

논문 2012-49TC-5-13

# MIMO 무선 성능 성능평가 방법에 관한 연구

( On MIMO OTA Performance Characterization Method for Mobile Devices with Multiple Antennas )

조용상\*, 김영렬\*, 노승표\*, 심혜정\*, 김인경\*\*

( Y.S Cho, Y.R Kim, S.P No, H.J. Shim, and I.K. Kim )

## 요약

최근 국내외 주요 이동통신 사업자들이 본격적으로 4G 무선표준 방식인 LTE (Long Term Evolution) 서비스를 시작 하면서 LTE 방식을 지원하는 이동단말의 MIMO (Multi Input-Multi Output) OTA (Over The Air) 성능 평가 방법의 필요성이 중요해 지고 있다. LTE 방식은 high packet data rate을 기반으로 한 무선 데이터 서비스이므로 LTE 단말의 Downlink Data throughput향상을 위한 MIMO 안테나 설계가 매우 중요하다. 본 논문에서는 3GPP (3rd Generation Partnership Project)에서 논의되고 있는 MIMO OTA 측정 시스템 중 하나인 Anechoic chamber 방식에 기반 한 MIMO OTA test system 시스템에 대한 이론 및 실험적인 검증을 수행하고 기존의 antenna의 성능 평가 방법과의 비교를 통해 데이터의 유효성을 검증하였다.

## Abstract

Since the major cellular data service providers in U.S, Japan as well as in Korea started the LTE (Long Term Evolution) service, there has been more strong need for the methods that can accurately measure the MIMO (Multi Input-Multi Outout) OTA (Over The Air) performance of LTE handsets because the performance of the MIMO antenna determines the packet data rates in the downlink and therefore the higher system throughput of the network. In this regard, there has been a lot discussions in 3GPP on the candidate MIMO OTA test solutions. In this paper, a faire comparison has been done for the conventional method, the Envelop Correlation Coefficient (ECC) measurements, and the anechoic chamber based MIMO OTA test solution, one of the candidate system being discussed in 3GPP. The evaluations and the comparisons are conducted by numerically and experimentally.

**Keywords :** MIMO, OTA, LTE, ECC, Correlation, Channel model

## I. 서론

다중 안테나를 포함하는 단말의 무선 성능에 영향을 주는 요소는 안테나의 efficiency, correlation특성, baseband chip의 MIMO channel estimator 성능, channel환경 등에 의해 복합적으로 영향을 받는다. 이러한 종합적인 성능 평가는 주로 실제 서비스 망이 구축된 field환경에서 가능하므로 다중 안테나 방식을 지원하는 이동 단말의 무선 성능 평가를 위해서는 많은

비용과 시간이 필요하다.

실험실 환경에서 앞서 언급한 요소들을 모두 고려하여 다중 안테나를 포함하는 단말의 성능평가가 가능하고 정량화될 수 있다면 많은 시간과 비용을 절감함과 동시에 단말의 성능 최적화를 위한 안테나 개발 환경 및 검증 환경을 제공할 수 있을 것이다.

이러한 종합적인 MIMO 이동 단말에 대한 성능 평가 방법에 대한 필요성이 중요해 짐에 따라 지난 2008년부터 꾸준히 MIMO OTA testing methodology에 대한 연구 결과들이 research forum과 standardization forum에서 제안되어 논의되고 있다. 대표적으로 European Cooperation in Science and Technology COST

\* 정회원, \*\* 정회원-교신저자, LG전자

(LG Electronics)

접수일자: 2012년3월13일, 수정완료일: 2012년5월12일

COST2100의 뒤를 이을 IC1004가 있으며<sup>[1]</sup>, 3GPP RAN4 working item으로서 MIMO OTA methodology에 대한 논의가 활발히 진행되고 있고<sup>[2]</sup>, CTIA에서도 동일한 논의가 진행되고 있다<sup>[3]</sup>. 주요 그룹들에서 공통적으로 논의되고 있는 MIMO OTA methodology중 하나인 “Anechoic chamber with multiple probe antenna” 방법<sup>[4]</sup>은 외부에 연결된 fading emulator로 pre-faded MIMO OTA 신호를 생성하여 anechoic chamber내의 다수의 probe 안테나를 통해 spatial fading 환경을 구현한다. 이러한 방식의 MIMO OTA system은 3GPP SCM(E)<sup>[5]</sup>, WINNER<sup>[6]</sup> 및 IMT-Advanced<sup>[7]</sup> 등의 geometrical channel model을 기반으로 space-temporal fading channel을 anechoic chamber 중앙에서 실현함으로써 단말의 MIMO 안테나 성능과 수신기의 MIMO 디코딩 성능을 동시에 평가할 수 있도록 제안되었다.

본 논문에서는 MIMO OTA system에 대한 이론 및 실험적 검증을 수행하기 위해 기존의 안테나 평가 방법인 Power Azimuth Spectrum (PAS) 모델과 안테나의 방사 패턴을 이용하여 얻어진 안테나 correlation 특성 결과와 비교하였다. 이를 위해 두 개의 다이폴 안테나간의 이격거리  $\Delta_l$ 의 변화에 따른 cross-correlation 특성을 두 가지 방법으로 각각 구하여 이론적 및 실험적으로 비교하였다.

제 II장에서는 두 개의 다이폴 안테나간의 이격 거리에 따른 cross-correlation 특성을 안테나 방사패턴과 PAS 모델을 기반으로 분석하였다. 비교를 위해 MIMO OTA system에서 적용될 3가지 종류의 PAS 분포함수를 이용하여 correlation 특성 분석을 수행하였으며 PAS 모델과 안테나 coupling (cpl) 효과가 correlation 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 제 III장에서는 제 II장에서 사용된 세 가지 PAS 모델과 동일한 분포함수를 갖는 channel model을 사용하여 MIMO OTA system에서 다이폴 안테나의  $\Delta_l$  변화에 따른 cross-correlation 측정 결과에 대하여 논하였고 마지막으로 제 IV장에서는 건문의 결론을 맺는다.

## II. PAS 모델을 이용한 다이폴 안테나의 correlation 특성 분석

두 안테나간의 cross-correlation,  $\rho_{12}$ 은 일반적으로 안테나의 far-field radiation pattern을 이용하여 다음의

식 (1)로부터 얻을 수 있다<sup>[8]</sup>.

$$\rho_{12} = \frac{\int F_1(\Omega) F_2^*(\Omega) P_L(\Omega) d\Omega}{\sqrt{\int |F_1(\Omega)|^2 P_L(\Omega) d\Omega \cdot \int |F_2(\Omega)|^2 P_L(\Omega) d\Omega}} \quad (1)$$

$$P_L(\phi) = \sum_{k=1}^{N_c} \frac{Q_{L,k}}{\sigma_{L,k} \sqrt{2}} e^{[(-\sqrt{2}|\phi - \phi_{0,k}|)/\sigma_{L,k}]} \quad (2)$$

식 (1)로부터 얻은  $\rho_{12}$ 은 anechoic chamber에서 측정된 안테나의 far-field RP  $F_1, F_2$ 가 반영되어 두 개의 다이폴 안테나 이격거리,  $\Delta_l$ 에 따른 cpl 효과를 포함한다. 또한 식 (2)와 같이 Laplacian<sup>[9]</sup> 또는 2D-Uniform PAS (Power Azimuth Spectrum) field distribution 함수를 적용한다면 PAS의 형태와 조건에 따라 안테나 correlation이 어떻게 영향을 받는지 분석할 수 있다.

본 장에서는 현재 3GPP RAN4 MIMO OTA system 검증에 사용되고 있는 round-robin channel model<sup>[10]</sup> 중 Uniform multi-path channel, SCME Urban Micro model에 기반 한 Single spatial multi-path channel, SCME Urban Macro (SCME UMa) channel, 모두 세 가지 모델을 선정하여 각각의 channel model에서 정의된 parameter들을 기반으로 PAS를 정의하고 이들을 이용하여 dipole 안테나의  $\Delta_l$  변화에 따른 correlation 특성을 분석하였다. 그림 1에는  $\rho_{12}$ 을 얻기 위해 사용된 세 종류의 PAS 모델들을 Azimuth면상에 나타내었다. 각 PAS 모델을 구성하기 위한 parameter들은 round-robin channel model<sup>[10]</sup>의 parameter들을 적용하

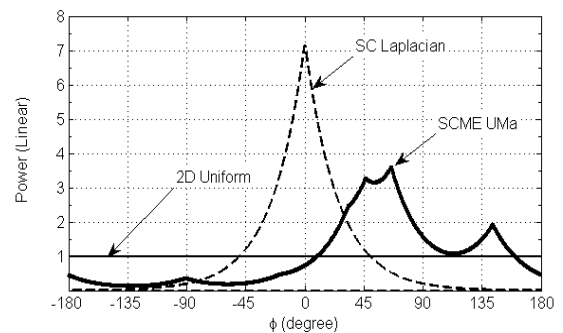


그림 1.  $\rho_{12}$ 을 구하기 위한 channel model별 Power Azimuth Spectrum (PAS)

Fig. 1. Power Azimuth Spectrum (PAS) models to be applied for  $\rho_{12}$  calculation.

였다. SC(Single cluster) model의 Laplacian PAS는 식 (2)의  $N_C=1$ 인 경우로서 그림 3의 점선과 같이 Angle of Arrival (AoA)를 중심으로 angular spread,  $\sigma=35^\circ$ 의 Laplacian 분포를 갖는다. Laplacian PAS는 Gaussian PAS보다 channel measurement 결과에 보다 근접한 특성을 갖는다고 보고되었으며<sup>[11]</sup>, SCM/SCME, WINNER model 등에 채택되었다<sup>[5-7]</sup>. SCME UMa시나리오에 해당되는 PAS는 식 (2)에서  $N_C=6$ 인 경우로서 그림 1에서와 같이 6개의 cluster에 의한 composite Laplacian

PAS형태를 갖는다. 2D uniform PAS는 Azimuth 면의 전 방향으로부터 균일한 power를 가지며 그림 1에 실선으로 나타내었다. PAS model별로 peak power가 다른 이유는 동일 energy를 가정하기 위한 normalize에 따른 결과이다.

먼저 안테나 cpl 효과가  $\rho_{12}$ 에 미치는 영향을 확인하기 위하여 안테나 cpl 효과가 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우의 안테나간의 cross-correlation 특성을 비교할 필요가 있다. 그림 2에는 세 가지 PAS 모델들이 각각 입사 필드 분포함수로 주어졌을 때, 다이폴 안테나이격거리,  $\Delta_l=0.1, 0.125, 0.25, 0.5, 0.75\lambda$  조건에 따른 correlation 변화도를 나타내었다. 이상적인 두 개의 다이폴 안테나의 correlation 특성은 Bessel function of the first kind를 이용한 cross correlation function을 이용하여 계산되었다<sup>[9]</sup>. 측정 데이터에 기반한 안테나의 correlation 특성은 다이폴 안테나의 RP측정 시 cpl효과를 포함하도록 두 개의 다이폴 안테나를 동시에 위치시킨 상태에서 측정한 RP 또는 cpl효과를 배제하기 위해 하나의 안테나만을 위치시킨 상태에서 측정한 RP로부터 얻어진 측정 데이터를 식 (1)에 적용하여 계산되었다. 그림 2 (a)의 2D uniform PAS 모델의 경우, cpl 효과가 배제된 RP로부터 얻은  $\rho_{12}$ 의 경향은 이론치와 유사한 결과를 보이지만 cpl 효과가 포함된 RP로부터 얻은  $\rho_{12}$ 의 경향은 이론치보다 크게 낮아짐을 알 수 있다. 특히  $\Delta_l \geq 0.25\lambda$ 에서는  $\rho_{12}$ 가  $\Delta_l$ 에 관계없이 '0'에 근접하여 전반적으로  $\rho_{12}$ 값이 크게 낮아짐을 확인하였다. 그림 2 (b)의 SC Laplacian PAS 조건에서도 cpl 효과가 배제된 RP의  $\rho_{12}$ 값은 이론치와 거의 일치되나 cpl 효과가 포함된 RP로부터 얻어진  $\rho_{12}$ 값의 경우 uniform PAS 조건에서와 유사하게 크게 낮아지는 경향을 보인다. 그러나  $D=0.5\lambda$  조건에서는 cpl 효과가 없는 RP의 결과보다  $\rho_{12}$ 가 상승되는 결과를 가져왔다. 이러한 현상은 SC Laplacian PAS의분포가  $\phi = 0 \pm \sigma/2$ 방향에 집중되어 있어 cpl효과에 의해서 왜곡된 RP의 형태에 따라 특정 AoA에서 관측될 수 있는 현상이다.

그림 2 (c)의 SCME UMa PAS 환경의 경우는 6개의 spatial cluster의 AoA가  $\phi = 45 \sim 66^\circ$  부근과  $143^\circ$ 에 분산되어 다이폴 안테나 배열의 broad side에서  $45^\circ \sim 140^\circ$ 의 offset각도를 가지고 있다. 이로 인해 AoA offset=0인 조건에서는 다른 PAS model 대비  $\Delta_l$  증가에 따른  $\rho_{12}$ 감소의 폭이 작게 나타났다.

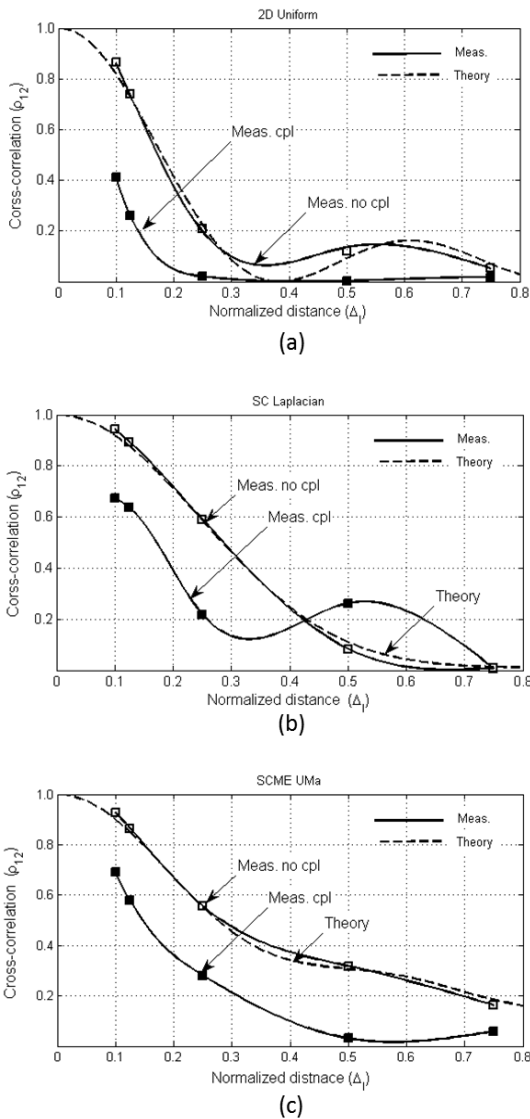


그림 2. PAS 모델별  $\Delta_l$  변화에 따른 correlation 특성곡선 (a) 2D uniform PAS, (b) Single cluster Laplacian PAS, (c) SCME UMa PAS

Fig. 2. Correlation characteristics impacted by  $\Delta_l$  under (a) 2D uniform PAS, (b) Single cluster Laplacian PAS, (c) SCME UMa PAS

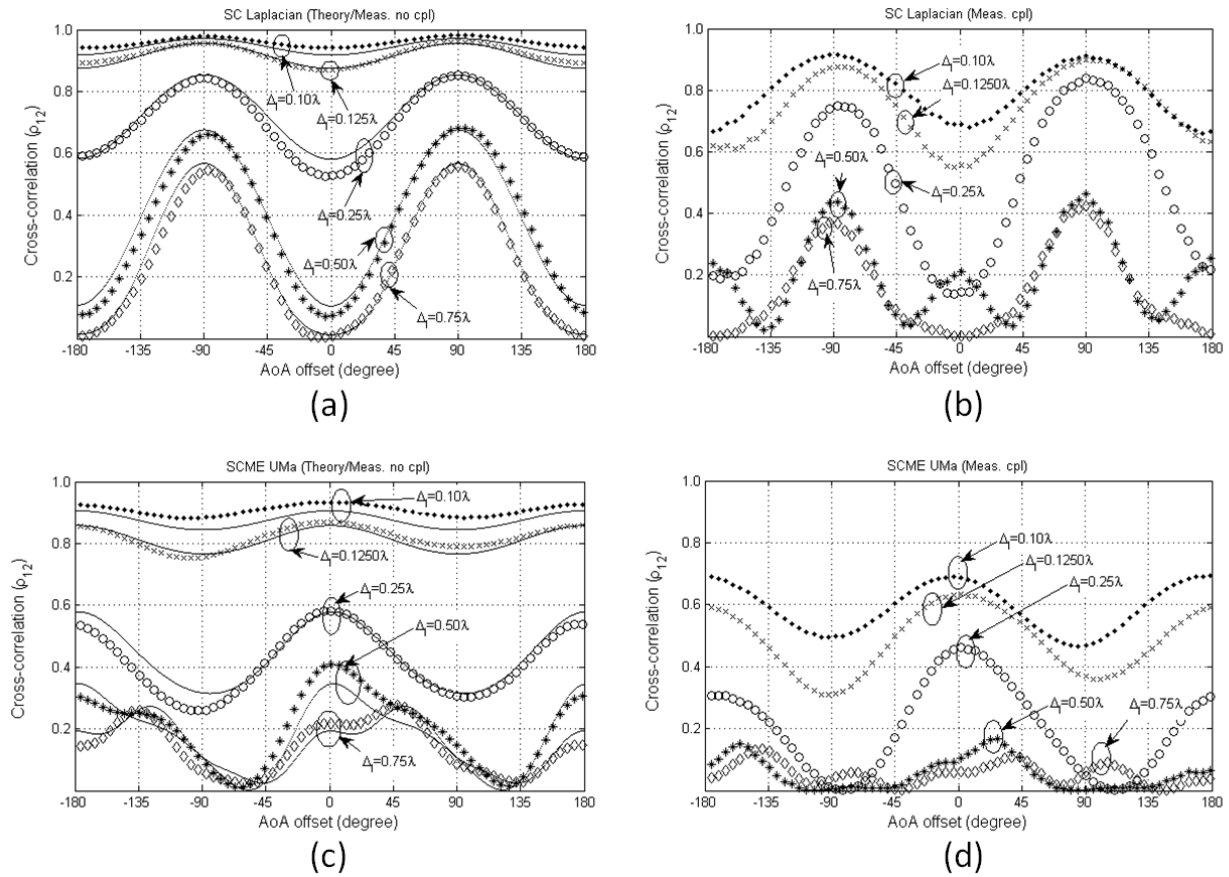


그림 3. AoA offset 및  $\Delta_l$ 에 따른  $\rho_{12}$  특성, (a) SC Laplacian PAS 모델 조건에서의 이론치(실선) 및 cpl효과가 배제된 RP로부터 얻은  $\rho_{12}$ , (b) SC Laplacian PAS 모델 조건에서의 cpl효과가 포함된 RP로부터 얻은  $\rho_{12}$ , (c) SCME UMa PAS 모델 조건에서의 이론치(실선) 및 cpl효과가 배제된 RP로부터 얻은  $\rho_{12}$ , (d) SCME UMa PAS 모델 조건에서의 cpl효과가 포함된 RP로부터 얻은  $\rho_{12}$

Fig. 3.  $\rho_{12}$  characteristics against AoA offset and  $\Delta_l$  condition under (a) SC Laplacian PAS and RP without cpl effect in comparison to the theoretical values (solid lines), (b) SC Laplacian PAS and RP with cpl effect, (c) SCME UMa PAS and RP without cpl effect in comparison to the theoretical values (solid lines), (d) SCME UMa PAS and RP with cpl effect

그림 2의 결과를 요약해 보면 안테나 cpl효과 유무에 따른  $\rho_{12}$  변화의 폭은 세 종류의 PAS 모델의 경향이 유사하나  $\Delta_l$  증가에 따른  $\rho_{12}$  변화의 폭의 경향성은 PAS 모델별 AoA 및 Cluster의 분포에 따라 다르다. 따라서 PAS 모델 AoA 또는 AoA offset에 따른  $\rho_{12}$  변화도를 고려할 필요가 있다.

그림 3는 AoA offset에 따른 correlation 특성 변화가 없는 2D uniform PAS 모델을 제외하고 SC Laplacian PAS와 SCME UMa PAS에 대하여 AoA offset 범위  $-180^\circ \sim 180^\circ$ 에서의  $\rho_{12}$  변화도를 나타내었다. 주어진 두 개의 다이폴 안테나간의 이격거리 조건은 그림 2의 경우와 동일하게 주어졌다. 그림 3 (a)에는 SC Laplacian PAS 모델 조건에서의 이상적인 다이폴 안테나의

correlation 특성을 실선으로 나타내어 cpl 효과가 배제된 RP로부터 얻은 correlation특성과 비교하여 도시하였다. (b)에는 cpl 효과가 포함된 RP로부터 얻은 correlation 특성을 나타내었다. (c)와 (d)에는 SCME UMa PAS 모델 조건에 대한 결과를 나타내었다. 각각의 PAS 모델에 조건에서 AoA offset 변화에 대한  $\rho_{12}$  변화 주기는  $\pi$ 이나 최대 점과 최소 점이 되는 AoA offset은 모델별 PAS의 peak위치에 따라 PAS모델별로 각각 다르다.

안테나 cpl 효과는  $\rho_{12}$ 을 전반적으로 낮게 할 뿐만 아니라 그 변화의 폭이 증가시킨다. 이러한 경향은 SC Laplacian PAS에서 더 두드러지게 나타났다. 안테나 cpl 효과가 가장 두드러지게 나타난 조건은  $\Delta_l=0.25\lambda$ 조

건이었고  $\Delta_l=0.5\lambda$ 에서는 AoA offset이  $0^\circ$ 에 가까워짐에 따라  $\rho_{12}$  변화의 경향이 역전되는 현상이 존재 한다. 그림 3 (c-d)의 SCME UMa PAS 모델 결과의 경우  $\Delta_l=0.1$  및  $0.125\lambda$  조건에서 cpl 효과에 의해 correlation 특성이 크게 감소하였다.

Unifrom PAS 모델과 달리 SC Laplacian PAS와 SCME Uma PAS 조건에서는 AoA offset에 따라  $\rho_{12}$ 가  $\pi$ 의 주기를 가지며 antenna cpl 효과에 의해 그 형태가 달라지므로 antenna 성능 평가를 특정 AoA offset에서 진행할 경우 dipole antenna array의 broad side orientation과 incident field 입사각 차이에 따라  $\rho_{12}$  편차가 크게 발생된다. 따라서  $-180^\circ \leq \text{AoA offset} \leq 180^\circ$  범위에서  $\rho_{12}$ 의 평균값이 반드시 고려되어야 한다.

### III. MIMO OTA system을 이용한 다이폴 안테나의 correlation 측정

MIMO OTA system은 Azimuth plane상에 probe용 OTA 안테나를 균일한 각도 간격으로 그림 4와 같이 ring의 형태로 배열시키고 이들 probe용 OTA 안테나를 이용하여 2D Laplacian PAS를 생성시킬 수 있다. Anechoic chamber 내에는 8개의 probe용 OTA 안테나가  $45^\circ$  간격으로 배열되어 있으며 각 probe용 OTA 안테나는 vertical 및 horizontal polarization용 급전 단자를 독립적으로 가지고 있어 PAS의 XPR (Cross polarization ratio)정도가 가능하다. MIMO OTA system에서의 PAS의 형성은 PAS의 AoA에 따라 8개의 OTA 안테나 중 2-4개를 선택하여 각각의 OTA 안테나로부터 출력되는 신호의 크기를 조절하여 PAS를 구현한다<sup>[4]</sup>.

MIMO OTA system에서의 dipole 안테나간의 cross-correlation측정은 LTE BSE (Base station emulator)장비로부터 2x2 MIMO LTE downlink신호를 생성하여 fading emulator의 input signal로 인가하고 fading emulator를 통해 spatial fading effect 및 PAS를 생성한다. 생성된 fading channel 신호는 fading emulator의 signal output과 연결된 probe용 OTA 안테나를 통해 chamber 중앙으로 전송된다. 전송된 2x2 MIMO 신호는 chamber 중앙에서 spatio-temporal fading channel 환경을 형성시킨다. Chamber 중앙에 위치한 두 개의 dipole 안테나 array로 수신된 신호는

RF cable을 통해 chamber 외부의 VSA(Vector signal analyzer)에서 데이터를 수집한다. VSA를 이용한 correlation 측정은 다음의 식 (3-4)으로부터 얻을 수 있다.

$$h_1 = FFT(S_1), h_2 = FFT(S_2) \quad (3)$$

$$\rho_{12} = \left| \frac{cov(h_1, h_2)}{\sqrt{cov(h_1, h_1) \cdot cov(h_2, h_2)}} \right| \quad (4)$$

VSA의 동기화 된 두 개의 수신 port를 이용하여 수집된 channel frequency response  $S_1, S_2$ 를 FFT (Fast Fourier Transform)을 통해 channel impulse response인  $h_1, h_2$ 으로 변환한다. impulse response를 Ideal dipole 안테나 array를 가정한 이론적인 channel correlation역시 channel impulse response  $h_1, h_2$ 로부터 두 채널 간의 channel covariance matrix를 구한 후 식 (4)에 따라  $\rho_{12}$ 을 구한다<sup>[12]</sup>.

실험에 사용된 channel model은 1장에서 사용된 PAS model과 동일한 PAS 특성을 갖는 round-robin channel model중에서 2D-Uniform Multi-path channel model, single spatial cluster channel model 및 SCME Urban Macro-cell channel model을 사용하였다.

그림 5은 2장에서 검증한 PAS model과 cpl효과가 포함된 RP로부터 얻은 correlation 특성과 그림 4의 MIMO OTA system에서 측정된 channel model별 correlation 특성을 비교한 결과이다. 안테나의 RP 및 PAS 모델과 식(1)로부터 얻은 결과 및 OTA system에

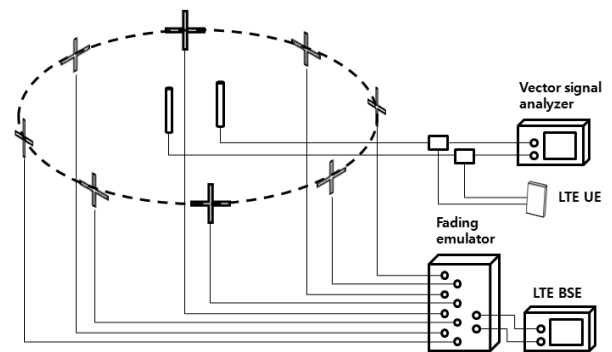


그림 4. Channel correlation 및 LTE 단말의 무선 Data throughput performance 측정을 위한 MIMO OTA system 구성도

Fig. 4. MIMO OTA system setup for measurement of data throughput performances and channel correlation properties.

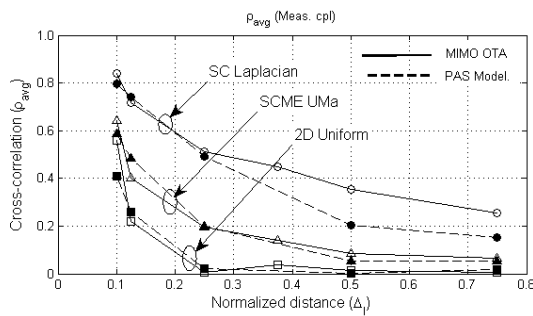


그림 5. MIMO OTA system에서 측정된 세 가지 Channel model에 대한 다이폴 안테나의  $\Delta_r$  변화에 따른 correlation 특성과 cpl 효과가 고려된 RP와 PAS model로부터 얻어진 correlation 특성 비교

Fig. 5. The comparison between the measured correlation characteristics in the MIMO OTA system and the correlation results obtained from the RP with cpl effect and the PAS models for the three selected channel models and  $\Delta_r$  variations

서 측정된 결과는 모두 AoA offset  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ 의 결과들에 대한 평균값이다. 그림 5의 결과로부터 MIMO OTA system에서 측정된 결과와 2장의 cpl효과가 고려된 RP 및 PAS model로부터 구한 다이폴 안테나의 correlation 특성이 single cluster model을 제외하고 거의 일치함을 알 수 있다. Single cluster model에서 두 가지 측정 방법에 차이가 발생하는 이유는 PAS가 단 하나만 존재하는 single cluster channel model의 경우 channel의 correlation 특성이 안테나 correlation 특성에 큰 영향을 미칠 정도로 지배적이기 때문이고 2D uniform과 같이 angular spread가 크거나 SCME UMa channel model과 같이 cluster의 개수가 증가할 경우 channel correlation 특성이 안테나의 cross-correlation 특성에 미치는 영향이 작아지기 때문이다.

그림 5의 결과에서 또 한 가지 내릴 수 있는 결론은 일반적으로 안테나 correlation 특성을 얻기 위해 일반적으로 적용되는 3D uniform PAS가정은 안테나의 correlation 특성을 실제 MIMO channel 환경에서 보다 낮게 예측하는 경향이 있으며 single cluster channel model의 경우는 실제보다 높게 예측하는 경향이 존재하므로 PAS 모델과 안테나 방사 패턴을 기반으로 안테나의 correlation 특성을 측정하고자 할 경우에는 반드시 이러한 PAS모델별 특성을 고려해야 한다. 상기 결론은 실제 MIMO channel이 multi spatial cluster 환경이라는 가정이 따른다.

## IV. 결 론

본 논문에서는 2D uniform 및 multi spatial cluster channel model의 경우에는 PAS모델 및 다이폴 안테나 방사패턴을 이용한 cross-correlation 특성 측정 결과와 MIMO OTA system에서의 결과가 일치함을 확인하였으며 안테나 cpl효과에 의한 correlation 특성 변화도 MIMO OTA system에서 동일하게 측정됨을 확인하였다. 그러나 Single spatial cluster channel model의 경우 correlation이 낮은 영역에서는 channel correlation 특성의 영향이 존재하여 두 방법의 결과에 차이가 존재하였다. 이러한 결과를 바탕으로 기존의 방사 패턴으로부터 안테나 correlation 특성을 구할 때 PAS 모델을 고려한다면 MIMO OTA system에서의 안테나의 MIMO 수신 성능에 대한 예측도 가능할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- [1] "http://www.cost2100.org/."
- [2] Vodafone, "Proposed SID revision for study item: Measurement of radiated performance for MIMO and multi-antenna reception for HSPA and LTE terminals," 3GPP TSG-RAN 54, RP-111754, Berlin, Germany, Dec. 6th-9th, 2011.
- [3] "http://www.ctia.org/."
- [4] Kyosti, Pekka, Nuutinen, Jukka-Pekka, Jamsa, Tommi, MIMO OTA test concept with experimental and simulated verification, Antennas and Propagation(EuCAP), 2010 Proceedings of the Fourth European Conference on Publication Year, 2010, Page(s), 1 - 5
- [5] Baum, D.S., Hansen, J., Salo, J., "An interim channel model for beyond-3G systems: extending the 3GPP spatial channel model (SCM)," in Proc. of the 61st IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC '05), Stockholm, Sweden, vol. 5, pp. 3132-3136, May 2005.
- [6] P. Kyosti et al., "IST-4-027756 WINNER II Deliverable 1.1.2. v.1.2, WINNER II Channel Models," IST-WINNER2, Tech. Rep., 2007
- [7] "Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced, ITU-R Report M.2135," ITU-R, Tech. Rep., 2008.
- [8] R. Vaughan and J. B. Andersen, Channels, Propagation and Antennas for Mobile Communications. The IEE, London, UK, 2003
- [9] S. Laurent, I.P. Klaus, E.M.Preben, From

Antenna Spacings to Theoretical Capacities-Guidelines for Simulating MIMO Systems, The 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2002, Vol. 2, pp: 587-592

[10] Measurement of radiated performance for MIMO and multi-antenna reception for HSPA and LTE terminals, 3GPP TR 37.976, v1.5.0, May, 2011  
 [11] Pedersen, K.I. Mogensen, P.E., Fleury, B.H., Spatial channel characteristics in outdoor

environments and their impact on BS antenna system performance, Vehicular Technology Conference, 1998. VTC 98. 48th IEEE Volume: , Page(s): 719 - 723 vol.2

[12] Kolmonen, V.-M.; Kermoal, J.-P.; Vainikainen, P., *Comparison of Correlation-Based and Ray-Based Radio MIMO Channel Models*, Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2006 IEEE 17th International Symposium on, Page(s): 1 - 5

저 자 소 개



조 용 상(정회원)  
 1997년 서울시립대학교 전기전자공학부 (공학학사)  
 1999년 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2004년~현재 LG전자 책임연구원

<주관심분야 : MIMO, 통신 시스템, 안테나>



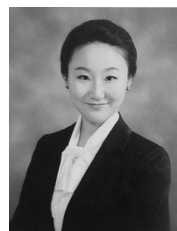
김 영 렬(정회원)  
 2005년 한양대학교 전자컴퓨터공학부 (공학학사)  
 2007년 한양대학교 전자전기제어계측공학과 (공학석사)  
 2007년~현재 LG전자 선임연구원

<주관심분야 : 통신 시스템, 안테나, 전자파해석>



노 승 표(정회원)  
 2004년 연세대학교 전기전자공학과 (공학학사)  
 2006년 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)  
 2006년~현재 LG전자 선임연구원

<주관심분야 : 통신 시스템, 신호처리, 안테나>



심 혜 정(정회원)  
 2010년 홍익대학교 전자전기공학부 (공학학사)  
 2010년~현재 LG전자 연구원  
 <주관심분야 : MIMO, 통신 시스템, 안테나>



김 인 경(정회원)  
 1983년 서울대학교 전자공학과 (공학학사)  
 1985년 서울대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1992년 University of Southern California EE-Systems Ph.D.

1992년~2005년 Hughes Network Systems, System Architect/Technical Director  
 2006년~현재 LG전자 4G/LTE 총괄 상무  
 <주관심분야: 통신 시스템, 신호처리, 안테나>