

FLC-C VDSL 선로특성과 Coverage에 관한 연구

정회원 길계태*, 하종영*, 권순철*, 한권훈*, 신종원**, 임종대**

A study on the line characteristics and coverage of FLC-C VDSL system

GyeTae Kihl*, JongYoungHa*, SunCheol Gweon*, GweonHoon Han*, JongWon Sin**,
JongDae Im**, *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 FLC 광가입자 전송시스템에 수용된 CAP방식의 VDSL시스템에 대한 Reach특성을 분석하였다. 이를 위하여 VDSL 선로의 감쇠특성과 잡음 환경을 측정/분석하여 가입자 선로 구성방법에 따른 전송용량과 Bit Error Rate을 분석하고, VDSL선로에 사용하는 케이블 종류에 따른 최대 가용거리를 분석하였다. FLC-C VDSL모뎀을 사용하여 25.92 Mbps의 하향스트림 데이터 전송을 할 때 최대 가용거리가 UTP5 0.5mm케이블을 사용하는 경우, 570m정도 가능한 것으로 나타났다.

ABSTRACT

In this paper, we analyzed the reach performance of the FLC-C VDSL system using 4-CAP modulation scheme. We measured the attenuation of VDSL lines and their noise characteristics, and calculated the channel capacity. And then, we evaluated the VDSL coverage for each type of cables; CPEV 0.5mm, CPEV 0.65mm, UTP3 0.5mm, UTP5 0.5mm, FS 0.4mm, FS 0.5mm. In case that FLC-C VDSL modem transmits 25.92 Mbps data over a UTP5 0.5mm cable, the VDSL reach appears to be about 570m.

1. 서 론

VDSL(Very high-rate Digital Subscriber Lines)은 기존의 동선 또는 동축케이블을 이용하는 ADSL보다 고속의 전송속도를 갖는 디지털 전송방식으로, 1990년대 초반에 DAVIC^[1]을 중심으로 규격화 작업이 진행되면서 생긴 기술이다.

DAVIC은 본래 VOD서비스를 목표로 표준화 작업을 추진하였으므로, VDSL에 대한 규격도 고속의 downstream 대역과 저속의 upstream 대역을 갖는 비대칭적 성격을 띠게 되었으며, 최근 VOD에 대한 서비스 보급이 둔화되면서 인터넷 서비스, 양방향 화상회의 및 고속데이터통신서비스를 포함하기 위해

대칭적 성격의 속도를 추가로 정의함으로써, VDSL의 성격이 변화하고 있다. VDSL에 대한 표준화 작업은 1998년 현재 ANSI T1E1.4^[2]와 ETSI^[3]에서 활발히 진행되고 있으며, G7국가의 Telco들이 중심이 되어 신설된 FSAN(Full Service Access Network)^[4]의 VDSL Working Group에서도 ANSI와 ETSI의 연구결과를 토대로 표준화작업을 추진하고 있다.

VDSL은 하나의 동선 또는 동축케이블을 이용하여 전화(POTS), 협대역ISDN, ADSL 등과 선로가 같은 전송대역을 분할하여 사용하는 형상을 갖고 있으며, ADSL과 overlay되는 경우에는 1.104MHz부터 30MHz사이, 그외의 경우에는 300KHz부터 30MHz사이의 주파수 대역을 사용한다.

* 한국통신 가입자망연구소

논문번호 : 99075-0226, 접수일자 : 1999년 2월 26일

** 삼성전자

본 논문에서는 한국통신이 국내업체들과 공동으로 개발한 FLC-C시스템에 수용된 CAP방식의 VDSL시스템에 대한 BER(Bit Error Rate) 성능을 측정, 분석하여 이 VDSL모뎀의 수신단에서 요구되는 최소의 SNR값을 계산하고, VDSL 선로의 특성과 잡음환경을 고려하여, 요구되는 송신전력량을 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 FLC-C시스템에 수용된 VDSL모뎀에 대해 간단히 설명하고, 국내의 가입자선로의 특성과 잡음환경 및 가입자 선로 구성방법에 따른 전송용량을 분석하였다. 그리고, 3장에서는 VDSL시스템의 BER 측정방법과 측정치를 설명하고, 표준규격의 BER 요구치를 만족시키기 위해 필요한 SNR값과 선로구성 방법에 따른 송신전력요구치 및 표준규격의 송신전력상한치에서 최대 전송거리를 분석하였다. 3장의 분석결과를 바탕으로, 4장에서는 FLC-C VDSL 가입자선로의 케이بل링 방법에 대해 설명하고 결론을 맺었다.

II. 국내의 가입자 선로 특성과 잡음환경

본 장에서는 국내에서 사용되고 있거나 또는 사용될 예정인 동선케이블들의 감쇠 특성과 누화특성에 대해 설명하였다.

2.1 FLC-C시스템에 수용된 VDSL모뎀

FLC-C시스템에 수용된 VDSL모뎀은 FDD(Frequency Division Duplexing) 형의 모뎀으로서, 26Mbps 및 56Mbps의 하향속도와 1.62Mbps의 상향속도를 갖고 있으며, (그림 1)에서 보는 바와 같이, 하향전송에는 6.48MHz부터 25.92MHz까지의 19.44MHz대역폭을 사용하며, 상향전송에는 고주파대역과 저주파대역을 선별적으로 적용가능한 데, 고주파대역은 28.35MHz부터 29.97MHz까지, 저주파대역은 2.43MHz부터 4.05MHz까지의 1.62MHz대역폭을 사용한다.

변조방식으로서 downstream에는 CAP(Carrierless Amplitude Phase), upstream에는 QPSK 변조방식을 사용하고, 채널코딩에는 Reed-Solomon코딩방식을 사용한다.

CAP변조방식은 QAM(Quadrature Amplitude Modulation)방식의 변형으로서, 오류 성능은 동일하지만 QAM에 비하여 수신부의 등화기(Equalizer)구조가 간단하고, 반송파(carrier) 복원이 필요치 않는 등의 잇점을 가지고 있다⁵⁾.

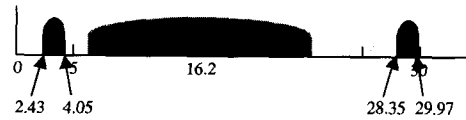


그림 1. VDSL 스펙트럼 할당

(그림 2)는 하향전송신호의 스펙트럼과 UTP5케이블 620m상에서 측정된 하향수신신호의 스펙트럼을 보여준다. 하향신호의 송신전력밀도는 약 -75dBm/Hz로서 송신전력량은 약 -2.13dBm정도이며, 하향신호의 수신전력밀도는, 약 -1118.3dBm/Hz로서 수신전력량은 약 -45.4 dBm정도이다.

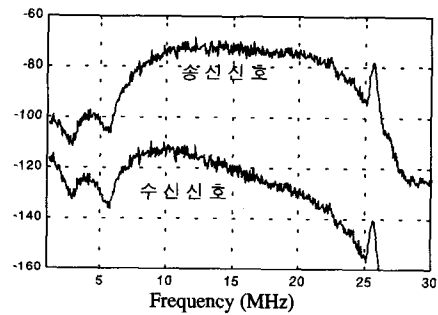


그림 2. VDSL 하향신호의 주파수 스펙트럼

2.2 가입자 선로 특성

국내의 가입자 선로는 아파트단지의 경우, 전화국사에서 아파트내 통신실의 MDF까지는 foam skin 케이블 또는 지절연케이블이 사용되며, MDF에서부터 세대단자함까지는 CPEV 0.5mm 또는 CPEV 0.65mm를 사용하며, 세대단자함부터의 맥내배선은 TIV 0.8mm 케이블이 사용되는 경우가 대부분이다. FSAN에서는 광대역서비스용 케이블로서 50미터이상의 거리에서 100Mbps/초이상의 전송속도를 낼 수 있는 ISO/IEC11801과 EN50173에 명시된 UTP-5 또는 FTP-5 케이블을 사용하도록 권고하고 있으며⁴⁾, 국내에서도 신설지역에는 UTP-5급이상의 케이블을 사용할 계획이다.

케이블의 감쇠특성은 동일 다발안의 케이블이라도 그 특성이 일정하게 나타나지 않고, 케이블에 따라 지름의 균일정도 및 꼬임정도, 그리고 기타 물리적 특성의 편차로 인해 같은 종류의 케이블에 대한 특성을 측정하더라도 각기 다른 특성을 보이는 것이 일반적이다. (그림 3)은 네트워크분석기를 사용하여 100m케이블에 대하여 케이블별로 12pair에 대해 측정하고, 그 평균치를 계산한 것이다. 측정결과에 따르면, 케이블의 감쇠특성은 케이블 환경에 따라

변화할 뿐만 아니라, 케이블 피복의 재질, 꼬임정도에 따라서 10MHz부근에서 0.5dB이상의 변화를 보였다.

길이가 l 인 통신선로에 의한 감쇠(attenuation)는 (식 1)^[11]에 따라 근사화할 수 있으므로, 이 식에 따라 계산한 케이블 상수들은 [표 1]과 같다.

$$LP(f, l) = 20 \cdot \log_{10}(e) \cdot (a \cdot \sqrt{f} + b \cdot f + c \cdot \frac{1}{\sqrt{f}}) \cdot l$$

$$= (k_1 \cdot \sqrt{f} + k_2 \cdot f + k_3 \cdot \frac{1}{\sqrt{f}}) \cdot l \quad (\text{식 1})$$

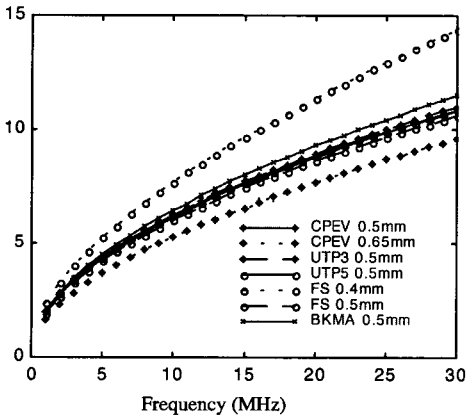


그림 3. 100m 케이블의 감쇠특성

표 1. 감쇠특성에 대한 Curve Fitting 결과

cable 현수	CPEV 0.5mm	CPEV 0.65mm	UTP3 0.5mm	UTP5 0.5mm
A_1	2.1000	1.7418	1.9712	1.9625
A_2	0.0294	0.0263	0.0083	0.0193
A_3	0.0280	0.0180	0.0333	0.0306

(* 주파수는 MHz, 길이는 100m단위)

2.3 잡음 환경^[9,10]

동일 케이블 다발안의 다른 VDSL신호의 crosstalk으로 인한 VDSL신호에의 interference에는 NEXT(Near-end crosstalk)와 FEXT(Far-end crosstalk)이 있다.

(그림 4)에서 송신신호의 전압을 V_S , 수신신호의 전압을 V_T , pair j 의 신호에 의해 pair i 의 송신단과 수신단에 인가되는 신호를 각각 V_N 와 V_F 라고 하자. VDSL케이블들간의 pair-to-pair NEXT loss는 V_S^2 / V_N^2 이며, pair-to-pair EL-FEXT loss는 V_T^2 / V_F^2 이다. 동일 케이블 다발안에 n 개의 crosstalk원이 존재하는 경우에, 임의의 케이블에 나타나는 cross-

talk power는 각 케이블에 의한 것들이 누적되어 나타나므로, NEXT loss-sum과 EL-FEXT loss-sum은 (식 2)와 (식 3)과 같이 구할 수 있다.

V_{Nj} 는 pair j 에 의해 pair i 에 인가된 NEXT전압이고, V_{Fj} 는 pair j 에 의해 pair i 에 인가된 FEXT전압이다.

$$NEXT_loss - sum = \frac{V_S^2}{\sum_{j=1}^n V_{Nj}^2} \quad (\text{식 2})$$

$$EL - FEXT_loss - sum = \frac{V_T^2}{\sum_{j=1}^n V_{Fj}^2} \quad (\text{식 3})$$

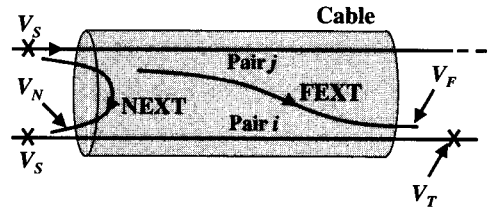


그림 4. 동선케이블의 crosstalk

(식 2)와 (식 3)과 같은 방법으로 측정되는 NEXT loss-sum과 EL-FEXT loss-sum은 (식 4)와 (식 5)을 사용하여 모델링한다^[7]. NEXT는 주파수가 10배 증가할 때마다 15dB씩 증가한다. FEXT는 주파수가 10배 증가할 때마다 20dB씩 증가하고, 케이블 길이가 10배 증가할 때마다 10dB씩 증가한다.

$$NEXT(f, n) = S(f) X_N f^{3/2} n^{0.6} \quad (\text{식 4})$$

$$FEXT(f, n, l) = S(f) H^2(f) X_F f^2 n^{0.6} l \quad (\text{식 5})$$

- f : 주파수
- $S(f)$: 송신신호 전력 밀도 함수
- X_N : NEXT 상수
- X_F : FEXT 상수
- n : 잡음원들의 수

[표 2]은 CPEV 0.5mm, CPEV 0.65 mm, UTP3 0.5mm, UTP5 0.5mm케이블에 대해 측정된 NEXT 과 FEXT에 대해 모델링한 결과를 정리한 것이다. 사용한 케이블은 25 pair케이블이므로, 잡음원(interferer)들의 최대 갯수는 24이다.

표 2. 25pair 케이블안에서의 NEXT와 FEXT parameters

	X_N (10^{-6})	$-10\log_{10}(X_N)$ (dB)	X_F (10^{-5})	$-10\log_{10}(X_F)$ (dB)
CPEV 0.5	5.62	52.5	5.0119	43.00
CPEV 0.65	4.00	54.0	3.1623	45.00
UTP3 0.5	2.80	55.5	3.5481	44.50
UTP5 0.5	1.26	79.0	1.5849	48.00

NEXT와 FEXT에 대한 면역성은, CPEV 케이블이 가장 약했으며, UTP5가 가장 강한 것으로 나타났다. 특히, FS 0.5mm케이블은 감쇠특성이 UTP5와 비슷한 수준이며, UTP5를 제외한 다른 어떤 케이블 보다는 FEXT에 대한 면역성이 좋은 것으로 나타났다. (그림 5)는 25 pair, 100m 케이블에 대한 ELFEXT loss sum을 (식 3)과 같은 방법으로 측정 한 다음, (식 5) 모델로 curvefitting한 결과를 도식한 것이다.

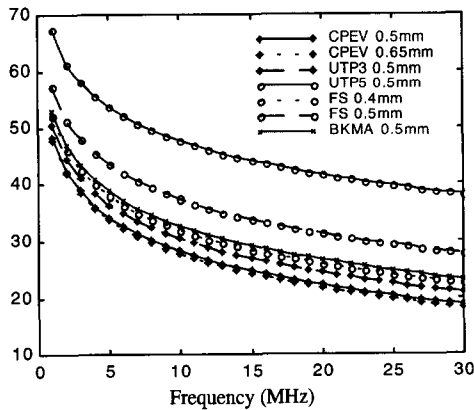


그림 5. 동선케이블의 ELFEXT loss sum

2.4 수신신호의 SNR(Signal-to-Noise Ratio)

수신신호 $r(t)$ 의 에너지를 E_r 라고 하고, white Gaussian noise의 전력스펙트럼밀도를 $N_0/2$ 라고 할 때, SNR은 일반적으로 (식 6)과 같이 정의된다.

$$SNR = \frac{E_r}{N_0} = \frac{P_r T_r}{N_0} \quad (식 6)$$

T_r 는 심볼주기이며, P_r 는 평균 수신전력이다. 수신신호가 wide-sense stationary process인 경우에, $G_R(f)$ 를 수신신호의 전력밀도함수라고 할 때, P_r 은 (식 7)과 같이 구한다.

$$P_r = \int_{-\infty}^{+\infty} G_R(f) df = 2 \cdot \int_w G_R(f) df \quad (식 7)$$

$$\cong 2 \cdot \sum_{f_i \in W} G_R(f_i) \cdot \Delta f$$

(식 7)를 (식 6)에 대입하면, 수신신호의 SNR은 (식 8)과 같이 표현된다.

$$SNR = \frac{E_r}{N_0} \cong \sum_{f_i \in W} \left(\frac{G_R(f_i)}{N_0/2} \right) \cdot \Delta f \cdot T_r \quad (식 8)$$

FLC-C에 수용된 VDSL모뎀은 FDD방식으로 동작하므로, VDSL성능에 가장 영향을 크게 미치는 요소는 동일 케이블 다발에 수용되는 VDSL신호들에 의한 FEXT(Far-end crosstalk)이다. 이것은 2개 이상의 VDSL신호들이 동일한 주파수 스펙트럼을 통하여 같은 방향으로 전송되기 때문에 NEXT가 수신신호의 전력스펙트럼에 주는 영향이 거의 없을 것이기 때문이다.

FEXT가 존재하는 경우에는 (식 8)은 (식 9)와 같이 변경이 가능하다. 이것은 FEXT가 수신신호대에 넓게 펼쳐져 있으므로, flat noise로 근사화할 수 있기 때문이다. D_x 는 crosstalk신호의 전력스펙트럼밀도이다.

$$SNR \cong \sum_{f_i \in W} \left(\frac{G_R(f_i)}{N_0/2 + D_x} \right) \cdot \Delta f \cdot T_r \quad (식 9)$$

대개의 스펙트럼분석기는 1Hz resolution bandwidth를 갖도록 하여 측정할 수 없고, 또 측정시 사용한 resolution bandwidth에 의한 전력밀도 표시값이 매우 높게 표시될 수 있으므로, 1Hz로 측정할 경우의 값으로 보정하여 판단해야 한다. 본 측정에서는 resolution bandwidth를 300kHz로 맞추어 측정하였으며, 분석시에 1Hz에 대한 값으로 환산하여 분석하였다.

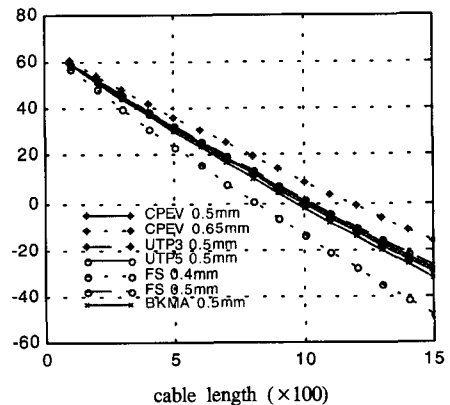


그림 6. 1가입자 수용시 거리에 따른 SNR변화

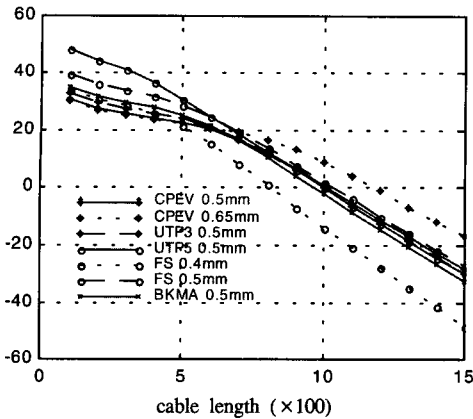


그림 7. 8가입자 수용시 거리에 따른 SNR 변화

(그림 6)과 (그림 7)은 2.2절과 2.3절에서 설명한 감쇠, 누화특성 측정치로부터 SNR값의 변화를 계산한 것으로서, 25 pair 동선케이블에 VDSL가입자가 각각 1과 8가입자 수용된 경우의 케이블의 길이가 증가함에 따라 SNR이 어떻게 변화하는지를 보여준다. (그림 6)은 crosstalk이 존재하지 않고, thermal noise만 존재하는 환경에서의 SNR값을 그린 것이다. (그림 7)으로부터, SNR값은 케이블길이가 짧은 경우에는 신호감쇠가 작으므로 crosstalk에 의해 결정되며, 케이블의 길이가 1km이상되면 SNR값의 변화가 crosstalk의 영향은 거의 없고 thermal noise에 의해 결정되는 것을 알 수 있다. VDSL 수신기가 20dB이하의 SNR을 갖는 신호도 복구 가능한 경우에는 thermal noise에 의해 SNR이 결정되므로, CPEV 0.65mm케이블과 같이 감쇠특성이 좋은 케이블을 사용하는 것이 바람직하고, 수신기가 요구하는 SNR이 20dB이상인 경우에는 UTP5케이블과 같이 crosstalk특성이 좋은 케이블을 사용하는 것이 바람직한 것을 알 수 있다.

실제 구현된 VDSL 모델의 경우에는 20.9dB이상의 SNR을 갖는 신호에 대해 10^{-7} 이하의 BER을 나타내므로, crosstalk특성이 좋은 케이블을 사용하면 좀더 먼 거리까지 25.92Mbps데이터를 전송할 수 있다.

2.5 케이블별 VDSL 전송용량

NEXT또는 FEXT가 주된 잡음원인인 환경에서, Shannon의 채널용량은 송신신호의 전력스펙트럼과 잡음에 의해서만 결정된다.

대역폭이 W 이고 AWGN을 갖는 flat 채널의 경우에 채널용량은 (식 10)과 같이 구한다. 잡음의 원인이 thermal noise만이 경우가 여기에 해당된다. P

는 수신신호의 전력스펙트럼밀도이고, N 은 수신측에서 측정된 잡음의 스펙트럼밀도이다.

$$Capacity = W \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P}{N} \right) \quad (식 10)$$

대역폭이 W 이고 colored noise를 갖는 nonflat채널의 용량은 (식 11)과 같이 구한다. VDSL선로의 FEXT는 주파수에 따라 변화하므로 colored noise에 해당된다.

$$Capacity = \sum_{i=1}^K \Delta f \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P(f_i)}{N(f_i)} \right) \quad (식 11)$$

채널의 주된 잡음원이 crosstalk(NEXT또는 FEXT)인 경우에 수신단에서의 SNR은 (식 12)와 같이 구하며, crosstalk이 thermal noise보다 큰 경우에는 ACR(Attenuation to Crosstalk Ratio)과 동일한 값을 갖는다. 신호채널의 전달함수가 $H(f)$ 이고, crosstalk 채널의 전달함수가 $X(f)$ 라고 할 때, 수신신호 $P(f)$ 는 $S(f)H^2(f)$ 이고, crosstalk Noise는 $S(f)X^2(f)$ 이므로, SNR은 (식 12)와 같이 구한다.

$$\frac{P(f_i)}{N(f_i)} = \frac{S(f_i)H^2(f_i)}{S(f_i)X^2(f_i) + N_0/2} \quad (식 12)$$

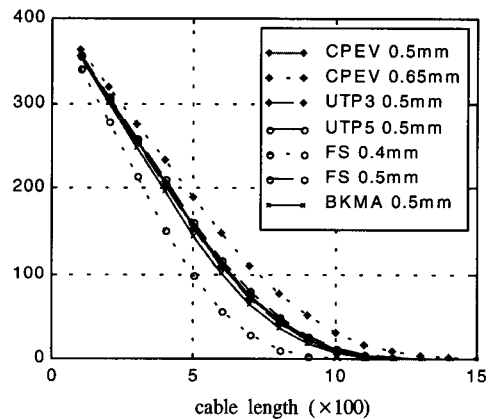


그림 8. Thermal noise 환경에서의 채널용량

(그림 8)은 2.2절과 2.3절에서 설명한 감쇠, 누화특성 측정치로부터 채널용량을 계산한 것으로서, AWGN 환경에서 crosstalk이 배제된 경우의 케이블 길이 변화에 따른 채널용량의 변화를 그린 것이다. 이 경우에는 채널용량이 케이블의 감쇠특성에만 의존하게 되므로 UTP5 0.5mm와 CPEV 0.65mm케이블의 용량이 다른 케이블보다 우수하게 나타난다.

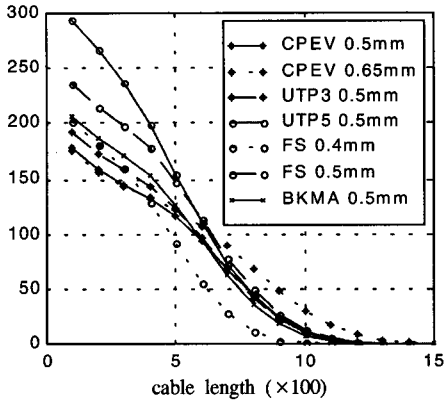


그림 9. 8가입자 수용시, 채널용량

(그림 9)은 2.2절과 2.3절에서 설명한 감쇠, 누화 특성 측정치로부터 채널용량을 계산한 것으로서, 25 케이블다발에 8 VDSL가입자가 수용된 경우의 케이블 길이에 따른 채널용량의 변화를 그린 것이다. 약 610m이하의 길이에서는 FEXT영향으로 인해 UTP5의 용량이 CPEV 0.65mm보다 크고, 610m이상의 경우엔 그 반대이다.

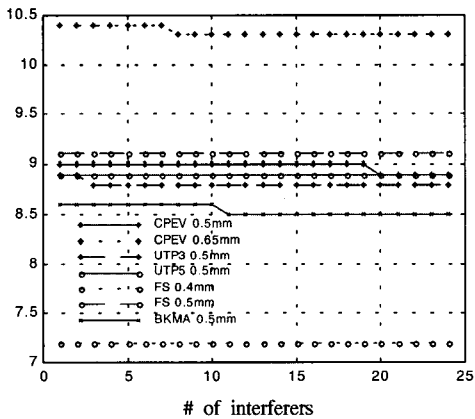


그림 10. 25.92 Mbps 확보가능한 최대 거리

(그림 10)은 25.92Mbps의 채널용량을 확보할 수 있는 케이블의 최대 거리를 그린 것이다. UTP5케이블을 사용하는 경우, 이론상으로는, 25.92Mbps속도로 1,030m까지 전송이 가능하고, JFFS케이블은 910m정도, BKMA케이블은 850m정도까지 전송이 가능할 것을 볼 수 있다. Interferer의 수에 거의 무관하게 maximum reach가 일정한 것은 VDSL수신기가 8dB정도의 작은 SNR조건에도 10^{-7} 의 BER로 복구가능한 이상적인 수신기를 가정하였기 때문이다. SNR값이 8dB이상되는 케이블의 길이는 매우

길기 때문에 crosstalk이 thermal noise수준보다 상대적으로 매우 작다.

III. VDSL시스템의 BER성능 측정

3.1 환경 구성 및 측정 방법

DAVIC, ETSI, ANSI에서 명시하는 10^{-7} 의 BER(Bit Error Rate)을 만족시키는 수신측의 SNR을 구하기 위해서, (그림 11)과 같이 테스트베드를 구성하였다. 사용된 시료로서는 VCU(VDSL Channel Unit)과 COTU(CO-side Optical Transmission Unit), ONU shelf 1set과 VDSL NIU(Network Interface Unit) 1set이며, 계측기로서는 spectrum analyzer(HP 8593A), ATM Analyzer (HP 37717, HP E4200B)를 사용하였다. 동선케이블과 VCU 및 NIU사이에는 100ohm BALUN(BALance UNbalance, North Hill FSCM98821)을 사용하였으며, PC S/W (HP E444A BenchLink spectrum analyzer)을 사용하여 spectrum자료를 PC로 저장하여 Matlab으로 2차 가공분석하였다.

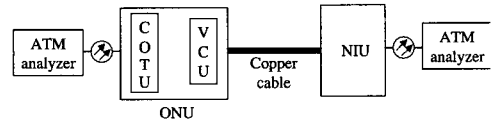


그림 11. BER성능 측정 환경

BER측정은 동선케이블의 예상되는 최대 길이부터 시작하여 10m씩 케이블의 길이를 줄여가면서 Bit Error가 발생하지 않는 길이에서 멈추고, 그 때의 전력스펙트럼을 측정/기록하였다. 이것은 송신측 ATM분석기에서 PRBS(pseudo random bit stream)를 발생시키고, 수신측 ATM분석기에서 수신되는 스트림의 BER을 확인하는 방식으로 진행하였다. 각 케이블 길이에서의 측정시간은 BER측정값이 0.9×10^{-7} 에서 1.1×10^{-7} 사이가 될 확률이 90%이상되는 시간, 즉 4-CAP 26Mbps 전송의 경우이므로, 210초 동안 BER을 측정하였으며, 일단 10^{-7} 보다 작은 BER이 나타나는 케이블 길이를 발견하면, 그 상태에서 30분이상 장시간 시험함으로써, 10^{-7} 보다 작은 BER을 나타내는 조건임을 재확인하였다.

3.2 BER 측정시간

VDSL모델에 대한 비트오류확률을 측정하는 데 있어서, 측정결과에 대하여 특정 수준이상의 정확도와 신뢰도를 확보하기에 필요한 최소의 측정시간을

계산하기 위해, 다음과 같이 모델링하였다.

무한히 많은 symbol을 전송하여 측정된 symbol error rate을 p 라고 가정하고, N 개의 symbol을 전송하여 측정된 symbol error rate을 이라고 P_N 정의한다.

Y_N 를 N 개의 symbol을 전송한 경우에 오류를 경험하는 symbol들의 수라고 정의하면, 측정에 의해 계산하는 symbol error rate P_N 은 $\frac{Y_N}{N}$ 이다.

그런데, Y_N 은 binomial random variable이므로, N 개 symbol전송시 k 개 symbol이 오류발생할 확률은 (식 13)과 같다.

$$\text{Prob}\{Y_N = k\} = \binom{N}{k} p^k (1-p)^{N-k} \quad (\text{식 13})$$

Binomial r.v.의 경우, $E\{Y_N\}=Np$ 이고, $\text{Var}(Y_N)=Np(1-p)$ 이므로, p_N 의 평균과 분산은 (식 14)와 (식 15)와 같다.

$$E(p_N) = \frac{E(Y_N)}{N} = p \quad (\text{식 14})$$

$$\text{Var}(p_N) = \frac{1}{N^2} \text{Var}(Y_N) = \frac{p(1-p)}{N} \quad (\text{식 15})$$

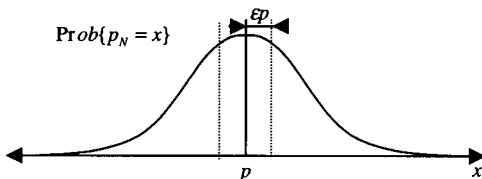


그림 12. Gaussian r.v.의 확률분포 함수

N 이 충분히 큰 값일 때, p_N 은 Gaussian r.v.가 되므로(그림 12), N 개의 symbol을 전송하여 측정된 symbol error rate(p_N)가 실제값(p)의 부근 $p \pm \epsilon p$ 내의 범위에 나타날 확률은 (식 16)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Prob}\{|p_N - p| < \epsilon p\} &\cong \int_{-p\epsilon}^{p\epsilon} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx \quad (\text{식 16}) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{\epsilon p}{\sigma}}^{\frac{\epsilon p}{\sigma}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = 1 - 2Q\left(\frac{\epsilon p}{\sigma}\right) \end{aligned}$$

그리고, p 가 1보다 매우 작은 값일 경우에, $\text{Var}(p_N) \cong \frac{p}{N}$ 이 되므로, $\sigma^2 = \frac{p}{N}$ 이고, 따라서, (식 16)는 (식 17)가 된다.

$$\text{Prob}\{|p_N - p| < \epsilon p\} \cong 1 - 2Q(\epsilon\sqrt{Np}) \quad (\text{식 17})$$

예를 들면, 4-CAP변조방식을 사용하여 26 Mbps bit stream을 전송하여 10^{-7} 정도의 bit error rate을 측정하고자 할 때, 측정치 p_N 이 실제값(p)의 부근 $p \pm 0.1p$ 내의 범위에 나타날 확률이 90%이상되도록 측정하려면, 전송해야 하는 최소 bit수 N 은 다음과 같이 구할 수 있다.

조건으로부터 $\epsilon=0.1$ 이고, $1-2Q(\epsilon\sqrt{Np})=0.9$ 이며, $Q(x) = \frac{1-0.9}{2} = 0.05$ 를 만족하는 x 값은 약 1.645정도가 된다. $\epsilon\sqrt{Np}$ 로부터 N 값은 (식 18)과 같이 구한다.

$$N = \frac{x^2}{\epsilon^2 p} \cong 2.7 \times 10^9 \quad (\text{식 18})$$

따라서, 2.7×10^9 개 bit를 전송하여 측정해야 하며, 26Mbps로 전송하므로, 이에 필요한 시간은 약 105sec정도이다. 실제 BER측정시에는 VDSL Frame Format의 오버헤드를 고려하여 $105 \times 2 = 210$ sec를 적용하였다.

3.3 CAP 변조방식의 BER

M-level 1-dimensional PAM(Pulse Amplitude Modulation)에 대한 심볼오류확률은 additive Gaussian Noise환경에서 (식 19)와 같다^[12].

$$P_{e,M}^{PAM} = 2\left(1 - \frac{1}{M}\right) \times Q\left(\sqrt{\frac{6}{M^2 - 1}} \times \text{SNR}\right) \quad (\text{식 19})$$

$$\text{SNR} = E_s/N_0$$

CAP변조방식은 2차원 인코딩방식으로서, In-phase와 Quadrature-phase에 각각 1개의 PAM신호가 인가된 것과 동일시 할 수 있으며, 두개의 PAM 신호는 서로 독립이므로, CAP변조방식에 대한 심볼 오류확률은 (식 20)과 같다.

$$P_{e,M}^{CAP} = 1 - (1 - P_{e,M}^{PAM})^2 \cong 2P_{e,M}^{PAM} \quad (\text{식 20})$$

CAP의 signal constellation상에 데이터 심볼을 Gray encoding 규칙을 적용할 경우, VDSL 수신기의 디코더 출력단에서의 비트오류확률 P_B^0 은, 심볼 당 비트수가 m 인 경우, (식 21)과 같다.

$$P_B^0 = \frac{P_{e,M}^{CAP}}{m} \quad (\text{식 21})$$

4-CAP인 경우에는 m 은 2이고, 16-CAP인 경우에는 m 은 4이다.

3.4 측정 결과

시험환경에서 측정된 thermal noise의 전력스펙트럼밀도($N_d/2$)는 140.27 dBm/Hz 이었다.

CPEV 0.5mm, CPEV 0.65mm, UTP3 0.5mm, UTP5 0.5mm, Foam Skin 0.4mm케이블 각각에 대하여 측정한 결과, NIU측에서 수신한 신호의 SNR 값이 20.94 dB인 경우에 10^{-7} 이하의 BER을 나타내었다. 4-CAP변조방식의 경우, 10^7 의 BER을 나타내는 SNR값은 약 14.5 dB인데, 측정결과가 20.94 dB로서 이론적 수치보다 높게 나타난 것은 VDSL 모델 제작에 사용된 각종 필터들의 비선형성, 보드 라우팅에 의한 잡음 등이 BER 성능에 변수로 작용한 때문으로 보인다. SNR이 20.94 dB 인 경우에 4-CAP변조방식에 의한 심볼오류확률은 7.6×10^{-29} 정도이다.

(그림 13)과 (그림 14)는 FEXT-dominated 환경 하에서 VDSL모델을 사용하여 서비스가 가능하고, 각각 0dB과 6dB의 noise margin을 확보하는 최대 거리를 분석한 결과이다. 25페어케이블에 VDSL가입자를 1가입자 수용한 경우에는 VDSL FEXT가 존재하지 않으므로, 감쇠특성과 thermal noise에 의해 수신측 모델의 SNR이 결정되므로, 케이블의 직경이 큰 CPEV 0.65mm케이블이 670m까지 도달 가능하고, 0.5mm케이블들은 560~590m까지, 그리고 0.4mm케이블은 470m까지 도달가능한 것으로 나타났다.

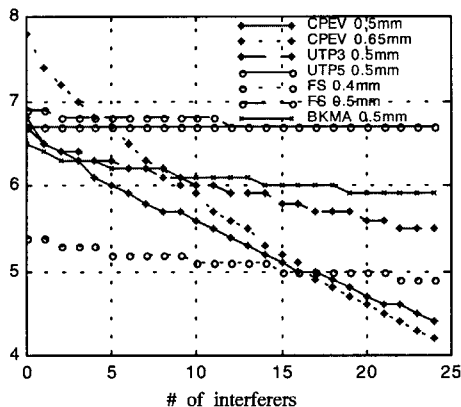


그림 13. 0dB Noise Margin을 확보하는 최대 거리

그러나, 가입자수가 2명이상 되면, 케이블의 직경보다는 케이블의 누화특성에 의해 도달거리가 좌우

되므로, 가입자수가 10명인 경우 누화특성이 좋은 UTP5케이블은 570m까지 도달가능한 반면, CPEV 0.65mm케이블은 도달거리가 200m에 불과하였다. 특이한 점은, JFFS 0.5mm케이블의 도달거리가 UTP5를 제외한 다른 종류의 케이블들의 특성보다 월등히 좋은 것으로 분석된 점이다.

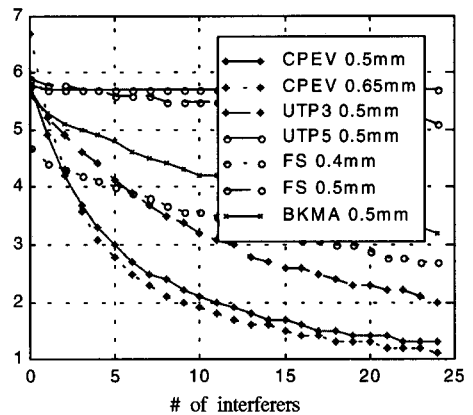


그림 14. 6dB noise margin을 확보하는 최대 거리

IV. 결론

케이블의 특성만을 고려하고, VDSL모델의 성능이 이상적인 경우를 가정한 Shannon의 이론적 채널 용량은 CPEV 0.65mm케이블은 1,030m, UTP5 0.5mm케이블은 890m, JFFS 0.5mm케이블은 910m 부근의 도달거리가 가능한 것으로 분석된다.

그러나, 제작된 VDSL모델의 성능이 이론적 채널 용량을 충분히 활용하지 못하고 잡음에 대한 면역성의 차이 때문에, UTP5 0.5mm케이블은 570m, JFFS 0.5mm케이블은 510m, 나머지 케이블들은 300m이하의 도달거리를 나타내는 것으로 분석되었다. 특히, CPEV 0.5mm와 0.65mm케이블은 6dB Noise Margin을 적용한 경우, 도달거리가 다른 케이블에 비해 현저히 짧아진 130m와 110m를 각각 나타내었다.

가입자의 VDSL보급률은 30%정도로 가정할 때, UTP5케이블은 570m, UTP3케이블은 370m, CPEV 0.65mm케이블은 230m, CPEV 0.5mm케이블은 250m, JFFS케이블은 380m정도의 도달거리를 확보할 수 있으므로, VDSL 동선케이블로서 UTP5케이블을 사용하는 것이 이상적이다. JFFS 0.5mm케이블은 현재 전화교환국에서 아파트지역 MDF 또는 일반주거지역까지의 피더 케이블로서 널리 사용되고

있으며, 가격도 UTP5케이블보다 매우 저렴하므로, 가격이 문제되는 지역의 경우에 JFFS 0.5mm케이블을 사용하는 것도 한 가지 방법으로 판단된다. 또한, VDSL선로설계시 ONU의 위치로부터 세대단자함까지의 거리를 250m이내로 할 경우에는 CPEV케이블을 사용하고, 370m이내로 할 경우에는 UTP3케이블도 대안이다.

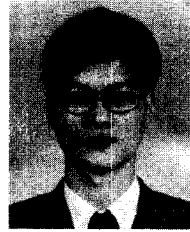
기존 아파트의 경우에는 CPEV 0.5mm케이블과 CPEV 0.65mm케이블이 이중접속되어 사용되고 있으므로, ONU의 설치위치를 정할 때, 250m정도의 도달거리를 가정하고 위치를 정해야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] DAVIC spec. 1.0 Rev 5.0
- [2] T1E1.4/98-043R2
- [3] DTS/TM-06003-1 V0.0.7
- [4] FSAN Requirement Specification 1.0
- [5] Gi-Hong Im, "Carrierless AM/PM Modulation and Its Applications for HDSL/ADSL, ATM LAN and Broadband Interactive Multimedia", 텔레콤 제 10권 제2호, 1994.12
- [6] Victor B. Lawrence, "Broadband Access to the Home on Copper", Bell Labs Technical Journal, summer, 1996
- [7] "A new analytical method for NEXT and FEXT noise calculation", T1E1.4/98-189, ANSI T1E1.4 meeting in Huntsville, AL, 1-5 June, 1998
- [8] CEI/IEC 1156-1, "Multicore and symmetrical pair/quad cables for digital communications, part 1: Generic specification", CEI, 1994
- [9] Lucent Technologies, "UTP Cable FEXT Test Methods", Advance Application Note, March 13, 1998
- [10] Gang Huang and J.J.Werner, "T1E1.4/97-169: VDSL Cable Characteristics", May 12-16, 1997
- [11] ANSI/TIA/EIA-568-A, "Commercial Building Telecommunications Cabling Standard", ANSI, October, 1995.
- [12] John G. Proakis, "Digital Communications", McGraw-Hill, 1983

길 계 태(GyeTae Kihl)

정회원



1989년 한양대학교 전자통신공학과 (공학사)
1991년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1991년~현재: 한국통신 연구개발본부

2000년 3월~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(박사과정)

<주관심 분야> 고속데이터통신, xDSL, ATM

e-mail: gategil@kt.co.kr

하 종 영(Joungyoung Ha)

정회원



1987년 2월: 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1989년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과 (석사)
1992년~현재: 한국통신 가입자망연구소 전임연구원

<주관심 분야> 광가입자망, 광전송기술

권 순 철(SunCheol Gweon)

정회원



1983.2: 고려대 전자공학과 (학사)
1985.2: 서울대 전자공학과 (석사)
1990.8: 미국 Texas A&M Univ. (Ph.D.)

1985~1986: 해태전자 특수개발부

1991.3~현재: 한국통신 가입자망연구소 FLC연구실 장(책임연구원)

<주관심 분야> 가입자망기술

e-mail : scgweon@kt.co.kr

한 권 훈(Kwonhoon Han)

정회원

1982년 2월: 서울대학교 금속공학과 졸업(공학사)
1992년: Rutgers University(USA)세라믹공학과 졸업 (공학박사)

1992년~현재: 한국통신 가입자망연구소 광선로연구실장

<주관심 분야> 광가입자망, 광전송기술

신 종 원(JongWon Shin)

1989.2 : 광운대학교 전자통신공학과

1989.5 ~ 1999.12.31 : 삼성전자

2000.1 ~ 현재 : 샘서스 전자

daniel@semsus.co.kr

<주관심 분야> xDSL 전송기술

임 종 대(JongDae Lim)

1981.2 : 한양대학교 전자통신공학과 (학사)

1981.2 ~ 현재 : 삼성전자 정보통신부문 기간네트워크 사

업무 Access Network 개발팀 수석연구원

<주관심 분야> 액세스네트워크 시스템 개발