

Ray tracing 기반 5.9 GHz 대역 통신 채널 모델링에 관한 연구

이수환¹ · 임기택² · 김종찬³ · 조형래⁴ · 서동환[†]

(Received October 26, 2017 ; Revised November 5, 2017 ; Accepted November 11, 2017)

A study on channel modeling of 5.9 GHz band communication based on Ray tracing

Soo-Hwan Lee¹ · Ki-Taek Lim² · Jong-Chan Kim³ · Hyung-Rae Cho⁴ · Dong-Hwan Seo[†]

요약: 자율 주행과 같은 차량 운행 지원 기술의 발달에 따라 C-ITS (Cooperative Intelligent Transport Systems)의 핵심적 기술인 차량의 무선 통신 기술 WAVE(Wireless Access for Vehicle Environment)가 국내외로 활발히 연구되고 있다. WAVE 통신은 차량간 통신인 V2V(Vehicle to Vehicle)와 차량과 노변기지국간의 통신인 V2I(Vehicle to Infrastructure)로 구성되어 있어 각각의 통신 환경에 대한 고려가 필요하다. 특히, V2I는 V2V에 비해 비교적 커버리지가 넓어 도로의 구조와 주변 지형 그리고 차량의 혼잡도 등 여러 요인에 의해 통신 환경이 변화한다. 따라서 도심, 산악과 같은 복잡한 NLOS(Non line of sight) 환경이 많은 국내의 5.9 GHz 대역 V2I 전파 특성 연구를 통하여 통신 채널 모델링의 최적화가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 고속도로에 실제로 구현된 WAVE 기반 V2I의 전파 환경 측정을 위해 시험도로에서 수집된 RSSI(Received signal strength indicator)를 바탕으로 WAVE 통신의 전파 채널을 분석하였고 이를 통해 ray tracing 기반 log distance 모델을 도출하여 국내 고속도로상의 WAVE 통신 채널 모델을 제시한다.

주제어: C-ITS, WAVE, ray tracing, 통신 채널 모델

Abstract: The development of driving support technology such as autonomous driving has been actively researched domestically and overseas for Wireless Access for Vehicle Environment (WAVE), a key technology of Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS). WAVE communication comprises Vehicle to Vehicle (V2V) and Vehicle to Infrastructure (V2I) which correspond to communication between vehicles and roadside base stations, therefore, it is necessary to consider each communication environment. In particular, the V2I has a relatively large coverage compared to the V2V, and the communication environment changes due to various factors such as the road structure, the surrounding terrain, and the congestion of the vehicle. Therefore, the complicated NLOS (nonlinear sight) We need to optimize communication channel modeling through V2I propagation characteristics of the 5.9 GHz band. Therefore, in this paper, we have analyzed the propagation channel of WAVE communication based on the received signal strength indicator (RSSI) collected on the test road to measure the propagation environment of WAVE based V2I practically implemented on highways. We have also presented a WAVE communication channel model on the domestic highway.

Keywords: C-ITS, WAVE, Ray tracing, Communication channel model

1. 서론

최근 도로의 인프라, 차량을 연결하여 교통 시스템의 구성 요소들 간의 정보를 공유하는 C-ITS(Cooperative Intelligent Transport Systems)은 교통 정보, 사고 예방, 자율 주행 등과 같은 서비스를 제공하기 위해 전세계적으로 연구 및 개발이 진행되고 있다. 그 중에서 5.9 GHz 대역을 사용하는 WAVE(Wireless Access in Vehicle Environment)는

C-ITS의 핵심적인 차량용 무선 통신 기술로 적용되고 있다. 차량간 통신인 V2V(Vehicle to Vehicle)와 차량과 노변기지국간의 통신인 V2I(Veicle to Infrastructure)로 구성된 WAVE 통신은 궁극적으로 인프라와 주변 차량과의 통신을 통해 전후방의 교통정보, 차량 이동과 사고 가능성 등의 다양한 정보를 전달하여 사고를 조기에 예방하거나 대형 사고의 발생을 최소화하는 것을 목표로 한다. 이러한 WAVE 통신

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3610-0356>): Division of Electronics and Electrical Information Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan, 49112, Korea, E-mail: dhseo@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4412

¹ Department of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: config5246@naver.com, Tel: 051-410-4822

² SoC Platform Research Center, Korea Electronics Technology Institute, E-mail: limkt@keti.re.kr, Tel: 031-739-7410

³ Department of Railroad Electronics, KyungBuk College, E-mail: kjc@kbc.ac.kr, Tel: 054-630-5067

⁴ Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: hrcho@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4421

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

은 기존의 무선 통신인 IEEE 802.11a 표준을 차량 통신 및 도로 환경에 맞도록 PHY(Physical) layer와 MAC(Media Access Control) layer을 수정한 IEEE 802.11p을 따르고 있으며, 차량 통신 환경에 적합하도록 넓은 커버리지와 빠른 접속을 보장하는 성능을 가질 수 있도록 제정되었다[1][2].

현재 고속도로에서 WAVE 통신의 상용화를 위해서는 V2V에 앞서 5.9 GHz 대역을 사용하는 V2I 무선 채널의 특성을 분석하고 모델링함으로써 시스템의 구성과 인프라의 성능 및 설계에 대한 최적화가 필요하다. 현재 V2X(Vehicle to Everything)의 무선 채널 특성에 관한 연구에서 V2V 분야는 국내외적으로 활발히 진행되고 있으나 V2I 분야는 설비 운영의 한계로 국외에만 제한적으로 연구되고 있다.

관련 연구로는 C. Somer *et al.* [3]은 실제 도로 환경을 바탕으로 NLOS 환경을 만드는 건물에 대한 V2V의 전파 환경을 직접 분석하고 특성 모델을 설계하였다. 하지만 이 연구에서는 V2I에 대한 전파 모델에 대한 연구가 포함되지 않아 V2X의 전체적인 환경을 파악하기 어렵다. 또한 Ros *et al.* [4]은 Path loss, fading, 장애물 등 다양한 환경적 요인뿐만 아니라 고속도로, 도심지 등 공간적인 요인들을 시뮬레이션하여 WAVE 통신의 전파 환경을 분석하였다. 이 연구 또한 전체적으로 V2V에 대한 연구만 진행되어 V2I에 전파의 모델링 연구는 다소 부족하다. 이와 같이 미국, 유럽 환경을 중심으로 연구되는 결과들은 산지 및 도심지 등이 많고 차량의 밀도가 높은 국내 상황에 그대로 적용하기에는 신뢰성에 한계가 존재하며 특히, 노변 기지국의 설치 및 기술 구현 등의 인프라의 구축이 필수적인 실제 도로 환경에서의 V2I에 대한 연구는 매우 제한적이다.

이전의 논문[5]에서는 도로 환경에 적합한 전파 모델을 구성하기 위해서 two-ray ground 모델을 기반으로 구성하였으나 이는 반사되는 도로면만을 고려한 것으로 실제 차량의 통행량에 따른 밀집도가 국내 V2I의 전파 환경에 끼치는 영향에 대해 분석할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 국내 전파 환경에 적합한 모델 parameter 값을 도출하여 고속도로 상에 향후 구축될 WAVE 기반 V2I 통신 채널 최적화된 모델을 제시한다. 이를 위하여 시험적으로 기지국이 설치되어 있는 실제 고속도로 상에서 송신되는 5.9 GHz 대역 신호를 수집하여 Large-scale fading으로 발생하는 전파 특성을 분석하고 이를 도로 환경에 적합하도록 ray tracing을 기반으로 log distance 모델을 구성하여 V2I 통신 모델을 설계한다.

2. WAVE 통신 채널 분석

2.1 WAVE 통신 표준

WAVE 통신은 WLAN(Wireless LAN) 표준인 IEEE 802.11a를 차량간 및 노변기지국과의 무선 연결에 적합하도록 PHY layer 및 MAC layer을 변경하여 IEEE 802.11p로 표준화되었다. Table 1은 IEEE 802.11a와 IEEE 802.11p의 주요 특성을 나타낸다. IEEE 802.11p는 5 GHz의 ISM (Industry

science medical) 밴드 사용하는 IEEE 802.11a 표준과 달리 5.850 ~ 5.925 GHz의 독립적인 주파수 대역을 사용함으로써 대역 충돌로 인해 발생하는 co-channel interference를 영향을 최소화시켰다. 또한, 기존의 20 MHz의 채널 대역폭을 10 MHz로 줄여 향상된 multipath mitigation을 보장하고 전송 속도는 변조방식에 따라 3 ~ 27 Mbps를 지원한다.

Table 1: Comparison of standard IEEE 802.11a and 802.11p

	IEEE 802.11a	IEEE 802.11p
Frequency band	5.15~5.825 GHz	5.85~5.925 GHz
Occupied bandwidth	20 MHz	10 MHz
Subcarrier separation	0.3125 MHz	0.15625 MHz
Symbol duration	4 μs	8 μs
Guard period	0.8 μs	1.6 μs
Data rates	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps	3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24, 27 Mbps
RF power	< 23 dBm	< 44.8 dBm

2.2 Ray tracing 기반 채널 모델링

효과적인 ITS 서비스를 위한 신뢰성 높은 WAVE 통신의 구현을 위해선 고속도로상의 V2I 시스템의 채널 모델링은 필수적이다. 전파의 채널 모델링이란 송신단과 수신단 사이의 방사되는 전파가 환경에 따라 감쇄되는 형태를 도식적으로 나타내는 것이다. 전파 모델은 Large-scale 페이딩과 Small-scale 페이딩으로 해석 가능하며 수신단과 송신단 사이의 거리가 늘어남에 따라 감쇄와 그 사이의 장애물에 의해 발생하는 음영을 고려한 전파 해석을 Large-scale 페이딩이다. 이 Large-scale 페이딩을 기반으로 다중경로를 고려하여 small-scale 페이딩을 해석하면 채널 모델이 완성되게 된다. 본 논문에서는 WAVE 통신의 기초가 되는 Large-scale 페이딩 채널 모델을 도출한다.

우선 공간적인 전파의 감쇄 모델을 알기 위해서는 자유 공간상 채널 특성을 알 필요가 있다. 따라서 식 (1)의 Friis' free space 전파 모델[6]을 통해 자유공간에서 전파 크기를 다양한 요소를 통해 도출해낼 수 있다. 그리고 식 (2)를 통해 거리에 따른 신호의 감쇄 정로를 모델로 구성할 수 있다.

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L_{system}} \quad (1)$$

$$PL(d) = 10 \log_{10} \frac{P_t}{P_r(d)} \quad (2)$$

여기서 P_t 는 송신기를 통해 송신되는 신호 강도를 의미하며 P_r 는 측정된 수신 신호 강도를 의미한다. G_t 와 G_r 은 각 송신기와 수신기의 안테나 이득을 말하고 λ 는 WAVE 통신 대역의 파장, L_{system} 은 시스템 손실로 식 (1)와 식 (2)

를 통해 자유공간의 전파 감쇄를 예측할 수 있으나 일반적인 통신환경에서는 적합하지 않다. 특히, 고속도로는 주변의 구조물이 적어 도심지에 비해 이상적인 환경에 적용되는 Friis' free space 전파 모델과 유사하나 차량, 방음벽과 같은 좌우의 장애물들과 지면 반사로 일어나는 현상을 무시할 수 없다. 따라서 이러한 반사파를 고려한 ray tracing 기반 모델[7]의 적용이 적합하다.

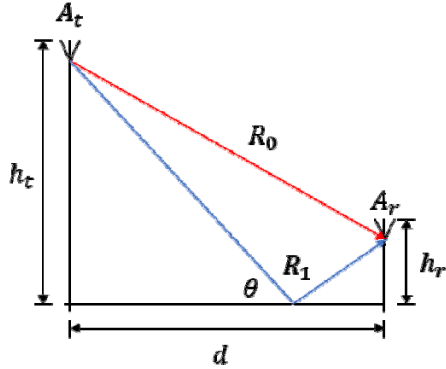


Figure 1: The geometry of 2-ray model with different heights

Figure 1은 송신 안테나와 수신 안테나 사이를 수직으로 투시한 그림이다. A_t 와 A_r 는 각각 송신기와 수신기의 안테나, R_0 은 송수신기 사이의 거리, R_1 는 지면에 반사되어 입력되는 거리, θ_1 는 전파의 입사각, h_t 는 송신기의 높이, h_r 는 수신기의 높이를 말한다. R_0 의 직접파를 제외하고 도로 상에서 가장 빠르게 도착하는 반사파는 R_1 의 지면 반사파이다. 따라서 A_r 에서 도달하는 신호는 이 둘의 합과 같다. 하나의 입력되는 반사파의 신호를 식으로 표현하면 식 (3)과 같이 표현된다.

$$S_n(t) = \frac{\lambda\sqrt{G}}{4\pi} \left(\frac{s(t)e^{\frac{j2\pi d_0}{\lambda}}}{d_0} + \Gamma \frac{s(t-\tau)e^{\frac{j2\pi d'_0}{\lambda}}}{d'_0} \right) \quad (3)$$

$$d_0 = \sqrt{R_0^2 + (h_t - h_r)^2} \quad (4)$$

$$d'_0 = \sqrt{R_0^2 + (h_t + h_r)^2}$$

여기서 $s(t)$ 은 송신하는 신호를 말하며, d'_0 은 반사되어 오는 신호의 거리를 말한다. d'_0 는 Figure 1의 입사각과 반사각이 같으므로 식 (4)로 계산할 수 있다. 시간차 τ 는 매우 작으므로 $s(t) = s(t-\tau)$ 라고 근사하고 $PL(d)$ 을 식 (2)를 통해 식 (5)를 도출할 수 있다. 식 (5)는 계산된 감쇄 모델에 차량 밀도 계수 α 를 추가한 것으로 α 는 이후 수평 반사파와 같이 서술하도록 한다.

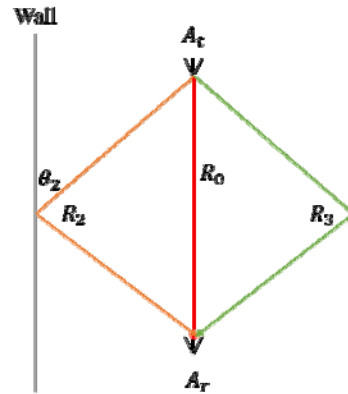


Figure 2: The geometry of 6-ray model with antenna

$$PL_n(t) = \alpha \frac{\lambda\sqrt{G}}{4\pi} \left(\frac{e^{\frac{j2\pi d_0}{\lambda}}}{d_0} + \Gamma \frac{e^{\frac{j2\pi d'_0}{\lambda}}}{d'_0} \right) \quad (5)$$

Figure 2는 송신 안테나와 수신 안테나 사이의 전파 진행을 수평으로 투시한 그림이다. R_2 와 R_3 는 각각 좌우 벽면에 반사되는 거리, θ_2 는 벽면에서 입사각을 의미한다. 본 모델은 직접파와 반사파의 신호의 크기를 합하여 전체 수신되는 전파를 모델링하는 것이 필요하며 식 (3)의 일반화된 전파의 신호에 앞서 말한 차량 밀도 계수 α 를 도입한다. Figure 2의 좌우 벽은 차량 혹은 방음벽에 의해 만들어지는 환경을 말하며 차량과 방음벽은 플라스틱 혹은 금속으로 구성되어 적합한 반사 계수 Γ 를 도입해야 한다. 또한 차량 밀집도 α 는 수신 안테나와 송신 안테나간 거리와 그 사이의 벽면이 존재하는 거리를 나누어서 나온 것으로 차량 간 거리가 0으로 매우 혼잡한 도로의 경우 1, 차량이 존재하지 않는 거리는 0이다. 따라서 도로의 방음벽의 경우 방음벽이 존재하는 거리에 따라 계산한다. R_1 의 지면 반사파의 경우 항상 포화된 상태이므로 1로 적용한다. 따라서 식 (5)를 발생한 반사파를 각 밀도 계수를 적용하여 모두 합하면 최종적으로 전체 전파의 강도를 식 (6)과 같이 계산할 수 있다.

$$P_t = 20 \log \left| \sum_{i=0}^n P_i \right| \quad (6)$$

식 (6)의 P_i 는 Figure 1과 Figure 2의 R_0, R_1, R_2 과 R_3 를 통해 수신된 신호 세기를 말하며, R_0 은 직접파이기 때문에 식 (1)의 단순한 Friis' free space 전파 모델로 만들어진 신호 세기이고 R_1 은 지면에 반사된 신호 세기, R_2 와 R_3 는 양 벽면에 반사된 신호 세기를 말한다. 본 전파 환경 모델링의 대상인 WAVE 통신 기지국은 송신기의 높이가 5.5 m, 수신기의 높이가 2 m 그리고 5.9 GHz 대역이다. 본 연구에서 적용하는 ray tracing 방식으로 분석하면 기준거리 $d_c \approx 1100$ m를 넘게 되면 반사파가 직접파와 거의 유사하게 되어 일반적

인 장거리 모델을 적용하여 거리의 4제곱만큼 감쇄가 발생하게 된다. 하지만 본 통신의 도달 범위가 500m이므로 두 개의 전파 모델을 거리에 따라 사용하는 dual slope model을 적용할 필요가 없다. 따라서 식 (6)의 모델에 정규 분포 X_σ 를 적용하여 log-normal 모델을 적용하면 식 (7)과 같다.

$$P_l = 20 \log \left| \sum_{i=0}^n P_i \right| + X_\sigma \quad (7)$$

식 (7)의 log-normal 모델을 바탕으로 WAVE channel model을 해석된다.

3. WAVE 통신 시험 환경 및 측정

3.1 여주 시험도로 측정 환경

도출된 모델을 검증하기 위해선 국내 환경을 기반으로 WAVE 통신 환경을 측정하여 모델과 비교할 필요가 있다. 따라서 우리는 V2I 인프라가 구축된 여주시험도로에서 WAVE 신호를 측정하였다. Figure 3은 여주분기점에서 하행 방향에 위치한 체협도로의 노변기지국 위치와 주변 환경을 나타낸다. Figure 3의 삼각형은 기지국을 나타내며 여주 시험도로는 여주 분기점으로부터 하행방향 고속도로 옆에 조성되어 있으며 상용 도로로 운행되지 않아 장애물이 거의 존재하지 않는 구간이다. 도로에는 기지국들이 통신 범위를 고려하여 약 0.5 Km 간격으로 설치되어 있으며 이 노변기지국들 중 1번 기지국만을 대상으로 송신기로부터 하행으로 약 0.5 km의 구간을 측정하였다. 시험도로는 두 차선으로 구성되어 있고 실험은 두 차선 모두를 사용하였다. 1차선은 하행 방향으로 약 5m 좌측에 실사용 중인 도로가 존재하여 차벽을 형성하고 있으며 2차선은 양쪽 모두 비어있어 이상적인 환경에 가깝다. 이를 통해 주변 차량의 영향에 대한 실제 상황의 결과와 비교하여 모델의 신뢰성을 입증하였다. Table 2는 송수신 안테나의 각 주요 요소를 보여주며 신호의 출력 값은 20 dBm이며 이득은 9 dBi, 시스템 손실은 1.34 dB 정도이다. 수신 안테나의 이득은 7 dBi로 야크 안테나를 설치하였다.



Figure 3: The map of test road and the location of road side station

Table 2: The antenna factor of transmitter and receivers

	Transmitter	Receiver
Frequency band	5.85~5.925 GHz	5.85~5.925 GHz
Occupied bandwidth	10 MHz	10 MHz
Antenna Gain	9 dBi	7 dBi
Power	20 dBm	-
Height	5.5 m	2 m

3.2 WAVE 전파 환경 측정 방법

여주 시험도로에 설치된 WAVE 통신 V2I 기지국으로부터 송신되는 WAVE 신호를 수집하기 위하여 본 연구에서는 5.9 GHz 대역의 안테나와 스펙트럼 분석기를 사용하였으며 송신기는 기존에 구축되어있는 WAVE 통신 기지국을 사용하였다. 여주 시험도로에서 large-scale 페이딩 모델을 구성하기 위하여 고정 장애물이 가장 적은 구간의 기지국을 기준으로 WAVE 신호를 총 0.5 km를 10 m 간격으로 각 위치 당 30회 이상 측정하였다. Figure 4은 시험도로에 설치되어있는 1번 노변기지국을 보여준다. 4개의 무지향성 송신 안테나는 각각 5.5 m 높이로 설치하였다. Figure 5은 측정차량에 2 m 높이로 설치되어있는 무지향성 수신 안테나를 보여준다.



Figure 4: The road side station for WAVE communication



Figure 5: The vehicle for measuring WAVE communication signals

4. 측정 결과 및 모델링 분석

4.1 측정 결과 분석

여주 체험도로에서 측정한 데이터를 분석하고 모델링을 검증하였다. WAVE 통신 주파수 대역은 75 MHz로 배정되어 있으나 본 측정에서는 하나의 채널 대역 10 MHz 만을 사용하였다. 또한 기지국 통신 모델에서 송신 안테나로 입력되는 신호의 출력 값은 20 dBm이며 이득은 9 dBi, 시스템 손실은 1.34 dB 정도이므로 실 출력 신호는 27.66 dBm 정도이다. 실측은 10 m 단위로 이동해가면서 진행하였고 첫 측정 지점은 기지국으로부터 직선으로 떨어진 각 차선의 중심 지점에서 시작되었다. 즉, index 1은 기지국으로부터 10 m, index 50은 0.5 km이다. Figure 6는 index 30의 위치에서 측정된 신호들의 각 주파수 별 최대값을 나타낸다. x축은 WAVE 신호의 주파수를 나타내고 y축은 WAVE의 수신 신호 세기를 나타낸다. Figure 7는 index 60의 위치의 각 주파수 별 신호세기 최대값을 나타낸다. x축은 측정된 WAVE 신호의 주파수를 나타내고 y축은 WAVE의 수신 신호 세기를 나타낸다. Figure 6와 Figure 7를 통해 입력되는 WAVE 신호를 확인 할 수 있으며, 300 m 구간에서는 -80 dBm 정도가 입력되는 것을 볼 수 있다. 또한 600 m 구간에서는 -98 dBm 정도가 입력되어 통신 범위를 벗어난 것을 확인할 수 있다. Figure 8은 노변기지국으로부터 10 m 간격으로 구분된 index에 따른 5.9 GHz의 WAVE 신호를 측정된 결과이다. 여기서 위치 인덱스를 의미하는 x축은 첫 측정지점으로부터 10 m 씩 이동하면서 측정하였다. y축은 수신단에 측정된 WAVE의 수신 신호 세기를 나타낸다[8]-[10].

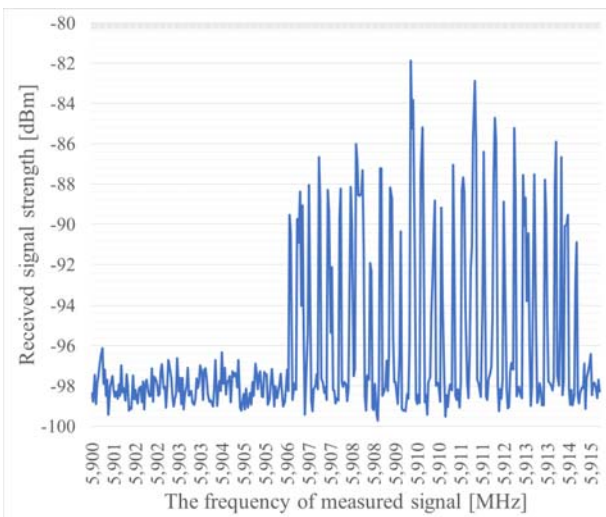


Figure 6: The signal strength of WAVE band in the index 20

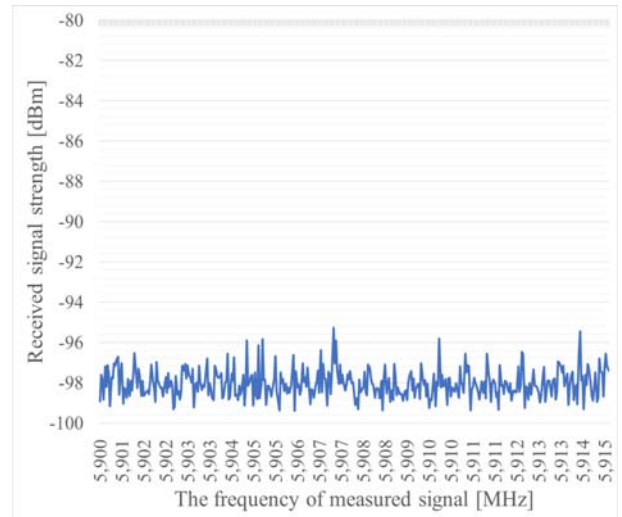


Figure 7: The signal strength of WAVE band in the index 60

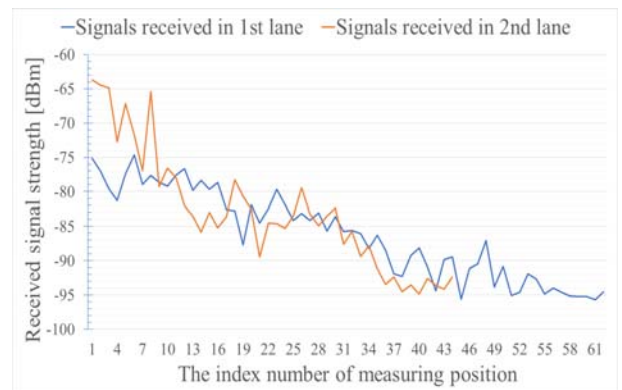


Figure 8: The signal strength according to position

청색 실선은 1차선 신호, 황색 실선은 2차선 신호를 나타낸다. index 1~15 사이의 수신 신호를 비교하면 1차선 신호는 일반적인 감쇄 모델과 같이 거리에 따라 로그함수의 형태로 감소한다. 2차선의 신호는 1차선의 신호에 비해 완만한 감쇄를 보인다. 또한 15~45 구간은 두 신호가 비슷한 감쇄 형태를 가지게 되며 2차선은 신호가 45 구간을 넘으면 -95 dBm 이하로 감소하여 통신이 어려워진다. 따라서 1차선, 2차선 모두 450 ~ 600m 구간에서 신호의 세기가 -95 dBm 이하로 떨어지므로 기지국의 배치를 500m 지점의 커버리지가 겹치도록 구성할 필요가 있다. 측정이 이루어진 시험도로의 기지국은 500 m 간격으로 설치되었고 이를 적절한 것으로 판단된다.

4.2 WAVE 통신 채널 모델링

WAVE 신호의 측정 결과를 기반으로 채널 모델링을 진행하였다. 채널 모델링은 지면의 반사 계수와 차량의 밀집

도에 따른 반사를 고려할 수 있는 ray tracing을 기반인 4-ray reflection 모델로 전파의 특성을 분석하여 국내 고속도로에 적합한 전파 환경 모델을 구성하였다. 이 방식은 고속도로를 비롯한 공용 도로에서 차량의 밀집도로 인해 발생하는 금속벽을 고려하며 동시에 가장 강한 반사파인 지상의 반사를 고려할 수 있다. Figure 9은 1차선의 도로를 노변기지국으로부터 10 m 간격으로 구분된 index에 따라 측정된 WAVE 신호와 식 (6)을 통해 만들어진 4-ray reflection 모델의 결과이다. 1차선의 측정 환경 당시 환경을 기반으로 모델의 계수는 하행기준으로 좌측방향에 실제 운영되는 고속도로가 존재하며, 우측은 2차선으로 비어있었으며, 차량의 통행량을 고려하여 차량 밀집도 α 를 설정할 필요가 있다. α 는 2.1 절에서 말하였듯, 도로 상에 차량이 가득한 환경에서는 차량으로 인해 금속 벽과 동일한 특성을 가지는 벽면이 생겼다고 가정할 수 있다. 측정 당시 촬영한 영상을 통해 차량간 거리가 평균적으로 차량 크기의 2/3 정도로 계산하여 좌측 R_3 의 차량 밀집도 α 를 0.4로 설정하고 우측의 빈 도로이므로 R_2 의 차량 밀집도 α 는 0으로 설정하여 도출하였다. Figure 9의 청색 실선은 실측값, 하늘색 실선은 모델을 기반 예측값으로 여기서 x축은 위치 인덱스를 나타내고 y축은 WAVE의 수신 신호 세기를 나타낸다. Figure 9를 보면 모델 예측값과 실측값은 전반적으로 비슷한 크기를 가진 결과를 만들어낸다. 특히, 직접파와 반사파의 결합으로 세기가 작아지는 down fading의 위치가 각각 index 11, 18, 30, 40 과 46으로 측정값의 down fading 위치와 index 40 ~ 44 구역을 제외한 영역에서는 비슷한 경향성을 띄고 있다. 동일하게 세기가 커지는 up fading의 위치는 index 30 지점을 제외한 영역에서 일치하는 것을 확인 할 수 있다.

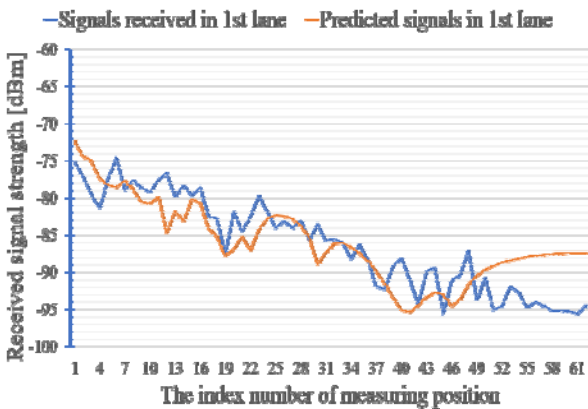


Figure 9: The received signals and predicted signals in 1st lane

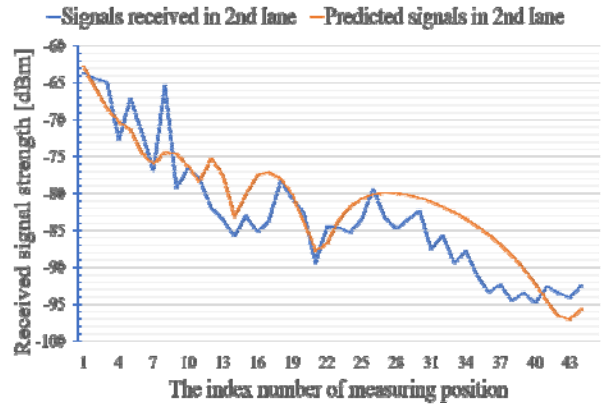


Figure 10: The received signals and predicted signals in 2nd lane

Figure 10은 2차선의 도로를 노변기지국으로부터 10 m 간격으로 구분된 index에 따라 측정된 WAVE 신호와 식 (6)을 통해 만들어진 4-ray reflection 모델을 적용하여 비교한 것이다. 2차선 측정 당시의 환경은 하행기준으로 좌측과 우측은 1차선과 도로변 숲으로 비어있어, 좌측 R_3 와 우측 R_2 의 차량 밀집도 α 를 0로 설정하여 모델을 구성하였다. 따라서 Figure 10의 모델은 4-ray reflection 모델이 간소화된 two-ray ground 모델이다. Figure 10의 황색 실선은 실측값, 회색 실선은 모델을 기반 예측값으로 여기서 x축은 위치 인덱스를 나타내고 y축은 WAVE의 수신 신호 세기를 나타낸다. Figure 10을 보면 실측값과 예측값이 매우 유사한 패턴을 띈다. 특히, down fading의 위치가 각각 index 8, 14, 22와 43으로 측정값의 down fading 위치와 일치하며 up fading의 위치는 index 9 지점을 제외한 영역에서 일치하는 것을 확인 할 수 있다. 이에 따라 본 논문에서 제안한 4-ray reflection 모델은 거리에 따라 정리한 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned}
 P(d) = & \frac{0.051 \sqrt{G}}{4\pi} \left(e^{\frac{j2\pi d}{0.051}} \right) & (8) \\
 & + \frac{0.051 \sqrt{G}}{4\pi} \left(e^{\frac{j2\pi d}{0.051}} - 0.84 e^{\frac{j2\pi d}{d'}} \right) \\
 & + \alpha_1 \frac{0.051 \sqrt{G}}{4\pi} \left(e^{\frac{j2\pi d}{0.051}} + \Gamma_1 e^{\frac{j2\pi d}{d'}} \right) \\
 & + \alpha_2 \frac{0.051 \sqrt{G}}{4\pi} \left(e^{\frac{j2\pi d}{0.051}} + \Gamma_2 e^{\frac{j2\pi d}{d'}} \right)
 \end{aligned}$$

여기서 α_1 과 α_2 는 도로 환경에 따라 변하는 차량 밀집도이고 Γ_1 과 Γ_2 는 반사계수로 물체에 따라 다르며 G 는 송수신기 이득을 나타낸다. 두 번째 항은 지면 반사 신호로 α 는

1로 I 는 -0.84로 설정한다. 위의 결과를 통해 식 (8)의 모델은 타당성을 가지는 것을 확인 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 기존에 발표된 통신 채널 모델을 기반으로 하여 5.9 GHz 대역 WAVE 통신의 고속도로상의 V2I 환경을 분석하였고 목표인 고속도로 환경을 가진 시험도로에서 측정된 데이터를 기반으로 하여 large-scale fading 모델을 제시하였다. ray tracing을 통해 전파의 환경을 예측하였고 측정 결과와 비교하여 parameter 값을 검증하였고 이를 통해 4-ray reflection 기반 log-distance 모델을 통해 WAVE 통신 채널을 분석하였다.

이 연구를 바탕으로 국내 고속 도로상에 설치되고 있는 기지국의 간격과 위치를 최적화가 가능하며 차량 밀집도가 높은 국내환경에 적합한 모델링을 기초로 국내 일반 도로, 도심 도로 환경에 대한 연구가 확대될 수 있을 것이다. 향후 다양한 장애물에 의해 발생하는 추가적인 반사파를 고려하여 복잡한 환경에 대한 모델링을 진행할 계획이다.

후 기

본 연구는 국토교통부 교통물류연구개발사업의 연구비 지원(15TLRP-B101406-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] Korea Communication Agency, "V2X Communication", Has emerged as the Intelligent Transport System's core technology, p. 06.
- [2] T. W. Hwang, "Development Trend of vehicles and communication technology," The Journal of Communications radio, vol. 10, no. 54, pp. 92-93, 2012.
- [3] C. Sommer, D. Eckhoff, R. German, and F. Dressler, "A computationally inexpensive empirical model of IEEE 802.11 p radio shadowing in urban environments," Wireless On-Demand Network Systems and Services (WONS), 2011 Eighth International Conference on IEEE, pp. 84-90, 2011.
- [4] Francisco J. Ros, Juan A. Martinez, and Pedro M. Ruiz, "A survey on modeling and simulation of vehicular networks: Communications, mobility, and tools," Computer Communications, vol. 43, pp. 1-15, 2014.
- [5] S. H. Lee, J. C. Kim, K. T. Lim, H. R. Cho, and D. H. Seo, "WAVE communication-based V2I channel modeling," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 40, no. 10, 2016.
- [6] T. S. Rappaport, "Wireless Communications: Principles

and Practice, second ed", Prentice Hall, 2002.

- [7] H. Friis, "A note on a simple transmission formula, in: I.R.E. and Waves and Electrons," pp. 254-256, 1946.
- [8] S. B. Park, J. W. Ahn, and E. G. Kim, "Design and Implementation of Secure Vehicle Communication Protocols for WAVE Communication Systems," Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, vol. 19, no. 4, pp. 841-847, 2015 (in Korean).
- [9] Y. S. Song and H. J. Yun, "Link Budget of WAVE Communication System for a Reliable ITS Service under Highway Environments," Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems, vol. 14, no. 4, pp. 80-85, 2015 (in Korean).
- [10] J. S. Park, G. D. Choi, J. W. Kim, and H. R. Cho, "A study on the EMI in special power distribution zone on ship," Journal of the Korea Society of Marine Engineering, vol. 38, no. 6, pp. 730-736, 2014 (in Korean).