

---

# 페이딩 채널에서 MMSE-OSUC 수신기를 적용한 MIMO 시스템의 성능 분석

박기식\*

Performance Analysis of MIMO System adopting MMSE-OSUC Receiver in Fading Channel

Ki-Sik Park\*

요약

본 논문에서는 레일리(Rayleigh) 페이딩 채널 환경에서 MMSE-OSUC 수신기 알고리즘을 적용한 MIMO 시스템의 성능을 시뮬레이션을 통해 평가하였다. 변조 기법은 BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM으로 각각 나누어 시뮬레이션을 수행하였고, 프레임의 길이는 100 심볼로 설정하였다. 먼저 송신단에서 채널상태정보를 모르는 경우의 MIMO 시스템의 채널 용량을 이론적으로 산출하였다. 성능 해석 결과, 채널 용량은 채널의 함수이므로 MIMO 시스템의 채널 용량은 채널의 특성에 따라 큰 영향을 받을 수 있었다. 다음으로 MIMO 채널에서의 성능 향상을 위해 MIMO 시스템에 적용되는 기술의 각 알고리즘을 분석하였다. 성능 해석 결과, MMSE-OSUC 수신기 알고리즘을 적용한 경우가 기존 ZF-OSUC 수신기 알고리즘을 적용한 경우보다 전반적으로 성능은 우수하지만, 성좌도가 큰 변조 기법을 사용할수록 그 성능 차이가 감소함을 알 수 있었다.

ABSTRACT

In this paper, we simulate and evaluate the performance of MIMO systems adopting MMSE-OSUC receiver algorithm under Rayleigh fading channel environment. In the simulation, BPSK, QPSK, 16QAM, and 64QAM modulation is used with frame length of 100 symbols. First, the concept of MIMO is introduced by the analytical basis of the channel capacity of MIMO system. From the performance analysis results, the channel capacity is identified by the function of channel and it is affected by the channel characteristic. Next, based on this approach, the algorithm for performance evaluation over MIMO channel was analyzed. From the performance analysis results, it is found that MMSE-OSUC receiver algorithm generally outperform conventional ZF-OSUC receiver algorithm in performance but the performance difference between the two algorithms is reduced as modulation scheme with larger constellation point is used.

키워드

Capacity, Algorithm, MMSE-OSUC, MIMO Channel.  
용량, 알고리즘, MMSE-OSUC, MIMO 채널.

1. 서론

최근 무선통신을 이용해서도 음성 서비스 이외에 동

영상, 인터넷 서비스와 같은 보다 큰 전송률을 요구하는 다양한 서비스 요구가 급속도로 높아지고 있다. 일반적으로 고속 데이터 전송을 하기 위해서는 단위 시

---

\* 인하공업전문대학 정보통신과(gspark@inhac.ac.kr)

접수일자 : 2011. 08. 21

심사(수정)일자 : 2011. 09. 21

게재확정일자 : 2011. 10. 12

간당 전송할 수 있는 데이터 수를 증가시켜야 하기 때문에 큰 전송 대역폭을 필요로 한다. 그러나 이와 같은 대역폭의 증가는 한정된 주파수 자원을 효율적으로 사용하지 못하는 문제점이 있다. 그러므로 전송 대역폭의 변화 없이 무선채널을 통해 고속으로 데이터를 전송할 수 있는 시스템의 필요성이 대두되었다. 현재 고려되고 있는 다양한 전송 효율 향상 기술 중 송/수신단 모두에 다수의 안테나를 사용하는 다중 안테나(MIMO : Multi-Input Multi-Output) 기술은 추가적인 주파수 할당이나 전력증가 없이도 통신 용량 및 송수신 성능을 획기적으로 향상 시킬 수 있는 방법으로서 가장 큰 주목을 받고 있다[1, 2]. 송/수신 단에서 안테나의 수를 동시에 늘리게 되면 송신기나 수신기에서만 다수의 안테나를 사용하게 되는 경우와 달리 안테나 수에 비례하여 이론적인 채널 전송 용량이 증가하므로 주파수 효율을 획기적으로 향상 시킬 수 있다. MIMO 전송은 복수의 송수신 안테나를 사용하여 동일한 주파수로 동시에 복수의 신호를 공간적으로 다중 전송하는 방식이며, 산란 환경에서 이론적으로는 안테나의 수에 거의 비례하는 통신 용량이 얻어진다[3, 4]. MIMO 전송에서의 응용예로서 공간적으로 신호를 다중화하는 공간분할다중(SDM : Spatial Division Multiplexing) 방식이 거론된다. 공간다중방식으로는 양쪽 송수신기에서 통신로 정보를 이용하여 지향성 제어를 행하는 고유 빔형 MIMO 시스템이 있지만, 피드백의 오버 헤드가 크고 페이딩 변동이 심한 환경에서는 실현하기가 어렵다. 이 때문에 일반적인 SDM 방식에서는 송신측에서 MIMO 채널이 미지임을 전제로 하여 각 송신 안테나에 균일한 정보와 송신 전력을 할당하고 있다. 수신측에서는 각 송신 신호(substream)를 분리·검출하기 위해 ZF(Zero Forcing)와 MMSE (Minimum Mean Square Error)에 의한 공간 필터링 등이 행해진다. SDM 방식 중에서도 V-BLAST(Vertical-Bell Lab Layered Space Time)는 낮은 복잡도로 신호를 검출할 수 있고, MIMO 채널에서 고속 전송을 실현할 수 있는 어플리케이션으로 주목받고 있다[5-8]. V-BLAST 방식은 MIMO의 사용을 통해 다중화 이득을 얻고자 한다는 점에서 ZF 및 MMSE 수신기와 같은 계열이지만, OSUC(Ordered Successive Cancellation) 방법을 이용하여 보다 높은 다이버시티 이득을 얻을 수 있다는 이점이 있다. 그러나 MIMO의 통신로 용량은 송수신 사

이의 통신로 상태에 의존하기 때문에 통신로 용량이 불안정하게 된다는 문제가 있다. 이 때문에 송수신 사이의 통신로 상황을 고려하여 각 송수신 안테나에서 송신 전력과 변조 방식을 적응적으로 변화시킴에 의해 송신 제어를 시행하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 MIMO 시스템의 채널 용량을 이론적으로 모델링하고, 이를 기반으로 다중 안테나 시스템에 적용되는 기술 중 멀티플렉싱 계열의 대표적인 시스템의 알고리즘을 분석하고자 한다. 먼저 MIMO 시스템의 채널을 모델링한 다음, 송신 단에서 채널 상태정보를 모르는 경우로 가정하여 채널 용량을 산출하고자 한다. 이를 기반으로 최근 급부상되고 있는 MMSE-OSUC 수신기 알고리즘을 분석한 다음, 이 수신기 알고리즘을 적용한 MIMO 시스템의 성능을 레일리 페이딩 채널 환경에서 시뮬레이션을 통해 평가하고자 한다.

## II. MIMO 채널

### 1. MIMO 시스템 채널 모델링

그림 1에 N 개의 송신 안테나와 M 개의 수신 안테나를 사용하는 전형적인 MIMO 시스템의 구조를 나타낸다.

그림 1에서처럼 송신단에서 전송하는 신호를 벡터 형태로 표현하면,

$$s(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t)]^T \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서  $s_N(t)$ 는 N 번째 안테나에서 t시간 동안 전송하는 신호를 나타내고,  $(\cdot)^T$ 는 transpose 연산을 나타낸다.

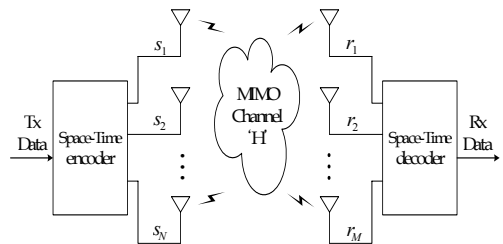


그림 1. MIMO 시스템의 블록도  
Fig. 1 Block Diagram of MIMO System

수신 신호도 같은 방법으로 표현하면,

$$r(t) = [r_1(t), r_2(t), \dots, r_M(t)]^T \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 또한, 송신단과 수신단 사이의 협대역 MIMO 채널은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1M} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \dots & \alpha_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{M1} & \alpha_{M2} & \dots & \alpha_{MM} \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (3)에서  $\alpha_{nm}$ 은 송신단의 n번째 안테나에서 수신단의 m번째 안테나로의 복소 전송 계수를 나타낸다. 또한,  $\alpha_{nm}$ 은 동일한 평균 전력을 갖는 복소 가우시안 분포로 가정한다. 따라서 송신 신호  $s(t)$ 와 수신 신호  $r(t)$ 의 관계를 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

$$r(t) = H(t)s(t) + n(t) \quad (4)$$

단,  $n(t)$ 는 수신 신호와 배열의 크기가 같고  $\sigma^2 = 1$ 인 AWGN을 의미한다.

### 2. 채널 용량

$R_x$ 를 X의 공분산 행렬(covariance matrix)로 정의한다면, MIMO 시스템의 채널 용량 C는 수신 신호 y로부터 얻을 수 있는 s에 대한 최대 상호정보(mutual information)의 최대 값으로 정의되고, 이는 다음과 같이 구할 수 있다[9].

$$C = \max_{I(s;y)} = \log_2 [\det(I_M + HR_X H^H)] \quad \text{bps/Hz} \quad (5)$$

식 (5)에서  $I_M$ 은  $M \times M$  항등행렬이고, 송신 전력의 총합은  $\text{Tr}(R_X) \leq P_T$ 로 제한되고, 여기서  $\text{Tr}(\cdot)$ 은 행렬의 trace 값을 나타낸다. 채널 용량 C는 채널 H에 따라 변하는 확률 변수이므로 흔히 채널에 대한 평균을 취한 평균 용량(ergodic capacity)  $C_E$ 와 outage 용량(outage capacity)  $C_{\text{out}}$ 을 이용하여 시스템의 용량을 비교한다. 각각은 다음과 같이 표시할 수 있다[10].

$$C_E = E_H[\log \det(I_M + HR_X H^H)] \quad (6)$$

$$C_{\text{out}} = \arg [P(C < C_0) = \alpha] \quad (7)$$

여기서  $\alpha$ 는 outage 확률이다.

이어서 채널 H에 대한 정보를 송신 단에서 모르는 경우의 이론적인 채널 용량을 살펴본다.

송신 단에서 채널상태정보를 알 수 없으므로 각 송신 안테나는 모두 동일한 전력으로 신호를 송신하는 것이 최적이다. 각 송신 안테나 전송 신호가 동일한 평균 전력을 갖고 상호 독립일 경우,  $R_X = (\rho/N)I_N$ 과 같고 이를 식 (5)에 대입하면,

$$C = \log_2 \det(I_M + \frac{\rho}{N} H H^H) \quad (8)$$

로 계산할 수 있다. 식 (8)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있는데,

$$C = \sum_{i=1}^{\min(N,M)} \log_2 (1 + \frac{\rho}{N} \lambda_i) \quad (9)$$

여기서  $\lambda_i$ 는  $H H^H$ ( $N < M$ 인 경우) 또는  $H^H H$ ( $N > M$ 인 경우)의 0이 아닌 I번째 고유값(eigenvalue)이다. 식 (9)의 채널 용량은 서로 독립인 레일리 페이딩 채널의 경우, M과 N 중 작은 값에 비례하여 선형적으로 증가한다[11]. 그림 2는 송/수신기 안테나의 수가 일치할 때 평균 채널 용량의 변화를 나타낸다. 동일한 SNR 값에서 채널 용량이 안테나 수에 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다. SNR이 20 dB이고 송신 안테나와 수신 안테나 수가 각각 8개인 시스템에서의 채널 용량은 43.8 bps/Hz 임을 알 수 있다.

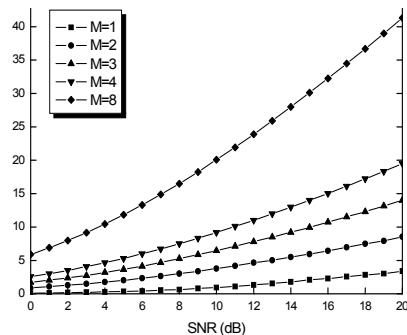


그림 2.  $M \times M$  안테나 구성에 따른 10% outage 채널 용량

Fig 2. 10% Outage Capacity for Various Antenna Configurations with  $M \times M$

### III. MMSE-OSUC 수신기 알고리즘

MIMO 시스템에서는 시스템의 복잡도와 BER(Bit Error Rate) 성능의 trade-off를 고려한 알고리즘이 최상의 성능을 낼 수 있다. 현재 MIMO 채널을 통한 전송기술은 크게 두 가지 계열로 분류할 수 있다.

- Data rate maximization scheme (Multiplexing)
- Diversity maximization scheme (Diversity)

최근의 연구 동향은 이 둘을 모두 융합하는 방향으로 진행되고 있다.

첫 번째 전송률 극대화 기법은 평균 용량을 증가시키기 위한 것이다. 이를 통해 여러 개의 안테나를 이용하여 동시에 보내더라도 공간 멀티플렉싱을 통해 전송률을 극대화시킬 수 있다. 또한, 각 정보 스트림은 전송중의 채널 페이딩과 간섭 등으로 생기는 에러로부터 보호하기 위해 심볼 상호간의 특별한 관계를 적용하여 인코딩된다. 이렇게 함으로써 outage 확률을 최소화함과 동시에 outage 용량을 최대화시킴으로써 두 번째의 다이버시티 극대화를 달성할 수 있다.

본 논문에서는 첫 번째 전송률 극대화 기법 (Multiplexing)에 초점을 두고 분석해 보고자 한다.

#### 1. 멀티플렉싱(Multiplexing) 계열

멀티플렉싱 방식은 송/수신 안테나간의 가상의 부채널들을 만들어서 각각의 송신 안테나를 통해 서로 다른 데이터를 전송함으로써 전송 속도를 높이는 방식이다. 이 때 수신기에서는 송신기로부터 동시에 전송된 데이터 사이에 상호 간섭이 발생하게 된다. 수신기에서는 이 간섭을 적절한 신호처리 기법을 이용하여 제거한 후 수신한다. 여기에 사용되는 잡음 제거 방식은 ML(Maximum Likelihood) 수신기, ZF 수신기, MMSE 수신기, D-BLAST(Diagonal Vertical- Bell Lab Layered Space Time), V-BLAST (Vertical-BLAST) 등이 있으며, 특히 송신단에서 채널 정보를 알 수 있는 경우에는 Singular Value Decomposition(SVD) 방식 등을 사용할 수 있다. 멀티플렉싱 방식은 다이버시티 방식과는 달리 송신단 혹은 수신단 한쪽에서만 다중의 안테나를 사용하는 경우 그 이득을 충분히 얻을 수 없다. 멀티플렉싱 방식의 성능은

동시에 전송할 수 있는 독립적인 송신 신호의 개수를 멀티플렉싱 이득(multiplexing gain)으로 표현되고 이는 송신단과 수신단의 안테나 수의 최소 값과 같다.

#### 2. MMSE-OSUC 수신기 알고리즘

BLAST(Bell-Lab Layered Space-Time)방식은 다이버시티 이득이 적은 공간 멀티플렉싱 방식의 단점을 극복하고 복호 성능을 향상시키기 위한 기법이다 [12]. 이 방식은 각 송신 안테나를 통해 전송되는 신호들을 매 심볼 구간마다 시간, 공간 상에서 대각 방향으로 편이 시켜 반복적으로 송신함으로써 모든 송신 신호들이 높은 다이버시티를 얻도록 구현한 방식이다. 그러나 구현이 다소 복잡하고 복호 지연이 발생하는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 각 송신 안테나로부터 전송된 신호들의 각 부채널을 수직적으로 구분하여 복원하는 V-BLAST 방식이 제안되었다. V-BLAST 방식 역시 수신단의 안테나 개수가 송신단의 안테나 개수 이상일 경우에 동작한다는 전제 조건을 갖는다. V-BLAST 방식은 MIMO의 사용을 통해 멀티플렉싱 이득을 얻고자 한다는 점에서 ZF 수신기와 MMSE 수신기와 같은 계열이지만 OSUC의 방법을 이용하여 보다 높은 다이버시티 이득을 얻을 수 있다는 면에서 한 단계 발전된 기법이라고 할 수 있다.

그림 3은 V-BLAST 시스템의 기본 구조를 나타낸 것이다. 송/수신단에서 각각 N, M개의 안테나를 사용하는 시스템( $N \leq M$ )을 고려할 때, 전송하려는 데이터를 벡터 인코더를 통해 송신 안테나 개수만큼 다중화시키고, N개의 서로 다른 송신 신호를 각 송신 안테나를 통해 전송한다.

V-BLAST 수신기의 복호기는 수신 신호들로부터 ZF 수신기나 MMSE 수신기 등을 통하여 송신 신호들을 분리해내고 이 중에서 신호 대 간섭 잡음비(SINR)가 가장 좋은 심볼 하나를 검출한다. 이렇게 검출된 심볼은 다시 재생(regeneration)되어 다른 부채널의 수신 신호들로부터 제거되는 간섭 제거 과정을 거치게 된다.

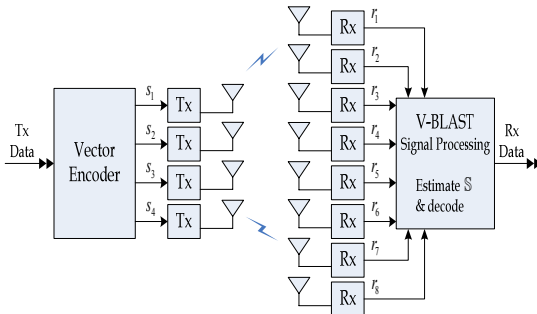


그림 3. V-BLAST 시스템의 블록도  
Fig. 3 Block Diagram of V-BLAST System

검출된 심볼들을 제거하고 새로이 얻어진 수신 신호들로부터 다시 ZF/MMSE 수신기를 통하여 남은 송신 신호들 중에서 SINR이 최대인 신호가 검출되고 또다시 재생된 후에 간섭 제거를 거치는 과정이 계속되어 마지막 송신 신호까지 검출한다. 이때 간섭 제거 과정에서 오차 전이(error propagation)가 없는 상황을 가정한다면 검출과정이 반복되면 될수록 유효한 간섭 신호의 개수가 줄어들기 때문에 검출 성능이 좋아지게 된다. 이러한 OSUC 알고리즘은 일반적으로 ZF 수신기나 MMSE 수신기에 많이 적용하여 사용한다. 본 논문에서는 OSUC 알고리즘을 ZF 수신기와 MMSE 수신기에 각각 적용해보고, 시뮬레이션을 통해 성능을 비교 분석하였다. MMSE-OSUC 수신기의 알고리즘을 표 1에 나타내었다[13].

표 1. MMSE-OSUC 수신기 알고리즘  
Table 1. Algorithm for MMSE-OSUC Receiver

초기화 과정	
반복 과정	

#### IV. 성능 평가

본 논문에서는 ZF-OSUC, MMSE-OSUC, ML 수신기를 각각 사용하는 2x2 MIMO 시스템을 기준으로 모델링하였다. 우선 변조 기법은 BPSK, QPSK, M-ary QAM으로 각각 나누어 시뮬레이션을 수행하였고, 프레임의 길이는 100 심볼로 설정하였다. 또한 전송 채널은 Rayleigh fading 채널 환경으로 모델링하였으며, 수신단에서의 상관(correlation) 계수는 0.5로 가정하였다.

그림 4부터 그림 6까지는 각각 BPSK, QPSK, M-ary QAM 변조에 따른 ML, ZF-OSUC, MMSE-OSUC 수신기의 BER 성능 곡선을 나타낸 그래프이다. OSUC 알고리즘을 적용해 본 결과, ZF 수신기는 간단한 구조이지만 수신 단에서 각 송신 안테나로부터 전송된 신호를 복호하는 과정에서 다른 N-1 개의 송신 안테나로부터 전송된 신호들을 억제하기 위해 수신기에서 N-1개의 자유도를 사용하기 때문에, 수신단에서 M-(N-1)만큼의 다이버시티 이득이 생기므로 수신 성능이 떨어진다는 단점이 있다. 반면, MMSE-OSUC 수신기는 잡음 신호의 분산을 고려하기 때문에 ZF-OSUC 수신기에 비해 우수한 성능을 나타내지만 수신기를 통해 얻을 수 있는 다이버시티 이득은 ZF-OSUC 수신기와 같음을 알 수 있다.

따라서 MMSE-OSUC 수신기가 ZF-OSUC 수신기보다 전반적으로 성능이 우수하지만, 성좌도가 큰 변조기법을 사용할수록 그 성능 차이는 크게 줄어들어 64QAM를 사용하는 경우에는 비슷한 성능을 보임을 확인할 수 있다.

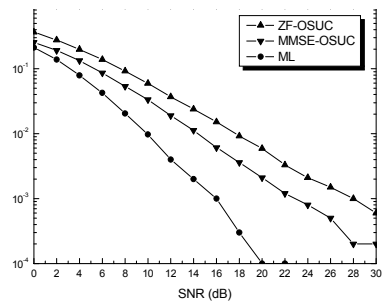


그림 4. 수신 알고리즘에 따른 BER 성능 - BPSK  
Fig. 4 BER Performance of Various Detection Algorithm - BPSK

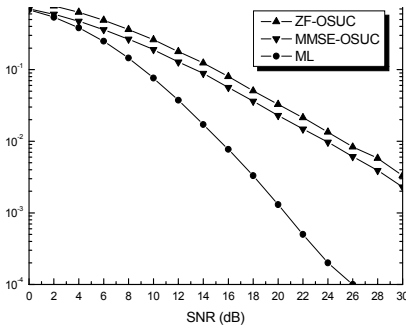


그림 5. 수신 알고리즘에 따른 BER 성능 - QPSK  
Fig. 5 BER Performance of Various Detection Algorithm - QPSK

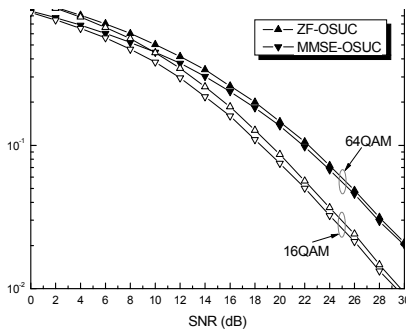


그림 6. 수신 알고리즘에 따른 BER 성능 - QAM  
Fig. 6 BER Performance of Various Detection Algorithm - QAM

### V. 결론

본 논문에서는 레일리(Rayleigh) 페이딩 채널 환경에서 MMSE-OSUC 수신기 알고리즘을 적용한 MIMO 시스템의 성능을 시뮬레이션을 통해 평가하였다. 변조 기법은 BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM으로 각각 나누어 시뮬레이션을 수행하였고, 프레임의 길이는 100 심볼로 설정하였다. 먼저 송신단에서 채널상태 정보를 모르는 경우의 MIMO 시스템의 채널 용량을 이론적으로 산출하였다. 성능 해석 결과, 채널 용량은 채널의 함수이므로 MIMO 시스템의 채널 용량은 채널의 특성에 따라 큰 영향을 받음을 알 수 있었다. 다음으로 MIMO 채널에서의 성능 향상을 위해 MIMO 시스템에 적용되는 기술의 각 알고리즘을 분석하였다.

성능 해석 결과, MMSE-OSUC 수신기 알고리즘을 적용한 경우가 기존 ZF-OSUC 수신기 알고리즘을 적용한 경우보다 전반적으로 성능은 우수하지만, 성좌도가 큰 변조 기법을 사용할수록 그 성능 차이가 감소함을 알 수 있었다.

### 참고 문헌

- [1] E. Dahlman and S. Parkvall, "The evolution of 3G WCDMA", *Telecommunications Review*, Vol. 13, No. 6, pp. 824-833, Dec., 2003.
- [2] A. Paulraj, R. Nabar and D. Gore, "Introduction to Space-Time Wireless Communications", Cambridge University Press, 2003.
- [3] I. E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels", *Eur. Trans. Telecommun.*, Vol. 10, No. 6, pp. 585-595, Nov., 1999.
- [4] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas", *Wireless Pers. Commun.*, Vol. 6, pp. 311-355, Mar., 1998.
- [5] P. W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. D. Golden and R. A. Valenzuela, "V-BLAST: An Architecture for Realizing Very High Data Rates Over the Rich-Scattering Wireless Channel", *URSI ISSSE'98*, pp. 295-300, Sep. 29 - Oct. 2, 1998.
- [6] M. F. Demircol and M. A. Ingram, "Power-controlled capacity for interfering MIMO links", In *Proc. IEEE Vehicular Technology Conf.*, Atrantc City, Nj, pp. 915-919, Oct., 2001.
- [7] 강명구, "W-CDMA 통신 시스템에서 새로운 롱코드 MMSE 검파기 구성 및 성능 분석", *한국전자통신학회 논문지*, 제6권, 제2호, pp. 163-170, 2011.
- [8] S. H. Nam, O. S. Shin and K. B. Lee, "Transmit Power Allocation for a Modified V-BLAST System", *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 51, No. 11, pp. 1783-1787, Nov., 2003.
- [9] G. J. Foschini, M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas", *Kluwer: Wireless Personal Communications*,

- pp. 311-335, 1998.
- [10] P. F. Driessen and G. J. Foschini, "On the capacity formula for multi-input multi-output wireless channels: A geometric interpretation", IEEE Trans. Commun., Vol. 47, pp. 173-176, Feb., 1999.
  - [11] D. Shu, G. J. Foschini, M. J. Gans, and J. M. Kahn, "Fading correlation and its effect on the capacity of multielement antenna systems", IEEE Trans. Commun., Vol. 48, pp. 502-513, Mar., 2000.
  - [12] E. Biglieri, G. Taricco, and A. Tulino, "Decoding space-time codes with BLAST architectures", IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 50, Oct., 2002.
  - [13] M. Jankiraman, "Space-Time Codes and MIMO Systems", Artech House, pp. 144-160, 2004.

### 저자 소개



#### **박기식(Ki-Sik Park)**

1991년 한국항공대학교 항공통신  
정보공학과 졸업(공학사)

1996년 한국항공대학교 대학원 통  
신정보공학과 졸업(공학석사)

2000년 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 졸  
업(공학박사)

1994년~2001년 (주)세영통신 책임연구원

2001년~현재 인하공업전문대학 정보통신과 부교수

※ 관심분야 : 무선통신, 이동통신, 광통신