances of DSL, and estimated its  $S/N$  and  $BER$  performances. In particular, the channel capacity gained from  $S/N$  values was compared with the field trial results in Japan and it was known that the results from this study was proved to be valid. Also, the  $S/N$  performance of DSL is degraded due to only Gaussian noise, and  $BER$  performance degraded greatly with both the higher frequency and the longer distance.

However, results of this analysis can be used as the basic data in specifying the standardization of DSL in the future.

### 1. 서 론

오늘날 소규모 사업 및 홈(home) 가입자들은 고속 인터넷 액세스 및 비디오 회의와 같은 양방향

광대역 서비스 제공을 원하고 있으며, VOD(Video On Demand) 또는 디지털 TV와 같은 단방향 서비스도 동시에 제공되기를 희망하고 있다. 문제는 홈까지 적어도 수 km까지 채널을 제공해야 하며, 채널에 접속하는 가입자의 수가 상당히 많다는 점이

\* 한국전자통신연구원 기술기준연구팀(yongkim@etri.re.kr) \*\* 한국전자통신연구원 기술기준연구팀(pdcho@etri.re.kr)  
\*\*\* 군산대학교 정보통신공학과(yhkgang@kunsan.ac.kr)  
논문번호 : 99434-1027, 접수일자 1999년 10월 27일

다. 이러한 문제점을 해결하는 데는 여러 가지 방법이 있지만, 그 중에서도 최근 가입자라인의 다운스트림(downstream)에 수 Mb/s의 고속전송이 가능한 ADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line), 그리고 300m 범위에서의 약 52Mb/s 고속 데이터 전송이 가능한 VDSL(Very-high-rate DSL)과 같은 디지털가입자라인의 도입이다<sup>[1]</sup>.

디지털가입자라인의 기술과 관련하여 국내외적으로 많은 표준들이 이루어지고 있으며, 특히 미국의 ANSI가 대표적인 표준기관이다. 여기서 이루어진 표준들 중에는 최근 ADSL 표준문서 T1E1.4 issue2<sup>[2]</sup>에 수록되어 있으며, issue1과 비교하여 STM(Synchronous Transfer Mode) 및 ATM(Asynchronous Transfer Mode) 전송 집중 레이어(convergence layer), 저감 오버헤드 모드(reduced overhead mode), 전송 PSD(Power Spectrum Density) 및 부프 타이밍 등에 대한 표준들이 추가되었다<sup>[3]</sup>.

한편, 실제 멀티패어 케이블의 디지털가입자라인을 구축하는 데는 내부 및 외부케이블 환경에 따른 여러 잡음원들에 의해 그 성능열화가 필연적이라 할 수 있다. 예를 들어 내부잡음에는 열잡음, 에코 및 반사, 감쇄 및 누화(crosstalk) 뿐만 아니라, 케이블 구조에 따른 서지(surge) 보호기, 무선주파수 간섭 필터, 브리지 탭 및 부하코일 등에 의한 구조적 감쇄가 발생하게 된다. 외부잡음원으로는 불꽃 방전, 전기펜스(electric fence), 전력선 및 스위치 등에 의한 임펄스성 잡음 등을 들 수 있다<sup>[4]</sup>. 이러한 잡음들 중에 누화는 디지털가입자라인의 채널용량에 가장 크게 영향을 미치는 잡음원의 하나로서 근단누화(near-end crosstalk; NEXT)와 원단누화(far-end crosstalk; FEXT)로 구분된다.

근단누화 잡음은 동일대역에서 동시에 전송하지 않는 한 무시되므로 원단누화 잡음에 의한 디지털가입자라인의 성능평가가 중요시되고 있어 이에 대한 측정이 이루어지고 있지만<sup>[4]-[6]</sup>, 그 이론적 평가 및 시뮬레이션 방법에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 디지털가입자라인의 해석을 위한 twisted-pair 라인특성<sup>[5]</sup>을 모델로 원단누화 잡음환경에서의 디지털가입자라인의 성능 파라미터로서  $S/N$ (Signal to Noise Ratio) 및  $BER$ (Bit Error Rate)에 대한 이론해석 및 시뮬레이션 방법을 이용한 평가를 수행한다. 특히  $BER$  평가에서는 Semi-analytic 방법<sup>[7]</sup>을 이용함으로써 Monte Carlo 기법

에서 불가능한  $10^7$ 이하의 에러율 평가가 가능하도록 한다. 이를 위해 제II장에서는 대표적 디지털가입자라인인 ADSL 기본모델에 대해 설명하고, 제III장에서는 디지털가입자라인을 해석하기 위한 채널특성 및 제IV장에서는 누화잡음으로서 근단누화 및 원단누화에 대해 설명한다. 제V장에서는 제III장에 주어진 채널특성을 이용하여 가우스(Gaussian) 잡음만의 경우와 가우스 잡음 및 원단누화 잡음이 공존하는 경우의  $S/N$  및  $BER$ 에 대한 평가를 행한 후  $S/N$  성능으로부터 얻어진 채널용량을 일본의 측정결과와 비교 분석하여 제VI장에서 결론을 내린다.

## II. ADSL 기본모델

ADSL은 기존 twisted-pair 전화가입자 루프플랜트에 구축되는 여러 디지털가입자라인 중의 하나이다. 그래서 ADSL은 twisted-pair 채널을 이용하므로 전송속도에 제한을 극복하기 위해 인터넷 접속과 같은 양방향 접속에는 다운스트림(downstream)과 업스트림(upstream)의 데이터 속도간의 비율 10:1로 두고 있다.

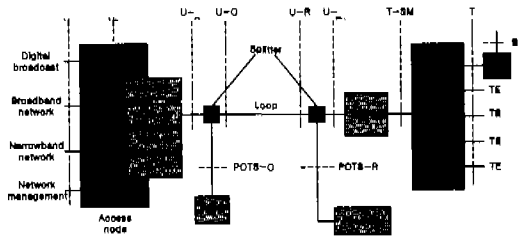


그림 1. ADSL 시스템의 기본모델

그림 1에 ADSL의 기본모델을 나타낸다. ADSL은 고속 데이터링크 제공뿐만 아니라 기존의 전화채널 가입자들을 위한 POTS(Plain Old Telephone Service)의 3.1kHz 채널을 제공해야 한다. 이를 위해 그림 1과 같이 ADSL 신호로부터 POTS 신호를 분리해 내는데 사용되는 LPF(Low Pass Filter)와 HPF(High Pass Filter)를 갖는 분리기(splitter)가 사용된다. ADSL 링크는 한 쌍의 모델, 로컬교환국(Central Office; CO)의 ADSL 송신 Unit-C(ATU-C), 그리고 가입자단(remote site)의 ATU-R로 구성된다. TV 세트, 컴퓨터 또는 PC와 같은 터미널 장치(Terminal Equipment; TE)는 가입자단의 구내분배망(Premises Distribution Network; PDN)에 접속된다. 로컬교환국에서 액세스노드는 DSLAM(Digital

Subscriber Line Access Multiplexer)를 통해 LAN, ATM망, 또는 필요한 기타 망에 접속될 수 있다<sup>11)</sup>.

### ■. DSL의 채널특성

Twisted-pair 전화루프 전송채널 모델링은 디지털 가입자라인 시스템 기술에 중요한 역할을 하며, 이 전부터 twisted-pair 케이블의 주요 및 보조 파라미터들에 대한 정의가 이루어져 왔다. 즉, twisted-pair 케이블의 전송특성은 전송라인의 분산등가회로에서 정의된 주요 파라미터에 의해 정확히 규정될 수 있으며, 보조 파라미터는 이상전송라인의 성능 해석을 위해 사용된다. 그러나 twisted-pair 케이블의 주요 및 보조 파라미터들은 모두 주파수 함수이다.

만일 루프가 특성임피던스로 완전히 종단되었다고 하면, 길이  $d$ 의 종단루프에서 그 전달특성은 다음과 같이 주어진다<sup>12)</sup>.

$$H_T(d, f) = e^{-\alpha k_1 \sqrt{f} + k_2 f} \cdot e^{-\gamma d k_3 f} \quad (1)$$

여기서  $d$ 의 단위는 mile이고,  $f$ 는 Hertz이다. 상수  $k_1, k_2$  및  $k_3$ 는 다음 표 1과 같이 주어진다<sup>13)</sup>.

표 1. 단순케이블 모델에 관련된 상수값

Gauge	$k_1 (\times 10^3)$	$k_2 (\times 10^8)$	$k_3 (\times 10^3)$
22	3.0	0.035	4.865
24	3.8	-0.541	4.883
26	3.8	-1.709	4.907

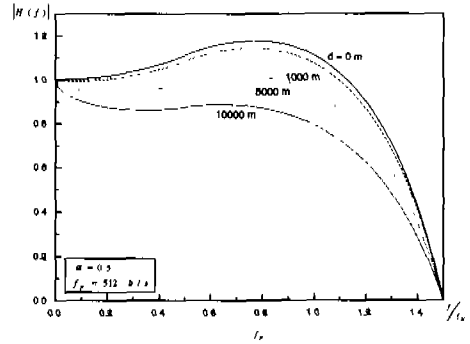
한편, 나이퀴스트(Nyquist) 이론에서 대역폭  $\beta = f_N = f_s/2$ 를 갖는 채널은  $f_s$ 의 독립 심볼을 전송할 수 있어야 하는데 롤오프(roll-off) 상수,  $\alpha$ 에 따른 나이퀴스트 필터링은 다음과 같다<sup>14)</sup>.

$$H_F(j\omega) = \begin{cases} \frac{(\omega T_s/2)}{\sin(\omega T_s/2)}, & 0 \leq \omega \leq \frac{\pi}{T_s}(1-\alpha) \\ \frac{(\omega T_s/2)}{\sin(\omega T_s/2)} \cos^2 \left\{ \frac{T}{4a} \left[ \omega - \frac{\pi(1-\alpha)}{T_s} \right] \right\}, & \frac{\pi}{T_s}(1-\alpha) \leq \omega \leq \frac{\pi}{T_s}(1+\alpha) \\ 0, & \omega > \frac{\pi}{T_s}(1+\alpha) \end{cases} \quad (2)$$

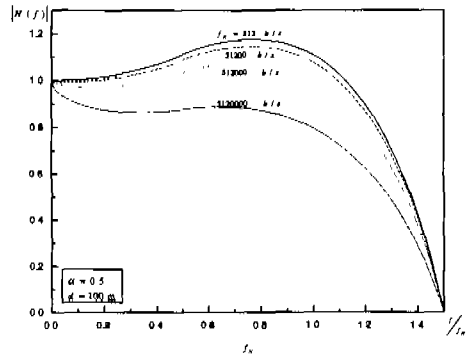
따라서 twisted-pair 케이블의 전체특성은 식(1)과 (2)로부터 식(3)과 같이 표현되며,  $\alpha = 0.5$ 일 때 거리  $d$ 에 따른 채널전달특성을 그림 2의 (a), 나이퀴스트 주파수  $f_N$ 에 따른 채널전달특성을 그림 2의 (b)에

보인다.

$$|H(f)| = |H_T(f) H_F(f)| \quad (3)$$



(a) 거리  $d$ 에 따른 진폭특성

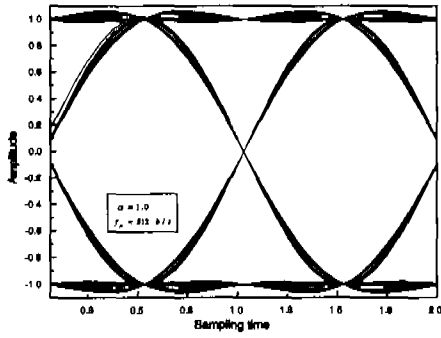


(b) 나이퀴스트 주파수  $f_N$ 에 따른 진폭특성

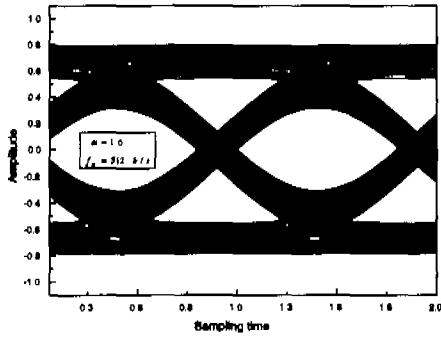
그림 2. 필터를 도입한 twisted-pair 케이블의 채널특성

그림 2로부터 알 수 있듯이 전송거리가 클수록 또한 나이퀴스트 주파수가 클수록 채널의 진폭특성은 점점 감쇄하는 특성을 보이고 있다. 한편, 그림 2의 twisted-pair 케이블의 전송거리  $d$  및 나이퀴스트 주파수  $f_N$ 에 따른 채널특성에 의한 성능열화를 비교하기 위해  $\alpha = 0.5$ 인 부호간 간섭(ISI)이 존재하지 않을 때의 eye pattern을 이용하여 그림 3의 (a)에  $d=0m$ , 즉 채널 감쇄가 없을 때의 eye pattern, 그림 3의 (b)에는 전송거리  $d=5000m$ 일 때의 eye pattern 열화특성, 그리고 그림 3의 (c)에는 나이퀴스트 주파수  $f_N=512kb/s$ 일 때의 eye pattern 열화특성을 각각 보인다.

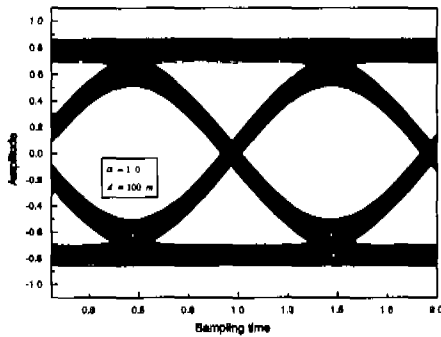
그림 3으로부터  $d=0m$ 인 경우의 eye-pattern은 나이퀴스트 채널에서의 부호간 간섭이 없을 때( $\alpha = 1.0$ )와 동일하여 100%의 eye-open과 0%의 time



(a) 감쇄가 없을 때의 eye pattern



(b) 전송거리 d=5000m에 의한 eye pattern



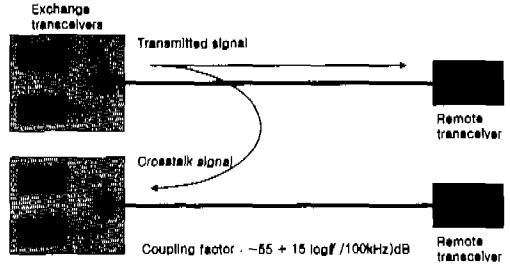
(c) 나이퀴스트 주파수  $f_N=512\text{kb/s}$ 에 의한 eye pattern

그림 3. Twisted-pair 채널의 eye pattern 특성

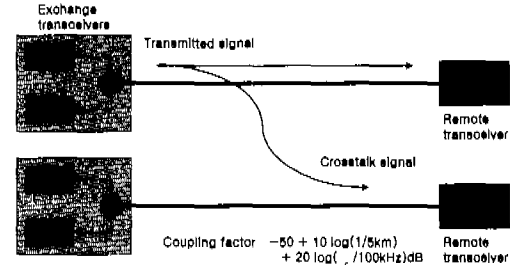
jitter 특성을 갖는다. 그러나  $d=5000\text{m}$ 로 길어지면 그림 3의 (b)와 같이 eye-pattern의 특성은 30%의 eye-open 과 30%의 time jitter가 발생하여 채널특성에 의한 부호간 간섭 왜곡이 심각하다는 것을 알 수 있다. 마찬가지로 나이퀴스트 주파수  $f_N=512\text{kb/s}$ 로 높아지면 그림 3의 (c)로부터 50%의 eye-open과 약 10%의 time jitter가 발생한다.

#### IV. 근단누화와 원단누화

누화는 디지털가입자라인의 전송용량 제한에 가장 크게 영향을 미치는 잡음으로서, 멀티패어 억제 스케이블 내에 크게 다른 두 가지 형태의 누화, 즉 그림 4의 (a) 및 (b)에 각각 보이는 근단누화(NEXT)와 원단누화(FEXT)가 있다<sup>[4]</sup>.



(a) NEXT



(b) FEXT

그림 4. 누화의 형태

근단누화는 간섭원으로서 케이블의 다른 패어의 동일단(same end)에 발생하는 간섭이며 그 크기는 전송거리와는 무관하다. 이와는 달리 원단누화는 간섭원으로서 케이블의 다른 패어의 원단 또는 반대편단(opposite end)에 발생하는 간섭이며, 그 크기는 거리에 따라 감쇄하는 특징을 갖는다.

근단누화는 한번에 동일 방향으로 전송하는 시스템에 영향을 미치며, 원단누화보다 그 영향이 크게 나타나지만, 동일대역에서 동시에 동일방향으로 전송하지 않는 한 그 영향은 무시할 수 있다<sup>[4]</sup>.

따라서 본 연구에서는 근단누화에 의한 영향을 무시하고 가우스 잡음 및 원단누화 잡음환경에 대한 디지털가입자라인의 성능평가를 행하기 위해 원단누화 잡음특성에 대해서만 설명한다. 단순화된 49 disturber 원단누화 손실모델은 다음과 같다<sup>[5]</sup>.

$$FEXT_{49} = kd f^2 |H(f)|^2 \quad (4)$$

여기서  $k=8 \times 10^{-20}$ ,  $d$ 는 루프길이[feet],  $f$ 는 주파수[Hz],  $H(f)$ 는 루프의 전달함수이다.

또한, 디지털가입자라인의 수신기 전단에서 원단누화 전력밀도는 다음과 같이 표현된다<sup>[5]</sup>.

$$PSD_{FEXT}(f) = G_S(f) FEXT_N(f) \quad (5)$$

$$= G_S(f) \times \left(\frac{N}{49}\right)^{0.6} kd f^2 |H(f)|^2$$

여기서  $G_S(f)$ 는 송신신호의 전력밀도이다.

식(4) 및 (5)를 이용하여 제V장에서 가우스 잡음 및 원단누화 잡음이 공존하는 환경에서 디지털가입자라인의  $S/N$  및 BER을 평가한다.

## V. 성능평가

### 1. S/N 평가

수신단에서의  $S/N$ 은 평균수신신호전력,  $S$ 와 평균 잡음전력,  $N$ 의 비이다. 평균수신신호전력,  $S$ 는 송신신호전력 스펙트럼밀도,  $G_S(f)$ 와 디지털가입자라인의 채널전달함수  $H(f)$ 로 표현되며, 평균잡음전력  $N=N_0B$ 이다. 여기서  $B$ 는 대역폭을 나타낸다. 이때 가우스환경에서의  $S/N$ 은 식(6), 가우스 및 원단누화 잡음환경에서의  $S/N$ 은 식(7)로 구해진다.

$$\frac{S}{N} = \frac{\int_0^B G_S(f) e^{-2\alpha(k_1\sqrt{f} + k_2f)} df}{N_0B} \quad (6)$$

$$\frac{S}{N} = \frac{\int_0^B G_S(f) e^{-2\alpha(k_1\sqrt{f} + k_2f)} df}{kd \int_0^B G_S(f) e^{-2\alpha(k_1\sqrt{f} + k_2f)} f^2 df + N_0B} \quad (7)$$

한편, ADSL과 같은 디지털가입자라인에서 검토되고 있는 변복조방식의 표준으로서 ANSI(T1.413) 표준인 DMT(Discrete Multitone) 방식과 AT&T 및 Globespan 회사에서 제안한 CAP(Carrierless Amplitude and Phase Modulation) 방식이 있다<sup>[1]</sup>. 이 중 CAP방식은 두 개의 직교성 캐리어가 변조되어 합성된다는 점에서 기존의 QAM(Quadrature Amplitude Modulation) 방식과 매우 유사하다. 따라서 본 연구에서는 식(6) 및 식(7)의 신호원  $G_S(f)$ 를 QAM 신호전력 스펙트럼으로 이용한다.

그림 5는 가우스 및 원단누화 잡음환경에서의  $S/N$ 을 얻기 위한 시뮬레이션 블록도를 나타내며,

QAM 신호는 푸리에변환 후 이상 LPF를 통과하여 디지털가입자라인의 twisted-pair 채널 특성에 의한 평균신호전력  $S$ 를 구하고, 평균잡음전력  $N$ 은 LPF로 필터링된 가우스 잡음과 디지털가입자라인 채널의 원단누화 감쇄특성을 고려한 잡음의 합으로 얻을 수 있다.

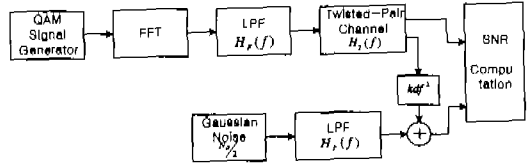


그림 5. 가우스 및 원단누화 잡음환경에서의  $S/N$  시뮬레이션 블록도

그림 5의 시뮬레이션의 타당성을 검증하기 위해 식(6), (7)의 결과와 비교하여 가우스 환경에서의 결과를 그림 6에, 가우스 및 원단누화 잡음환경에서의 결과를 그림 7에 각각 나타내었다.

그림 6은 디지털가입자라인의 전송길이  $d$  및 대역폭에 따른 가우스 잡음환경에서의  $S/N$  성능을 나타낸 것으로 전송길이가 짧은 경우에는 대역폭에 관계없이 이론치와 시뮬레이션치가 일치하고 있지만, 전송길이가 길수록 또한 대역폭이 넓을수록 그 차이가 나타나고 있다. 예를 들어 전송길이  $d=5000m$ 이고, 대역폭이 1MHz일 때 이론치와 시뮬레이션치의 차이는 약 2dB 정도이다.

한편 전송길이가 길수록  $S/N$  성능열화를 가져와 전송거리  $d=100m$ 에서  $d=5000m$ 로 전송길이가 길어지면 대역폭이 1kHz에서는  $S/N$ 의 차가 약 8dB인 반면, 대역폭이 1MHz로 넓어지면 약 21dB의  $S/N$  성능열화를 가져온다. 마찬가지로 전송길이가 동일해도 대역폭에 따라  $S/N$  성능열화가 크게 나타나는데, 예를 들어  $d=100m$ 인 경우 대역폭이 1kHz에서 1MHz로 넓어지면 약 25dB,  $d=1000m$ 인 경우는 약 30dB,  $d=3000m$ 인 경우는 약 51dB,  $d=5000m$ 인 경우는 약 48dB의  $S/N$  성능열화를 보이고 있다.

그림 7은 디지털가입자라인의 전송길이  $d$  및 대역폭에 따른 가우스 및 원단누화 잡음환경에서의  $S/N$  성능을 나타낸 것으로 가우스 잡음만의 환경에서와는 달리 전송 거리에 따른  $S/N$  성능열화는 크지 않고 대역폭이 넓어짐에 따라 성능열화가 크게 나타나고 있다. 즉, 전송거리  $d=1000m$ , 3000m 및 5000m의 성능곡선이 거의 동일특성을 보이고 있으며,  $d=100m$ 의 짧은 거리에서만  $d=1000m$  거리에서

보다 1kHz대역폭에서 약 7dB의 S/N 성능개선을 가져오지만, 1MHz대역폭에서는 오히려 3dB의 성능열화를 보이고 있다.

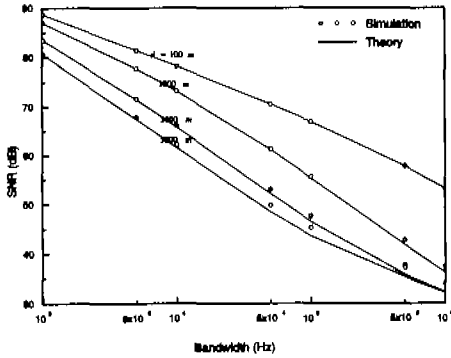


그림 6. 가우스 잡음환경에서의 성능특성

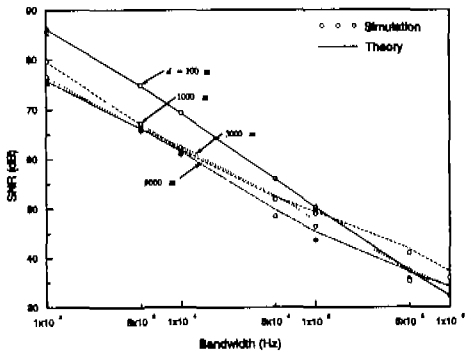


그림 7. 가우스 및 원단누화 잡음환경에서의 S/N

한편, 그림 6의 가우스 잡음만의 경우와 그림 7의 원단누화 잡음과 가우스 잡음이 공존하는 경우의 S/N 성능비교를 그림 8에 나타내었다.

그림 8로부터 알 수 있듯이 전송길이  $d=100m$ 로 짧을 때에는 대역폭에 따라 원단누화 잡음에 의한 S/N 성능열화가 두드러지지만 전송거리  $d=5000m$ 로 길어지면 원단누화에 의한 잡음보다 가우스 잡음에 의한 성능열화가 두드러지고 있다. 즉  $d=100m$ 일 때 대역폭 1kHz에서는 원단누화 잡음에 의해 약 2dB 정도 S/N 성능열화를 가져오지만, 1MHz 대역폭이 넓어지면 약 21dB의 성능열화를 가져온다.

이와는 달리  $d=1000m$ 인 경우는 대역폭 1kHz에서 원단누화 잡음에 의해 약 7dB의 S/N 성능열화를 가져오지만 1MHz로 대역폭이 넓어지면 약 1dB 정도의 성능열화를 보이고 있다. 마찬가지로

$d=5000m$ 로 길어지면 대역폭 1kHz에서는 약 5dB의 성능열화를 보이는 반면 50kHz 이상이 되면 원단누화 잡음에 의한 성능열화는 무시되어 잡음에 의해 지배적이다.

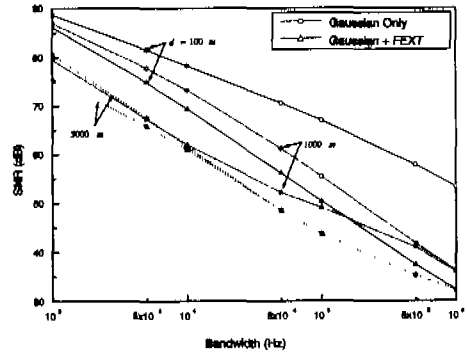


그림 8. 가우스 잡음만의 경우와 가우스 잡음 및 원단누화 잡음이 공존하는 경우의 S/N 비교

그림 9는 본 연구에서 S/N에 대한 이론해석 및 시뮬레이션 결과치를 이용하여 얻어진 통신용량과 문헌[6]에서 얻어진 통신용량 실험치와의 비교특성을 나타낸다. 문헌[6]의 실험치는 일본 도쿄 및 오사카 지역에서 전송거리에 따른 ADSL의 통신용량을 측정된 것으로 동일 전송거리에서도 상당히 편차가 크게 나타나고 있다.

그 이유로서 통신용량은 여러 인자, 가령 케이블의 구조, 라인의 수, 브리지 탭 등에 의해 영향을 받기 때문이다. 한편, 본 연구에서 해석된 이론치는 실험치의 상한화 하한의 증상에 위치하고 있어, 측정결과를 어느 정도 추론할 수 있다.

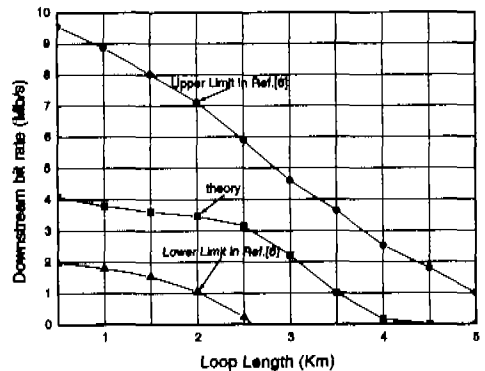


그림 9. 전송거리에 따른 전송용량의 이론치와 실험치 비교

## 2. BER 성능평가

디지털 통신시스템에서 복조오류,  $P_e$ 는 전형적인 시스템 성능평가 기준으로서 이의 시뮬레이션 방법인 Monte Carlo(MC) 기법이 가장 널리 알려져 왔다. 그러나, MC기법은 복잡한 통신시스템에 있어 아주 낮은 오류율 얻기 위해서는 많은 양의 데이터 발생 및 이의 처리에 따른 컴퓨터 수행시간이 상당히 길다는 단점이 있다. 특히 디지털가입자라인의 성능은  $P_e=10^{-7}$  이하일 것이 요구되므로<sup>[5]</sup> MC기법으로 오류율을 평가하는 것은 불가능하다.

따라서 본 연구에서는 빠른 수행시간에 아주 낮은 오류율까지도 평가할 수 있는 Semi-analytic(SA) 시뮬레이션 기법을 이용하여 디지털가입자라인의 복조오류 성능을 평가한다. 다른 대부분의 시뮬레이션 기법과는 달리 SA기법은 시스템의 BER을 평가하는 대신에 오류식에 의해 계산하는 것으로 컴퓨터 자원의 효율적인 이용을 가져와 일단 시뮬레이션을 수행하면 평균 및 분산데이터를 저장하여 어느 S/N에서도 BER을 계산할 수 있도록 한다<sup>[7]</sup>.

그림 10에 디지털가입자라인의 BER 성능평가를 위한 SA 시뮬레이션 블록도본 나타낸다. 여기서 입력 디지털신호는 QAM(또는 QPSK) 신호라 가정하고, 송수신필터 특성은 raised-cosine 필터, 디지털가입자라인의 채널특성은 식(1)로 주어지는 twisted-pair 채널로 가정한다. 그림 10의 시뮬레이션 블록도를 이용하여 최적의 성능을 보이는 raised-cosine 필터의 roll-off 계수  $\alpha$ 가 0.1일 때 가우스 환경에서의 가입자라인의 BER 성능을 그림 11 및 그림 12에, 가우스 잡음 및 원단누화 공존할 때의 BER 성능을 그림 13 및 그림 14에 나타낸다.

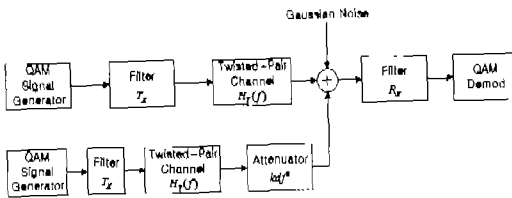


그림 10. BER 성능평가를 위한 시뮬레이션 블록도

그림 11은  $f_N=512\text{b/s}$ 일 때 가우스 잡음환경에서 디지털가입자라인의 전송거리에 따른 BER 특성을 나타낸 결과로,  $d=0\text{m}$ 의 채널감쇄가 없는 경우 SA 시뮬레이션에 의한 BER 성능특성은 이론치보다  $E_b/N_0$  값이 0.5dB 이내의 열화를 보여 SA 시뮬레이션의 타당성을 보여주고 있다.

한편, 전송길이  $d$ 에 따라 BER 성능열화가 두드러짐을 알 수 있으며, 예를 들어 감쇄가 없는  $d=0\text{m}$ 의 경우  $BER=10^{-7}$ 을 얻기 위한  $E_b/N_0 \approx 11.3\text{dB}$ 인 반면  $d=1000\text{m}$ ,  $5000$ ,  $7000\text{m}$ 로 길어짐에 따라  $E_b/N_0$  값도 약 11.5dB, 15.7dB, 23.1dB로 열화한다.

그림 12는 가우스 환경에서 전송거리  $d=100\text{m}$ 로 고정하여 나이퀴스트 주파수  $f_N=512\text{kb/s}$ 에 따른 디지털가입자라인의 BER 성능특성을 보인 것으로  $f_N=512\text{kb/s}$ 까지는 BER 성능열화가  $BER=10^{-7}$  기준으로  $E_b/N_0$  값이 1.5dB 정도밖에 안되나,  $f_N=5120\text{kb/s}$ 로 높아지면 BER 성능은 상당히 크다는 점을 알 수 있다.

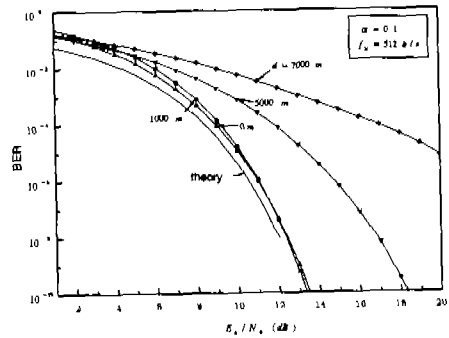


그림 11. 가우스 잡음환경에서의 나이퀴스트 주파수  $f_N=512\text{b/s}$ 일 때 DSL 전송거리에 따른 BER 특성

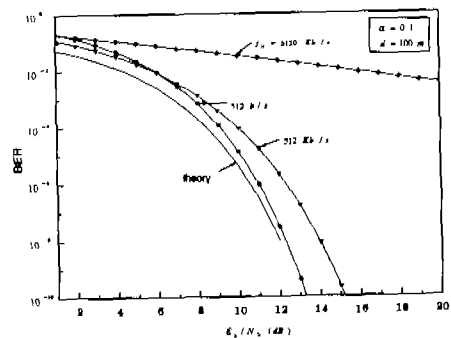


그림 12. 가우스 잡음환경에서  $d=100\text{m}$ 일 때 나이퀴스트 주파수에 따른 DSL의 BER 특성

그림 13은 가우스 잡음 및 원단누화 환경에서의 감쇄정수  $k$ 에 따른 BER 성능특성으로  $k$ 값이 작을 때는 BER 성능열화가 나타나지 않지만,  $k$ 값이 커지면 BER 성능열화가 현저하다는 점을 알 수 있다. 물론 전송거리가 클수록  $k$ 값에 민감하여  $d=100\text{m}$ 일 때는  $k=10^{-6}$  정도에서  $BER=2.5 \times 10^{-6}$ 에서  $BER=2.2$

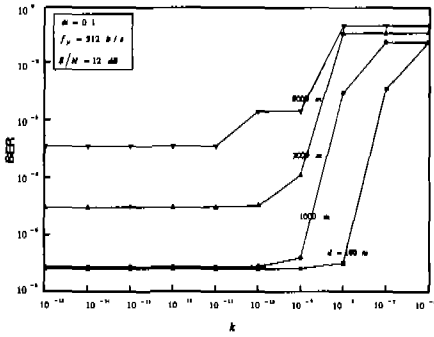


그림 13. 감쇄정수 k 및 전송거리 d에 따른 원단누화 잡음 영향

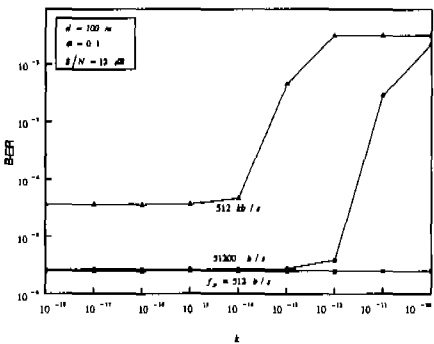


그림 14. 감쇄정수 k 및 Nyquist 주파수 fN에 따른 원단누화 잡음 영향

$\times 10^2$ 으로 BER 성능이 크게 열화하지만,  $d=5000m$  정도로 길어지면  $k=10^8$ 에서  $BER=3.4 \times 10^4$ 에서  $BER=4.34 \times 10^2$ 으로 BER 성능이 크게 열화한다. 따라서 전송길이가 길수록 원단누화 잡음에 의한 영향이 크게 나타나고 있다.

그림 14는 가우스 잡음 및 원단누화 환경에서  $d=100m$ 로 고정할 때 나이퀴스트 주파수  $f_N$ 에 따른 BER 성능특성으로  $f_N$ 이 클수록 k값에 민감하여  $f_N=512b/s$ 일 때는  $k=10^{10}$ 이어도  $BER=2.5 \times 10^6$ 의 일정한 값을 유지하지만,  $f_N=51200b/s$ 로 높아지면  $BER=2.67 \times 10^6$ 에서  $k=10^{10}$ 일 때  $BER=2.22 \times 10^2$ 로 크게 열화한다. 마찬가지로  $f_N=512kb/s$ 로 더욱 높아지면,  $BER=3.61 \times 10^5$ 에서  $k=10^{12}$ 일 때  $BER=3.18 \times 10^2$ 로 크게 열화하고 있다.

## VI. 결론

본 논문에서는 디지털가입자라인의 성능분석을 위해 twisted-pair 케이블의 특성을 고려하여 가우스

잡음환경만의 경우와 가우스 잡음 및 원단누화 잡음이 공존하는 경우에 있어서 S/N 성능에 대해서는 이론적 해석 및 시뮬레이션을 통한 비교 분석을, 그리고 BER 특성에서는  $10^{-7}$  이하의 성능계산을 위해 Semi-analytic 시뮬레이션 기법을 도입하여 BER 성능분석을 수행한 후 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) S/N 성능평가에서는 이론적 해석과 시뮬레이션 결과가 거의 일치하였으며, 먼저 가우스 잡음만의 경우, 전송거리 및 나이퀴스트 주파수에 따라 성능열화가 크게 나타나고, 원단누화 잡음이 존재하면 전송거리가 짧을 때는 원단누화 잡음에 의한 S/N 성능열화가 두드러지지만, 전송길이가 길어지면 원단누화 잡음의 영향이 없고 가우스 잡음만의 경우와 거의 일치한다.

2) 본 연구에서 수행된 S/N 성능에 대한 이론해석 및 시뮬레이션 결과를 이용하여 얻어진 디지털 가입자라인의 채널용량과 일본의 여러 환경에서 측정된 ADSL 채널용량을 비교할 때 본 해석결과는 측정의 상한과 하한의 중심에 위치함을 알 수 있다. 따라서 본 해석결과는 실제 측정에 앞서 그 측정결과를 어느 정도 추론할 수 있는 타당성을 제공하고 있다.

3) BER 성능특성도 마찬가지로 전송거리 및 나이퀴스트 주파수에 따라 그 성능이 열화하며 특히 전송거리  $d=100m$ 에서  $5000m$ 로 길어지면  $BER=10^{-7}$ 을 얻기 위한  $E_b/N_0$ 면에서 약 4.5dB정도 열화한다. 한편, 나이퀴스트 주파수  $f_N=512kb/s$ 까지는 성능열화가 미미하지만  $f_N=5120kb/s$ 로 높아지면 그 성능열화는 상당히 크다.

결론적으로 본 논문에서의 해석은 간단한 twisted-pair 케이블의 특성을 이용하였지만, 앞으로 4단자 망과 같은 더욱 복잡한 채널특성 그리고 케이블 구조, 라인의 수, 브리지 탭 등의 인자들을 고려하여 디지털가입자라인에 대한 성능평가를 행하고자 할 때에도 본 논문의 해석방법이 그대로 적용될 수 있으며, 또한 본 해석결과는 디지털가입자라인의 국내의 표준제정의 기본 데이터로 활용될 수 있을 것이다.

## 참고문헌

[1] Z. Papir and A. Simmonds, "Competing for throughput in the local loop," *IEEE Commun. Mag.*, pp.61-66, May 1999.



