

24 GHz 이하 도심/부도심의 클러터 손실 측정 및 분석

Measurement and Analysis of Clutter Loss in Urban/Suburban below 24 GHz

강영흥 · 이형선* · 박성원** · 이일용** · 임종혁** · 윤대환**

Young-Heung Kang · Haeng-Seon Lee* · Sung-Won Park** · Il-Yong Lee** ·
Jong-Hyuk Lim** · Dea-Hwan Yoon**

요 약

최근 국립전파연구원에서는 5G 이동통신 도심/부도심 지역에서 빌딩에 의한 클러터 손실을 예측하기 위해 3, 6, 10, 18, 24 GHz 대역에서 전파측정을 수행하였다. 본 연구에서는 송신안테나 높이가 85 m일 때, 도심과 부도심환경에서 주파수에 따라 측정된 클러터 손실을 비교하며, ITU-R P.2108 예측모델과의 오차를 평가하였다. 도심이나 부도심 지역에서 주파수가 높을수록 클러터 손실이 크게 나타나며, 도심 지역에서의 클러터 손실은 부도심 지역보다 더욱 강한 클러터 손실을 보이지만, ITU-R P.2108 예측 모델보다 낮은 클러터 손실을 얻어졌다. 결론적으로 측정된 데이터로부터 송신 안테나가 85 m로 높은 경우 도심/부도심 지역에서 클러터 손실에 대한 데이터를 예측모델에 반영하여 클러터 손실 예측모델을 좀 더 개선시켜 나갈 필요가 있다.

Abstract

Recently, measurements on clutter loss due to buildings in urban/suburban areas at 3, 6, 10, 18, and 24 GHz have been performed by the Radio Research Agency with the purpose of predicting the clutter loss close to actual urban/suburban propagation for 5G mobile communication. In this work, we have compared the urban clutter loss to suburban clutter loss for a transmit antenna height of 85 m. Furthermore, we have estimated the error between the predicted loss as per ITU-R P.2108 and the measured clutter loss. Our results indicate that for higher frequencies, the measured clutter loss in urban/suburban areas is higher and so lower than the predicted clutter loss. In conclusion, it is necessary to improve the prediction model for clutter loss by taking into account the measured clutter loss in urban/suburban areas in the prediction model.

Key words: 5G, Propagation Measurement, Clutter Loss, Diffraction, RMSE

I. 서 론

2020년 이후 모바일 데이터는 새로운 무선 광대역통신 서비스와 함께 다양한 시장요구로 인해 2010년에 비해

1,000배 이상을 지원할 필요가 있다. 이러한 요구는 IMT-Advanced 기술을 지나 새로운 이동통신 시대의 5G 시대를 맞이하게 될 것이다^[1]. 이에 5G 시대의 이동통신 등 급증하는 주파수 수요를 해결하기 위해 기존 주파수 대역

†이 논문은 '17~'18년도 국립전파연구원의 지원을 받아 수행된 연구, '밀리미터파 클러터 모델 개발 연구' 결과의 일환임.

군산대학교 컴퓨터정보통신공학부(School of Computer, Information and Communication Engineering, Kunsan University)

*서강대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Sogang University)

**국립전파연구원(National Radio Research Agency)

· Manuscript received December 21, 2017 ; Revised January 25, 2018 ; Accepted February 6, 2018. (ID No. 20171221-124)

· Corresponding Author: Young-Heung Kang (e-mail: yhkang@kunsan.ac.kr)

에서 전송효율을 최대로 높이는 기술을 개발하고, 동시에 넓은 주파수 대역을 확보하려는 노력이 전 세계적으로 진행되고 있다. 영국 Ofcom에서는 차세대 이동통신(5G) 주파수 대역으로 넓은 서비스 커버리지 특성의 700 MHz 저주파수, 비교적 넓은 대역폭의 3.4~3.8 GHz 중주파수, 초광대역의 24.5~27.5 GHz 밀리미터파 주파수 이용을 검토하는 등 국가적으로 차이가 있지만, 6 GHz 이하 대역과 24 GHz 이상 대역으로 5G 이동통신 주파수가 개발되고 있다^[2].

5G 무선 인터페이스 및 시스템의 정확한 설계를 위해 0.5~100 GHz의 광범위한 주파수 범위에서 기본적인 피지컬(physical) 기반의 유연하고 정확한 채널모델이 개발되어야 한다. 최근 6 GHz 이상의 주파수 대역에서 전파 메커니즘(mechanism)과 채널특성을 이해하기 위한 상당한 측정과 연구가 진행되고 있다^{[3]~[5]}. 이들 연구에서는 이동통신 전파환경을 LOS(Line-of-Sight)와 NLOS(Non LOS) 조건을 분리하여 경로손실을 예측하고 있다. 밀리미터파와 같이 주파수가 높을수록 굴절(diffraction)이 주요 전파 메커니즘인 6 GHz 이하보다 더 큰 굴절 손실과 NLOS 환경에서 건물이나 나뭇잎 등의 새도영(shadowing) 변동 또는 클러터 손실(clutter loss)이 증가하므로 LOS 전파환경이 NLOS 조건에 비해 좀 더 신뢰성의 성능을 제공하게 될 것이다.

ITU에서는 도심/부도심 지역에서의 단거리(short range) 경로 전파손실로서 주로 빌딩 및 나뭇잎에 의한 클러터(clutter) 손실을 반영한 예측모델인 Rec. ITU-R P.1411^[6]과 P-P(Point to Point) 간접계산을 위한 전파 메커니즘으로 클러터 손실에 대한 해석구조와 예측모델을 제공하는 Rec. ITU-R P.452^[7] 등, 권고안들을 제공하고 있지만, 특정 주파수 및 특정 사이트에 제한적으로 적용되어 왔다. 최근에는 여러 다른 환경에서의 클러터 손실을 평가하기 위한 모델로서 클러터 환경의 카테고리(category)를 정의하고, 클러터 내의 루프탑(roof-top)과 터미널 간의 경로손실로서 거리 폭, 빌딩 높이, 초목의 깊이(vegetation depth) 등과 같은 전파경로의 정확한 정보가 알려지지 않을 때 통계적인 모델로서 권고안 Rec. ITU-R P.2108^[8]이 개발되었다.

그러나 5G 이동통신 서비스를 대비한 다양한 이동통신 전파환경을 고려할 경우, 24 GHz 이하의 여러 주파수 대역에서 도심/부도심 지역의 빌딩 등에 의한 클러터 손

실 측정 및 분석이 미흡하다고 예상된다. 이에 본 연구에서는 광주광역시 시청 부근의 도심 및 부도심 지역에서 3, 6.1, 10, 18, 24 GHz 주파수에서 송신 안테나는 비교적 높은 85 m의 광주시청 헬리포트(heliport)에 설치하여 주파수에 따른 전파측정이 수행되었으며, 이때 수신 안테나 높이는 1.5 m로 고정하였다. 측정된 데이터를 분석하여 주파수에 따라 도심과 부도심의 클러터 손실을 비교 분석하였으며, 특히 권고안 Rec. ITU-R P.2108^[8]에 주어지는 클러터 손실의 이론적 예측값과 비교 분석을 수행하였다.

본 연구에서 분석된 결과는 향후 ITU-R SG3 회의 기고문 투고를 통해 5G 이동통신 환경에서의 건물에 의한 클러터 손실 모델 개발에 기여하게 될 것이다. 이를 위해 2장에서는 클러터 손실을 정의하고, 3장에서는 측정 시나리오 및 측정에 사용된 송수신 파라미터를 설정한다. 4장에서는 주파수에 따른 비교분석 및 ITU 권고안 Rec. ITU-R P.2108^[8]에 주어지는 이론적인 예측값과 측정결과를 비교분석하여 5장에서 결론을 내린다.

II. 클러터 손실

클러터란 ITU 권고안, Rec. ITU-R P.1411^[6], P.452^[7] 및 P.2108^[8]에서 설명되고 있으며, 지상의 빌딩 또는 초목(vegetation)과 같은 장애물을 말한다. 보통 수신 터미널에 가까운 클러터가 전파에 강한 영향을 주지만, 클러터 거리는 클러터의 특성과 전파 파라미터에 의해 영향을 받는다.

본 연구에서는 이동통신 환경에서의 클러터 손실로 전파경로의 송수신 구간에 클러터의 존재 유무에 의한 전송간의 차로 정의한다. 즉, 자유공간에서 수신 전력을 계산하는 Friis 식을 이용하여 해당 주파수 및 거리, 안테나 이득 등에 의한 수신 전력을 계산하고, 이 값을 실제 측정결과에서 빼주면 클러터 손실을 얻을 수 있는데, 클러터 손실 L (dB)은 식 (1)과 같다.

$$L = P_T - P_R + G_T + G_R + 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right) \text{ dB} \quad (1)$$

여기서, P_T , P_R 은 각각 송신과 수신 전력이며, R 은 송수신 거리, G_T , G_R 은 각각 송신과 수신 안테나 이득, λ 는 파장이다.

한편, ITU 권고안 P.2108^[8]에서는 지상경로에서 $p\%$ 위

치확률(percentage of location)을 초과하지 않는 클러터 손실 L_{ctt} 는 식 (2)로 나타낸다.

$$L_{ctt} = -5 \log(10^{-0.2L_l} + 10^{-0.2L_s}) - 6Q^{-1}(p/100) \text{ dB} \quad (2)$$

여기서, $Q^{-1}(p/100)$ 은 역의 정규분포함수이며, L_l 및 L_s 는 각각 식 (3) 및 식 (4)로 주어진다.

$$L_l = 23.5 + 9.6 \log(f) \text{ dB} \quad (3)$$

$$L_s = 32.98 + 23.9 \log(d) + 3 \log(f) \text{ dB} \quad (4)$$

여기서, $d(\text{km})$ 및 $f(\text{GHz})$ 는 경로길이 및 주파수이다. 식 (2)에 의해 계산된 매디안(median) 클러터 손실을 그림 1에 보인다. 경로길이에 따라 건물들에 의한 전파손실이 더해져 클러터 손실이 증가하다 1 km 이상의 거리에서는 건물들에 의한 추가적인 전파손실이 크지 않아 클러터 손실이 포화상태로 나타난다.

III. 측정 시나리오

3-1 측정 경로

광주광역시청 주위에서 도심 지역을 대표하는 지역으로 높이 30~60 m 정도의 건물이 다수 있는 그림 2(a)의 지역과 부도심 지역을 대표하는 지역으로 높이 12~17 m 정도의 2~3층 건물들이 밀집된 그림 2(b)의 지역을 선택하였다.

측정에서의 송신 안테나는 광주광역시청 옥상의 헬리

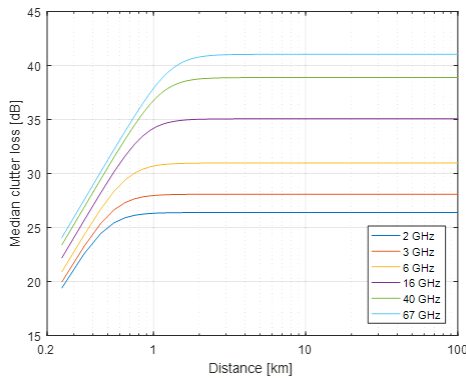


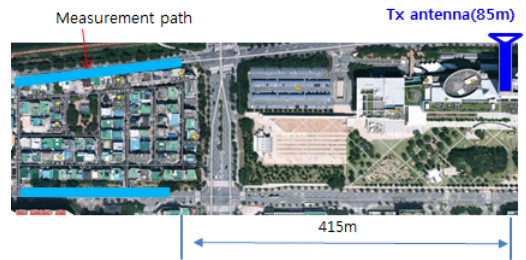
그림 1. 매디안 클러터 손실

Fig. 1. Median clutter loss.



(a) 도심 지역

(a) Urban area



(b) 부도심 지역

(b) Suburban area

그림 2. 도심 및 부도심 지역의 측정경로

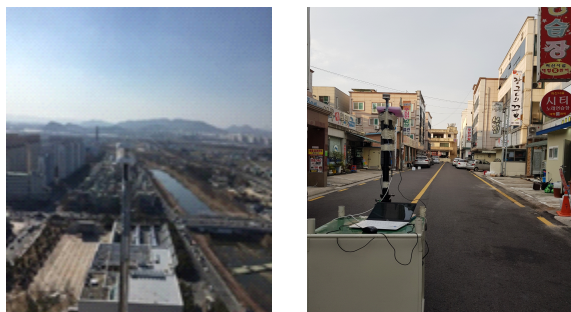
Fig. 2. Measurement route in urban/suburban area.

포트(높이 85 m)를 이용하였으며, 수신 안테나의 높이는 1.5 m로 고정하였다. 그림 2에 보인 바와 같이 도심 및 부도심에서의 측정경로는 NLOS 경로만을 택하여 측정을 수행하였다.

3-2 송수신 파라미터

그림 3에 측정에서 사용한 송신 및 수신 안테나의 외관을 보이는데, 송수신 안테나는 옴니(omni) 안테나를 사용하였으며, 송신 안테나는 85 m로 고정하였다. 수신 안테나는 이동식 카트에 1.5 m로 고정시켜 약 2~3 m 간격으로 이동시키면서 한 지점당 30회 정도 수신전력을 측정하여 기록하였다.

그림 4는 송수신장치의 블록도를 나타내며, 각 블록단



(a) 송신 안테나

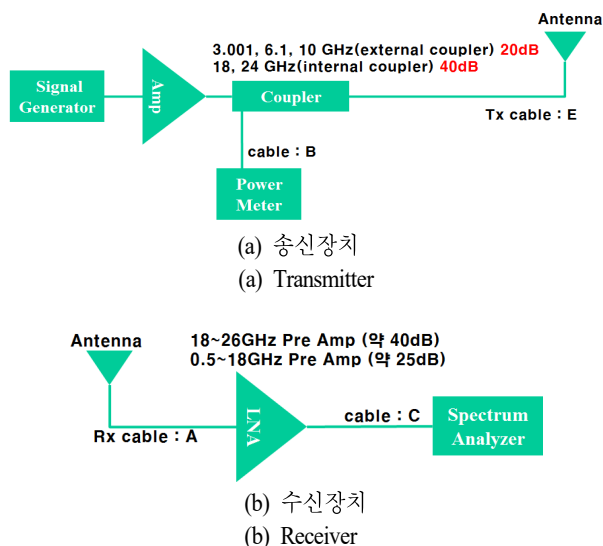
(a) Transmitter antenna

(b) 수신 안테나

(b) Receiver antenna

그림 3. 송수신 안테나 형태

Fig. 3. Shape of transmitter and receiver antenna.



(a) 송신장치

(a) Transmitter

(b) 수신장치

(b) Receiver

그림 4. 송수신장치 블록도

Fig. 4. Block diagram of transmitter and receiver.

에 주파수에 따라 적용된 파라미터 값들을 표 1 및 표 2에 각각 나타낸다.

IV. 측정 분석

4-1 안테나 높이에 따른 클러터 손실

4-1-1 도심지역의 클러터 손실

그림 2(a)에 보인 도심지역의 측정경로에 따라 3 GHz 및 24 GHz 주파수에서 수신전력을 측정하여 얻어진 대표

표 1. 송신장치 파라미터

Table 1. Transmitter parameters.

Frequency [GHz]	SG output [dB]	Power meter [dB]	Coupling loss [dB]	Coupler cable(B) [dB]	Antenna cable(E) [dB]	Antenna gain [dB]
3.0	-20.0	+10.2	-20.0	-1.30	-4.08	-0.77
6.1	-20.0	+6.32	-20.0	-1.98	-6.10	+1.35
10	-20.0	+5.92	-20.0	-2.46	-7.76	+1.42
18	-30.0	-12.5	-42.2	-3.36	-10.70	+1.95
24	-30.0	-10.92	-42.4	-4.10	-12.90	+4.60

표 2. 수신장치 파라미터

Table 2. Receiver parameters.

Frequency [GHz]	LNA (Pre amp) [dB]	Antenna cable(A) [dB]	Antenna cable(C) [dB]	Antenna gain [dB]
3.0	+25.30	-0.53	-0.79	-0.33
6.1	+24.40	-0.86	-1.19	+1.5
10	+25.40	-1.03	-1.52	+1.47
18	+40.70	-1.43	-2.05	+2.21
24	+41.40	-1.68	-2.51	+4.70

적 클러터 손실을 그림 5에 나타낸다. 이 결과로부터 알 수 있듯이 거리에 따라 주파수가 높을수록 경로손실이 증가함을 알 수 있다.

주파수 3, 6.1, 10, 18, 24 GHz에서 도심지역의 클러터 손실에 대한 CDF(Cumulative Distribution Function)를 그림 6에 나타낸다. 측정 결과로부터 클러터 손실은 주파수가 높을수록 크게 분포하고 있다. 예를 들어, 50 % 누적분포에서 주파수 3, 6.1, 10, 18, 24 GHz에 따라 클러터 손실은 21, 23, 25, 27, 28 dB로 증가하고 있다.

4-1-2 부도심 지역의 클러터 손실

그림 2(b)에 보인 부도심 지역의 측정경로에 따라 3 GHz 및 24 GHz 주파수에서 수신전력을 측정하여 얻어진 대표적 경로손실을 그림 7에 나타낸다.

이 결과로부터 알 수 있듯이 도심 지역의 경우와 마찬가지로 송신 안테나의 높이가 85 m로 비교적 높은 경우는 전파가 건물의 루프탑(roof-top)으로부터 회절에 의한

영향이 지배적이므로 거리에 따라 주파수가 높아질수록 경로손실이 높아지고 있다.

3, 6.1, 10, 18, 24GHz 주파수에서 측정된 부도심 지역의 클러터 손실에 대한 CDF를 분포를 그림 8에 나타낸다. 주파수에 따른 클러터 손실은 증가 추세를 보이고 있지만, 도심지역과는 다르게 일부 누적분포 값에서 역전되

는 현상이 보인다. 측정 결과로부터 클러터 손실은 50 %의 누적분포에서 주파수가 4~10 GHz에서 클러터 손실은 약 15 dB, 18~24 GHz에서는 약 20 dB를 나타낸다.

4-2 예측모델과 측정결과 비교

ITU P.2108^[8]에서 주어지는 그림 1에 보인 클러터 손실

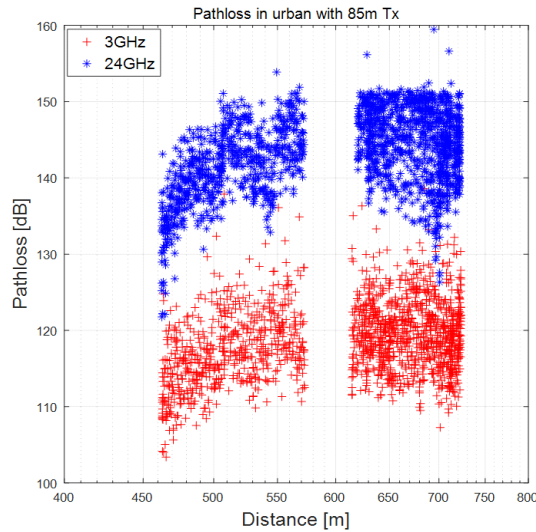


그림 5. 3 GHz 및 24 GHz에서 도심 지역의 경로손실
Fig. 5. Path loss in urban area for 3 and 24 GHz.

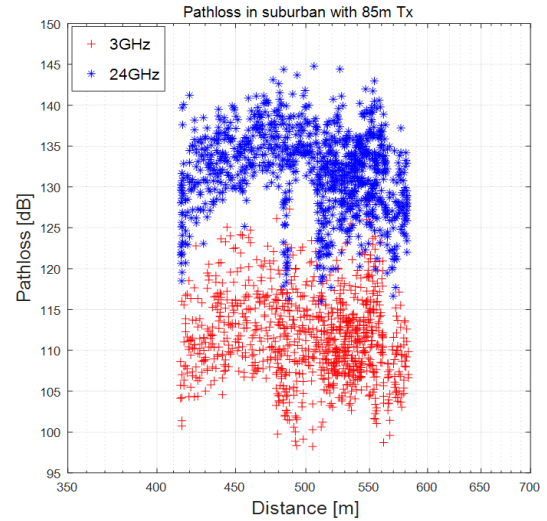


그림 7. 18 GHz에서 부도심 지역의 클러터 손실
Fig. 7. Clutter loss in suburban area for 18 GHz.

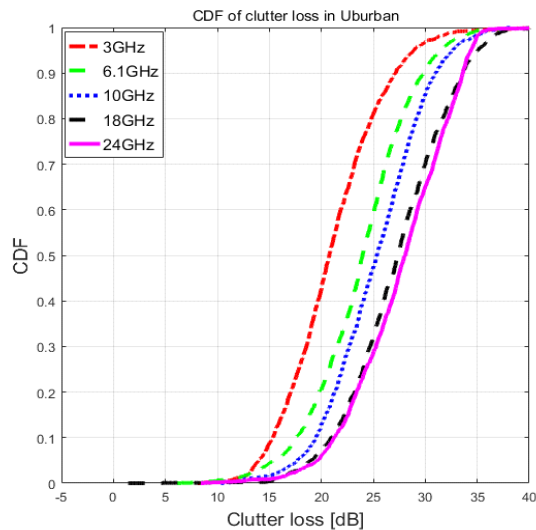


그림 6. 도심 지역의 클러터 손실 누적분포
Fig. 6. CDF of clutter loss in urban area.

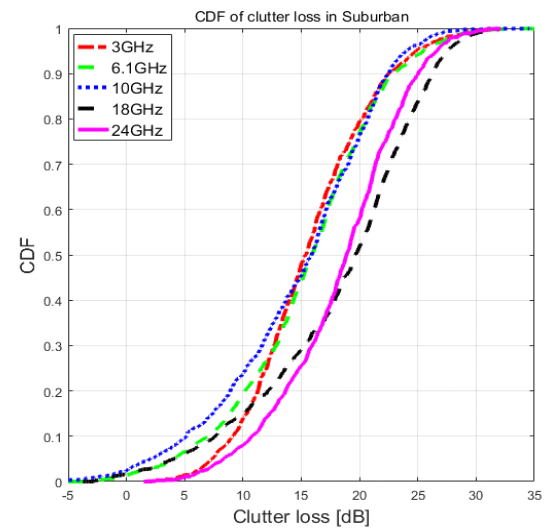


그림 8. 부도심 지역의 클러터 손실 누적분포
Fig. 8. CDF of clutter loss in suburban area.

모델의 정확도를 분석하기 위해 식 (5)에서 주어지는 RMSE (Root Mean Square Error)를 평가한다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{pi} - P_{mi})^2} \quad (5)$$

여기서, P_{pi} (dB) 및 P_{mi} (dB)는 예측 및 측정의 상대 클러터 손실 값이다.

그림 2에 보인 도심 및 부도심 지역의 측정경로에 따라 수신전력을 측정하여 3 GHz 및 24 GHz 주파수에서 얻어진 대표적 클러터 손실과 그림 1에 주어지는 위치확률 p %의 예측값과 비교한 결과를 그림 9에 나타내며, 각각의 주파수에 대한 RMSE 계산결과를 표 3에 보인다.

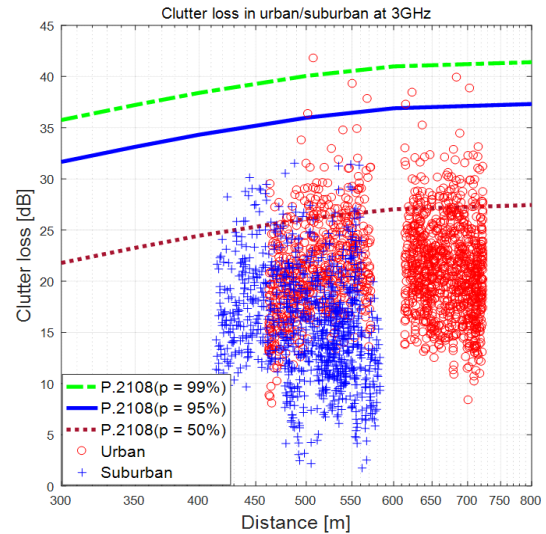
그림 9(a)로부터 알 수 있듯이 3 GHz 도심 지역의 클러터 손실은 부도심 지역보다 크게 나타나고 있으며, 손실의 메디안(median) 값은 그림 1의 50 % 위치확률 예측모델보다도 밑으로 분포하고 있다. 마찬가지로 그림 9(b)의 24 GHz 주파수에서도 3 GHz보다 조금 큰 클러터 손실을 보이고 있으나, 도심 지역의 클러터 손실이 부도심 지역보다 명확히 크다는 점을 알 수 있다. 3 GHz와 마찬가지로 클러터 손실의 메디안 값은 50 % 위치확률 예측모델보다 밑으로 분포하고 있다.

표 3에서 도심 지역의 클러터 손실은 50 % 위치확률 예측모델과의 RMSE 값은 3 GHz에서 가장 큰 7.4850, 24 GHz에서 가장 작은 6.1991 값을 가지므로 주파수에 따라 증가하는 점을 입증하고 있다. 또한 3, 6.1, 10, 18, 24 GHz 주파수에서 도심과 부도심의 차가 약 4.3, 6.7, 8.9, 7.2, 7.3으로 도심 지역의 클러터 손실이 예측값에 근접하고 있다.

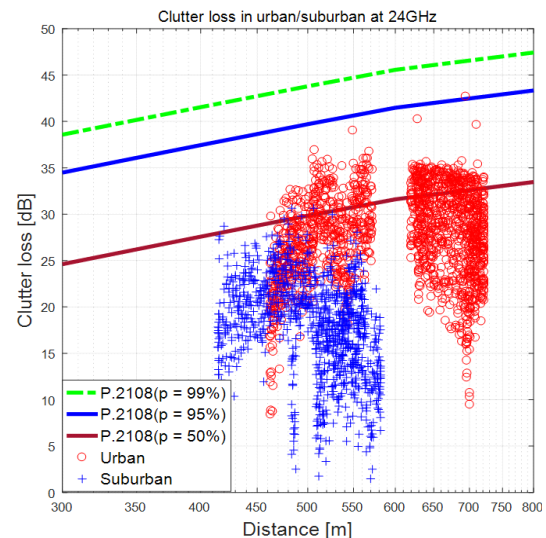
V. 결 론

본 연구에서는 송신 안테나 높이가 85 m일 때, 광주광역시 시청 부근의 도심 및 부도심 지역에서 3, 6.1, 10, 18, 24 GHz 주파수에 대한 전파측정을 수행하여 측정된 데이터를 도심과 부도심 지역에 따른 비교와 권고안 P.2108^[8]에 주어지는 클러터 손실의 이론적 예측값과 비교 분석을 수행하였다.

송신 안테나 높이가 높으면 도심지역에서 주파수가 높을수록 클러터 손실이 크다는 점이 명확하나, 부도심 지역에서는 특정 주파수에서 역전되는 현상이 발생한다. 본



(a) 3 GHz



(b) 24 GHz

그림 9. 3 GHz 및 24 GHz에서 도심/부도심 지역의 클러터 손실 예측과 측정비교

Fig. 9. Comparison of measured and predicted clutter loss in urban/suburban area for 3 and 24 GHz.

측정에서와 같이 송신 안테나의 높이가 85 m로 비교적 높은 경우는 전파가 건물의 루프탑(roof-top)으로부터 회절에 의한 영향이 지배적이므로 거리에 따라 주파수가 높아질수록 경로손실이 높은 반면, 송신 안테나의 높이가 낮아지면 건물의 루프탑 뿐만 아니라, 건물의 측면으로

표 3. 클러터 손실의 RMSE 값

Table 3. RMSE values of clutter loss.

Frequency [GHz]		3.001	6.1	10	18	24
p%	Urban	7.4850	7.1449	6.6620	6.3622	6.1991
	Suburban	11.7808	13.8807	15.5776	13.5413	13.4508
95	Urban	16.4162	15.8001	15.3763	14.5966	14.6221
	Suburban	21.0308	23.0553	24.7922	23.4375	22.7993
99	Urban	20.3718	19.7229	19.3157	18.4835	18.5349
	Suburban	25.0024	27.0004	28.7376	26.3515	26.7823

부터 회절에 의한 영향이 더해져 거리에 따라 경로손실이 증가하여 클러터 손실이 비교적 높을 것으로 예측된다.

결론적으로 도심 및 부도심 지역에서의 클러터 손실은 건물의 밀집도, 주파수, 경로길이에 의존하며, 본 연구에서 측정된 데이터로부터 도심 및 부도심 지역에 따른 클러터 손실 등을 예측모델에 반영할 필요가 있으며, ITU SG3 기고문을 통한 P.2108^[8] 클러터 손실 예측모델을 좀 더 개선시켜 나갈 필요가 있는 것으로 검토되었다.

References

- [1] Cisco, "Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update," 2016~2021 White paper, Feb. 2017. Available: http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white_paper_c11-520862.pdf. Accessed on: Oct. 5, 2017.
- [2] Ofcom, "Update on 5G spectrum in the UK," Feb. 2017. Available: https://www.ofcom.org.uk/_data/assets/pdf_file/0021/97023/5G-update-08022017.pdf. Accessed on: Oct. 5, 2017.
- [3] T. S. Rappaport, Y. Xing, G. R. MacCartney, A. F. Molisch, E. Mellois, and J. Zhang, "Overview of millimeter wave communications for fifth - generation (5G) wireless networks-with a focus on propagation models," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 12, pp. 6213-6230, Nov. 2017.
- [4] S. Rangan, T. S. Rappaport, and E. Erkip, "Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges," in *Proceedings of IEEE*, Mar. 2014, vol. 102, no. 3, pp. 366-385.
- [5] *Study on Channel Model for Frequency Spectrum above 14.3.1 Release 14*, ETSI TR 138 900 v14.3.1, Aug. 2017.
- [6] *Propagation Data and Prediction Methods for the Planning of Short-Range Outdoor Radiocommunication Systems and Radio Local Area Networks in the Frequency Range 300 MHz to 100 GHz*, Recommendation ITU-R P.1411-8, Jul. 2017.
- [7] *Prediction Procedure for the Evaluation of Interference between Stations on the Surface of the Earth at Frequencies above about 0.1 GHz*, Recommendation ITU-R P.452-16, Jul. 2015.
- [8] *Prediction of Clutter Loss*, Recommendation ITU-R P.2108-0, Jun. 2017.

강 영 흥



1984년 2월: 한국항공대학교 통신공학과 (공학사)
1986년 2월: 한국항공대학교 전자공학과 (공학석사)
1993년 2월: 한국항공대학교 전자공학과 (공학박사)
1988년 3월~1990년 2월: 한국항공대 통

신공학과 조교

1995년 8월~1996년 8월: 일본 오사카대학 객원교수
2003년 8월~2005년 2월: 영국 York대학 방문교수
1990년 4월~현재: 군산대학교 컴퓨터정보통신공학부 교수
[주 관심분야] 위성통신공학, 통신공학, 이동통신공학, 정보통신 표준화, USN

이 일 용



1996년 2월: 경희대학교 전파공학과 (공학사)
1998년 2월: 경희대학교 전파공학과 (공학석사)
2001년 9월~현재: 국립전파연구원
[주 관심분야] 전파 모델, 위성통신, 정보통신 표준화

이 행 선



1995년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1997년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2000년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
2000년 9월~2004년 2월: LG전자 선임연

구원

2004년 3월~현재: 서강대학교 전자공학과 교수
[주 관심분야] 전파 모델, 전자파 산란 분석, EMI/EMC

임 중 혁



2004년 3월: 홍익대학교 전자공학과 (공학사)
2006년 2월: 한양대학교 전파통신컴퓨터공학과 (공학석사)
2012년 8월: 한양대학교 전파통신컴퓨터공학과 (공학박사)
2012년 8월~2013년 2월: 한양대학교 전

파통신컴퓨터공학과 Post. Doc.

2013년 3월~현재: 국립전파연구원
[주 관심분야] 안테나 설계 및 교정방법, 밀리미터파 전파모델, RF 통신시스템, 정보통신 표준화

박 성 원



2003년 2월: 경희대학교 정보통신공학과 (공학석사)
2003년~현재: 국립전파연구원
[주 관심분야] 전파 모델, 우주전파통신, 테라헤르츠통신, 정보통신 표준화, 고주파 대역 물질상수

윤 대 환



2007년 3월: 조선대학교 전자공학과 (공학사)
2008년~2014년: 광주전파관리소
2014년~현재: 국립전파연구원
[주 관심분야] 밀리미터파 전파모델, 테라헤르츠 통신, 고주파 대역 물질상수, 드론 전파측정