

자동차 간 통신에서 비컨 메시지의 효율적인 방송을 위한 성능 분석

학생회원 응엔 호아 흥*, 아디타 바위유가**, 종신회원 정 한 유****

An Analysis for the Efficient Dissemination of Beacon Messages in Vehicle-to-Vehicle (V2V) Communications

Hoa-Hung Nguyen*, Adhitya Bhawiyuga** Student Members, Han-You Jeong**** Lifelong Member

요 약

자동차 간 (Vehicle-to-Vehicle) 통신에서, 각각의 자동차들은 위치, 속도, 조향 등의 정보를 포함하는 비컨 메시지를 주변의 자동차들에게 주기적으로 방송함으로써, 이들로 하여금 자신의 주행 정보를 인지할 수 있도록 한다. 그런데, 단순한 비컨 메시지의 방송은 메시지 수신 확률을 감소시키고 지연 시간을 크게 증가시키는 원인이 된다. 따라서, 본 논문에서는 비컨주기 (Beacon Period), 반송파감지거리 (Carrier-Sensing Range), 그리고 IEEE 802.11 DCF 경쟁구간크기 (Contention Window Size)가 자동차 간 통신의 성능에 미치는 영향을 수학적으로 분석하고자 한다. 우선, 측위 오차의 임계값으로부터 자동차 운전 속도에 반비례하는 비컨주기를 도출하고, 이를 기반으로 비컨 메시지로 인한 DSRC 채널의 최대 부하를 수학적으로 유도한다. 비컨 메시지의 부하가 특정 임계치 이하가 되도록 반송파감지거리를 결정하는 수학적 모형을 유도하고, 수율을 최대화하는 DCF 경쟁구간크기에 대한 닫힌 근사해를 제시한다.

Key Words : 자동차 간 통신, 비컨 메시지 방송, 비컨주기, 반송파감지거리, IEEE 802.11 DCF 경쟁구간크기

ABSTRACT

In vehicle-to-vehicle (V2V) communications, each vehicle should periodically disseminate a beacon message including the kinematics information, such as position, speed, steering, etc., so that a neighbor vehicle can better perceive and predict the movement of the vehicle. However, a simple broadcasting of such messages may lead to a low reception probability as well as an excessive delay. In this paper, we attempt to analyze the impact of the following key parameters of the beacon dissemination on the performance of vehicular networks: beacon period, carrier-sensing range, and contention window (CW) size. We first derive a beacon period which is inversely proportional to the vehicle speed. Next, we mathematically formulate the maximum beacon load to demonstrate the necessity of the transmit power control. We finally present an approximate closed-form solution of the optimal CW size that leads to the maximum throughput of beacon messages in vehicular networks.

I. 서 론

자동차 간 (Vehicle-to-Vehicle) 통신은 교통 사고로 인한 천문학적인 경제적·사회적 손실을 줄이기

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2012-0000918).

* 부산대학교 물류IT학과(nguyenhoahungit@gmail.com)

** 부산대학교 물류IT학과(adhitya.bhawiyuga@gmail.com)

***부산대학교 차세대물류IT기술연구사업단(hyjeong@pusan.ac.kr) (° : 교신저자)

논문번호 : KICS 2012-04-220, 접수일자 : 2012년 4월 27일, 최종논문접수일자 : 2012년 5월 21일

위해 필수적인 협력기반 운전안전보조(Cooperative Driving Safety Assistance) 기능을 제공하기 위한 핵심 기술이다¹¹. 자동차 간 통신은 무선 다중 홉 전송을 통해 교통사고 등의 도로 정보를 미리 운전자에게 전달함으로써 교통사고를 미연에 방지하는 역할을 담당한다.

자동차 간 통신에서 자동차는 주변의 자동차들에게 안전 메시지(Safety Message)와 비컨 메시지(Beacon Message)를 방송함으로써 협력기반 운전안전보조 기능을 제공한다¹²⁻¹⁴. 여기에서 안전 메시지는 도로 상에 위험한 상황이 발생할 경우, 주변의 자동차들이 이를 미리 대비할 수 있도록 방송하는 메시지이다. 반면, 비컨 메시지는 송신하는 자동차의 현재 위치, 속도, 주행 방향 등의 정보를 방송함으로써 주변에 위치한 자동차들이 송신 자동차의 주행을 예측할 수 있도록 한다. 그러나, 이러한 메시지들의 빈번한 방송은 자동차의 밀도(Vehicle Density)가 높은 경우, 무선 채널의 부하를 가중시킨다. 이로 인해 무선 채널에서의 메시지 손실과 충돌이 크게 증가하는 문제가 발생하게 된다.

기존 연구에서는 위의 문제들을 해결하기 위해 비컨 메시지 방송의 주요 파라미터들인 비컨주기(Beacon Period), 반송파감지거리(Carrier-Sensing Range, CSR), DCF 경쟁구간크기(Contention Window Size)가 자동차 간 통신의 성능에 미치는 영향에 대하여 연구하였다¹⁵⁻¹⁹. 논문 [5]에서는 주변 자동차들의 측위 오차가 임계값 범위를 초과할 때마다 비컨 메시지를 방송하는 알고리즘을 제시하였다. Torrent-Moreno 등은 고정 비컨주기를 기반으로 비컨 메시지의 채널 부하가 임계값보다 작아지도록 비컨송신전력을 제어하는 알고리즘을 제시하였다⁶. 논문 [7]에서는 시뮬레이션을 통해 자동차의 밀도에 따라 IEEE 802.11 DCF의 경쟁구간크기를 조정할 필요가 있음을 제시하였다. 위의 논문들은 비컨 메시지 방송에 영향을 미치는 일부 파라미터들만 고려하여 시뮬레이션을 통해 성능을 검증하였다. 논문 [8]에서는 주변 자동차들의 측위 오차에 따라 비컨주기를 조절하는 알고리즘을 제시하였고, 논문 [9]에서는 숨은노드 문제(Hidden-Node Problem)를 고려하여 자동차 간 통신의 성능을 수학적으로 분석하였다. 그러나, 위의 파라미터들이 비컨 메시지 방송에 미치는 영향을 통합적으로 고려하여 수학적으로 분석한 연구는 기존에 알려진 바가 없다.

본 논문에서는 위의 세 파라미터들이 자동차 간 통신의 성능에 미치는 영향을 포괄적으로 분석하고자

한다. 이를 위해, 모든 자동차들이 만족해야 하는 서비스 조건, 채널부하 조건, 그리고 안전거리 조건을 설정한다. 주변의 자동차들의 측위 오차가 D_{th} 이내에 수렴하도록 하는 서비스 조건으로부터 비컨주기 T_{BP} 를 결정한다. 이를 통해서 비컨주기가 자동차의 속도에 반비례함을 보인다. 다음으로, 안전한 도로 주행을 위하여 자동차 간 거리(Inter-Vehicle Distance)가 최소 D_{IV} 이상이 되도록 하는 안전거리 조건으로부터 자동차 밀도(Vehicle Density)의 상한 $\bar{\rho}$ 를 유도한다. 또한, 무선 채널에서 비컨 메시지의 부하가 특정 임계치 $C_{b,max}$ 보다 작아지도록 하는 채널부하 조건으로부터 반송파감지거리를 결정하기 위한 수학적 공식을 유도한다. 위의 조건들을 기반으로 IEEE 802.11 DCF의 수율을 최대화하기 위한 최적 DCF 경쟁구간크기 W_{opt}^* 에 관한 닫힌 근사해(Closed-Form Approximate Solution)를 유도한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 자동차 간 통신 모형을 소개하고, 비컨 방송을 위한 세가지 조건을 제시한다. 3장에서는 세가지 핵심 파라미터들이 비컨 메시지 방송 성능에 미치는 영향을 수학적으로 분석하고, 4장에서 결론을 제시한다.

II. 자동차 간 통신 모형과 비컨 메시지 방송 조건

본 장에서는 자동차 간 통신 모형을 제시하고, 비컨 메시지 방송을 위해 필요한 세가지 조건에 관해 설명한다.

2.1 자동차 간 통신 모형

그림 1에서는 양방향으로 K ($K=4$) 개의 차선을 가지는 고속도로에서 자동차 간 통신의 예를 도시하였다. 그림에서 K 개의 차선에서 주행하는 자동차들의 평균주행속도는 v 로 나타내었다. 본 논문에서는 협력적 크루즈 컨트롤(Cooperative ACC)이나 비상제동 경고등(EEBL) 등과 같은 협력기반 운전안전보조 기능을 제공하기 위해 모든 자동차들이 비컨 메시지와 안전 메시지를 방송함을 가정한다. 송신 자동차는 비컨 메시지를 통해 자신의 주행 정보를 방송한다. 이를 수신하는 주변의 자동차들은 메시지에 포함된 주행 정보를 분석하여 송신 자동차의 위치를 예측한다. 반면, 안전 메시지는 추돌 사고 등의 비정상적 교통 상황이 발생할 경우 이를 주변의 자동차들에게 방송하기 위해 사용된다. 교통 정보의 신속한 전달을 위해 안전 메시지는 자동차 간 통신에서 가장 높은 우선

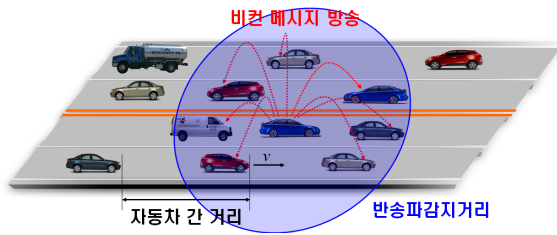


그림 1. 자동차 간 통신 모형
Fig. 1. Model for vehicle-to-vehicle communications

순위로 방송된다.

자동차 간 통신에서는 5.9 GHz 대역에서 정의된 7 개의 10 MHz DSRC (Dedicated Short-Range Communications) 채널을 사용한다. IEEE 802.11p 표준에서는 자동차의 이동성 및 짧은 연결 시간을 고려하여 IEEE 802.11 MAC 프로토콜의 초기 연결 설정에서 이루어지는 접속 및 보안 절차들을 단순화하였다^[2,11]. 이와 함께 OCB (Outside the Context of BSS) 기능을 지원함으로써, 연결성 문제를 더욱 완화하였다^[11].

본 논문에서는 그림 1에서 보인 바와 같이 비컨 메시지를 방송하는 기준 자동차(Reference Vehicle)의 반송파감지거리 내에서 비컨 메시지 방송에 관한 성능 분석을 수행하고자 한다. 자동차 간 통신에서 수신하는 무선 신호의 특성은 신호 감쇄 (Path Loss), 도플러 효과 (Doppler Effect), 그리고 페이딩 (Fading) 등에 의해 영향을 받는다^[10]. 반송파 감지거리 D_{CS} 는 그 이내에 위치한 다른 자동차들의 메시지 전송을 감지할 수 있는 최대 거리를 말한다. IEEE 802.11 DCF에 의해 기준 자동차가 메시지를 전송하면 불필요한 간섭을 줄이기 위하여 반송파 감지거리 내의 모든 자동차들의 메시지 송신을 비활성화시킨다. 하지만, 반송파 감지거리 외부에 위치한 자동차들은 기준 자동차와 동시에 메시지 방송이 가능하다. 본 논문에서는 반송파 감지거리가 주어지면 물리 (PHY) 계층에서 이를 만족하도록 비컨송신전력을 적절하게 제어할 수 있음을 가정한다. 또한, 성능 분석의 편의를 위해 숨은노드 문제가 없다고 가정한다.

2.2 비컨 메시지 방송을 위한 세가지 조건

본 논문에서는 자동차 간 통신에서 효율적인 비컨 메시지를 방송을 위하여 다음의 세가지 조건들을 부과한다. 첫 째, 비컨 메시지는 협력기반 운전안전보조 서비스에서 주변 자동차들을 일정한 오차 범위 내에서 추적(Trace) 가능하도록 충분히 자주 방송되어야 하는데, 이를 서비스 조건이라고 정의한다. 둘째, 안

전 메시지가 신속히 방송되기 위해서는 비컨 메시지의 부하가 특정 임계치보다 낮게 유지되어야 하는데, 이를 채널부하 조건이라고 정의한다. 마지막으로 도로 주행 시 추돌 사고를 막기 위해서 두 자동차 사이에 최소 거리를 유지해야 하는데, 이를 안전거리 조건이라고 정의한다. 본 절에서는 각각의 조건에 대한 자세한 설명을 제시한다.

1) 서비스 조건 : 자동차 간 통신에서 비컨주기를 결정하기 위한 접근 방식은 고정형 (Fixed) 비컨주기 방식과 적응형 (Adaptive) 비컨주기 방식으로 구별된다^[3-5,8]. 고정형 비컨주기 방식에서는 각각의 자동차가 일정 주기(0.1 초)마다 한 번씩 비컨 메시지를 방송한다^[3,4]. 그러나, 자동차 밀도가 높은 상황에서 고정형 비컨주기 방식은 비컨 메시지 방송 부하를 크게 증가시킬 수 있는 문제점이 있다. 반면, 적응형 비컨주기 방식에서는 각각의 자동차들이 자신과 주변의 자동차들의 위치를 추정한다. 이 때, 실제 위치와 추정값 사이의 차이가 임계값보다 커지면 비컨 메시지를 방송하여 오차를 보정한다^[5,8]. 그러나, 각각의 자동차를 위한 별도의 측위 추정 모듈을 유지해야 하므로, 자동차 밀도가 높은 경우 연산 부하가 커지는 단점이 있다.

본 논문에서는 GPS 측위값의 불확실성을 고려하여 비컨주기를 결정한다. 자동차 네비게이션 등에 널리 사용되는 저가의 GPS 측위값의 RMS (Root-Mean-Square) 오차 D_{th} 는 대략 10 m 정도에 이르는 것으로 알려져 있다^[12]. 다시 말해, D_{th} 내에서 다수의 GPS 측위값을 비컨 메시지를 통해 방송하더라도 GPS 수신기의 측위 오차로 인해 더 이상의 측위 정확도 향상을 기대하기 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 D_{th} 거리 내에 한 개의 GPS 측위값을 방송하도록 비컨주기를 결정한다.

2) 채널부하 조건 : 이전에 언급한 것처럼 자동차 간 통신에서 안전 메시지는 최대한 많은 자동차들에게 전달될 수 있도록 방송해야 한다. 그러나, 자동차 밀도가 높은 경우에는 비컨 메시지의 채널 부하 C_b 가 DSRC 채널의 전송율 C 의 대부분을 점유할 수 있다 ($C_b \approx C$). 이러한 상황을 피하기 위해서 비컨 메시지의 부하는 다음과 같이 DSRC 채널 대역폭의 일정 비율 이하로 유지되어야 한다.

$$C_b \leq C_{b,max} = \alpha C, \quad 0 \leq \alpha \leq 1. \quad (1)$$

3) 안전거리 조건 : 자동차 간 통신에서 마지막으로 부과되는 조건인 안전거리 조건은 자동차의 안전한

도로 주행을 위해 설정한 조건이다. 일반적으로 운전자는 돌발 상황에 대비하여 앞차와의 거리를 일정 수준 이상으로 유지하는데 이를 자동차 간 안전거리 D_{IV} 로 정의한다. 이 때, 자동차 간 안전거리는 운전자가 돌발 상황을 인지하고 브레이크를 밟기 시작할 때까지 이동한 거리인 공주거리 D_r 과 브레이크를 밟는 순간부터 완전히 제동하는데까지 이동한 거리인 제동거리 D_b 의 합으로 주어진다. 자동차의 길이를 D_v 라고 정의하면, 자동차 간 안전거리 D_{IV} 는 다음과 같이 주어진다.

$$D_{IV} = D_v + D_r + D_b = D_v + \tau_r v + \frac{v^2}{2a} \quad (2)$$

위의 수식에서 τ_r 은 돌발 상황을 인지한 시점에서 감속을 시작하는 시점까지의 시간을 나타내고, a 는 자동차가 급정지할 때 감속하는 가속도 상수를 나타낸다. 수식 (2)의 안전거리 조건은 3.2절에서 자동차 밀도의 상한을 유도하는데 사용된다.

III. 비컨 메시지 방송에 대한 성능 분석

자동차 간 통신 모형과 비컨 메시지 방송에 관한 세 가지 조건을 기반으로 본 장에서는 비컨 메시지 방송을 위한 주요 파라미터 값을 결정하는데 필요한 수학적 모형을 제시한다. 또한, 각각의 파라미터가 비컨 메시지 방송 성능에 미치는 영향을 함께 분석한다.

3.1 비컨주기

2.2 절의 서비스 조건에서, 자동차가 가장 최근에 비컨 메시지를 방송한 위치로부터 D_{th} 만큼 이동하면 DSRC 채널의 혼잡을 줄이기 위해 새로운 비컨 메시지를 방송해야 함을 설명하였다. 주변의 자동차들이 비컨 메시지를 수신하면, 이를 활용하여 송신 자동차의 위치를 갱신한다. 따라서, 속도 v 로 주행하는 자동차의 비컨주기 T_{BP} 는 다음과 같이 주어진다.

$$T_{BP} = \frac{D_{th}}{v} \quad (3)$$

3.2 반송파감지거리

본 절에서는 2.2 절에서 설명한 안전거리 조건으로부터 자동차 밀도의 상한(Upper Bound)을 유도하고, 이를 기반으로 비컨 메시지로 인한 DSRC 채널 부하의 상한을 계산한다. 마지막으로 비컨 메시지의 부하를 임계값 $C_{b,max}$ 이하로 유지하기 위한 반송파감지

거리 D_{CS} 를 수학적으로 도출한다.

1) 자동차 밀도의 상한 : 본 논문에서 자동차의 밀도는 특정 차선에서 단위 길이(1 m)에 존재하는 자동차의 수로 정의한다. 일반적으로, 단일 차선에서 인접한 두 자동차 간 거리는 2.2 절의 안전거리 조건에 의해 D_{IV} 보다 크기 때문에, 차선 당 자동차 밀도의 상한 $\bar{\rho}$ 는 D_{IV} 의 역수로 주어진다.

$$\bar{\rho} = \frac{1}{D_{IV}} = \frac{1}{D_v + \tau_r v + \frac{v^2}{2a}} \quad (\text{veh/m/lane}) \quad (4)$$

수식 (4)에서 자동차 밀도의 상한값은 자동차의 평균 주행속도 v 가 증가함에 따라 감소함을 보여준다.

2) 비컨 메시지 부하의 상한 : 본 절에서는 반송파 감지거리 내에서 비컨 메시지 부하를 도출한다. 3.1 절에서 반송파감지거리 내의 모든 자동차들은 수식 (3)의 주기 T_{BP} 마다 한 번씩 길이가 L 인 비컨 메시지를 방송한다. 따라서, 개별 자동차의 비컨 메시지 부하는 L/T_{BP} 로 나타낼 수 있다. 그림 1에서 보인 바와 같이 K 개의 차선을 가진 도로에서 양방향으로 반송파감지거리 D_{CS} 내에 있는 자동차 수의 최대값은 수식 (4)에 의해 $2D_{CS}K\bar{\rho}$ 로 주어진다. 모든 자동차들이 T_{BP} 마다 비컨 메시지를 방송하므로 반송파감지거리 내에서 비컨 메시지의 전체 부하의 상한 \bar{C}_b 는 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{C}_b = 2D_{CS}K\bar{\rho} \frac{L}{T_{BP}} = \frac{2D_{CS}KLv}{D_{IV}D_{th}} \quad (5)$$

수식 (5)에서 비컨 메시지 부하의 상한 \bar{C}_b 는 반송파 감지거리 D_{CS} 와 자동차 평균주행속도 v 의 함수로 주어진다.

수식 (1)에서 비컨 부하의 상한은 채널부하 조건의 임계값보다 작아야 한다($\bar{C}_b \leq C_{b,max} = \alpha C$). 그림 2에서는 $C = 3$ Mbps, $\tau_r = 1$ sec, $a = 7.5$ m/sec², $D_v = 5$ m, $D_{th} = 10$ m, $L = 500$ bytes, 그리고 $K = 8$ 일 때, 비컨 메시지 부하의 상한을 평균주행속도에 따라 도시하였다. 그림에서 비컨 메시지의 부하 $\bar{\rho}$ 는 α 값이 감소함에 따라 보다 넓은 주행 속도 범위에서 비컨 부하의 임계값 $C_{b,max}$ 를 초과하는 것을 관찰할 수 있다. 수식 (5)에서 비컨 메시지 부하의 상한

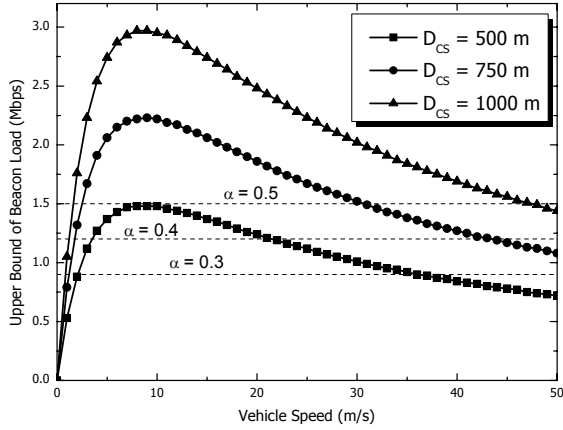


그림 2. 평균주행속도에 따른 비컨 부하의 상한
Fig. 2. Upper bound of beacon load vs. vehicle speed.

이 반송파감지거리 D_{CS} 에 비례하므로, 위의 영역에서는 반송파감지거리를 감소시켜 채널부하 조건을 만족시켜야 한다. 또한, 비컨 메시지 부하의 상한이 자동차 평균주행속도 v 에 대한 오목 함수(Concave Function)임을 관찰할 수 있다. 따라서, 수식 (5)를 평균주행속도 v 에 관해 편미분하면 비컨 메시지 부하의 상한을 최대화하는 평균주행속도 v_{peak}^* 는 다음과 같이 주어진다.

$$v_{peak}^* = \sqrt{2aD_v} \approx 8.66 \text{ m/sec} \quad (6)$$

3) 반송파감지거리 : 자동차 간 통신에 관한 기존 연구들에서는 비컨주기 또는 비컨송신전력을 제어하여 비컨 메시지의 부하를 조절하였다[5]-[9]. 그런데, 비컨주기는 서비스 조건에 의해 결정되었으므로, 본 논문에서 비컨송신전력을 제어하는 방법을 고려한다. 2.1 절에서 언급하였듯이, 통신이 가능한 최대 거리인 반송파감지거리 D_{CS} 가 주어지면, 물리 (PHY) 계층에서 위의 다양한 요인들을 고려하여 비컨송신전력을 적절하게 제어할 수 있다고 가정한다. 따라서, 본 절에서는 비컨 메시지 부하에 따라 반송파감지거리를 적응적으로 결정하는 수식에 초점을 맞춘다.

본 절에서는 비컨 메시지 부하의 상한이 임계값 $C_{b,max}$ 를 초과하지 않는 최대반송파감지거리 D_{CS}^* 를 구하고자 한다. 수식 (1)과 수식 (5)에서 채널부하 조건을 만족하는 반송파감지거리의 최대값 $D_{CS,ch}$ 는 다음과 같이 주어진다.

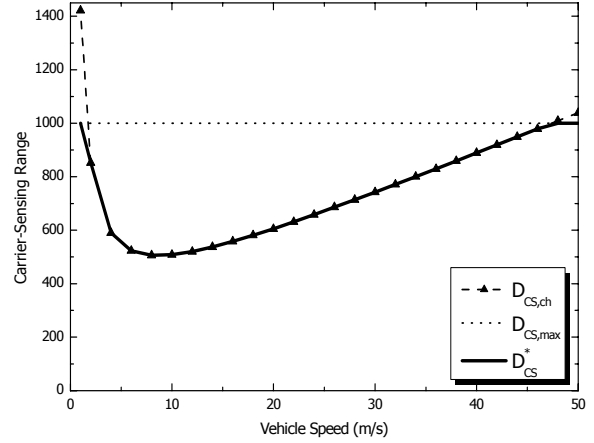


그림 3. 평균주행속도에 따른 최대 반송파감지거리
Fig. 3. The maximum CSR vs. vehicle speed.

$$D_{CS,ch} = \frac{D_{th} D_{IV} \alpha C}{2LKv} = \frac{D_{th} \left(D_v + \tau_r v + \frac{v^2}{2a} \right) \alpha C}{2LKv} \quad (7)$$

수식 (7)에서 채널부하 조건을 만족하는 반송파감지거리의 최대값 $D_{CS,ch}$ 는 평균주행속도 v 에 대한 볼록 함수(Convex Function)이다. 따라서 평균주행속도가 증가함에 따라 $D_{CS,ch}$ 는 IEEE 802.11p 표준의 최대송신전력에 해당하는 반송파감지거리 $D_{CS,max}$ 를 초과할 수 있다[2]. 이러한 예외적인 경우를 방지하기 위해서 최대반송파감지거리 D_{CS}^* 를 다음과 같이 설정한다.

$$D_{CS}^* = \min(D_{CS,ch}, D_{CS,max}) \quad (8)$$

그림 3에서는 $D_{CS,max} = 1 \text{ Km}$ 일 때 최대반송파감지거리들을 평균주행속도에 따라 도시하였다. 그림에서 점선은 IEEE 802.11p 표준의 최대반송파감지거리 $D_{CS,max}$ 를, 대시(Dash) 선은 수식 (7)의 채널부하 조건을 만족하는 반송파감지거리 $D_{CS,ch}$ 를, 그리고 굵은 실선은 최대반송파감지거리 D_{CS}^* 를 나타낸다. 자동차의 일반적인 주행속도($v \leq 40 \text{ m/sec}$)를 감안할 때, 그림에서 최대반송파감지거리 D_{CS}^* 는 채널부하 조건을 만족하는 반송파감지거리 $D_{CS,ch}$ 에 의해 결정됨을 확인할 수 있다. 이는 자동차 간 통신에서 비컨 송신전력 제어의 중요성을 보여준다.

그림 4에서는 $\alpha = 0.5$ 일 때, 비컨 메시지 부하의 상한을 평균주행속도에 따라 도시하였다. 그림에서 점선은 채널부하 조건에 의한 비컨 메시지 부하의 임계값을, 대시 선은 고정형 반송파감지거리($D_{CS} = 1$

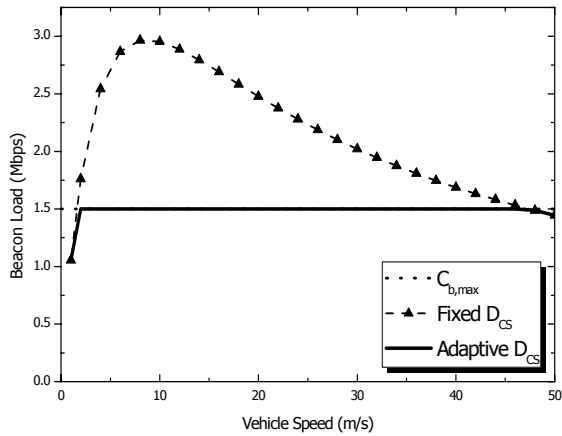


그림 4. 고정형 및 적응형 반송파감지거리 방식의 비컨 부하 상한
 Fig. 4. The upper bound of beacon load for fixed and adaptive CSR scheme

Km) 방식의 비컨 메시지 부하 상한을, 그리고 짧은 실선은 수식 (8)에 따라 적응적으로 반송파감지거리를 조절하는 적응형 반송파감지거리 방식의 비컨 메시지 부하 상한을 나타낸다. 고정형 반송파감지거리 방식에서는 비컨 메시지의 부하가 임계값을 초과하여 안전 메시지의 방송에 영향을 미칠 수 있다. 반면, 적응형 반송파감지거리 방식에서의 비컨 메시지 부하는 항상 임계값 이내에 수렴하므로 신속하고 신뢰할 수 있는 안전 메시지 방송이 가능하다. 위의 결과들로부터 수식 (8)의 반송파감지거리 조절 방식은 채널부하 조건을 만족하는 최적의 반송파감지거리를 도출함을 알 수 있다.

3.3 IEEE 802.11 DCF 경쟁구간크기

비컨 프레임 방송에 있어서 IEEE 802.11 DCF 경쟁구간크기는 수율을 최대화하는데 있어 매우 중요한 파라미터이다. 만일 DCF 경쟁구간크기가 너무 작은 경우에는 불필요한 프레임 충돌으로 인해 수율이 낮아진다. 반면, DCF 경쟁구간크기가 너무 큰 경우에는 DSRC 채널의 대역폭을 낭비하게 된다. IEEE 802.11 MAC 표준에서 단대단 (Point-to-Point) 트래픽의 프레임 충돌을 해결하기 위해 지수적 백오프 (Exponential Backoff) 알고리즘을 사용한다[10]. 지수적 백오프 알고리즘에서 프레임 전달이 실패하면, DCF 경쟁구간크기를 두 배로 늘려서 난수를 발생함으로써 충돌 확률을 줄이게 된다. 반면, 비컨 프레임과 같은 방송(Broadcast) 프레임에 대해서는 이와 같은 충돌 해결 방안이 정의되어 있지 않다. 따라서, 본 절에서는 방송 프레임의 수율을 최대화하는 최적 DCF 경쟁구간크기 W_{opt}^* 에 대한 닫힌 근사해를 유도

한다. 이를 위해 반송파감지거리 내에 있는 자동차의 수를 N 으로, DCF 경쟁구간크기를 W 로 나타낸다. 3.2 절에서 반송파감지거리 내에 있는 자동차의 수 N 은 $N = 2D_{CS}K\bar{\rho}$ 로 주어진다.

본 절에서는 성능 분석을 용이하게 하기 위해 1) 모든 자동차들이 항상 전송할 비컨 프레임이 있으며, 2) 물리 계층에서 비트 오류로 인한 패킷 손실은 없다고 가정한다. 각 미니 슬롯(Mini-Slot)에 프레임 방송을 시도하는 자동차의 수 X 에 따라 미니 슬롯의 상태는 다음의 세가지로 구분된다.

- 유희 (Idle) 슬롯 : $X = 0$ 인 경우이며, DSRC 채널의 대역폭을 낭비하는 문제점이 있다.
- 성공 (Success) 슬롯 : $X = 1$ 인 경우이며, 성공적인 방송 프레임 방송이 가능하다.
- 충돌 (Collision) 슬롯 : $X \geq 2$ 인 경우이며, 다수의 프레임들 간의 충돌로 인해 프레임을 방송하지 못한다.

여기에서 유희 슬롯, 성공 슬롯, 충돌 슬롯의 확률을 각각 P_I, P_S, P_C 로 나타낸다. 각각의 자동차가 경쟁구간 $[0, W-1]$ 내에서 임의로 난수를 발생하여 프레임 임을 방송하므로, 확률 변수 X 는 이항분포 $B(N, 1/W)$ 을 따르므로, 위의 확률들은 다음과 같이 주어진다.

$$P_I = \left(1 - \frac{1}{W}\right)^N \tag{9}$$

$$P_S = \frac{N}{W} \left(1 - \frac{1}{W}\right)^{N-1} \tag{10}$$

$$P_C = 1 - \left(1 - \frac{1}{W}\right)^N - \frac{N}{W} \left(1 - \frac{1}{W}\right)^{N-1} \tag{11}$$

또한, 유희 슬롯과 성공 슬롯, 그리고 충돌 슬롯의 길이를 각각 T_I, T_S, T_C 로 표기하면, 유희 슬롯의 길이는 1 미니 슬롯이고, 성공 슬롯과 충돌 슬롯의 길이는 비컨 프레임의 길이가 500 byte이므로 88 미니 슬롯이 된다($T_S = T_C = 88$).

따라서, 비컨 프레임의 수율 S 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = \frac{T_S P_S}{T_I P_I + T_S P_S + T_C P_C} \tag{12}$$

반송파감지거리 내에 고정된 수의 자동차들이 존재한다 가정하면, 수식 (9)-(12)에서 비컨 프레임의 수율 S 를 DCF 경쟁구간크기 $W (W \in \mathbb{R})$ 에 관한 함수 $S(W)$ 로 나타낼 수 있다. 최적의 실수해 W_{opt} 를 구

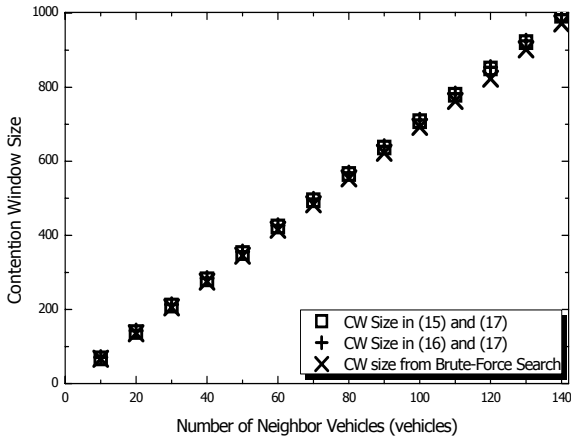


그림 5. 반송파감지거리 내의 자동차 수에 따른 최적 경쟁구간크기
 Fig. 5. The optimal CW size vs. number of vehicles in the CSR

하기 위해서 수식 (12)을 DCF 경쟁구간크기 W 에 관하여 미분을 취하면 W_{opt} 는 다음 방정식의 해가 된다.

$$(T_C - 1) \left(1 - \frac{1}{W_{opt}} \right)^N + T_C \left(\frac{N}{W_{opt}} - 1 \right) = 0 \quad (13)$$

일반적으로 $1/W_{opt} \ll 1$ 이므로, 수식 (13)에서 $(1 - 1/W_{opt})^N$ 을 테일러급수전개(Taylor's Series Expansion)를 통해 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$\left(1 - \frac{1}{W_{opt}} \right)^N \approx 1 - \frac{N}{W_{opt}} + \frac{N(N-1)}{2W_{opt}^2} \quad (14)$$

수식 (14)를 수식 (13)에 대입하면, 최적 DCF 경쟁구간크기에 대한 닫힌 근사해를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$W_{opt} \approx \frac{N(N-1)(T_C - 1)}{-N + \sqrt{N^2 + 2N(N-1)(T_C - 1)}} \quad (15)$$

자동차의 수 N 이 충분히 크면, 수식 (15)를 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$W_{opt} \approx \frac{(T_C - 1)N}{\sqrt{2T_C - 1} - 1} \quad (16)$$

최종적으로, DCF 경쟁구간크기는 자연수이어야 하므

로 최적 DCF 경쟁구간크기 W_{opt}^* 는 다음과 같이 주어진다.

$$W_{opt}^* = \arg \max_{\lfloor W_{opt} \rfloor, \lceil W_{opt} \rceil} [S(\lfloor W_{opt} \rfloor), S(\lceil W_{opt} \rceil)] \quad (17)$$

그림 5에서는 최적의 DCF 경쟁구간크기를 반송파 감지거리 내에 있는 자동차 수 N 에 따라 도시하였다. 그림에서 ‘□’ 마크는 수식 (15)와 (17)을 사용하여 계산한 수식을, ‘+’ 마크는 수식 (16)과 (17)을 사용하여 계산한 수식을, 그리고 ‘X’ 마크는 모든 DCF 경쟁구간크기에 대하여 전수 조사를 통해 얻은 최적해를 나타낸다. 그림에서 닫힌 근사해들이 오차 범위 3% 이내에서 전역(Global) 최적해에 근사함을 확인할 수 있다. 그리고, 수식 (16)에서 예측할 수 있듯이, DCF 경쟁구간크기는 자동차 수 N 에 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 자동차 간 통신에서 비컨 방송을 위해 만족해야 하는 세가지 조건인 서비스 조건, 채널부하 조건, 그리고 안전거리 조건을 제시하였다. 이를 기반으로 비컨 메시지 방송의 핵심 파라미터들인 비컨주기, 반송파감지거리, 그리고 DCF 경쟁구간크기에 관한 수학적인 모형을 도출하였다.

그러나, 본 논문에서는 숨은노드문제가 없다는 가정 하에 관련 수식들은 도출하였다. 자동차 네트워크와 같은 무선 애드 혹 (Ad Hoc) 네트워크에서 숨은노드문제가 갖는 중요성을 감안할 때, 향후 본 논문에서 제시하는 수학적 모형들을 확장하여 숨은노드문제를 고려한 성능분석모형을 개발하는 것이 필요하다.

참 고 문 헌

[1] "Vehicle safety communications project, task 3 final report: Identify intelligent vehicle safety applications enabled by DSRC," *Nat. Highway Traffic Safety Admin.*, Washington, D.C., 2005.
 [2] IEEE Computer Society, "IEEE standard for information technology-Telecommunications and information exchange between

systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 6: Wireless access in vehicular environments," *IEEE Std 802.11p-2010*, 2010.

[3] IEEE Vehicular Technology Society, "IEEE standard for wireless access in vehicular environments (WAVE). Multi-channel operation," *IEEE Std 1609.4-2010*, 2010.

[4] SAE International, "DSRC implementation guide: A guide to users of SAE J2735 message sets over DSRC," online available: <http://www.sae.org/standardsdev/dsrc/DSRCImplementationGuide.pdf>, Feb. 2010.

[5] A. Boukerche, C. Rezende, R. W. Pazzi, "Improving neighbor localization in vehicular ad-hoc networks to avoid overhead from periodic messages," *Proc. IEEE GLOBECOM 2009*, Dec. 2009.

[6] M. Torrent-Moreno, J. Mittag, P. Santi, and H. Hartenstein, "Vehicle-to-vehicle communication: fair transmit power control for safety-critical information," *IEEE Trans. on Vehicular Techno.*, vol. 58, no. 7, pp. 3684-3703, Aug. 2009.

[7] R. Reinders, M. V. Eenennaam, G. Karagiannis, G. Heijenk, "Contention window analysis for beaconing in VANETs," *International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC 2011)*, pp. 1481-1487, Aug. 2011.

[8] C. L. Huang, Y. P. Fallah, R. Sengupta, and H. Krishnan, "Adaptive intervehicle communication control for cooperative safety systems," *IEEE Network*, vol. 24, no. 1, pp. 6-13, Jan. 2010.

[9] Y. P. Fallah, C. L. Huang, R. Sengupta, and H. Krishnan, "Analysis of information dissemination in vehicular ad-hoc networks with application to cooperative vehicular safety systems," *IEEE Trans on Vehicular Techno.*, vol. 60, no. 1, pp. 233-247, Jan.

2010.

[10] L. Cheng, B. E. Henty, D. D. Stancil, F. Bai, and P. Mudalige, "Mobile vehicle-to-vehicle narrow-band channel measurement and characterization of the 5.9 GHz dedicated short range communication (DSRC) frequency band," *IEEE J. Selected Areas in Commun.*, vol. 25, no. 8, pp. 1501-1516, Oct. 2007.

[11] IEEE Computer Society, "IEEE standard for information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," *IEEE Std 802.11-2007*, 2007.

[12] E. Abbott and D. Powell, "Land-vehicle navigation using GPS," *Proc. of the IEEE*, vol. 87, no. 1, pp. 145-162, Jan. 1999.

응엔 호아 흥 (Hoa-Hung Nguyen)

학생회원



2009년 4월, 베트남 호치민공과대학(HCMUT) 컴퓨터공학과 학사
2011년 9월~현재, 부산대학교 물류IT학과 석사과정
<관심분야> 자동차 통신 및 네트워크

아디타 바위유가 (Adhitya Bhawiyuga)

학생회원



2011년 3월, 인도네시아 ITS대학 정보공학과 학사
2011년 9월~현재, 부산대학교 물류IT학과 석사과정
<관심분야> 자동차 통신 및 네트워크

정 한 유 (Han-You Jeong)

중신회원



1998년 2월, 서울대학교 전기
공학부

2000년 2월, 서울대학교 전기
컴퓨터공학부 석사

2005년 2월, 서울대학교 전기
컴퓨터공학부 박사

2005년 3월~2007년 7월, 삼
성전자 정보통신총괄 책임연구원

2008년 1월~8월, 미네소타대학교 박사후연구원

2008년 9월~현재, 부산대학교 차세대물류IT기술연
구사업단 조교수

<관심분야> 자동차 네트워크, 무선 메시 네트워크,
광통신망