

HFC망 상향채널 모델링과 양방향 CATV 시스템의 성능 개선에 대한 연구

이재일, 서종수
연세대학교 공과대학 전기·전자 공학과

Study of Modeling HFC Networks Upstream Channel and Performance Improvement of Two-Way CATV System

Jae-II Lee, Jong-Soo Seo
Dept. of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University

요 약

본 논문에서는 고품질의 DTV, HDTV와 인터넷 등의 고속 광대역 멀티미디어 서비스를 위한 HFC(Hybrid Fiber Coaxial)-CATV망의 상향채널을 SPW(Signal Processing Worksystem)를 사용하여 모델링하고, HFC-CATV망 상향채널의 문제점인 유입잡음의 영향을 전산모의 실험을 통해 분석하였다. 그리고 상향채널의 열악성을 극복할 수 있는 방법으로 트렐리스 부호화 변조(Trellis-Coded Modulation)와 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)을 결합한 OFDM-TC8PSK 시스템을 제안하고 그 성능을 CATV 상향채널 환경에서 전산모의 실험하고 기존의 QPSK 시스템의 성능과 비교 분석하였다.

1. 서 론

국내 초고속망 구축에 있어서 기존 전화망을 이용한 가입자망은 전송속도의 한계를, 광케이블망의 경우엔 높은 비용의 문제를 안고 있으므로 동축케이블망과 광케이블망의 혼합형인 HFC(Hybrid Fiber Coax)망을 통한 디지털 전송 방식이 가입자망으로 대두되고 있다. 그러나, 기존의 CATV망인 동축망은 방송국에서 가입자까지의 하향채널 방송신호의 전송을 주된 목적으로 수지 분기형(Tree & Branch)으로 설계되어 상향신호의 전송시 가입자단으로부터의 임펄스성 잡음이 헤드엔드의 수신측에서 합쳐지는 잡음의 깔데기 현상(Noise Funneling)을 겪게되어 가입자에서 방송국까지의 상향채널 디지털 신호의 전송 품질을 보장하지 못한다^{[1][2][3]}. 따라서 기존의 케이블 TV망을 이용한 DTV, HDTV 또는 인터넷 등 고속 광대역의 멀티미디어 서비스를 제공하기 위해서는 케이블 TV망에 대한 정확한 분석과 시스템 성능 개선방안이 필요하다.

본 논문에서는 HFC-CATV망 상향채널에서 발생하는 잡음들을 SPW를 사용하여 모델링하고, 전산모의 실험을 통하여 이 채널에서 가장

문제점인 가입자단으로부터 발생하는 임펄스성 잡음의 유입 영향을 분석한다. 또, 트렐리스 부호화 변조와 다중반송파 방식인 OFDM을 결합한 OFDM-TC8PSK 시스템을 상향채널의 열악성을 극복할 수 있는 방법으로 제안하고 그 성능을 CATV 상향채널 환경에서 기존의 QPSK 시스템의 성능과 비교 분석한다.

2. HFC-CATV망의 구조와 특성

2.1. HFC-CATV망의 구조

그림 1과 같이 HFC-CATV망은 HE(Head End)에서 ONU(Optical Network Unit)까지는 성상형(Star) 구조를 가지며 광케이블을 사용하여 신호를 전송하고, 최종 ONU에서 가입자 단말까지는 수지형(Tree & Branch) 구조를 가지며 동축케이블을 사용하여 신호를 전송한다^[1].

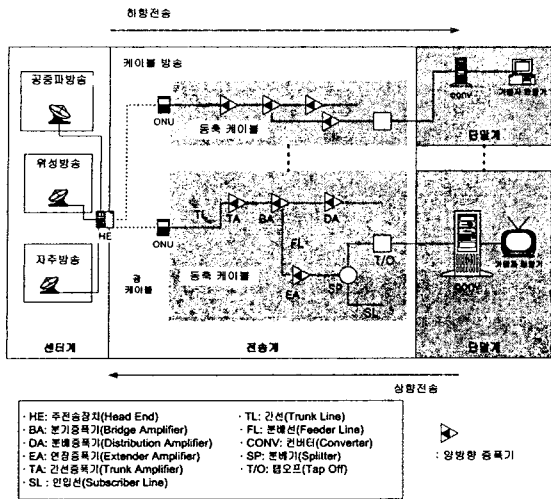


그림 1. HFC-CATV의 기본 구성도

2.2. HFC-CATV 주파수 이용

HFC-CATV망에서는 그림 2 처럼 상향과 하향의 주파수대역을 나누어 쓰고 기존의 단방향 전송 시스템에서 다이플렉서 필터와 같은 양방향 통신이 가능한 장치들로 교체함으로써 양방향 통신 서비스를 제공할 수 있다. 전체 주파수 대역폭은 750MHz이며, 5~42MHz는 상향신호, 54~450MHz는 아날로그 하향신호, 450~750MHz는 향후 추가될 데이터 서비스 및 멀티미디어 서비스에 각각 사용된다.^{[1][2]}

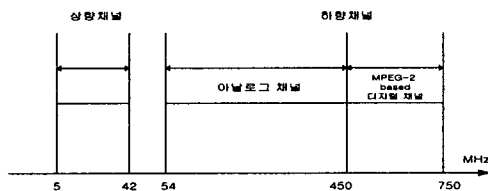


그림 2. HFC-CATV망의 주파수 할당

2.3 깔데기 현상(Noise Funneling)

수지형 구조의 기존의 동축 CATV망에서는 분배기 또는 분기기와 같은 수동소자를 이용하여 분기한다. 하향채널에서는 신호가 분배기를 통과했을 때 신호가 감소되는 만큼 잡음도 감소 되어 분기후 신호대 잡음비의 변화가 없지만, 상향채널에서는 하향채널에서 분기 출력단이었던 것이 입력단이 되므로 그림 3과 같이 정보를 가진 신호가 한 곳에서 입력되더라도 잡음이 그 분기기가 연결된 모든 가입자의 잡음으로 합쳐져서 입력되므로 신호대 잡음비가

감소하게 되며, 이런 현상을 깔데기 현상 (Noise Funneling)이라고 한다. 이는 상향채널과 하향채널간의 전송속도 차이를 일으키는 직접적인 원인이 된다.^{[1][2]}

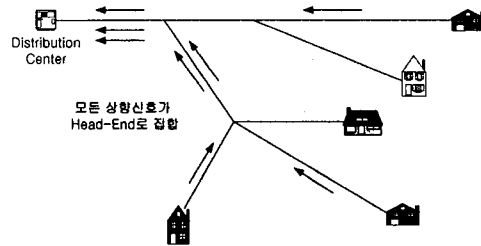


그림 3. 상향채널에서의 깔데기 현상

2.4 HFC-CATV망의 잡음

HFC-CATV망에는 동축 케이블간의 연결부에서 신호가 반사되어 일어나는 반향(Echo), 시스템 자체에서 일어나는 열잡음, 동축케이블에서의 경로손실, 증폭기에서의 비선형 왜곡, 유입잡음 등이 존재한다. 특히 가입자 단으로부터 유입되어 들어오는 임펄스성 유입잡음은 전송망의 공유로 인해 수신단에서 집중되는 깔데기 현상을 일으켜 상향통신의 품질에 커다란 영향을 미친다.^{[1][2][9]} 그림 4에 양방향 CATV의 상향채널을 도식적으로 표현하였다.

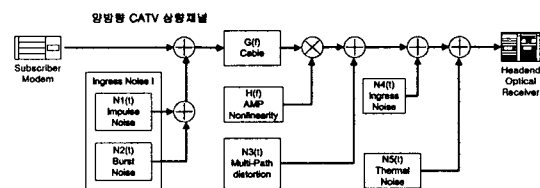


그림 4. HFC-CATV 상향채널 환경

3. CATV 전송채널 모델링

3.1 채널 열화 요인에 대한 모델링

1) 열 잡음

도체 내에서는 전자가 온도에 따라 불규칙 운동을 한다. 이로 인해 전류가 생기고 전압이 발생되는데 이를 열잡음이라 한다. 채널의 실제적인 최대 전송용량은 이 열 잡음에 의하여 결

정되며, 단위 주파수 당 열 잡음은 식 (1)과 같다.^[6]

$$\text{Noise Power Density} = 4kT \quad (1)$$

여기서, k : Boltzmann 상수 ($k = 1.38 \times 10^{-23}$ joules/Calvin), T : 절대온도

2) 경로 손실

전송신호는 케이블의 종류, 동작주파수와 경로의 길이에 따라 상이한 감쇄특성을 가진다. 케이블의 종류에 따른 특성 임피던스, 캐패시턴스, 인덕턴스 등의 파라미터 값을 사용하여 식 (2)와 같이 감쇄정수 α 로 경로 손실을 정의할 수 있다.^[11]

$$\alpha = \frac{0.435}{Z_0 \times D} \left[\frac{D}{d} K_1 \times K_2 \right] \sqrt{F} + 2.78 \sqrt{E} \times P.F. \times F \quad [dB/100ft] \quad (2)$$

여기서,

α = 감쇄량 [dB/100ft] d = 내경 [inches]
 D = 외경 [inches] K_1 = strand factor
 K_2 = braid factor F = 주파수 [MHz]
 $P.F.$ = 전력 요소 Z_0 = 임피던스
 E = 케이블 절연체의 비유전율 상수

본 논문에서 케이블의 감쇄량은 간선, 분기선, 인입선별로 모델링하며, 표 1과 같이 간선은 동축 케이블 HFA-17, 분배선은 HFA-12, 인입선은 HFA-5를 가정하여 모델링하였다.^{[6][10]}

표 1. 동축 케이블의 종류별 파라미터 특성

케이블 종류 파라미터	간선	분기선	인입선
	HFA-17	HFA-12	HFA-5
외경(D)[mm]	19.1	12.7	5.5
내경(d) [mm]	4.2	2.8	1.2
Dielectric Constant(e)	2.3	2.3	2.3
Power Factor(P.F)	0.0003	0.0003	0.0003
Strand Factor(k1)	-3.048	-0.417	25.889
Braid Factor(k2)	18.087	6.526	-114.27

3) 비선형 왜곡

비선형 왜곡은 주로 증폭기에 의해 일어나며 신호의 크기와 위상을 비선형적으로 변환한다.

본 논문에서는 간선 증폭기, 분배 증폭기, 연장 증폭기로 분류하여 비선형 증폭기 특성을 SPW의 복소 비선형 증폭기 블록을 사용하여 표 2와 같이 모델링하였다.^[6]

표 2. 각 증폭기 파라미터

분류 항목	간선 증폭기		분기 증폭기		연장 증폭기	
	상 향	하 향	상 향	하 향	상 향	하 향
기준 이득[dB]	7	22	3.5	30	13.5	22
출력레벨[dB μ V]	90	92	90	100	100	102
Composite Triple Beat[dB]	-73	-78	-70	-60	-75	-66
잡음 지수[dB]	15	10	19	10	10	12

4) 유입 잡음

가입자 단으로부터 유입되어 들어오는 임펄스 성 잡음인 유입잡음은 임펄스 잡음과 연접 잡음으로 이루어져 있다. 임펄스 잡음은 전기모터나 엔진 점화장치, 전력 스위치와 같은 수동적인 요인으로 인하여 발생하고 광대역이며, 통과대역 전체에 나타나 Noise floor를 증가시킨다.

연접 잡음은 어느 정도의 주기성을 띄며, 임펄스 잡음보다는 잡음 전력이 작게 연접하여 발생하는 잡음으로 임펄스 잡음이 긴 시간동안 들어오는 경우이다.

본 논문에서는 잡음의 전력을 신호의 전력과 같다고 가정하여, 표 3, 표 4와같이 주기 R과 펄스폭 d를 갖는 주기적 신호를 사용하여 임펄스 잡음과 연접 잡음을 모델링하였다.^{[1][2][3]}

표 3. 임펄스 잡음 파라미터

Parameter Condition	Pulse Width(d)	Frequency(R)
light	1 μ sec	58kHz
average	1 μ sec	120kHz
heavy	1 μ sec	170kHz

표 4. 연접 잡음 파라미터

Parameter Condition	Duration(d)	Rate(R)
light	8 μ sec	10Hz
average	20 μ sec	10Hz
heavy	80 μ sec	10Hz

5) 반향현상

유선 전송채널에서는 임피던스 부정합시 전송된 신호가 반사되어 돌아오는 영향에 의해 그림 5와 같이 무선채널에서 처럼 다중경로가 발생하게 된다. 이러한 에코 현상은 송신부와 수신부 사이의 전송매질과 간접 경로의 길이에

따라 달라지며, 디지털 전송에서 심볼간 간섭을 일으키게 된다^[9].

본 연구에서는 표 5와 같이 서로 다른 지연시간을 갖는 다섯 개의 경로를 가질 경우로 모델링하였다^[3].

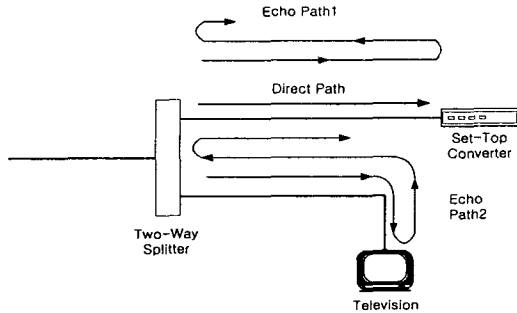


그림 5. HFC-CATV 채널에서의 반향 현상

표 5. 반향(Echo) 파라미터

Path No. Con.	Echo Path1 (0)	Echo Path2 (0.5)	Echo Path3 (1.0)	Echo Path4 (1.5)	Echo Path5 (2.0)	Delay time (μ sec)
light	0	0	0	7.0	8.0	C/Echo (dB)
average	0	0	0	5.0	6.0	C/Echo (dB)
heavy	0	2.0	3.0	13.0	14.0	C/Echo (dB)

4. OFDM-TC8PSK 시스템

4.1 OFDM

OFDM은 직렬 심벌 블록을 병렬 심벌들로 변환하고 이에 대응하는 각각의 직교 부반송파(subcarrier)를 발생하여 변조하는 방식이다. 직렬 심벌 주기가 T_s 일 때 OFDM의 심벌 주기는 부반송파의 개수 N 만큼 곱해진 NT_s 가 된다. 이 때 NT_s 를 채널의 제곱 평균 자승(rms) 지연시간보다 길게하면 각 부반송파에서의 심벌율이 직렬 데이터율보다 매우 작아지기 때문에 다중경로에서 생기는 지연시간에 따른 수신신호의 심벌간 간섭(Intersymbol Interference)의 영향을 줄일 수 있다. 즉, 부반송파 수만큼 심벌 주기가 늘어나므로 고속 데이터 전송시 지연 경로의 rms 지연 시간이 단일 반송파의 심벌 주기보다 긴 주파수 선택적 페이딩인 경우에도 OFDM 심벌 주기가 채널의 지연 시간보다 길게 되므로 상대적으로 페이딩의 영향을 적게 받게 된다^{[4][5]}.

τ_k 가 각 전송채널의 지연이며 $P(\tau_k)$ 가 그 경

로의 상대적 수신 전력일 때 지연 확산 σ_k 는 식 (3)과 같이 주어진다^[8].

$$\sigma_k = \sqrt{\tau^2 - (\bar{\tau})^2} \quad (3)$$

여기서

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)}, \quad \tau^2 = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k^2}{\sum_k P(\tau_k)} \quad \text{이다.}$$

주파수 선택적 페이딩과 주파수 비선택적 페이딩을 결정하는 요소인 코히어런스 대역폭 B_c 는 식 (4)와 같다^[8].

$$B_c \approx \frac{1}{5\sigma_k} \quad (4)$$

표 5의 값을 식(3)과 (4)에 대입하여 HFC-CATV 상향채널의 지연 확산과 코히어런스 대역폭을 구하면 표 6과 같다.

표 6. 지연 확산 및 코히어런스 대역폭

	지연 확산	코히어런스 대역폭
light	0.545 μ sec	366.9724771kHz
average	0.591 μ sec	338.132779kHz
heavy	0.86 μ sec	232.5003728kHz

여기서 $\sigma_k > 0.1T_s$ 이면 주파수 선택적 페이딩을 겪게 되어 심볼간 간섭이 일어나게 되지만, OFDM의 심벌 주기는 부반송파의 개수 N 만큼 곱해진 NT_s 가 되므로 부채널의 수 N 을 조절하여 심볼간 간섭의 영향을 줄일 수 있다.

4.2 TC-8PSK

트렐리스 부호 변조를 사용하면 전력제한 환경에서 효율적인 방법인 채널 부호화와 대역폭이 제한된 환경에서 효율적인 방법인 M-ary 변조 방식을 하나의 과정으로 수행하여 대역폭과 전력의 증가없이 신뢰도를 향상시킬 수 있다. 그림 6~ 그림 8은 정보 비트로부터 매 T 초 동안 2 비트의 정보 비트를 전송하는 디지털 통신 시스템으로 TC-8PSK 시스템의 개념을 설명한 것이다. 그림 6은 부호화를 하지 않고 매 T초마다 1개의 신호를 전송하는 QPSK 변조방식을 사용한 경우이다. 그림 7과 같이 그림 6에 부호화율 2/3인 컨벌루션 부호화를 하면 필요한 대역폭이 3/2배가 된다. 그러나

그림 8과 같이 8PSK 변조방식을 사용하면 부호화율 2/3인 컨벌루션 부호화를 하여도 QPSK와 동일한 대역폭으로 대역폭의 증가없이 부호화된 정보 신호를 전송할 수 있다^[7].



그림 6. 부호화하지 않은 QPSK

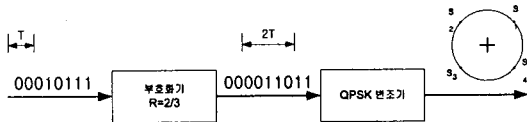


그림 7. R=2/3인 QPSK

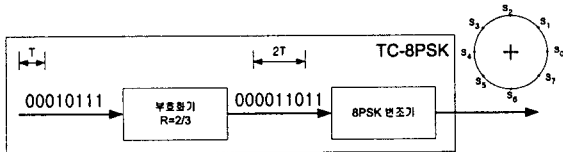


그림 8. R=2/3인 8PSK

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

전산모의 실험에 사용한 채널환경과 시스템 파라미터는 표 7, 표 8과 같고, 이 때 송신전력 스펙트럼과 수신잡음을 제한하기 위하여 roll-off factor가 0.25인 Square-Root Raised Cosine Low-Pass 필터를 사용하였다. 전산 모의 실험에 사용된 툴은 Cadence사의 SPW이다. 그림 8과 그림 9로의 결과로 알 수 있듯이 HFC-CATV 상향채널은 임펄스성 잡음의 크기보다는 주기에 영향을 많이 받는다. 즉 가입자의 수가 늘어남에 따라 상향채널의 열화가 심해짐을 알 수 있다. 따라서 HFC-CATV망을 통해 양질의 양방향 서비스를 제공하기 위해서는 가입자 수의 제한이 필요하다. 또, 다중 반송파 전송방식인 OFDM-TC8PSK 시스템이 그림 10에서 알 수 있듯이, 같은 가입자 수도 기존의 QPSK시스템보다 1×10^{-3} 의 BER에서 약 2.2~5dB의 E_b/N_0 성능 개선을 얻는다. 즉 5~42MHz의 한정된 상향대역에서 기존의 시스템과 같은 대역으로도 부호이득을 얻을 수 있고 반향현상의 영향을 덜 받는 방식인 OFDM-TC8PSK 시스템을 쓴다면 같은 전력에서 더 많은 가입자 수를 가질 수 있고, 같은 가입자 수를 갖는다면 보다 양질의 서비스를

제공할 수 있다.

표 7. HFC-CATV 상향 채널환경

잡음	파라미터
경로손실	표 1 (간선, 분기선, 인입선)
열잡음	AWGN(E_b/N_0 : 2~18dB)
비선형왜곡	표 2
임펄스 잡음	표 3
연집 잡음	표 4
반향	표 5 (average)

표 8. 전산 모의실험 조건

변조방식	QPSK	OFDM-TC8PSK
에러정정부호	-	4상태 트렐리스 부호 Viterbi 복호
부반송파 수	-	96
심볼률	320kHz	
필터	Raised Cosine Low Pass Filter (roll off factor = 0.25)	
채널환경	양방향 CATV 상향채널	

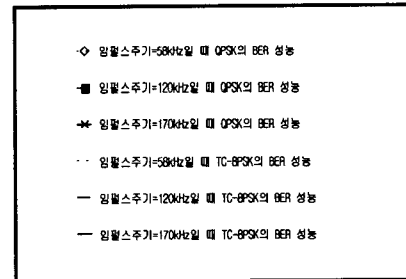
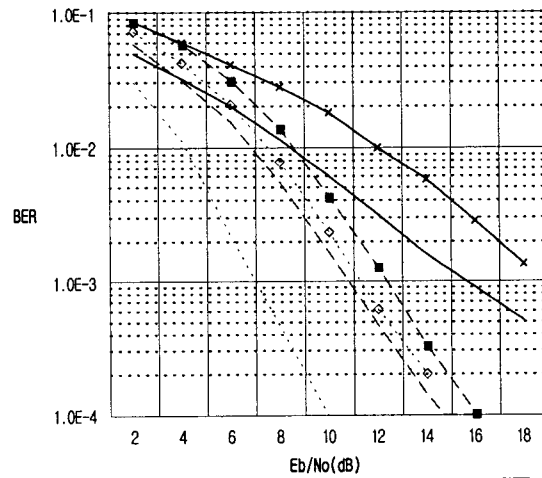


그림 9. 연집 잡음(크기=8μsec, 주기=10Hz)일 때의 임펄스 잡음 변화에 따른 시스템의 BER 곡선

6. 결론

HFC-CATV망에서 양질의 양방향 멀티미디어 서비스를 제공하려면 망정비를 통한 가입자수의 제한으로 임펄스성 유입잡음의 유입을 제한하여야 하고, 또 잡음에 강한 시스템이 필요하다. 본 논문에서 제안한 OFDM-TC8PSK 시스템은 기존의 QPSK 시스템보다 E_b/N_0 성능을 개선시킬 수 있다. 그러나 여전히 임펄스성 잡음의 유입에 크게 영향을 받으므로, 향후 보다 나은 양질의 양방향 서비스를 HFC-CATV망을 통해 제공하기 위해서는 임펄스성 잡음에 강한 시스템의 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] R.P.C. Wolters, "Characteristics of Upstream Channel Noise in CATV-networks," IEEE Transaction on Broadcasting, Vol. 42, No.4, Dec. 1996.
- [2] Bruce Currivan and Bill Xenakis, "Considerations For Upstream Channel Communications in CATV Systems," Electronic Design, Feb. 3, 1997.
- [3] Cable Television Lab., *Advanced Modulation Systems Technology Report*, October 13th, 1997.
- [4] J. van de Beek, M. Sandell, P. O. Borjesson, "On Synchronization in OFDM Systems Using the Cyclic Prefix", Vehicular Technology Conference, 1995.
- [5] Gottfried Ungerboeck, "Channel Coding with Multilevel/Phase Signals", IEEE Trans. on Information Theory, Vol. IT-28, No. 1, Jan. 1982.
- [6] 김기철, *CATV 종합 핸드북*, 도서출판 技多利, 1993.
- [7] Bernard Sklar, *Digital communications fundamentals and applications*, Prentice Hall, 1988.
- [8] Theodore S, Rappaport, *Wireless communications principles & practice*, Prentice Hall, 1996.
- [9] Kenneth j. Kerpez, "Digital transmission over in-home coaxial wiring", IEEE Transmissions on broadcasting, Vol. 43, No. 2, June 1997.
- [10] LG Cable, *Coaxial cable for CATV*, 1988
- [11] Times Microwave Systems Ltd., *Coaxial Cable The Complete Handbook*, 1987.

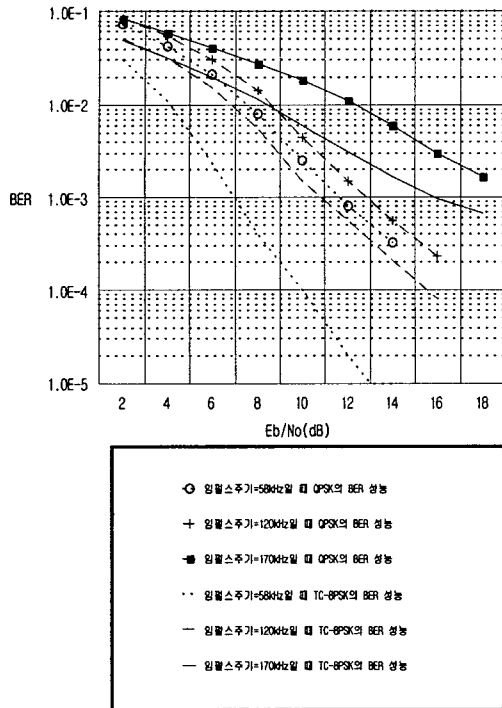


그림 10. 연접잡음(크기=80 μ sec, 주기=10Hz)일 때의 임펄스 잡음 변화에 따른 시스템의 BER 곡선

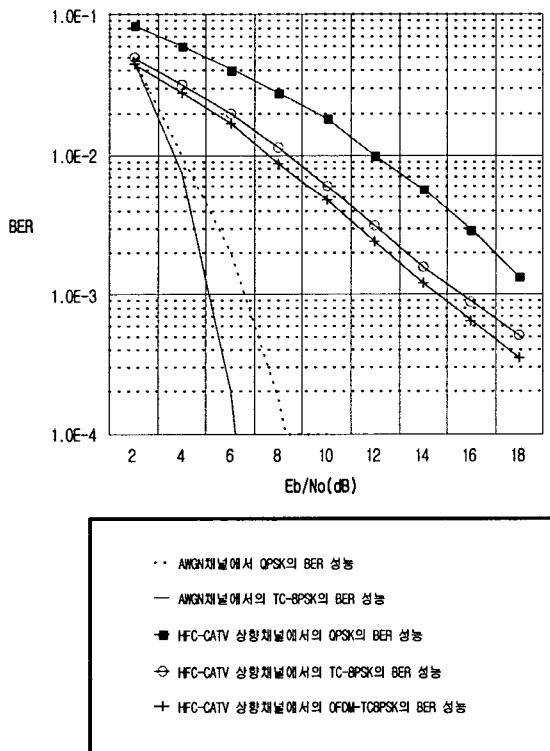


그림 11. 임펄스잡음(크기=1 μ sec, 주기=170kHz), 연접잡음(크기=8 μ sec, 주기=10Hz)일 때, 각 시스템의 BER 곡선