

# 나카가미 페이딩 채널에서 선택 다이버시티와 최대비 합성 다이버시티가 FH/MFSK 시스템의 성능에 미치는 영향

정회원 이충성\*, 김항래\*, 김남\*

## Effect of the Selection Diversity and MRC Diversity on Performance of the FH/MFSK System in Nakagami Fading Channel

Chung-Seong Lee\*, Hang-Rae Kim\*, Nam Kim\* *Regular Members*

### 요 약

무선 통신 시스템에서 신호의 다중경로 페이딩 현상은 시스템 성능을 저하시키는 원인중의 하나이다. 본 논문에서는 나카가미 페이딩 채널에서 FH/MFSK 시스템에 선택 다이버시티와 최대비 합성 다이버시티를 적용하였을 경우의 시스템 성능을 분석한다. 선택 합성과 최대비 합성 후, 수신신호로부터 제거확률을 유도하고 FH/MFSK 시스템의 성능분석을 위해 사용자 수(M), 신호대 잡음비(SNR), 나카가미 페이딩 지수(m), 다이버시티 가지의 수(D)와 같은 파라미터를 사용한다. SNR이 15dB인 경우, D=2와 D=3에서 선택 다이버시티를 사용한 시스템의 용량은 다이버시티를 고려하지 않은 용량보다 35.4%와 47.5%로 증가하고, 최대비 합성 다이버시티를 사용한 시스템의 용량은 41.1%와 50.7%로 증가한다는 것을 알 수 있다.

### ABSTRACT

Multipath fading phenomenon is one of the reasons of the system performance degradation in radio mobile system. In this paper, the system performance in case of applying the selection diversity and the MRC(maximal ratio combining) diversity to FH/MFSK system is analyzed. After selection combining and MRC, the deletion probability is derived from the received signal and the parameters such as the number of users(M), signal to noise ration(SNR), Nakagami fading figure(m), and the number of diversity branches(D) are used for the performance analysis of the FH/MFSK system. In case of SNR=15dB, it is shown that the system capacity using the selection diversity more increased to 35.4% and 47.3% than the capacity of no diversity consideration and the system capacity using the MRC diversity more increased to 41.1% and 50.7% than the capacity of no diversity consideration at D=2 and D=3.

### I. 서 론

대역확산 시스템은 사용자가 통신 중에 발생할 수 있는 간섭이나 전파방해(jamming) 또는 도청으로부터 정보를 보호하기 위해 전송할 신호의 대역을 확산부호를 사용하여 미리 충분히 넓혀주는 방식이다. 전력 스펙트럼 밀도를 아주 낮게하여 전송

하면 수신단에서는 거의 백색잡음과 같은 낮은 레벨의 신호를 수신한다. 수신한 신호를 송신할 때에 사용한 확산 부호를 이용하여 역확산시키면 원래의 신호가 재생되고, 의도적인 잡음이나 기타 추가된 신호는 낮은 레벨로 확산되어 원하는 정보를 거의 손상 없이 검출할 수 있다. 가장 널리 알려진 대역 확산 시스템에는 긴 확산부호를 사용하여 원래 신

\* 충북대학교 정보통신공학과  
논문번호: 00292-0726, 접수일자: 2000년 7월 26일

호의 대역을 확산시키는 DS(direct sequence) 시스템과 원신호의 반송 주파수를 특정한 도약패턴에 따라 도약시켜서 원신호의 대역을 확산시키는 FH (frequency hopping) 시스템이 있다. FH 시스템은 통신 채널에서 주파수 대역이 고의적인 전파 방해나 각종 잡음 및 페이딩에 강한 성질 때문에 주로 군사용 통신이나 위성통신 및 HF 통신에 많이 응용되고 있다<sup>[1,2]</sup>.

1978년에 Viterbi는 비교적 낮은 데이터율을 사용하는 위성통신에 이용할 목적으로 MFSK(multilevel frequency shift keying) 변조를 사용하는 FH 시스템을 제안하였다<sup>[3]</sup>. 이 시스템을 디지털 이동통신 서비스에서도 사용할 수 있는지에 대한 연구는 1980년 Goodman에 의하여 이루어졌다. 그 결과 단방향 대역폭이 20MHz이고 데이터율이 32kbps인 FH/MFSK 시스템에서 페이딩 환경을 고려하지 않은 경우에는 최대 209명의 사용자를 수용할 수 있음이 증명되었고, 레일레이(Rayleigh) 분포된 다중경로 페이딩 환경을 고려할 경우에는 39명 적은 170명의 사용자에게 서비스할 수 있음이 또한 증명되었다<sup>[4]</sup>. 그러나, 기지국에서 이동국까지 가시경로(line-of-sight)가 형성될 경우 즉, 직접파와 간접파에 비해 우세한 지역 및 건물등과 같은 지형지물에 의한 음영효과(shadowing effect)가 발생하는 지역에서는 레일레이 다중경로 페이딩 채널 모델만으로는 정확한 시스템의 성능분석을 할 수 없게 된다. 1998년 Xuto는 이러한 다중경로 페이딩 채널을 라이시안(Rician), 새도우드 라이시안(shadowed Rician), 나카가미(Nakagami)로 나누고 각각에 대한 시스템 성능분석을 하였다<sup>[5]</sup>. 그러나 Goodman과 Xuto는 FH/MFSK 시스템에서 페이딩 환경을 극복하기 위한 어떠한 방법도 제시하지는 않았다.

페이딩의 영향을 감소시켜 시스템의 성능을 개선하기 위한 방법으로는 다이버시티(diversity)가 있다<sup>[6,7]</sup>. 다이버시티는 다중경로로 전송된 신호의 통계적 특성을 이용하는 것으로 수신 신호들이 서로 독립적일 경우에는 다중경로 채널로 수신되는 신호의 전력들이 어느 정해진 임계값 이하로 동시에 떨어질 확률이 작다는 원리를 이용한 것이다. 합성 방식으로는 크게 선택 합성(selection combining), 최대비 합성(maximal ratio combining) 및 동일 이득 합성(equal gain combining)이 있으며 이 중에서는 선택 합성 방식과 최대비 합성 방식이 가장 많이 사용되고 있다.

본 논문에서는 FH/MFSK 시스템에 대한 성능을

분석하기 위해 나카가미 페이딩 채널에서 선택 다이버시티와 최대비 합성 다이버시티를 적용한 경우의 제거 확률을 유도하고 사용지수, 페이딩 지수, 다이버시티 가지의 수 및 신호대 잡음비(SNR)를 고려하여 선택 다이버시티와 최대비 합성 다이버시티가 FH/MFSK 시스템의 성능에 미치는 영향을 해석적으로 분석한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 분석하고자 하는 FH/MFSK 시스템 모델링과 채널 모델링에 대해 서술하고, 3장에서는 나카가미 페이딩 채널에서 선택 합성과 최대비 합성후의 수신 신호에 대한 SNR을 구한다. 4장에서는 시스템의 오경보 확률(false alarm probability)과 제거 확률(deletion probability)을 구하고, 5장에서는 수치해석 결과를 나타낸다. 6장에서는 결론을 기술한다.

## II. 시스템 모델링과 채널 모델링

### 2.1 FH/MFSK 시스템 모델링

제안한 FH/MFSK 시스템의 송신기와 수신기를 그림 1에 나타내었다. 제안한 시스템은 K가 8이고 L이 19인 2<sup>8</sup>진 시스템으로 2<sup>8</sup>개의 주파수를 사용한다. FH/MFSK 시스템에서는 사용자들이 시스템의 전 대역폭을 점유하게 되므로, 사용자들간의 신호를 구분하는 방법이 필요하게 된다. 이러한 신호 구분 방법은 시간과 주파수의 형식으로 구성된 주소를 각 사용자에게 할당하는 것이다<sup>[1]</sup>.

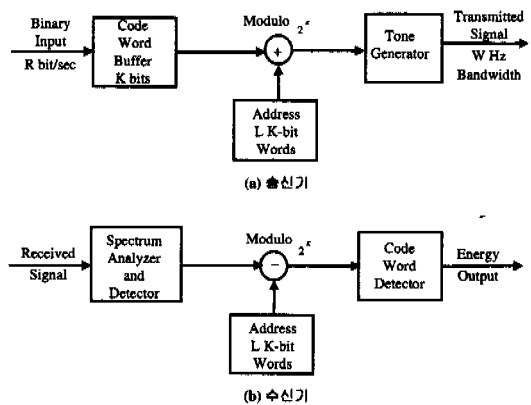


그림 1. FH/MFSK 시스템의 구성도

사용자는 길이가 L이고 K비트의 부호어(code word)로 구성된 주소를 송신기로부터 할당받는다. 그 다음 사용자의 K비트 메시지는 부호어와 modulo-2<sup>L</sup> 가산이 되어 길이가 L인 새로운 수열

(sequence)을 생성한다. 신호의 주기를 T라 하면 새롭게 생성된 수열의 부호어는 간격이  $\tau=T/L$ 가 되고 그 값은 0에서부터  $2^k-1$  사이의 값들로 구성된다. 톤 발생기는 새롭게 생성된 수열을 이용하여  $2^k$ 개의 직교 주파수중에서 신호톤과 일치하는 주파수를 선택하게 된다.

수신기에서는 톤의 유무에 상관없이 임계값(threshold level)  $b$ 와 주파수 빈(bin)의 에너지 값을 비교하여  $2^k$ 개 주파수중 하나를  $\tau$ 초마다 검출한다. 수신된 톤들은 검출된 후 일치하는 부호어로 다시 변환되고 송신기에서 사용했던 주소와 modulo- $2^k$  가산을 한다. 그러므로 마지막 신호의 주기에서는 원 K비트 메시지의 L개 복사본이 생성된다. 수신기는 원하는 사용자로부터 수신된 톤뿐만 아니라 시스템의 다른 사용자들이 송신한 톤까지도 검출한다. 이 과정에서 상호간섭, 다중경로 페이딩, AWGN이 전송된 톤을 제거(deletion)하거나 잘못 수신된 톤을 간접적으로 검출하여 오경보(false alarm)를 일으키게 된다.

### 2.2 채널 모델링

무선 이동통신의 여러 가지 문제점 중에서도 특히 신호의 다중경로에 의한 페이딩 현상은 아주 중요한 문제가 되고 있다. 이러한 페이딩 채널을 모델링하기 위해 레일레이, 라이시안, 로그노말, 나카가미 등과 같은 여러 가지의 페이딩 모델이 제시되었고, 그 중에서 나카가미 페이딩 모델은 실험 및 이론적으로 도시 지역에서의 페이딩 채널을 표현하는데 가장 적합하다고 알려져 있다<sup>[8,9]</sup>. 따라서 본 논문에서는 전송채널을 나카가미 페이딩 채널로 가정하고 FH/MFSK 시스템의 성능을 분석한다.

나카가미 페이딩은 나카가미  $m$ -분포라고도 하는데, 수신된 신호의 포락선이 다음과 같은 확률밀도 함수를 갖는 페이딩 모델이다<sup>[8,9]</sup>.

$$p(u) = \frac{2m^m u^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega(m)} \exp\left(-\frac{mu^2}{\Omega}\right), \quad u \geq 0 \quad (1)$$

여기서  $u$ 는 나카가미 페이딩 신호의 크기,  $\Omega$ 는  $u$ 의 제곱평균값인  $E(u^2)$ ,  $\Gamma(m)$ 은 감마 함수(gamma function)를 나타낸다.  $m$ 은 모멘트의 비율로써 분포의 모양을 결정하고 페이딩 정도를 나타내며 페이딩 지수(fading figure)라고 한다.  $m$ 값의 범위는  $0.5 \leq m < \infty$ 이고  $m=1$ 인 경우는 레일레이 분포가 되며,  $m=0.5$ 인 경우는 단측 가우시안(half-Gaussian) 분포가 된다. 특히, 이 모델은  $m$ 이 증가

할수록 페이딩이 약하게 되고  $m$ 이 무한히 커지면 델타함수에 근사하게 되어 페이딩이 존재하지 않는 상태가 된다. 나카가미 페이딩은  $m$ 과  $\Omega$ 를 적절히 조절함으로써 레일레이 페이딩과 라이시안 페이딩을 모두 표현할 수 있기 때문에 이동통신과 위성통신에 적용할 수 있는 페이딩 모델이다. 그림 2는 나카가미  $m$ -분포함수를 나타낸다.

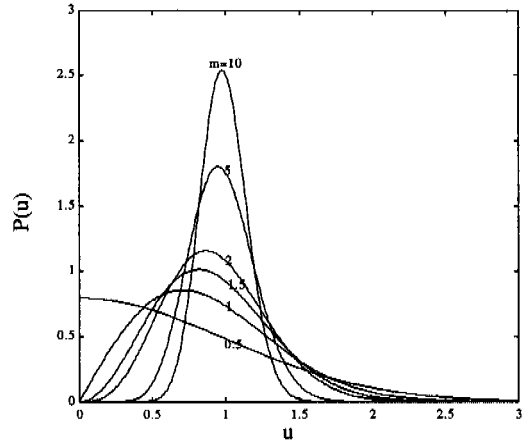


그림 2. 나카가미  $m$ -분포 함수 ( $\Omega=1$ )

## III. 다이버시티 적용후 수신 신호의 신호대 잡음비

나카가미 페이딩 채널에서 다이버시티를 적용할 경우, 시스템 성능이 선택 합성과 최대비 합성에 의해서 어느 정도 개선되는지를 분석하기 위해서는 합성후의 수신 SNR를 구해야만 한다.

### 3.1 선택 다이버시티

선택 합성 기법은 안테나를 통해 수신된 신호를 계속 비교한 후에 SNR이 가장 우수한 것을 취하는데, 실제 이 방식을 적용할 때는 SNR을 계산하기 보다는 수신 신호의 세기가 가장 큰 것을 선택한다<sup>[7,10,11]</sup>. 그림 3은 선택 다이버시티의 구성도를 나타낸다.

다이버시티를 사용할 경우  $k$ 번째 수신단에서 수신된 신호는 다음과 같은 정현파 형태로 표현할 수 있다.

$$y_k(t) = u_k \exp(j2\pi f_0 t) \quad (2)$$

여기서  $u_k$ 는  $k$ 번째 사용자 신호의 포락선 크기를 나타낸다. 수신된 신호의 시간평균(time averaging), 즉 평균전력은  $u_k^2/2$ 이 된다. 평균 잡음전력을  $N$ 이라 하면  $k$ 번째 수신단에서 수신된 신

호의 SNR,  $\gamma_k$ 는 다음과 같다.

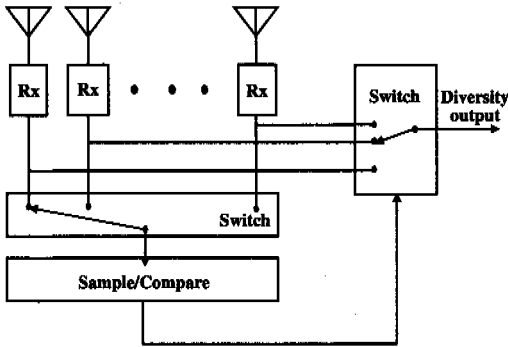


그림 3. 선택 다이버시티 구성도

$$\gamma_k = \frac{u_k^2}{2N} \quad (3)$$

그러므로 나카가미 페이딩을 겪은  $k$ 번째 수신단에서, 수신된 신호의 순시 SNR에 대한 확률밀도함수는 다음과 같다<sup>[5]</sup>.

$$p_r(\gamma_k) = \frac{m_k^{m_k} \gamma_k^{m_k-1}}{\Gamma(m_k) \gamma_0^{m_k}} \exp\left(-\frac{m_k \gamma_k}{\gamma_0}\right), \quad \gamma_k \geq 0 \quad (4)$$

여기서  $\gamma_k$ 는  $k$ 번째 수신단에서의 SNR,  $\gamma_0 = \Omega/2N$ 는 페이딩이 존재할 경우의 평균 SNR,  $m_k$ 는  $k$ 번째 수신단에서의 페이딩 지수를 나타낸다. 확률분포함수는 확률밀도함수를 적분한 것이므로  $\gamma_k$ 에 대한 확률 분포함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_r(\gamma) = \int_0^\gamma \frac{m_k^{m_k} x^{m_k-1}}{\Gamma(m_k) \gamma_0^{m_k}} \exp\left(-\frac{m_k x}{\gamma_0}\right) dx, \quad \gamma \geq 0 \quad (5)$$

위 적분식에서  $t = m_k x / \gamma_0$ 로 놓고 풀면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_r(\gamma) = \int_0^{\frac{m_k \gamma}{\gamma_0}} \frac{1}{\Gamma(m_k)} t^{m_k-1} \exp(-t) dt \quad (6)$$

$$= F\left(m_k, \frac{m_k \gamma}{\gamma_0}\right)$$

$F(a, \beta)$ 는 다음과 같이 정의된 불완전 감마함수 (incomplete gamma function)이다<sup>[13,14]</sup>.

$$F(a, \beta) = \frac{1}{\Gamma(a)} \int_0^\beta \xi^{a-1} \exp(-\xi) d\xi \quad (7)$$

$$= 1 - e_{a-1}(\beta) \exp(-\beta)$$

여기서  $e_n(x) = \sum_{j=0}^n \frac{x^j}{j!}$ 이다. 그러므로 식 (6)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_r(\gamma) = 1 - \exp\left(-\frac{m_k \gamma}{\gamma_0}\right) \sum_{k=0}^{m_k-1} \left(\frac{m_k \gamma}{\gamma_0}\right)^k \frac{1}{k!} \quad (8)$$

선택 합성후, 수신 신호의 SNR에 대한 분포를 구하기 위해서는 선택 합성후의 SNR,  $\gamma_s$ 가  $x$ 이하일 확률을 구해야만 한다. 각 수신단에서의 SNR을  $\gamma_k (k=1, 2, \dots, D)$ 라 하고 모든 수신단이 서로 독립적이라고 가정하면, 선택 합성후 수신된 신호의 SNR이  $x$ 이하일 확률은 다음과 같이 된다.

$$\Pr\{\gamma_s \leq x\} = \prod_{k=1}^D \Pr\{\gamma_k \leq x\} \quad (9)$$

여기서  $D$ 는 수신단의 개수 즉, 다이버시티 가지의 수이다. 각 수신단에서 평균 SNR과 페이딩 파라미터  $m_k$ 가 동일한 값을 갖는다고 가정하면, 수신 신호의 SNR은 동일한 확률분포를 갖기 때문에 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Pr\{\gamma_1 < x\} = \Pr\{\gamma_2 < x\} = \dots = \Pr\{\gamma_D < x\} \stackrel{set}{=} \Pr\{\gamma < x\} \quad (10)$$

그 다음, 선택 합성후 수신 신호의 SNR에 대한 확률분포함수,  $P_{r,s}(x)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$P_{r,s}(x) = \prod_{k=1}^D \Pr\{\gamma_k \leq x\} = [\Pr\{\gamma \leq x\}]^D = [P_r(x)]^D \quad (11)$$

나카가미 페이딩 환경에서 선택 합성후 수신 신호의 SNR에 대한 확률밀도함수는 식 (11)을 미분하면 된다. 그러므로  $p_{r,s}(\gamma)$ 는 다음과 같다.

$$p_{r,s}(\gamma) = \frac{d}{dx} [P_{r,s}(x)] = D [P_{r,s}(\gamma)]^{D-1} p_r(\gamma) \quad (12)$$

### 3.2 최대비 합성 다이버시티

최대비 합성 방식은 각 수신단에 입력된 신호에 입력된 신호의 진폭 및 복조된 위상을 곱해준후, 각 수신단의 출력을 합성하는 방식이다. 이 방법은 구현이 매우 복잡하지만 다른 다이버시티 기법보다 나은 성능을 얻을 수 있다. 그림 4는 최대비 합성 다이버시티의 구성도를 나타낸다.

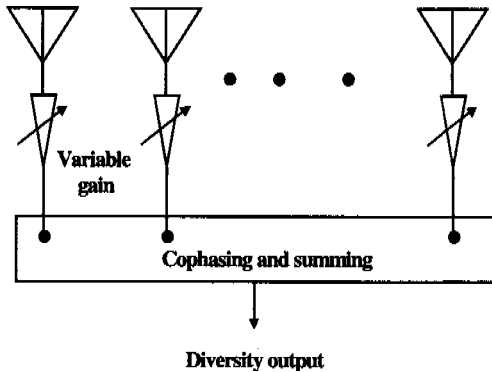


그림 4. 최대비 합성 다이버시티 구성도

가지의 수를  $D$ 라 하면 수신기에서는 서로 다른  $D$ 개의 정보를 수신하게 된다. 각 수신단에서 페이딩과 잡음의 영향이 독립적이고 가정하면 최대비 합성후 수신 신호의 SNR,  $\gamma_{mrc}$ 는 각 수신단의 수신 SNR의 합과 같으며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\gamma_{mrc} = \sum_{k=1}^D \gamma_k \tag{13}$$

그러므로, 나카가미 페이딩 채널에서  $k$ 번째 수신단의 수신신호의 순시 SNR에 대한 확률밀도함수는 다음과 같이 쓸 수 있다<sup>[15]</sup>.

$$p_{\gamma, mrc}(\gamma) = \frac{m_k^{m_k D} \gamma_k^{m_k D - 1}}{\Gamma(m_k D) \gamma_0^{m_k D}} \exp\left(-\frac{m_k \gamma_k}{\gamma_0}\right) \tag{14}$$

#### IV. 오경보 확률과 제거 확률

대부분 AWGN과 다중경로 페이딩이 오경보와 제거를 일으키며 이러한 채널 손상들은 랜덤한 특성을 갖기 때문에 확률로써 표현할 수 있다. 이 장에서는 오경보 확률과 나카가미 페이딩 채널에서 다이버시티를 적용하였을 때의 제거 확률을 분석한다.

FH/MFSK 시스템이 넌코히런트 온오프 키잉(noncoherent on-off keying)처럼 각각의 톤을 전송할 때, 오경보 확률  $P$ 는 어떠한 신호도 포함하지 않은 주파수 bin의 에너지 값이 임계값을 초과할 확률이다. 주파수 bin의 에너지는 배경잡음에 의해 발생하며 다음과 같이 주어진다<sup>[4]</sup>.

$$P_f = \exp\left(-\frac{b_0^2}{2}\right) \tag{15}$$

여기서  $b_0 = b/\sqrt{N}$ 는 실제의 임계값  $b$ 를 평균 잡

음전력  $N$ 으로 정규화한 값이다.

제거 확률은 수신된 신호의 포락선 크기가 임계값보다 작을 확률이다. 우선, 신호가 페이딩이 존재하지 않는 AWGN 채널을 통과한다고 가정하면, 수신된 신호 포락선  $r$ 의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$p(r) = \frac{r}{N} \exp\left(-\frac{r^2 + u^2}{2N}\right) I_0\left(\frac{ru}{N}\right) \tag{16}$$

여기서  $u$ 는 수신된 신호 포락선의 크기,  $I_0(z)$ 는 1종 0차 수정된 베셀함수(modified Bessel function of 1st kind and 0th order)이다. 그러므로 제거 확률은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} p_d &= \Pr\{r < b\} \\ &= \int_0^b p(r) dr \\ &= \int_0^b \frac{r}{N} \exp\left(-\frac{r^2 + u^2}{2N}\right) I_0\left(\frac{ru}{N}\right) dr \end{aligned} \tag{17}$$

여기서  $b$ 는 임계값이다. 식 (17)에서 변수  $x = r/\sqrt{N}$ 로 놓고 식 (3)을 사용하면, 다음과 같이  $\gamma$ 의 항으로 제거 확률을 나타낼 수 있다<sup>[4]</sup>.

$$p_d = \int_0^{b_0} x \exp\left(-\frac{x^2 + 2\gamma}{2}\right) I_0(x\sqrt{2\gamma}) dx \tag{18}$$

나카가미 페이딩을 겪은 채널에서 선택 다이버시티를 적용할 때 수신된 신호의 SNR에 대한 분포가 식 (12)와 같을 때, 식 (18)은 식 (12)의 랜덤변수  $\gamma$ 의 밀도함수이므로 선택 다이버시티를 적용한 시스템의 제거 확률은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{d,s} = \int_0^\infty p_{\gamma,s}(\gamma) p_d d\gamma \tag{19}$$

유사하게, 최대비 합성 다이버시티를 적용한 시스템의 제거 확률은 다음과 같이 쓸 수 있다.

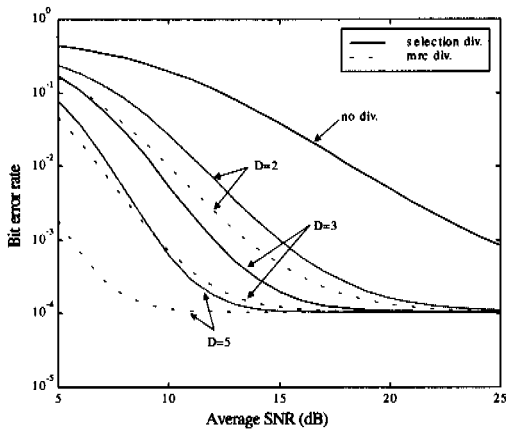
$$P_{d,mrc} = \int_0^\infty p_{\gamma,mrc}(\gamma) p_d d\gamma \tag{20}$$

#### V. 시스템 성능 분석

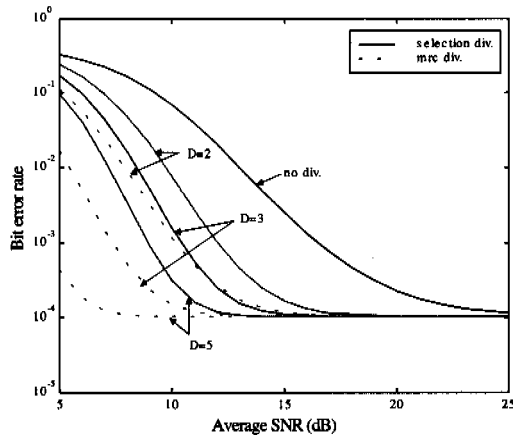
나카가미 페이딩 채널에서 다이버시티를 적용한 FH/MFSK 시스템의 성능분석을 위해 식 (19)와 식 (20)을 이용한다. 성능분석에는 사용자수( $M$ ), 페이딩 지수( $m$ ), 신호대 잡음비(SNR), 및 다이버시티

가지의 수(D)를 파라미터로 하여 수치적으로 계산하였다. 시스템의 비트에러율은 Gooan의 결과식을 이용하였으며<sup>[4]</sup> 대역폭은 20MHz, 데이터율은 32kbps이고 심볼간 간섭(intersymbol interference)이나 도플러 효과(Doppler effect)는 고려하지 않았다.

그림 5는 사용자 수가 170명일 때, 수신 신호의 평균 SNR과 가지의 수(D)의 변화에 따른 FH/MFSK 시스템의 비트에러율을 나타낸 것이다. 가로축은 수신 신호의 평균 SNR을 나타내고 세로축은 비트에러율을 나타낸다. 그림 5의 (a)는 m이 1인 나카가미 페이딩 채널 즉, 레일레이 페이딩 채널을 나타내고 그림 5의 (b)는 m이 2인 나카가미 페이딩 채널을 나타낸다. 다이버시티를 적용한 시스템의 성능이 다이버시티를 적용하지 않은 시스템의 성능보다 우수하고, 최대비 합성 다이버시티를 적용한 시스템의 성능이 선택 다이버시티를 적용한 시스템



(a) m=1



(b) m=2

그림 5. 다이버시티를 사용할 때, 평균 SNR과 가지의 수(D) 변화에 따른 FH/MFSK 시스템의 비트에러율 (M=170)

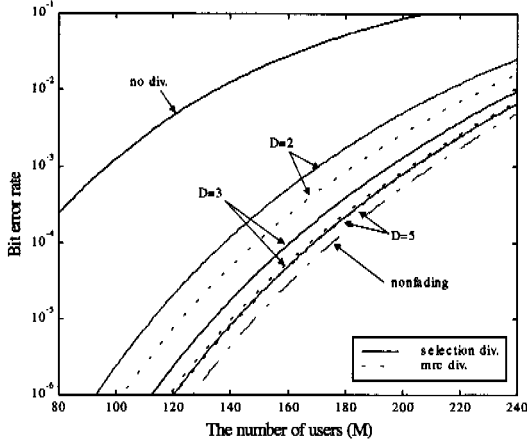
의 성능보다 우수함을 알 수 있다. 평균 SNR일 일정한 경우에는 D가 증가할수록 시스템의 성능이 개선되며, m이 2인 페이딩 채널보다는 m이 1인 페이딩 채널에서 다이버시티가 더 효과적임을 알 수 있다. 즉, 다이버시티는 채널환경이 열악할수록 효과적으로 사용될 수 있다. 예를 들어, m이 1일 때 다이버시티를 사용하지 않은 경우에 비트에러율이  $1.0 \times 10^{-3}$ 이하이기 위해서는 약 25dB의 SNR이 요구되지만, D가 2인 선택 다이버시티를 사용하면 약 15dB의 SNR이 요구되어 10dB만큼의 이득이 있음을 알 수 있다. 표 1은 비트에러율이  $1.0 \times 10^{-3}$ 이하이기 위해 요구되는 SNR을 나타낸다.

표 1. BER이  $1.0 \times 10^{-3}$ 이하이기 위해 요구되는 SNR

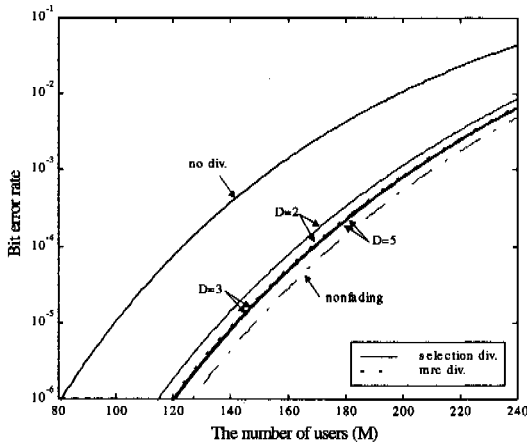
m	D	선택 다이버시티	최대비 합성 다이버시티
1	1	25	
	2	15	14
	3	12	10
	5	10	6
2	1	17	
	2	12	11
	3	11	8
	5	9	-

그림 6은 평균 SNR이 15dB일 때, 사용자 수(M)와 가지의 수(D)의 변화에 따른 FH/MFSK 시스템의 비트에러율을 나타낸 것이다. 그림에서 가로축은 시스템의 사용자 수를 나타내고 세로축은 비트에러율을 나타낸다. 그림 (a)는 m이 1인 경우를 나타내고 그림 (b)는 m이 2인 경우를 나타낸다. m이 1인 경우  $1.0 \times 10^{-3}$ 의 비트에러율에서 시스템의 사용자 수는 170명으로 Xuto의 결과와<sup>[5]</sup> 동일하다. 비트에러율이 일정한 경우에 D가 증가할수록 M이 증가함을 알 수 있으며, 선택 다이버시티보다는 최대비 합성 다이버시티를 사용할 때 M이 증가함을 알 수 있다. m이 1인 경우에는 선택 다이버시티와 최대비 합성 다이버시티 둘 다 D가 증가함에 따라 시스템의 성능이 개선됨을 볼 수 있다. 그러나, m이 2일 때 D가 2인 경우에는 다이버시티에 의해 시스템 성능이 개선되지만, D가 3이상 증가하는 경우에는 다이버시티에 의한 시스템의 성능이 거의 개선되지 않음을 볼 수 있다. 이러한 결과는 페이딩 현상이 비교적 양호한 전송채널에서는 다이버시티가 별 효과를 거두지 못함을 의미하는 것으로 무조건 가지의 수를 증가시킨다고 해서 시스템 성능이 항상 개선되는 않으며 적

절한 다이버시티의 가지의 수를 찾는 것이 중요하다. 표 2는  $1.0 \times 10^{-3}$ 의 비트에러율에서, 시스템이 서비스 할 수 있는 최대 사용자 수를 나타낸다.



(a)  $m=1$



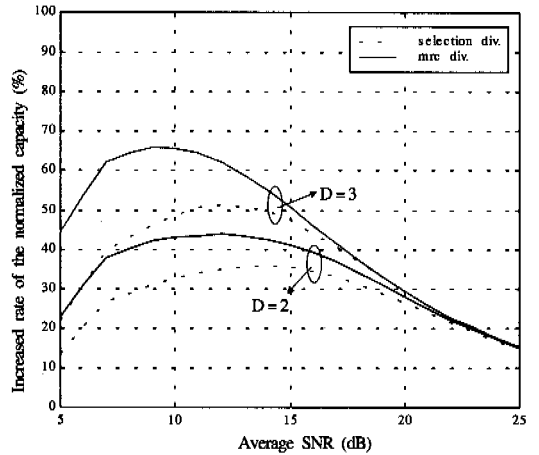
(b)  $m=2$

그림 6. 다이버시티를 사용할 때 사용자 수(M)와 가지의 수(D) 변화에 따른 FH/MFSK 시스템의 비트에러율 (평균 SNR=15dB)

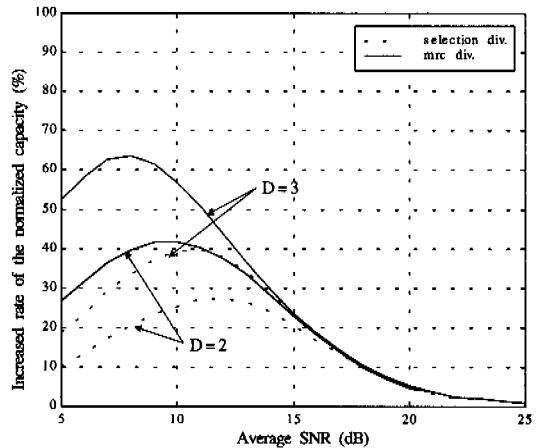
표 2. BER= $1.0 \times 10^{-3}$ 에서 FH/MFSK 시스템의 최대 사용자 수 (명)

$m$	D	선택 다이버시티	최대비 합성 다이버시티
1	1	97	
	2	171	183
	3	196	202
	5	204	204
2	1	155	
	2	197	203
	3	203	204
	5	205	205

그림 7은  $1.0 \times 10^{-3}$ 의 비트에러율에서, 다이버시티를 사용하지 않은 시스템과 다이버시티를 사용한 시스템에서 사용자의 변화를 나타낸 것이다. (a)는  $m$ 이 1인 경우를, (b)는  $m$ 이 2인 경우를 나타낸다. 가로축은 평균 SNR을 나타내고 세로축은 다이버시티를 사용한 시스템의 사용자 수에서 다이버시티를 사용하지 않은 시스템의 사용자 수를 백 값을 시스템의 최대 사용자 수로 정규화한 값이다. 여기서 최대 사용자 수는 209명으로 나카가미 페이딩을 고려하지 않았을 때이다. 예를 들면, 그림 7의 (a)에서 평균 SNR이 15dB일 때 다이버시티를 사용하지 않은 시스템의 사용자 수는 97명이었는데, D가 2인 선택 다이버시티를 사용한 시스템의 사용자 수는 171명으로 35.4% 증가한 것이다.



(a)  $m=1$



(b)  $m=2$

그림 7. 평균 SNR과 가지의 수(D) 변화에 따른 FH/MFSK 시스템의 정규화된 사용자 수의 증가율 (BER= $1.0 \times 10^{-3}$ )

그림 6은 SNR이 작을수록 다이버시티의 효과는 증가하고 선택 다이버시티보다는 최대비 합성 다이버시티가 더 좋은 효과를 나타냄을 보이고 있다. 특이한 점은  $m$ 이 1인 경우에는 약 20dB 이상의 SNR에서,  $m$ 이 2인 경우에는 약 15dB 이상의 SNR에서 다이버시티의 종류와 D의 개수에 상관없이 사용자 수의 증가율이 일정하였다. 또한,  $m$ 이 1일 때는 D의 개수에 상관없이 SNR이 약 5dB~15dB 사이에서는 최대비 합성 다이버시티가 선택 다이버시티보다 더 높은 사용자 수의 증가율을 나타내지만,  $m$ 이 2일 때는 SNR이 약 6dB~22dB인 경우에 D가 3인 선택 다이버시티가 D가 2인 최대비 합성 다이버시티보다 더 높은 사용자 수의 증가율을 나타내었다. 표 3은  $m$ 이 1과 2인 경우 다이버시티 방식에 따른 정규화된 사용자 수의 증가율을 나타낸다.

표 3. BER= $1.0 \times 10^{-3}$ 에서 정규화된 사용자 수의 증가율(%)

	$m$	D	SNR(dB)				
			5	10	15	20	25
선택 다이버시티	1	2	13.4	32.5	35.4	26.3	14.8
		3	22.0	48.8	47.3	29.1	15.3
	2	2	10.0	25.3	20.5	4.7	0.9
		3	18.8	39.2	23.4	5.2	0.9
최대비 합성 다이버시티	1	2	22.9	43.0	41.1	27.7	14.8
		3	44.4	65.5	50.7	29.1	15.3
	2	2	26.7	41.6	22.9	4.7	0.9
		3	52.6	56.9	23.4	5.2	0.9

## VI. 결론

나카가미 페이딩 채널에서 FH/MFSK 시스템의 성능분석을 위해서는 제거 확률에 대한 분석이 중요하다. 페이딩을 겪은 신호는 시스템에서 제거를 유발시켜 시스템 성능을 저하시킨다. 따라서 평균 SNR을 증가시켜야 한다. 그러나 송신전력의 증가는 간섭량을 증가시키는 단점을 가지기 때문에, 다이버시티는 기법을 사용하여 페이딩을 보상해주는 방법이 더욱 적합하다고 할 수 있다.

본 논문에서는 SNR을 증가시키지 않으면서 FH/MFSK 시스템의 성능을 개선하는 방법으로 선택 다이버시티와 최대비 합성 다이버시티를 고려하였다. 나카가미  $m$ -분포 페이딩을 겪은 MFSK 신호의 선택 다이버시티와 최대비 합성 다이버시티에 대한 제거 확률을 유도하여 FH/MFSK 시스템의 성능 변

화를 분석하였다. 분석결과, 다이버시티 방식을 적용한 시스템이 다이버시티를 적용하지 않은 시스템보다 성능이 우수하였고 선택 다이버시티보다는 최대비 합성 다이버시티를 적용한 시스템 성능이 우수하였다.  $m$ 이 1이고 시스템에서 요구하는 BER이  $1.0 \times 10^{-3}$ 인 경우에 평균 SNR은, 가지의 수가 2, 3 및 5로 증가함에 따라 선택 다이버시티에서는 각각 10dB, 13dB 및 15dB 만큼 이득이 있었고 최대비 합성 다이버시티에서는 각각 11dB, 15dB 19dB 만큼 이득이 있었다. 평균 SNR이 15dB인 경우, 가지의 수가 2와 3으로 각각 증가할 때, 사용자 수는 선택 다이버시티에서는 35.4%와 47.3% 증가하였고 최대비 합성 다이버시티에서는 41.1%와 50.7% 증가하였다.

본 연구의 결과는 FH 시스템의 용량과 이동 통신시스템의 무선 전파환경, 다이버시티의 효과에 대한 이론적 근거로 사용할 수 있으며, 향후 도플러 효과와 심플간 간섭이 시스템 성능에 미치는 영향을 연구할 예정이다.

## 참고 문헌

- [1] R. Kohno, R. Meidan, and L. B. Milstein, "Spread spectrum access method for wireless communications," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 58-67, Jan. 1995.
- [2] T. S. Rappaport, *Wireless communications*, Prentice hall, 1996.
- [3] A. J. Viterbi, "A processing satellite transponder for multiple access by low-rate mobile user," in *Proc. 4th Int. Conf. Digital Satellite Commun.*, Montreal, Canada, pp. 166-174, Oct. 23-25, 1978.
- [4] D. J. Goodman, P. S. Henry, and V. K. Prabhu, "Frequency-hopped multilevel FSK for mobile radio," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 59, no. 7, pp. 1257-1275, Sept. 1980.
- [5] U. S. Xuto, Q. Wang, and V. K. Bhargava, "Capacity of an FH-SSMA system in different fading environments," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 47, no. 1, pp. 75-83, Feb. 1998
- [6] G. L. Stuber, J. W. Mark, and I. F. Blake, "Diversity and coding for FH/MFSK systems with fading and jamming part-II: selective diversity," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 37, no.



- 8, pp. 859-869, Agu. 1989.
- [7] A. Annamalai, "Analysis of selection diversity on Nakagami fading channel," *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 7, pp. 548-549, Mar. 1997.
  - [8] J. G. Proakis, *Digital communication*, McGraw-Hill, Inc., 3rd ed., 1995.
  - [9] J. C. Lin, W. C. Kao, Y. T. Su, and T. H. Lee, "Outage and coverage considerations for microcellular mobile systems in a shadowed-Rician/shadowed-Nakagami environment," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 48, no. 1, pp. 66-75, Jan. 1999.
  - [10] K. Wu and S. Tsaur, "Selection diversity for DS-SSMA communications on Nakagami fading channel," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 43, no. 3, pp. 428-438, Aug. 1994.
  - [11] M. D. Yacob, *Foundations of mobile radio engineering*, CRC press, 1993.
  - [12] 김남수, "불완전 전력제어된 DS/CDMA 셀룰러 시스템에서 최대비 합성 다이버시티 및 선택다이버시티의 영향." *한국통신학회 논문지, 제 23 권 제 1호*, pp. 108-115, Jan. 1998.
  - [13] M. Abramowitz and I. A. Stegun, *Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical Tables*, U. S. Department of Commerce, 1982.
  - [14] Peyton Z. Peebles, Jr., *Probability, random variables, and random signal principles*, McGraw-Hill, Inc., 3rd ed., 1993.
  - [15] E. Al-Hussaini and A. Al-Bassiouni, "Performance of the MRC diversity systems for the detection of signal with Nakagami fading," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-33, no. 12, pp. 1315-1319, Dec. 1985.

이 충 성(Chung-Seong Lee)



1998년 : 충북대학교 정보통신공학과(공학사)  
 2000년 : 충북대학교 정보통신공학과(공학석사)  
 2000년~현재 : ICOLS outsourcing 사업부

<주관심 분야> 디지털 이동통신, 무선 시스템

김 항 래(Hang-Rae Kim)



1995년 : 청주대학교 전자공학과(공학사)  
 1997년 : 청주대학교 전자공학과(공학석사)  
 1997년~1997년 : 한국전자통신연구원 위촉연구원  
 1999년~현재 : 충북대학교 정보통신공학과 박사과정

<주관심 분야> 디지털 이동통신, 무선시스템

김 남(Nam Kim)



1981년 : 연세대학교 전자공학과(공학사)  
 1983년 : 연세대학교 전자공학과(공학석사)  
 1988년 : 연세대학교 전자공학과(공학박사)

1992년~1993년 : 미 Stanford 대학 방문교수

2000년~현재 : 미 California Technology Institute (Caltech) 방문교수

1989년~현재 : 충북대학교 정보통신공학과 교수

<주관심 분야> Diffractive Optics, WDM Optical Filter & DEMUX Optical Memory, Holography Application, 디지털 이동통신, 전자파 해석, EMR/EMC