

---

# 다중 반송파 전송 방식들의 성능 분석

최승국\* · 이기영\*

## Performance Evaluation of Multi Carrier Transmission Techniques

Seung-kuk Choi\* · Ki-Young Lee\*

### 요 약

다중 반송파 전송 방식에서는 데이터 전송 시, 서로 직교성이 있는 여러 개의 부반송파들을 사용한다. 그러므로 주파수 다이버시티 효과를 얻을 수 있어서 성능이 우수한 전송이 가능하다. 본 논문에서는 여러 가지 종류의 다중 반송파 전송 방식들을 사용했을 때의 전송시스템 성능을 비교 분석한다. 이러한 여러 가지 시스템들에서 데이터가 다중 경로 Rayleigh 페이딩 환경 하에서 전송될 때의 데이터 비트 에러율을 분석한다.

### ABSTRACT

Multi carrier transmissions are digital modulation techniques where a single data symbol is transmitted at multiple subcarriers which are orthogonal to each other. With this technique, frequency diversity can be achieved. The performance of multi carrier transmission systems with various structure are analyzed, where data is transmitted over multi-path Rayleigh fading channel. The performance of this technique, gauged by the average bit error rate, is compared dependent upon the various structures.

### 키워드

다중 반송파 전송, OFDMA, MC-DS-CDMA, MC-CDMA, BER

## I. 서 론

다중 반송파 전송 방식에서는 송신하려는 데이터를 병렬화 한 후에 이를 다수의 직교 부반송파를 사용하여 전송하기 때문에 전송 심볼의 길이가 DS-CDMA 같은 단일 반송파 전송 방식보다 부반송파의 수만큼 더 길어지게 된다. 따라서 심볼 주기가 짧은 고속 데이터 전송 시 발생하는 심볼간 간섭 문제를 해결할 수 있다 [1]. 송·수신 단에서 변·복조 시 IFFT/FFT를 사용하여 고속의 시스템 구현이 가능하며, 수신 단에서 각 부반송파 마다 간단한 단일 탭(one-tap) 구조의 등화기를 사용하여 채널의 주파수 선택적 페이딩에 의한 왜곡을

보상할 수 있다[2,3].

송신 심볼이 주파수 선택적 Rayleigh 다중 경로 채널과 부가성 백색 가우스 잡음(AWGN: Additive White Gaussian Noise)채널을 통하여 전송될 때 그 크기 및 위상이 변화되어 성상도에 변화가 생긴다. 이러한 성상도를 원래의 정확한 모습으로 복원하기 위하여 파일럿 심볼을 이용한 변조 방식(PSAM: Pilot Symbol Assisted Modulation)이 시스템에 사용된다. PSAM 방식은 데이터 심볼 이외에 크기와 위상이 알려진 심볼들을 추가로 삽입하여 전송하는 방식이다. 수신단에서는 채널을 통하여 전송되어 온 이 파일럿 심볼들의 크기 및 위상변화로부터 채널 상태를 추정하며, 이 추정치

를 이용하여 데이터 심볼들의 크기 및 위상을 등화(equalization)시키는 방식이다. 그러나 부가성 백색 잡음과 여러 원인들에 의하여 정확한 추정 및 등화가 이루어지지 못하여 수신단에서 원래 데이터를 재생 시 비트 오류율(BER: Bit Error Rate)이 증가된다. 이외에도 단말기가 이동 시 발생하는 도플러 효과 등에 의해서 전송 채널의 특성이 한 블록 심볼 시간 중에 변하는 시변 채널(time variant channel)인 경우에 역시 인접 채널 간섭이 발생된다[4]. 그러나 본 논문에서는 느린 페이딩이 발생하는 시불변 채널의 경우를 가정한다.

다중 반송파 전송 방식을 사용하여 여러 사용자가 동시에 각각의 데이터를 전송하는 방식에는 OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access), MC-CDMA(Multi Carrier Code Division Multiple Access) 및 MC-DS-CDMA(Multi Carrier Direct Sequence Code Division Multiple Access) 방식들이 사용되고 있다[5,6]. 본 논문에서는 Rayleigh 페이딩 다중 경로 채널 하에서의 다중 반송파 전송 시스템들의 성능을 비트 에러율 면에서 비교 분석하고자 한다. II절에서는 다중 반송파 전송 시스템들의 구조에 대하여 기술하고, III절에서는 여러 가지 종류의 시스템 구조에 따른 BER 특성을 분석하고 시뮬레이션 결과를 분석한다.

## II. 다중 반송파 전송 시스템

OFDMA 방식에서는 모든 주파수 대역을 잘게 쪼개서 각 사용자에게 서로 겹치지 않게 N개씩 할당한다. 그러므로 OFDMA 방식은 N개씩의 서로 다른 주파수를 가지는 부반송파로 전송되는 고전적인 주파수 분할 다중화 방식이다. OFDM 전송 시스템에서는 그림 1에서와 같이 전송되어질 데이터는 우선 16-QAM(Quadrature Amplitude Modulation)되어 주기  $T_s$ 인 소스 심볼로 변환된 후, 직·병렬 변환기(S/P)를 거쳐 N개의 부반송파로 각각 변조된다. 소스 심볼들은 N개씩 블록화된 후 병렬화 되므로 블록의 길이는  $T = NT_s$ 가 된다. Modulator 출력에 나타나는 한 블록 소스 심볼들이 OFDM 변조된 신호의 복소 포락선(complex envelope)은 식(1)과 같다[2].

$$x_q(n) = (1/\sqrt{N}) \sum_{k=0}^{N-1} X_q(k) \exp(-j2\pi kn/N) \quad (1)$$

식(1)에서  $X_q(k)$ 는 QAM encoder 출력에 나타나는 k번째 심볼을 나타낸다. 또한 n은  $t = nT_s$  때마다 샘플링된 신호를 나타낸다. 식 (1)은  $X_q(k)$ 의 이산 역 Fourier 변환의 모양이다. 그러므로 변조를 송신기에서 소스 심볼을 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)한 후, 아날로그 신호로 변환(D/A)시킨 다음, RF 변조시키는 방법으로 간단하게 실현할 수 있다. 변조된 신호는 TWT(Traveling Wave Tube)와 같은 HPA(High Power Amplifier)를 이용하여 증폭되어 전송된다.

송신기 출력 신호  $x_0(t)$ 는 전송 도중에 다중 경로에 의해 주파수 선택적 페이딩이 발생된다. 또한 AWGN 잡음이 추가되며 도플러 영향 등으로 인하여 수신 시 주파수 동기 편차  $f_0$ 가 발생된다. 본 논문에서는 매 심볼 때마다 시간적으로 변화하는 탭(tap)값을 가지는 FIR(Finite Impulse Response) 필터 구조의 채널 모델을 가정한다. L개의 다중 경로로 인한 수신 신호  $y(t)$ 의 이산 복소 포락선  $y_m(n)$ 은 다음 식 (2)와 같다.

$$y_m(n) = \sum_{l=0}^{L-1} h(l) x_e(n-l) \quad (2)$$

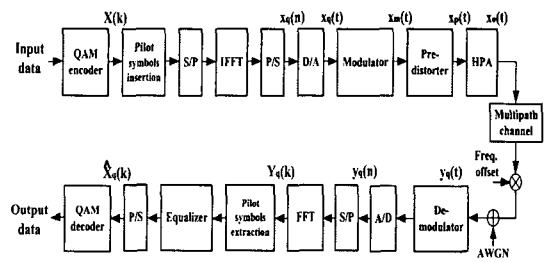


그림 1. OFDM 기저대역 전송 시스템의 구성도  
Fig. 1 Block diagram of OFDM baseband transmission system

위 식 (2)에서 느린 도플러 페이딩이 발생하여 채널 응답  $h(l)$ 이 한 블록 주기 T시간 동안 일정한 특성을 가지는 시 불변 채널을 가정한다.  $h(l)$ 은 복소 가우시안 불규칙 변수이며, 그 크기는 Rayleigh pdf(probability density function)를, 위상은 0에서  $2\pi$ 까지

의 균일 분포를 가진다. 그 다음 주파수 편차  $f_0$ 와 대역 통과 AWGN 잡음  $w(t)$ 의 영향까지 고려할 때, 수신 신호  $y(t)$ 의 복소 포락선  $y_q(t)$ 와 이 신호가  $t = nT_s$  때마다 샘플링 된 이산 복소 포락선  $y_q(n)$ 은 다음 식 (3)과 같다.

$$y_q(n) = y_m(n) \exp(j2\pi\epsilon n/N) + w(n) \quad (3)$$

이때  $w(n)$ 은 대역 통과된 AWGN의 이산 복소 포락선을 나타내는 불규칙 변수이다. 그러면  $y_q(n)$ 을 FFT하여  $Y_q(k)$ 를 구할 수 있다.

$$Y_q(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y_q(n) \exp(-j2\pi kn/N) \quad (4)$$

이러한 각 부반송파의 주파수 성분  $Y_q(k)$ 는 송신 증폭기의 비직선성, 전송 도중에 발생하는 다중 경로 페이딩, 주파수 편차 및 AWGN 등의 영향으로 인하여 각각의 주파수 성분들에 서로 다른 크기 감소와 위상 천이가 발생된다. 따라서  $Y_q(k)$ 는 각 부반송파의 전달 함수  $H(k)$ 로 추정된 복소 계수  $\hat{H}(k)$ 와 역으로 곱해져서 등화된다(zero forcing one tap frequency equalizer). 이때 PSAM(Pilot Symbol Assisted Modulation) 방식에서는 정보 심볼 이외에 크기와 위상이 알려진 파일럿 심볼  $P$ 개를 추가로 삽입하여 전송하며, 채널을 통하여 전송되어 온 이 파일럿 심볼  $\hat{P}(k)$ 로부터 채널의 전달 함수를 LS(Least Squares) 추정 방식으로 추정할 수 있다. 이것을 여러 개의 부반송파들에 대한 행렬 형태로 나타내면 다음 식 (5)와 같다.

$$\hat{\mathbf{H}}_{LS} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \frac{y_0}{p_0} & \dots & \frac{y_{N-1}}{p_{N-1}} \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

위 식에서  $\mathbf{Y}$ 는 수신 벡터,  $\mathbf{P}$ 는 파일럿 심볼을 포함하는 대각 행렬,  $\mathbf{H}$ 는 채널 전달 함수 벡터를 나타낸다. 한편 MMSE (Minimum Mean-Squared Error) 추정 방식을 이용하면 LS 방식으로 추정된  $\hat{\mathbf{H}}_{LS}$ 로부터 AWGN 잡음에 더욱 강건한 채널 추정을 할 수 있다 [4].

여러 명의 사용자가 동시에 각각의 데이터를 전송하는 다중 반송파 전송 방식에 따른 전송 주파수 할당 방법이 그림 2에 도시되었다. MC-DS-CDMA 방식은 OFDM과 CDMA 방식을 혼합한 방식이다. MC-DS-CDMA 방식에서는 그러므로 그림 2(b)에서와 같이 각 사용자는 모든 주파수 대역에 분할되어 있는 N개의 부반송파들을 모두 사용하며 각 사용자 간에 각 사용자에게 할당된 시간영역의 코드로 구분된다. 그림 2(c) MC-CDMA 방식은 MC-DS-CDMA 방식에서와 같이 각 사용자는 모든 주파수 대역에 분할되어 있는 모든 부반송파를 사용하는 방식이며 각 사용자 간에 각 사용자에게 할당된 주파수 영역의 코드로 구분된다.

그림 3의 MC-CDMA 시스템 구성도에서와 같이 직렬로 입력되는 데이터는 QAM 심볼로 변환되고 이 심볼들은 병렬화 된 후, 이 병렬화 된 각 심볼들은 각각 P개의 부반송파를 이용하여 전송된다. 이때 사용자마다 서로 다른 길이가 P인 코드가 각 병렬화 된 심볼에 곱해진 다음 IFFT 변환되므로 결국 최대 P명의 사용자 간 주파수 영역의 코드로 구분된다. 이때 코드로

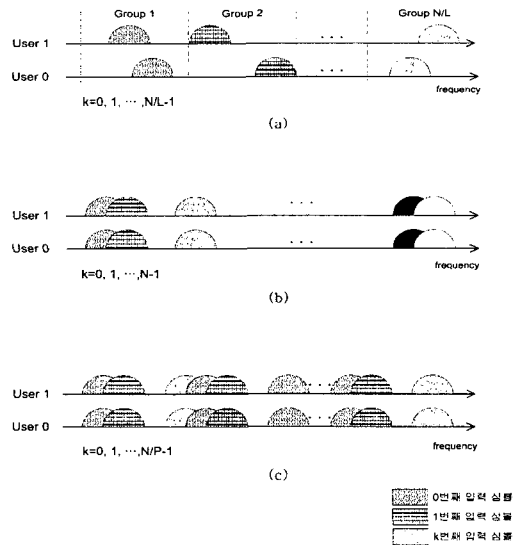


그림 2. 다중 반송파 전송 방식의 주파수 할당  
(a) OFDM, (b) MC-DS-CDMA,  
(c) MC-CDMA

Fig. 2 Frequency assignment of multi carrier transmission techniques((a) OFDM, (b) MC-DS-CDMA, (c) MC-CDMA)

Walsh-Hadamard(WH) 직교 코드가 사용될 수 있다. 데이터는 QAM 심볼로 매핑되어 주기  $T_s$ 인 소스 심볼로 변환된 후  $N/P$ 개씩 블록화 된 후 병렬화 되므로 블록의 길이는  $T = NT_s/P$ 로 원래 데이터의 주기보다  $N/P$ 배 길어진다. 소스 심볼  $X(k)$ 은  $l$ 번째 사용자의  $k$ 번째 데이터 심볼이며,  $c_{p,l}$ 은 길이가  $P$ 인 직교 코드이며,  $l$ 번째 사용자의 코드 칩의  $p$ 번째 비트이다. 이때 모든  $k$ 번째 데이터 심볼에 곱해지는 확산 코드는  $p$ 에 관계없이 동일하다. 그러면 OFDM 시스템과 같이 간단히  $N$ -IFFT를 사용하여 다중 반송파 변조를 구현할 수 있다.  $t = nT_s$  때마다 샘플링 된 IFFT의 출력 신호  $x_c(n)$ 은 다음 식 (6)과 같다.

$$x_c(n) = (1/\sqrt{N}) \sum_{k=0}^{P-1} X(k)c_{p,l} \exp(-j\frac{2\pi fn}{N}) \quad (6)$$

$$f = p\frac{N}{P} + k, \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (7)$$

그림 4의 MC-CD-CDMA 시스템 구성도에서와 같이 데이터는 QAM 심볼로 변조되어 주기  $T_s$ 인 소스 심볼로 변환된 후, 직·병렬 변환기(S/P)를 거쳐  $N$ 개의 부반송파로 각각 변조된다. 소스 심볼들은  $N$ 개씩 블록화 된 후 병렬화 되므로 블록의 길이는  $T = NT_s$ 로 원래 데이터의 주기보다  $N$  배 길어지고 길이가  $I_s$ 인 시간적 코드로 다시  $1/I_s$ 배로 시간 길이가 감소된다. WH 코드  $\{c_{i,l} | i = 0, \dots, I_s - 1\}$ 는 부반송파 인덱스  $k$ 와 관계없이 모든  $N$ 개 부반송파에 같은 모양

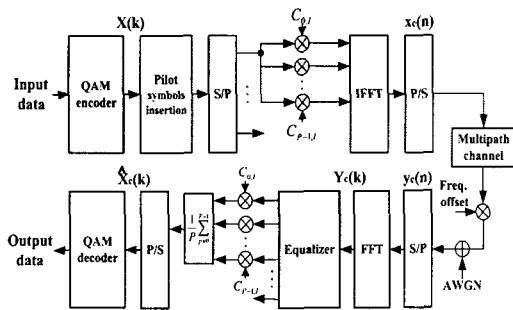


그림 3. MC-CDMA 기저대역 시스템 구성도  
Fig. 3 Block diagram of MC-CDMA system

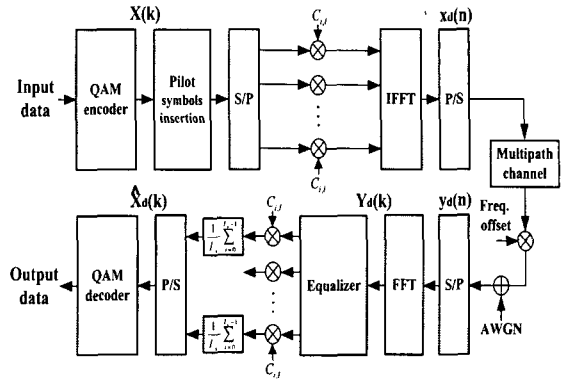


그림 4. MC-DS-CDMA 시스템 구성도  
Fig. 4 Block diagram of MC-DS-CDMA system

의 코드가 사용된다[5]. 그러면 시간 영역에서 확산된 심볼은 아래 식 (8)과 같이 표현 된다.

$$B_l(k) = \frac{X(k)c_{i,l}}{\sqrt{I_s}} \quad (8)$$

이 확산된 데이터 심볼은  $N$ -IFFT에 의해 다중 반송파 변조되며, 변조된 신호의 복소 포락선이  $t = NT_s$  때마다 샘플링 된 신호  $x_d(n)$ 은 다음 식 (9)와 같다.

$$x_d(n) = (1/\sqrt{N}) \sum_{k=0}^{N-1} B_l(k) \exp(-j\frac{2\pi kn}{N}) \quad (9)$$

### III. 다중 반송파 전송 시스템의 BER 성능 비교 분석

후대 인터넷을 위한 TTA phase I 표준에 의하면 전송 방식으로 OFDM이 선정되었으며 FFT의 크기는  $N = 1024$ 이고 채널의 대역폭은  $10\text{MHz}$ 이다. 따라서 부반송파 간격  $\Delta f = 9.766\text{kHz}$ 이며 샘플링 주파수는  $10\text{MHz}$ 이다. 여러 사용자가 다중 접속하고자 할 때 하향링크에서는 1024의 부반송파들을 여러 개의 band로 나누어서 각 band마다 1개씩의 부반송파를 할당하는 방법 등이 사용된다. 본 논문에서는 그림 2와 같이 1024 부반송파를 32개의 band로 순차적으로 나누고 각

band에 속해있는 32개의 부반송파들 중에서 불규칙적으로 한 개의 부반송파를 각 사용자에게 할당하는 방식을 상·하향링크에 적용한다. 따라서 최대 32 사용자가 사용자당 32개의 부반송파를 할당 받아 각각 데이터를 OFDM 전송하게 된다.

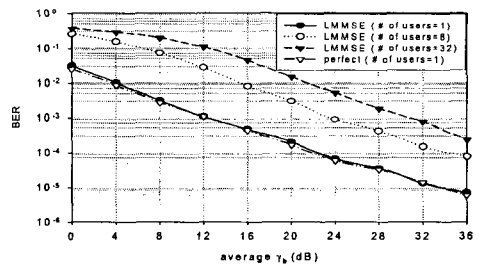
먼저 OFDM 한 블록시간 동안에는 모든 부반송파들에게 해당 채널에 1, -1, ... 모양의 파일릿 심볼들을 전송하여 전송 채널을 추정하고 그 다음 데이터가 보내지는 OFDM 블록 동안에는 수신단에서 추정된 채널 전달 함수를 이용하여 FFT된 심볼들을 등화 시킨다. TTA에서는 매크로 셀(macro cell) 크기를 반경 1km로 비교적 작게 규정하고 있다. 그러므로 본 논문에서는 최대 지연 시간이  $2\mu s$ 이고 rms 지연 시간이  $0.4\mu s$ 인 5탭(tap) 전력 지연 프로파일(power delay profile)을 가지는 채널 모델을 선택한다.

MC-CDMA와 OFDMA를 비교 분석하기 위하여 MC-CDMA시스템의 대역폭은 10MHz이고 샘플링 주파수는 10MHz이고 OFDMA와 같이  $N=1024$ 로 같은 수의 IFFT/FFT로 구성하여 그림 3과 같은 시스템 블록도를 따라 모의실험 하였다. MC-CDMA의 경우도 최대 32명의 사용자가 동시 접속 가능하도록 확산코드의 길이  $P=32$ 인 WH코드로 구성한다. 모의실험에서 병렬화된 심볼의 길이는  $N/P=32$  배이고 부반송파 사이의 간격은  $312.51kHz(32 \times 9.766kHz)$ 이 된다.

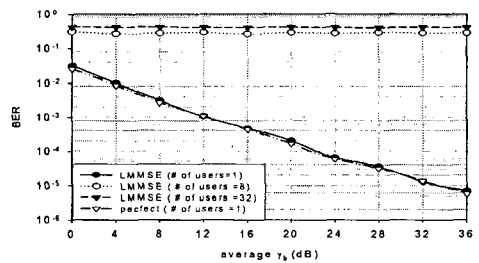
MC-DS-CDMA를 모의 실험하기 위하여 먼저 대역폭을 10MHz로 하고 한 셀 안에서 접속 가능한 최대 사용자 수를 32명으로 하기 위해 확산 코드의 길이  $I_s=32$ 로 정한다. 역시 1024-IFFT/FFT를 이용하여 송수신단을 구성하여 그림 4와 같은 시스템 구성도를 따라 모의 실험한다. 휴대인터넷 OFDM 상향링크 경우 각 사용자당 312.5kHz (10MHz/32명)를 사용한다. MC-DS-CDMA의 경우 병렬화된 후 심볼의 속도는 약  $0.3052kHz(312.5kHz/1024)$ 로 전송률이 낮아지고 그 후 직교 확산 코드 32 비트가 곱해지기 때문에 전송률은 9.766kHz가 된다. 그러므로 MC-DS-CDMA의 한 데이터 블록에 대한 사용 주파수 대역폭이 OFDM과 같은 대역폭인 10MHz( $9.766kHz \times 1024$ 부반송파)와 같게 되어 OFDM 방식과 성능 비교할 수 있다. MC-DS-CDMA의 경우 확산 코드의 직교성이 이루어질 때 시스템 성능이 좋으므로 비교적 정확한 채널 보상이 필요하다.

그러므로 채널 추정 방식은 한번의 LS 채널 추정을 거친 LMMSE 채널 추정 방식을 택한다.

그림 5에 정확한 채널 추정 시와 파일릿 심볼을 이용하여 LMMSE 채널 추정 방식 사용 시 사용자 수와  $\bar{\gamma}_b$ (데이터 비트당 신호 에너지/AWGN 전력스펙트럼 크기)에 따른 MC-CDMA의 BER 성능이 도시되었다. 하향링크 경우에는 사용자가 1명인 경우에는 32명 사용자 경우에 비해서 사용자 1인 신호의 평균 전력이 32배가 되므로  $\bar{\gamma}_b$ 에서 15dB의 이득이 있다. 그림에서 perfect는 정확한 채널 추정을 가정한 경우이다. 그림 5(b) 상향링크에서는 각각의 사용자는 서로 다른 채널을 통해 같은 주파수 성분의 송신신호를 전송하므로 주파수 영역 상에서 곱해진 코드의 직교성은 심하게 붕괴된다. 따라서 해당 사용자에 대한 채널 추정이 정확히 이루어진다 하더라도 BER 성능은 사용자 수가 증가함에 급격하게 나빠진다. 그러므로 상향링크에서 위와 같은 간단한 채널 등화 방법으로는 그 성능을 개선할 수 없다.



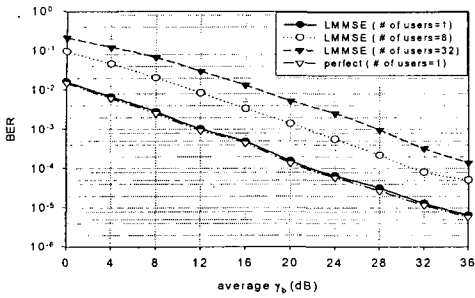
(a)



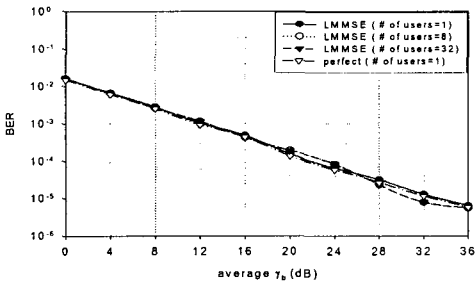
(b)

그림 5. MC-CDMA 시스템의 BER 성능((a)하향링크, (b)상향링크)

Fig. 5 BER performance by MC-CDMA system((a)downlink, (b)uplink)



(a)



(b)

그림 6. MC-DS-CDMA 시스템의 BER 성능(a)하향링크, (b)상향링크  
Fig. 6 BER performance by MC-DS-CDMA system(a)downlink, (b)uplink

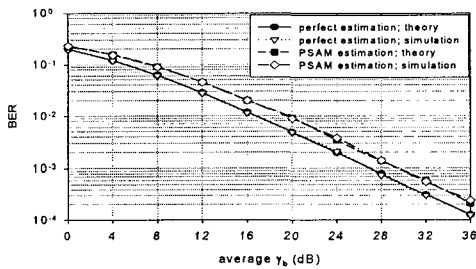


그림 7. OFDMA 시스템의 BER 성능  
Fig. 7 BER performance by OFDMA system

그림 6에 MC-DS-CDMA의 BER 성능이 도시되었다. 상향링크에서는 모두 같은 평균전력을 가지는 신호로 송신하므로 사용자 수에 관계 없이 그 성능이 동일하다. 하향링크에서는 사용자가 32명일때에는 사용자가

1명일 경우에 비해서  $\overline{\gamma}_b$ 에서 15dB의 손해가 있다. 상향링크에서 각각의 사용자가 다른 채널을 통해 신호가 전송되어도 시간 영역에서 사용자 코드의 직교성이 유지되어 MC-CDMA 상향링크에서와 같은 문제는 발생하지 않는다. 한 명의 사용자인 경우인 그림 7 OFDM 시스템의 BER 성능과 비교했을 때 MC-DS-CDMA 방식에서 15dB의  $\overline{\gamma}_b$  이득이 있는 것을 알 수 있다. 이는 확산 코드에 의해 같은 데이터가 시간적으로 32번 전송되고 수신단에서 32번의 데이터가 수신, 평균되어지면서 BER 성능에 이득이 생긴 것이다.

#### IV. 결론

여러 가지 구조에 따른 다중 반송파 변조 시스템의 BER 특성을 분석하였다. 시스템 구조에 따라 데이터가 변조, 주파수 선택적 시변 Rayleigh 페이딩, 파일럿 심볼을 이용한 채널 추정, 등화되는 과정에 대하여 각 블록마다 그 신호 변환 과정을 분석하였다. 이것을 이용하여 컴퓨터 모의실험에 의한 방법으로 BER 성능을 분석하였다. MC-CDMA 상향링크에서는 각각의 사용자는 서로 다른 채널을 통해 같은 주파수 성분의 송신신호를 전송하므로 주파수 영역 상에서 곱해진 코드의 직교성은 심하게 붕괴된다. 따라서 사용자 수가 증가함에 따라 BER 성능이 급격하게 나빠진다. MC-DS-CDMA 상향링크에서는 각각의 사용자가 다른 채널을 통해 같은 주파수 성분의 신호가 전송되어도 시간 영역에서 코드의 직교성이 유지되어 MC-CDMA 상향링크에서의 문제는 발생하지 않는다. MC-DS-CDMA 상향링크에서는 각 사용자가 모두 같은 평균전력을 가지는 신호를 송신하므로 사용자 수에 관계없이 그 BER 성능이 동일하다. 한 명의 사용자인 경우에 OFDMA와 MC-DS-CDMA 시스템의 BER 성능을 비교했을 때, MC-DS-CDMA 방식에서 15dB의  $\overline{\gamma}_b$  이득이 있는 것으로 분석 되었다.

#### 참고문헌

[1] Draft IEEE Standard for Local and metropolitan

- area networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems Amendment for Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands, IEEE P802.16e/D4, August 2004, 270p.
- [2] TTA 2.3GHz Portable Internet Project Group, "2.3GHz Portable Internet(WiBro) Overview", May 10 2004
- [3] M. Russell and G.L. Stüber, "Interchannel interference analysis of OFDM in a mobile environment", Proc. IEEE VTC'95, Chicago, IL, July 1995, pp.820-824.
- [4] O. Edfors, M. Sandell, J. J. van de Beek, S. K. Wilson, and P. O. Börjesson, "OFDM channel estimation by singular value decomposition", IEEE Trans. Commun., vol. 46, no. 7, pp. 931-938, Jul. 1998
- [5] 최승국, 임정욱, "안테나 다이버시티를 이용한 다중 반송파 시스템의 성능 분석", 한국해양정보통신학회논문지, 8권 2호, pp.250-257, 2004년 4월.

#### 저자소개

최승국(Seung-Kuk Choi)

인천대학교 정보통신공학과 교수

이기영(Ki-Young Lee)

인천대학교 정보통신공학과 교수