

# IEEE 802.11p MAC 기반 차량 네트워크에서의 분산된 브로드캐스팅 모델링

정 대 인\*

## Modeling of the Distributed Broadcasting in IEEE 802.11p MAC Based Vehicular Networks

Daein Jeong\*

요 약

본 논문은 차량 네트워크에 적용되는 IEEE 802.11p MAC 프로토콜에서의 브로드캐스팅 동작을 모델링하였다. 도로상의 안전 서비스 구현에 필요한 beacon 메시지는 브로드캐스팅 방식으로 교환되는데 최적의 안전 서비스 구현을 위해 브로드캐스팅 동작의 해석적 모델링이 필요하다. 모델링에 반영된 IEEE 802.11p 고유의 특성은, CCH(Control Channel)와 SCH(Service Channel) 간의 채널 스위칭 동작과 이로 인해 beacon 메시지를 교환하는 CCH 구간이 시간적 제한을 갖는다는 점, 그리고 재전송이 없다는 점이다. 이러한 고유 특성이 반영된 모델링 설계에서 본 논문은 beacon 메시지의 발생 패턴에 대한 제한을 두지 않았다. 즉, CCH 구간 내 분산된 발생 및 브로드캐스팅을 모델링하였다. 시뮬레이션 결과와의 비교를 통해 본 논문에서 제안한 모델링의 정확성을 확인하였다. 또한, beacon 메시지 발생 및 브로드캐스팅을 분산시킴으로써 전달률, 전송 지연 및 지연의 변동성 등 모든 성능 지표가 개선되는 것을 확인하였다.

**Key Words** : modeling, broadcasting, IEEE 802.11p MAC, DSRC, VANET, channel switching

### ABSTRACT

In this paper, we propose a modeling of the broadcasting in the IEEE 802.11p MAC protocol for the VANET(Vehicular Ad hoc Networks). Due to the fact that the beacon message which is needed for the safety services is shared via broadcasting, the analytical modeling of the broadcasting is crucial for the optimum design of the services. Two characteristics specific to the IEEE 802.11p are reflected in the modeling; the time limited CCH interval caused by the channel switching between the CCH and SCH, and no retransmission of the broadcasted messages. In the proposal, we assumed no restriction on the moment of generation of the beacon messages. We allow the messages to be generated and broadcasted within the whole CCH interval. Simulation results prove the accuracy of the proposed modeling. Noticeable improvements are also observed in terms of the performance indices such as the successful delivery ratio, transmission delay, and the variation of the delay.

### I. 서 론

실용적이고 인간 친화적인 교통 환경 구축을 목적으로 하는 지능형 교통시스템(ITS, Intelligent

※ 본 논문은 2013년 한국외국어대학교 교내 연구비 지원으로 수행되었습니다.

• First Author and Corresponding Author : 한국외국어대학교 공과대학 디지털정보공학과, djeong@hufs.ac.kr, 종신회원  
논문번호 : KICS2013-09-395, 접수일자 : 2013년 9월 3일, 최종논문접수일자 : 2013년 10월 25일

Transportation System)은 무선 통신 관련 기술 발전과 더불어 주요 연구 이슈로 부각되고 있다. 도로 상에서 인터넷 접속을 통한 다양한 서비스 제공, 원활한 교통 흐름을 유지하기 위한 트래픽 제어, 운전자의 안전을 우선으로 하는 안전 관련 서비스 개발 등 지능형 교통시스템 구축을 위한 연구와 기술 표준화 작업이 한창이다. 이러한 지능형 교통시스템에서 VANET(Vehicular Ad-hoc Network)은 도로상의 차량 간 또는 차량과 노변 장치(RSU, Road-Side Unit) 간의 무선 통신 환경을 구성한다. ITS 구축을 위한 IEEE 1609 WAVE(Wireless Access in Vehicular Environments) 표준에서 VANET 지원을 위한 MAC 프로토콜은 신속한 전송을 주목적으로 하는 DSRC(Dedicated Short Range Communications) 표준을 적용한다<sup>[1]</sup>. DSRC 기술은 5.9GHz 밴드의 75MHz 대역폭을 사용하며 IEEE 802.11a에 기반을 두면서 통신 오버헤드를 줄이고자 하였고, 이는 IEEE 802.11p로 표준화되고 있다<sup>[2]</sup>.

DSRC는 75MHz 대역에 7개의 채널을 정의하는데, 1개는 CCH(Control Channel)로 정의하여 시스템 제어 및 안전 관련 메시지 전송에 사용하고 나머지는 최대 6개 채널의 SCH(Service Channel)로 설정하여 안전과는 무관한 데이터 교환에 사용한다. 이러한 채널 설정을 활용하여, WAVE 응용을 위한 확장된 MAC 표준으로서 IEEE 802.11p가 정의되었다. IEEE 802.11p는 EDCA(Enhanced Distributed Channel Access) 기반 priority 기능을 지원하는 것과 더불어 다채널 구조의 개념을 갖는다. 다채널 지원은 주파수 분할과 시분할 다중접속을 혼합한 형태로 이루어진다. 그림 1은 WAVE MAC의 시분할 구조를 도시한다. 시간은 연속적인 100ms 구간 단위로 나누며, 각 100ms 구간마다 전반 50ms는 CCH에 할당되고 후반 50ms는 SCH에 할당된다. 각 50ms 구간의 시작부분에는 4ms의 GI(Guarding Interval)을 두는데 이는 CCH와 SCH 간 채널 스위칭의 안정화를 위한 것이다. 이와 같은 채널 스위칭을 시행하는 것은 WAVE 장비가 single-channel 무선장비인 경우에도 시차를 두고 CCH와 SCH 채널에 모두 접속이 가능하도록 하기 위해서이다. 안전을 위한 정보 취득을 위해서 CCH 접속이 누구에게든 필수적임을 반영한 것이다. Single-channel 무선장비의 경우 CCH와 SCH 간의 채널 스위칭을 통해 안전 관련 서비스와 비안전 관련 서비스 모두 수용이 가능하다.

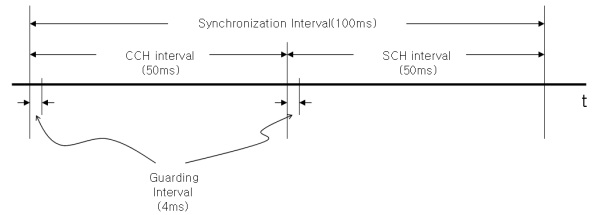


그림 1. WAVE MAC 시분할 구조  
Fig. 1. Time division in WAVE MAC

CCH 구간에서는 두 가지 종류의 메시지를 전송한다. 첫째는 안전 운전 관련 응용프로그램을 위한 메시지이고, 둘째는 SCH 채널에서 가용한 서비스를 공지하기 위한 WSA(WAVE Service Advertisement) 메시지이다. 안전 운전 관련 메시지는 돌발적 상황에 관련된 사건 기반 메시지와 안전 운전을 위한 기본 정보로서 주기적으로 전송되는 상태 메시지로 분류된다. 사건 기반 메시지는 간헐적으로 발생하며 신속한 전송을 위해 priority 지원 기능이 적용되며, 상태 메시지는 주기적으로 발생하여 안전 관련 응용들의 주요 입력 정보가 된다. 이들은 모두 메시지 특성상 브로드캐스팅이 요구되는 공통점을 갖는다. 브로드캐스팅 전송 형태에서는 일반적으로 트래픽 부하에 따른 전송 효율이 주요 성능 지표인데, 그러한 면에서 간헐적인 사건 기반 메시지에 비해 데이터 양이 많은 주기적인 상태 메시지의 전송 효율에 대한 관심을 많은 연구들이 갖게 되었다. 본 논문도 이러한 상태 메시지의 브로드캐스팅 전송 효율에 초점을 둔 연구이다.

주기적 전송이 요구되는 상태 메시지에는 차량의 위치와 더불어 속도, 운행 방향 등 정보가 포함되며 이를 beacon 메시지로 부르기로 한다. Beacon 메시지는 일반적으로 50~100ms의 주기로 발생하여 브로드캐스팅된다. 100ms의 경우 그림 1의 시분할 구조를 참조하면 하나의 CCH 구간에서 각 차량은 한 개의 beacon 메시지를 브로드캐스팅하게 된다. Beacon 메시지가 안전에 관련된 정보이므로 전달 지연과 전달률에 대한 엄격한 요구가 주어지며 지연은 500ms 이내, 전달률은 99% 이상이 요구된다<sup>[3]</sup>.

[4]는 beacon 메시지 전달 성능 분석을 위해 IEEE 802.11p의 브로드캐스팅 동작에 관한 모델링을 제시하였다. 특히, 기존의 연구 결과들에 비해 IEEE 802.11p의 채널 스위칭 동작을 반영한 점에서 유용한 모델링이다. 다만, 차량들의 beacon 메시지가 CCH 구간 시작 이전에 모두 발생 완료하여 CCH 구간 시작과 동시에 채널 경합을 갖는 것을 전제로 한 모델링으로서, beacon 메시지 발생 패턴의 제약을 받는다. 직관적으로, beacon 메시지 발생이 CCH 구간 내에

분산되면 전송을 위한 채널 경합도 분산되어 채널의 효율성이 개선될 것이라는 예상을 할 수 있음에 반해 이러한 발생 패턴은 [4]의 모델링에 반영되지 않은 것이다. 본 논문도 CCH 구간에서의 beacon 메시지 전송 성능에 대한 분석을 위해 브로드캐스팅 동작의 모델링을 제시한다. 특히 CCH와 SCH 간의 채널 스위칭을 반영하였다. 이 모델링을 이용하여 beacon 메시지의 전달률에 영향을 미치는 주요 요소들과 각 성능 지표와의 관계를 파악하고 성능 제고를 위한 방안을 모색할 수 있다. 특히 본 논문은 beacon 메시지 발생 패턴에 제한을 두지 않는 일반적 모델링을 제시한다. 실제 [5]에서 beacon 메시지가 CCH 구간 전반에 걸쳐 고르게 발생분포를 갖는 경우 beacon 메시지의 전송 지연은 물론 전달률이 개선되는 것을 확인하였으므로 본 논문이 제시한 모델링의 중요성을 기증할 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 본 연구와 관련된 기존 연구결과들을 살펴보고, 3장에서는 본 논문이 제시하는 브로드캐스팅 모델링을 소개한다. 4장에서는 제시한 모델링에 대한 정당성을 실험을 통해 확인하고, 모델링을 이용한 다양한 분석 결과들을 논의한다. 5장에서는 주요 결론과 향후 연구 계획을 제시한다.

## II. 관련 연구

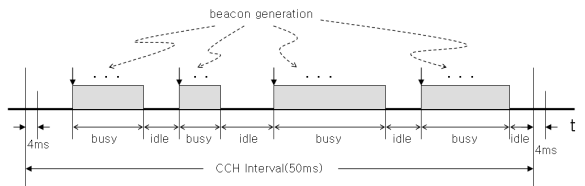
VANET에서 beacon 메시지는 브로드캐스팅 전송이 이루어지며 ACK 응답이 없고 충돌에 따르는 재전송은 시행되지 않는다. 따라서 MAC 파라미터인 contention window를 충돌 감지에 따라 조정하는 동작은 적용되지 않는다. 이러한 특성을 고려하여 IEEE 802.11p 성능분석을 위한 연구결과는 다양하게 이루어졌다. [3]에서는 VANET에서의 IEEE 802.11p 기반 브로드캐스팅에 대한 시스템 해석이 주어졌다. Beacon 메시지의 Poisson 발생 분포를 전제하여 각 노드 버퍼를  $M/G/1$  큐로 표현하였으며 beacon 메시지 지연 및 전달률 표현식을 구하였다. 그러나 채널 스위칭으로 인해 CCH 구간이 제한되는 특성은 고려되지 않았다. [6]에서는 beacon 메시지의 주기적 전송에 대한 해석적 모델링을 제시하였다. 각 노드 버퍼를  $D/M/1$  큐로 모델링하였고, 해석의 편의를 위해 각 차량이 항상 전송할 데이터를 보유하는 greedy 소스 모델을 적용하였다. 이는 실제의 beacon 메시지 발생과는 차이가 있으며, 또한 채널 스위칭 동작도 반영되지 않았다.

위 두 논문 관련하여 유의할 점은 beacon 메시지가 갖는 정보의 한시성이다. 즉, 움직이는 차량 정보는 매우 동적이므로 이전에 발생되어 전송되지 못한 beacon 메시지는 새롭게 발생한 beacon 메시지로 대체된다. 따라서 큐잉 분석이 beacon 메시지의 성능 분석에서 큰 의미를 갖지 않는다. 이를 반영하여 [7]에서는 버퍼링 변수를 배제하고 시스템 상태를 두 개의 파라미터(전송 경합중인 차량 개수와 채널 상태)를 사용하여 2차원의 embedded Markov chain으로 간략히 모델링 하였다. 그러나 채널 스위칭은 반영되지 않았다. 채널 스위칭으로 인해 CCH 구간이 제한되면 beacon 메시지의 전달률에 중요한 영향을 미친다. 즉, 전송 실패가 beacon 메시지간의 충돌에 의해 발생하는 것 외에도 전송 중 채널 스위칭이 시행되어 전송이 실패하는 경우도 추가된다. 이러한 점을 고려할 때 시스템 상태 파라미터로서 시간이 추가로 고려되어야 함을 알 수 있다.

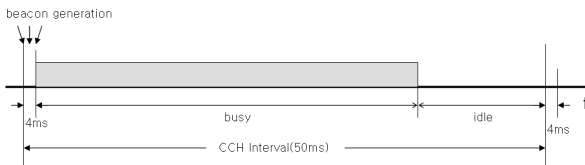
CCH 구간의 잔여시간을 변수로 고려하여 채널 스위칭 동작을 반영한 연구는 [4]에서 처음으로 제시되었다. IEEE 802.11p/WAVE 기반의 VANET에서 CCH 구간 동안의 브로드캐스팅 전송을 recursive 형태로 모델링하였다. 이를 확장하여 [8]에서는 priority 지원이 추가된 모델링을 제시하였다. [4]와 [8]은 노드(차량)들이 CCH 구간 시작과 동시에 모두 beacon 메시지 전송대기 상태에 있음을 가정한다. 그러나, 이와 같이 모든 노드들이 beacon 메시지 전송을 위한 경쟁에 동시에 참여하는 것은 충돌 개연성을 높이게 된다. Contention window 기반의 backoff 동작이 수행되지만 beacon 메시지 간의 충돌을 줄이기 위해서는 contention window를 크게 설정해야 하는데 이는 두 가지의 문제점을 갖는다. 첫째는, backoff 동작이 길어져 전송대기 지연의 증가를 피할 수 없다는 점이며, 둘째는 backoff 동작이 CCH 구간 내에서 완료되지 못하여 전송기회를 갖지 못하는 노드가 발생할 수도 있다는 점이다. 또한 전달률의 개선 효과도 단순한 contention window 조정으로는 한계가 있다는 점이 확인되고 있다<sup>9)</sup>.

본 논문은 beacon 메시지의 발생 시점에 대한 제한을 없애고, 각 노드의 beacon 메시지가 CCH 구간 전체에 분산되어 발생하고 브로드캐스팅되는 시스템의 모델링을 제시한다. 이는 [4]에서 주어진 모델을 확장한 형태로 주어진다. 시스템 내 전송 또는 backoff 대기 중인 beacon 메시지가 존재하는 시간 구간을 busy 구간, 그러한 메시지가 존재하지 않는 시간 구간을 idle 구간이라 할 때, CCH 구간 전체에 beacon 메시

지 발생이 분포하면 시스템은 그림 2(a)와 같이 busy 구간과 idle 구간을 반복하게 될 것이다. 반면, [4]와 같이 모든 노드들이 CCH 구간 시작 이전에 beacon 메시지 발생을 완료한 상태에 있다면 CCH 구간 동안 시스템에는 그림 2(b)와 같이 한 개의 busy 구간만이 존재하게 된다. 즉, [4]는 시스템 내 한 개의 busy 구간 해석에만 적용 가능하다는 제한을 갖는다. Beacon 메시지 발생이 CCH 구간 전체에 분포하면 새로운 beacon 메시지가 busy 구간뿐만 아니라 idle 구간에도 발생할 수 있으며 그 경우 새로운 busy 구간을 형성하게 된다. 따라서 하나의 busy 구간 모델링은 부족하고, 하나의 CCH 구간 전체에 걸친 시스템 동작을 모델링해야 한다. 이와 같은 일반적인 시스템 운용 분석을 위해서는 [4] 모델링의 확장이 필요하다.



(a) 분산 발생의 경우  
(a) Distributed generation case



(b) 사전 발생의 경우  
(b) Pre-generated case

그림 2. Beacon 메시지 발생 분포에 따른 CCH 구간 동작  
Fig. 2. CCH interval activity with distribution of the beacon generations

### III. 시스템 모델링

도로 상의 특정 영역에서 전체  $N$  개의 차량을 가정한다. 본 논문이 제시하는 모델링에서 전제된 조건들은 다음과 같다. 첫째, 모든 노드들은 전송거리 내에 포함되어 한 홉 브로드캐스팅으로 정보 전달이 가능하며, hidden terminal은 없는 것으로 가정한다. 둘째, 전송 오류는 발생하지 않는 것으로 가정한다. 따라서 전송 실패는 동시 전송에 의한 충돌이나 전송 중 채널 스위칭 발생에 의해서만 초래된다. 셋째, 응용프로그램이 채널 스위칭을 인지하여 CCH 구간에서만 beacon 메시지를 발생하며, 전체 노드들로부터의 beacon 메시지 발생 분포는 고른 분포(uniform distribution)를 가정한다. 발생 빈도는 하나의 CCH

구간에서 각 노드들이 하나의 beacon 메시지를 발생시키는 것을 가정한다. 넷째, 브로드캐스팅 전송에 대한 ACK 응답은 없으며 따라서 충돌 감지에 따른 재전송은 없다. 그러므로 contention window 값은 고정되며 이 고정된 값을 CW로 표기한다. 다섯째, 차량 이동성에 비해 메시지 전송의 시간 단위가 매우 작으므로 하나의 CCH 구간 분석에서 차량의 이동성은 고려하지 않는다<sup>10)</sup>.

확률  $P(l,n,w,k)$ 은 다음과 같이 정의된다<sup>4)</sup>. Beacon을 발생하여 전송 대기 중인 노드가  $n$ 개 있고 이들의 최대 backoff count 값이  $w$ 인 환경에서,  $l-1$  번째 슬롯까지는 아무런 전송이 없고  $l$  번째 슬롯에서 처음으로  $k$  개 노드의 backoff count 값이 0이 되어  $k$  개 전송이 동시에 이루어지는 확률을  $P(l,n,w,k)$ 로 정의한다. 이는  $(1 \leq l \leq w, 1 \leq k \leq n)$ 의 조건에서 의미를 가지며 다음과 같이 표기된다<sup>4)</sup>.

$$P(l,n,w,k) = \left(1 - \frac{l-1}{w}\right)^n \binom{n}{k} \left(\frac{1}{w-l+1}\right)^k \left(1 - \frac{1}{w-l+1}\right)^{n-k} \quad (1)$$

Backoff count 값이 주어진 구간에서 균일하게 선택되어지는 점이 반영되었다.

확률  $P(l,n,w,k)$ 는 이미 발생된 beacon 메시지의 전송에 대한 확률 값이다. 이에 비해 본 연구는 beacon 메시지의 임의적 발생을 반영하는 모델링이므로 다음과 같은 확률 정의가 추가로 필요하다. 새롭게 발생하는 beacon 메시지는 채널이 점유상태일 때 발생한 경우에는 버퍼에 저장 후 backoff 동작이 적용되는데 비해 채널이 유희상태일 때 발생한 경우에는 즉시 전송되므로 [2] 이 경우 복수 개 동시 발생은 충돌을 낳는다. 이러한 점을 반영하여 새로운 beacon 메시지 발생은 두 가지 형태로 분리하여 표기한다. 먼저 충돌의 개연성을 갖는 확률 변수로서  $G(l,m,t,k)$ 는, CCH 구간 종료까지 남은 시간이  $t$  슬롯인 현재까지 beacon 메시지를 발생시킨 노드가  $m$ 개인 상황에서 향후  $l-1$  번째 슬롯까지는 아무런 발생이 없고  $l$  번째 슬롯에서 처음으로  $k$  개의 발생이 동시에 이루어지는 확률을 정의한다. 이는 CCH 구간을  $T$ 라 할 때,  $(1 \leq l \leq t \leq T, 1 \leq k \leq N-m)$ 의 조건에서 정의된다.  $G(l,m,t,k)$  표현식을 위해 다음과 같은 이벤트를 정의한다. *Event*(사전조건)의 형식이다.

.  $E_1$ : *Event*( $l-1$  슬롯 동안 발생 안함)  $T-t$  슬롯 동안 발생 안함

.  $E_2$ : Event(첫 번째 슬롯에서 발생함  $E_1$ )

$$\Pr(E_3) = \frac{F(T-t+l) - F(T-t)}{1 - F(T-t)} \quad (5)$$

각 노드의 beacon 발생 확률 분포 함수(PDF)를  $f(\cdot)$ , 누적 분포함수(CDF)를  $F(\cdot)$ 로 두면, 위  $E_1$ 과  $E_2$ 의 확률 값  $\Pr(E_1)$ ,  $\Pr(E_2)$ 는 각각 다음과 같다.

$$\Pr(E_1) = \frac{1 - F(T-t+l-1)}{1 - F(T-t)}, \quad \Pr(E_2) = \frac{f(l)}{1 - F(T-t+l-1)} \quad (2)$$

이를 이용하면  $G(l, m, t, k)$ 는 다음과 같다.

$$G(l, m, t, k) = \Pr(E_1)^{N-m} \binom{N-m}{k} \Pr(E_2)^k (1 - \Pr(E_2))^{N-m-k} \quad (3)$$

$f(\cdot)$ 를 구간  $[0, T]$ 에서 정의된 균일분포(uniform distribution)로 가정하면 식(3)은

$$G(l, m, t, k) = \left(1 - \frac{l-1}{t}\right)^{N-m} \binom{N-m}{k} \left(\frac{1}{t-l+1}\right)^k \left(1 - \frac{1}{t-l+1}\right)^{N-m-k} \quad (4)$$

와 같다. 식(1)과는  $G(l, m, t, k) = P(l, N-m, t, k)$ 의 관계임을 알 수 있다. 전송 관련 확률( $P(l, n, w, k)$ )과 발생 관련 확률( $G(l, m, t, k)$ )의 구별을 위해 별도의 표기를 사용한다. 즉, 확률  $P(\cdot)$ 는 전송대기 중인 beacon 메시지들 간의 동시전송 확률, 확률  $G(\cdot)$ 는 beacon 메시지를 발생하지 않은 노드들 간의 동시발생 확률을 나타낸다. 또 다른 발생 관련 확률로서 두 번째 변수는  $B(l, m, t, k)$ 로 표기하며, 채널이 점유된 상태에서 발생하여 backoff 처리되는 beacon 메시지에 적용된다.  $B(l, m, t, k)$  정의는 다음과 같다. 확률  $B(l, m, t, k)$ 는 CCH 구간 종료까지 남은 시간이  $t$  슬롯인 현재까지 beacon 메시지를 발생시킨 노드가  $m$ 개인 상황에서 향후  $l$  슬롯 동안 나머지 노드 중  $k$ 개의 노드가 beacon 메시지를 발생할 확률이다. 이는 확률  $G(\cdot)$ 와는 달리 beacon 메시지를 발생하지 않은 노드들 중 특정 구간의 채널 점유시간 동안 beacon 메시지를 발생하는 확률을 의미한다.  $B(l, m, t, k)$  관련 이벤트  $E_3$ 를 다음과 같이 정의한다.

.  $E_3$ : Event( $l$  슬롯 동안 발생 첫  $T-t$  슬롯 동안 발생 안함)

확률 값  $\Pr(E_3)$ 는 다음과 같으며,

$B(l, m, t, k)$ 는 다음과 같이 표기된다.

$$B(l, m, t, k) = \binom{N-m}{k} \Pr(E_3)^k (1 - \Pr(E_3))^{N-m-k} \quad (6)$$

이는 ( $1 \leq k \leq N-m, 1 \leq l \leq t$ )의 조건에서 정의된다. 역시  $f(\cdot)$ 를 구간  $[0, T]$ 에서 정의된 균일분포(uniform distribution)로 가정하면 식(6)은

$$B(l, m, t, k) = \binom{N-m}{k} \left(\frac{l}{t}\right)^k \left(1 - \frac{l}{t}\right)^{N-m-k} \quad (7)$$

와 같다. 확률 변수 (1),(3),(6)의 정의를 이용한 CCH 구간에서의 시스템 동작 모델링은 아래와 같다.

$S(t, w, n, m)$ 은 다음과 같은 시스템 상태를 의미한다. 즉, CCH 구간 종료까지 남은 시간이  $t$  슬롯, 현재까지 beacon 메시지 발생이 완료된 노드가  $m$ 개,  $m$ 개 노드 중 아직 beacon 메시지 전송을 위해 대기 중인 노드가  $n$ 개,  $n$ 개 노드가 갖고 있는 backoff count의 최대값이  $w$ 이며 채널은 유희상태이다.  $S(t, w, n, m)$  상태에서 남은  $t$  슬롯동안 성공적으로 전송이 기대되는 beacon 메시지의 평균 개수를  $Q(t, w, n, m)$ 로 정의한다.  $t$  슬롯 동안  $N-m$ 개의 새로운 beacon 메시지가 발생예정이며 이들을 고려한  $Q(t, w, n, m)$ 을 표현하기 위해서 앞에서 정의한 확률들,  $P(l, n, w, k)$ ,  $G(l, m, t, k)$ , 그리고  $B(l, m, t, k)$ 를 활용한다. CCH 구간의 남은  $t$  슬롯 동안의 시스템은 일반적으로 그림 2(a)와 같이 채널의 점유 구간과 유희 구간이 반복되는 것으로 나타낼 수 있다. 점유 구간은 성공적인 전송을 의미할 수도 있고 복수 노드의 동시전송으로 인한 충돌 구간일 수도 있다. 점유 구간에 새롭게 발생하는 beacon 메시지는 버퍼에 저장되어 backoff 동작이 적용된다. 유희 구간은 시스템에 backoff 동작 중인 beacon만 있거나 아니면 beacon 메시지가 전혀 없는 경우를 의미한다. 유희 구간에 새롭게 발생하는 beacon 메시지는 backoff 동작 없이 바로 전송을 하게 되며, 따라서 복수개의 새로운 beacon 메시지가 동시에 발생하는 경우 모두 충돌을 경험하게 된다. 이러한 사항들을 고려하여, 상태  $S(t, w, n, m)$ 로부터 전송이 발생하는 경우들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 Q(t,w,n,m) = & \tag{8} \\
 & \sum_{l=1}^{\min(t-s,w)} (P(l,n,w,1)B(l,m,t,0)[1+B(s,m,t-l,0)Q(t-l+1-s,w-l,n-1,m) \\
 & \quad + \sum_{k=1}^{N-m} B(s,m,t-l,k)Q(t-l+1-s,CW,n-1+k,m+k)] \\
 & + P(l,n,w,0)G(l,m,t,1)[1+B(s,m+1,t-l,0)Q(t-l+1-s,w-l,n,m+1) \\
 & \quad + \sum_{k=1}^{N-m-1} B(s,m+1,t-l,k)Q(t-l+1-s,CW,n+k,m+k+1)] \\
 & + \sum_{k=2}^n P(l,n,w,k)B(l,m,t,0)[B(c,m,t-l,0)Q(t-l+1-c,w-l,n-k,m) \\
 & \quad + \sum_{i=1}^{N-m} B(c,m,t-l,i)Q(t-l+1-c,CW,n-k+i,m+i)] \\
 & + \sum_{k=2}^{N-m} P(l,n,w,0)G(l,m,t,k)[B(c,m+k,t-l,0)Q(t-l+1-c,w-l,n,m+k) \\
 & \quad + \sum_{i=1}^{N-m-k} B(c,m+k,t-l,i)Q(t-l+1-c,CW,n+i,m+k+i)] \\
 & + \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^{N-m} P(l,m,w,k)G(l,m,t,i)[B(c,m+i,t-l,0)Q(t-l+1-c,w-l,n-k,m+i) \\
 & \quad + \sum_{j=1}^{N-m-i} B(c,m+i,t-l,j)Q(t-l+1-c,CW,n-k+j,m+i+j)]
 \end{aligned}$$

- 경우1:  $n$  대기노드 중 한 개만 전송하여 성공
- 경우2:  $N-m$  노드 중 한 개의 beacon 메시지 발생 및 즉시 전송하여 성공
- 경우3:  $n$  대기노드 중 복수 개 동시 전송으로 충돌
- 경우4:  $N-m$  노드 중 복수 개의 beacon 메시지 동시 발생 및 즉시 전송으로 충돌
- 경우5:  $n$  대기노드 및  $N-m$  노드로부터 각각 한 개 이상 동시 전송으로 충돌

위 모든 경우에서 전송 또는 충돌 기간 중 새로운 beacon 메시지가 발생할 수 있으며 이는 전송 또는 충돌이 완료된 후 후속 상태를 결정짓는다. 이러한 분석을 기반으로  $Q(t,w,n,m)$ 은 식(8)과 같이 표현된다.  $s$ 는 성공적인 전송기간,  $c$ 는 충돌기간을 나타낸다.

식(8)에서 더해지는 다섯 개의 항들은 전술한 다섯 가지 경우에 각각 순서대로 해당된다. 첫 항을 구체적으로 설명하면,  $l$ 번째 슬롯에 전송대기 중인  $n$ 개 노드 중 1개만 전송하고 beacon 메시지 미발생 노드들로부터는 새로운 발생이 없어 성공적인 전송이 이루어지며, 이러한 전송이 이루어지는 동안 미발생 노드

로부터의 beacon 메시지 발생 여부 및 개수에 따라 다음 상태가 결정된다. 새로운 발생의 경우 가능한 최대 backoff count 값은 CW가 되는 것을 반영하였다. CCH 구간 종료까지  $s$  슬롯 이내의 시간이 남은 상태에서 발생하는 새로운 beacon 메시지는 전송이 종료되지 못하므로  $Q(t,w,n,m)$  산출에서 배제된다.

식(8) 모델링은 CCH 구간의 일반적 시스템 운용에 관한 모델링이다. 즉, CCH 구간 전체에 걸쳐 임의로 발생하는 beacon 메시지에 의해 busy 구간과 idle 구간을 반복하는 시스템에서, 임의의 상태로부터 CCH 구간 종료까지 성공적으로 전송되는 beacon 메시지 개수의 기댓값을 산출한다.

위 관계식으로부터 하나의 CCH 구간 동안 기대되는 성공적 beacon 메시지 전달률은

$$\frac{Q(T,0,0,0)}{N} \tag{9}$$

으로 표기된다. CCH 구간의 시작 시점에 유휴 상태를 가정한 경우이다. [4]의 모델링은 식(8) 모델링의 특별한 경우에 해당된다. 즉, CCH 구간 시작과 동시

에 모든 노드들이 beacon 메시지 전송 대기 상태에 있어 설정되는 한 개의 busy 구간 동안 기대되는 성공적 beacon 메시지 전달률이므로 위 식(8)을 적용하면

$$\frac{Q(T, CW, N, N)}{N} \quad (10)$$

와 같이 표현할 수 있다.

#### IV. 실험 결과 및 분석

본 논문에서 제시한 모델링의 타당성을 확인하기 위해 시뮬레이션을 통한 실험을 수행하였다. IEEE 802.11p MAC 동작과 식(8)로 주어진 모델링을 각각 프로그래밍 하였고 동일한 환경에서 이들 간의 수행 결과를 비교하였다. 실험에 사용된 파라미터 설정은 표 1과 같다. CCH 구간 50ms 내에서의 차량 간의 정보교환이 차량의 이동성에 비해 훨씬 작은 시간 단위로 이루어진다는 점에서 차량의 이동성은 정적인 것으로 가정하여 실험할 수 있다<sup>9)</sup>. 또한, 표현의 편의를 위하여, beacon 메시지 발생을 CCH 구간 직전에 완료하는 방식을 CB(Concentrated Beacon) 방식, 본 논문과 같이 CCH 구간 전반에 분산시키는 방식을 DB(Distributed Beacon) 방식으로 표기한다. [4]는 CB 방식이고 본 논문의 모델링은 파라미터 운용에 따라 CB(식 (10)의 전달률)와 DB(식 (9)의 전달률) 방식 모두 가능하다.

표 1. 실험 파라미터  
Table 1. Parameters for experiments

Parameter	Value
beacon length	500 bytes
data rate	6 Mbps
slot time	16 μs
DIFS	32 μs
CW	15 <sup>[11]</sup> (if not specified)
beacon generation period	100ms

우선, [4]의 모델링이 식(8)에 주어진 본 논문 모델링의 특별한 경우임을 확인하는 실험을 수행하였다. 즉, 본 논문의 모델링 식(8)을 CB 방식으로 운영하는 경우의 beacon 메시지 전달률을 나타내는 식(10)과 CB 방식만을 모델링한 [4]의 beacon 메시지 전달률 값을 비교하였다. 실험에서는 규격 권고치인 CW 값

을 15[1]로 고정하고, 차량 개수를 다양하게 조정하면서 전달률을 관측하여 그림 3에 도시하였다. 이들 해석과는 별도로 IEEE 802.11p MAC 시뮬레이션을 수행하여 그 결과도 함께 도시하였다. 시뮬레이션에서도 CB 방식을 적용하였다. 시뮬레이션은 3절에서 기술한 모델링의 다섯 가지 전제조건을 반영하여 수행하였다. 즉, 모든 노드는 한 홉 전송거리 내에 있고, 충돌 이외의 전송오류는 없다. Beacon 메시지는 CCH 구간 내에서 고른 발생 분포를 갖는다. 또한, broadcasting에 대한 ACK는 없으므로 재전송이 없다. 마지막으로 전송 시간단위가 매우 작은 것을 반영하여 차량 이동성은 고려하지 않는다. 시뮬레이션은 각 설정마다 충분히 수행하여 지표의 평균값을 추출하였다. 그림 3으로부터 두 모델링의 결과가 명확히 동일함을 확인할 수 있으며, 두 모델링 모두 시뮬레이션 결과에 매우 근접한 것도 관측된다. 이로써, [4]의 모델링은 본 논문 모델링 식(8)의 특별한 경우이며, 두 접근 모두 정확한 모델링임이 확인된다.

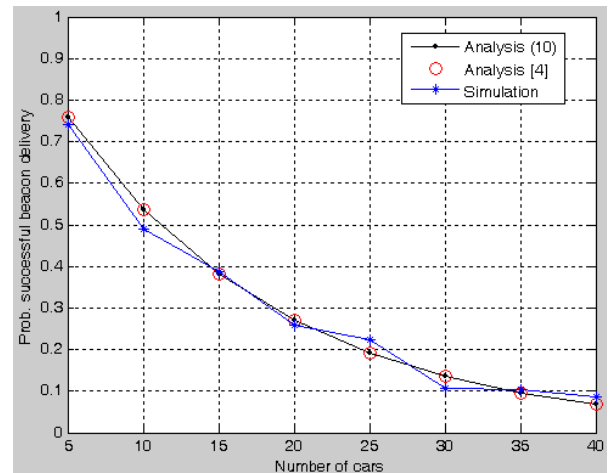
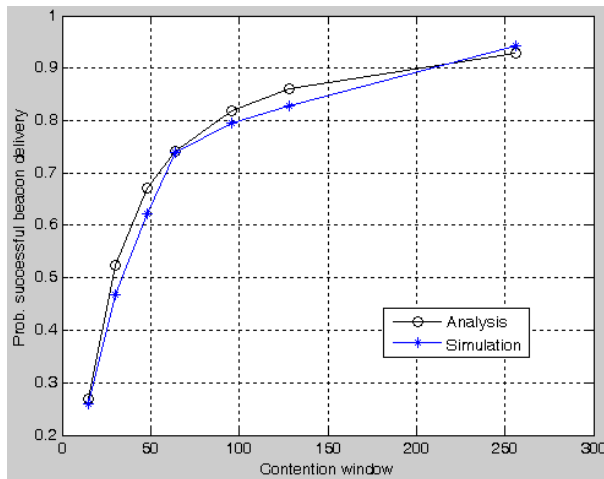


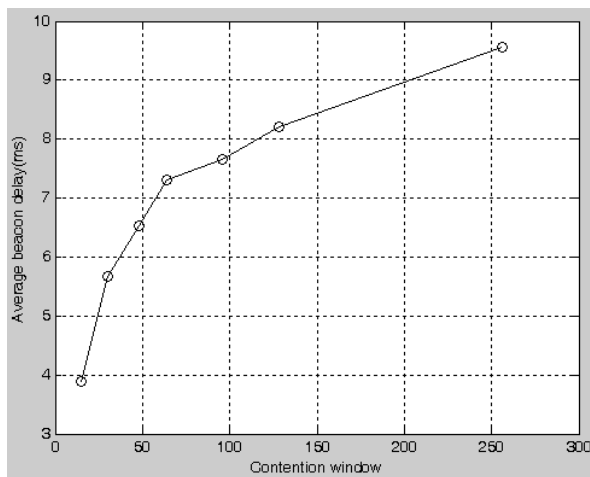
그림 3. CB 방식 비교(CW=15)  
Fig. 3. Comparison of the CB case(CW=15)

위 실험에서 주목할 점은, CCH 구간 초기의 큰 채널 경합으로 인해 CW 값 15는 수용 가능한 전달률을 얻기에 크게 부족하다는 점이다. 차량 대수가 많다고 볼 수 없는 10대의 경우에도 전달률이 60%에도 미치지 못하는 것이 확인된다. CB 방식을 유지하면서 전달률 개선을 위해 CW를 크게 설정하는 방안을 고려해볼 수 있다. 그러나, 이 경우 backoff 상태가 길어져 전송 지연이 증가하는 것을 피할 수 없다. CCH 구간이 한정되어 있어 backoff 상태가 CCH 구간 내에서 완료되지 않는 경우 메시지 손실이 발생할 수도 있다. 두 번째 실험에서는 차량을 20대로 고정하고, CW 값

을 다양하게 조정하면서 beacon 메시지의 성공적 전달률과 평균 전송 지연을 관측하였다. 전달률은 식 (10)의 모델링과 시뮬레이션으로 각각 구하여 그림 4(a)에 도시하였고, 전송 지연은 시뮬레이션으로 구하여 그림 4(b)에 보였다. 전송 지연은 beacon 메시지의 발생으로부터 브로드캐스팅이 완료되기까지의 시간을 의미한다. CW 값이 증가할수록 전달률과 전송 지연 모두 증가하는 것이 확인된다. 요구 전달률인 99%에 이르기 위해서는 CW를 256보다 크게 설정해야 하고 이에 따라 전송 지연도 더욱 증가하게 된다. 작은 CW 값 설정으로도 만족스러운 전달률을 얻기 위해서는 차량 간 채널 경합을 줄일 수 있는 DB 방식의 적용이 필요해 보인다.



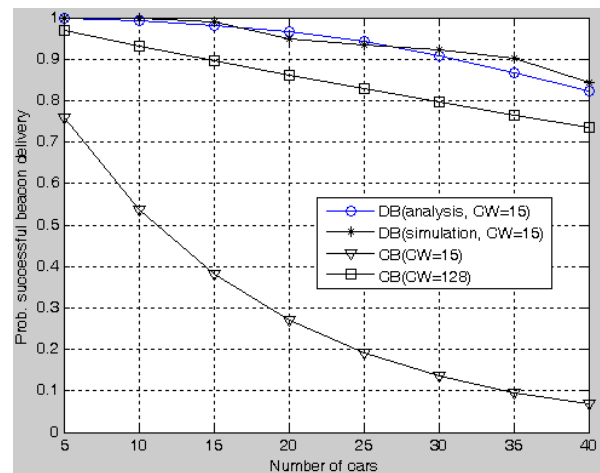
(a) 전달률  
(a) Successful delivery ratio



(b) 평균 전송 지연  
(b) Average transmission delay

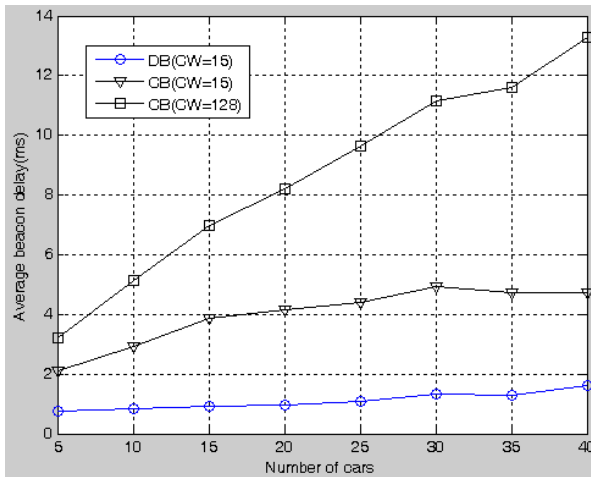
그림 4. CB 방식 성능(N=20)  
Fig. 4. CB Performance (N=20)

DB 방식에서 성능이 개선되는 것을 확인하고자 세 번째 실험에서는 DB 방식을 실험하였고 이를 CB 방식과 비교하였다. DB 방식의 경우 각 노드에서의 beacon 메시지 발생 패턴은 편의상 CCH 구간 내에서 균일분포를 가정하였으며 따라서 식(4)와 식(7)을 식 (8)에 적용하였다. 단, beacon 메시지의 전송 소요 시간이  $s$  슬롯이므로 CCH 구간 이내에 처리가 가능하도록 응용계층에서의 beacon 메시지 발생은  $T-s$  구간 내로 한정짓는 것을 가정한다. 차량을 5대부터 40 대까지 5대 간격으로 증가시키면서 각 환경에서의 beacon 메시지 전달률과 전송 지연을 관측하였다. DB 방식 해석의 타당성 확인을 위해 DB 방식 시뮬레이션도 같이 수행하였으며, 성능 비교를 위해 CB 방식 실험도 병행하였다. Beacon 메시지 전달률은 그림 5(a)에 비교 도시하였고 전달 지연은 그림 5(b)에 도시하였다. CW는 DB의 경우 15로 고정하였고, CB의 경우 15와 128 두 경우를 관측하였다. 그림 5(a)에서 DB 방식의 시뮬레이션 결과와 모델링 적용 결과가 매우 유사한 것을 확인할 수 있다. 이는 식(8) 모델링이 DB 방식을 정확하게 반영하고 있음을 의미한다. 그림 5(a)와 (b)로부터 DB 방식은 CW를 15로 작게 설정함에도 CB 방식에 비해 전달률과 전송 지연 모두 주목할 만한 개선이 있음을 확인할 수 있다. 차량 15 대 이하의 경우 전송율 99% 요구를 매우 근접하게 충족시키는 것이 확인된다. 또한 전송 지연은 차량 대수와 거의 무관하게 작은 값을 유지하고 있다. 반면, CB 방식은 CW 15의 경우 차량의 증가에 따라 지연은 비교적 작은 값을 유지하는 반면 전달률이 크게 감소하는 것을 보인다. CW 128의 경우 CB 방식은 여전히 미흡한 전달률에 머물러 있으며, 특히 지연은 차량 대수에 비례하여 증가하는 것을 보이고 있다



(a) 전달률  
(a) Successful delivery ratio





(b) 평균 전송 지연  
(b) Average transmission delay

그림 5. DB 방식과 CB 방식의 성능 비교  
Fig. 5. Performance of DB and CB cases

한편으로, 전달 지연은 전달이 성공한 경우라면 CCH 구간인 50ms 이내로 한정되므로, [3]에서 제시된 지연 요구 500ms를 충분히 만족시키는 점을 고려할 때 CB 방식의 경우 전달률 개선에만 초점을 두고 CW를 더욱 크게 설정할 수 있다. 그러나, 그 경우 CCH 구간 내에서의 backoff 미완료로 인한 메시지 손실이 발생할 수 있는 문제뿐만 아니라 다음과 같은 문제점이 발생한다. [10]에서는 CACC(Cooperative Adaptive Cruise Control)와 같은 응용의 원활한 운용을 위해서는 동일 노드로부터 수신되는 beacon 메시지 도착 간격(inter-arrival time)의 편차가 작아야 함을 지적하였다. 이는 직관적으로 CW가 작은 값을 유지할 때 가능한 요구조건이다. CW 값이 큰 경우 하나의 노드가 beacon 메시지를 전송할 때 마다 취하는 backoff count 값들의 편차도 커지며 따라서 backoff 지연의 편차가 커지게 된다. 이를 확인하기 위해 다음 실험에서는 beacon 메시지 전송 지연의 분포를 살펴 보았다. 시스템 상에서 한 개의 송신 노드와 한 개의 수신 노드를 고정하고 수신 노드에 전달되는 송신 노드 beacon 메시지의 전송 지연을 관측하였다. 상당히 낮은 밀집도인 차량 10대의 환경에서 요구 전달률 99%에 근접한 설정이 되도록 CW는 DB의 경우 15를, CB의 경우 256을 각각 설정하였다. 100회의 CCH 구간 동안 고정된 수신 노드에서 취합된 송신 노드로부터의 beacon 지연 값들을 취합하여 그 분포도를 그림 6에 도시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 지연의 변화는 DB 방식의 경우 2ms 이내에 집중되지만 CB 방식에서는 1~12ms 범위 내에 넓게 분포하고 있다. 이

상의 실험들로부터, CW 설정을 작게 유지할 수 있는 DB 방식은 전달률, 지연, 그리고 지연 편차 등 모든 성능 지표에서 CB 방식에 비해 우수함을 확인하였다.

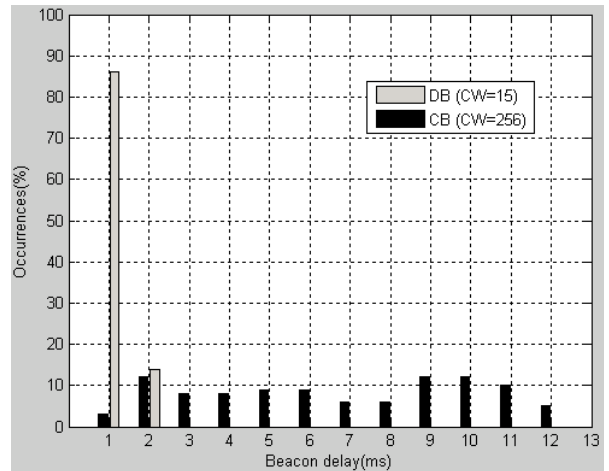


그림 6. Beacon 메시지 전송 지연 분포도(N=10)  
Fig. 6. Distribution of the transmission delay of the beacon messages(N=10)

### V. 결론

IEEE 802.11p MAC 동작에서 beacon 메시지가 CCH 구간 전반에 분산되어 발생하는 것을 고려한 브로드캐스팅 모델링을 제시하였다. 제시된 모델링의 정확성은 시뮬레이션 수행 결과와의 비교를 통해 확인하였다. 검증된 모델링은 WAVE 기반 VANET 구축에서 브로드캐스팅 전달률 개선을 위한 MAC 운용 방안을 면밀하게 설계 및 검증하는데 활용될 수 있다. Beacon 메시지의 발생을 분산시킴으로서 브로드캐스팅 전달률이 향상되고 지연 및 지연 변동성도 개선되는 것을 확인한 본 논문의 결과가 그 활용의 한 예이다.

주목할 점은, 그러한 개선에도 [3]에서 제시하는 99%의 전달률에는 상황에 따라 부족함을 볼 수 있다는 점이다. [11]과 [12]에서는 beacon 메시지의 낮은 전달률을 개선하기 위해 선별적 재전송 방안을 제시하였다. 선별적 재전송은 두 가지 이슈를 갖는다. 충돌을 감지하는 방안, 그리고 재전송 처리 방안이다. 그 중, 재전송 방안에 대해서는 [9]에서 보인 우선권 부여 방식을 활용하는 것이 적절해 보인다. 기본적으로 재전송이 허용된 시스템을 모델링하기 위해서는 보다 유동적 접근이 필요해 보이며 이는 본 논문에서와 같이 분산된 beacon 메시지 발생 분포 환경을 반영하는 모델링을 기반으로 하는 것이 적절해 보인다. 본 논문에서 제안한 모델링에 재전송을 수용하기 위해

우선권 부여 방식을 적용하는 등의 모델링 확장은 향후 연구주제로 남겨둔다.

### References

- [1] IEEE, *Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments*, IEEE 802.11p-2010, July 2010.
- [2] IEEE, *IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE- Multichannel Operation)*, IEEE Std. 1609.4, Feb. 2011.
- [3] X. Ma and X. Chen, "Delay and broadcast reception rates of highway safety applications in vehicular ad hoc networks," in *Proc. Mobile Networking Veh. Environment*, pp. 85-90, Anchorage, U.S.A., May 2007.
- [4] C. Campolo, A. Vinel, A. Molinaro, and Y. Koucheryavy, "Modeling broadcasting in IEEE 802.11p/WAVE vehicular networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 15, no. 2, pp. 199-201, Feb. 2011.
- [5] C. Campolo, A. Molinaro, and A. Vinel, "Understanding the performance of short-lived control broadcast packets in 802.11p/WAVE vehicular networks," in *Proc. IEEE Veh. Networking Conf. (VNC)*, pp. 102-108, Amsterdam, Netherlands, Nov. 2011.
- [6] A. Vinel, V. Vishnevsky, and Y. Koucheryavy, "A Simple analytical model for the periodic broadcasting in vehicular ad-hoc networks," in *Proc. IEEE GLOBECOM Workshops*, pp. 1-5, New Orleans, U.S.A., Nov. 2008.
- [7] A. Vinel, Y. Koucheryavy, S. Andreev, and D. Staehle, "Estimation of a successful beacon reception probability in vehicular ad-hoc networks," in *Proc. Int. Conf. Wireless Commun. Mobile Comput. (IWCMC)*, pp. 416-420, Leipzig, Germany, June 2009.
- [8] C. Campolo, A. Molinaro, A. vinel, and Y. Zhang, "Modeling prioritized broadcasting in multichannel vehicular networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 2, pp. 687-701, Feb. 2012.
- [9] R. Reinders, M. Eenennaam, G. Karagiannis, and G. Heijenk, "Contention window analysis for beaconing in VANETs," in *Proc. Int. Conf. Wireless Commun. Mobile Comput. (IWCMC)*, pp. 1481-1487, Istanbul, Turkey, July 2011.
- [10] M. Eenennaam, W. Wolterink, G. Karagiannis, and G. Heijenk, "Exploring the solution space of beaconing in VANETs," in *Proc. IEEE Veh. Networking Conf. (VNC)*, pp. 1-8, Tokyo, Japan, Oct. 2009.
- [11] H. Yoo, D. Shin, and D. Kim, "Repetition-based broadcasting protocol for reliable beaconing in VANETs," in *Proc. KICS Summer Symp.*, pp. 326-327, Jeju Island, Korea, June 2009.
- [12] M. Hassan, H. L. Vu, and T. Sakurai, "Performance analysis of the IEEE 802.11 MAC protocol for DSRC safety applications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 8, pp. 3882-3896, Oct. 2011.

### 정 대 인 (Daein Jeong)



1984년 2월 서울대학교 공과대학 제어계측공학과(학사)  
 1986년 2월 서울대학교 공과대학 제어계측공학과(석사)  
 1997년 8월 Polytechnic Univ. (공학박사)  
 1987년~1999년 한국통신 선

임연구원

2000년 9월~현재 한국외국어대학교 공과대학 디지털정보공학과 교수  
 <관심분야> 무선센서네트워크, QoS 제어, MAC 프로토콜, 망 혼잡제어, VANET