

# 지능형 1차원 채널 추정 방법과 DVB-T 시스템에서의 응용

준회원 조창연\*, 정회원 김준태\*

## An Intelligent 1-Dimensional Channel Estimation Method and Its Application to a DVB-T System

Chang Yeon Cho\* Associate Member, Joon Tae Kim\* Regular Member

요약

본 논문에서는, OFDM 시스템에서 채널 환경에 따라 지능적으로 보간 순서를 결정하여 채널을 추정하는 방법을 제안한다. 먼저 수신기는 채널의 시간 변화량인 도플러 주파수와 다중 경로에 의한 최대 지연 시간을 파악한 후, 시간과 주파수 축에서 채널의 상대적 변화량을 알 수 있는 채널의 지표를 이끌어낸다. 이러한 지표는 1차원 채널 추정에서 시간 축으로 보간을 하고 주파수 축의 보간을 수행할지, 혹은 그 반대의 과정을 거치게 될지를 결정하는데 사용하게 된다. DVB-T 시스템에 적용된 컴퓨터 모의실험을 통해서 제안된 지능형 추정 방법이 기존의 고정된 방법보다 다양한 채널 환경에서 좋은 추정 성능을 낼 수 있음을 보여준다.

**Key Words** : OFDM, Channel estimation, Pilot, DVB-T

### ABSTRACT

In this paper, we propose a channel estimation method associated with the interpolation order for OFDM systems. We first analyze the time varying channel and frequency selective channels, and then derive the channel index which indicates the ratio of the time axis variation and the frequency axis variation. This index is used for determining the order of interpolation such as time axis followed by frequency axis interpolation or vice versa. The computer simulation over a DVB-T system shows that the proposed method can provide more accurate channel information, thereby improving the overall performance.

### I. 서론

OFDM 전송방식은 전체 전송 대역을 여러 개의 작고 부반송파로 분할해 동시에 데이터를 전송하는 방식으로 각 심볼 사이에 보호구간을 삽입함으로써 동기를 쉽게 맞출 수 있으며, ISI를 효과적으로 제거할 수 있다<sup>[1][3]</sup>. 또한 다중 경로에 의한 주파수 선택적 채널에서도 고속의 데이터 전송을 가능하게 해준다. 이러한 이유로 디지털 오디오 방송 (DAB), 유럽 디지털 텔레비전의 표준인 DVB-T 및 IEEE

802.11a/g 무선 랜 등의 전송 기술로 채택되어 사용되고 있다<sup>[1],[4]-[5]</sup>.

실제 무선 통신 환경에서는 다중경로에 의한 신호 지연과, 이동 간 통신에 따른 도플러 효과로 주파수 선택성과 시변성이 상존한다<sup>[1]</sup>. 따라서 수신단에서 송신신호의 원활한 검출을 위해 채널의 추정과 보상이 필요하게 되고, 이를 위해 삽입된 파일럿을 이용하여 채널을 추정하는 방법이 널리 사용되고 있다<sup>[6]-[8]</sup>.

파일럿 심볼을 이용한 채널 추정 방법은 시간과

\* 본 연구는 BK21 사업의 지원으로 수행되었습니다.

\* 건국대학교 전자공학과 통신시스템설계 연구실 (opened@konkuk.ac.kr, jtkim@konkuk.ac.kr)

논문번호 : KICS2007-08-368, 접수일자 : 2007년 8월 17일, 최종논문접수일자 : 2008년 1월 17일

주파수 축에서 변화하는 채널에 파일럿 심볼을 삽입하여 파일럿이 위치한 곳의 채널을 알아낸 다음, 파일럿 심볼 사이의 데이터 심볼에서의 채널을 보간을 통해 추정하는 방법이다. 따라서 파일럿을 많이 삽입할수록 채널 추정의 정확도는 높아지지만, 그만큼 실제 데이터의 전송률은 떨어지게 되는 단점이 있다.

이러한 채널 추정의 방식으로는 시간과 주파수 2차원 격자에서 한 번에 채널을 추정하는 2차원 추정 방식<sup>6)</sup>, 시간과 주파수 축에서 차례대로 추정하는 1차원 추정 방식이 있다<sup>7)</sup>. 먼저 2차원 채널 추정 방식은 최적의 성능을 낼 수 있는 반면에, 구조가 복잡하여 실시간 구현에 어려움이 따른다. 하지만 1차원 채널 추정 방식은 채널의 추정 성능은 다소 떨어지지만, 구조가 간단하여 널리 사용되고 있다.

널리 알려진 DVB-T 시스템에서의 일반적인 채널 추정 방식을 살펴보면, 시간 축에서 1차로 보간을 먼저 하고, 그 정보를 바탕으로 주파수 축으로의 보간을 수행한다. 그러나 이 방식은 주파수 선택성이 거의 없고, 도플러가 높은 채널 환경에서 시간 축에서 보간을 선행하게 되면 보간 오류가 크게 발생하여, 이어지는 주파수 축에서의 추정 성능 역시 급격히 떨어뜨릴 수 있다. 이는 결국 채널 추정의 전체 성능을 떨어뜨리는 주요 원인이 된다.

따라서 본 논문에서는, OFDM 시스템에서 채널 환경에 따라 지능적으로 보간 순서를 결정하는 새로운 방법을 제안한다. 먼저 수신기는 채널의 시간과 주파수 축에서의 변화량을 각각 파악한 후, 채널의 상대적 변화량을 알 수 있는 채널의 지표로 이끌어낸다. 이러한 지표는 1차원 채널 추정에서 시간 축으로 보간을 하고 주파수 축의 보간을 수행할지, 혹은 그 반대의 과정을 거치게 될지를 결정하는데 사용하게 된다. DVB-T 시스템에 적용된 컴퓨터 모의실험을 통해 제안하고 있는 지능형 추정 방법이 기존의 고정된 방법보다 여러 채널 환경에서도 꾸준히 좋은 성능을 낼 수 있음을 보여준다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 채널의 시간과 주파수 축에서의 변화량과 그에 따라 추정 가능한 파일럿의 간격을 통해 채널 지표를 유도해 내고, III장에서는 II장에서 유도해 낸 채널 지표를 이용하여 보간의 순서를 상황에 맞게 결정하는 지능형 채널 추정 시스템을 선보인다. IV장에서는 실제 제안하는 채널 추정 방법을 DVB-T 시스템에 적용시켜 모의실험 결과를 보이고, 마지막으로 V장에서 간단한 요약과 함께 결론을 맺는다.

## II. 채널 지표의 유도

### 2.1 1차원 채널 추정과 샘플링 이론

데이터 스트림 사이에 파일럿 심볼을 삽입하여 채널을 추정하는 방식은 가장 널리 사용되고 있는 채널 추정 방법이다. 나이퀴스트의 샘플링 이론에 따르면, 샘플링 비율이 높을수록 저성능의 필터를 사용하여도 원래의 아날로그 신호를 깨끗하게 복원할 수 있듯이, OFDM과 같은 다중 반송파 시스템에서도 파일럿 심볼의 비율이 높을수록 채널 추정 성능의 높은 정확성을 기대할 수 있다. 하지만 파일럿 심볼의 비율이 높을수록 실제 전송하고자 하는 데이터의 전송 속도가 저하되는 단점이 있다. 따라서 채널 추정의 성능과 데이터 전송률을 적절히 만족시켜 주어야 한다.

OFDM 시스템의 채널 추정기는 이미 알고있는 파일럿 심볼의 이산 샘플로부터 전송하고자 하는 데이터 심볼을 복원하는 일종의 디지털-아날로그 변환기(DAC)로 생각할 수 있다. 이때 채널은 유동적으로 변하는 가변적 요소이며 파일럿의 간격은 시스템에서 고정되어있는 값이므로, 샘플링 주파수가 고정되어 있고 입력 신호의 주파수가 변화하는 것으로 간주할 수 있다. 그러므로 복원 가능한 입력 신호의 주파수는 파일럿의 간격(주기)과 나이퀴스트의 샘플링 이론에 따라 정해지게 된다. 즉, 고정된 OFDM 시스템에서 채널 추정이 이루어질 수 있는 채널의 상한선이 존재하는 것을 의미한다.

시간과 주파수 축에서 각각 변화하는 채널의 주파수를 알면, 그 채널을 복원 가능한 인접 파일럿 사이의 최대 간격을 알아낼 수 있다. 이를 실제 고정되어 있는 파일럿 간격으로 각각 나누어주면 파일럿에 의한 오버샘플링의 비율을 구할 수 있다.

그림 1과 같이 파일럿 심볼이 주파수축으로  $m$ 번째 부분송파마다 삽입되고, 시간축으로는  $n$ 번째 심볼마다 삽입된 파일럿 심볼이 삽입된 일반적인 OFDM 시스템을 생각해보자. 또한 전송 채널은 최대 도플러 주파수( $f_d$ )와 최대 지연 시간( $t_d$ )을 갖는 다중 경로 Rayleigh 페이딩 채널로 간주한다. 수신기에서는 수신된 파일럿을 이용해 파일럿 위치에서의 채널을 알아낸 후, 인접 파일럿 사이의 채널을 보간을 통해 추정하고 보상하게 된다.

먼저 시간 축에서 도플러 주파수가  $f_d$ 인 상황일 때, 시간 축에서 추정이 가능한 인접 파일럿 심볼의 최대 간격은 나이퀴스트 샘플링 이론에 따라  $1/2T_{sym}f_d$ 가 된다. 또한 주파수 축에서 최대 지연시

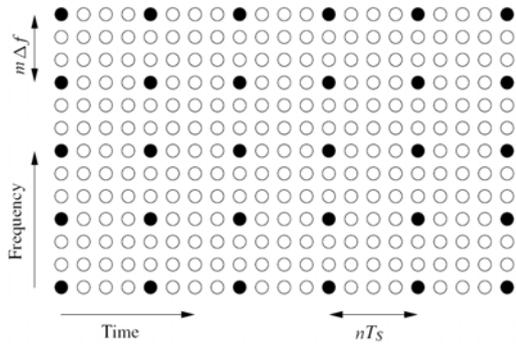


그림 1. 파일럿 심볼이 삽입된 예

간이  $t_d$ 인 경우 주파수 축에서 추정이 가능한 인접 파일럿 심볼의 최대 간격은 역시  $N/2 \lceil t_d/t_{sam} \rceil$  가 된다. 여기서  $\lceil x \rceil$  는  $x$ 를 넘지 않는 최대 정수이고  $t_{sym}$ ,  $t_{sam}$ 은 각각 OFDM 심볼과 샘플의 전송시간,  $N$ 은 FFT의 길이이다.

$$m_{nyq} = \frac{N}{2 \lceil T_d / T_{sam} \rceil}, \quad n_{nyq} = \frac{1}{2T_{sym}f_d} \quad (1)$$

이를 각각  $m_{nyq}$ ,  $n_{nyq}$ 로 정의하며, 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며<sup>9)</sup>, 시스템에서 고정된 파일럿 간격인  $m$ 과  $n$ 으로 나누어주면 각각 주파수 축과 시간 축에서의 오버샘플링 비율을 구할 수 있다. 여기서  $f_d$ 와  $t_d$ 가 크면 각각  $m_{nyq}$ 와  $n_{nyq}$ 가 작아지고 결국 오버샘플링의 비율이 낮아짐을 식 (1)을 통해 확인할 수 있다. 샘플링 비율이 높을수록 저성능의 필터로 원래의 아날로그 신호의 복구가 가능하듯, 파일럿 심볼에 의한 오버샘플링 비율이 높을수록 선형 보간과 같은 간단한 추정 방법으로서 정확한 채널의 추정이 가능하게 된다.

특히 시간 축과 주파수 축으로 1차원 보간을 순차적으로 수행하는 추정기에서는 선행되는 추정 축에서의 채널 추정이 매우 중요하다. 왜냐하면 2차로 추정되는 축에서의 채널 추정에 중요한 정보를 제공하기 때문이다. 따라서 1차로 추정되는 축에서 보간 오류가 적어야 2차로 추정되는 축에서도 보다 정확한 채널 추정이 가능하다.

하지만 특별한 신호의 처리 과정 없이 오버샘플링 비율이 높은 축을 선택해서 1차로 보간을 수행하게 되면 1차적으로 발생하는 보간 오류를 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 그에 따라 채널 추정의 전체 성능도 향상될 수 있다.

## 2.2 채널 특성의 파악과 채널 지표의 유도

하지만 주파수와 시간 축으로의 채널 변화량을 알아야만 그에 따른 오버샘플링 비율을 알 수가 있고, 또한 선행해야할 보간의 방향도 정할 수 있다. 시간 축으로의 채널 변화는 도플러 주파수의 영향을 받으며, 주파수 축으로의 채널 변화는 최대 지연 시간의 영향을 받는다. 따라서 도플러 주파수와 최대 지연 시간을 수신기가 파악할 수 있다면, 시간과 주파수 축에서의 오버샘플링 비율 뿐만 아니라 1차원 채널 추정의 순서 또한 정할 수 있다.

먼저 도플러 주파수는 시간축으로 인접한 파일럿의 위상 변화로 알아낼 수 있다. 실제 OFDM 시스템에서는 동일한 부반송파의 위치에 매 OFDM 심볼마다 삽입되는 연속 파일럿(continual pilots)이 존재하는데, 이를 이용하면 보다 정확한 도플러 주파수를 얻을 수 있다.

채널의 최대 지연 시간은 채널의 임펄스 응답을 통해 알아낼 수 있다. 임펄스 응답은 파일럿 심볼만을 취한 뒤 IFFT를 수행하면 얻을 수 있다<sup>10)</sup>. 이와 같은 방법으로 알아낸 도플러 주파수와 채널 최대 지연 시간을 이용하면  $m_{nyq}$ 와  $n_{nyq}$ 를 구할 수 있고, 또한 이를 시스템에 고정된  $m$ 과  $n$ 으로 각각 나누면 시간과 주파수 축에서의 오버샘플링 비율을 알아낼 수 있다.

여기서 우리는 채널 지표(channel index),  $\gamma$ 를 각각 시간과 주파수 축에서의 파일럿 심볼에 의한 오버샘플링율의 비로 정의할 수 있고, 그 표현은 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{m_{nyq}/m}{n_{nyq}/n} \leq 1 \quad (2)$$

따라서 채널 지표  $\gamma$ 가 1보다 작으면 시간 축에서의 오버샘플링 비율이 크기 때문에 시간 축으로 보간을 선행하고, 반대로 1보다 크면 주파수 축으로의 오버샘플링 비율이 크기 때문에 주파수 축으로 보간을 먼저 수행하게 된다.

## III. 지능형 채널 추정 방법

지금까지 수신된 파일럿 심볼로부터 각각 도플러 주파수, 최대 지연 시간을 구한 뒤, 식 (1)과 (2)를 통해 보간의 순서를 결정하는 방법을 알아보았다. 여기서 보간의 순서는 도플러 주파수, 최대 지연 시

간과 시스템의 매개변수에 의해 결정된다. 본 장에서는 도플러 주파수와 최대 지연 시간을 시스템 환경, 즉 샘플과 심볼의 주기로 정규화해서 얻은 값을 2차원 평면에 나타내어 보고, 보간의 순서를 결정하는 지능형 채널 추정기를 제안하고자 한다.

식 (1)에서 이미 살펴보았듯이 최대 지연 시간은 보호구간을 제외한 OFDM 심볼의 기간으로 정규화하고, 도플러 주파수는 심볼의 주기로 정규화해서 각각  $T$ 와  $f$ 를 얻을 수 있고 이를 식으로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$T = \frac{[T_d / T_{sam}]}{N}, \quad f = T_{sym} f_d \quad (3)$$

그림 1에서 OFDM의 심볼을 시간과 주파수의 2차원 격자에서 표현한 것과 마찬가지로, 채널의 상황 또한  $T$ 와  $f$ , 즉 도플러와 최대 지연 시간의 2차원 평면으로 표시할 수 있다.

그림 2에서  $T=1/2m$ ,  $f=1/2n$ 이 되는 지점이 바로 앞서 구한 나이퀴스트 샘플링 이론의 임계점이다. 즉, 사각형 바깥쪽의 영역은 도플러 주파수와 최대 지연 시간이 너무 커서 시스템에서 삽입된 파일럿으로 이상적인 채널 추정기를 사용하여도 원래의 채널을 알아낼 수 없는 영역이 된다. 반대로 좌표 평면에서 원점에 가까울수록 채널의 변화가 적어 파일럿 심볼에 의해 오버샘플링 되는 영역으로 생각할 수 있다.

그러면 시간과 주파수 축 중에서 어느 한쪽의 변화만 크거나 작은 경우를 고려해보자. 그림 2에서 'A'를 포함한 사선은 시간과 주파수 축에서 채널 상황이 유사한 경우로서 이때의 채널 지표는 약 1이 되는 경우이다. 반면 'B'는 주파수에서, 'C'는 시간

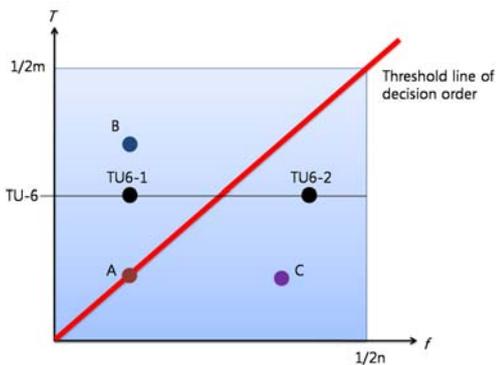


그림 2. 2차원 평면에서 채널의 표현

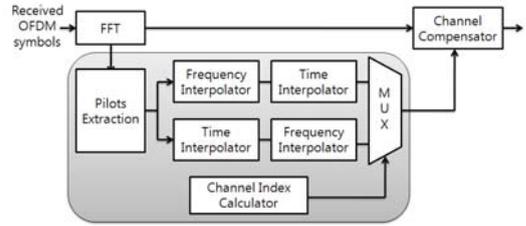


그림 3. 제안하는 지능형 채널 추정기의 개념도

축에서 채널의 변화가 상대적으로 큰 상황이다.

직선의 아래쪽은 시간 축에서의 채널 변화가 상대적으로 높은 상황으로서 주파수 축의 오버샘플링 비율이 높은 영역이 되고, 반대로 직선의 위쪽은 시간 축의 오버샘플링 비율이 높은 영역이 된다. 따라서 직선의 아래쪽, 즉 C의 경우에는 주파수 축의 보간을 선행하는 것이 유리하고, 직선의 위쪽, B의 경우 시간 축의 보간을 선행하는 것이 유리할 것이라고 예상해 볼 수 있다.

그림 3은 제안하는 채널 추정기의 이해를 도울 수 있는 개념도이다. 먼저 도플러 주파수와 최대 지연 시간으로 채널 지표를 계산해내고, 채널 지표에 따라 주파수와 시간 중에서 어느 쪽의 보간을 먼저 수행할지 선택하게 된다. 실제 구현시에는 그림 3에서와 같이 시간과 주파수 축의 보간기가 2개씩 따로 구현하는 것이 아니라, 보간의 순서만을 제어하도록 구현하여 하드웨어 복잡도를 크게 증가시키지 않고도 좋은 성능을 기대할 수 있다.

#### IV. 컴퓨터 모의실험 결과 및 분석

본 장에서는 제안한 채널 추정기를 모델링하고 실제 여러 가지 채널 상황에서 어떤 방법이 우수한 성능을 보이는지 컴퓨터 모의실험을 통해 비교, 분석해 보고자 한다. 모의실험에서는 DVB-T(2K) 시스템에 본 채널 추정기를 적용하였으며, QPSK 변조와 보호구간은 1/4을 삽입하였으며, 보간은 단순한 구조로서 구현이 간단한 선형 보간을 채택하였다. DVB-T의 파일럿 패턴은 그림 4와 같고 채널 코딩은 사용하지 않았다.

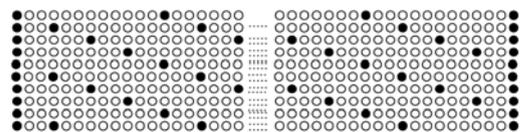


그림 4. DVB-T의 파일럿 패턴

그림 4의 DVB-T 파일럿 패턴을 보면 알 수 있듯이 매 OFDM 심볼에 파일럿이 존재하므로 주파수 축으로 보간을 먼저 수행하게 되면 시간 축으로의 2차 보간이 필요하지 않다. 따라서 시간 축 보간 후 주파수 축 보간과 주파수 축에서의 보간이 비교될 것이다.

표 1은 모의실험에서 고려되는 채널 조건 A, B, C와 TU6가 서로 다른 도플러를 갖는 두 가지 경우의 채널 조건을 나타낸다. 이때 A, B, C는 두 개의 다중경로를 갖으며 두 번째 경로는 -3dB의 전력을 갖는 채널로 모델링하였다. 또한 이것을 그림 2에 모의실험에서 고려된 각 채널 상황을 2차 평면에 나타내었다. A의 경우는 도플러와 최대 지연 시간으로 인한 채널의 변화가 거의 유사한 지점이다. 이때 시간과 주파수 축에서 채널의 상대적 변화가 거의 동일하기 때문에 A의 경우 주파수와 시간 어느 쪽으로 보간을 먼저 하더라도 성능의 큰 차이가 없음을 그림 5의 결과를 통해 알 수 있다.

B의 경우는 A와 동일한 도플러 주파수를 갖으며 채널의 최대 지연이 3배 길어진 상황이다. 따라서 주파수 선택성이 매우 강해 주파수 축으로 보간을 선행하게 되면 신호 대 잡음비가 30dB인 환경에서도 BER 성능이 개선되지 않음을 그림 6에서 확인할 수 있다.

그림 7은 C의 경우에서의 BER 성능 곡선이다. 이때의 환경은 A와 같은 최대 지연 시간을 갖고 도플러가 3배 높아진 상황이므로 채널의 시변성이 매우 크다. 따라서 주파수 축으로 보간을 먼저 수행하는 쪽이 BER  $10^{-2}$ 에서 2dB 이상의 이득을 얻고 있음을 확인할 수 있다.

TU6-1과 TU6-2는 TU6 채널 지연을 갖는 환경에서 도플러 주파수만을 변화하는 상황을 고려하였다. 또한 기존 DVB-T에서 사용하는 시간-주파수 보간의 순서를 갖는 채널 추정기와 제안하는 지능형 채널 추정기를 서로 비교하였다. TU6는 전형적인 도심 환경이 보이는 채널 환경으로서 이 채널 지연의 정보는 표 2에 자세하게 나타내었다. 그림 8에서 보듯, TU6-1은 주파수 축에서의 상대적 채널 변화가 많은 쪽이므로 제안하는 방법은 기존 DVB-T의 시간-주파수 보간 순서를 그대로 따르게 되므로 문제가 없는 상황이다.

반면 TU6-2의 경우는 시간 축에서의 상대적 변화가 많은 상황이다. 기존 DVB-T의 채널 추정기는 시간 축으로 보간을 먼저 하도록 고정되어 있기 때문에 그림 9에서 보듯 BER 성능이 급격히 떨어짐을 알 수 있다. 그러나 제안하는 추정 방법은 시변

성이 매우 큰 채널의 상황을 미리 파악하고 주파수 축으로의 보간을 선택함으로써 기존 방법보다  $10^2$  상황에서 약 2dB 이상의 이득을 얻고 있다.

표 1. 시뮬레이션에서 고려된 채널 조건.

	$f$	$T$	$\gamma$
A	0.031	0.0129	1.000
B	0.031	0.0387	0.330
C	0.094	0.0129	3.005
TU6-1	0.040	0.0293	0.563
TU6-2	0.100	0.0293	1.407

표 2. TU6 채널 파라미터.

경로	Rayleigh channel (TU-6)	
	평균전력(dB)	지연시간(us)
1	-3.0	0.0
2	0.0	0.2
3	-2.0	0.5
4	-6.0	1.6
5	-8.0	2.3
6	-10.0	5.0

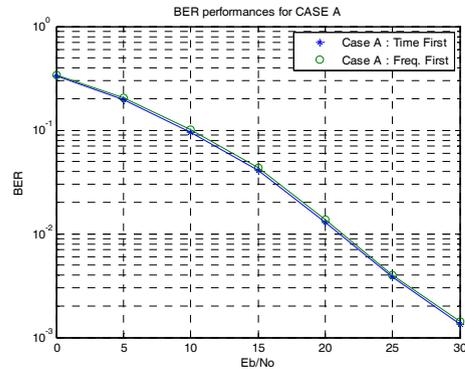


그림 5. A경우에서 BER

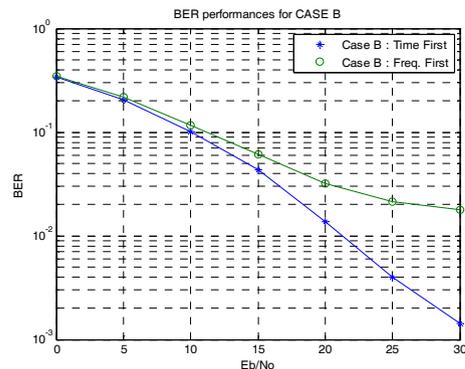


그림 6. B경우에서 BER

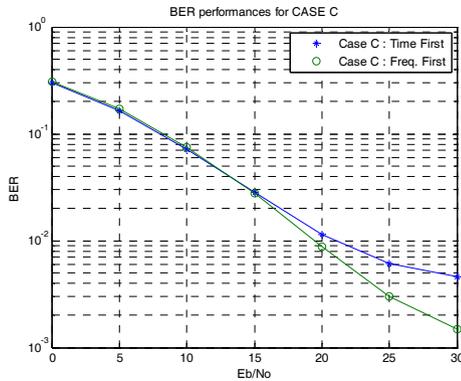


그림 7. C경우에서 BER

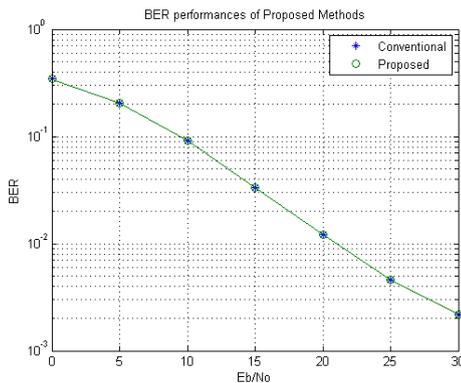


그림 8. TU6-1경우에서 BER

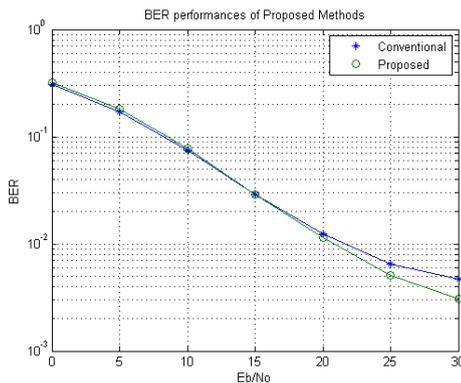


그림 9. TU6-2경우에서 BER

### V. 결 론

본 논문에서는 OFDM 시스템에서 특수한 채널 상황에서 심각한 성능 저하를 가져올 수 있는 기준

의 1차원 채널 추정기를 보완한 새로운 채널 추정 기법을 제안하였다. 이 방법은 도플러 주파수와 채널의 최대 지연 시간으로 시간과 주파수 축에서 상대적인 채널 변화를 파악하여 변화가 적은 쪽으로 보간을 먼저 하도록 보간 순서를 제어하는 방식이다. 제안하는 채널 추정기를 DVB-T 시스템에 적용하여 얻어 낸 컴퓨터 모의실험 결과는 다양한 채널에서도 꾸준한 성능을 보여주고 있음을 확인하였다. 이 제안하는 방법은 다른 OFDM 시스템에도 적용이 가능하며, 또한 차세대 이동통신에도 크게 기여할 수 있을 것으로 보인다.

### 참 고 문 헌

- [1] H. Shulze, C. Luders, Theory and Applications of OFDM and CDMA Wideband Wireless Communications, John Wiley & Sons, 2005.
- [2] W. Y. Zou, and Y. Wu, "COFDM : An Overview", IEEE Trans. Broadcasting, vol. 41, pp. 1-8, Mar. 1995.
- [3] L. C. Cimini, Jr., "Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency-division multiplexing", IEEE Trans. Comm., vol. 33, pp. 665-675, July 1995.
- [4] ETSI, "Digital Video Broadcasting (DVB) : Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television", ETSI EN300 744 V1.5.1, Jun. 2004.
- [5] IEEE Computer Society, "IEEE Standard for Information technology- Telecommunications and information exchange between systems- Local and metropolitan area networks", IEEE Std 802.11g, Jun. 2003.
- [6] R. Negi, J. Cliff, "Pilot Tone Selection for Channel Estimation in a Mobile OFDM System," IEEE Trans. Comm., Vol. 44, pp. 1122-1128, Aug. 1998.
- [7] J. K. Cavers, "An analysis of pilot symbol assisted modulation for Rayleigh fading channels," IEEE Trans. Vehicular Tech., Vol. 40, No. 4, pp. 686-693, Nov 1991.
- [8] P. Hoecher, S. Kaiser, P. Robertson, "Two-dimensional pilot-symbol-aided channel estimation by wiener filtering," in Proc.

*IEEE ICASSP'97, Munich, Germany*, pp. 1845-1848, Apr. 1997.

- [9] M. J. Fernandez-Genito Garcia, S. Zazo, J. M. Paez-Borrillo, "Pilot patterns for channel estimation in OFDM," *IEEE Letters*, Vol. 36, No. 12, pp. 1049-1050, June 2000.
- [10] Y. Zhao, A. Huang, "A novel channel estimation method for OFDM mobile communication system based on pilot signals and transform-domain processing," *IEEE Vehicular Tech. Conf.* Vol. 3, pp. 2089-2093, May, 1997.

조 창 연 (Chang Yeon Cho)

준회원



2007년 2월 건국대학교 전자공학과 졸업  
2007년 3월~현재 건국대학교 전자공학과 석사과정  
<관심분야> OFDM

김 준 태 (Joon Tae Kim)

정회원



1990년 8월 한국과학기술원 전자공학과 졸업(공학사)  
1993년 2월 한국과학기술원 전자공학과 졸업(공학석사)  
1998년 2월 한국과학기술원 전자공학과 졸업(공학박사)  
2003년 9월~현재 건국대학교 전자공학과 교수

<관심분야> 방송통신, OFDM