

FlexRay 프로토콜의 동적 구간에서의 잔여 미니 슬롯 확률 분포 분석

김봉준*, 박기진**

*아주대학교 산업공학과

**아주대학교 산업정보시스템공학부

e-mail : bongjun@ajou.ac.kr, kiejin@ajou.ac.kr

Analysis of Empty Minislot Distribution in the FlexRay Dynamic Segment

Bongjun Kim *, Kiejin Park **

*Dept. of Industrial Engineering, Graduate School of Ajou University

**Division of Industrial and Information Systems Engineering, Ajou University

요 약

차량 내부 네트워크(In-Vehicle Network)에 많은 관심이 고조되는 가운데 Time-Triggered 와 Event-Triggered 패러다임의 장점을 모두 갖춘 하이브리드(Hybrid) 프로토콜인 FlexRay 가 최근 들어 많은 자동차 분야 업체들로부터 주목 받으면서 이에 대한 다양한 성능 분석 시도가 이루어지고 있다. 하지만 FlexRay 프로토콜의 메시지 전송의 유연성(Flexibility)으로 인해 정확한 성능 분석에 많은 어려움이 있다. 이에 본 논문에서는 다양한 길이의 메시지를 고려한 동적 구간 분석 모델을 제안하였고, 이를 바탕으로 잔여 미니 슬롯 확률 분포(Empty Minislot Distribution)를 도출하였으며 FlexRay 메시지 셋(Set)을 이용한 실험을 통하여 특정 길이의 동적 구간에서 미니 슬롯 개수에 따른 잔여 미니 슬롯 발생확률 값의 변화를 확인하였다.

1. 서론

최근 들어, 차량의 전자화로 인해 자동차 내에서 사용되는 센서 및 전자 제어기(Electronic Control Unit, ECU)의 수가 증가하고 있고, 그에 따라 Controller Area Network (CAN), Local Interconnect Network (LIN), Time-Triggered Protocol/Class C (TTP/C), FlexRay 등과 같은 다양한 차량 내부 네트워크(In-Vehicle Network)용 통신 프로토콜(Protocol)의 개발 및 응용이 활발하다 [1,2].

통신 프로토콜은 크게 두 패러다임(Paradigm)으로 구분할 수 있다. 특정 사건(Event)이 발생할 때에 메시지가 전송되는 방식을 Event-Triggered 프로토콜이라고 하고, 반면에 미리 계획된 시간 구간에서 메시지가 전송되는 방식을 Time-Triggered 프로토콜이라 한다 [3].

최근에는 Time-Triggered 와 Event-Triggered 패러다임의 장점들을 결합한 하이브리드(Hybrid) 프로토콜이 주목 받고 있으며, 그 예로 Time-Triggered CAN (TTCAN), Flexible Time-Triggered CAN (FTT-CAN), FlexRay 프로토콜 등이 있다. 특히 FlexRay 는 두 패러다임의 장점을 모두 제공할 뿐만 아니라, 현재 차량 내 프로토콜로 가장 널리 쓰이는 CAN 보다 10 배가 높은 10Mbit/s 의 대역폭(Bandwidth)을 갖고, 듀얼 채널 통신이 가능함으로 인해 현재 많은 자동차 분야 업체들이 사용하는 de-facto 표준으로 자리잡아 가고

있다. 하지만 FlexRay 가 성공적으로 차량 내에 쓰이기 위해서는 FlexRay 의 성능 및 시간 분석을 위한 연구가 필수적이다[4].

FlexRay 의 통신 성능을 분석함에 있어서 어려운 점은 동적 구간(Dynamic Segment)에서의 유연성으로 인해 프레임의 전송 행태를 예측하기 힘들다는 것이다. 현재는 시뮬레이션 기법을 활용하여 성능평가를 수행하는 경우가 많지만 시뮬레이션 기법을 이용하여 신뢰성 있는 결과를 도출해 내기 위해서는 상당히 많은 시간이 소모되기 때문에 분석적인(Analytical) 접근 방식에 의한 모델 기반 성능평가가 요구되고 있다.

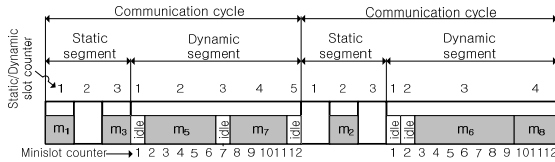
FlexRay 프로토콜의 동적 구간을 마코브 체인(Markov Chain, MC)으로 모델링한 후 그것을 이용해 다양한 성능평가 지표(Performance Metric)를 제안하는 연구가 선행되었지만, 동적 구간에서 프레임의 우선 순위(Priority)를 의미하는 Frame Identifier (이하: Frame ID)가 동일한 프레임일지라도 하나의 Frame ID 를 할당 받은 노드 안에 다양한 길이의 메시지들이 존재할 수 있고 이로 인해 통신 사이클마다 해당 동적 구간에 전송되는 프레임의 길이가 다양하게 변하는 경우를 고려하지 않았다[5]. 이에 본 저자는 [6]에서 다양한 길이의 프레임을 고려한 새로운 MC 모델을 제안한 후, 이를 바탕으로 동적 구간에서 메시지들이 전송 예정된 통신 사이클에 전송되지 못하고 다음 사이클로 지연될 확률인 프레임 지연 확률을 분석하였다.

본 논문에서는 [6]에서 제안한 새로운 MC 모델을 바탕으로 동적 구간에서 각 노드에 할당된 시간 구간이 모두 사용된 후 현재의 동적 구간이 끝날 때까지 일정 개수의 미니 슬롯이 남을 확률인 잔여 미니 슬롯(Empty Minislot, EM) 확률을 도출하고, 미니 슬롯 개수 별 EM 확률을 확인할 수 있는 EM 분포(Empty Minislot Distribution, EMD)을 도출하였다.

본 논문의 2 장에서는 FlexRay 의 통신 사이클에 대해 설명하였고, 3 장에서는 FlexRay 의 동적 구간을 MC 을 이용하여 모델링 한 후, EM 확률을 제안하였으며, 4 장에서는 제안된 모델을 평가 및 분석한 후, 5 장에서 결론을 내렸다.

2. FlexRay 통신 사이클

FlexRay 의 통신 사이클은 일정한 주기로 반복되고, 하나의 사이클은 크게 4 개의 구간으로 나뉜다. 그림 1 은 4 개의 구간 중 실제 의미 있는 데이터 프레임이 전송되고 프로토콜 성능에 직접적인 영향을 주는 정적 구간(Static Segment), 동적 구간만을 표현한 통신 사이클을 나타낸다.



(그림 1) FlexRay 프로토콜의 통신 사이클

FlexRay 의 정적 구간과 동적 구간의 길이는 각각 다르고 매 사이클마다 길이가 고정되어 있으며 두 구간 모두 다수의 시간 구간(Time Slot)으로 구성되어 있다. Time Division Multiple Access(TDMA) 방식인 정적 구간에서의 시간구간은 정적 슬롯(Static Slot)이라고 하며 그 개수가 고정되어 있고, 전송되는 메시지들의 길이에 관계 없이 모두 길이가 동일하기 때문에 메시지의 응답시간이 결정적인 특징을 갖는다. 반면 Flexible TDMA(FTDMA) 방식을 취하는 동적 구간에서의 시간 구간은 동적 슬롯(Dynamic Slot)이라고 하며 정적 슬롯과는 다르게 그 길이가 전송되는 메시지의 길이에 따라 달라지기 때문에 유연한 통신 방식을 제공한다[7]. 또한, 동적 슬롯은 아주 작은 길이의 시간 구간 개념인 미니 슬롯(Minislot)으로 이루어지며, 미니 슬롯의 개수로 동적 구간의 길이를 표현할 수 있고, 동적 구간 전체의 미니 슬롯 개수는 FlexRay 의 전역 파라미터(Global Parameter)인 $gNumberOfMinislots$ 의 값과 일치한다[8].

FlexRay 의 동적 슬롯은 그 길이가 유연하기 때문에, 메시지의 길이에 따라서 메시지를 전송하려는 시점부터 현재의 통신 사이클이 끝날 때까지 가용할 수 있는 잔여 미니 슬롯의 개수가 부족할 경우, 현재의 통신 사이클에 해당 메시지가 전송되지 못하는 상황

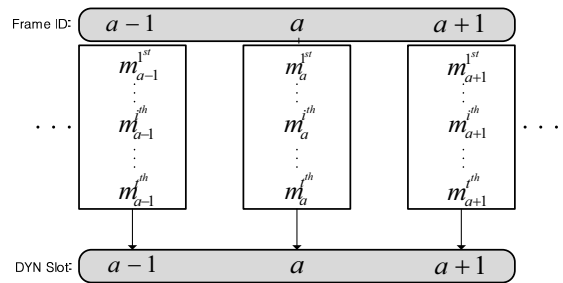
이 발생한다. 이는 FlexRay 의 각 노드에서 설정 가능한 $pLatestTx$ 라는 FlexRay 파라미터 값에 의해 결정된다.

3. 잔여 미니 슬롯 확률 분포 (Empty Minislot Distribution)

이번 장에서는 동적 구간의 MC 모델링을 위한 기본적인 설정들을 간략히 설명한 후, 다양한 프레임 길이를 고려한 MC 모델을 제안하고, 성능평가 지표로써 잔여 미니 슬롯 확률 분포를 도출하였다.

3.1 시스템 모델

FlexRay 의 동적 구간을 MC 를 이용하여 모델링 하기 위해 그림 2 와 같이 동적 구간에서 Frame ID 가 할당된 메시지 버퍼에 다양한 길이의 메시지들이 적재되어 있는 시스템 모델을 가정하였다.



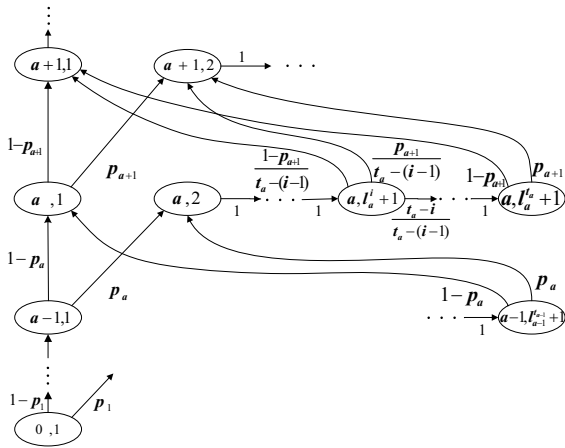
(그림 2) 동적 구간의 시스템 모델

Frame ID a 를 할당 받은 노드의 메시지 버퍼에 각기 다른 길이의 메시지가 총 t_a 개($m_a^{1st} \sim m_a^{t_a}$) 있다고 할 때, t_a 개의 메시지를 프레임 길이 순서대로 정렬해서 그 중 프레임 길이가 가장 짧은 메시지는 m_a^{1st} 이며 그 길이는 l_a^1 으로 표시하고, 프레임 길이가 i 번째인 메시지 $m_a^{i^{th}}$ 의 길이는 l_a^i 이며, t_a 번째 즉, 가장 긴 프레임의 길이는 $l_a^{t_a}$ 로 표시한다.

실제 FlexRay 의 동적 구간에서는 하나의 동적 슬롯에는 한번에 하나의 메시지만 전송될 수 있기 때문에 본 모델에서는 동적 슬롯 a 에 전송 예정된 t_a 개의 메시지 중에서 i 번째 메시지 하나가 임의의 통신 사이클 안에서 전송될 확률이 t_a 개의 메시지 모두에 대해 동일하다고 가정하였다.

본 논문의 FlexRay MC 모델은 기본적으로 이산 사건(Discrete Event)에 대한 Transient 분석을 기초로 하며, 그 목적은 동적 구간에서 개별 시간 구간들의 상태확률(State Probability)을 도출하는 것이다[9]. 본 MC 모델에서의 상태확률 $\pi(k)$ 는 동적 구간이 시작된 후 k 번째 미니 슬롯의 상태확률을 의미한다.

그림 3 은 다양한 길이의 메시지를 고려한 MC 모델의 구조를 나타내고 있다. 메시지 프레임의 길이는 미니 슬롯 단위로 표현되며 각 상태는 기본적으로 두 가지 요소를 갖는 (a, b) 로 표시한다. a 는 동적 슬롯의 번호를 의미하고 그 값은 0 부터 시작하며 해당 시스템의 동적 구간을 이루는 미니 슬롯의 전체 개수(즉, $gNumberOfMinislots$) 만큼의 값까지 표현 가능하다. b 는 해당 동적 슬롯의 상태를 나타내며, $b=1$ 일 경우 유ힴ(Idle)상태를 나타내고 $b>1$ 이면 전송(Transmission)상태를 나타낸다. 예를 들어 $(2,1)$ 은 동적 슬롯 2 가 유ힴ상태라는 의미이며, $(3,2)$ 는 동적 슬롯 3 이 전송상태에 있다는 것을 의미한다.



(그림 3) 다양한 길이의 메시지를 고려한 MC 모델

MC 에서는 하나의 상태에서 다른 상태로 변할 때 일정한 확률로 변하며 이를 전이확률(Transition Probability)이라 한다[10]. 본 MC 모델에서는 전이확률을 p_a 라고 표시하고 동적 슬롯 a 에 프레임이 전송되기 위한 Frame ID 를 갖는 메시지의 도착 확률(Arrival Probability)로 정의 하였다. 즉, 동적 구간 a 에 해당 메시지가 도착할 확률은 p_a 이며, 그 반대로 메시지가 전송되지 않아서 빈 미니 슬롯 하나만 소비될 확률(즉, 유ힴ상태 확률)은 $1-p_a$ 이다. 또한 동적 슬롯 a 에 다양한 길이의 메시지가 전송될 수 있는 경우에 프레임 길이가 i 번째인 메시지가 전송된 후, 그 다음으로 동적 슬롯 $a+1$ 이 전송상태(T)가 될 확률과 유ힴ상태(I)가 될 확률은 각각 식(1), (2)와 같이 정의 하였다.

$$P_1(DYN Slot a+1: I | m_a^{i^{th}} : T) = \frac{1-p_{a+1}}{t_a - (i-1)} \quad (1)$$

$$P_2(DYN Slot a+1: T | m_a^{i^{th}} : T) = \frac{p_{a+1}}{t_a - (i-1)} \quad (2)$$

또한, 동적 슬롯 a 에 i 번째 메시지보다 더 긴 메시지가 전송될 경우 상태 $(a, l_a^i + 1)$ 에서 그 다음 $(a, l_a^i + 2)$ 상태로 가는 전이확률은 다음과 같이 정의 하였다.

$$P_3(State(a, l_a^i + 2) | State(a, l_a^i + 2)) = \frac{t_a - i}{t_a - (i-1)} \quad (3)$$

3.2 잔여 미니 슬롯 확률 분포

본 논문에서의 EM 은 현재의 동적 구간에서 각 노드에 할당된 동적 슬롯 이후부터 동적 구간이 끝날 때까지 남은, 어떠한 노드에도 할당되지 않은 미니 슬롯을 의미한다. EM 의 수는 최소 0 부터 최대 동적 구간의 길이(즉, $gNumberOfMinislots$)까지 가능하며, 반대로 EM 의 개수로 현재의 동적 구간에서 얼마나 많은 미니 슬롯이 노드에 의해 사용되었는지를 파악할 수 있으며, 결국 동적 구간의 이용률(Utilization) 분석에 도움이 된다.

현재의 동적 구간에서 m 개의 미니 슬롯이 사용되지 않고 남은 확률은 $P_{EM}(m)$ 으로 표시하며, 이는 $k = gNumberOfMinislots$ 일 때, 즉 통신 사이클이 끝날 때의 상태확률 $\pi(k)$ 를 이용하여 계산할 수 있으며 그 식은 (4)과 같다.

$$P_{EM}(m) = \pi(k)_{r+m,1} + \sum_{b=m}^{r+m-1} \pi(k)_{r+m-b, b+2} \cdot I(b < l_{r+m-b}^{r+m-b} - 1) \quad (4)$$

여기에서 r 은 동적 슬롯의 전체 개수를 나타내고, 함수 I 는 입력 값이 참이면 1 을 출력하며, 거짓이면 0 을 출력한다. 본 논문에서 제안한 MC 모델은 2 장에서 설명된 FlexRay 의 동적 구간에서의 특징 중에 하나인 $pLatestTx$ 값에 의한 동적 메시지 전송을 완전히 반영하지 못하기 때문에 식 (4)에서 MC 모델이 갖는 오류를 보정하고, 실제 FlexRay 의 통신을 보다 정확히 반영하였다.

결국, 계산된 EM 확률 $P_{EM}(m)$ 을 활용하여 현재 동적 구간에서 남은, 가용할 수 있는 잔여 미니 슬롯이 발생할 확률의 분포를 미니 슬롯 개수 별로 표현한 EMD 를 도출할 수 있다.

4. 모델 평가

본 논문에서 제안한 MC 모델을 바탕으로 EM 의 개수 별 발생 확률 값을 도출하기 위해 표 1 과 같이 동적 구간에 전송되는 다양한 길이를 갖는 10 개 ($m_1 \sim m_{10}$)의 메시지를 발생시켰다.

<표 1> 모델 평가를 위한 동적 구간에서의 메시지 셋

Message	Frame ID	Frame Length(minislots)
m_1	1	4
m_2	2	7
m_3	3	5
m_4	4	3
m_5	5	3
m_6	5	5
m_7	5	6
m_8	6	5
m_9	6	8
m_{10}	7	2

표 1에서 Frame ID 5와 6을 다양한 길이의 메시지들이 공유하고 있음을 확인할 수 있고, 이로 인해 동적 슬롯 5와 6은 매 사이클마다 그 길이가 다양하게 변할 수 있다. 또한, EMD를 도출하기 위해 MC 모델을 이용하여 상태 확률을 계산할 시, 모든 메시지들의 도착확률을 0.5로 동일하게 설정하였으며, 실제 FlexRay 시스템에서는 메시지를 생성하는 태스크(Task)의 실제 발생 빈도에 따라 각 메시지별 도착확률을 본 모델에 적용시킴으로써 더욱 정확한 상태 확률을 도출할 수 있다.

표 1의 메시지를 이용하여 길이가 21 미니 슬롯인 동적 구간(즉, $gNumberOfMinislots$)에서의 잔여 미니 슬롯이 발생할 확률을 미니 슬롯 개수 별로 나타낸 EMD를 도출하였다(그림 4 참조).

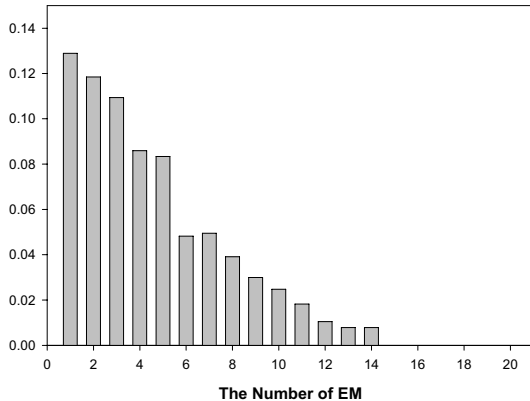
PEM ($gNumberOfMinislots = 21$)(그림 4) EM 분포 ($gNumberOfMinislots = 21$)

그림 4에서 잔여 미니 슬롯의 개수별 발생 확률을 파악할 수 있으며, 그 개수가 많아 질수록 확률값이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 FlexRay의 메시지들의 동적 구간 이용률 분석에 도움을 줄 수 있고, 결국 FlexRay 시스템 설계 시 동적 구간에 전송되는 프레임의 개수 및 길이, 동적 구간의 크기 등을 결정하기 위한 척도로 쓰일 수 있다.

5. 결론 및 후속연구

본 논문에서는 FlexRay 프로토콜의 동적 구간의 동일한 Frame ID를 공유하는 다양한 길이의 메시지를 반영한 분석 모델을 제안하였으며, 현재의 동적 구간 내에서 어떠한 노드로부터 사용되지 않은, 잔여 미니 슬롯이 발생할 확률에 대한 미니 슬롯 개수별 확률 분포인 EMD를 도출하였다. 제안된 모델의 평가를 위해 가정된 메시지 셋을 이용하여 특정 길이의 동적 구간에서의 개수별 EM 발생 확률을 확인하였고, 이는 FlexRay의 동적 구간에 전송되는 프레임의 개수 및 길이, 동적 구간의 크기 등을 결정하는데 도움을 줄 수 있다는 것을 확인하였다.

향후에는 본 논문에서 제안한 MC 모델을 이용하여 FlexRay 프로토콜의 성능평가를 위한 다양한 성능평가 지표에 대한 연구를 수행할 예정이다.

지원기관

본 연구는 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-331-D00438)

참고문헌

- [1] A. Albert, "Comparison of Event-Triggered and Time-Triggered Concepts with Regard to Distributed Control Systems," *Embedded World 2004*, pp. 235-252, Feb. 2004.
- [2] G. Cena and A. Valenzano, and S. Vitturi, "Advances in automotive digital communications," *Computer Standards & Interfaces*, Vol. 27, Issue 6, pp. 665-678, June 2005.
- [3] A. Hagiescu, U. Bordoloi, S. Chakraborty, P. Sampath, P. Ganesan, and S. Ramesh, "Performance Analysis of FlexRay-based ECU Networks," *Design Automation Conference*, pp. 284-289, June 2007.
- [4] N. Navet, Y. Song, F. Simonot-Lion, and C. Wilwert, "Trends in Automotive Communication Systems," *Proceeding of the IEEE*, Vol. 93, Issue 6, pp. 1204-1223, June 2005.
- [5] J. Nielsen, A. Handan, and H. Schwefel, "Markov Chain-based Performance Evaluation of FlexRay Dynamic Segment," *6th International Workshop on Real Time Networks*, July 2007.
- [6] B. Kim and K. Park, "Analysis of Frame Delay Probability in the FlexRay Dynamic Segment," *The 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, pp. 1519-1522, July 2008.
- [7] G. Cena and A. Valenzano, "On the Properties of the Flexible Time Division Multiple Access Technique," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 2, Issue 2, pp. 86-94, May 2006.
- [8] F. Consortium. FlexRay Communication Systems Protocol Specification Version 2.1 Revision A, FlexRay Consortium, Dec. 2005.
- [9] C. Cassandras and S. Lafortune, *Introduction to Discrete Event Systems*, Kluwer Academic Boston, 1999.
- [10] G. Bolch, S. Greiner, H. Meer, and K. Trivedi, *Queueing Networks and Markov Chains*, John Wiley & Sons Inc, Apr. 2006.