

# 동일 채널 간섭 환경에서 OFDM 전송 방식을 위한 온/오프 송신 전력 제어

준회원 박진규\*, 종신회원 임창헌\*\*

## An On/Off Power Control for OFDM Transmission Scheme in a Cochannel Interference Environment

Jinkyu Park\*, Associate Member, Chang Heon Lim\*\* Lifelong Member

### 요 약

셀룰러 무선 통신 환경에서는 주파수 재사용으로 인해 동일 채널 간섭이 발생한다. 본 논문에서는 이런 환경에서 동작하는 OFDM 기반 통신 시스템의 송신 전력을 조절하는 방안을 제안하고자 한다. 기존의 전력 조절 방법 중에서는 IWF(iterative waterfilling) 방식이 우수한 성능을 보이는 것으로 알려져 있다. 하지만 이 방식은 부반송파마다 송신 전력 수준과 비트 할당 정보를 수신기에서 송신기로 전달해야 하기 때문에 부반송파 개수가 큰 경우에는 이로 인한 부담이 클 수 있다. 이에 본 논문에서는 이런 제한 정보량을 줄이기 위한 방안으로 부반송파의 송신 전력 할당을 좀 더 단순화한 방식을 제안하고자 한다. 제안한 방식은 채널 상태가 일정 수준 이상이 되는 양호한 그룹의 반송파에 대해서는 동일한 송신 전력을 할당하고, 그렇지 않은 반송파에는 송신 전력을 할당하지 않는 방식이다. 컴퓨터 실험 결과 제안한 방식은 IWF보다 제한 정보량을 적게 사용하면서도 송신 전력 측면에서는 IWF에 매우 근접한 성능을 보인다는 것을 확인할 수 있었다.

**Key Words** : Power control, OFDM, Cochannel interference

### ABSTRACT

Frequency reuse in a cellular wireless communication environment gives rise to a phenomenon of cochannel interference. This paper introduces a power control strategy for OFDM based communication systems operating in such an environment. Among the existing power control schemes, IWF(iterative waterfilling) is known to exhibit relatively good performance. However, it requires feedback of power level and bit allocation information for each subcarrier from a receiver to its associated transmitter, which can lead to a considerable overhead, especially for the case of employing large number of subcarriers. Motivated by this, we present a simplified power control scheme with reduced overhead feedback, which allocates some nonzero identical power to the subcarriers of which channel conditions are above a certain threshold and zero power to the other ones. Computer simulations show that the proposed strategy produces a good approximation to the performance of the IWF in terms of the transmission power level while it requires less overhead feedback.

### I. 서론

전파는 진행 거리에 따라 전파의 세기가 감소되

는 특징을 가지며, 감소의 정도는 전파 환경에 따라 다르다. 따라서 일정 거리 이상 떨어진 2개의 지역에서 동일한 주파수 대역을 사용하여 각 지역 내의

\* (주)솔리테크(saint16@pknu.ac.kr), \*\* 부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부(chlim@pknu.ac.kr)  
논문번호 : KICS2007-06-288, 접수일자 : 2007년 6월 9일, 최종논문접수일자 : 2007년 10월 2일

통신을 하더라도 서로 간의 전파 간섭은 큰 문제가 되지 않을 수 있다. 주파수 재사용(frequency reuse)이란 이와 같이 지역적으로 떨어진 여러 장소에서 동일한 주파수 대역을 사용하여 통신하는 기술을 가리키며, 무선 셀룰러 통신 시스템을 가능하게 하는 기반 기술이다.

무선 셀룰러 통신 시스템은 동일 채널을 사용하는 셀 사이에 어느 정도의 간격을 유지하여 셀 간의 전파 간섭을 일정 수준 이하로 통제하지만, 원천적으로 동일 주파수 대역을 사용하기 때문에 이로 인해 발생하는 주파수 간섭 현상을 피할 수는 없다<sup>[1]</sup>. 특히 주파수 이용 효율을 향상시키기 위해 주파수 재사용율을 높이는 방안을 고려할 때는 더욱 그러한데, 이와 같이 동일 채널을 사용함으로써 발생하는 전파 간섭 현상을 동일 채널 간섭(cochannel interference)라고 부른다.

동일 채널 간섭은 해당 링크의 전송 용량과 밀접한 관련이 있다. 예를 들어 동일 채널 간섭이 크다면 전송 용량은 그 만큼 작아질 수 밖에 없다. 따라서 전송 용량을 높이려면 동일 채널 간섭량을 줄이는 것이 필요하다. 동일 채널 간섭량에 영향을 주는 요소로는 동일한 채널을 사용하는 송신기의 전력 수준과 해당 송신기와의 거리 그리고 채널의 페이딩 특성 등이 있다. 만약 주파수 재사용 패턴이 정해져 있어 동일 채널의 사용하는 송신기와의 거리가 이미 정해져 있다면, 이 중에서 우리가 조절할 수 있는 요소는 송신 전력이 유일하다. 이렇게 본다면 동일 채널 간섭량을 줄이기 위해서는 송신 전력을 낮추는 방법 밖에는 없다. 그러나 다른 한편으로 송신 전력은 전달하고자 하는 신호의 세기를 의미하기 때문에 이를 낮춘다는 것은 전송 용량이 줄어든다는 것을 의미한다. 따라서 이 2 가지 현상을 고려하여 전송 성능이 원하는 수준이 되도록 송신 전력을 결정하는 방법이 필요하다<sup>[1]</sup>.

동일 채널 간섭 환경에서 송신 전력을 결정하는 문제에 대한 연구는 1990년 초부터 활발하게 전개되어 현재까지 계속되고 있다. 초기의 중요 연구 결과인<sup>[2]</sup>은 주파수 비선택적(frequency nonselective) 페이딩 환경에서 동일한 채널을 사용하는 다수의 통신 링크의 SINR(signal-to-interference plus noise ratio)이 일정 수준 미만이 되는 확률을 최소화하는 송신 전력 결정 방안을 제시하였다. 이 방안은 단말 또는 기지국이 송신 전력을 결정하기 위해 각 통신 링크의 채널 이득 특성뿐만 아니라 서로 다른

링크간의 간섭 채널 이득 특성을 필요로 하기 때문에, 현실적으로 사용하기에 적합하지 않은 방식이지만 성능 비교 척도의 한 사례를 제시한다는 점에서 그 의의가 있다. 이후<sup>[3]</sup>의 연구 결과를 토대로 각 통신 기기 차원에서 확보할 수 있는 정보만을 사용하여 송신 전력을 결정하는 분산형 전력 제어 방식이 제안된 바가 있는데<sup>[4-6]</sup>, 이 방식은 개별 통신 기기에서 확보할 수 있는 정보들만으로 전력을 제어하기 때문에 실제 시스템에 적용하기에 적합하다.

송신 전력 조절에 관한 초기 연구는 주파수 비선택적 채널 환경을 대상으로 한 단일 반송파 시스템에 대한 것이었다. 이후 고속 전송의 필요성에 따라 OFDM 시스템에 대한 연구가 활발하게 진행되면서, 이에 대한 송신 전력 결정 방식도 활발하게 연구가 진행되고 있다. 예를 들면 DMT방식의 DSL 시스템을 대상으로 발표된 IWF(iterative waterfilling) 방식 등<sup>[4-6]</sup>이 있고, 다중 셀 OFDM 또는 OFDMA 시스템을 대상으로 하여 발표된 연구 결과<sup>[7-11]</sup>가 있다. 이들 연구 결과들은 각기 서로 다른 특징들이 있지만 기본적으로 부반송파(subcarrier)별로 송신 전력을 조절한다는 점에서 공통점을 갖는다.

간섭 환경이 정적인 경우에 임의의 주파수 특성을 갖는 채널의 전송 용량을 최대로 하는 전력 할당 방식은 WF(waterfilling)의 형태가 된다는 것은 널리 알려진 사실이다. 그러나 이를 실제 시스템에 적용하려면 송신측이 채널에 대한 정보 또는 그에 상당하는 정보를 확보하고 있어야 하는데, 이러한 정보는 송신기가 측정할 수 없는 정보이기 때문에 수신기에서 측정해서 송신기로 전달해야 하는 부담이 있다. 따라서 이러한 제한 정보 부담이 적은 송신 전력 조절 방식이 필요하다. 이에 본 논문에서는 IWF 전력 조절 방식의 근사적 방식의 하나로 채널 상태가 일정 수준 이상이 되는 양호한 그룹의 반송파에 대해서는 동일한 송신 전력을 할당하고, 그렇지 않은 반송파에는 송신 전력을 할당하지 않는 방법을 제안하고, 컴퓨터 실험을 통해 수렴 특성을 살펴보고자 한다.

본 논문에서는 I장의 서론에 이어서, II장에서는 본 논문에서 제안하고자 하는 방식에 대한 시스템 환경을 설명하고, III장에서는 본 논문에서 제안하고자 하는 전력 조절 방식을 소개한다. 그리고 IV장에서는 해당 전력 조절 방식의 수렴 특성을 컴퓨터 실험을 통해 살펴본 후, V장에서 결론을 맺고자 한다.

## II. 시스템 환경

본 논문에서 다음과 같은 동일 채널 간섭 환경을 가정하였다. 먼저 동일 채널을 사용하는 다수의 셀이 존재하고, 전송 방식은 OFDM 방식을 사용하는 것으로 설정하였으며, 다중 접속 방식으로는 FDMA나 TDMA를 가정하였다. 그리고 편이상 하향 링크에 대하여 송신 전력을 제어하는 경우를 가정하였다.

기지국 또는 단말기가 사용하는 부반송파의 개수를  $N_c$ 로 할 때, 동일 채널을 사용하는  $k$ 번째 단말기의  $l$ 번째 부반송파에서 나타나는 SINR은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$SINR_{k,l} = \frac{p_{k,l} h_{kk,l}}{\left( \sigma_{k,l} + \sum_{j=1, j \neq k}^{N_u} p_j h_{jk,l} \right)} \quad (1)$$

위 식에서  $p_{k,l}$ 는  $k$ 번째 기지국의 송신기에서  $l$ 번째 부반송파 채널에 할당하는 송신 전력을 가리킨다. 그리고  $h_{jk,l}$ 은  $j$ 번째 기지국의 송신 전력이  $k$ 번째 기지국과 통신하는 상대 단말기의 수신 전력에 미치는 비율을 나타내는 채널 이득을 나타낸다. 마지막으로  $\sigma_{k,l}$ 는  $k$ 번째 단말기의  $l$ 번째 부반송파 채널에 존재하는 가산성 잡음(additive noise)을 나타내며,  $N_u$ 은 동일 채널을 사용하는 링크의 개수를 가리킨다.

## III. OFDM 시스템에 대한 송신 전력 결정 방식

무선 셀룰러 시스템이 가지고 있는 동일 채널 간섭 문제는 기본적으로 정보 이론(information theory) 분야에서 많은 논의가 되어온 간섭 채널(interference channel)<sup>[12]</sup> 문제로 볼 수 있다. 하지만 현재까지 간섭 채널에 대한 이론적인 채널 용량 영역(capacity region)은 알려져 있지 않은 상태이기 때문에 최적의 송신 전력 배분 방식 또한 알려져 있지 않다.

최근 DSL 시스템을 대상으로 발표된 IWF 방식에 대한 연구 결과<sup>[6]</sup>에 따르면, WF 방식과 마찬가지로 부반송파 별로 채널 상태에 따라 전력을 적절히 배분하면 전송 용량을 높일 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 동일 채널 간섭이 존재하는 경우에도 부반송파별로 송신 전력을 달리하는 방식이 전송 용량을 확충한다면 측면에서 유용하다는 것을 짐작할 수 있다. 하지만 이 방법은 앞서도 언급한 바와 같이 채널 정보나 이에 준하는

정보를 제환 루프를 통해 전달해야 하기 때문에 실제 시스템을 구현한다는 관점에서 보면 추가 부담이 큰 방식이라고 볼 수 있다.

반면 동일 채널 간섭이 없는 경우에 대한 기존의 연구 결과<sup>[13]</sup>에 따르면 일정 수준 이상의 채널 상태를 갖는 반송파 그룹에 대해서 0이 아닌 동일한 송신 전력을 할당하고, 그렇지 않은 반송파에는 송신 전력을 할당하지 않는 방식은 송신 전력을 최적의 형태(WF)로 설정한 경우와 비교하여 전송 능력 측면에서 손실이 크지 않은 것으로 알려져 있다. 한편, <sup>[14]</sup>의 연구 결과에 따르면 동일 채널 간섭이 존재하는 환경에 대하여 부반송파마다 동일한 전력을 할당하는 송신 전력 방식은 제환 정보에 대한 부담을 많이 줄일 수 있지만, IWF방식에 비해 수렴에 필요한 송신 전력값이 다소 높게 형성되는 것을 알 수 있다. <sup>[13]</sup>의 연구 결과를 참고할 때, 이는 부반송파 중에서 채널 상태가 매우 좋지 않은 채널이 있는 경우에도 상태가 좋은 채널과 동일한 전력을 할당하기 때문인 것으로 보인다. 이에 본 논문에서는 부반송파별로 동일한 전력을 사용하는 방식과 IWF 방식의 절충안으로 부반송파 중에서 채널 상태가 양호하지 않은 부반송파에는 전력을 할당하지 않고 그 외에 부반송파에는 동일한 전력을 할당하는 방식을 제안하고자 한다.

제안한 방식의 동작을 설명하면 그림 1에 나타낸 바와 같다. 먼저  $k$ 번째 기지국이 송신 전력을 갱신할 시점이 되면 현재 송신 전력 수준으로 목표 전송 속도를 달성할 수 있는 지를 확인할 필요가 있는데, 이를 위해 부반송파 주파수 대역별로 채널 상태를 파악할 필요가 있다. 각 부반송파의 채널 상태를 나타내는 양으로 다음과 같이 열잡음과 간섭 잡음으로 구성된  $N_{k,l}$ 를 사용하기로 한다.

$$N_{k,l} = \Gamma \times \left( \frac{\sigma_{k,l}}{h_{kk,l}} + \sum_{j=1, j \neq k}^{N_u} p_j \frac{h_{jk,l}}{h_{kk,l}} \right) = \frac{\Gamma \times p_{k,l}}{SINR_{k,l}} \quad (2)$$

식(2)의  $\Gamma$ 는 실제 시스템이 전송할 수 있는 심볼 당 비트 수와 채널 용량간의 차이를 나타내는 파라미터로 SNR gap이라고 하며, 목표 BER에 따라 달라지는 값이다.

만약 현재 추정된 채널 상태에서 현재의 전력 할당 분포를 유지해도 목표로 하는 전송 속도를 달성

할 수 있다면 송신 전력 할당 분포를 변경할 필요는 없다. 그러나 만약 그렇지 않다면 현재 달성할 수 있는 전송 속도와 목표 전송 속도와의 관계에 따라 총 송신 전력을 늘리거나 줄이는 과정을 반복적으로 수행해야 한다. 이 과정에서 본 논문에서 제안하는 전력 할당 방식은 앞에서 언급한 바와 같이 채널 상태가 일정 수준 이상이 되는 부반송파에 대해서만 전력을 균등하게 할당하는 방법을 사용한다. 이때 부반송파를 선택하는 방안은 여러 가지가 있을 수 있겠지만, 본 논문에서는 주어진 전력을 waterfilling 방식으로 부반송파에 할당했을 때 0이 아닌 전력이 할당되는 반송파들로 구성하고자 한다. 널리 알려진 바와 같이 waterfilling 방식은 전송 용량을 최대로 하는 송신 전력 할당 방식이다. 따라서 waterfilling 방식에서 선택한 부반송파와 동일한 부반송파 그룹을 사용하는 것은 적절한 방안이라고 볼 수 있다.

$k$ 번째 기지국이 사용하는 총 송신전력을  $P_k$ 라고 하고 송신 전력 할당 여부를 평가하는 기준을  $T_k$ 라고 할 때, 제안한 전력 할당 방식은  $k$ 번째 기지국의  $l$ 번째 부반송파에 할당하는 송신 전력  $p_{k,l}$ 를 다음과 같이 결정한다.

$$p_{k,l} = \begin{cases} \frac{P_k}{n_k}, & N_{k,l} < T_k \\ 0, & N_{k,l} \geq T_k \end{cases} \quad (3)$$

위 식에서  $n_k$ 는  $k$ 번째 기지국의 사용 가능한 부반송파 중에서 잡음 및 간섭 전력이  $T_k$  이하인 부반송파 개수를 가리킨다. 그리고 앞서 언급한 형태로 부반송파를 선택한다면,  $T_k$ 는  $P_k$ 를 waterfilling 방식으로 부반송파에 할당했을 때 수위(water level)에 해당한다.

식(3)와 같이 송신 전력을 할당 후 한 개의 OFDM 심볼이 전송할 수 있는 비트 수  $b_k$ 는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$b_k = \sum_{\{i \in N_i\}} \log_2 \left( 1 + \frac{SINR_{k,i}}{\Gamma} \right) \quad (4)$$

위 식에서  $N_i$ 는 선택된 부반송파 인덱스의 집합이다. 각 부반송파에 송신 전력을 할당한 후 현재의 심볼당 전송 비트수  $b_k$ 이 목표한 전송 비트수  $b_T$ 보

다 크게 되면 총 송신 전력  $P_k$ 를 감소시키며, 그 반대의 경우에는 총 송신 전력  $P_k$ 를 증가시켜 심볼당 전송 비트수  $b_k$ 가  $b_T$ 에 도달하도록 한다.

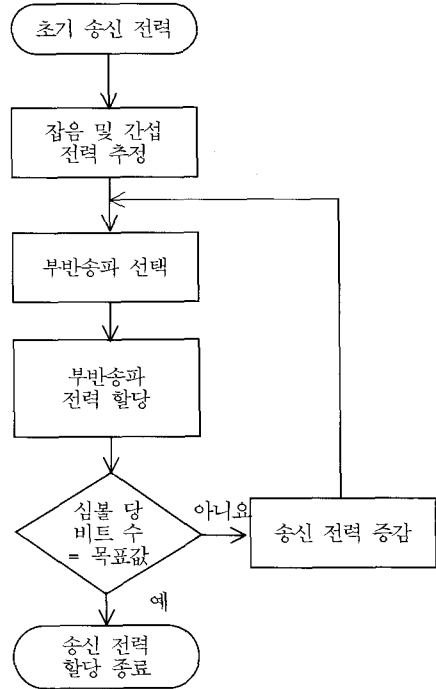


그림 1. 제안한 송신 전력 할당 알고리즘

OFDM 기반 시스템에서 송신기가 송신 전력 수준과 비트 할당 정보를 결정하기 위해서는 채널 상태에 관한 정보를 확보해야 한다. 그러나 간섭 신호의 크기가 송신기와 수신기에 다르게 나타날 수 있기 때문에 채널 정보를 송신기가 독자적으로 추정할 수는 없다. 따라서 일반적으로 수신기가 채널 상태를 측정 후 이를 토대로 송신 전력과 비트 할당 정보를 추정하고 이를 궤환 채널을 통해 송신기로 전달한다. 이때 궤환 채널을 통해 전달하는 정보량은 어떤 형태의 송신 전력 조절 방식을 선택하는가에 따라 달라진다. OFDM 방식과 같이 여러 개의 부반송파를 사용하는 시스템인 경우에는 경우에 따라서 궤환 정보량이 상당할 수가 있다. 따라서 송신 전력 조절 방식을 선택하는데 있어 이런 측면을 고려해 볼 필요가 있다.

IWF 방식은 기본적으로 사용하는 모든 부반송파에 대하여 비트 할당 정보와 전력 수준 정보를 송신측으로 전달해야 하므로 이때 발생하는 궤환 정보량  $L_{FB,IWF}$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

표1. 셀룰러 시스템의 파라미터

셀 반경	1 (km)	셀의 총 개수	19 (개)
셀 내의 동일 채널 사용 단말 개수	1	셀 내 단말의 위치	균일한 분포(uniform distribution)
주파수 재사용율	4	셀의 형태	hexagon
전송 환경	NLOS	경로 손실 모델	Okumura-Hata 경로 손실 모델
목표 전송 속도	0.5 (bits) / 부반송파	부반송파의 개수	32 (개)
전송 대역	8.000 ~ 8.288 (MHz)	SNR-gap	9.2 (dB)

표2. 다중 경로 파라미터

	경로1	경로2	경로3	경로4	경로5	경로6
지연시간	0 $\mu$ s	3 $\mu$ s	8 $\mu$ s	11 $\mu$ s	13 $\mu$ s	21 $\mu$ s
상대적 크기	0dB	-7dB	-15dB	-22dB	-24dB	-19dB
도플러주파수	0Hz	0.1Hz	2.5Hz	0.13Hz	0.17Hz	0.37Hz
K factor	1	0	0	0	0	0

$$L_{FB,IWF} = N_c \times L_{BA} + N_c \times L_{POW} \quad (5)$$

여기서  $L_{BA}$ 와  $L_{POW}$ 는 부반송파 하나에 대한 비트 할당 정보와 전력 수준을 표시하는데 사용되는 비트 길이를 가리킨다. 한편, 모든 부반송파에 동일한 송신 전력을 할당하는 방식의 제한 정보량  $L_{FB,CP}$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$L_{FB,CP} = N_c \times L_{BA} + L_{POW} \quad (6)$$

이와 비교하여 본 논문에서 제안한 방식은 부반송파에 할당하는 전력이 2가지 종류이기 때문에 전력 수준을 나타내는  $L_{POW}$ 와 함께 각 부반송파별로 전력 수준을  $L_{POW}$ 로 할지 아니면 0으로 할지를 나타내는 이진 정보를 함께 전송한다. 그러므로 제안한 송신 전력할당 방식의 제한 정보량  $L_{FB,On/Off}$ 은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

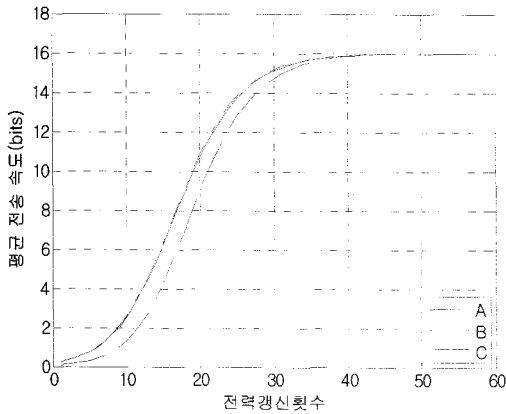
$$L_{FB,On/Off} = N_c \times L_{BA} + N_c + L_{POW} \quad (7)$$

여기서 등호 오른쪽에 두 번째 항인  $N_c$ 는 부반송파가  $L_{POW}$ 의 전력 수준을 사용할지 여부를 표시하는 정보의 총 비트 길이를 나타낸다. 이로부터 제

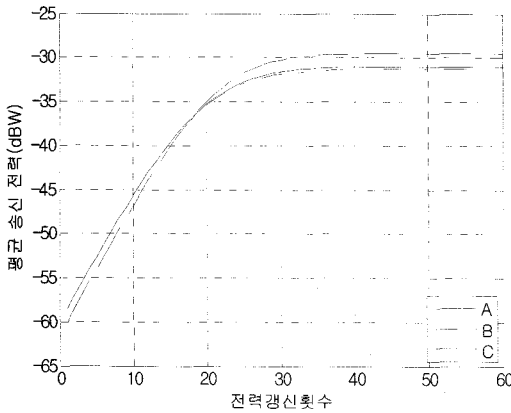
안한 송신 전력할당 방식은 IWF 방식에 비해  $(N_c - 1) \times L_{POW} - N_c$  만큼 제한 정보량이 작은 반면, 모든 부반송파에 동일한 송신 전력을 할당하는 방식과 비교해서는  $N_c$  만큼 제한 정보량이 크다는 것을 알 수 있다. 실제 이들 방식이 필요로 하는 제한 정보량은 전력 수준과 비트 할당 정보의 비트 길이 그리고 반송파 개수에 따라 그 격차가 달라질 수 있다. 제한 정보량이 크면 이를 전송하기 위해 전력과 주파수 자원이 소모되기 때문에 이를 줄이는 것이 중요하다. 그러나 제한 정보량이 크면 그 만큼 송신 전력을 정교하게 조절할 수 있어 이로 인한 전력 이득이 발생한다. 따라서 이 두 가지 상반되는 효과를 감안하여 제한 정보량을 적절한 수준으로 조정하는 것이 바람직하다.

#### IV. 컴퓨터 실험 결과

본 논문에서 제안한 송신 전력 갱신 알고리즘의 수렴 특성을 살펴보기 위하여 컴퓨터 실험 환경을 표1에 나타난 파라미터에 기초하여 구축하였다. 표1에서 실제 시스템의 전송 용량과 이론적인 채널 용량의 차이를 나타내는 SNR gap  $\Gamma$ 는  $BER = 10^{-6}$ 을 기준으로 해서 9.2 dB로 설정하였다.



(a) 전력 조절 횟수에 따른 평균 전송 용량 변화



(b) 전력 조절 횟수에 따른 평균 송신 전력 변화

그림 2. 연속 비트 할당을 사용한 송신 전력 갱신

한편 기지국과 단말기 사이의 다중 경로 페이딩 현상을 재현하기 위하여 표 2에 표시한 바와 같이 6개의 경로를 TDL(tapped delay line) 형태로 모델링하고, 개별 경로의 특성은 표에 나타난 바와 같도록 설정하였다<sup>15)</sup>.

본 논문에서 제안한 송신 전력 갱신 알고리즘의 수렴 특성을 살펴보기 위하여 두 가지 송신 전력 갱신 알고리즘을 비교 기준으로 활용하였다. 첫째는 IWF 방식을 사용하는 송신 전력 갱신 알고리즘이며, 두 번째는 모든 부반송파의 송신 전력을 동일하게 설정하는 송신 전력 갱신 알고리즘이다. 앞으로 표현상의 편의를 위해 본 논문에서 제안한 알고리즘을 A 라고 하고 IWF 방식을 사용하는 알고리즘을 B, 나머지 부반송파에 동일한 송신 전력을 사용하는 알고리즘을 C라고 표시하겠다.

그림 2는 세 알고리즘의 송신 전력 및 전송 속도

의 수렴 특성을 보여 주고 있다. 표1과 2를 통해 구축한 가상의 동일한 채널환경에서 19개 모든 링크의 평균 송신 전력과 평균 전송 속도를 보여주고 있다. 이 결과는 비트 할당을 이산적인 아닌 연속적으로 한다는 전제하에서 도출한 결과이다. 그림1의 (a)를 통해 세 알고리즘 모두 평균 전송 속도가 목표한 전송 속도에 수렴함을 알 수 있다. 그림1의 (b)에서 평균 송신 전력의 수렴값 결과는 B 알고리즘이 가장 작으며, C 알고리즘이 가장 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다. 그리고 본 논문에서 제안한 A 알고리즘은 B 알고리즘과 비슷한 수렴값을 가짐을 알 수 있다.

그림 3은 표1과 표2를 사용하여 구현한 1000개의 가상 채널환경에서 각 알고리즘의 수렴된 평균 송신 전력의 분포를 나타낸 것이다. 본 논문에서 제안한 A 알고리즘과 IWF를 사용하는 B 알고리즘의 경우 수렴된 평균 송신 전력의 분포가 비슷함을 알 수 있다. 반면 C 알고리즘의 경우 수렴된 평균 송신 전력의 분포가 A 와 B 알고리즘에 비해 오른쪽으로 치우쳐져 있는 것을 볼 수 있는데, 이 현상을 통해 C 알고리즘은 수렴에 필요한 평균 송신 전력이 A 와 B 알고리즘의 경우보다 크다는 것을 알 수 있다.

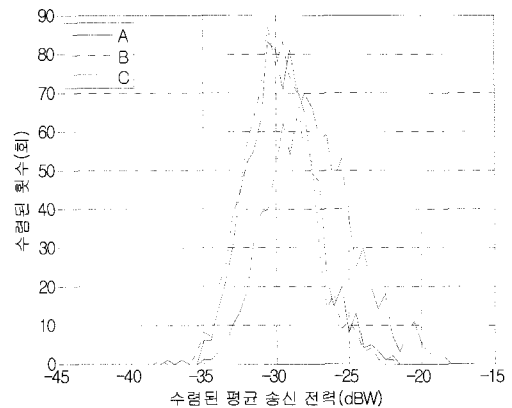
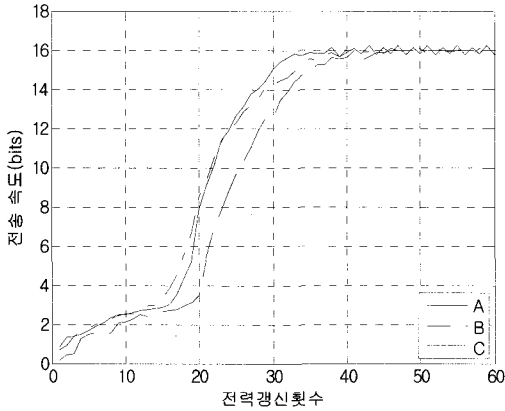


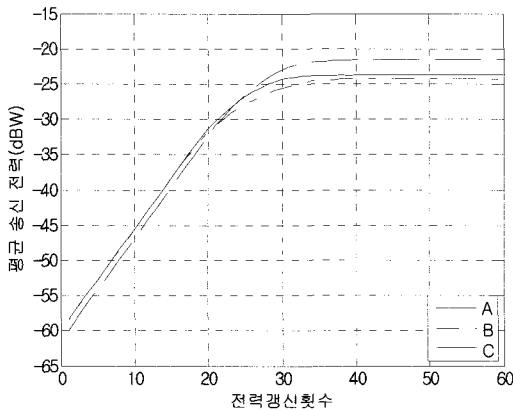
그림 3. 각 알고리즘의 수렴된 평균 송신 전력 분포(연속 비트 할당)

실제 시스템에서는 한 개의 부반송파가 심볼 구간을 통해 전송할 수 있는 비트 수가 정수로 제한된다. 따라서 이를 고려하면 한 개의 심볼이 전송하는 전송 비트 개수를 구하는 식(4)를 다음과 같이 변환해서 사용해야 한다.

$$b_k = \sum_{i=1}^{N_c} \left\lfloor \log_2 \left( 1 + \frac{SINR_{i,k}}{\Gamma} \right) \right\rfloor \quad (8)$$



(a) 전력 조절 횟수에 따른 평균 전송 용량 변화



(b) 전력 조절 횟수에 따른 평균 송신 전력 변화

그림 4. 이산 비트 할당을 사용한 송신 전력 갱신

위 식에서  $\lfloor a \rfloor$ 는  $a$ 값을 넘지 않는 최대 정수를 나타낸다.

그림 4는 그림 2와 동일한 환경에서 식(8)와 같이 이산 비트 할당 방식을 사용할 때 세 알고리즘의 수렴 특성을 보여주고 있다. 이 경우에는 이산 비트 할당 방식을 사용하기 때문에 부반송파별로 전송 속도가 목표로 하는 값을 기준으로 약간의 오르내림이 있지만 평균값은 수렴함을 알 수 있다. 수렴한 송신 전력값의 결과는 그림4에서 보듯이 C 알고리즘이 가장 많은 송신 전력값을 필요로 하며, A 와 B 알고리즘은 그보다 낮은 송신 전력값을 필요로 함을 알 수 있다.

그림 5의 결과 역시 그림3과 같이 C 알고리즘이 A 와 B 알고리즘에 비해 수렴에 필요한 송신 전력이 높게 형성된다는 것을 보여주고 있다.

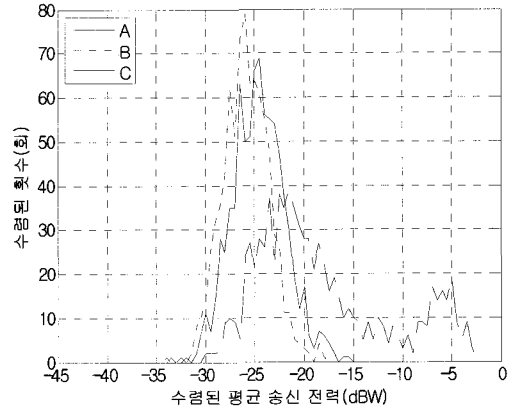


그림5. 각 알고리즘의 수렴된 평균 송신 전력 분포 (이산 비트 할당)

## V. 결론

본 논문에서는 다중 셀 환경에서 발생하는 동일 채널 간섭을 고려하여 OFDM 통신 시스템의 송신 전력을 조절하는 방안을 제안하고, 컴퓨터 실험을 통해 기존의 전력 할당 방식, 즉 IWF 방식 및 모든 부반송파에 동일한 송신 전력을 할당하는 방식과 수렴 특성을 비교하였다. 그 결과 주어진 비트 전송 속도를 달성하기 위해 필요한 송신 전력 수준 측면에서는 본 논문에서 제안한 방식이 모든 부반송파에 동일한 송신 전력을 사용하는 방식에 비해 낮은 수준의 송신 전력을 필요로 하며, IWF 방식과는 거의 대등한 수준의 전력을 사용한다는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 제한 정보량 측면에서는 제안한 방식이 IWF 방식에 비해 매우 적은 제한 정보량을 사용하게 되며, 모든 부반송파에 동일한 송신 전력을 사용하는 방식에 비해서는 약간 많은 제한 정보량을 사용함을 알 수 있었다. 이를 종합하면 본 논문에서 제안하는 방식은 IWF 방식과 거의 대등한 송신 전력을 사용하면서도 상대적으로 적은 제한 정보량을 사용하기 때문에 시스템 복잡도에 대한 제약이 큰 시스템의 송신 전력 조절 방식으로 적합하다고 여겨진다.

## 참고 문헌

- [1] J. Zander, "Performance of optimum transmitter power control in cellular radio systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol 41, Issue 1, pp.

- 57-62, Feb 1992.
- [2] J. Zander, "Distributed cochannel interference control in cellular radio systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol 41, Issue 3, pp. 305-311, Aug 1992.
- [3] G. J. Foschini and Z. Miljanic, "A simple distributed autonomous power control algorithm and its convergence," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol 42, Issue 4, pp. 641-646, Nov 1993.
- [4] W. Yu, G. Ginis and J. M. Cioffi, "Distributed multiuser power control for digital subscriber lines," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 20, Issue. 5, pp. 1105-1115, June 2002.
- [5] S. T. Chung and J. M. Cioffi, "Rate and power control in a two-user multicarrier channel with no coordination : The optimal scheme versus a suboptimal method," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, Issue 11, pp. 1768-1772, Nov 2003.
- [6] J. Lee, R. V. Sonalkar, and J. M. Cioffi, "Multi-user discrete bit-loading for DMT-based DSL systems," *IEEE GLOBECOM 2002*, vol. 2, pp. 1259-1263, Nov 2002.
- [7] C. Yih and E. Geraniotis, "Centralized power allocation algorithms for OFDM cellular networks," *IEEE MILCOM 2003*, vol. 2, pp. 1250-1255, Oct 2003.
- [8] C. Yih and E. Geraniotis, "Power allocation and control for coded OFDM wireless networks," *IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications*, vol. 1, pp. 164 - 168, Sept. 2000.
- [9] H. Su and E. Geraniotis, "A distributed power allocation algorithm with adaptive modulation for multi-cell OFDM systems," *IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications*, vol. 2, pp. 474 - 478, Sept. 1998.
- [10] L. Yan, Z. Wenan, and S. Junde, "An adaptive subcarrier, bit and power allocation algorithm for multi-cell OFDM systems," *IEEE CCECE 2003*, vol. 3, pp. 1531 - 1534, May 2003.
- [11] G. Kulkarni, S. Adlakhia, and M. Srivastava, "Subcarrier allocation and bit loading algorithms for OFDMA-based wireless networks," *IEEE Trans. Mobile Computing.*, vol. 4, Issue 6, pp. 652-662, Nov 2005
- [12] I. Sason, "On achievable rate regions for the Gaussian interference channel," *IEEE ISIT 2004.*, pp. 1, June 2004.
- [13] W. Yu and J. M. Cioffi, "On constant power water-filling," *IEEE ICC 2001.*, vol. 6, pp. 1665-1669, June 2001
- [14] 박진규, 임창현, "동일 채널 간섭 환경에서 OFDM 전송 방식을 위한 송신 전력 제어," *한국통신학회논문지*, vol. 32, no. 3, pp.271-280, Mar 2007.
- [15] H. Harada and R. Prasad, *Simulation and Software Radio for Mobile Communication.*, Artech House, 2002.

박진규 (Jinkyu Park)

준회원



2005년 8월 부경대학교 전자공학과 (공학사)  
 2007년 8월 부경대학교 전자공학과 석사과정  
 <관심분야> 통신시스템

임창현 (Chang Heon Lim)

종신회원



1986년 2월 서울대학교 전자공학과 (공학사)  
 1988년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
 1993년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)  
 1994년 3월~현재 부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부 정교수

<관심분야> 통신, 레이더 신호 처리, 오디오 부호화