

# 이동 ad-hoc 채널에서 빔 형성 방식의 페이딩 특성 측정

## The Measurement of Fading Characteristics of The Beamforming on Mobile ad-hoc Channel Environments

고학림\*, 박병훈\*\*

Hak-Lim Ko\*, Byeong-Hoon Park\*\*

### 요약

이동 채널 환경에서 신호는 다중경로 페이딩의 영향으로 통신품질이 크게 저하된다. 지금까지 이러한 페이딩의 영향은 기지국과 이를 중심으로 움직이는 이동 단말간의 이동 채널환경에서 고려되어왔다. 그러나 텔레메틱스 등과 같은 향후의 이동통신 서비스는 기지국과 같은 인프라를 통한 통신뿐만 아니라 단말기간 이동 ad-hoc 통신도 활용될 것이므로 이런 통신환경에서의 페이딩 영향을 분석하고 다이버시티 기법에 대해 연구할 필요가 있다.

본 논문에서는 두 대의 차량을 이용하여 이동 통신 채널을 측정하고, 이 데이터를 활용하여 선형 빔형성 안테나의 페이딩 성능을 분석하였다. 채널 측정은 전 방향 안테나가 장착된 이동 차량에서 2GHz 대역의 QPSK 신호를 전송하고, 선형 배열 안테나가 장착된 차량을 일정 지역을 이동하면서 수신 신호를 저장하였다. 빔 형성 안테나 기법의 페이딩 성능은 전 방향 안테나에 대한 페이딩 마진의 향상 정도를 분석하였으며 선택 다이버시티를 사용한 경우와 비교하였다. 측정 데이터로부터 페이딩 깊이에 따른 CDF를 분석한 결과, 빔 형성 기술을 적용하면 선택 다이버시티를 적용한 경우에 비해 페이딩 마진이 페이딩 환경에 따라 6-7dB 향상됨을 알 수 있었다.

### Abstract

In mobile channel environments, the effect of the multi-path fading reduces the performance of the mobile communication severely. Previous studies on the effect of the multi-path fading show that, only the channel between fixed base stations and mobile terminals are considered. However, the future mobile communication service such as telematics may use the communication between moving mobile terminals, so called mobile ad-hoc communication, the studies on the channel is required for such situations.

In this paper we have measured the mobile channel and analyzed the fading characteristics when using the linear array antennas. In the data measurements, we sent the QPSK modulated signal with carrier frequency of 2GHz band and received the signal using the array antennas equipped on moving vehicles. We have analyzed the fading characteristics and the effects of the fading reduction using the CDF of fading depth using data collected from two moving vehicles. The simulation results show that the beamforming technique adds 6 or 7dB to the fading margin than that of the selection diversity depending on channel environments.

**Keywords:** beamforming, array antenna, mobile ad-hoc channel, ad-hoc communication, selection diversity, fading margin

### I. 서론

텔레메틱스 서비스는 도로안내 및 교통정보, 차량의 사고 및 긴급 상황 등과 관련된 정보 제공, 엔터테인먼트 및 생활편의 정보와 차량의 상태를 원격으로 감시하고 서비스하는 CRM(Customer Relationship Management) 서비스 제공 등을 통해 차량의 운전자 및 차량 안전의 편의성을

향상시킬 것이다. 따라서 현재 무선 LAN 규격에 이동성을 강화하고, 통신 서비스 반경도 증대시키기 위한 많은 연구가 수행되고 있는데, 그 예로 IEEE802.16 표준을 중심으로 Wi-Max 및 Wi-Bro의 표준화 연구가 활발히 이루어지고 있다[1][2]. 또한, 향후 보다 많은 정보를 이동 중인 차량에 제공하고, 차량간 ad-hoc 통신을 가능하게 하기 위해서는 고속으로 이동중인 채널 환경에서도 고속의 데이터를 보다 안정성 있게 제공할 수 있어야 한다. 하지만 고속의 이동 환경에서는 다중경로 페이딩의 영향이 커지며, 이에 의해 링크 버짓이 줄어들어 이에 의해 통신 반경이 줄어들고 통신 시스템의 성능이 저하된다. 따라서 링크 버짓을 향상시

\*호서대학교 전자정보통신공학부 \*\*인덕대학 컴퓨터전자과  
 논문 번호 : 2007-2-2      접수 일자 : 2007. 4. 16  
 심사 완료 : 2007. 10. 15

키기 위해서는 전송 전력을 증가시키거나, 다이버시티 기법을 사용하거나, 수신 단에서 탭 수가 많은 구조의 적응 등화기 등을 이용하여 이동 채널 환경을 보상할 수도 있으나, 본 연구에서는 빔 형성기를 적용하는 경우에 대한 링크 버짓의 향상 정도를 실제의 채널 환경에서의 측정을 통해 분석하고 이를 다이버시티 기법을 사용하는 경우와 비교·분석하였다.

빔 형성 기법은 복수개의 배열 안테나 소자를 이용하여 각각의 안테나 소자에서 수신되는 신호들의 이득 및 위상을 조절하는 공간 필터링이 수행되게 함으로써 원하는 방향으로부터 전송되는 신호만을 수신하고 원하지 않는 방향으로부터 수신되는 간섭 잡음을 최소화시켜 수신신호의 성능을 향상시키는 기술이다[3]. 따라서 이동 채널 환경에 빔 형성 기법을 적용하면 원하는 방향으로만 빔을 형성시킴으로써 통신 반경을 증가시키고, 원하지 않는 방향으로부터 전송되는 다중경로 신호 성분을 제거함으로써 다중 경로 신호에 의한 페이딩의 영향을 최소화시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이동 중인 두 대의 차량을 이용하여 측정을 수행하고, 측정 데이터를 이용하여 빔 형성 기술을 적용하였을 때의 페이딩 마진 향상 정도를 분석한다.

## II. 채널 측정

그림 1은 본 연구에서 사용한 송신단과 수신단의 블록도이며, 그림 2는 송신측에 사용된 신호 발생기와 차량이다. 그림에서 보이는 바와 같이 본 측정의 송신측은 신호발생기를 이용하여 QPSK변조 신호를 전력증폭기로 증폭한 후에 차량 천장에 탑재된 전방향 안테나를 통해 전송하였다. 또한, 신호 전송 시에 사용한 반송파 주파수는 1.95GHz를 사용하였으며 송신전력은 10dBm으로 하였다.

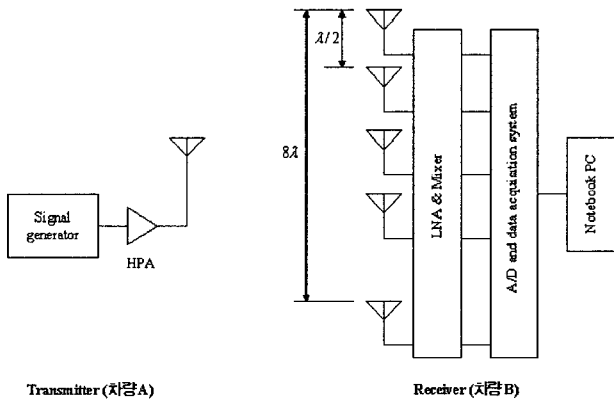


그림 1. 페이딩 분석에 사용된 송신단과 수신단의 구조도  
Fig. 1. The block diagram of transmitter and receiver

수신기는 그림 3에서 보이는 바와 같이 반파장 간격으로 총 4개의 안테나가 설치되어 있는 선형 배열안테나를 이용하였다(9개의 안테나들 중에서 4개만 사용). 이 배열 안테

나 양 끝의 간격은 1.23m로서 이 간격은 1.95GHz 주파수의 8 파장에 해당된다. 이 간격은 다이버시티를 얻기에 적합하므로 다이버시티 채널 분석은 선형 배열안테나의 양 끝에 위치한 두 개의 안테나에서 수신된 데이터를 이용하였다. 그리고 빔 형성을 적용한 채널 분석은 4개의 안테나 소자로 수신한 채널 데이터를 이용하였다. 그림 3은 수신차량에 탑재된 배열 안테나와 수신 시스템을 보여주는 사진이다. 이 수신 시스템은 중간 주파수가 70MHz이며 19.2Msps의 샘플링율로 A/D 하여 채널 데이터를 수집한다.

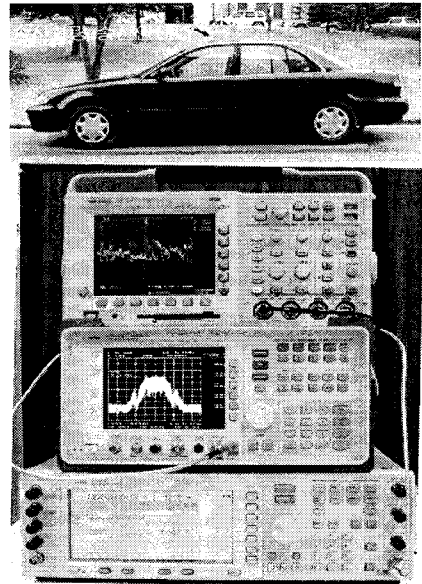


그림 2. 페이딩 측정에 사용된 송신 장비  
Fig. 2. The channel measuring instrument of transmitter side

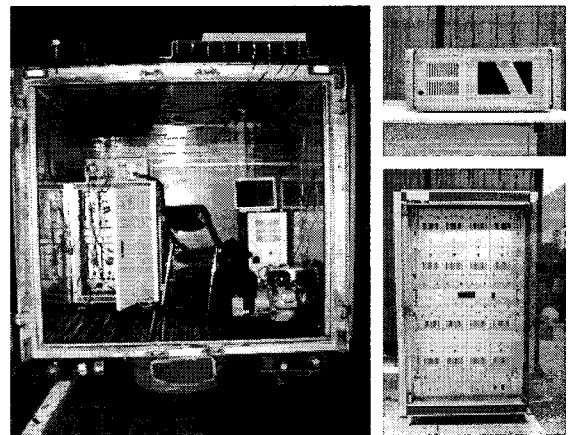


그림 3. 페이딩 측정에 사용된 수신 차량 및 다채널 LNA & Mixer 및 데이터 저장기  
Fig. 3. The channel measuring instrument of receiver side(LNA, Mixer and Data acquisition system)

채널 측정은 그림 4의 지도에서 보이는 바와 같이 천안 시내의 일부 도로상에서 실시하였다. 또한, 측정 송수신 차량 간의 간격은 100m와 250m의 두 경우에 대해 실시하였으며, 송수신 차량의 속도는 모두 60Km/h로 하였다. 또한, 송수신차량 사이에는 신호 전송에 방해될 일으키도록 또 다른 차량 한 대를 주행시키며 측정하였다.



그림 4. 채널 측정이 수행된 도심의 평면지도  
Fig. 4. The 2D map of the region where measurements were performed

### III. 페이딩 특성 분석

그림 5는 빔형성 안테나 시스템의 구조도이다. 여기서 하나의 안테나로 수신된 데이터를  $r(t)$ 라고하면 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$x(t) = m(t) + f(t) \quad (1)$$

여기서  $f(t)$ 는 고속 레일리 페이딩 신호 성분을,  $m(t)$ 는 신호의 로컬 평균값을 의미한다. 일반적으로  $m(t)$ 는 송신기와 수신기 사이의 거리에 의해 결정되는데 송신기와 수신기 사이의 통선거리가 증가할수록 감소한다. 따라서 송신기와 수신기의 거리에 관계없이 수신신호의 페이딩 특성만을 분석하기 위해서 수신 신호에서  $m(t)$  성분을 제거하여야 하며,  $m(t)$ 를 계산하기 위해서는 전송 신호의 40파장 이상의 거리에 대해 평균을 취해야한다[4]. 따라서 수신된 신호의 로컬 평균  $m(t)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta m(t) = \frac{1}{\Delta t} \int x(t) dt |_{\Delta t = (40\lambda/v)} \quad (2)$$

여기서  $\Delta t$ 는 송신 신호의 40 파장에 해당되는 시간으로서 차량의 속도에 의해 달라지며, 일반적으로  $\Delta t$ 가 40 파장 보다 작으면  $m(t)$ 에 페이딩에 의한 변동 성분이 포함되며,  $\Delta t$ 가 40 파장 보다 크면  $m(t)$ 에 의해 페이딩에 의한 변동 성분이 평균되어 제거될 수 있다[3].

또한, 수신된 신호의 페이딩 특성만을 분석하기 위하여 수신된 신호에서 로컬 평균 성분을 제거한다.

$$f(t) = x(t) - \frac{1}{\Delta t} \int x(t) dt \quad (3)$$

#### 3.1 선택 다이버시티의 페이딩 이득 특성

선택 다이버시티는 전력이 큰 신호를 선택한다[3]. 식 (1)에서 파장의 8배 간격으로 이격된 두 안테나에서 수신된 신호를 각각  $x_1(t)$ 와  $x_2(t)$ 라고 하고, 각 수신 신호에 포함된 고속 페이딩 성분을  $f_1(t)$ 와  $f_2(t)$ 라고 한다면, 선택 다이버시티의 출력  $x_{div}(t)$ 는 다음과 같다.

$$x_{div}(t) = \max\{x_1(t), x_2(t)\} \quad (4)$$

따라서  $x_{div}(t)$ 에서 페이딩에 의한 변동 성분을 제거하면, 고속 페이딩에 의한 신호 성분  $f_{div}(t)$ 는 다음 식과 같다.

$$f_{div}(t) = \begin{cases} f_1(t), & x_1(t) > x_2(t) \\ f_2(t), & x_1(t) < x_2(t) \end{cases} \quad (5)$$

본 연구에서는 선택 다이버시티를 사용하는 경우에 대한 페이딩 이득을 분석하기 위하여 두 안테나 중 첫 번째 안테나에서 수신한 신호에서 추정한  $f_1(t)$ 와 수신 신호 전력이 큰 신호에서 추정한  $f_{div}(t)$ 의 CDF를 다음과 같이 계산한다.

$$CDF_1 = P[X_1 \leq x_0] \quad (6)$$

$$CDF_{div} = P[X_{div} \leq x_0] \quad (7)$$

여기서  $X_1$ 과  $X_{div}$ 는 랜덤변수로 각각  $f_1(t)$ 와  $f_{div}(t)$ 의 페이딩 깊이를 나타낸다. 또한, 선택 다이버시티를 사용하였을 때 확률  $p_0$ 에서의 페이딩 이득은 다음과 같다.

$$G_{div}(p_0) = X_{div}[p = p_0] - X_1[p = p_0] \quad (dB) \quad (8)$$

#### 3.2 빔 형성 방식의 페이딩 이득 특성

빔 형성 기법은 복수개의 배열 안테나 소자를 이용하여 각각의 안테나 소자에서 수신되는 신호들의 이득 및 위상을 조절하는 공간 필터링이 수행되게 함으로써 원하는 방향으로부터 전송되는 신호만을 수신하고 원하지 않는 방향으로부터 수신되는 간섭 잡음을 최소화시켜 수신신호의 성능을 향상시키는 기술이다[6]. 그림 5에 본 연구에서 사용한 빔 형성기의 구조도가 보여진다.

본 연구에서는 도심 채널환경에서 선형 배열 안테나를 이용하여 실측한 안테나 채널별 수집 데이터에 MVE (Minimum Variance Estimator) 알고리즘을 적용하여 빔 형성용 가중치 벡터를 구하였다. MVE 알고리즘은 원하는 방향에서 수신되는 신호레벨은 그대로 유지하면서 전체의 출력전력을 최소화함으로써 원하지 않는 방향으로부터 수신되는 간섭 잡음을 최소화시키는 알고리즘으로 빔 형성을 위한 가중치 벡터는 다음의 식과 같다[7].

$$w = R^{-1}a(\theta) \quad (9)$$

여기서 수신신호의 공분산 행렬  $R$ 은 다음과 같으며

$$R = E[XX^*] = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X(t_n)X^*(t_n) \quad (10)$$

$a(\theta)$ 는 신호가 수신되는 방향  $\theta$ 에 대한 방향 벡터이다. 그리고 여기서  $N$ 은 샘플링 된 데이터 심볼의 수이다.

$$X(t) = \sum_{\ell=1}^L x(t-\tau_{\ell})a(\theta_{\ell}) \quad (11)$$

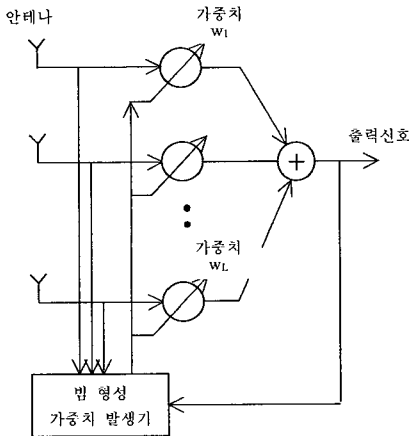


그림 5. 빔형성 안테나 시스템  
Fig. 5. A beamforming antenna system

여기서  $L$ 은 분해 가능한 다중 경로의 수이며,  $\tau_{\ell}$ 은  $\ell$ 번째 경로 신호의 시간지연이고,  $\theta_{\ell}$ 은  $\ell$ 번째 경로 신호의 수신 방향이다. 또한, 빔 형성기의 출력 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_{bf}(t) = w^* X(t) \quad (12)$$

여기서  $w$ 는 식(9)의 MVE 알고리즘을 이용하여 추정된 복소 가중치 벡터이며 매 1/1000 초 마다 갱신하였다.

우리는 빔 형성에 의한 페이딩 이득을 분석하기 위하여 식(3)에서 보인 방법으로 평균전력을 제거한 후에 빔형성 후의 페이딩 성분  $f_{bf}(t)$ 를 구하였으며, 식(6)과 식(7)에서 보인 방법으로 빔 형성 신호의 페이딩에 대한 CDF를 추정하였다.

#### IV. 분석 결과

그림 6은 그림 4에 표시된 도로에서 차량 간격을 100m로 하여 측정한 신호를 이용하여 계산된 수신신호, 선택 다이버시티 신호 및 빔형성 신호의 페이딩 특성이고, 그림 7은 그림 6의 페이딩 특성을 이용하여 계산한 CDF이다. 그림에 나타난 바와 같이 이동 중인 채널 환경에서 선택 다이버시티나 빔 형성을 수행한 경우의 페이딩 영향이 이를 수행하지 않은 경우에 비해 매우 작았다. 또한, 그림 7의 환경에서는 선택 다이버시티를 사용한 경우와 빔 형성

을 사용하는 경우의 페이딩 이득이 비슷함을 알 수 있다. 즉 CDF 1%를 기준으로 할 때 차량 간격이 100m이고, 60Km/h의 속도로 차량이 이동하는 경우에는 빔 형성과 선택 다이버시티의 성능 차가 1dB 이하였다.

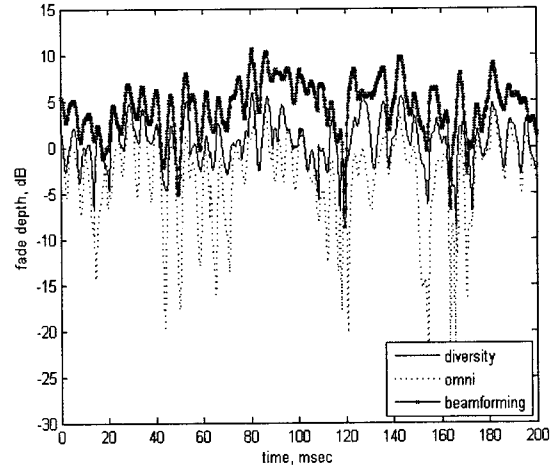


그림 6. 수신신호, 선택 다이버시티 신호 및 빔 형성 신호의 페이딩 특성 (차량 간 거리 100m)  
Fig. 6. The fading characteristics of the received signal, selection diversity signal, and beamformed signal (distance is 100m between transceivers)

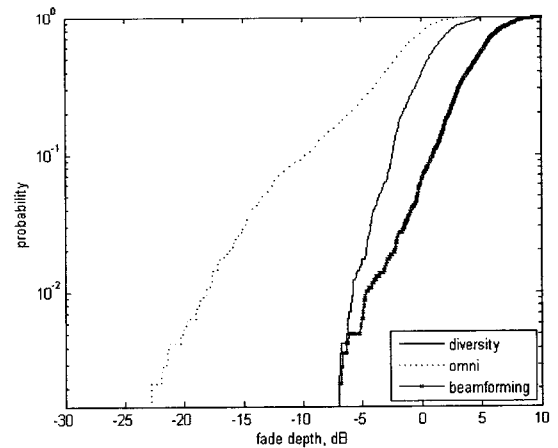


그림 7. 그림 6의 페이딩 특성에 대한 CDF.  
Fig. 7. The CDF of fading characteristics in fig. 6.

그림 8은 이동 차량 간의 간격을 250m로 하였을 때, 측정한 신호를 이용하여 계산된 수신신호, 선택 다이버시티 신호 및 빔형성 신호의 페이딩 특성이며, 그림 9는 그림 8의 페이딩 특성을 이용하여 계산한 CDF이다. 그림 8과 그림 9에서 보이는 바와 같이 이동하는 두 차량 간격이 250m인 환경에서는 선택 다이버시티를 사용한 경우 보다 빔 형성을 사용하는 경우의 페이딩 이득이 더 많음을 알 수 있었다. 즉, 즉 선택 다이버시티에서는 약 1%의 신호가

-7dB 보다 깊은 페이딩으로 수신되는 반면에, 빔 형성기를 사용하는 경우에는 약 1%의 신호가 -1dB보다 깊은 페이딩으로 수신되어 약 6dB의 페이딩 이득이 있는 것으로 나타났으며, 0.1%를 기준으로 할 때는 약 7dB의 페이딩 이득이 더 있음을 알 수 있었다.

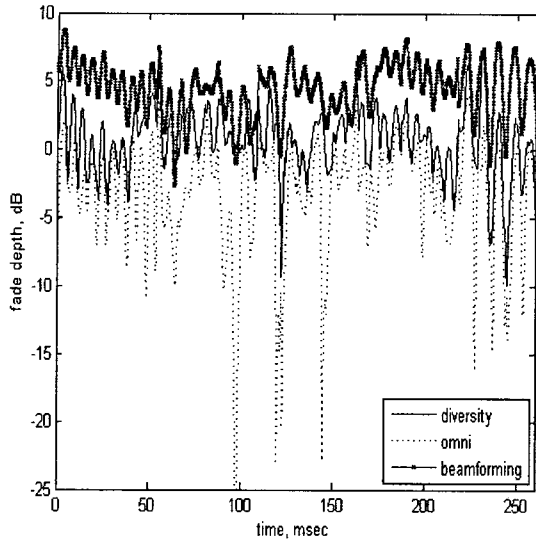


그림 8. 수신신호, 선택 다이버시티 신호 및 빔 형성 신호의 페이딩 특성 (차량 간 거리 250m)

Fig. 8. The fading characteristics of the received signal, selection diversity signal, and beamformed signal (distance is 250m between transceivers)

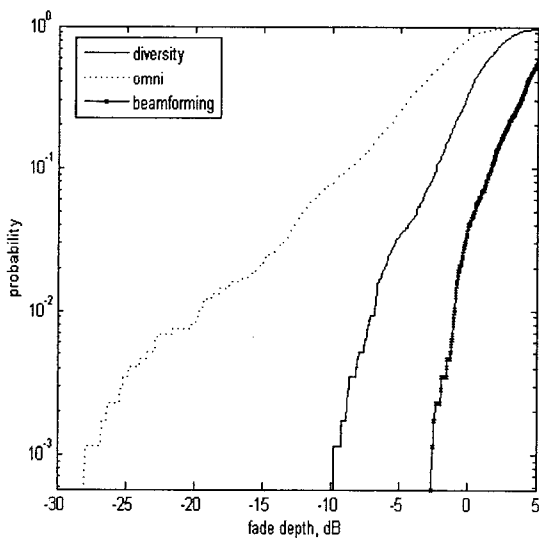


그림 9. 그림 8의 페이딩 특성에 대한 CDF.

Fig. 9. The CDF of fading characteristics in fig. 8.

표 1은 그림 7과 9의 결과에서 두 가지 페이딩 환경에서 전방향 안테나의 경우를 기준으로 해서 빔 형성 기법과 선택 다이버시티에 의한 페이딩 마진이 향상되는 정도를 표로 정리한 것이다. 표에 나타난 바와 같이 차량 간의 간

격이나 환경에 따라 약간의 차이는 있었으나, 빔 형성 기법을 사용하는 경우에는 신호가 수신되는 주 경로 방향으로만 빔 형성을 수행하고 원하지 않는 다른 방향으로부터 수신되는 다중 경로 성분을 제거함으로써, 다이버시티를 사용하는 방법 보다는 1dB에서 많게는 7dB까지 페이딩 마진을 향상시킬 수 있고, 단일 안테나를 사용하는 경우 보다는 20dB 이상의 페이딩 마진을 향상시킬 수 있었다.

표 62. 빔 형성 안테나의 페이딩 마진

Table 1. The fading margin of beamforming antenna (측정차량의 주행속도: 60km/h)

	페이딩 CDF 1%(10 <sup>-2</sup> )		페이딩 CDF 0.1%(10 <sup>-3</sup> )	
	차간격 100m	차간격 250m	차간격 100m	차간격 250m
선택 다이버시티	12 dB	12 dB	16 dB	18 dB
빔 형성	13 dB	17 dB	16 dB	25 dB

따라서 이 결과를 바탕으로 S-밴드의 2GHz 대역을 이용하여 차량 간 ad-hoc 통신시스템 설계 시 빔 형성 기법을 적용하면, 99%~99.9%의 안정성으로 선택 다이버시티에 비해 6~7dB정도의 페이딩 마진을 더 얻을 수 있는 것으로 기대된다.

### V. 결론

본 연구에서는 2GHz 대역에서 이동하는 두 대의 차량을 이용하여 측정을 수행하고 측정데이터를 분석하여, 이동 중인 채널 환경에서 빔 형성 기법 적용 시의 페이딩 마진 향상 정도를 분석하고, 이를 선택 다이버시티를 적용한 방식과 비교하였다. 또한 성능분석에서의 배열 안테나는 반송 주파수의 반 파장 간격으로 선형 배열된 네 개의 안테나를 사용하여 빔 형성을 수행하였으며, 8 파장이 이격된 두 개의 안테나에서 수신된 신호를 이용하여 선택 다이버시티를 수행하였다. 수신된 데이터를 이용하여 페이딩 깊이에 대한 CDF를 분석한 결과 선택 다이버시티를 사용하는 경우에는 CDF의 확률 0.1~1%에서 페이딩 환경에 따라 약 12~18dB 정도의 페이딩 이득을 얻을 수 있었다. 그리고 배열안테나를 이용한 빔형성 기술을 적용하였을 때는, CDF의 확률 0.1~1%에서 약 14~25dB 정도의 페이딩 이득을 얻을 수 있었다. 특히 다중경로가 많아 페이딩이 훨씬 심한 환경에서는 빔 형성 기법이 선택 다이버시티에 비해 6~7dB 더 높은 페이딩 이득을 나타내었다.

이러한 페이딩 이득은 이동 채널 환경에서 링크 버짓 계산 시에 페이딩 마진을 줄여 링크 버짓을 향상시키고, 이는 통달거리의 증대나 낮은 송신 전력을 이용한 안정적인 통신에 기여할 것이다.

참고 문헌

- [1] <http://www.wimaxforum.org/home/>
- [2] <http://www.wibro.or.kr/>
- [3] IEEE Std 802.11g-2003 Part II; Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications, pp. 107-109.
- [4] W. Y. C. Lee, "Estimate of Local Average Power of a Mobile Radio Signal," IEEE Trans. on Vehicle Technol., Vol34, pp.22-27, Feb. 1985.
- [5] J. H. Winter, J. Salz, and R. D. Gitlin, "The Impact of Antenna Diversity on the Capacity of Wireless Communication System," IEEE Trans. on Communications, Vol. 42, No. 2/3/4 pp. 1740-1751, Feb. 1994.
- [6] J. Litva and T. k. Lo, Digital beamforming in wireless Communications. Artech Hous Inc., Norwood, MA, 1996.
- [7] W. H. Tranter, B. D. Woerner, T. S. Rappaport, and J. H. Reed, Wireless Personal Communications, Channel Modeling and System Engineering, Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, 2000.



고 학 림(Hak-Lim Ko)

1983년 2월 숭실대학 전자공학과(공학사)

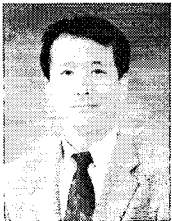
1986년 8월 Fairleigh Dickson Univ.  
Electrical Eng. (공학석사)

1995년 8월 North Carolina State Univ.

Electrical & Computer Eng.(공학박사)

1996년 3월 ~ 현재 호서대학교 정보통신공학과 부교수

※주관심분야 : 배열 신호처리, 스마트 안테나 시스템, 이동통신



박 병 훈(Byeong-Hoon Park)

1986년 2월 연세대학 전기공학과(공학사)

1988년 2월 연세대학 전기공학과(공학석사)

1999년 8월 연세대학 전기컴퓨터공학과

(공학박사)

1988년 3월 ~ 1994년 2월 삼성종합기술원 선임연구원

2000년 3월 ~ 현재 인덕대학 컴퓨터전자과 부교수

※주관심분야 : 스마트 안테나 시스템, 이동통신