

블루투스 시스템을 위한 효율적인 QoS 기반 MAC 스케줄링 기법

정희원 주 양 익*, 오 종 수*, 권 오 석*, 김 용 석*, 이 태 진**, 엄 두 섭*, 차 균 현*

An Efficient and QoS-aware MAC Scheduling Algorithm for Bluetooth System

Yang-Ick Joo*, Jong Soo Oh*, Oh-Seok Kwon*, Yongsuk Kim*, Tae-Jin Lee**,
Doo Seop Eom* and Kyun Hyon Tchah* *Regular Members*

Doo Seop Eom* and Kyun Hyon Tchah* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 블루투스 시스템에서 각 마스터-슬레이브 쌍(Master-Slave pair)에 대한 스케줄링(scheduling) 결정에 있어서 수율(throughput)과 지연(delay), 즉 형평성(fairness) 측면 모두를 고려한 효율적인 QoS (Quality of Service) 기반 MAC 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 블루투스가 마스터 중심의 TDD (Time Division Duplex) 방식으로 동작하며 기본적으로 라운드로빈(Round Robin) 방식의 스케줄링을 수행하므로 전송할 큐(queue)에 데이터가 없는 경우에도 POLL 및 NULL 패킷(packet)으로 인한 슬롯 낭비가 발생한다. 이러한 링크 낭비 문제를 해결하기 위해 많은 알고리즘들이 제안되어 왔고, 그 중 큐 상태 기반 우선순위(priority) 방식과 저전력 모드(low power mode) 기반의 알고리즘이 비교적 높은 수율과 형평성을 보인다. 하지만 이들은 트래픽 특성에 따라 일정하지 않은 성능을 나타내며, 추가적인 계산과정과 시그널링(signaling) 오버헤드(overhead)가 요구된다. 따라서 본 논문에서는 높은 수율과 형평성을 보장하는 새로운 간단한 우선순위 기반의 알고리즘을 제안한다. 제안된 방식의 성능은 수율과 형평성 측면에서 평가되었고, 시뮬레이션 결과 적절한 파라미터(parameter) 선택에 의해 전반적인 성능의 향상을 가져올 수 있다. 각 마스터-슬레이브 쌍의 QoS 파라미터를 제안된 알고리즘의 파라미터에 적절히 매핑(mapping)함으로써 스케줄링 효율을 최적화할 수 있고, 본 논문의 결과는 QoS 기반의 블루투스 스케줄링 방식의 설계에 활용될 수 있다.

ABSTRACT

In this paper, we propose an efficient and QoS-aware MAC scheduling algorithm for Bluetooth, which considers both throughput and delay performance on each Master-Slave pair in scheduling decisions, and thus, attempts to maximize overall performance. Since Bluetooth employs a master-driven TDD based scheduling algorithm, which is basically operated with the Round Robin policy, many slots may be wasted by POLL or NULL packets when there is no data waiting for transmission in queues. To overcome this link wastage problem, several algorithms have been proposed. Among them, queue state-based priority policy and low power mode-based algorithm can perform with high throughput and reasonable fairness. However, their performances may depend on traffic characteristics, i.e., static or dynamic, and they require additional computational and signaling overheads. Therefore, we propose a new simple priority based scheduling algorithm guaranteeing high throughput and fairness. Performance of our proposed algorithm is evaluated with respect to throughput and fairness. Simulation results show that overall performance can be improved by selecting suitable parameters. The algorithm can optimize scheduling efficiency by appropriately mapping QoS parameters of each Master-Slave pairs to the parameters proposed in our algorithm. Our results can serve as a guideline to the design of QoS-aware MAC scheduling policy in Bluetooth.

* 고려대학교 전자공학과 (yiju@korea.ac.kr)

** 성균관대학교 정보통신공학부

논문번호: 020187-0418, 접수일자: 2002년 4월 18일

I. 서론

무선 통신 기술의 발전은 통신 영역의 지역적 확장과 더불어 각 사용자에게 주어지는 서비스의 확장을 가져오게 되었다. 이러한 무선 통신 기기들에 대한 수요 및 사용의 증가는 독립적으로 통신하는 다양한 무선 통신 기기들간의 효율적인 연결을 요구하게 되었고, 이로 인해 블루투스(Bluetooth)와 같은 무선 개인 통신망(WPAN: Wireless Personal Network) 기술은 다양한 분야에서 큰 관심의 대상이 되고 있으며, 노트북, PDA, 이동전화, 헤드셋(headset) 등 다양한 이종 기기들간의 유기적인 연결을 제공할 것으로 기대되고 있다.

저가의 저전력 개인 휴대통신 환경에서의 무선통신을 위해 제안된 블루투스는 TDD (Time Division Duplex) 기반의 시스템이며 마스터(Master)-슬레이브(Slave) 구조를 갖는다. 슬레이브는 반드시 마스터가 전송한 직후의 슬롯(slot)에서만 전송이 가능하며, 마스터는 짝수번째 슬롯, 슬레이브는 홀수번째 슬롯을 사용하도록 할당되므로 블루투스 시스템의 MAC 스케줄링(scheduling)은 마스터-슬레이브 쌍(master-slave pair)을 단위로 이루어진다.

마스터 중심의 스케줄링이 이루어지므로 블루투스 시스템의 성능을 개선하기 위해서는 마스터가 슬레이브의 상태를 적절히 고려하여 스케줄링하여야 한다. 하지만 기본적인 라운드로빈(Round Robin) 스케줄링 방식만을 고려하는 경우 많은 슬롯의 낭비가 예상되므로 블루투스 시스템의 성능을 향상시키기 위한 효과적인 스케줄링 방안이 연구되어야 한다.

최근 들어 블루투스를 위한 효율적인 스케줄링 방안이 많이 제안되고 있다. [2], [3]에서는 마스터와 슬레이브의 큐(queue) 상태를 기반으로 한 스케줄링 방식이 제안되었는데 각 마스터-슬레이브 쌍의 링크 사용정도에 따라 클래스를 나누고 이에 대해 적절한 우선순위(priority)를 주어 스케줄링하며 서비스가 특정 마스터-슬레이브 쌍에 치우치지 않도록 형평성(fairness)을 유지하기 위해 서비스를 제공받는 기회의 차이를 일정한 값으로 제한하는 방식이다. 한편 [4], [5]에서는 블루투스의 저전력 모드를 이용하여 슬롯을 효율적으로 배분해주는 방식이 제안되었다. 하지만 일정 시간동안 특정 모드로 전환해서 그 모드를 유지하게 되므로, 데이터 트래픽 발생이 동적으로 변화하는 경우 지속적으로 좋은 성능을

보이기 어렵고, 모드 변환에 있어서의 시그널링의 오버헤드(overhead)가 매우 큰 단점이 있다. [2], [3]에 있어서도 우선순위의 결정이 링크 사용정도에 따라 즉 수율(throughput) 측면에서의 우선순위만이 고려되었고, 형평성을 보장하기 위한 다른 방안이 추가되어야 하며, 형평성을 보장하기 위한 한계값에 도달한 이후의 성능이 데이터 트래픽의 발생 빈도에 따라 일정하지 않은 성능을 보이므로 비효율적인 측면이 있다. 따라서 본 논문에서는 우선순위에 의한 스케줄링을 제공함에 있어서 우선순위를 결정할 때 수율측면 뿐 아니라 각 마스터-슬레이브 쌍의 지연(delay) 측면까지 고려한 우선순위 결정을 통해서 스케줄링의 효율성과 형평성을 동시에 보장할 것이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 블루투스 시스템의 MAC 스케줄링 방식을 검토해보고, 3장에서는 이에 대한 문제점을 극복하기 위한 제안된 알고리즘에 대해 설명될 것이다. 4장에서 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 제안한 알고리즘에 대한 성능분석이 수행되고, 끝으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. 블루투스 시스템의 MAC 스케줄링

블루투스에서의 MAC 스케줄링은 마스터를 중심으로 이루어진다. 그림 1과 같이 마스터는 슬레이브로의 데이터 전송을 짝수번째 슬롯에서 할 수 있으며, 이 슬롯 직후 슬레이브의 데이터 전송을 유도할 수 있다. 따라서 블루투스 시스템의 스케줄링 방식은 마스터-슬레이브 쌍을 단위로 이루어지게 되고 이로 인해 기본적으로 사용되는 라운드로빈 방식은 시스템 성능을 고려할 때 바람직하지 못한 방식이라 할 수 있다. 즉 마스터의 전송에 의해 슬레이브의 전송이 유도되는 블루투스의 특성은 서로 전송할 데이터가 없는 상황에서도 규칙적인 폴링(polling)과 응답을 위해 POLL-NULL 패킷(packet)이 교환되어야 하므로 슬롯의 낭비를 초래하게 되고 결과적으로 시스템 성능을 떨어뜨리게 된다. 그러므로 블루투스 시스템에서 라운드로빈 방식은 적합한 MAC 스케줄링 방식이라 할 수 없다.

따라서 블루투스와 같은 마스터 중심의 TDD 시스템에 대한 새로운 스케줄링 방식이 요구되며, 이 방식은 블루투스의 저가, 저전력이라는 특성을 유지할 수 있도록 간단해야 할 것이며, 할당된 슬롯이 최대한 효율적으로 사용될 수 있도록 하여야 할 것이다. 다음 장에서는 이와 같은 요구사항을 만족하

는 블루투스를 위한 새로운 MAC 스케줄링 알고리즘이 제안된다.

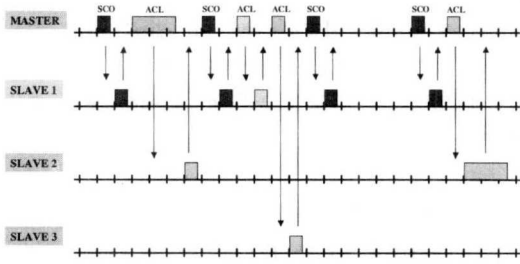


그림 1. 블루투스 시스템의 MAC 스케줄링 방식

III. T-D 우선순위 방식

T-D 우선순위 방식(Throughput-Delay Priority Policy)은 우선순위를 결정하는 방식에 있어 식(1)과 같은 수식을 기반으로 하여 수율 측면에서의 효과적인 스케줄링과 함께 보다 간단히 서비스의 형평성을 고려하여 지연 측면에서의 성능을 향상시킬 수 있다.

$$P = \alpha T + (1 - \alpha)D \tag{1}$$

여기서 T는 수율을 향상시키기 위해 마스터-슬레이브 쌍의 큐 상태를 기반으로 결정된 우선순위 값으로 [2], [3]에서와 마찬가지로 각 마스터-슬레이브 쌍의 큐 상태를 관찰하여 현재 할당된 슬롯에 대한 사용할 슬롯의 활용정도를 기준으로 하여 할당되며, D는 지연 측면을 고려하기 위해 반영된 파라미터(parameter)로, 각 마스터-슬레이브 쌍마다 카운터(counter)를 두어 서비스를 다른 마스터-슬레이브 쌍에 양보한 횟수를 계산한 값이며 양보를 받은 경우 그 값을 감소시킨다. α 는 수율과 지연에 대한 시스템 성능에 대한 가중치를 나타내는 파라미터로 이 값이 크면 수율 측면의 성능을 보다 고려하여 우선순위를 할당하게 되고, 이 값이 작으면 지연 및 형평성 측면의 성능을 보다 고려하여 우선순위를 할당하게 된다. 따라서 P는 각 어플리케이션마다의 특성에 적합한 α 를 적용하여 전체적인 성능의 향상을 도모할 수 있다. 예를 들어, 폴링 주기(polling interval)가 긴 경우 α 를 상대적으로 작은 값으로 설정하고, 짧은 경우에 상대적으로 큰 값으로 설정하여 폴링 주기에 대한 요구사항을 충족시킬 수 있다. 다시 말해서 폴링 주기 등과 같은 QoS 파라미터들을 제안된 알고리즘의 파라미터에 대응시킴으로

써 시스템 전반의 성능을 제어하는 것이 가능하다.

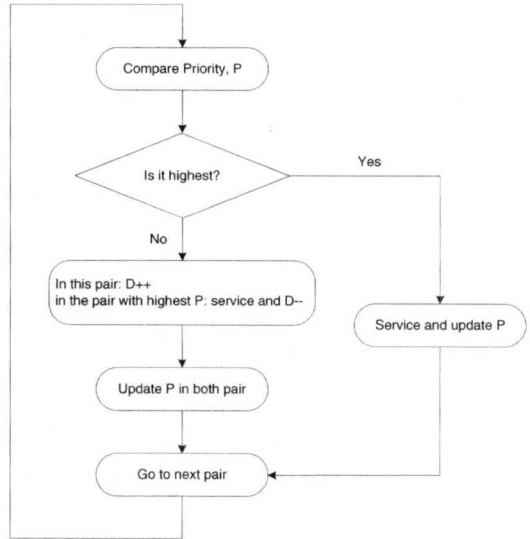


그림 2. T-D 우선순위 방식(Throughput-Delay Priority Policy)

T-D 우선순위 알고리즘을 그림 2에 나타내었으며, 이를 정리하면 다음과 같다. 각 마스터-슬레이브 쌍은 매 슬롯마다 한 쌍씩 라운드로빈 방식으로 관찰되며, 우선순위 P가 높은 마스터-슬레이브 쌍이 우선적으로 서비스된다. 우선순위가 낮으면 높은 우선순위를 갖는 마스터-슬레이브 쌍에게 서비스 기회를 양보하며 자신의 카운터 값을 증가시키고, 서비스 기회를 양보받은 마스터-슬레이브 쌍의 카운터는 감소된다. 그러므로 이를 통해 서비스 기회를 양보한 마스터-슬레이브 쌍의 우선순위를 상대적으로 높이고, 서비스 기회를 양보받은 마스터-슬레이브 쌍의 우선순위는 상대적으로 낮출 수 있으므로 결과적으로 서비스에 대한 형평성을 보장할 수 있는 방안이 될 수 있으며, 이러한 우선순위의 결정은 α 를 통해 조절이 가능하므로 QoS 요구사항을 충족시킬 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과

제안한 알고리즘에 있어서 다양한 T와 α 값에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 패킷 크기는 1, 3, 5 슬롯 크기의 패킷을 사용하였고, SCO 링크가 없는 환경에서 성능을 평가하였다. 5개의 마스터-슬레이브 쌍을 가정하였고, 각 마스터-슬레이브 쌍의 데이터 트래픽 발생 특성은 표 1과 같다. 표 1에서 마스터-슬레이브 쌍 1, 2, 3은 포아송 과정(Poisson

process, MP)을 통해 트래픽이 생성되며, 마스터-슬레이브 쌍 4, 5는 이진상태 MMPP (two-state Markov Modulated Poisson Process)에 의해 트래픽이 발생된다. 약 310,000 슬롯동안의 시뮬레이션을 통해 수율과 형평성 측면에서의 성능을 평가하였으며, 형평성은 평균적인 폴링(polling) 횟수보다는 실질적인 서비스 횟수를 통해 평가하기 위해 각 마스터-슬레이브 쌍들의 수율 간의 분산(variance)을 통해 측정하였다. 마스터-슬레이브 쌍의 큐 상태에 따라서 링크 사용 빈도에 대한 클래스를 구분하였고 이를 통해 적절한 T를 할당하였다. 예를 들어, 마스터-슬레이브 쌍의 큐에 모두 전송할 데이터가 있는 경우 100%의 링크 사용을 나타내므로 가장 높은 클래스를 할당하고, 마스터와 슬레이브 중 한쪽 큐에 5 슬롯 크기의 전송할 패킷이 있고, 나머지 한쪽 큐에는 보낼 데이터가 없는 경우 83%의 링크 사용을 나타내므로 두번째로 큰 클래스를 할당하며, 마스터와 슬레이브 모두 전송할 데이터가 없는 경우 가장 낮은 클래스를 할당한다. 1, 3, 5 슬롯 크기의 패킷을 가진 경우 이러한 방식으로 링크 사용 빈도에 따라 서로 다른 클래스를 각 마스터-슬레이브 쌍마다 할당하여 높은 클래스에 상대적으로 큰 T값을 대응시켰다. T는 두 가지 경우를 가정하였다. 첫째로 각 클래스마다의 가중치의 차이를 지수적으로 $T = 16t, 8t, 4t, 2t, 1$ 로 할당한 경우와, 두번째로 가중치의 차이를 선형적으로 차이를 둔 $T = 5t, 4t, 3t, 2t, 1$ 의 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 이 두 경우는 각 마스터-슬레이브 쌍의 데이터 트래픽 발생에 따른 클래스 변화가 우선순위에 미치는 영향이 서로 다르다. 즉, 지수적인 가중치 차를 준 경우는 각 마스터-슬레이브 쌍의 링크 사용 빈도가 변화함에 따라 우선순위의 변화가 상대적으로 크므로 큐 상태 변화에 우선순위 값이 빠르게 반응하지만 지연 측면의 파라미터가 우선순위 결정에 크게 반영되지 못하며, 선형적인 차이를 둔 경우는 이에 비해 큐 상태 변화에는 민감하게 반응하지 않지만 상대적으로 지연 측면의 파라미터에 대한 비중이 크다고 할 수 있으므로 지수적인 차이를 둔 T에 비해 상대적으로 높은 t와 α 값에서 최적의 성능을 보일 것을 예상할 수 있다.

그림 3 ~ 6에서 위의 두 경우에 대해서 다양한 t와 α 값에 대한 수율 및 분산에 대한 결과를 보여준다. 그림에서 보듯이 높은 T 값은 예상된 바와 같이 높은 수율과 낮은 형평성의 결과를 나타낸다. 하지만 α 값에 대해서는 높은 α 값에 대해서는

비교적 우수한 수율과 형평성을 보이지만 낮은 α 값에 대해서는 반드시 형평성이 우수하다고 결론지을 수는 없다. 세부적으로 살펴보면 가중치 차가 큰 경우에 있어서는 비교적 낮은 α 값에 대해 좋은 수율 및 형평성의 결과를 보였고, 가중치 차가 작은 경우에 있어서는 비교적 높은 α 값에서 보다 좋은 성능을 보였다.

표 1. 데이터 트래픽 발생 특성

	M1	S1	M2	S2	M3	S3
process	MP	MP	MP	MP	MP	MP
arrival rate	0.2	0.2	0.39	0.01	0.01	0.39

	M4	S4	M5	S5
process	MMPP	MMPP	MMPP	MMPP
arrival rate (transition rate)	0.39/0.01 (0.01)	0.39/0.01 (0.01)	0.39/0.01 (0.01)	0.39/0.01 (0.01)

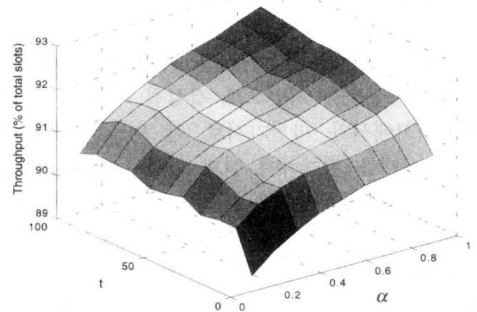


그림 3. 가중치 차가 큰 경우($T=16t, 8t, 4t, 2t, 1$)의 수율

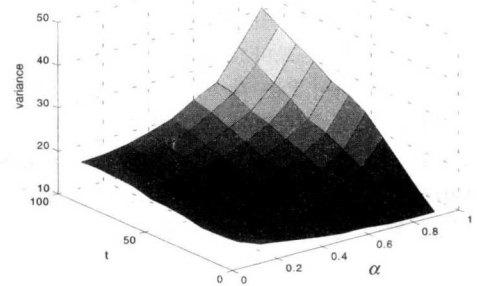


그림 4. 가중치 차가 큰 경우($T=16t, 8t, 4t, 2t, 1$)의 분산

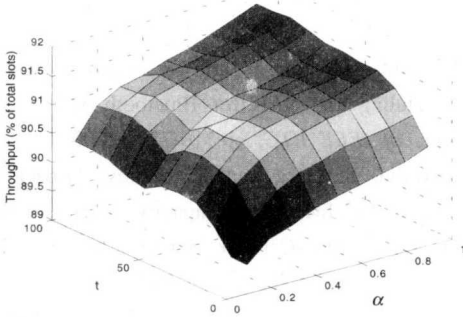


그림 5. 가중치 차가 작은 경우($T=5t$, $4t$, $3t$, $2t$, 1)의 수율

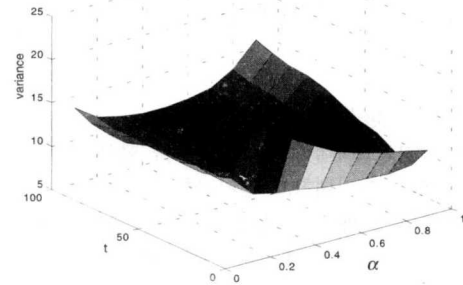


그림 6. 가중치 차가 작은 경우($T=5t$, $4t$, $3t$, $2t$, 1)의 분산

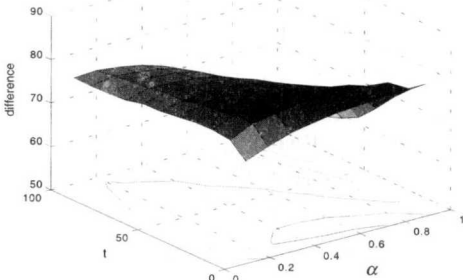


그림 7. 가중치 차가 큰 경우($T=16t$, $8t$, $4t$, $2t$, 1)의 수율과 분산의 차

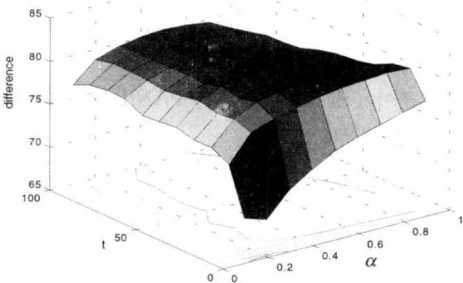


그림 8. 가중치 차가 작은 경우($T=5t$, $4t$, $3t$, $2t$, 1)의 수율과 분산의 차

따라서 적절한 α 및 t 의 선택을 통해 전반적인 블루투스 시스템의 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 생각되며, 본 논문에서의 시뮬레이션의 경우 가중치 차가 큰 경우에 있어서는 $\alpha = 0.6$, $t = 10$ 인 경우 가장 우수한 성능을 보였고, 가중치 차가 작은 경우에 있어서는 앞서 예상한 바와 같이 상대적으로 높은 값인 $\alpha = 0.7$, $t = 20$ 인 경우 가장 우수한 성능을 보였다. 그림 7, 8에 이와 같은 결과를 수율과 분산의 차를 통해 나타내었다. 만약 애플리케이션마다의 혹은 각 마스터-슬레이브 쌍마다의 성능 요구 조건에 따라 QoS 파라미터가 적절한 α 로 대응이 된다면 QoS 특성을 스케줄링에 반영하면서 시스템의 전반적인 성능이 최적화될 수 있을 것이다.

표 2. 데이터 트래픽 발생 특성

	M1	S1	M2	S2	M3	S3
process	MP	MP	MP	MP	MP	MP
arrival rate	0.2	0.2	0.2	0.01	0.01	0.01

	M4	S4	M5	S5
process	MMPP	MMPP	MMPP	MMPP
arrival rate (transition rate)	0.2/0.01 (0.01)	0.2/0.01 (0.01)	0.2/0.01 (0.01)	0.2/0.01 (0.01)

표 3에 기존의 라운드로빈 방식이나 [2], [3]에서의 KFP (K-Fairness Policy) 방식과의 성능 비교를 수행하였다. 물론 각 방식에서의 파라미터 설정에 따라 그 성능이 다르게 나오므로 절대적인 비교는 불가능하지만, 일반적인 파라미터 값을 반영하여 그 결과를 관찰하였다. 표 1에서의 데이터 트래픽 발생 특성은 각 기기마다 데이터 발생률이 매우 높으므로 효율적인 스케줄링이 일어나지 않더라도 POLL 혹은 NULL 패킷의 발생이 적어서 수율 성능이 각 방식마다 큰 차이를 보이지 않는다. 하지만, 표 2에서와 같이 데이터 트래픽 발생 빈도를 낮춰줄 경우 다음의 표 3과 같은 성능차이를 보인다. 본 실험에서는 KFP 방식의 K값을 200으로 설정하였고, T-D PP 방식에서의 t 는 100으로, α 는 각 쌍마다 0.9, 0.7, 0.1, 0.3, 0.3으로 데이터 트래픽 발생 패턴에 따라 다르게 설정하였으며, 총 15000 슬롯동안 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션 결과 제안한 T-D PP 방식의 성능이

