

---

# 송수신 다이버시티를 이용한 OFDM 시스템에서의 도플러 영향 분석

이 종 길\*

Analysis of Doppler Effects in OFDM Systems Using Transceiver Diversity

Jong Gil Lee\*

## 요 약

OFDM 시스템은 고속 데이터 전송 능력 및 효율적인 주파수 대역 이용 특성 때문에 그 활용 가능성이 날로 커지고 있다. 그러나 OFDM 시스템은 고속 이동시 도플러 주파수 확산에 민감한 특성을 보이는데 도플러 영향 정도에 따라 직교성 상실에 의한 반송파 간섭 및 전체적인 시스템 잡음의 증가를 초래할 수 있다. 따라서 시스템에서의 이러한 도플러 영향을 분석하기 위하여 도플러 확산 모델 및 그 정도에 따른 시스템 성능의 열화정도를 분석하였다. 특히 본 논문에서는 비교적 간단한 송신 및 수신 다이버시티 적용 시스템에서의 도플러 영향에 의한 성능열화 정도를 분석하였다. 이러한 열화 현상은 송수신 다이버시티 구조에 따라 달라지는데 일반적으로 비교적 간단히 구현할 수 있는 2개의 송신 및 수신안테나를 쓰는 경우와 2개의 송신 안테나 다이버시티 기법만을 적용 한 경우, 그리고 다이버시티 기법을 적용하지 않았을 때의 시스템 성능에 관하여 비교하고 분석하였다.

## ABSTRACT

The popularity of OFDM systems is being increased because of high speed data transmission capability and the spectral efficiency characteristics. However, since OFDM systems are very sensitive to the Doppler spread, The interference among subcarriers and the total system noise can be increased seriously due to the degree of Doppler effects which can cause the orthogonality problems. Therefore, these Doppler effects were analyzed using the Doppler spectrum models by varying its parameters. Especially in this paper, The degree of system performance degradation was investigated for the OFDM systems applying the relatively simple transmit and receiver diversity. The degree of the system performance degradation depends on the specific diversity structures of transceiver systems. Here, the performances of OFDM systems with two antennas transceiver diversity were analyzed and compared with that of systems with only transmission diversity and without diversity as the Doppler characteristics varied.

## 키워드

송수신 다이버시티, 도플러 확산, 반송파 간섭, OFDM

## I. 서 론

무선 및 이동통신이 비약적으로 발전함에 따라 날이 갈수록 멀티미디어 서비스를 위한 무선 고속데이터 송

수신 기술의 필요성이 커지게 되었다. 이러한 요구에 부응할 수 있는 유용한 시스템중의 하나가 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식 통신 시스템이다. OFDM 방식은 다수의 부 반송파를 이용하는 다중 반송

파 방식의 일종으로서 각 부반송파의 직교성을 이용하여 변조된 신호의 주파수 대역을 겹쳐서 전송할 수 있게 함으로서 효율적인 주파수대역 사용이 가능하게끔 하였다. 따라서 OFDM 전송기술은 부반송파 수만큼 심볼의 주기가 확장되므로 다중경로 전파에 따른 심볼간 간섭문제에 상당히 효율적이며 상대적으로 느린 시변 채널인 경우 특정 가입자에 대해 신호 대 잡음 비에 따라 전송속도를 가변시킴으로서 최적화된 통신이 가능하다.

그러나 이러한 OFDM 시스템은 여러 개의 부반송파를 사용하기 때문에 이러한 부반송파 주파수가 고속 이동시 도플러 주파수 천이의 영향으로 인하여 송신 및 수신 단에서 정확히 일치되지 못할 경우 각 부반송파사이의 직교성이 상실되어 부반송파들 채널간의 간섭현상이 발생하게 된다. 이러한 간섭현상들은 그 정도에 따라 시스템의 성능에 심각한 영향을 줄 수 있다[1].

그러므로 본 논문에서는 시스템 설계 시 중요한 파라미터인 이러한 도플러 모델 및 그 특성에 따른 영향을 고찰하였다. 즉 송신 및 수신 다이버시티 기법을 이용하는 OFDM 통신 시스템에서의 열화정도를 정량적으로 분석하였다. 비교적 간단하게 구현이 가능한 2개의 송신 및 수신 안테나를 사용하는 다이버시티 시스템과 2개의 송신 안테나 다이버시티 기법만을 적용한 경우, 단일 송수신 안테나만을 사용하여 다이버시티 기법을 적용하지 않는 경우를 비교, 분석하였으며 도플러 모델 및 그 특성 변화에 따른 성능열화 정도를 고찰하였다.

## II. 송수신 다이버시티 기법

무선채널에서 전송된 신호는 심볼 간 간섭, 다중경로, 도플러 천이 등의 현상이 발생하게 되며 심각한 페이딩 현상이 발생할 수 있다. 따라서 무선 환경에서는 안정적인 수신을 위하여 동일한 전송신호를 복사하여 여러 가지 방법으로 다시 전송하게 되는데 이러한 방법들을 일반적으로 송신 다이버시티 기법이라고 한다. 다이버시티 기술은 페이딩이 심한 채널에서 복사된 같은 신호들이 독립적인 페이딩을 겪게 한다면 전체적인 수신 신호의 페이딩 발생 확률을 현저히 낮출 수 있다.

안테나 다이버시티는 구조적으로 크게 송신 다이버시티와 수신 다이버시티로 나눌 수 있다. 그러나 수신 다이버시티는 2개 이상 여러 개의 수신 안테나를 사용할

경우 수신단의 복잡도가 심화되고 그만큼 부피가 커져 휴대하거나 사용하는데 있어서 불편을 겪는 등 실제 시스템에 적용하는데 많은 어려움이 있다. 따라서 고정된 무선 송신부에 송신 다이버시티 시스템을 구현하는 방법에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다[2][3]. 송신단에 다수의 안테나를 사용하는 형태의 송신 다이버시티 기술을 적용하게 되면 수신 다이버시티에서와 마찬가지로 페이딩에 의한 성능열화 정도를 개선시킬 수 있다. 또한 송신 및 수신 부 모두에 다수의 안테나를 이용할 경우 더 나은 성능향상을 기대할 수 있을 것이다.

따라서 본 논문에서는 이러한 송신 및 수신 다이버시티 기법을 동시에 적용하는 비교적 구조가 간단하면서도 구현이 용이한 OFDM 시스템을 가정하였으며 이러한 시스템에서의 도플러 천이 및 그 특성에 따라 전체적인 시스템 성능에 어느 정도의 영향을 미치는지를 정량적으로 분석하였다.

2개의 송신 안테나만을 적용하는 일반적인 구조는 Alamouti에 의해 제안된 방식으로 2개의 가지를 갖는 송신 다이버시티 방식이다[4][5]. 2개의 송신 안테나와 하나의 수신 안테나를 사용하는 구조로서 시간 및 공간상에서 동일한 신호들을 서로 반복 전송하게 된다.

그림 1에서는 송신 및 수신 단에 각각 2개의 안테나를 갖는 송신 및 수신 다이버시티 구조를 나타내고 있다. 다이버시티 기술을 적용하여 각각의 송수신 채널이 어느 정도의 독립성이 유지된다면 신호의 페이딩 확률을 현저히 낮출 수 있을 뿐만 아니라 제반 시스템 열화현상을 완화시킬 수 있을 것이다.

그러므로 본 논문에서는 수신 단에서도 비교적 간단히 구현할 수 있는 2개의 수신 안테나 다이버시티 구조를 적용하였다. 즉 송수신부에 각각 2개의 송신 및 수신 안테나 다이버시티를 적용하여 OFDM 시스템을 구성하는 것을 가정하였다. 그림 1에 간략한 블록도로 표시하였다. 두 개의 송신 안테나에선  $s_0, s_1$  두 개의 심볼과 그 심볼들의 켈레 복소수  $-s_1^*, s_0^*$ 를 시간 슬롯  $t$ 와  $t+T$ 에 각각 전송하고 두 개의 수신 안테나에서 채널 및 잡음의 영향을 받은 4개의 심볼들을 차례로 수신하게 된다 [6][7].

이러한 각각의 수신된 신호들은 combiner에서 결합된 후 추정, 복원된다. 이러한 경우 채널이 주파수 선택적(frequency selective fading)이며, 연속되는 심볼구간에

서는 채널이 일정하고, 각각의 송신 및 수신 안테나 사이의 페이딩(fading)이 서로 독립적이라는 것을 가정하였다.

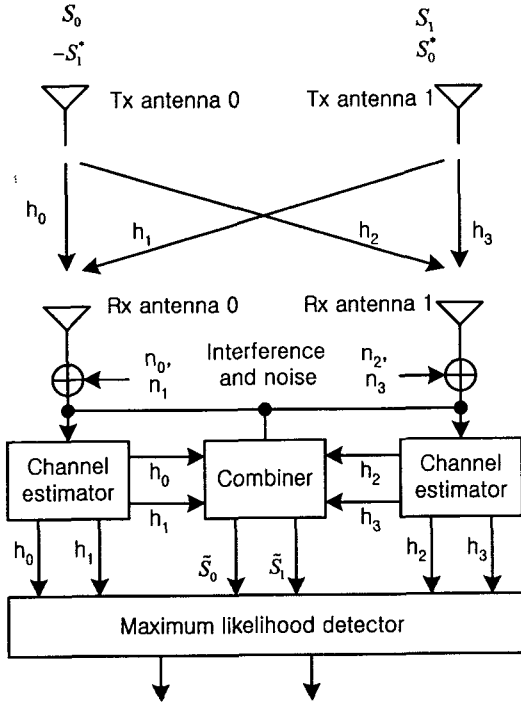


그림 1. 두개의 송신 및 수신 안테나 구조  
Fig. 1. The structure of 2-transceiver antenna diversity

### III. 도플러 확산에 의한 반송파 간섭

OFDM 시스템에서 변조된 신호는 무선채널을 통하여 수신 단으로 전송되는데 왜곡이 없는 경우 부반송파 간의 직교성이 그대로 유지되므로 FFT를 통하여 원하는 정보를 복원해 내는데 문제점이 발생하지 않는다. 그러나 이동채널의 도플러 천이 등에 의하여 다중 부반송파 간의 직교성이 상실될 경우 심각한 성능 열화현상이 나타날 수 있다.

이러한 현상을 표시하기 위하여 우선 하나의 OFDM 심볼이 전송되어 수신 단에서 완벽하게 보호 구간부분을 제거하여 심볼간 간섭이 일어나지 않으며 타이밍 동기화 및 샘플링 오차가 없다고 가정하자. 이러한 경우 FFT 과정을 거쳐서 수신되는 신호는 다음과 같이 첫 번

째 원하는 신호부분  $\eta_i$  와 두 번째 반송파 간섭부분 (subcarrier interference)  $\eta_{SCI}$  그리고 세 번째 가우시안 백색잡음 부분으로 나누어 다음과 같이 표시할 수 있다 [8].

$$Y_i = \frac{X_i}{N} \sum_{n=0}^{N-1} H_{n,i} + \sum_{\substack{k \in K \\ k \neq i}} \frac{X_k}{N} \sum_{n=0}^{N-1} H_{n,k} e^{j2\pi(k-i)n/N} + W_i \quad (1)$$

여기에서  $H_{n,k}$  는  $t=nT_s$ ,  $f=k/T$  에서의 채널 전달함수를 의미한다.  $X_k$  는 부반송파의 데이터 심볼이고  $K$  는 반송파 인덱스 집합을 나타낸다. 본 논문에서는  $K=[-32, 31]$  인 64 포인트 FFT 시스템을 가정하였으며 심볼  $X_k$  의 크기는 1이며 심볼간 상관성이 없으며 평균은 0으로 변조되었다고 가정하였다. 또한 도플러 천이에 의한 영향을 나타내기 위하여 이동 무선시스템에의 기저대역 모델에서 송수신단 임펄스 셰이핑 필터(impulse shaping filter) 는 시간영역에서 서로 매칭되어 있고 rectangular form 을 가지는 것으로 하였다.

송신 단에서 필터를 통과한 변조된 심볼은 직교하는 각 부반송파에 의하여 전달된다. 이러한 송신신호는 각각 다른 도플러 주파수, 크기 왜곡, 시간지연을 갖는 다중 경로를 거쳐 수신된다. 여기서 다중경로를 거쳐 수신된 신호의 반송파 간섭의 영향을 간단하게 계산하기 위하여 경로는 단일 경로  $k$ 만 존재하며  $i$  번째 부반송파와  $i$  부반송파에 영향을 주는 방해 부반송파  $j$  만 존재한다고 가정한다. 이때 경로  $k$ 로 수신단의 매치필터로 입력되는 신호  $Y_i^{(k)}$  의 전력 스펙트럼은 주파수  $f = f_i - f_j + f_d^{(k)}$  에서의 크기가  $1/T \cdot a^{(k)}$  인 dirac delta pulse 로 볼 수 있고 필터의 전력밀도에 대한 주파수 응답특성은  $T^2 \text{sinc}^2(fT)$  으로 표시되므로 출력신호의 전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_{Y_j^{(k)}}^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{1}{T} \cdot a^{(k)} \right)^2 \delta [f - (f_i - f_j + f_d^{(k)})] \\ &\quad \cdot T^2 \text{sinc}^2(fT) df \\ &= (a^{(k)})^2 \text{sinc}^2 [(f_i - f_j + f_d^{(k)})T] \end{aligned} \quad (2)$$

즉, 식(2)는  $f_i \neq f_j$  일때  $i$ 번째 부반송파에 작용하는  $j$ 번째 부반송파의 간섭을 나타낸다.

일반적인 모델인 다중경로를 거친  $N$ 개의 부반송파를 가지는 신호에서의 반송파 간섭을 계산하기 위하여 경로 수  $P$  개를 갖는 채널모델에서 도플러 주파수가 같게 나타나는 경로들을 묶어서 인덱스  $k'$  로 나타내면 식(2)로부터 원하는 신호부분에 대한 관계식을 다음과 같이 표시할 수 있다[9].

$$\begin{aligned} \eta_i^2 &= \sum_{k'=0}^{i-1} \text{sinc}^2(f_d^{(k')} \cdot T) \cdot E^{(k')}, \\ -N/2 \leq i \leq N/2 - 1 \end{aligned} \quad (3)$$

위 식에서  $E^{(k')}$ 는 도플러 주파수가  $f_d^{(k')}$  일 때의 도플러 전력 스펙트럼을 나타내는데 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$E^{(k')} = \sigma_x^2 P(f_d^{(k')}) \quad (4)$$

여기서 경로  $k'$ 에 따른 전체  $P(f_d^{(k')})$ 에 대한 합은 1이 된다.

이제  $i$ 번째 부반송파에 작용하는 반송파간의 간섭부분을 표시하여보면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \eta_{SCI}^2 &= \\ &\sum_{k'=0}^{i-1} \sum_{\substack{i=N/2 \\ i \neq j}}^{N/2-1} \text{sinc}^2 [(f_i - f_j + f_d^{(k')}) \cdot T] \cdot E^{(k')} \end{aligned} \quad (5)$$

그러므로 구해진 결과 식들을 이용하면 다양한 도플러 전력 스펙트럼 모델에 따른 반송파 간섭의 영향을 계산할 수 있다. 이러한 도플러 천이에 의해 초래되는 확산은 부반송파간의 간섭현상을 초래하게 되며 이러한 이유로 인하여 가우시안 백색잡음만을 고려하는 경우와 달리 실질적인 유효 SNR 값은 감소하게 된다. 따라서 시스템의 BER 성능이 나빠질 수 있다. 그러나 이러한 도플러 스펙트럼에 의한 열화현상은 송수신 다이버시티를 이용하는 시스템의 경우 어느 정도까지는 개선효과를 기대할 수 있다.

#### IV. 도플러 스펙트럼 모델 및 결과

본 논문에서 모의실험에 적용한 4가지 도플러 스펙트럼 모델을 표 1에 나타내었다. 여기서 도플러 주파수의 범위는  $|f| \leq f_{\max}$  로 표시되며  $G, A_1$  및  $A_2$ 는 다음과 같이 표시되는 함수들이다[10].

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{50}{\sqrt{2\pi} \cdot 3f_{\max}}, \\ A_2 &= \frac{10^{1.5}}{\sqrt{2\pi} (\sqrt{10} + 0.15)f_{\max}}, \\ G(A_i, f_i, s_i) &= A_i \exp \left[ -\frac{(f - f_i)^2}{2s_i^2} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

표 1. 도플러 전력 스펙트럼 모델 (COST 207)  
Table 3. Doppler power spectrum model(COST 207)

Type	Doppler power spectral density
Jakes	$\frac{1}{\pi f_{\max} \sqrt{1 - (f/f_{\max})^2}}$
Gauss I	$G(A_1, -0.8f_{\max}, 0.05f_{\max}) + G(A_1/10, -0.4f_{\max}, 0.1f_{\max})$
Gauss II	$G(A_2, -0.7f_{\max}, 0.1f_{\max}) + G(A_2/10^{1.5}, -0.4f_{\max}, 0.15f_{\max})$
Rice	$\frac{(0.41)^2}{\pi f_{\max} \sqrt{1 - (f/f_{\max})^2}} + (0.91)^2 \delta(f - 0.7f_{\max})$

먼저 최대 도플러 주파수가 부반송파 간격의 0.07 인 경우 Jakes 도플러 모델에 대한 성상도를 그림 2에 나타 내었다. 그림 3 부터 그림 5 까지는 각각의 도플러 스펙 트럼 모델에 따른 확산현상이 시스템 성능에 미치는 영 향을 다이버시티 미적용, 송신 다이버시티 및 송수신 다 이버시티 적용 시스템과 비교하여 그 성능을 나타내었다. 여기서 Gauss I 및 Gauss II 모델의 경우는 거의 유사 한 결과를 보이기 때문에 Gauss I의 경우만 그래프로 표 시하였다. 그림들에서 보는 것처럼 2개의 송신 안테나 또는 2개의 송신 및 수신 안테나를 이용한 송수신다이버 시티 시스템은 상당한 성능개선 효과를 보인다. 특히 송 신 및 수신 다이버시티를 동시에 적용한 경우 개선 효과 가 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 이러한 개선효과는 SNR 값이 클수록 상대적으로 크게 나타나며 송수신 다 이버시티 시스템이 더 강한 특성을 보인다는 것을 확 인할 수 있다. 그러나 도플러 스펙트럼 모델 변화에 따른 특성의 차이는 거의 없다는 것을 알 수 있다. 그림 6에서 는 SNR 값을 전형적인 값으로 고정하고 최대 도플러 주 파수를 변화시키면서 시스템의 성능이 변화하는 정도 를 고찰하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 도플러 모델에 따른 특성 차이가 거의 없으므로 어떤 도플러 모델을 적 용해도 무방하나 여기서는 Jakes 도플러 스펙트럼 모델 로 하여 결과 그래프를 나타내었다. 마찬가지로 다이버 시티를 적용하지 않은 경우 및 송신 다이버시티만을 적 용한 경우, 송수신 다이버시티 모두 적용한 경우로 나누 어서 도플러에 의한 영향을 표시하였다. 그림 6의 결과

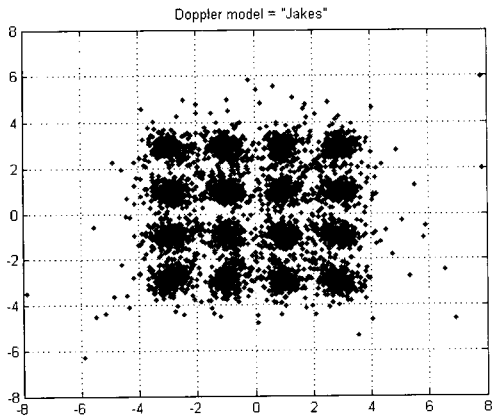


그림 2. Jakes 모델 성상도 왜곡  
Fig. 2 Distortion of constellation in Jakes Model

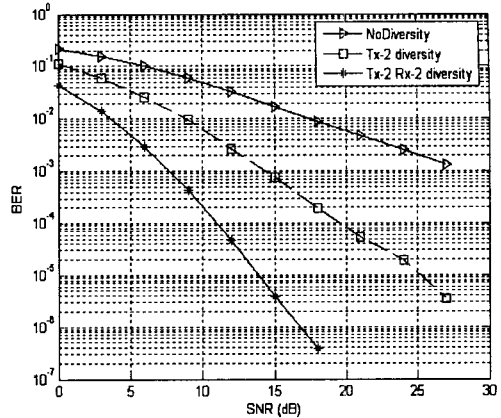


그림 3. Jakes 모델에서의 SNR 변화에 따른 BER  
Fig. 3 BER in Jakes model according to SNR variation

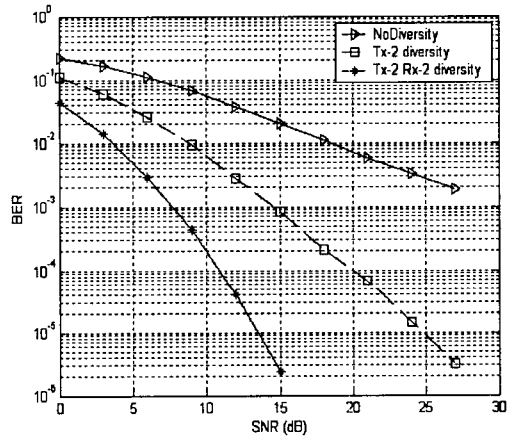


그림 4. Gauss I 모델에서의 SNR 변화에 따른 BER  
Fig. 4 BER in Gauss I model according to SNR variation

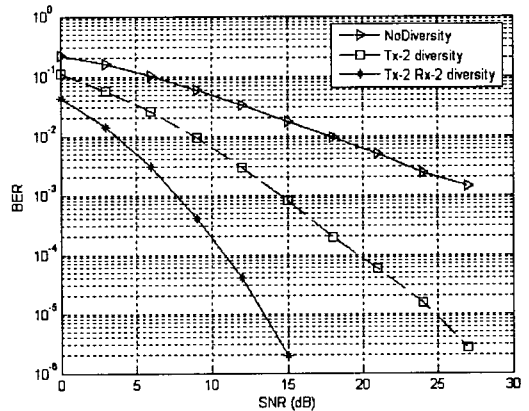


그림 5. Rice 모델에서의 SNR 변화에 따른 BER  
Fig. 5 BER in Rice model according to SNR variation

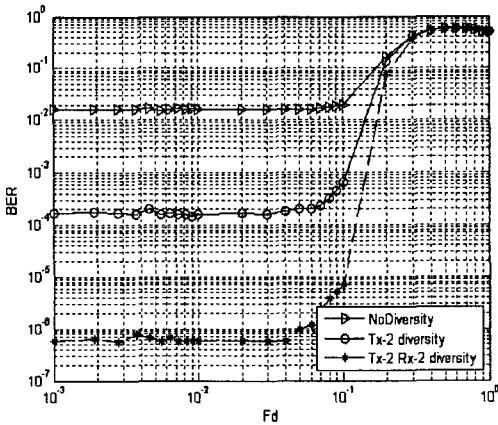


그림 6. 도플러 주파수 변화에 따른 송수신 다이버시티 시스템의 BER (SNR=15dB)

Fig. 6 BER in transceiver diversity systems according to Doppler frequency variation

에서 알 수 있는 것처럼 일정 범위내의 도플러 확산인 경우 송수신 다이버시티 시스템이 강인한 특성을 유지하고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 일정 범위를 초과하는 매우 큰 도플러 확산이 일어날 경우 시스템의 열화 정도는 급격하게 증가하게 되며 이러한 경우에는 별 다른 차이를 보이지 않게 된다.

### V. 결론

본 논문에서는 비교적 구현이 용이한 간단한 송신 및 송수신 다이버시티 시스템에서의 도플러 확산에 따른 열화 정도를 고찰하였다. 즉, 2개의 송신 안테나를 사용하는 경우와 송수신부 모두에서 각각 2개의 송신 및 수신 안테나를 활용하는 다이버시티 시스템에서의 성능을 검증하였다.

도플러 확산에 의한 시스템의 영향을 정량적으로 분석하기 위하여 전형적인 도플러 스펙트럼 모델들을 설정하고 SNR 값 및 도플러 변이의 정도를 다양하게 변화시키면서 성능분석 결과들을 얻을 수 있었다. 결과 그림들에서 보는 것처럼 단일안테나 시스템에 비하여 송신 및 송수신 다이버시티 적용 시스템의 성능개선 효과가 뚜렷하다는 것을 알 수 있으며 그 정도는 SNR 값의 증가에 따라 더욱 많은 차이를 보인다. 또한 도플러 모델들에 따른 성능개선 정도의 특성 차이는 크게 다르지 않다. 아

울러 최대 도플러 주파수 변동에 따른 시스템 성능 분석 결과에서 보는 것처럼 도플러 확산의 정도가 지나치게 크게 발생하지 않는 대부분의 경우에서 송수신 다이버시티를 이용하는 시스템이 매우 강인한 특성을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

### 참고문헌

- [ 1 ] R. Nee and R. Prasad, *OFDM wireless multimedia communications*, Artech House, 2000
- [ 2 ] J. H. Winters, "The diversity gain of transmit diversity in wireless systems with Rayleigh fading," *Proc. IEEE Int. Conf. Communications*, pp. 1121-1125, 1994
- [ 3 ] D. Agrawal, V. Tarokh, et al. "Space-time coded OFDM high data-rate wireless communication over wideband channels," *Proc. IEEE Vehicular Technology Conf.*, pp. 2232-2236, 1998
- [ 4 ] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity scheme for wireless communications," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 16, pp. 1451-1458, Oct. 1988
- [ 5 ] B. Lu and X. Wang, "Space-time code design in OFDM systems," *Proc. Globecom*, vol. 2, pp. 1000-1004, 2000
- [ 6 ] T. H. Liew and L. Hanzo, "Space-time codes and concatenated channel codes for wireless communications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, pp. 187-219, Feb. 2002
- [ 7 ] G. L. Stuber et al., "Broadband MIMO-OFDM wireless communications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, pp. 271-294, Feb. 2004
- [ 8 ] P. H. Moose, "A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 42, no. 11, pp. 2908-2914, Oct. 1994
- [ 9 ] P. Robertson and S. Kaiser, "The effects of Doppler spreads in OFDM mobile radio systems," *Proc. IEEE VTC* vol. 1, pp. 329-333, Sept. 1999
- [ 10 ] M. Patzold, *Mobile fading channels*, John Wiley & Sons, pp. 259-265, 2002

## 저자소개



**이 종 길 (Jong Gil Lee)**

1982년 2월 연세대학교 전자공학과  
(공학사)

1985년 1월 미국 Case Western Reserve  
University, Electrical Eng. (M.S.)

1990년 5월 미국 Clemson University, Electrical Eng. (Ph.D.)

1991년 1월 ~ 1993년 2월 삼성전자 특수연구소

1993년 3월 ~ 현재 인천대학교 정보통신공학과 교수

※ 관심 분야: 무선통신, 레이다신호처리, 통신시스템,  
스펙트럼분석