

# 차량간 직선거리와 각도 확률 분포 모델링 및 V2V 통신에서의 응용 방안

김근우\*, 현성환\*, 김지혜\*, 김성철<sup>o</sup>

## Distribution Modeling of the Distance and Angle Between Vehicles and Its Applications for V2V Communication Systems

Keunwoo Kim\*, Seong-Hwan Hyun\*, Jihye Kim\*, Seong-Cheol Kim<sup>o</sup>

### 요 약

완전한 자율주행을 위해서는 차세대 지능형 교통 시스템과 함께 차량에 설치된 센서를 통해 습득한 raw data를 Gbps 단위로 전송하는 통신 기술이 필요하다. 이를 위해 mmWave 대역 주파수를 활용한 차세대 vehicle-to-vehicle (V2V) 통신 시스템이 주목받고 있으나 기존 통신 시스템은 Tx와 Rx의 위치에 대한 제약이 없는 데 반해 V2V 통신 환경에서는 Tx 차량과 Rx 차량은 형태가 정해진 도로 위에서 통신한다는 차이가 있으므로 V2V 통신 환경의 특징에 맞지 않는 기존 시스템의 설계를 그대로 이용할 경우 통신 효율성이 떨어질 것이라 예상할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 V2V 통신 환경에 적합한 시스템을 설계하기 전의 선제 연구로써 V2V 통신 환경의 특성을 모델링하고 공간적 특성을 분석하였으며, 그중에서도 Tx 차량과 Rx 차량 사이의 각도 분포에 대한 수학적 모델을 제시하였고 해당 모델링의 타당성을 모의실험을 통해 검증하였다. 우리는 모의실험을 통해 도로 환경에서의 V2V 통신 시스템은 빔 트레이닝 및 빔 추적 등에서 기존 통신 시스템과 다른 설계가 필요함을 확인하였고 앞으로의 연구 방향을 제시하였다.

**키워드** : 빔 트레이닝, 거리 및 각도 확률 분포 모델링, 도로의 공간적 특성, 교통량 시뮬레이션, 차량간 통신

**Key Words** : Beam training, Distance and angular distribution modeling, Spatial characteristic of the road, Traffic simulation, V2V communication

### ABSTRACT

For complete and safe autonomous driving with the aid of cooperative-intelligent transport system, communication system that transmits raw sensor data obtained from each vehicles in unit of Gbps is required. For this purpose, the next-generation vehicle-to-vehicle communication system using mmWave band frequency is attracting attention, but the existing communication system does not have restrictions on the location of Tx

※ 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1A2C2086621).

• First Author : Department of Electrical and Computer Engineering and INMC, Seoul National Univ., kimkeunwoo15@maxwell.snu.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : Department of Electrical and Computer Engineering and INMC, Seoul National Univ., sckim@maxwell.snu.ac.kr, 중신회원

\* Department of Electrical and Computer Engineering and INMC, Seoul National Univ., {shhyun, jihyekim224}@maxwell.snu.ac.kr, 학생회원

논문번호 : 202205-072-A-RE, Received March 29, 2022; Revised June 8, 2022; Accepted June 13, 2022

and Rx, whereas in the V2V communication environment, the Tx vehicle and the Rx vehicle communicate on a road with a fixed shape. So it can be expected that communication efficiency will decrease if the design of the existing system that does not fit the characteristics of the V2V communication environment is used. In this paper, as a preemptive study before designing a system suitable for such a V2V communication environment, the characteristics of the V2V communication environment were modeled and spatial characteristics were analyzed and verified through simulation. Through simulation, we confirmed that the V2V communication system in the road environment requires a different design from the existing communication systems such as beam training and beam tracking, and suggested future research directions.

## I. 서 론

완전한 자율주행을 위해서는 차세대 지능형 교통 시스템(cooperative-intelligent transport systems, C-ITS)과 함께 차량에 설치된 센서를 통해 습득한 raw data를 Gbps 단위로 전송하는 통신 기술이 필요하다<sup>[1]</sup>. 현재 상용화된 dedicated short-range communication (DSRC) 및 long-term evolution (LTE) 기반 통신 시스템의 경우 Gbps 단위의 데이터 전송량을 안정적으로 확보할 수 없으므로<sup>[2,3]</sup> 더욱 발전된 형태의 통신 표준이 필요하며 그중에서도 주목 받는 것이 mmWave 대역 주파수를 활용한 차세대 vehicle-to-vehicle (V2V) 통신 시스템이다<sup>[4]</sup>.

현재 mmWave 대역 주파수를 활용한 차세대 V2V 통신 시스템 표준은 3rd generation partnership project (3GPP)에서 제정 중이다. 2022년 3월 3GPP에서 발표된 release 17에는 mmWave 주파수 대역인 FR2 대역을 활용한 5G NR vehicle-to-everything (V2X) 통신 시스템 표준이 명시되어있으며 1 Gbps의 데이터 전송량을 확보하는 것을 목표로 표준 제정이 이루어지고 있다<sup>[5,6]</sup>. V2V 통신은 sidelink 통신이라는 주제로 다루어지고 있으며 마찬가지로 1 Gbps의 데이터 전송량을 확보하는 것을 목표로 한 표준 제정이 진행 중이다.

하지만, 기존에 설계된 대부분의 표준 문서 및 상용화된 통신 기술에서는 transmitter (Tx)와 receiver (Rx)가 제한되지 않은 공간상에 균일하게 분포되어 있다고 가정한다. 코드북 설계는 이러한 균일 분포 가정이 가장 명확히 드러나는 부분이다. 한정된 크기의 코드북을 최대한 효율적으로 설계하는 방법은 Tx와 Rx의 각도 분포에 맞춰 설계하는 것이며 균일 분포 가정으로 인해 대부분의 통신 시스템은 모든 빔 폭과 안테나 이득이 동일한 형태의 코드북을 고수해왔다<sup>[7,8]</sup>. 예를 들어, IEEE 802.15.3c에 기재된 코드북의 경우 Rx가 모든 방향각 상에 균일하게 분포하였다는

가정하에서 Tx는 동일한 빔 폭을 가지는 코드 워드를 통해 통신을 진행하도록 설계되어 있다<sup>[9]</sup>. 이러한 추세는 표준뿐 아니라 대부분의 연구 논문들에서도 유사하게 찾아볼 수 있다. 일례로 [10]에서는 동일한 빔 폭을 가지는 코드북을 특정 단계로 나누어 효율적으로 설계하는 방법에 관한 연구를 진행하였다.

이에 반해, V2V 통신 시스템의 경우 Tx 차량과 Rx 차량 모두 제한된 형태의 도로 환경 위에 분포하였다는 제약이 있다. 다시 말해, Tx와 Rx의 위치에 대한 제약이 없는 일반적인 통신 환경과 달리 V2V 통신 환경에서는 Tx 차량과 Rx 차량은 형태가 정해진 도로 위에서 통신한다는 차이가 있다는 것이다. 따라서, V2V 통신 환경의 특징에 맞지 않는 기존 시스템의 설계 (예: 동일한 빔 폭을 가지는 코드북 디자인 등)를 그대로 이용할 경우 통신 성능이 떨어질 것이라 예상할 수 있으며 V2V 통신 환경에서의 Tx 차량과 Rx 차량의 각도 분포 등을 명확히 모델링하고 이에 맞춘 빔 폭이 서로 다른 코드북을 적용하는 등의 전반적인 통신 시스템을 재설계하여<sup>[7]</sup> Tx 차량과 Rx 차량간의 위치 및 각도를 tracking 하는 새로운 지향성 빔을 사용하는 기술을 적용한다면<sup>[11]</sup> 우리는 V2V 통신 환경에서 더 나은 통신 성능을 확보할 수 있으리라 기대할 수 있다.

본 논문은 이러한 V2V 통신 환경에 적합한 시스템을 설계하기 전의 선제 연구로써 V2V 통신 환경의 특성을 모델링하고 공간적 특성을 분석하였으며, 그중에서도 Tx 차량과 Rx 차량 사이의 각도 분포에 대한 수학적 모델을 제시하였다.

## II. 본 론

### 2.1 시스템 모델

이 절에서는 Tx 차량과 Rx 차량이 위치한 도로 환경에 대한 모델링을 진행하였다. 한 차선의 폭이  $w$ 인  $L$ 차선 도로 환경을 가정하며 각 차선에 위치한 차량

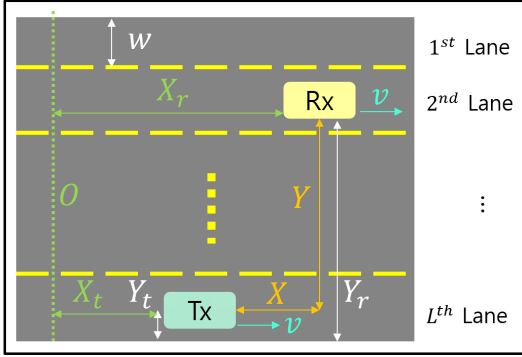


그림 1. Tx 차량과 Rx 차량이 위치한 도로 환경 모델링  
Fig. 1. Modeling for road environment with Tx and Rx vehicle

의 평균 속도는 모두  $v$  로 동일하다고 가정하였다<sup>1)</sup> (그림 1. 참고). 본 논문에서는 도로에 차량이 등장하는 사건은 discrete random 하며 차량간 간섭은 없다고 가정하는 undisturbed vehicle traffic 모델을 적용하였다<sup>2)</sup>. 이 모델 하에 일정 길이의 차선에서  $\alpha$  대의 차량이 나타날 확률을  $P(\alpha)$ 라 한다면, 차량이 나타나는 사건은 discrete random 하므로  $P(\alpha)$ 는 포아송 분포 (Poisson distribution)를 따르고 이는 다음과 같이 표현된다<sup>12)</sup>.

$$P(\alpha) = \frac{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^\alpha e^{-\frac{1}{\lambda}}}{\alpha!}. \quad (1)$$

이때,  $\lambda = vT$ 에서  $T$ 는 차량간 거리를 초로 환산한 차간간격 (Gap)을 나타내고<sup>13)</sup>  $\lambda$ 는 차량간의 평균 거리를 나타낸다.

일정 거리의 차선에서  $\alpha$  대의 차량이 나타날 확률  $P(\alpha)$ 가 포아송 분포를 따를 경우, 그 차선 위 차량간의 거리는 평균이  $\lambda$ 인 지수 분포 (Exponential distribution)를 따르게 된다<sup>12)</sup>. 제시한 도로 환경위 임의의 기준선  $O$  에서 차량의 진행 방향으로 가장 가까운 Tx 차량과 Rx 차량의 진행 방향으로의 위치를 나타내는 확률 변수를 각각  $X_t, X_r$  이라 하면  $X_t, X_r$ ,

의 probability density function (PDF)  $f_{X_t}(x_t)$ ,  $f_{X_r}(x_r)$ 은 지수 분포의 무기역성 (Memoryless) 성질에 의해 차량간 거리 분포와 마찬가지로 평균이  $\lambda$ 인 지수 분포를 따르게 된다<sup>14)</sup>. 이에 따라  $f_{X_t}(x_t)$ ,  $f_{X_r}(x_r)$ 는 식 (2), (3)과 같이 나타난다.

$$f_{X_t}(x_t) = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{1}{\lambda}x_t}, x_t \geq 0, \quad (2)$$

$$f_{X_r}(x_r) = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{1}{\lambda}x_r}, x_r \geq 0. \quad (3)$$

이때, Tx 차량 위치에 대한 Rx 차량의 진행 방향으로의 위치 차이를 나타내는 확률 변수를  $X = X_r - X_t$ 라 하면  $X$ 의 PDF  $f_X(x)$ 는 식 (4)와 같이 표현된다<sup>15)</sup>.

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{1}{2\lambda} e^{\frac{1}{\lambda}x}, & x < 0, \\ \frac{1}{2\lambda} e^{-\frac{1}{\lambda}x}, & x \geq 0. \end{cases} \quad (4)$$

이와 더불어, 가정된 도로 환경에서 Tx 차량과 Rx 차량의 진행 방향에 수직인 방향으로의 위치를 나타내는 확률 변수를 각각  $Y_t, Y_r$  이라 하고 모든 차량은 진행 방향에 수직인 방향으로 균일하게 분포하였다고 가정하면, 다시 말해 임의의 차선에 존재할 수 있다고 가정하면  $Y_t, Y_r$ 의 PDF  $f_{Y_t}(y_t)$ ,  $f_{Y_r}(y_r)$ 은 식 (5), (6)과 같이 나타난다.

$$f_{Y_t}(y_t) = \frac{1}{wL}, 0 \leq y_t \leq wL, \quad (5)$$

$$f_{Y_r}(y_r) = \frac{1}{wL}, 0 \leq y_r \leq wL. \quad (6)$$

이때, Tx 차량 위치에 대한 Rx 차량의 진행 방향에 수직인 방향으로의 위치 차이를 나타내는 확률 변수를  $Y = Y_r - Y_t$ 라 하면  $Y$ 의 PDF  $f_Y(y)$ 는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$f_Y(y) = \begin{cases} \frac{1}{wL} - \frac{y}{(wL)^2}, & 0 \leq y \leq wL, \\ \frac{1}{wL} + \frac{y}{(wL)^2}, & -wL \leq y \leq 0. \end{cases} \quad (7)$$

1) 실측 실험 결과, 각 차선에 위치한 차량의 속도 분포는 평균이  $v$  인 정규분포 (Normal distribution)의 형태로 모델링 된다<sup>13)</sup>.  
2) 해당 모델은 고속도로와 같이 traffic이 적으며 신호등의 간섭을 받지 않는 제한된 조건에서 성립하는 모델이다<sup>13)</sup>. 하지만, 수학적 편의성 및 차량간 거리와 각도의 확률 분포에 대한 직관 제공을 위해 본 논문에서는 해당 모델을 전반적인 V2V 통신 시나리오에 적용하였다.

2.2 차량간 직선거리 및 각도의 확률 분포

앞 절에서 가정한 도로 환경에서 Tx 차량과 Rx 차량의 진행 방향으로의 위치 차이를 나타내는 확률 변수  $X$ 와 Tx 차량 위치에 대한 Rx 차량의 진행 방향에 수직인 방향으로의 위치 차이를 나타내는 확률 변수  $Y$ 가 서로 독립이라 가정할 경우,  $X \geq 0, Y \geq 0$ 인 가정에 두 확률 변수의 joint PDF  $f_{X,Y}(x,y)$ 는 각 확률 변수의 PDF의 곱으로 표현된다. 이를 수식으로 나타내면 식 (8)과 같다. ( $x \geq 0, 0 \leq y \leq wL$ )

$$f_{X,Y}(x,y) = f_X(x)f_Y(y) = \frac{1}{2\lambda} e^{-\frac{1}{\lambda}x} \left( \frac{1}{wL} - \frac{y}{(wL)^2} \right). \quad (8)$$

우리는 가정한 도로 환경의 공간 특성을 분석하기 위해  $X, Y$ 로 정의된 직교 좌표계를 거리와 각도로 표현되는 극좌표계로 변형하고자 한다. 차량간 직선거리를 나타내는 확률 변수를  $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$ 이라 하고 차량간 각도를 나타내는 확률 변수를  $\theta = \tan^{-1}(Y/X)$ 라 하면, 기존 직교 좌표계에서 정의된 두 확률 변수  $X, Y$ 를  $X = R \cos(\theta), Y = R \sin(\theta)$ 라 치환할 수 있다. 이를 통해  $X, Y$ 의 joint PDF  $f_{X,Y}(x,y)$ 를 차량간 직선거리를 나타내는 확률 변수  $R$ 과 차량간 각도를 나타내는 확률 변수  $\theta$ 의 joint PDF  $f_{R,\theta}(r,\theta)$ 로 치환하여 수식으로 표현한 결과는 식 (9)와 같다.

$$f_{R,\theta}(r,\theta) = f_{X,Y}(r \cos(\theta), r \sin(\theta)) |J| = \frac{1}{2\lambda} e^{-\frac{1}{\lambda}r \cos(\theta)} \left( \frac{1}{wL} - \frac{r \sin(\theta)}{(wL)^2} \right) r. \quad (9)$$

$$(0 \leq r \leq \frac{wL}{\sin(\theta)}, 0 \leq \theta \leq \pi/2)$$

이때,  $J$ 는 야코비 행렬 (Jacobian Matrix)를 나타내며 야코비 행렬  $J$ 의 행렬식 (Determinant)을 나타내는  $|J|$ 의 크기는

$$|J| = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial r} \\ \frac{\partial x}{\partial \theta} & \frac{\partial y}{\partial \theta} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -r \sin(\theta) & r \cos(\theta) \end{vmatrix} = r \quad (10)$$

이다.

최종적으로, 차량간 직선거리를 나타내는 확률 변

수  $R$ 과 차량간 각도를 나타내는 확률 변수  $\theta$ 의 joint PDF  $f_{R,\theta}(r,\theta)$ 를 차량간 거리  $r (0 \leq r \leq \frac{wL}{\sin(\theta)})$ 에 대하여 적분하면  $f_\theta(\theta) = \int f_{R,\theta}(r,\theta) dr$  이므로  $\theta$ 의 PDF  $f_\theta(\theta)$ 를 알아낼 수 있다. 이는 아래와 같은 수식으로 나타내진다.

$$f_\theta(\theta) = \int f_{R,\theta}(r,\theta) dr = \int_0^{\frac{wL}{\sin(\theta)}} \frac{1}{2\lambda} e^{-\frac{1}{\lambda}r \cos(\theta)} \left( \frac{1}{wL} - \frac{r \sin(\theta)}{(wL)^2} \right) r dr = \frac{1}{2 \frac{wL}{\lambda} \cos^2(\theta)} \left( 1 + e^{-\frac{wL}{\lambda} \cot(\theta)} + \frac{2e^{-\frac{wL}{\lambda} \cot(\theta)} - 2}{\frac{wL}{\lambda} \cot(\theta)} \right). \quad (11)$$

$$(0 \leq \theta \leq \pi/2)$$

$$\therefore f_\theta(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{2 \frac{wL}{\lambda} \cos^2(\theta)} \left( 1 + e^{-\frac{wL}{\lambda} \cot(\theta)} + \frac{2e^{-\frac{wL}{\lambda} \cot(\theta)} - 2}{\frac{wL}{\lambda} \cot(\theta)} \right), & (0 \leq \theta \leq \pi/2, -\pi \leq \lambda \leq -\pi/2) \\ \frac{1}{2 \frac{wL}{\lambda} \cos^2(\theta)} \left( 1 + e^{\frac{wL}{\lambda} \cot(\theta)} + \frac{2e^{\frac{wL}{\lambda} \cot(\theta)} - 2}{-\frac{wL}{\lambda} \cot(\theta)} \right), & (\pi/2 \leq \theta \leq \pi, -\pi/2 \leq \lambda \leq 0) \end{cases}. \quad (12)$$

이때, 식 (12)는  $\theta$ 의 PDF  $f_\theta(\theta)$ 가  $X, Y$ 에 대하여 대칭이기 때문에 성립한다. 다시 말해,  $X, Y$ 에 대해 정의된  $x-y$  공간에서 1사분면 상에 ( $x \geq 0, 0 \leq y \leq wL$ ) 정의된  $f_\theta(\theta) (0 \leq \theta \leq \pi/2)$ 는  $x$ 축 기준으로 대칭이고  $y$ 축 기준으로도 대칭이라는 의미이다. 이 외에도, PDF  $f_\theta(\theta)$ 가 ( $0 \leq \theta \leq \pi/2$ )에서 정의된 경우,  $f_\theta(\theta)$ 의 cumulative distribution function (CDF)  $F_\theta(\theta') = P_\theta(\theta \leq \theta')$ 은 식 (13)과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}
 F_{\theta}(\theta') &= P_{\theta}(\theta \leq \theta') \\
 &= \frac{(1 + e^{-\frac{wL}{\lambda} \cot(\theta)} + 2e^{-\frac{wL}{\lambda} \cot(\theta)} - 2) \int_0^{\theta'} \frac{\frac{wL}{\lambda} \cot(\theta)}{2\frac{wL}{\lambda} \cos^2(\theta)} d\theta}{e^{-\frac{wL}{\lambda} \cot(\theta')} - 1 + \frac{wL}{\lambda} \cot(\theta')} \\
 &= \frac{2(\frac{wL}{\lambda} \cot(\theta'))^2}{2(\frac{wL}{\lambda} \cot(\theta'))^2} \tag{13}
 \end{aligned}$$

우리는 식 (12)와 식 (13)을 통해 차량간 각도를 나타내는 확률 변수  $\theta$ 의 PDF  $f_{\theta}(\theta)$  및  $f_{\theta}(\theta)$ 의 CDF  $F_{\theta}(\theta)$ 는  $\frac{wL}{\lambda}$ 이라는 상수에 의해 결정된다는 사실을 확인할 수 있으며 해당 상수  $\frac{wL}{\lambda}$ 를 traffic parameter라 부르기로 한다.

### III. 실험

#### 3.1 모의실험 설정

본 논문에서는 앞서 구한 차량간 각도를 나타내는 확률 변수  $\theta$ 의 PDF  $f_{\theta}(\theta)$ 와  $f_{\theta}(\theta)$ 의 CDF  $F_{\theta}(\theta)$ 의 traffic parameter  $\frac{wL}{\lambda}$ 에 따른 변화를 관찰하고  $f_{\theta}(\theta)$  유도식의 타당성을 판단하고자 한다. 또한, 앞서 구한  $f_{\theta}(\theta)$ 가 기존 통신 시스템에서 적용되는 각도상의 동일 확률 분포 가정 (i.e.  $f_{\theta}(\theta) = 1/2\pi, (\theta \in (0, 2\pi])$ ) 과 얼마나 차이가 나는지를 확인하기 위하여 다음과 같은 모의실험을 설정하였다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터  
Table 1. Simulation parameters.

Width of the lane $w$	4 m
Number of the lanes $L$	6
Average speed of the vehicle $v$	5 m/s (Urban) 30 m/s (Highway)
Average distance between vehicle in heading direction $\lambda$	10 m (Urban) 60 m (Highway)
Average gap between vehicles $T$	2 s
Number of Monte-Carlo iterations	$10^5$

우리는 모의 실험상에서 한 차선의 폭이  $w = 4$  m 인  $L = 6$  차선 도로 환경을 가정하였다. 각 차선 상에 위치한 차량들의 평균 속도는 모든 차선에서 동일하다고 가정하였으며, 도심지 (Urban)와 고속도로 (Highway) 환경에서의 차량의 평균 속도는 각각 5 m/s (=18 km/h), 30 m/s (=108 km/h) 로 가정하였다. 이때 차량간의 평균 거리  $\lambda$ 는 차량의 평균 속도 \* 2 s 로 구해지므로<sup>[13,16]</sup>  $T = 2$  s 이며  $\lambda = 10$  m, 60 m 가 된다. 따라서 주어진 모의실험 환경에서의 traffic parameter는 각각 도심지에서  $\frac{wL}{\lambda} = \frac{4m * 6}{10m} = 2.4$ , 고속도로 환경에서  $\frac{wL}{\lambda} = \frac{4m * 6}{60m} = 0.4$  이다.

모의실험 결과는 각  $10^5$ 번의 몬테카를로 방법을 적용하여 구해졌으며 이를 통해 모의실험 환경에서의 차량간 각도에 대한 empirical CDF 와 앞서 구한 이론적 CDF를 비교하여 제시한 모델의 타당성을 검증하였다.

#### 3.2 모의실험 결과

모의실험 결과는 그림 2-4와 같다. 그림 2는 traffic parameter  $\frac{wL}{\lambda}$ 에 따른  $f_{\theta}(\theta)$ 의 변화를 나타내고 있으며 도심지와 같이 차량의 평균 속도가 낮은 곳 (traffic parameter  $\frac{wL}{\lambda} = 2.4$ ) 에서의 차량간 각도 분포는 기존 가정인 균일 분포와 유사한 형태를 보이는 것을 확인할 수 있지만, 고속도로 환경과 같이 차

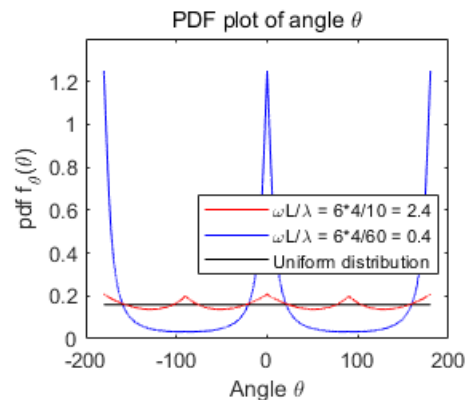


그림 2. Traffic parameter  $\frac{wL}{\lambda}$ 에 따른 확률 밀도 함수  $f_{\theta}(\theta)$   
Fig. 2. Probability density function  $f_{\theta}(\theta)$  w.r.t. traffic parameter  $\frac{wL}{\lambda}$

량의 평균 속도가 높은 곳 (traffic parameter  $\frac{wL}{\lambda} = 0.4$ ) 에서의 차량간 각도 분포는 균일 분포와 다른 각도 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다.

이러한 경향은 traffic parameter  $\frac{wL}{\lambda}$  에 따른  $f_{\theta}(\theta)$  의 변화를 극좌표계상에 보인 그림 3.에서 더욱 두드러지게 나타난다. 그림 3.에서 나타나듯 고속도로 환경 (traffic parameter  $\frac{wL}{\lambda} = 0.4$ )에서는 도심지 환경 (traffic parameter  $\frac{wL}{\lambda} = 2.4$ )과 달리 Tx 차량의 진행 방향 쪽에 Rx 차량이 존재할 확률이 진행 방향에 수직인 방향 쪽에 존재할 확률보다 확연히 높다는 사실을 확인할 수 있다.

앞선 모의실험의 결과를 간단히 설명하자면 다음과 같다. Traffic parameter  $\frac{wL}{\lambda}$  가 작은 환경이란 도로의 폭  $wL$ 보다 차량간의 평균 거리  $\lambda$ 가 상대적으로 큰 환경이라는 것을 의미하며 이는 통신을 시도하고자 하는 차량의 진행 방향과 수직인 방향에 다른 차량이 적게 존재하는 vertically sparse 한 V2V 통신 환경이라는 것을 의미한다. 이 경우, 일반적으로 Rx 차량은 Tx 차량의 진행 방향 쪽에 모여있게 되며 Tx 차량

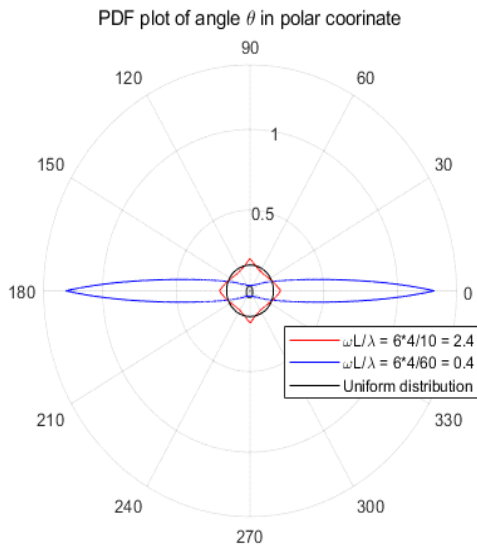


그림 3. Traffic parameter  $\frac{wL}{\lambda}$  에 따른 극좌표계상에서의 확률 밀도 함수  $f_{\theta}(\theta)$   
 Fig. 3. Probability density function  $f_{\theta}(\theta)$  w.r.t. traffic parameter  $\frac{wL}{\lambda}$  in polar coordinate

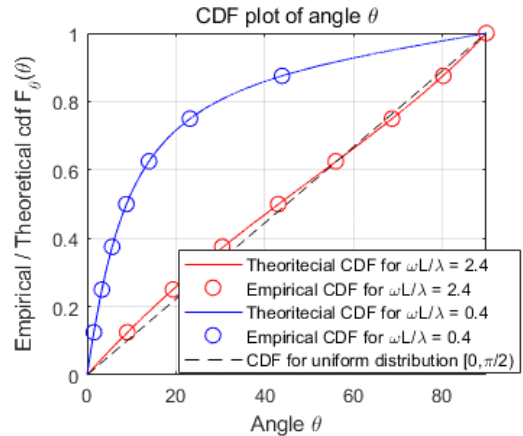


그림 4. Traffic parameter  $\frac{wL}{\lambda}$  에 따른 누적 분포 함수  $F_{\theta}(\theta)$   
 Fig. 4. Cumulative distribution function  $F_{\theta}(\theta)$  w.r.t. traffic parameter  $\frac{wL}{\lambda}$

의 진행 방향 기준으로 양옆에는 높은 확률로 Rx 차량이 존재하지 않게 된다. 이로 인해 그림 4.와 같이 traffic parameter  $\frac{wL}{\lambda} = 0.4$  인 고속도로 환경에서는 약 90 %의 Rx 차량이 Tx 차량의 진행 방향에서 45° 안에 존재하게 되며 약 10 %의 Rx 차량만이 Tx 차량의 진행 방향에서 45° 밖에 존재하게 되는 것이다.

Traffic parameter  $\frac{wL}{\lambda}$  가 크다는 것은 앞선 상황과 정반대인 환경이라는 것을 나타내며 통신을 시도하고자 하는 차량의 진행 방향과 수직인 방향에 다른 차량이 많은 vertically dense 한 V2V 통신 환경이라는 것을 의미한다. 이 경우 Rx 차량은 대체로 모든 방향으로 균일하게 분포하게 된다.

이 외에도 우리는 모의실험을 통해 구한 empirical CDF와 이론적으로 구한 CDF가 상당히 일치한 경향을 보인다는 사실을 확인하였으며 이는 그림 4.에 나타난다. 이를 통해 제시한 확률 분포 모델이 타당하다는 것을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

이번 논문에서는 특정 형태로 가정한 도로 환경에서의 Tx 차량과 Rx 차량간 거리 및 각도에 대한 확률 분포 모델링을 진행하였으며 그 타당성을 모의실험을 통해 검증하였다. 모의실험을 통해 제시한 차량간 각도에 대한 확률 분포 모델링이 타당하다는 사실을 확

인하였으며 차량의 평균 속도 등에 의해 결정되는 traffic parameter에 따라 차량간 각도 분포는 IEEE 802.15.3c과 같은 표준에서 적용되는 가정인 균일 각도 분포와 큰 차이가 생길 수 있음을 확인하였다.

우리는 이렇게 구한 V2V 통신 환경에서의 Tx 차량과 Rx 차량의 각도 분포 모델링 결과를 새로운 통신 기법 (ex. 코드북 디자인<sup>[7]</sup>, 빔 트레이닝 기법 및 빔 추적 기법 등<sup>[11,17]</sup>)에 적용한다면 기존 통신 시스템 대비 더 나은 데이터 전송량을 얻을 수 있으리라 기대한다. 따라서 우리는 관련 연구들을 추후 진행할 계획이며 mmWave 대역에서의 V2V 통신 시나리오에 관한 연구 및 실험 또한 진행할 계획이다.

### References

[1] K. Sakaguchi and R. Fukatsu, "Cooperative perception realized by millimeter-wave V2V for safe automated driving," in *2018 APMC*, pp. 180 - 182. Yokohama, Japan, Nov. 2018. (<https://doi.org/10.23919/apmc.2018.8617507>)

[2] J. Harding, G. Powell, R. Yoon, J. Fikentscher, C. Doyle, D. Sade, M. Lukuc, J. Simons, and J. Wang, "*Vehicle-to-vehicle communications: readiness of V2V technology for application*," United States National Highway Traffic Safety Administration, Tech. Rep. 2014. ([https://doi.org/10.1007/978-0-85729-085-4\\_46](https://doi.org/10.1007/978-0-85729-085-4_46))

[3] A. Vinel, "3GPP LTE versus IEEE 802.11p/WAVE: Which technology is able to support cooperative vehicular safety applications?" *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 1, no. 2, pp. 125-128, 2012. (<https://doi.org/10.1109/wcl.2012.022012.120073>)

[4] J. Choi, V. Va, N. Gonzalez-Prelcic, R. Daniels, C. R. Bhat, and R. W. Heath, "Millimeter-wave vehicular communication to support massive automotive sensing," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 12, pp. 160-167, 2016. (<https://doi.org/10.1109/mcom.2016.1600071cm>)

[5] M. Harounabadi, D. M. Soleymani, S. Bhadauria, M. Leyh, and E. RothMandutz, "V2X in 3GPP standardization: NR sidelink in

release-16 and beyond," *IEEE Commun. Standards Mag.*, vol. 5, no. 1, pp. 12-21, 2021. (<https://doi.org/10.1109/mcomstd.001.2000070>)

[6] 3GPP TS 38.214 V17.1.0 (2022-04)

[7] S.-H. Hyun, J. Song, K. Kim, J.-H. Lee, and S.-C. Kim, "Adaptive beam design for V2I communications using vehicle tracking with Extended Kalman Filter," *arXiv preprint arXiv:2108.02584*, 2021. (<https://doi.org/10.1109/tvt.2021.3127696>)

[8] J. Song, J. Choi, and D. J. Love, "Common codebook millimeter wave beam design: Designing beams for both sounding and communication with uniform planar arrays," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 65, no. 4, pp. 1859-1872, 2017. (<https://doi.org/10.1109/tcomm.2017.2665497>)

[9] Y. Yaman and P. Spasojevic, "Reducing the LOS ray beamforming setup time for IEEE 802.11ad and IEEE 802.15.3c," in *MILCOM 2016*, pp. 448-453, Baltimore Maryland, USA, Nov. 2016. (<https://doi.org/10.1109/milcom.2016.7795368>)

[10] S. Noh, M. D. Zoltowski, and D. J. Love, "Multi-resolution codebook and adaptive beamforming sequence design for millimeter wave beam alignment," in *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 16, no. 9, pp. 5689-5701, Sep. 2017. (<https://doi.org/10.1109/twc.2017.2713357>)

[11] Z. Yang, P. H. Pathak, Y. Zeng, and P. Mohapatra, "Sensor-assisted codebook-based beamforming for mobility management in 60 GHz WLANs," in *2015 IEEE 12th Int. Conf. Mobile Ad Hoc and Sensor Syst.*, pp. 333-341, 2015. (<https://doi.org/10.1109/mass.2015.58>)

[12] J. C. Cooper, "The poisson and exponential distributions," *Mathematical Spectrum*, vol. 37, no. 3, pp. 123-125, 2005. (<https://doi.org/10.1007/s11858-018-0957-x>)

[13] D. L. Gerlough and M. J. Huber, "*Traffic flow theory*," Tech. Rep., 1976. (<https://doi.org/10.1016/C2015-0-01702-6>)

[14] R. E. Walpole, R. H. Myers, S. L. Myers, and

K. Ye, *Probability and statistics for engineers and scientists*, Macmillan New York, vol. 5, 1993.

(<https://doi.org/10.1016/C2018-0-02166-0>)

- [15] H. Wu, R. Fujimoto, and G. Riley, "Analytical models for information propagation in vehicle-to-vehicle networks," *VTC 2004-Fall*, vol. 6, pp. 4548-4552, Los Angeles, USA, Sep. 2004.

(<https://doi.org/10.1109/vetecf.2004.1404940>)

- [16] 3rd Generation Partnership Project (3GPP) "Study on evaluation methodology of new vehicle-to-everything (V2X) use cases for LTE and NR(Release 15)," TR 37.885-15.3.0, Jun. 2019.

- [17] K. Kim, et al., "A beam tracking technique for mmWave V2V communication system with the use of velocity measurements" in *Proc. KICS Summer Conf.*, pp. 611-612, Pyeongchang, Korea, Aug. 2020.

#### 김근우 (Keunwoo Kim)



2019년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 학사 졸업

2019년 3월~현재 : 서울대학교 공과대학 전기정보공학과 석박사통합과정

<관심분야> 5G/6G, 이동통신, 차량용 무선통신

[ORCID:0000-0003-3799-6780]

#### 현성환 (Seong-Hwan Hyun)



2018년 2월 : 동국대학교 전자전기공학과 학사 졸업

2018년 3월~현재 : 서울대학교 공과대학 전기정보공학과 석박사통합과정

<관심분야> B5G통신, V2X 무선통신, 무선채널 모델링

[ORCID:0000-0002-6221-7606]

#### 김지혜 (Jihye Kim)



2021년 2월 : 연세대학교 공과대학 전기전자공학과 학사 졸업

2021년 3월~현재 : 서울대학교 공과대학 전기정보공학과 석박사통합과정

<관심분야> 무선 측위, 레이더 신호 처리, 차량용 레이더

[ORCID:0000-0003-1119-0770]

#### 김성철 (Seong-Cheol Kim)



1984년 2월 : 서울대학교 공과대학 전기공학과 학사 졸업

1987년 2월 : 서울대학교 공과대학 전기공학과 석사 졸업

1995년 7월 : Polytechnic Institute of NYU 공과대학 전기공학과 박사 졸업

1992년 4월~1994년 10월 : Symbol Technologies, Inc. 연구원

1995년 8월~1999년 1월 : AT&T Bell Laboratories

1999년 3월~2003년 2월 : 서울대학교 전기정보공학부 조교수

2003년 3월~2008년 2월 : 서울대학교 전기정보공학부 부교수

2008년 3월~현재 : 서울대학교 전기정보공학부 교수  
<관심분야> 5G+/6G 이동 통신 시스템, 무선채널 모델링, 전파 전파 분석 & 전파 환경 분석

[ORCID:0000-0002-7896-5625]