

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2021.21.5.27>

JIIBC 2021-5-4

## 스텝 크기에 의한 FC-MMA 적응 등화 알고리즘의 성능 평가

# A Performance Evaluation of FC-MMA Adaptive Equalization Algorithm by Step Size

임승각\*

Seung-Gag Lim\*

**요약** 본 논문은 16-QAM 신호 전송시 시분산 채널에서 발생하는 부호간 간섭을 경감시키기 위하여 사용되는 FC-MMA 적응 등화 알고리즘에서 고정 스텝 크기에 따른 등화 성능을 평가하였다. FC-MMA는 기존 MMA의 통신 채널의 시변 특성 및 순단과 같은 비정상적인 상황에서 신속하게 새로운 환경에 적응토록 빠른 수렴 속도를 갖는 것이 특성이지만, 수렴 속도는 고정 스텝 크기에 의하여 결정된다. 논문에서는 고정 스텝 크기값에 따른 등화 성능을 평가하였으며, 관련된 성능 지수로는 수렴 특성을 나타내는 잔류 isi와 최대 찌그러짐, MSE 및 잡음 강인성을 나타내는 SER과 균지연 보상 능력등이 사용되었다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 적응 스텝 크기가 클수록 정상 상태에 도달하는 수렴 속도는 개선되지만, 정상 상태 이후의 잔여량에서는 스텝 크기가 적을수록 우월해짐을 알 수 있었다. 본 연구 결과 FC-MMA 알고리즘은 초기에는 스텝 크기를 크게 설정하고, 정상 상태에 도달하면 이를 적게 조정하여 등화 잔여량을 최소화시킬 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract** This paper evaluates the equalization performance of FC-MMA adaptive equalization algorithm by the fixed step size that is used for the minimization of the intersymbol interference which occurs in the time dispersive communication channel. The FC-MMA has a fast convergence speed in order to adapts the new environment more rapidly in case of the time varying characteristics and the abnormal situation like as outage of the communication channel. But the algorithms operates in adaptive method, convergence speed is depend on fixed step size for adaptation. For this situation, its performance was evaluated by changing the step size value, the residual isi and maximum distortion and MSE performance index which means the convergence characteristics are widely adapted in the adaptive equalizer, SER were applied. As a result of computer simulation, the large step size can improves the convergence speed for reaching the steady state, but has a poor performance compared to small step size in residual values after steady state. The research result shows that the FC-MMA algorithm is applied the large step size for rapidly reaching the steady state in initial time, then adjust the small step size after reaching the steady state for reducing the residual values for equalization.

**Key Words** : MMA, FC-MMA, Residual isi, Maximum Distortion, Consellation Dependent Constant

\*정회원, 공주대학교 정보통신공학부 정보통신공학 전공  
접수일자 2021년 8월 30일, 수정완료 2021년 9월 30일  
게재확정일자 2021년 10월 8일

Received: 30 August, 2021 / Revised: 30 September, 2021 /  
Accepted: 8 October, 2021

\*Corresponding Author: [sglim@kongju.ac.kr](mailto:sglim@kongju.ac.kr)

Dept. of Information and Communication, Kongju National  
University, Korea

## I. 서 론

최근 다양한 통신 기술 발달에 따른 정보 전송의 요구가 급증하면서 한정된 대역폭내에서 스펙트럼 효율이 높은 QAM 신호가 널리 사용되고 있다. 특히 이동 무선 멀티미디어 통신과 증계 전송의 경우 인공 장애물등에 의한 전파 음영 지역이 존재하거나 이동에 의한 도플러 주파수 천이 및 전파 경로상의 감쇠 상수가 수시로 변동하며, 전송 신호의 구성 주파수 성분들이 서로 다른 감쇠를 받게 되는 균지연 현상에 의한 부호간 간섭은 고속 전송의 장애 요인이 되고 있다. 이와 같은 열악한 전파 환경에 의한 전송 시스템에서 최대 정보 전송율이 제약을 받거나 심볼 오류율 (SER : Symbol Error Rate) 증가와 동기 이탈등이 발생되어 전체 시스템의 전송 효율과 성능이 저하된다. 이를 위한 대책으로 송수신 필터, MIMO (Multi Input Multi Output) 전송 기술, 부분 응답 부호화 (PRC: Partial Response Coding), 다이버시티 (Diversity)등이 있으나, 이들은 별도의 H/W 구성을 필요로 하거나 통신 자원 낭비와 송신 전력을 높여야 하므로 시스템의 직접적 비용이 증가되므로 이를 최소화할 수 있는 대책으로는 적응 등화기를 들 수 있다<sup>[1][2]</sup>. 적응 등화기는 수신측에서 정보를 수신하면서 통신 채널에 의해 발생하는 찌그러짐에 의한 부호간 간섭을 제거할 수 있는 능력을 가지므로 자원 낭비와 송신 전력의 증가 없이도 최적의 전송 효율과 throughput을 얻을 수 있는 시스템을 말한다. 적응 등화기의 대표적인 알고리즘인 MMA (Multiple Modulus Algorithm)는 채널의 진폭과 위상 찌그러짐을 동시에 보상할 수 있으며 등화 성능이 CMA보다 열화되는 단점을 갖는다<sup>[2][3]</sup>. 등화 성능에는 정상 상태에 도달하기 위한 수렴 속도와 정상 상태 이후의 잔여량의 2가지가 고려되며, 이를 위하여 잔류 isi, 최대 찌그러짐, MSE (Mean Square Error) 가 사용된다. 특히 수렴 속도는 무선 이동 통신 채널의 시변 특성에 의한 급격한 전달 함수의 변화나 순단과 같은 장애 환경이 발생하는 경우 새로운 적응을 위하여 초기 상태에서 재적응을 위한 시간을 말하며, 적응 등화기의 성능 지수로서 매우 중요하다<sup>[4][5]</sup>. 본 논문에서는 주어진 16-QAM 송신 신호를 대상으로 MMA 알고리즘의 수렴 특성을 개선시킨 FC-MMA (Fast Convergence-Multi Modulus Algorithm) 에서 스텝 크기에 따른 수렴과 잔여량의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 평가하며 이때 스텝 크기는 0.0003, 0.0009, 0.0015의 3가지로 변화시켰다. 2장에서는 적응 등화기를 사용하는 기저 대역

통신 시스템 모델과 MMA와 FC-MMA 알고리즘에 대하여 설명한 후, 3 장에서는 시뮬레이션 과정 및 결과를 다루고 마지막 4장에서는 결론을 내리겠다.

## II. 본 론

### 1. 기저 대역 통신 시스템 모델

일반적인 수신기는 최적 검출기를 구현하기 위하여 복조단에서 스펙트럼을 기저 대역으로 천이한 후 채널에서의 부호간 간섭과 찌그러짐을 보상한 후 정보를 판별하는 결정 장치로 구성된다. 시스템 모델에서는 복조 과정은 생략하며 등화기의 필터와 이의 계수를 갱신하는 알고리즘, 결정 장치를 고려하게 되며 이를 그림 1에 나타내었다. 송신측에서는 constant modulus 특성을 갖는 16-QAM과 같은 신호  $s_k$ 를 송신하면 임펄스 응답이  $h_k$ 인 채널을 통과하면서 가우시안 잡음  $n_k$ 가 부가되어 수신된다. 이때 임펄스 응답  $h_k$ 는 주파수 영역에서 진폭 전달 특성이 일정하지 않고, 위상 전달 특성은 균지연이 일정하지 않은 비선형 특성을 갖게 되어 수신 신호  $r_k$ 에는 이로 인한 부호간 간섭 영향이 부가되며 동시에 잡음도 부가된다. 수신된 신호  $r_k$ 는 응답이  $f_k$ 인 등화기에 입력되어 진폭과 위상이 보상된 출력 신호  $z_k$ 를 얻은 후 이 신호는 결정 장치를 통과하면서 최종 복원 신호  $\hat{s}_k$ 를 얻게 된다. 이때 등화기의 응답을 나타내는 계수  $f_k$ 는 출력 신호  $z_k$ 와 modulus 값을 입력으로 FC-MMA 알고리즘을 적용하여 각각의 비용 함수를 최소화시키도록 적응적으로 변화시킨다. 임펄스 응답  $h_k$ 와 등화 필터  $f_k$ 의 차수를  $N$  이라면 이들 간에는 다음의 관계식들이 성립되며, \*는 선형 컨볼루션을 나타낸다.

$$\begin{aligned} h_k &= [h_0 \quad h_1 \quad h_2 \quad \dots \quad h_{N-1}] \\ f_k &= [f_0 \quad f_1 \quad f_2 \quad \dots \quad f_{N-1}] \\ r_k &= s_k * h_k + n_k, \quad z_k = r_k * f_k \end{aligned} \quad (1)$$

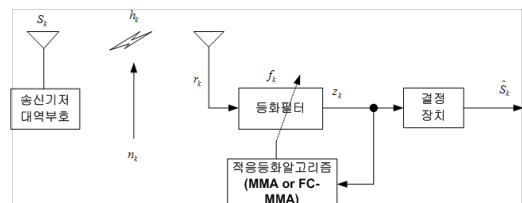


그림 1. 기저 대역 통신 시스템 모델  
Fig. 1. Baseband communication system model

## 2. MMA 알고리즘

MMA는 등화기 출력 전력에 비례하여 signal constellation point의 각 subset에 이들 multiple modulus중 1개를 할당시키는 원리이며, 이때 비용 함수는 2차원이 아닌 1차원의 합으로 구성된다. 비용 함수에서 등화기 출력의 실수와 허수부를 고려한 복소수 형태 이어서 채널 위상 찌그러짐과 위상에 의한 constellation 회전 특성을 보상할 수 있고, 정상 상태에서 misadjustment에 의한 영향이 적으므로 등화 잡음이 적게 된다. MMA 적응 등화 알고리즘은 CMA 알고리즘을 개선한 것으로 등화 필터 계수  $f_k$ 에 대한 특정한 비용 함수  $J$ 를 최소화시키도록, 이를 stochastic gradient algorithm을 적용하여 반복시킨다. 여기서 비용 함수와 오차 함수 및 탭 계수 갱신식은 각각의 알고리즘에 따라 상이하게 되며 MMA는 식(2)와 같으며, 여기서  $\mu$ 는 적응을 위한 스텝의 크기를 나타낸다.

$$J_{MMA} = E\left\{\left(|z_{kr}|^p - R_{MMA}^p\right)^2 + \left(|z_{ki}|^p - R_{MMA}^p\right)^2\right\} \quad (2)$$

$$R_{MMA}^p = \frac{E\{s_{kr}^{2p}\}}{E\{s_{kr}^p\}} = \frac{E\{s_{ki}^{2p}\}}{E\{s_{ki}^p\}}$$

$$\overline{e_{kMMA}} = z_{kr}(|z_{kr}|^2 - R_{MMA}^2) + j z_{ki}(|z_{ki}|^2 - R_{MMA}^2)$$

$$f_{k+1} = f_k - \mu \overline{e_{kMMA}} r_k^*$$

여기서  $R_{MMA}^p$ 를 constant modulus 라고 하며 등화기의 출력이 modulus 주위에 위치하도록 계수  $f_k$ 를 갱신 하게 된다. 식(2)에서  $p$ 는 정수로서 2의 값을 많이 사용하며  $z_{kr}$ ,  $z_{ki}$ 는 등화기 출력  $z_k$ 의 실수와 허수이고,  $S_{kr}$ ,  $S_{ki}$ 는 송신 신호  $S_k$ 의 실수와 허수를 각각 나타낸다. 식(2)의 MMA 비용 함수는 1차원의 CMA 비용 함수를 2 개 더한 형태로 표시되므로 등화기 출력을 복소 평면에서 표시해보면 4개의 점 ( $\pm R_{MMA} \pm j R_{MMA}$ ) 주위로 분포하게 된다.

## 3. FC-MMA 알고리즘

FC-MMA 은 오차 함수의 (+)와 (-) 영역을 분할하여 송신 신호 정상도에서 중간 심볼 레벨에 강제로 null을 삽입시킨다. null을 삽입시켜 송신 constellation에서 심볼 레벨의 중간에서 오차를 0으로 만들뿐 만 아니라 전체적인 오차 함수를 줄일 수 있게 된다. 이는 기존 MMA 오차 함수의 실수부와 허수부에 다음과 같이 주어지는 항을 곱하여 얻어진다.

$$(z_{kr}^2 - (m-1)^2)/R_{FC-MMA}^2, (z_{ki}^2 - (m-1)^2)/R_{FC-MMA}^2 \quad (3)$$

여기서  $m$ 은 송신 신호의 심볼 레벨수를 나타내며 16-QAM에서는 2, 64-QAM에서는 4의 상수값이고, FC-MMA의 실수와 허수부의 비용 함수와 오차 함수는 다음과 같이 된다.

$$J_{k,R,FC-MMA} = E\left[\frac{z_{kr}^6}{6R_R} + \frac{(m-1)^2 z_{kr}^2}{2} - \frac{z_{kr}^4}{4} - \frac{(m-1)^2 z_{kr}^4}{4R_R} + H_R\right] \quad (4)$$

$$J_{k,I,FC-MMA} = E\left[\frac{z_{ki}^6}{6R_I} + \frac{(m-1)^2 z_{ki}^2}{2} - \frac{z_{ki}^4}{4} - \frac{(m-1)^2 z_{ki}^4}{4R_I} + H_I\right]$$

$$\overline{e_{k,FC-MMA}} = \frac{(z_{kr}^2 - (m-1)^2)}{R_R} z_{kr}(z_{kr}^2 - R_R) + j \frac{(z_{ki}^2 - (m-1)^2)}{R_I} z_{ki}(z_{ki}^2 - R_I)$$

여기서  $H_R$ ,  $H_I$ 는  $J_{k+1,R,I} \geq 0$ 이 되도록 선택되어지는 적분 상수를 말하며 다음의 식 (5)와 같이 된다.

$$H_{R,I} = \frac{R_{R,I} [3(m-1)^2 - R_{R,I}]}{12} \quad (5)$$

constant modulus 는 수렴 후 등화기 출력의 통계치가 송신 심볼의 통계치와 matching시키도록 등화기 이득을 조절하는데 중요한 역할을 수행하며 다음과 같이 계산된다.

$$R_R = \frac{E[s_{kr}^6 - s_{kr}^4(m-1)^2]}{E[s_{kr}^4 - s_{kr}^2(m-1)^2]}, R_I = \frac{E[s_{ki}^6 - s_{ki}^4(m-1)^2]}{E[s_{ki}^4 - s_{ki}^2(m-1)^2]} \quad (6)$$

식 (5)와 (6)을 이용하면 FC-MMA 알고리즘에서의 탭 계수 갱신식은 다음과 같이 된다.

$$f_{k+1} = f_k - \mu \overline{e_{k,FC-MMA}} r_k^* \quad (7)$$

## III. 컴퓨터 시뮬레이션

적응을 위한 스텝 크기에 따른 FC-MMA 블라인드 적응 등화 알고리즘의 성능 변화를 평가하기 위하여 하기 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위한 파라미터로는 SNR을 30dB, 스텝 크기  $\mu$ 를 0.0003, 0.0009, 0.0015의 3가지를 적용하였고, 등화기 적응 필터의 차수는 15차 FIR로 동일하였다. 송신 복소 신호 16-QAM 신호를 발생시킨 후 부호간 간섭이 발생하는 통신 채널을 통과 및 잡음 신호  $n_k$ 를 부가한 후 수신 신호  $r_k$ 를 얻었으며 시뮬레이션을 위한 신호 처리 과정을 그림 2에 나타내었다. QAM 신호를 발생시킨 후 채널을 통과시킨 후 원하는 SNR의 잡음을 부가시켜 수신 신호를 획득하였다. 이 신호를 이용하여 식 (3)에서 식(7)까지를 발생시키면서 적응 등화기 계수를 갱신시키면서 채널에서 발생하는 찌그러짐을 보상하였다. 또한 이 과정에서 등화기의 성능 관련 지수를 적용하여 계산하였으며, 그림 3은 부호간 간섭을 발생시키는 통신 채널의 주파수

전달 함수를 진폭과 위상으로 구분하여 나타낸 것이다. 진폭 전달 함수의 경우 주파수에 따라 통과되는 이득이 3.5dB 범위 내에서 많은 변동하며, 위상은 경우 주파수마다 기울기가 일정치 않아 군지연이 발생됨을 알 수 있다.

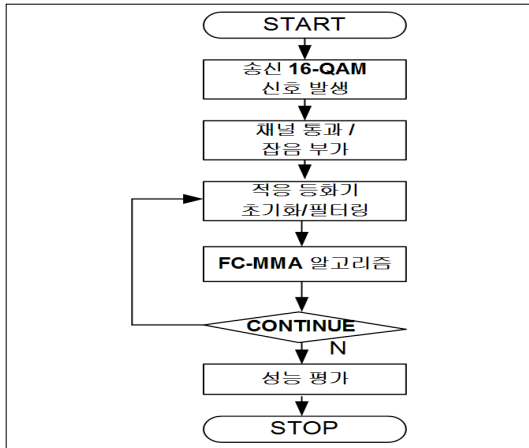
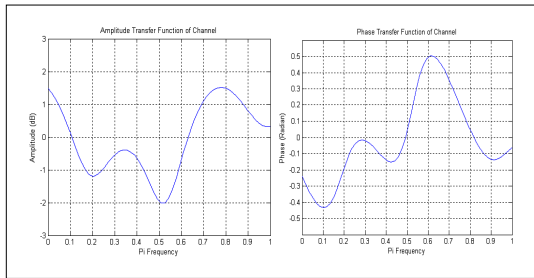


그림 2. 신호 처리 흐름도  
Fig. 2. Signal processing flowchart



(a) 진폭 전달 함수 (b) 위상 전달 함수

그림 3. 채널의 주파수 전달 함수  
Fig. 3. Frequency transfer function of channel

이상의 시뮬레이션 환경을 통하여 FC-MMA 알고리즘의 스텝 크기에 따른 성능을 평가하였으며, 이를 위한 지수로는 등화기 출력 신호 constellation, 잔류 isi와 최대 찌그러짐, MSE, SER를 적용하였다. 그림 4는 부호간 간섭을 제거된 후의 정상 상태에서 등화기 출력 신호 constellation을 나타낸 것이다. 어떤 스텝 크기에서도 16개의 심볼점은 구분되며 이들이 square 형태로 분포하기 때문에 부호간 간섭에 의한 진폭과 위상 찌그러짐이 상당히 보상됨을 알 수 있다. 그러나 각 신호점을 나타내는 폭이 적고 좁으며 신호점간의 거리가 클수록 우수한 보상 특성을 갖는 알고리즘이므로 스텝 크기가 적을수록 우수함을 알 수 있다.

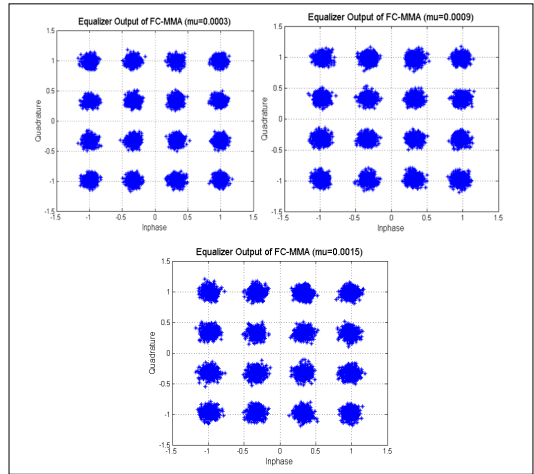


그림 4. 등화기 출력 신호  
Fig. 4. Equalizer output signal

두 번째로 성능을 나타내는 지수로는 잔류 isi (Residual isi)와 최대 찌그러짐 (Maximum Distortion)과 MSE를 사용하였다. 먼저 잔류 isi는 등화 필터 계수  $f_k$ 가 완전 보상이 될 때 시간 영역에서는 채널과 등화기의 종합 성능은 임펄스 신호가 되며 주파수 영역에서는 평탄한 전달 특성을 갖게 된다. 그러나 시간 영역에서 이의 완전 보상은 불가능해 되어 임펄스 성분을 제외한 나머지 잔류 성분의 전력양을 나타내므로 이들의 양이 적을수록 우수한 성능을 갖게 되며, 최대 찌그러짐은 잔류 isi 성분들의 전압을 의미하므로 이들은 매우 유사한 지수이다. 마지막으로 MSE는 이들의 알고리즘에서 등화기 출력과 결정 장치 출력간의 자승 오차값을 나타낸다. 그림 5는 두 번째 성능 평가 지수인 잔류 isi 성능을 16-QAM 신호를 대상으로 10000회 반복 수행시킬 때의 결과를 나타낸 것이다. 전체적으로 이들 알고리즘이 약 -23dB 정도로 안정되게 수렴함을 알 수 있으며, 시뮬레이션 경험상 잔류 isi양이 -20dB를 정상 상태로 볼 때 스텝 크기가 클수록 이에 도달하는 속도가 빠르며, 크기가 적을수록 수렴 속도는 느려짐을 알 수 있다. 이의 결과는 그림 6의 최대 찌그러짐 성능에서도 유사한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그림 7은 세 번째 지수인 MSE 성능 곡선을 나타낸 것으로서 이는 결정 장치의 전후에서 얻은 것이다. MSE 성능은 결정 장치에서 샘플링 순간의 timing jitter로 해석될 수 있으며, 여기에서도 수렴 속도가 빠를수록 MSE 성능이 열화됨을 알 수 있다. 원래 FC-MMA는 MMA보다 송신 신호의 심볼점 사이에 fast convergence를 위하여

강제적으로 null의 삽입하여 수렴 속도를 더욱 개선시켰지만, 이들도 스텝 크기에 영향을 받음을 알 수 있다.

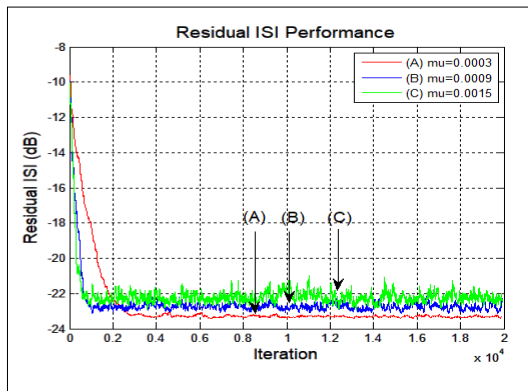


그림 5. 잔류 isi 성능  
 Fig. 5. Residual isi Performance

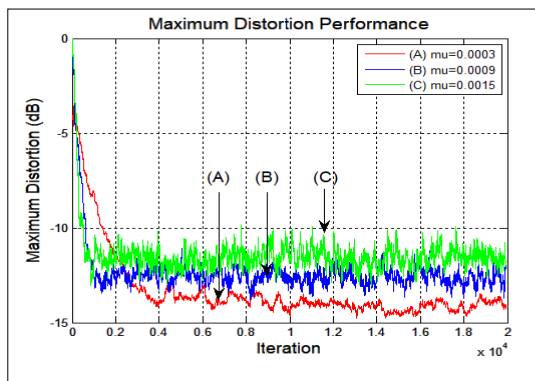


그림 6. 최대 찌그러짐 성능  
 Fig. 6. Maximum Distortion Performance

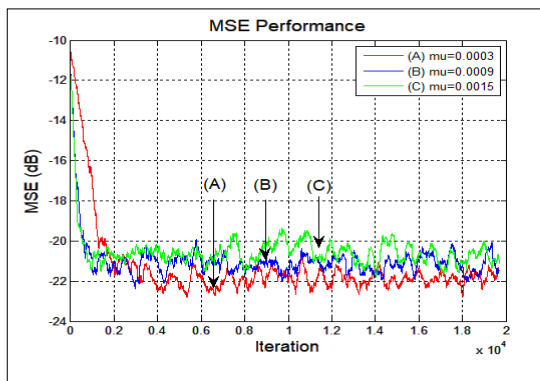


그림 7. MSE 성능  
 Fig. 7. MSE Performance

표 1은 3가지의 스텝 크기에 대한 그림 5, 6, 7의 정상적인 등화 성능 지표에 대한 정량화된 결과를 나타낸 것이다. 잔류 isi와 MSE의 경우  $-20\text{dB}$ 과 최대 찌그러짐의 경우  $-12\text{dB}$ 의 정상 상태에 도달하는데 필요한 iteration 수와 정상 상태 이후의 잔류량들의 평균과 분산값을 나타내었다. 스텝 크기가 클수록 정상 상태에 도달하는데 소요되는 iteration의 수가 적어서 수렴 속도가 우월함을 알 수 있지만, 정상 상태 이후의 잔여량의 평균과 분산값이 증대되어 등화 성능 관점에서는 열화됨을 알 수 있다.

표 1. 수렴 속도와 등화 성능의 통계치  
 Table 1. Statistics of convergence speed and equalization performance

	스텝 크기	정상 상태 도달 까지 iteration 수	정상 상태 이후의 잔여량 평균	정상 상태 이후의 잔여량 분산
잔류isi	0.0003	1274	0.0048	$3.17e-7$
	0.0009	507	0.0053	$1.013e-7$
	0.0015	315	0.0060	$2.03e-7$
MSE	0.0003	1262	0.0067	$6.33e-7$
	0.0009	613	0.0077	$5.19e-7$
	0.0015	511	0.0087	$8.18e-7$
최대 찌그러짐	0.0003	2319	0.2020	$1.025e-4$
	0.0009	906	0.2357	$1.052e-4$
	0.0015	844	0.2639	$2.15e-4$

FC-MMA 알고리즘의 스텝 크기에 의한 잡음의 강인성(robustness)를 알아보기 위하여 신호 전력과 채널에서 부가되는 잡음 전력의 비를 나타내는 신호대 잡음비에 대한 SER (Symbol Error Rate) 성능을 그림 8에 나타내었다. 그림에서 모든 신호대 잡음비에서 스텝 크기가 적을수록 SER 성능이 우월함을 알 수 있고, 신호대 잡음비가  $10\sim 25\text{dB}$ 의 일반적인 범위내에서는 이들의 차이가 미미하지만, 그 이상에서의 신호대 잡음비에서는 스텝 크기에 따라 민감해지며 이에 의한 SER 성능에 영향이 커짐을 알 수 있다. SER이  $10^{-2}$ 에서 스텝 크기를 적게 조정하므로써 약  $2\text{dB}$ 의 등화 이득을 얻을 수 있으며, SER값을 이보다 낮게 설정하는 경우 등화 이득이 개선됨을 알 수 있다.

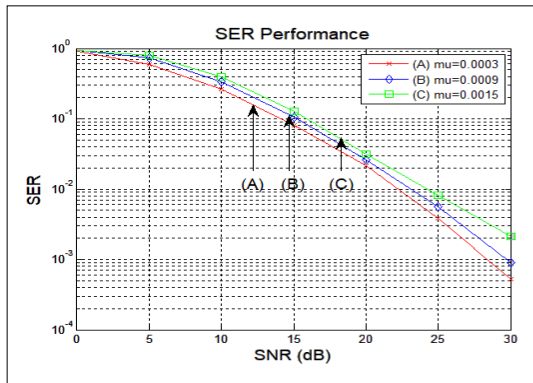


그림 8. SER 성능  
Fig. 8. SER Performance

#### IV. 결 론

논문에서는 MMA 적응 등화 알고리즘의 수렴 특성을 개선한 FC-MMA에서 스텝 크기에 따른 성능을 평가하였다. 일반적으로 FC-MMA는 송신 심볼의 중앙에 null을 삽입하는 비용 함수를 이용하여 기존 MMA 보다 수렴 속도를 빠르게 할 수 있지만, 이때 스텝 크기에 따른 성능을 독립적으로 평가하였다. 시뮬레이션 결과 스텝 크기가 적을수록 수렴 속도는 약 2배 정도 느려지지만, 정상 상태 이후의 성능을 결정하는 잔여량에서는 개선되며 잡음에 대한 강인성인 SER 성능도 개선됨을 확인하였다. 특히 SER 성능의 경우 신호대 잡음비가 10~25dB 범위인 경우 스텝 크기에 의한 심볼 오류 성능이 다른 범위보다 매우 적은 특성이 있음을 확인하였다. 이와 같은 FC-MMA 알고리즘에 대한 연구 결과는 통신 채널의 급격한 변화 또는 순단과 같은 적응 등화기의 재적응이 필요한 상황에서 얼마나 빠르게 정상 상태에 도달할 수 있는가를 나타내므로 등화기로서의 중요한 성능 지수가 되며, 채널의 신호대 잡음비에 따른 초기의 비정상 상태인 경우 스텝 크기를 크게 하여 빠른 수렴 속도로 정상 상태에 도달시킨 후 스텝 크기를 적게 조정함으로써 비정상 상태에 신속히 적응함으로써 통신 채널 환경 변화에 유연하게 적응할 수 있도록 기반 기술로서 많은 유용성을 가진다.

#### References

- [1] S.U.H.Qureshi, "Adaptive Equalization", Proc. of the IEEE 73(9), pp.1349~1387, 1985.  
DOI : <https://doi.org/10.1109/PROC.1985.13298>
- [2] D.N.Godard, "Self-recovering Equalization and carrier tracking in two-dimensional data comm. system", IEEE Trans. on Comm., Vol. 28, pp.1867~1875, Nov. 1980.  
DOI : <https://doi.org/10.1109/TCOM.1980.1094608>
- [3] S.A.Sheikh, P.Fan, "Fast Convergence Multimodulus Algorithm for Blind Equalization of QAM Signals", Int. Conf. on Information and Emerging Technology, pp.1~5, 2007.  
DOI : <https://doi.org/10.1109/ICIET.2007.4381307>
- [4] D. Kolosovs, A. Zelenkov, A. Jersovs, "Enhanced Decision Adjusted Modulus Algorithm for Blind Equalization", Procedia Computer Science, Vol. 104, pp.429~436, 2017.
- [5] S.Abrar, A.Zerguine, "A New Multimodulus Blind Equalization Algorithm", Int. Conf. on Networking and Communication, pp.165~169, 2004.  
DOI : <https://doi.org/10.1109/INCC.2004.1366598>
- [6] V.Weerackody, S.A.Kassam, "Convergence Analysis of an algorithm for blind equalization", IEEE Signal Proc. Letter, Vol.13, No.1, pp.37~40, Jan. 2006.
- [7] Lim S.G., "A Performance Comparison of CR-MMA and FC-MMA Adaptive Equalization Algorithm in 2 Dimensional QAM Signal", Journal of I.W.I.T., Vol.18, No.1, pp.85~90, Feb. 2018.
- [8] K.N.Oh, "A Design of Error Signals Effective for Blind Equalization in Both of Initial Phase and Steady-State", Journal of K.I.I.T., Vol.10, No.6, pp.45~51, June 2012.

#### 저 자 소 개

##### 임 승 각(정회원)



- 1983년 숭실대학교 전자공학과 학사 졸업.
- 1985년 경희대학교 전자공학과 석사 졸업.
- 1997년 경희대학교 전자공학과 박사 졸업
- 2021년 현재 공주대학교 정보통신공

학부 교수.

- 주관심분야 : 방송/통신 시스템, 이동통신

※ 이 논문은 2021년 공주대학교 학술 연구 지원 사업의 연구 지원에 의하여 연구되었음  
This work was supported by the research grant of the Kongju National University in 2021.