

IEEE 1609.4 다중 채널 운용에서 사건기반 긴급메시지의 지연 성능 분석

정 대 인*

Delay Analysis of Event-Driven Emergency Messages in IEEE 1609.4 Multi-Channel Operation

Daein Jeong*

요 약

본 논문은 WAVE(Wireless Access in Vehicular Environment) 규격 중 IEEE 1609.4에서 정의된 다중 채널 운용 환경 아래 처리되는 긴급메시지의 지연 성능을 분석한다. 도로상의 안전서비스 구현을 위한 주기적 비컨메시지와 사건기반 긴급메시지가 처리되는 환경에서 긴급메시지의 전달 지연 성능에 초점을 두었다. 긴급메시지 처리의 제한요소인 채널스위칭 동작을 반영하여 지연 성능 산출 모델링을 제시하였다. 긴급메시지는 신속한 처리가 가능하도록 우선권이 부여되며 이러한 차별적 처리가 모델에 반영되었다. 주기적 비컨메시지와의 상호 의존성을 반영하여 모델의 정확성을 제고하였다. 메시지 전달률에 심각한 영향을 미치는 숨은 노드 문제도 모델링에 반영하여 지연과의 관계를 파악하였다. 제안된 모델을 적용하여 다양한 시스템 변수들과 긴급메시지 전송 지연과의 관련성을 분석하였다. 비컨메시지 또는 숨은 노드문제가 긴급메시지 지연에 미치는 영향은 제한적인 반면 채널스위칭이 지연 성능에 미치는 영향은 주목할 만함을 확인하였다.

키워드 : IEEE 801.11p, DSRC, 지연 성능, 사건기반 긴급메시지, 다중 채널 운용

Key Words : IEEE 801.11p, DSRC, delay performance, event-driven emergency message, multi-channel operation

ABSTRACT

In this paper, we study delay performance of emergency messages processed in the multi-channel operation defined in WAVE standard IEEE 1609.4. In an environment where periodic beacon messages and event-driven emergency messages are processed together for safety services on the road, we focused on the delay in delivering emergency messages. We propose a delay model of the emergency messages reflecting the constraints caused by the channel switching operation. Emergency messages are given priority so that they can be processed quickly, and the resulting differentiated treatment is reflected in the model. In order to improve the accuracy, the proposed model reflects inter-dependency of traffic. The hidden node problem that seriously affects the message delivery ratio is also reflected in the modeling to identify its effects on the delay. The proposed model is applied to investigate the relationship between various system parameters and the delay performance of the emergency messages. We found that, while the influence of beacon messages or hidden node problem is limited, the channel switching operation has a noticeable effect on the delay performance of emergency messages.

* 이 연구는 2019학년도 한국외국어대학교 교내학술연구비의 지원에 의하여 이루어진 것임.

• First Author : Hankuk University of Foreign Studies, Div. of Computer & Electronic Sys. Eng., djeong@hufs.ac.kr. 종신회원
논문번호 : KICS201910-220-B-RE, Received October 2, 2019; Revised November 14, 2019; Accepted November 16, 2019

I. 서론

무선통신 기술발전으로 도로에서 안전과 편의성 개선을 목표로 하는 지능형 교통시스템(ITS, Intelligent Transportation System) 연구가 한창이다. ITS 구축을 위한 차량 간 통신 기술로서 최근 DSRC (Dedicated Short Range Communications) 기반의 IEEE 802.11p^[1]와 LTE (Long-Term Evolution) 기반의 LTE-V2X (Vehicle-to-Everything) 기술에 대한 규격화 및 비교 논의가 활발하다^[2]. 본 연구는 IEEE 802.11p 기술에 초점을 둔다.

IEEE 1609 규격의 WAVE 프로토콜에서 IEEE 802.11p MAC 프로토콜을 적용하는데, 메시지 통신 대역으로 5.9GHz DSRC 밴드의 75MHz 대역폭을 사용하여 7개 채널을 정의한다. 1개의 CCH(Control Channel)와 6개의 SCH(Service Channel)로 구성된다. IEEE 1609.4^[3]에서 그림 1과 같은 채널 운용 방안을 보였다. 본 논문에서 다루는 alternating 방식은, 시간을 100ms 길이의 반복 T_{SY} (Synch Interval) 구간으로 나누고 T_{SY} 내에서 CCH와 SCH를 번갈아 접속한다. Time slot 0에 모든 노드가 CCH에 접속하여 안전 관련 정보를 교환하고 이어지는 time slot 1에서는 각자 선택한 SCH 접속으로 데이터 서비스를 수행하며, 이러한 채널스위칭이 반복된다. 각 time slot은 4ms의 guard time(T_g)을 포함하여 50ms의 길이를 가지며, 편의를 위해 본 논문에서는 각각 T_{CCH} , T_{SCH} 로 표기한다. T_g 구간에서 트래픽 전송은 없다.

안전관련 정보는 차량의 위치와 속도, 운행 방향 등 정보를 주기적으로 이웃 차량들에게 전송하는 비컨메시지(이하 M_b 로 표기)와 돌발 상황 시 발생하는 사건기반(event-driven) 긴급메시지(이하 M_e 로 표기)가 있

다.^[4] M_b 는 100ms 간격으로 각 차량으로부터 주기적으로 발생하여 브로드캐스팅 되며 RTS(request to send)/CTS (clear to send) 및 ACK 메시지 전송이 적용되지 않는다. 돌발 상황 시 위험에 노출된 차량들에게 전달되는 M_e 는 전송 지연에 대한 요구가 엄격하다.^[5] 신속한 전달이 요구되는 M_e 의 전송 지연 성능에 대한 분석이 본 연구의 주제이다. M_e 지연 성능에 영향을 미치는 요소는 채널스위칭 뿐만 아니라 동시에 다루어지는 M_b 의 간섭, 숨은 노드 문제 등이다. 이 요소들을 반영한 M_e 지연의 해석적 모델링을 본 논문에서 제안한다. 제안된 모델에서는 채널의 점유 확률을 시스템 상태에 의존적인 상태변수로 정의하여 차량 간의 상호 간섭을 구체적으로 다룬다. 본 연구에서 제시하는 모델은 CCH 구간 내 M_e 처리 전제아래 그림 1과 같은 다양한 채널스위칭 설정을 수용한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 본 연구와 관련된 기존 연구결과들을 살펴본다. 3장에서는 M_e 지연 모델링을 소개한다. 4장에서는 모델을 이용한 다양한 분석 결과들을 논의한다. 5장에서는 주요 결론과 향후 연구 계획을 제시한다.

II. 관련연구

WAVE의 IEEE 802.11p MAC 프로토콜은 채널스위칭 동작, 메시지 타입 간의 차별적 처리 등을 중심으로 성능분석 연구가 활발하다. [5]는 비컨메시지만 처리되는 환경에서 채널스위칭을 반영하여 전송성공률과 지연 성능에 대한 분석적 모델링을 제시하였다. 긴급메시지에 대한 분석은 [6]에서 전달성공률 중심으로 제시되었다. M_e 반복 전송으로 전달성공률이 개선됨을 보였다. [6]에서 M_b 의 간섭은 [7]의 M_b 브로드캐스팅 모델을 반영하였는데 모든 M_b 가 CCH 구간 시작 이전에 발생 완료된 것을 가정한 모델이다. [8]은 사건기반 긴급메시지의 지연 성능을 단일클래스 환경에서 분석하였다. 특히 SCH 구간에서도 사건기반 긴급메시지를 전송하여 전송지연을 개선하는 방안을 제시하였다. [9]는 CCH 구간에 처리되는 두 클래스 트래픽에 대한 전달률과 지연 성능을 분석하였다. 각 차량이 두 개의 무선 송수신장치를 구비하여 채널스위칭이 필요 없는 환경을 가정 하였다.

본 연구는 M_e 의 지연 성능을 중점적으로 분석한다. [8]에 비해 다양한 제한 요소들을 확대 적용한 M_e 지연 모델링을 제시한다. M_b 의 발생 시점에 대한 제한

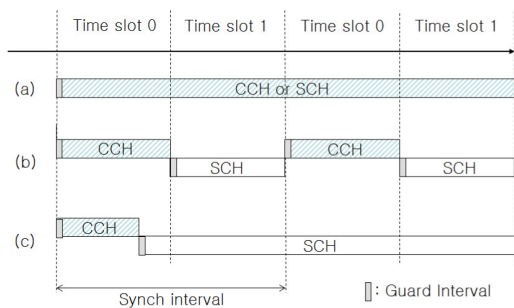


그림 1. 채널접속 사례[3]: (a) continuous, (b) alternating, (c) immediate
 Fig. 1. Channel access example[3]: (a) continuous, (b) alternating, (c) immediate

없이^[5] 임의의 시점에 발생하는 M_b 가 M_e 지연에 미치는 영향을 고려한다. 또한 M_e 의 반복 전송이 M_e 전달 지연에 미치는 영향을 분석한다. 더 나아가 M_e 지연 모델에 숨은 노드 문제를 반영하여 M_e 의 반복 전송이 숨은 노드 문제에 대해 갖는 효과를 지연 성능 측면에서 확인한다.

IEEE 1609.4 채널스위칭은 M_e 지연 분석의 핵심적 제한 요소이다. 우선권 기반의 차별적 트래픽 처리, 숨은 노드 문제, 반복 전송 등 부수적 제한 요소들을 반영하여 M_e 의 지연 성능 분석을 위한 정확한 모델을 구축하는 것이 본 연구의 목표이다.

III. M_e 지연 모델링

3.1 시스템 설정

M_e 는 어느 순간에든 발생할 수 있으며, 차량들의 신속한 대응을 위해 일반적으로 100ms 이내에 전달 되는 것이 요구된다^[10]. 따라서 100ms 길이의 T_{SI} 을 고려할 때, 본 연구는 M_e 가 발생한 T_{SI} 와 후속 T_{SI} 구간을 포함한 시간 범위에서 지연 분석을 수행한다. 이 기간 동안 또 다른 M_e 는 발생하지 않는 것을 가정한다. M_e 는 브로드캐스팅 방식으로 전송되며 M_e 발생 차량으로부터 한 홉 브로드캐스팅 전송거리 내에 있는 차량들만을 수신 차량으로 정의한다. M_e 는 $D(\geq 1)$ 회 반복전송하며 모든 수신 차량이 수신에 성공한 경우만을 전송 성공으로 간주한다. 지연 성능은 전송에 성공한 M_e 만을 대상으로 구한다. MAC 파라미터 CW (contention window)와 $AIFS$ (arbitration inter frame space)는 트래픽 등급별로 설정되며 본 논문에서는 M_e 등급은 $CW_e, AIFS_e$, M_b 등급은 $CW_b, AIFS_b$ 로 각각 표기한다. M_e 와 M_b 간에는 $(CW_e - 1)\sigma + AIFS_e < AIFS_b$ 관계를 가정한다. 위 관계는 M_e 와 M_b 가 동시에 backoff 단계 개시 시 항상 M_e 가 먼저 전송되는 조건이며, 이하 이 관계를 M_e 가 갖는 우선권으로 표기한다. M_e 와 M_b 의 충돌은 M_e 발생 후 $AIFS_e$ 경과시점과 동시에 M_b 의 backoff 카운트가 0이 되는 경우이다. 편의를 위해 $AIFS_e$ 와 $AIFS_b$ 는 각각 A_e, A_b 로 표기한다.

M_e 충돌은 숨은 노드로 인해서도 발생한다. M_e 발생 차량의 이웃 중 임의의 차량을 A라 하자. A의

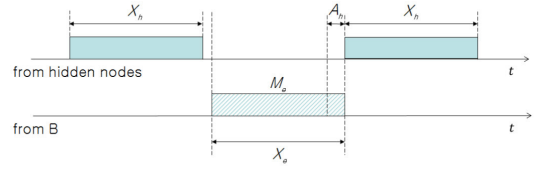


그림 2. 숨은 노드로부터의 간섭
Fig. 2. Interference from hidden nodes

이웃 중에는 M_e 발생 차량의 신호 감지 범위(carrier sensing range)를 벗어난 영역에 있는 차량이 있을 수 있다. A의 이 두 이웃은 상호 신호 감지 범위를 벗어나므로 동시에 A를 수신으로 하는 메시지를 전송할 수 있고 이는 A에서 충돌을 야기한다. 이러한 숨은 노드 문제는 RTS/CTS 제어메시지 적용이 어려운 브로드캐스팅 환경에서 더욱 심각해진다. M_e 발생 차량을 B라 하고 이 M_e 가 숨은 노드로 인해 충돌이 발생하는 확률을 P_h 라 하자. M_e 가 숨은 노드와의 충돌을 피하기 위해서는 그림 2와 같이 두 조건이 필요하다.^[11] 첫째, M_e 전송 시작시점에 전송 중인 숨은 노드가 없어야 한다. 둘째, M_e 전송 중에 전송 개시하는 숨은 노드가 없어야 한다. B의 숨은 노드가 N_h 개, 숨은 노드가 전송하는 메시지의 전송시간을 X_h , M_e 의 전송시간을 X_e , 숨은 노드가 전송한 메시지의 $AIFS$ 값을 A_h 라면, 첫 번째 조건의 확률은 $1 - N_h X_h / T_{CCH}$, 두 번째 조건의 확률은 $(1 - (X_e - A_h) / T_{CCH})^{N_h}$ 와 같고, P_h 는 다음과 같다.

$$P_h = 1 - \left(1 - \frac{N_h X_h}{T_{CCH}}\right) \left(1 - \frac{X_e - A_h}{T_{CCH}}\right)^{N_h} \quad (1)$$

3.2 모델링

M_e 가 발생하는 시점은 CCH 구간과 SCH 구간으로 나눌 수 있다.

3.2.1 SCH 구간에 M_e 가 발생하는 경우

SCH 구간에서 M_e 발생을 균일분포로 가정하면 M_e 는 발생 후 SCH 구간 내 평균 대기시간 $T_{SCH}/2$ 과 T_g 경과 후 CCH 구간에서 채널 접속을 한다. 이때, M_e 는 우선권에 의해 M_b 로부터의 간섭은 없지만 숨은 노드의 간섭은 피할 수 없다. 숨은 노드와의 충돌 확률이 P_h 일 때 D 회의 M_e 전송 중 k 번째 성

공하는 경우, 그 확률은 $P_h^{k-1}(1-P_h)$ 이며 그 때의 총 소요 시간은 $T_{SCH}/2 + T_g + k(A_e + X_e)$ 이다. 이를 W_{SCH} 로 두면 다음과 같다.

$$W_{SCH} = \sum_{k=1}^D \left\{ \frac{T_{SCH}}{2} + T_g + k(A_e + X_e) \right\} P_h^{k-1}(1-P_h) \quad (2)$$

M_e 의 전송은 MAC 동작에서 A_e 을 항상 수반하므로 $A_e + X_e$ 의 형태로 주로 표기된다. 편의를 위하여 앞으로 $A_e + X_e$ 는 T_e 로 대체 표기한다. M_e 의 반복 전송 간격은 A_e 로 간주하였다. 본 논문의 나머지 부분에서 표기의 편의를 위해 $W(t_{wait}, R)$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$W(t_{wait}, R) = \sum_{k=1}^R (t_{wait} + kT_e) P_h^{k-1}(1-P_h) \quad (3)$$

이를 이용하면 W_{SCH} 는 다음과 같이 표기된다.

$$W_{SCH} = W\left(\frac{T_{SCH}}{2} + T_g, D\right) \quad (4)$$

3.2.2 CCH 구간에 M_e 가 발생하는 경우

CCH 구간에 발생한 M_e 는 전송 시 M_b 의 간섭을 받는다. M_b 는 CCH 구간 내에서 N 개의 차량으로부터 발생하며 임의의 시점에 이들은 세 가지 상태로 나뉜다. 아직 생성되지 않은 상태, 생성되었지만 전송되지 않은 상태, 전송을 완료한 상태이다. 각각 열린 상태, 활성 상태, 닫힌 상태로 표기하자. 열린 상태와 활성 상태의 M_b 가 M_e 전송에 영향을 미친다. M_b 간섭이 반영된 M_e 지연 모델링을 위해 CCH 구간 내 특정 시점을 정의한다. CCH 개시 직후 또는 임의의 M_b 전송 종료 직후 A_b 경과 시점이다. 이는 M_b 전송이 가능해지는 시점이며, 이를 경합시점으로 부르자. 본 논문의 M_e 지연 모델링은 경합시점 간의 상태 천이를 표현한다. 이웃하는 경합시점 간에는 M_e 또는 M_b 전송이 포함된다. 본 논문에서 각 경합시점은 CCH 종료까지 남은 시간으로 표기된다. 즉, 경합시점 t 는 CCH 잔여시간이 t 임을 의미한다. 마찬가지로 본 논문 나머지 부분에서 시간 변수는 모두 CCH 종료까지의 잔여시간을 표기한다. 따라서, 시간 구간 $[t_1, t_2]$ 는 $t_1 > t_2$ 의 관계를 가지며 CCH 잔여시

간이 t_1 에서 t_2 로 감소하는 구간을 의미한다.

각 경합시점에는 M_b 에 관련된 다음과 같은 세 개의 변수가 정의된다. 활성 상태 M_b 개수, 활성 상태 M_b 들의 backoff 카운트 값, 그리고 열린 상태 M_b 개수이다. M_e 의 전송 지연 모델링에서 위 세 개의 변수들로 M_b 의 간섭이 반영된다.

M_e 전송에서 주목할 점은, CCH 구간이 제한되어 있으므로 D 회의 M_e 전송이 현재의 CCH 구간에서 완료되지 못하고 후속 CCH 구간으로 일부 유보될 수 있다는 점이다. CCH 잔여시간이 t_{rem} 인 시점에 발생한 M_e 는 현재의 CCH 구간에서 최대 $\min\left\{D, \left\lfloor \frac{t_{rem}}{T_e} \right\rfloor\right\}$ 회 전송되고 $D - \min\left\{D, \left\lfloor \frac{t_{rem}}{T_e} \right\rfloor\right\}$ 회는 후속 CCH 구간에서 전송된다.

경합시점을 중심으로 M_e 의 전송지연을 다음과 같이 모델링한다. M_e 지연 모델링을 위해 $d_{n,m}^{t,w}$ 을 정의한다. $d_{n,m}^{t,w}$ 는, 경합시점 t 에서 $N-m$ 개의 열린 상태 M_b , 그리고 backoff 카운트 값 w 이하를 갖는 n 개의 활성 상태 M_b 가 있는 상황에서 이후 전송되는 M_e 의 지연 기대 값이다.

- (1) 경합시점 t 가 $0 \leq t < T_e - A_b$ 인 경우

이 경우 구간 $[t + A_b, 0]$ 에서 발생한 M_e 는 CCH 잔여시간이 T_e 보다 짧아 대기 후 후속 CCH에서 전송된다. 따라서 이 구간의 $d_{n,m}^{t,w}$ 는 다음과 같다.

$$d_{n,m}^{t,w} = W((t + A_b)/2 + T_{SCH} + T_g, D) \quad (5)$$

식(5)는 M_e 가 후속 CCH 구간에 D 회까지 전송 기회를 갖는 것을 반영한다.

- (2) 경합시점 t 가 $T_e - A_b \leq t \leq T_{CCH}$ 인 경우

임의의 경합시점 t 에서 M_e 발생시점에 따라 가능한 이벤트는 다섯 가지이다. 그림 3에는 임의의 경합시점 t 와 후속 경합시점 간의 간격을 도시하였다. 첫째, M_e 가 $[t + A_b, t + A_e]$ 구간인 그림 3의 zone 1에서 발생하면 $A_e < A_b$ 이므로 M_b 와 무관하게 A_e 경과 후 전송된다. 첫 번째 경우가 아니면, 경합시점 t 이후 l 번째 슬롯에서 임의의 첫 전송 발생을 가정할 수 있다. 그 전송이 M_e 단독인 경우가 둘 째 경우이고,

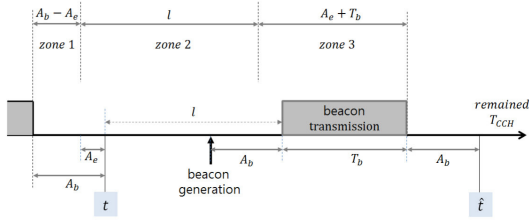


그림 3. 이웃하는 두 관측시점 구간
Fig. 3. interval of neighboring two observing points

M_e 와 M_b 의 동시 전송이 세 번째 경우이다. 이들은 zone 2에서 M_e 가 발생한 경우이다. 그 전송이 M_b 만의 전송인 경우에는, zone 3에서 M_e 가 발생하는 경우가 네 번째, M_b 전송완료까지 M_e 가 발생하지 않는 것이 다섯 번째 경우이다. 다섯 경우 모두 경합시점 t 에서의 M_e 의 지연, 즉 $d_{n,m}^{t,w}$ 모델링에 반영된다. 주목할 점은, 다섯 번째 경우는 후속 경합시점 $\hat{t} = t - l - T_b - A_b$ 에서 예상되는 M_e 지연 기댓값 $d_{n,m}^{\hat{t},w}$ 으로 반영된다.

위의 경우들을 반영하여 M_e 지연을 구하면 다음과 같다. 그림 3의 영역 1, 즉 $[t + A_b, t + A_e]$ 구간에서 발생한 M_e 는 CCH 종료이전에 최대 $\min\left\{D, \lfloor \frac{t + (A_e + A_b)/2}{T_c} \rfloor\right\}$ 회 전송될 수 있으며 이를 R_1 로 둔다. 이 구간에서 발생한 M_e 는 R_1 회 모두 숨은 노드와 확률 $P_h^{R_1}$ 로 충돌할 수 있지만 후속 CCH 구간에서 $D - R_1$ 회 전송기회가 있다. 이 경우 M_e 지연을 $W_1(t)$ 라하면 다음과 같고 오른쪽 두 번째 항이 이를 반영한다.

$$W_1(t) = W(0, R_1) + P_h^{R_1} W\left(t + \frac{A_b + A_e}{2} + T_{SCH} + T_g, D - R_1\right)$$

경합시점 t 이후 $l - 1$ 슬롯동안 아무런 전송이 없고 l 번째 슬롯에서 첫 전송이 발생하는 경우를 살펴보자. 이 첫 전송이 M_e 단독 전송이라면 이 M_e 는 현 CCH에서 최대 $\min\left\{D, \lfloor \frac{t - l}{T_c} \rfloor\right\}$ 회 전송될 수 있고 이를 R_2 로 둔다. 이 M_e 의 지연을 $W_{only}(t, l)$ 라하면 다음과 같다.

$$W_{only}(t, l) = W(0, R_2) + P_h^{R_2} W\left(t + A_e - l + T_{SCH} + T_g, D - R_2\right)$$

이 첫 전송이 M_b 인 경우를 살펴보자. 열린 상태에서 $i (\geq 0)$ 개, 활성 상태에서 $j (\geq 0)$ 개의 M_b 가 관측시점 t 이후 l 번째 슬롯에서 전송되는 확률을 O_i^j 로 표기하자. n 개의 활성 상태 M_b 가 있고 이들의 backoff 카운트 값이 w 이하인 상황에서 관측시점 t 이후 l 번째 슬롯에서 처음으로 j 개의 M_b 전송이 시작되는 확률을 $P_{w,j}^{l,n}$ 로 정의하면 $P_{w,j}^{l,n} = \left(1 - \frac{l-1}{w}\right)^n \binom{n}{j} \left(\frac{1}{w-l+1}\right)^j \left(\frac{w-l}{w-l+1}\right)^{n-j}$ 와 같다. $N - m$ 개의 열린 상태 M_b 를 가정하면, 관측시점 t 이후 l 번째 슬롯에서 열린 상태 M_b i 개가 전송되기 위해서는 $t + A_b$ 시점으로부터 l 번째 슬롯에 i 개가 생성되어야 한다. 이 확률을 $G_{t+A_b,t}^{l,m}$ 로 정의한다. $G_{t+A_b,t}^{l,m}$ 은 $P_{t,i}^{l,N-m}$ 와 동일하다. 이들을 이용하면 $O_i^j = P_{w,j}^{l,n} G_{t+A_b,t}^{l,m}$ 로 표현된다. O_i^j 를 매개로 M_e 는 열린 상태와 활성 상태의 M_b 로부터 영향을 받는다.

M_e 가 M_b 와 충돌되는 경우, 후속 $D - 1$ 회의 M_e 전송이 이어진다. 이 경우 전송 성공하는 M_e 의 지연을 $W_2(t, l)$ 이라하면 이는 다음과 같다.

$$W_2(t, l) = \sum_{k=2}^{R_2} k T_c P_h^{k-2} (1 - P_h) + P_h^{R_2 - 1} W\left(t + A_e - l + T_{SCH} + T_g, D - R_2\right)$$

M_e 가 M_b 전송 중에 발생하는 경우 M_e 는 CCH 종료이전에 최대 $\min\left\{D, \lfloor \frac{t - l - T_b}{T_c} \rfloor\right\}$ 회 전송될 수 있고 이를 R_3 로 둔다. T_b 는 M_b 의 전송소요 시간이다. 이 M_e 의 지연을 $W_3(t, l)$ 라면 다음과 같다.

$$W_3(t, l) = W\left(\frac{T_b}{2}, R_3\right) + P_h^{R_3} W\left(t - l - \frac{T_b}{2} + T_{SCH} + T_g, D - R_3\right)$$

위에서 살펴본 네 경우와 M_e 발생이 후속 경합시점으로 미루어진 경우를 포함하여 M_e 지연 기댓값 $d_{n,m}^{t,w}$ 을 표기하면 다음과 같다.

$$d_{n,m}^{t,w} = P_1 W_1(t) + (1 - P_1) \sum_{l=1}^{\min(t,w)} \left[O_0^0 P_2 W_{only}(t, l) + \sum_{i=0}^{N-m} \sum_{j=0}^n \left\{ \hat{O}_i^j (P_2 W_2(t, l) + (1 - l P_2) (P_3 W_3(t, l) + (1 - P_3) \sum_{k=0}^{N-m-i} B_{t+A_b-l,k}^{A_b+T_b,m+i} d_{n-j+k,m+i+k}^{[t-l-T_b-A_b]^+, w_k})) \right\} \right] \quad (6)$$

여기서, $P_1 = (A_b - A_e)/(t + A_b)$, $P_2 = 1/(t + A_e)$, $P_3 = (A_e + T_b)/(t + A_e - l)$ 이다. 이 확률 값들은 M_e 가 CCH 구간에서 발생하는 조건을 반영한다. 식(6)은 CCH 잔여시간 t 에서 이후 발생하는 M_e 의 지연 기댓값을 나타낸다. \hat{O}_i^j 는 $i+j=0$ 이면 0, $i+j>0$ 이면 O_i^j 이다. 식(6)의 셋째 줄은 M_b 전송 종료시점까지 M_e 가 발생하지 않은 경우로서, 후속 경합시점 $\{t-l-T_b-A_b\}^+$ 에서의 지연 기대 값을 반영한다. $\{t-l-T_b-A_b\}^+$ 는 $\max\{t-l-T_b-A_b, 0\}$ 를 의미하고, w_k 는 $k=0$ 일 때 $w-l$, $k>0$ 일 때 CW_b 이다. $B_{i,k}^{s,m}$ 은 열린 상태 M_b 가 $N-m$ 개일 때 CCH 잔여시간이 t 인 시점에서 향후 s 슬롯동안 k 개의 M_b 가 생성될 확률이며 $B_{i,k}^{s,m} = \binom{N-m}{k} \left(\frac{s}{t}\right)^k \left(1-\frac{s}{t}\right)^{N-m-k}$ 이다.

일반적인 M_e 의 지연 기댓값을 L_e 라면, CCH 개시 시점에 대기 중인 M_b 가 k 개일 때 식(4)(5)(6)을 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$L_e = \frac{T_{SCH}}{T_{SI}} W_{SCH} + \frac{T_{CCH}}{T_{SI}} d_{k,k}^{T_{CCH} CW_e}, \quad (0 \leq k \leq N) \quad (7)$$

IV. 실험 및 토의

본 절에서는 제시 모델을 활용하여 M_e 전달과 관련된 다양한 요소들이 M_e 지연 성능에 미치는 영향을 살펴본다. 비교를 위한 시뮬레이션은 C언어로 IEEE 802.11p을 구현하여 기존 연구⁵¹ 등에서 검증된 프로그램을 활용하였다. 시험에서, $AIFS_e$ 는 $SIFS$ 와 동일하게 설정하여 M_e 의 반복전송 시 M_b 의 간섭이 없도록 하였다. M_e 가 속한 AC에는 M_e 만 존재

하므로 CW_e 는 가능한 작게 설정했다. 이러한 설정은 $(CW_e - 1)\sigma + AIFS_e < AIFS_b$ 조건을 만족하여 M_e 의 M_b 에 대한 우선권을 보장한다. 시험 환경은 표 1에 정리하였다.

4.1 M_b 와 숨은 노드의 영향

M_e 지연은 M_b 와 동시 전송으로 인한 충돌, 또는 M_b 전송 중에 생성되어 대기하는 등의 형태로 M_b 로부터 영향을 받는다. M_b 와 동시 전송으로 충돌이 발생하면 이어지는 $D(>1)$ 회까지의 추가 M_e 전송은 우선권에 의해 M_b 의 간섭을 받지 않는다. M_b 전송 중에 생성되어 대기 지연이 발생한 경우 전송중인 M_b 전송이 완료된 후 우선권에 의해 M_e 가 전송된다. 그러므로 M_b 가 M_e 지연에 미치는 영향은 제한적이다. 첫 실험은 숨은 노드가 없거나($N_h = 0$) 숨은 노드 부하를 고려한($N_h = 10$) 환경에서 M_b 부하를 변화시키며 M_e 지연을 살펴보았다. M_e 지연은 식(7)을 적용하였으며 그 결과를 그림 4에 도시하였다. 시뮬레이션 결과도 같이 도시하였다. 시뮬레이션 결과는 60회 반복수행을 통하여 측정된 샘플 값으로부터 95% 신뢰구간의 M_e 지연 추정 값을 구하여 오류 바 형태로 도시하였다. 그림 4에서, 해석과 실험결과가 근접함을 볼 수 있으며 이는 해석의 타당성을 입증한다. 그림 4에서 M_b 부하는 숨은 노드 유무와 상관없이 M_e 지연에 주목할 만한 영향을 미치지 않음을 볼 수 있다. 참고로 $N=30$ 과 $N=20$ 인 경우 시스템 부하가 각각 86.6%, 57.7%이다. 이러한 차이에도 M_e

표 1. 실험파라미터
Table 1. Parameters for experiments

parameter	value
M_e, M_b, M_h	500 bytes
data rate	3 Mbps
slot(σ)	16 μ s
$AIFS_e, AIFS_b$	32 μ s, 80 μ s
CW_e, CW_b	2, 8
M_b rate	10 $M_b/s/node$

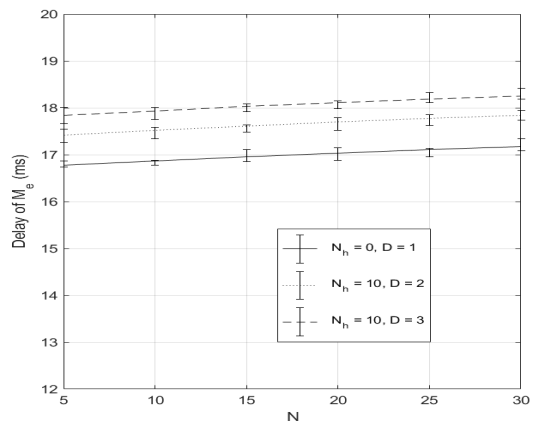


그림 4. M_b 부하 변화에 대한 M_e 지연
Fig. 4. M_e delay for M_b load variations

지연의 변화가 작은 것은 M_e 의 우선권 부여가 매우 효과적임을 보인다. 한편, 숨은 노드가 있는 경우 반복 전송으로 인한 지연의 증가를 확인할 수 있다. 지연은 전송에 성공한 경우만 반영되므로 $D=2$ 에 비해 $D=3$ 의 경우 세 번째 전송에 성공한 M_e 가 추가되어 지연은 증가하게 된다. 숨은 노드 영향은 다음 실험에서 확인한다.

4.2 숨은 노드의 부하에 따른 영향

M_e 지연이 이웃 M_b 로부터 받는 영향은 매우 제한적이지만 숨은 노드에서 발생한 M_b 의 영향은 무시할 수 없다. 이번 실험에서는 숨은 노드가 M_e 지연에 미치는 영향을 관측하였다. 실험은 M_b 부하를 고정 ($N=20$)하고 숨은 노드 부하를 변화시키면서 식(7)로 주어지는 M_e 지연을 산출하였다. 그림 5에 산출 결과와 더불어 시뮬레이션 결과도 오류 바 형태로 같이 보였다. 숨은 노드는 반복 전송 각각에 독립적인 영향을 미친다. 전송횟수(D)를 늘리는 것은 성공적으로 전달되는 확률을 높이는 반면 반복으로 인한 지연 증가도 동반한다. 그림 5에서, 숨은 노드 문제가 M_e 의 전달성공률에는 큰 영향을 미치는데 비해 M_e 의 지연 성능에는 그 영향이 제한적인 것이 확인된다. 이는 지연 측정이 전송에 성공한 M_e 만 반영하기 때문이다. 숨은 노드 부하가 증가할수록, 또는 D 값이 클수록 재전송으로 성공한 M_e 비중이 증가하므로 지연이 증가한다.

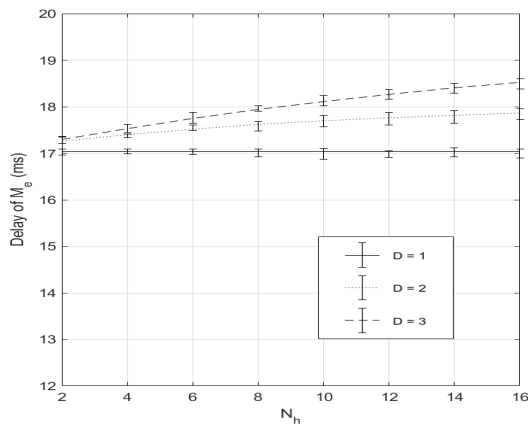


그림 5. 숨은 노드와 M_e 지연
Fig. 5. Hidden nodes and M_e delay

4.3 M_e 의 생성시점에 따른 영향

채널스위칭 동작으로 인해 M_e 의 생성시점은 M_e 의 지연 성능에 중요한 영향을 미친다. 생성시점이 CCH 종료시점에 가까울수록 M_e 의 전송은 다음 CCH 구간으로 늦추어질 수 있다. 이번 실험에서는 M_e 생성시점과 지연과의 관계를 살펴본다. 그림 6에서 수평축은 CCH 구간 잔여시간을 나타내며, 수직축은 각 잔여시간 시점에 발생한 M_e 의 지연 값으로 식(6)을 활용하여 $d_{0,0}^{CCH_{rem},0}$ 값을 CCH_{rem} 를 변화시키면서 도시한 것이다. $T_{CCH} = T_{SCH} = 50ms$, $N=20$, $N_h=10$, $D \leq 4$ 로 두었고, 각 D 값에 대해 M_e 의 전송성공률(P_s)도 표기하였다. M_e 생성구간이 CCH 종료시점에 근접할수록 지연이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. SCH 구간 동안의 대기가 이 지연의 주요 요인이다. Alternating 스위칭 방식에서 M_e 지연은 자신의 생성시점으로부터 큰 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. T_{SCH} 의 영향은 다음 실험에서 살펴본다.

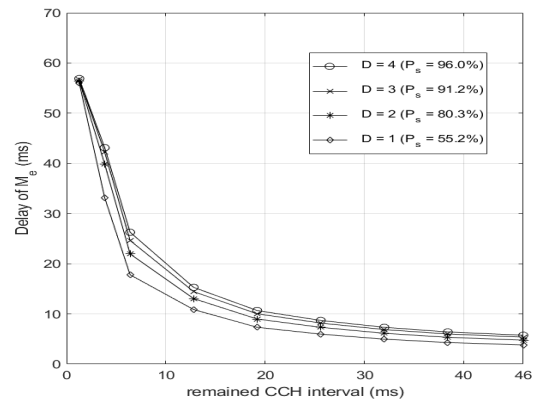


그림 6. M_e 지연과 발생 구간
Fig. 6. M_e delay and generated area

4.4 CCH와 SCH 구간의 비율에 따른 영향

이번 실험에서는 $r = T_{CCH} / T_{SCH}$ 의 조정이 M_e 지연에 미치는 영향을 관측한다. IEEE 1609.4 표준의 alternating 방식은 $r = 0.5$ 와 같다. 그림 7은 다양한 r 설정에 대해 식(7)으로 표현된 M_e 지연을 보인다. $N=20$, $N_h=10$ 로 두었다. T_{CCH} 가 작아질수록 지연은 크게 증가한다. 이 실험은 $r = T_{CCH} / T_{SCH}$ 이 변하여도 $100ms$ 인 T_{SCH} 를 주기로 CCH 접속이 반복되는 경우이다. 반면, immediate 방식에서는 SCH 채널 접속 이후 CCH 채널로 복귀하기까지의 간격은 규정되

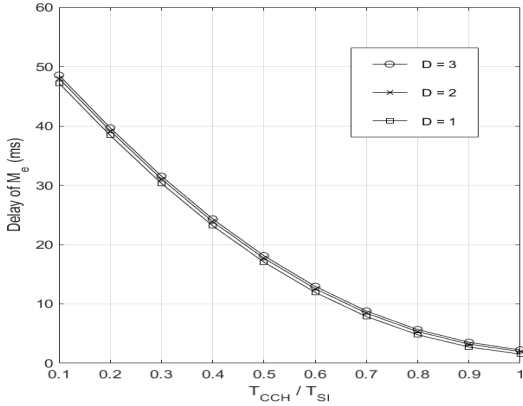


그림 7. $r(= T_{CCH}/T_{SI})$ 대비 M_e 지연
 Fig. 7. M_e delay for variation of $r(= T_{CCH}/T_{SI})$

지 않았었다. M_e 메시지의 요구지연 한계를 고려할 때 SCH 구간에서도 전송이 가능해지는 등 M_e 전송제한에 대한 보완이 필요해 보인다.

V. 결론

본 논문은, M_b 와 M_e 가 공존하는 환경에서 IEEE 1609.4의 채널스위칭을 반영하여 M_e 지연 성능 모델을 도출하였다. 본 논문에서 제안한 M_e 지연 모델링은 트래픽 상호간 의존성을 반영하는데 초점을 두었다. 제안된 모델을 활용하여 다양한 시스템 변수들과 M_e 지연 성능과의 관련을 분석하였다. 이러한 분석 결과는 도로상에서 신속한 대응이 가능한 최적화된 시스템 구성 방안을 찾는 데 활용될 수 있다. Alternating 스위칭 방식 이외에 긴급메시지 전송에 관한 제한이 완화되는 다양한 방안 도출과 이에 수반되는 성능 분석이 후속 연구 주제이다.

References

[1] IEEE 802.11 WG, "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.
 [2] B. Kim, H. Yoon, J. Yi, S. Park, and S. Choi, "Comparison of 3GPP LTE-based V2V communication and IEEE 802.11p communication in urban environments," in *Proc. KICS*

Conf., pp. 151-151, Korea, Jan. 2018.
 [3] IEEE Std 1609.4-2016, "IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environment (WAVE) - Multi-Channel Operation," 2016.
 [4] T. L. Willke, P. Tientrakool, and N. F. Maxemchuk, "A survey of inter-vehicle communication protocols and their applications," *IEEE Commun. Surv. and Tuts.*, vol. 11, no. 2, pp. 3-20, 2009.
 [5] D. Jeong, "Performance analysis of distributed broadcasting in IEEE 802.11p MAC protocol," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E-98B, no. 6, pp. 1086-1094, Jun. 2015.
 [6] C. Campolo, A. Molinaro, A. Vinel, and Y. Zhang, "Modeling event-driven safety messages delivery in IEEE 802.11p/WAVE vehicular networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 17, no. 12, pp. 2392-2395, Dec. 2013.
 [7] C. Campolo, A. Vinel, A. Molinaro, and Y. Koucheryavy, "Modeling broadcasting in IEEE 802.11p/WAVE vehicular networks," *IEEE Commu. Lett.*, vol. 15, no. 2, pp. 199-210, Feb. 2011.
 [8] A. J. Ghandour, M. Di Felice, H. Artail, and L. Bononi, "Dissemination of safety messages in IEEE 802.11p/WAVE vehicular networks: Analytical study and protocol enhancements," *Pervasive and Mob. Comput.*, vol. 11, Feb. 2013.
 [9] Y. Kim, Y. Bae, D. Eom, and B. Choi, "Performance analysis of a MAC protocol consisting of EDCA on the CCH and a reservation on the SCHs for the IEEE 802.11p/1609.4 WAVE," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 66, no. 6, pp. 5160-5175, Jun. 2017.
 [10] G. Karagiannis, et al., "Vehicular networking: A survey and tutorial on requirements, architectures, challenges, standards and solutions," in *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 13, no. 4, 4-th Quarter 2011.
 [11] M. I. Hassan, H. L. Vu, and T. Sakurai, "Performance analysis of the IEEE 802.11 MAC protocol for DSRC safety applications," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 60, no. 8, pp. 3882-3896, Oct. 2011.

정 대 인 (Daein Jeong)



1984년 2월 : 서울대학교 제어
계측공학과 졸업

1986년 2월 : 서울대학교 대학
원 제어계측공학과 석사

1997년 8월 : Polytechnic Uni-
versity (현 NYU Tandon
School of Eng.) 전기공학
박사

1987년 5월~1999년 8월 : 한국통신 선임연구원

2000년 9월~현재 : 한국외국어대학교 공과대학 컴퓨
터·전자시스템공학부 교수

<관심분야> 네트워크 트래픽 제어, WAVE 차량 네
트워크, 지능형 교통망