

# 개인전투체계 다중홉 네트워크를 위한 동적 시간슬롯 할당 기법

이 종 관<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> 육군사관학교 컴퓨터과학과

## Dynamic Slot Allocation Scheme in Tactical Multi-hop Networks for Future Soldier Systems

Jongkwan Lee<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> Department of Computer Science, Korea Military Academy, Korea

(Received 24 September 2020 / Revised 29 December 2020 / Accepted 29 January 2021)

### Abstract

In this paper, we propose a dynamic slot allocation scheme to improve the slot utilization rate in tactical multi-hop networks in which the channel condition varies due to node movements. The proposed scheme takes advantage of the fact that nodes that are more than three hops apart can use the same slot simultaneously. The frame is divided into two parts: the control period and the data period. To know the available slot information within two-hop distance, the node exchanges a slot allocation information with one-hop neighbors during the control period. The node can get the information on idle slots that are not used within two-hop distance but assigned already to other nodes that are more than three-hop away. The identified idle slot can be used by the node, which increases the slot utilization rate. The performance analysis results of the proposed scheme show that it increases the slot utilization rate sufficiently despite the overhead of the control period in the multi-hop networks of the future soldier system.

Key Words : Slot Allocation(슬롯 할당), Dynamic TDMA(동적 시분할다중접속), Tactical Multi-hop Networks(전술 다중홉 네트워크), MAC(매체접근통제), Future Soldier System(개인전투체계)

### 1. 서론

군사용 네트워크 체계의 발전 과정을 살펴보면 정보로서의 가치가 높은 데이터를 다루는 세대 순으로

최신 정보통신기술이 적용되어 왔다. 다시 말해, 전투 세대, 전술 세대에서 사용하는 데이터 보다는 전략 세대에서 사용하는 데이터를 처리하기 위한 시스템이 먼저 전력화된 이후 전술 데이터를 처리하기 위한 시스템이 개발되었다. 육군의 경우 군단급 이하 세대에서 사용하는 전술 C4I인 ATCIS(Army Tactical Command Information System)가 전력화된 이후 대대급

\* Corresponding author, E-mail: jklee64@kma.ac.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

이하 제대에서 사용하는 C4I 체계인 B2CS(Battalion Battle Command System)의 전력화가 추진되었다. 이러한 경향은 군사적 활용 측면에서 너무나 당연한 것이고 앞으로도 지속될 것이 분명하다. 최신 정보통신기술이 적용된 각 제대의 네트워크 체계들은 시의적절한 성능개량을 통해 미래전에 요구되는 능력을 계속 확장해 나갈 것이다. 대대급 이하 제대까지 네트워크화가 진행된 이후 다음 차례는 어디일까? 이제는 각 개 병사들이 네트워크화될 것이 자명하다.

세계 주요국들은 각개 전투원을 탐지-의사결정-타격 능력을 갖춘 하나의 독립된 전투체계로 탈바꿈시키기 위한 연구에 박차를 가하고 있다<sup>[1]</sup>. 우리 군도 개인 전투체계 개발을 위한 연구를 진행 중이다. 개인전투체계가 구비해야 할 많은 능력 중 하나가 바로 네트워크 기술이다. 현재는 특정 전투원만이 음성통신과 저속의 데이터 전송이 가능하여 전투원들간의 실시간 상황공유가 제한된다. 하지만 미래의 전투원은 개인전투체계를 통해 음성, 데이터(전문), 동영상 정보를 실시간 공유할 수 있을 것으로 기대된다<sup>[2]</sup>. 대용량의 데이터를 전송하기 위해 고주파 대역을 사용하기 보다는 데이터의 크기를 최소화하는 방향으로 발전될 것이다. 고주파 대역을 사용하는 상용 이동통신체계와 달리 개인전투체계는 통신 인프라가 제공되지 않는 모바일 애드혹(Ad-hoc) 환경일 뿐 아니라 주파수 대역이 높아질수록 전파의 수신 가능 범위가 축소되고 음영 지역이 넓어지기 때문이다.

이러한 기대를 충족하기 위해서는 전술적 채널 환경에서 제한된 무선 자원을 전투원들이 얼마나 효율적으로 공유할 수 있느냐가 무엇보다 중요하다. 전투원들이 분산되어 배치되고 각종 차폐물, 전투활동 등으로 전장환경에서의 무선채널 조건은 매우 급변할 수밖에 없다. 결국 개인전투체계의 네트워크는 많은 경우 멀티홉 구조가 될 것이다. 멀티홉 구조의 네트워크에서는 데이터를 목적지까지 전달하기 위해 중계를 해야하는 어려움이 있다. 하지만 두 노드의 거리가 3-홉 이상으로 이격되면 동일한 시간슬롯을 동시에 함께 사용할 수 있다. 3-홉 이상 이격되어 있는 두 노드의 데이터 송신은 서로 영향을 전혀 주지 않기 때문이다.

한편, 전투원은 최소한의 데이터 전송 기회를 보장받을 수 있어야 한다. 정확한 상황인식을 위해 생존 여부, 위치정보 등의 주기적 필수 데이터에 대한 최소한의 QoS(Quality of Service)를 보장해야 하며 이를

위해 무선자원을 경쟁방식이 아닌 예약방식으로 할당해야 한다. 대표적인 예약방식인 TDMA(Time Division Multiple Access)는 트래픽 부하와 무관하게 각 노드에게 최소한의 QoS를 보장할 수 있어 전술통신 및 네트워크 체계에 많이 적용된다. 미군의 대표적인 무전기인 SINCGARS, EPLRS와 전술데이터링크인 Link-16, Link-22도 TDMA 기술이 적용되어 있다. 하지만 예약 기반 방식은 전송할 패킷이 없는 경우에 예약된 슬롯이 유휴 슬롯으로 낭비되는 문제점이 있다<sup>[4]</sup>. 이러한 문제를 해결하기 위해 TDMA에 동적인 슬롯할당 기능을 접목시키는 연구가 진행되고 있다.

본 논문은 전장 환경과 같이 동적인 무선 멀티홉 네트워크 환경에서 최소한의 QoS를 보장한 가운데 시간슬롯 공유를 통해 시간슬롯 사용률을 극대화하기 위한 동적 슬롯할당 기법을 제안한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서 동적 슬롯할당과 관련된 기존 연구들을 살펴보고 3장에서는 제안하는 기법이 적용될 시스템 모델과 가정사항을 정의한다. 4장에서는 슬롯할당 예제를 포함하여 제안하는 기법에 대해 상세히 설명하고 5장에서 제안하는 기법의 성능을 분석한다. 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

## 2. 관련 연구

TDMA 기반의 네트워크에서 슬롯을 효과적으로 할당하기 위한 많은 연구들이 있어 왔다. 본 장에서는 제안하는 기법과 관련된 기존 연구들에 대해 간단히 살펴본다.

유지상 등 4인은 미래병사체제로 구성된 분대급의 소규모 네트워크 운용을 위한 TDMA 기반의 통신 프레임 구조를 제안하였다<sup>[5]</sup>. 전술 무선 채널 환경 특성에 따른 전송속도 제어의 필요성에 따라 제안된 프레임 구조에서 다양한 변조방식과 부호화율의 조합을 제시하였고, 최대 10 Mbps 이상의 전체 시스템 전송속도가 가능함을 제시하였다.

네트워크 내의 대표 노드가 네트워크 구조 및 슬롯할당 정보를 종합하여 슬롯을 동적으로 할당하는 클러스터 헤드(Cluster Head) 기반의 기법들이 있다.

권영민 등 4인은 미래병사체계가 클러스터 메시(Cluster Mesh) 기반의 애드혹 네트워크에서 운용될 때의 TDMA 통신 프레임 구조를 설계하였다<sup>[6]</sup>. TDMA

프레임에서 패킷 송신과 수신시 발생하는 중계 지연 시간이 중계 슬롯의 배치에 따라 영향을 받는 것에 착안하여 최대 중계 지연시간이 최소화되도록 중계 슬롯을 대칭적으로 할당하는 방안을 제안하였다. 그리고 최효종 등 7인은 무선 애드혹 네트워크를 위한 분산 TDMA MAC 프로토콜인 CH-MAC을 제안하였다<sup>7)</sup>. CH-MAC에서 클러스터 헤드는 2-홉 이내의 노드들로부터 슬롯할당정보를 수신하여 네트워크 구조를 인지한다고 가정한다. 따라서 클러스터 헤드는 새로운 노드의 슬롯요청을 효과적으로 처리할 수 있다. 이러한 클러스터 헤드 기반의 기법은 클러스터 헤드가 기능을 제대로 발휘하지 못하면 전체 네트워크 운용이 영향을 받게 된다. 또한 새로운 클러스터 헤드를 선정하는 것이 간단하지 않다. 특히, 임무가 종료될 때까지 클러스터 헤드의 생존성을 보장할 수 없는 전장환경에서 클러스터 헤드를 이용하는 것은 적절하지 않다.

한편, 별도의 클러스터 헤드 없이 각 노드들이 인접 노드들과의 데이터 교환을 통해 네트워크 구조와 슬롯할당 상태를 파악하여 동적으로 슬롯을 할당하는 기법들이 제안되었다<sup>8-11)</sup>. 이러한 기법들은 [5]에서 제시한 TDMA 프레임 구조와 같이 프레임이 슬롯할당 정보와 같은 제어 메시지를 전송하기 위한 제어구간과 데이터를 전송하기 위한 데이터구간으로 구성된다. 제어구간은 데이터 전송을 위한 일종의 오버헤드이며, 데이터구간 대비 제어구간의 상대적 크기에 따라 TDMA의 성능이 좌우된다<sup>12)</sup>. 클러스터 헤드가 없는 기법들은 단일장애점(single point of failure)이 없어 보다 융통성 있게 네트워크 운용이 가능하기 때문에 네트워크 구조와 채널 조건이 동적으로 변화하는 전술 네트워크에 적합하다고 할 수 있다.

### 3. 시스템 모델 및 가정사항

제안하는 기법은 개인전투체계가 적용된 소부대에 적용되는 TDMA 기반의 애드혹 네트워크를 대상으로 한다. 네트워크의 구조는 전술임무, 작전활동, 작전환경 등에 따라 매우 가변적일 수 있다. 특히, 도심지역과 같이 차폐물이 많은 상황에서의 작전에서는 네트워크가 멀티홉으로 구성될 수 있다.

본 논문에서는 다음과 같은 사항들을 가정한다. 첫째, 네트워크에 가입되는 노드의 수는 최대 10명이다.

이는 개인전투체계에서 소부대의 인원이 최대 10명인 점을 고려한 것이다. 둘째, 한 개의 프레임 동안에는 네트워크 구조가 변경되지 않는다. 즉 네트워크 구조에 대한 정보는 최소 한 프레임 동안에는 유효하다. 셋째, 각 노드별로 패킷은 패킷도착율(packet arrival rate)이  $\lambda$ 인 포아송 분포를 따라 생성되고 고정된 길이를 가지며, 한 개의 시간슬롯 안에서 처리된다.

Fig. 1은 시간 프레임의 구조를 나타낸다. 시간 프레임은 제어구간(Control Period)과 데이터구간(Data Period)으로 구분되며 주기적으로 반복된다. 제어구간의 시간슬롯(CS: Control Slot)은 각 노드에게 차례로 하나씩 할당되고 이후 역순으로 한 번 더 할당된다. 따라서  $m$ 을 네트워크에 참여할 수 있는 최대 노드 수라 할 때 CP는  $2m-1$ 개의 CS들로 구성된다. 이것은 한 번의 제어구간에서 모든 노드들이 정보교환을 완료하기 위함이다. CS는 고정적으로 할당되며 변경되지 않는다. CS가 고정적으로 각 노드들에게 할당되더라도 멀티홉 환경에서 각 노드가 자신의 CS에서 전송한 제어데이터를 모든 노드들이 공유하도록 하는 것은 쉽지 않다. 2-홉 이상 이격된 노드들에게는 해당 제어데이터가 직접적으로 전송될 수 없기 때문이다.

반면 DP의 시간슬롯(DS: Data Slot)은 각 노드에게 차례로 하나씩 할당된다. 따라서 DP는  $m$ 개의 DS로 구성된다. DS는 각 노드에게 고정적으로 프레임당 1개씩 할당되지만 3-홉 이상 떨어진 다른 노드에게 중복적으로 할당될 수 있다. 즉, 모든 노드는 프레임당 최소 1개 이상의 DS를 사용할 수 있어 최소한의 QoS를 보장받는다.

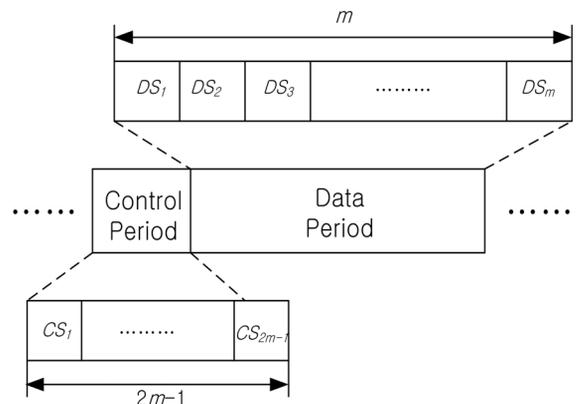


Fig. 1. Frame structure

4. 제안하는 기법

제안하는 기법은 제어구간에서 각 노드가 1-홉 슬롯할당정보( $SAI_1$ )를 교환하여 데이터구간에서의 유휴 슬롯을 개별 노드 입장에서 각자 파악한다. 이를 통해 3-홉 이상 떨어진 노드들간의 슬롯 재사용이 가능하다<sup>[9],[13]</sup>. 본 장에서는 제안하는 기법의 구체적인 동작 절차에 대해서 살펴본다. Table 1은 제안하는 기법을 설명하기 위한 기호와 의미를 나타낸다.

Table 1. Notation

표 기	의 미
$m$	네트워크에 참여하는 노드의 수
$N_i$	$i$ 번째 노드
$SAI_1(N_i)$	$N_i$ 관점에서 1-hop 거리 이내에 있는 노드들의 슬롯할당정보
$SAI_2(N_i)$	$N_i$ 관점에서 2-hop 거리 이내에 있는 노드들의 슬롯할당정보
$CS_i$	제어구간에서 $i$ 번째 시간슬롯
$DS_i$	데이터구간에서 $i$ 번째 시간슬롯

4.1 슬롯할당정보(SAI: Slot Allocation Information)

제안하는 기법에서 사용하는 SAI의 종류는  $SAI_1$ 과  $SAI_2$ 가 있다. 네트워크가 멀티홉으로 구성되는 경우에는 각 노드별로 생성된 SAI는 서로 다르며, 네트워크 구조의 변경에 따라 지속적으로 갱신된다.

$SAI(N_i)$ 는 노드  $N_i$ 의 관점에서 데이터구간의 슬롯의 할당상태를 0, 1, 2로 표현한다. 즉, SAI 값은 데이터구간의 슬롯의 개수만큼의 길이를 갖는 0, 1 또는 2로 이루어진 벡터라 할 수 있다. 그리고 SAI에서  $i$ 번째 원소의 값(0, 1 or 2)은  $DS_i$ 의 상태를 나타낸다.

이때,  $SAI_1$ 과  $SAI_2$ 에서 0, 1, 2의 의미가 조금 상이하다. Table 2는 각각의 의미를 나타낸다. 특히,  $SAI_2$ 에서 1로 표시된 슬롯은 2-홉 거리 이내에 이미 해당 슬롯을 사용하는 노드가 존재하므로 사용할 수 없지만, 0으로 표시된 슬롯은 재사용이 가능함을 의미한다.  $SAI_1$ 에서는 숨겨진 노드 문제(Hidden Node Problem)로 0이라 하더라도 해당 슬롯을 재사용할 수 없다<sup>[14]</sup>.

Table 2. Meaning of  $SAI_1$  and  $SAI_2$

구분	의 미	
	$SAI_1$	$SAI_2$
0	1-홉 이내에 해당슬롯을 사용하는 노드 미존재	2-홉 이내에 해당슬롯을 사용하는 노드 미존재
1	1-홉 이내에 해당슬롯을 사용하는 노드 존재	2-홉 이내에 해당슬롯을 사용하는 노드 존재
2	1-홉 이내에 해당슬롯을 재사용하는 노드 존재	2-홉 이내에 해당슬롯을 재사용하는 노드 존재

4.2 슬롯할당정보의 전송 및 갱신

제어구간의 슬롯은 각 노드에게 고정 할당된다. 즉, 각 노드는 해당 슬롯을 독점적으로 사용하며, 데이터구간의 슬롯과는 달리 다른 노드에게 임시적으로 중복할당되지 않는다. 각 노드는 제어구간에서 할당된 자신의 슬롯에서 현재까지 생성된  $SAI_1$ 을 매 프레임마다 전송한다.

한편, SAI 갱신 규칙을 위해 SOR 연산을 Table 3과 같이 정의하며, 제어구간에서 슬롯할당정보의 갱신 규칙은 다음과 같다.

Table 3. SOR operations

Input 1	Input 2	Output
0	0	0
0	1	1
0	2	2
1	0	1
1	1	1
1	2	1
2	0	2
2	1	1
2	2	2

• Rule 1

현재 자신의  $SAI_2$ 와 수신한  $SAI_1$ 들을 SOR 연산하여  $SAI_2$ 를 갱신한다.

• Rule 2

$CS_i$ 에서  $SAI_1$ 을 수신하지 못했다면 자신의  $SAI_1$ 의  $k$  번째의 값을 0으로 설정하고, 수신했다면 1로 설정한다. 여기서  $k$ 는 다음과 같다.

$$k = \begin{cases} i \bmod m, i \neq m \\ m, otherwise \end{cases} \quad (1)$$

• Rule 3

수신한  $SAI_1$ 에 2가 포함되어 있다면 현재 자신의  $SAI_1$ 에서 동일한 위치의 값과 SOR 연산하여 그 결과 값을 자신의  $SAI_1$ 에 반영한다.

• Rule 4

갱신한  $SAI_2$ 에서 0인 값에 해당하는 슬롯을 재사용하고자 할 때는 자신의  $SAI_1$ 과  $SAI_2$ 에 해당되는 값을 2로 변경한다.

4.3 슬롯 재사용

각 노드는 자신의  $SAI_2$ 를 통해 2-홉 거리 이내의 네트워크 구조와 재사용이 가능한 슬롯을 파악할 수 있다. 제어구간에서  $SAI_1$  교환 이후  $SAI_2$ 의 값에 0이 포함되어 있다면 해당 슬롯은 재사용이 가능하다.

제어구간에서 노드  $n_i$ 는 재사용하고자 하는 슬롯 ( $DS_k$ )의 상태정보를 Rule 4에 의해 0에서 2로 변경하고  $CS_i$ 에서  $SAI_1$ 을 전송한다. 이를 수신한 이웃노드들은  $DS_k$ 가 재사용되고 있음을 인지하게 되고 중복적인 재사용을 방지한다.

Table 4. Slot allocation example by the proposed scheme

		$N_1$		$N_2$		$N_3$		$N_4$	
		$SAI_1$	$SAI_2$	$SAI_1$	$SAI_2$	$SAI_1$	$SAI_2$	$SAI_1$	$SAI_2$
$f_1$	$CS_1$	<b>1000</b>	1000	0100	0100	0010	0010	0001	0001
	$CS_2$	1100	1100	<b>1100</b>	1100	0110	0110	0001	0001
	$CS_3$	1100	1100	1110	1110	<b>0110</b>	0110	0011	0011
	$CS_4$	1100	1100	1110	1110	0111	0111	<b>0011</b>	0011
	$CS_5$	1100	1100	1110	1111	<b>0111</b>	0111	0011	0111
	$CS_6$	1100	1110	<b>1110</b>	1111	0111	1111	0011	0111
	$CS_7$	<b>1100</b>	1110	1110	1111	0111	1111	0011	0111
$f_2$	$CS_1$	<b>1102</b>	1112	1112	1111	0111	1111	0011	0111
	$CS_2$	1102	1112	<b>1112</b>	1111	0111	1111	0011	0111
	$CS_3$	1102	1112	1112	1111	<b>0111</b>	1111	0011	0111
	$CS_4$	1102	1112	1112	1111	2111	1111	<b>2011</b>	2111
	$CS_5$	1102	1112	1112	1111	<b>2111</b>	1111	2011	2111
	$CS_6$	1102	1112	<b>1112</b>	1111	2111	1111	2011	2111
	$CS_7$	<b>1102</b>	1112	1112	1111	2111	1111	2011	2111
$f_3$	$CS_1$	<b>1102</b>	1112	1112	1111	0111	0111	0011	0011
	$CS_2$	1102	1112	<b>1112</b>	1111	0111	0111	0111	0111
	$CS_3$	1102	1102	1112	1111	<b>0111</b>	0111	0101	0101
	$CS_4$	1102	1112	1111	1111	0110	0110	<b>0101</b>	0101
	$CS_5$	1102	1102	1111	1111	<b>0110</b>	0110	0101	0101
	$CS_6$	1100	1111	<b>1111</b>	1111	0110	1111	0101	1111
	$CS_7$	<b>1100</b>	1111	1111	1111	0110	1111	0101	1111

만약, 네트워크 구조가 변경되어  $DS_k$ 의 상태정보가 1인  $SAI_l$ 를 수신한다면 Rule 1에 의해서  $DS_k$ 의 상태정보는 2에서 1로 변경된다. 즉, 슬롯 재사용이 중단된다. 이것은  $DS_k$ 의 사용 우선권은  $N_k$ 에게 있기 때문이다. 즉, 자신의 슬롯은 지속적으로 사용이 가능하기 때문에 최소한의 QoS 보장이 가능하다.

4.4 슬롯할당 시나리오

제안하는 슬롯할당 기법의 이해를 돕기 위해 Fig. 2와 같이 4개의 노드가 일렬로 배치된 네트워크 구조에서의 슬롯할당 시나리오를 설명한다. 노드들은 DP에서 하나의  $DS$ 를 각각 할당받은 상태이다. Table 4는 각 프레임의  $CS$ 별로 각 노드들의  $SAI_1$ 과  $SAI_2$ 의 값들을 나타낸다. 밑줄로 표시된 부분은 해당  $CS$ 에서 전송되는  $SAI_l$ 을 나타내며 나머지 값들은 전송된  $SAI_l$ 을 수신한 후 갱신된 값들을 나타낸다. 당연히  $SAI_l$ 을 수신한 노드들의  $SAI$  값들만 갱신된다. 노드는  $SAI_l$ 을 많이 수신할수록 2-홉 이내의 네트워크 구조와 재사용이 가능한 슬롯을 정확하게 파악할 수 있다.

예를 들어,  $f_i$  프레임에서  $N_l$ 은  $SAI_2(N_l)$ 를 통해  $DS_l$ 를 재사용할 수 있다는 것을 알 수 있다.  $f_j$ 에서  $N_l$ 은  $DS_l$ 의 상태를 2로 변경한  $SAI_l$ 을 전송함으로써  $DS_l$ 의 재사용을 선언한다. 즉,  $N_l$ 은  $N_j$ 와 공동으로  $DS_l$ 를 사용한다.

만약  $f_j$  프레임에서의 네트워크 구조가 Fig. 2.(b)와 같이 변경된다면  $SAI_2(N_l)$ 의  $DS_l$  상태는 2에서 1로 변경되고,  $DS_l$ 의 재사용은 중단된다. 한편, Table 4에서 보는 바와 같이  $N_l, N_2, N_3, N_4$ 는 각각 자신의 슬롯인  $DS_l, DS_2, DS_3, DS_4$ 를 지속적으로 사용한다. 즉, 프레임당 한 번의 전송기회를 보장받는다.

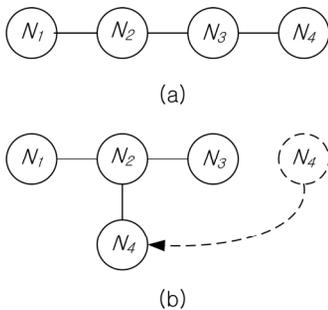


Fig. 2. Network structure for slot allocation example: (a) The initial structure, and (b) The structure after the movement of  $N_4$

5. 성능평가

본 장에서는 제안하는 기법을 평가하기 위한 성능지표를 정의하고 노드의 수, 패킷생성률, 제어구간의 길이에 따른 성능을 평가한다.

5.1 성능 지표

제안하는 기법의 성능을 평가하기 위한 지표로 슬롯사용율을 다음과 같이 정의한다.

$$U_{slot} = \frac{\sum_{i=1}^m C_{DS_i}}{m} \tag{2}$$

$C_{DS_i}$ 는  $DS_i$ 를 사용하는 노드의 수를 의미한다. 한 개의 슬롯에서 한 개의 패킷을 처리한다고 가정하면, 식 (2)는 단위 슬롯당 처리되는 패킷의 수라고 해석할 수 있다.

슬롯을 중복적으로 사용하는 경우가 많을수록 슬롯 사용율은 증가한다. 슬롯을 사용하는 노드가 없다면 슬롯사용율은 0이다. 그리고 각 노드가 슬롯의 중복할당이 없이 모든 시간슬롯을 매 프레임마다 사용한다면 슬롯사용율은 1이다. 만약 슬롯 중복할당이 허용된다면 슬롯사용율은 1보다 커질 수 있다. 제안하는 기법은 3-홉 이상 떨어진 노드들의 동일한 슬롯 사용을 허용하기 때문에 네트워크가 멀티홉으로 구성될수록 슬롯사용율이 커질 확률이 높아진다. 동일한 노드 수를 가정할 때 홉수가 가장 많은 네트워크 구성은 노드들이 일렬로 배치된 경우이고, 노드 수가  $m$ 개일 때 최대 슬롯사용율( $U_{slot}^{max}$ )은 다음과 같이 3가지 경우로 구분하여 계산된다.

- Case 1 :  $\text{mod}(m, 3) = 0$   

$$U_{slot}^{max} = \frac{m}{3} \tag{3}$$

- Case 2 :  $\text{mod}(m, 3) = 1$   

$$U_{slot}^{max} = \left( \left\lceil \frac{m}{3} \right\rceil^2 + 2 \times \left\lfloor \frac{m}{3} \right\rfloor^2 \right) / m \tag{4}$$

- Case 3 :  $\text{mod}(m, 3) = 2$   

$$U_{slot}^{max} = \left( 2 \times \left\lceil \frac{m}{3} \right\rceil^2 + \left\lfloor \frac{m}{3} \right\rfloor^2 \right) / m \tag{5}$$

5.2 노드의 수와 패킷생성율에 따른 성능

Fig. 3은 제안하는 기법과 기존 TDMA 기법에서 패킷발생율( $\lambda$ )의 변화에 따른 최대 슬롯사용율을 나타낸다. 각 노드에서 처리해야할 패킷의 생성은 서로 독립적이며 한 개의 DS에서 한 개의 패킷이 처리된다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 기존 TDMA 기법은 패킷발생율이 증가할수록 최대 슬롯사용률도 증가하지만  $\lambda$ 가 1 보다 커지는 구간에서는 슬롯사용률이 1로 수렴한다. 즉, 이 구간에서는 패킷이 충분히 처리되지 못하고 각 노드의 큐(queue)에 쌓이게 된다. 반면 제안하는 기법은 최대 슬롯사용률이 수렴되는 구간이 기존 TDMA에 비해 늦게 시작된다. 즉, 기존 TDMA에 비해 많은 패킷을 처리할 수 있음을 의미한다. 또한 노드의 수( $m$ )가 증가하고 패킷발생율( $\lambda$ )이 증가할수록 최대 슬롯사용율이 증가한다. 이는 노드의 수가 증가할수록 긴 멀티홉을 구성할 수 있어 동일한 슬롯을 더 많은 노드가 사용할 수 있기 때문이다.

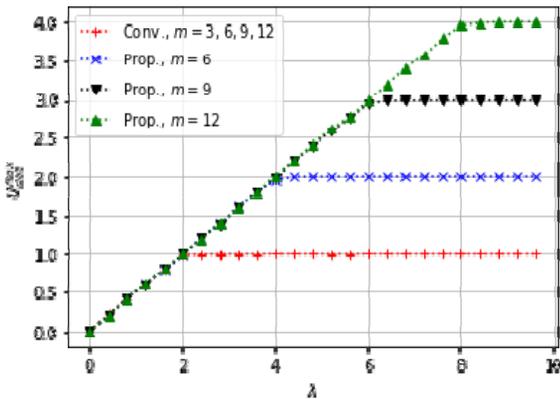


Fig. 3. Maximum slot utilization rates according to varying  $\lambda$  and  $m$  for conventional TDMA and proposed scheme

5.3 제어구간 길이에 따른 성능

제안하는 기법은 네트워크 구조를 파악하기 위해 제어구간에서 슬롯할당정보를 교환한다. 제어구간에서의 정보교환은 패킷처리와는 무관한 오버헤드이다. 특히 좁은 대역폭에서 낮은 전송속도를 가지는 전술 통신환경에서 제어를 위한 오버헤드를 줄이기 위한 노력은 필수적이다. 따라서 제어구간의 길이가 성능에 미치는 영향을 살펴본다.

DS와 CS의 길이를 각각 1과  $d$ 라고 하면 DP와 CP

의 길이는 각각  $m$ 과  $(2m-1) \times d$ 이다. 따라서 총 프레임의 길이는  $m+(2m-1) \times d$ 이다. 결국 기존 TDMA에서 동일한 프레임에서 처리할 수 있는 최대 패킷의 수는  $m+(2m-1) \times d$  이다. 따라서 제안하는 기법이 기존 TDMA 보다 많은 패킷을 처리하기 위해서는  $mU_{slot}$  이  $m+(2m-1) \times d$  보다 커야하며 이를 정리하면  $d$ 는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$d < \frac{m(U_{slot} - 1)}{2m - 1} \tag{6}$$

네트워크 구조가 최대 홉수를 가지는 상황이라 가정하자. 개인전투체계의 최대 가입자를 10명이라고 했으므로 식 (4)에 의해 최대 슬롯사용율은 3.4가 된다. 따라서  $d$ 는 식 (6)에 의해 24/19보다 작으면 제안하는 기법이 기존 TDMA 기법에 비해 우수한 최대 성능을 나타낸다.  $d$ 가 매우 작은 값은 아니기 때문에 충분히 구현이 가능할 것으로 판단된다. 하지만 이것은 노드들이 형성한 네트워크가 멀티홉으로 최대한 늘어져 있는 것을 가정한 것이기 때문에 실제 작전환경과 개인전투원의 작전행동 특성을 고려하여 CS의 길이  $d$ 를 선정할 필요가 있다.

한편, 식 (6)에 의해서  $d$ 가 음수여야 한다는 결과가 나온다면 제안하는 기법은 기존 TDMA에 비해서 우수한 성능을 나타내는 것이 불가능하다는 것을 의미한다.

6. 결론 및 향후연구

본 논문은 개인전투체계에서 사용되는 전술네트워크 환경을 고려하여 동적인 네트워크 구조에서 슬롯사용율을 향상시키기 위한 동적 슬롯 할당 기법을 제안하였다. 제안하는 기법은 시간 프레임을 제어구간과 데이터구간으로 구분한다. 제어구간에서 슬롯할당정보를 교환하여 각 노드들이 2-홉 이내의 네트워크 구조를 파악하고 이를 바탕으로 자신에게 이미 할당된 슬롯 이외의 슬롯을 추가적으로 사용할 수 있다. 즉 이미 할당받은 슬롯은 지속적으로 사용이 가능하기 때문에 최소한의 QoS를 보장받을 수 있다.

성능분석을 통해 제안하는 기법이 기존 TDMA에 비해 멀티홉의 네트워크 구조 하에서 슬롯사용율을 크게 향상시킴을 확인하였다. 또한 제어구간의 시간슬

롯 길이에 따른 성능분석을 통해 오버헤드로 인한 영향이 미미하여 제안하는 기법이 충분히 실현 가능성을 확인하였다.

본 논문의 결과는 최대 멀티홉 구조를 갖는 네트워크 환경을 고려한 최대 슬롯사용율을 기초로 도출되었다. 따라서 개인전투원들이 작전을 수행할 때 형성되는 네트워크 구조의 모델링 결과를 활용한 추가적인 연구를 수행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 육군사관학교 화랑대연구소와 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음.

(No. 2019R1G1A100303012)

## References

- [1] J. Chae et al., "NCW based Research & Development Technology for Korean Future Soldier System," KIMST Annual Conference Proceedings, pp. 465-470, 2012.
- [2] K. Lee and C. Lee, "A Study on the Acquisition Strategy for the Future Warrior System in ROKA," ICROS 2011, pp. 152-164, 2011.
- [3] E. J. Choe et. al., "A Direction of Required Technology for Future Warrior Platform with Mission Equipment," KIMST Annual Conference Proceedings, pp. 2183-2184, 2018.
- [4] J. K. Lee et. al., "Performance Analysis of Cooperative MAC Protocols in Dynamic TDMA based Wireless Networks," KIMST Annual Conference Proceedings, pp. 545-548, 2012.
- [5] J. S. You et. al., "Communication Frame Design for Small Scale Network Operation," KIMST Annual Conference Proceedings, pp. 873-874, 2018.
- [6] Y. M. Kwon, "TDMA Scheduling Scheme for Minimizing Multi-hop Relay Time in Small Scale Networks," KIMST Annual Conference Proceedings, pp. 1193-1194, 2019.
- [7] H. Choi et. al., "CH-MAC: A Cluster-based, Hybrid TDMA MAC Protocol over Wireless Ad-hoc Networks," MILCOM 2019 - 2019 IEEE Military Communications Conference(MILCOM), Norfolk, VA, USA, pp. 743-748, 2019.
- [8] J. K. Lee, K. M. Lee and J. Lim, "A Fast Dynamic Slot Assignment Protocol for Ad Hoc Networks," IEICE Transaction on Communications, Vol. E95-B, No. 12, 2012.
- [9] J. K. Lee et. al., "AC-DSA: Artificial Collision based Dynamic Slot Assignment for In-Band Control Networks," IEEE Transaction on Wireless Communications, Vol. 3, No. 11, 2014.
- [10] J. K. Lee, H. J. Noh and J. Lim, "TDMA based Cooperative MAC Protocol for Multi-Hop Relaying Networks," IEEE Communications Letters, Vol. 18, No. 3, 2014.
- [11] J. K. Lee et. al., "A Cooperative Relay Scheme for Tactical Multi-Hop Wireless Networks," IEEE MILCOM, 2013.
- [12] J. K. Lee, "Performance Analysis of Dynamic TDMA and Fixed TDMA in Tactical Data Link," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 21, No. 4, pp. 489-496, 2018.
- [13] J. K. Lee and M. Lee, "Dynamic Slot Re-assignment Scheme for Network Merge in Swarming Drone Networks," Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, Vol. 23, No. 2, pp. 156-164, 2019.
- [14] Kosek-Szott, K., "A Survey of MAC Layer Solutions to the Hidden Node Problem in Ad-Hoc Networks," Ad Hoc Networks, Vol. 10, No. 3, pp. 635-660, 2012.