

# 공중 전술 데이터링크에서 상황인식 공유를 위한 우선순위 기반 매체접속제어와 부하분산 기법

양 경 석\*, 백 호 기\*, 박 경 미°, 임 재 성\*\*, 박 지 현\*\*\*

## Priority Based Medium Access Control and Load Balancing Scheme for Shared Situational Awareness in Airborne Tactical Data Link

Kyeongseok Yang\*, Hoki Baek\*, Kyungmi Park°, Jaesung Lim\*\*, Ji Hyeon Park\*\*\*

### 요 약

현대전이 네트워크 중심전으로 변화함에 따라 아군 플랫폼끼리 상황인식 정보를 공유하는 능력은 작전임무 수행을 위한 핵심 능력이 되었다. 공중 환경에서 상황인식 공유를 위하여 Link-16과 같은 전술 데이터링크를 이용하는데, 슬롯 할당이 동적으로 되지 않거나 동적으로 할당된 슬롯의 개수를 변경하지 못하는 문제가 존재하였다. 또한 슬롯할당을 받지 못한 노드가 있는 경우 상황인식 공유의 필요에도 불구하고 유한한 타임 슬롯 자원의 한계로 이를 공유하지 못하여 상황인식 능력을 향상시키지 못하는 문제가 존재하였다. 본 논문에서는 TDMA (time division multiple access)와 랜덤액세스가 혼합된 구조를 활용하여 동적인 슬롯할당 및 할당 슬롯의 변화를 수용하며, 사용 가능한 슬롯이 소진된 경우에도 일부 상황인식 공유가 가능한 기법 및 슬롯 요청이나 메시지 전송 집중에 다른 슬롯 할당 지연시간을 감소를 위한 서브프레임간 부하 분산 기법을 제안한다.

**Key Words** : Link-16, dynamic TDMA, situational awareness, dynamic slot assignment, tactical datalink

### ABSTRACT

As modern warfare has changed into network centered, the ability to share situational awareness among allies become a core competency for performing operational missions. In an airborne environment, it uses a tactical data link such as Link-16 for shared situational awareness. There exist problems when it shares situational awareness over the existing data link that can not allocate slots dynamically or that can not change the number of a slot to be allocated. In addition, there was a problem that can not share this failure so that failed to improve situation awareness because of finite time slot resources. In this paper, we accommodate dynamic slot allocation and changes of slot allocation with mixed structure of TDMA (time division multiple access) and random access. We propose a technique that can be used when available slots are exhausted, and a load balancing method to prevent slot allocation delay when slot requesting or message sending is concentrated on a single subframe.

※ 본 연구는 국방과학연구소의 지원으로 수행되었음 (계약번호 : UD150010ED)

♦ First Author : Ajou University Graduate School of Software, gaeng@ajou.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Agency for Defense Development, jellymi@hanmail.net, 정희원

\* Ajou University Department of Military Digital Convergence, neloyou@ajou.ac.kr, 정희원

\*\* Ajou University Department of Software, jaslim@ajou.ac.kr, 종신회원

\*\*\* Agency for Defense Development, jhpark@add.re.kr, 정희원

논문번호 : KICS2016-07-154, Received July 19, 2016; Received September 27, 2016; Received September 27, 2016

## 1. 서 론

NCW (network centric warfare)<sup>[1]</sup>에서 전쟁에서 승리하는 것은 ISR (intelligence, surveillance, and reconnaissance), C2 (command and control), PGM (precision guided munitions)을 수행하는 플랫폼들 간의 정보 공유 능력에 달려 있다. 전술 데이터링크는 전술 정보 교환의 통신 매체 역할을 하며, 이를 통해 아군들은 상황인식을 공유하여 임무의 효율성을 증대시킬 수 있다.

상황인식이란 주변 상황에 대한 파악으로써, 이를 위해서는 많은 정보가 필요하다. 내부 센서로부터 스스로 획득할 수 있는 정보는 한정적이기 때문에 주변의 다른 전투기, 센서 등에서 얻은 정보를 데이터링크를 통하여 전달받고 교환함으로써 정보를 획득하고 공유하는 것이 필요하다. 상황인식을 위한 정보로는 주변 노드들의 위치, 속력, 방위 및 적아 식별 정보 등이 있다. 시간에 따라 계속 변하는 전장 상황에서는 정확한 정보의 빈번한 상황인식 정보 업데이트가 필요하다. 특히, 상황인식은 지휘 통제의 결정권자의 결정의 근거가 되므로, 신뢰성 있고 주기적인 전달이 보장되어야 한다.

Link-16, ADS-B (automatic dependent surveillance - broadcast)에서는 각각 PPLI (precise participant location and identification) 메시지<sup>[2]</sup>, ADS-B 메시지<sup>[3]</sup>를 통해 상황인식을 공유한다. 상황인식 메시지는 시간에 따른 변화에 대응하기 위해 주기성을 가지며, 여러 노드들과 쉽게 교환할 수 있도록 점 대 점 방식이 아닌 브로드캐스팅 방식을 사용한다.

공중 전술 데이터링크를 대표하는 Link-16에서는 유한한 채널을 공유하는 방법으로 TDMA (time division multiple access)를 사용하는데, 이는 주파수 채널을 타임 슬롯 단위로 나누어서 사용하는 다중 접속 방식으로써 각 타임 슬롯을 여러 사용자에게 분배하여 사용하도록 할 수 있다<sup>[4]</sup>. TDMA에서는 모든 노드들이 시간 동기를 맞추어야 하는데, Link-16에서는 이를 위해서 NTR (network time reference) 노드를 지정하여 시간 동기의 기준으로 삼는 방식을 사용한다. 이 때 각 노드들에게 TDMA 타임 슬롯이 사전 설계에 의해 정적으로 분배된 경우, 각 노드들은 지정된 타임 슬롯에서만 전송을 하게 되므로 신뢰성 있는 메시지교환이 가능하게 된다. 제안하는 방법은 NTR 중심의 공중 데이터링크에서 신뢰성 있는 정보를 동적으로 교환할 수 있는 방법의 필요로 부터 시작하였다.

TDMA 기반의 슬롯 할당 기법은 중앙 코디네이터

존재 여부에 따라 중앙집중형과 분산형의 2개 그룹으로 나눌 수 있다<sup>[5]</sup>. 최근 AC-DSA<sup>[6]</sup>와 같은 분산형 슬롯 할당 방식이 많이 연구되고 있다. 그러나 시간 동기를 위한 NTR이 존재하는 현재의 공중 전술 데이터링크 환경을 고려하고, 이 환경에서의 요구사항을 만족시키기 위하여 중앙집중형 슬롯 할당 기법에 대해 연구하였다.

기존의 RAND, PMNF<sup>[7]</sup> 등의 중앙집중형 슬롯 할당 기법의 연구에서는 마스터 새로운 노드에 슬롯을 할당한 후 사용하는 방식을 택하고 있다. 그런데 RAND, PMNF 등에서는 요청이 없더라도 마스터가 일괄적으로 노드에게 슬롯 할당을 하므로 노드들의 주기, 우선순위 등의 특성을 고려하지 못하며, 슬롯의 추가할당 등의 요구사항의 변화에 대하여도 대처하지 못한다.

본 논문에서는 NTR 중심의 공중 전술 데이터링크에서 상황인식 공유를 위한 동적 슬롯 할당 기법을 제안한다. 이를 위하여 NTR에게는 아군 플랫폼인지를 검증하고, 시간 스케줄을 결정하는 코디네이터로서의 추가적인 역할을 부여하게 된다. 이는 군사 작전에서 정보 교환은 아군에게도 중요하지만, 적군에게 노출될 경우에 치명적인 피해를 입을 수 있기 때문이다. 또한 슬롯 할당 요청 패킷이나 슬롯 재할당 요청 패킷 등의 데이터 전송은 원래의 NTR이 수행하던 데이터 교환의 양적 확장이므로 수행 능력은 문제가 되지 않는다.

제안 기법은 다양한 속성을 가진 노드들에게 신뢰성 있는 상황인식 메시지 교환을 위한 동적 슬롯 예약, 상황인식 메시지 전송 우선순위가 높은 노드 (HPN: high sending priority node)에게 슬롯 재할당, 상황인식 메시지 전송 우선순위가 낮은 노드(LPN: low sending priority node)에게 임시 상황인식 메시지 공유 등을 가능하도록 한다. 그리고 프레임 내의 가드타임의 비율을 줄여 프레임의 사용률을 높여준다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련 연구로써 Link-16, USAP-MA, ADS-B에 대한 간단한 설명과 제안하는 환경에서의 한계점에 대해 알아보고, 3장에서는 프레임 구조 및 그 구조에서의 여러 기법들을 제안하고, 4장에서는 시뮬레이션을 통해 제안한 기법의 개선점 및 한계점을 살펴보고, 5장에서는 본 연구의 결론을 기술하며 끝맺는다.

## II. 관련 연구

### 2.1 Link-16

Link-16은 대표적으로 널리 사용되는 공중전술데이터링크이다. TDMA 기반의 네트워크로써 하나의 프레임은 1,536개의 타임 슬롯으로 구성된다. 각 타임 슬롯은 사전 설계에 의해 각 노드에게 미리 할당되어 있으며, 한 타임 슬롯에서는 하나의 노드만이 정보를 전송할 수 있다. 모든 노드는 자신에게 할당된 타임 슬롯을 미리 알고 있으며, 이 때 TDMA 네트워크를 구성하기 위해 NTR 노드로부터 시간 동기를 획득한다.

Link-16에서는 제밍에 강인한 주파수 도약<sup>9)</sup> 및 다수의 작전 지원을 위한 멀티넷을 지원하는데, 여러 넷 중에서 Net0에서는 PPLI메시지를 주기적으로 전송함으로써 다른 노드들과 플랫폼 상태 정보를 공유한다. PPLI메시지는 RRN (recurrence rate number)에 따라 노드별로 다른 주기를 갖는데, 이로 인해 각 노드들은 각각의 RRN에 따라 주기적으로 상황인식 공유를 할 수 있다<sup>9),10)</sup>.

Link-16은 공중환경에서 사용되는 데이터링크로써 위성 환경<sup>11)</sup>과 유사하게 노드간의 전송지연시간이 매우 길기 때문에 메시지 전송 시 긴 가드타임을 필요로 한다. 또한, 설계에 의한 정적인 구조이기 때문에 필요에 따라 타임 슬롯을 동적으로 슬롯을 할당받지 못하며, 작전 변경 등에 따라서 슬롯 할당의 변경도 불가하다.

### 2.2 USAP-MA

USAP-MA<sup>12)</sup>는 스마트폰 시스템에 사용하기 위해 개발된 분산형 동적 슬롯 할당 기법으로써 Link-16과 달리 네트워크 내 노드들이 동적으로 슬롯을 예약하여 사용한다.

그림 1 상단에서는 USAP-MA의 프레임 구조를 보여준다. 125밀리초 길이의 한 프레임은 13개의 부트

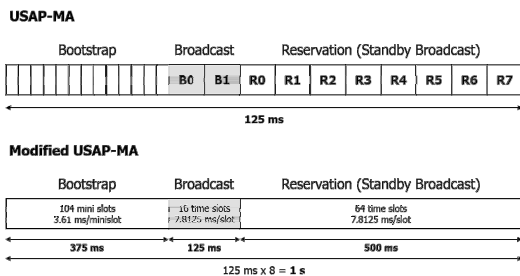


그림 1. USAP-MA 프레임 구조 및 수정된 구조  
Fig. 1. Frame structure of USAP-MA

스트랩 슬롯과 2개의 브로드캐스트 슬롯, 8개의 예약 슬롯으로 구성되어 있다.

부트스트랩 구간에서는 각 노드들의 슬롯 할당 정보와 슬롯 예약 및 탈퇴를 위한 정보를 공유한다. 각 노드는 각자 지정된 자신의 미니슬롯에서 USAP 패킷을 보내게 되는데, USAP 패킷 내에는 자신의 슬롯 사용 정보, 인접 노드의 슬롯 사용 정보, 슬롯 사용 요청 및 탈퇴에 대한 정보가 포함되어 있다.

브로드캐스트 구간은 프레임 마다 2개 노드의 슬롯이 지정되어 있어, 해당 노드는 별도의 예약 없이 사용 가능하다. 이는 모든 노드에게 최소한의 전송을 보장해준다. 예약 슬롯은 부트스트랩 슬롯을 통해 예약하여 사용할 수 있는데, 한번 예약된 슬롯은 계속 점유하여 사용하며 탈퇴 요청에 의해 슬롯 사용을 해제할 수 있다.

USAP-MA를 공중전술데이터링크에 적용시킬 경우 미니슬롯을 통해 슬롯을 예약하여 동적인 상황인식공유가 가능하다. 하지만 공중환경에서의 긴 전송지연시간으로 인하여 모든 슬롯마다 가드타임이 보장되어야 한다. 공중 환경에서 제안된 기법과의 공정한 비교를 위해 USAP-MA를 125밀리초의 프레임을 1초 길이의 프레임으로 수정하였다. 수정된 USAP-MA에서는 부트스트랩, 브로드캐스트, 예약 구간의 각 슬롯의 개수를 104개, 16개, 64개로 8배로 증가시켰고, 브로드캐스트 및 예약 구간의 각 슬롯의 크기를 제안된 구조 및 Link-16과 같은 7.8125밀리초로 일치시켰으며, 부트스트랩 미니 슬롯의 크기는 3.61밀리초로 정하였다. 수정된 구조를 공중환경에서 사용하더라도 프레임에서 가드타임 비율이 높아 프레임 사용률이 매우 낮으며, 특히 부트스트랩 구간에서는 각 미니슬롯의 길이가 3.61밀리초로써 가드타임이 들어갈 공간이 부족하여 네트워크 범위가 제한될 수 있다.

### 2.3 ADS-B

ADS-B는 민간 항공 교통관제에서 사용되는 GPS (global positioning system)에 의존적인 공중 감지 데이터링크이다. ADS-B 터미널을 장착한 항공기는 자동으로 그 위치, 속도, 방향 등과 같은 감지 데이터를 매 초마다 메시지로 브로드캐스팅 한다.

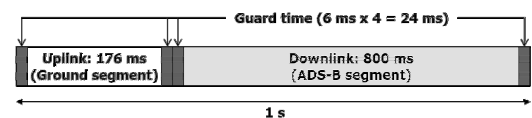


그림 2. ADS-B 프레임 구조  
Fig. 2. Frame structure of ADS-B

그림 2의 ADS-B 프레임 구조는 크게 지상 구간과 ADS-B 구간으로 나누어져 있다. 각 구간의 앞, 뒤에는 전파 지연과 타이밍 미세 조정에 대비하여 6밀리초의 가드타임이 존재한다. 첫 번째 부분인 176밀리초 길이의 지상 구간에서는 지상국이 항공기로 업링크 메시지를 전송하며, 두 번째 부분인 800밀리초 길이의 ADS-B 구간에서는 공중의 항공기가 다른 항공기 및 지상국으로 ADS-B 메시지를 전송한다. 모든 노드들은 주기적으로 ADS-B 메시지를 브로드캐스팅하며, 이 때 충돌은 고려하지 않는다. 따라서 ADS-B 터미널을 장착한 노드들은 각 노드별로 지정된 타임 슬롯을 할당받지 않고 상황인식 메시지를 공유한다. 타임 슬롯을 할당받지 않으며 방송을 통해 모든 노드들이 전송을 하므로 주기적인 메시지 전송을 보장하는 신뢰성 있는 통신은 불가능하다.

### III. 본 론

본 논문은 코디네이터 노드에 의해 관리되는 멀티홉 기반의 네트워크를 기반으로 한다. 이 때 코디네이터란 각 노드들의 타임 슬롯 할당 요청에 대하여 가입 승인 또는 가입 거절을 비콘을 통해서 알려주는 노드이다. 코디네이터 노드는 TDMA 네트워크 가입을 위한 시간 동기 메시지 교환을 수행하는 NTR 노드가 그 역할을 동시에 수행하도록 한다. 이 때, NTR은 오버히어링(overhearing)을 통해 다른 노드의 슬롯 사용 정보(점유 중인 타임 슬롯, 전송주기 및 우선순위)를 알 수 있다고 가정한다.

코디네이터 노드를 중심으로 가시선 범위 내의 싱글 홉 노드들이 있고, 싱글 홉 노드들은 NTR 노드로부터 수신한 메시지를 릴레이 해주어 멀티 홉을 지원하게 된다.

NTR 노드는 비콘 구간을 통해 상황인식 메시지 및 시간 동기 메시지 등을 전송하며, NTR을 제외한 각 노드들은 TDMA 구간 또는 랜덤액세스 구간을 통해 상황인식 공유 메시지를 주기적으로 일정한 우선순위에 따라 보낸다. 이 때 주기는 각 노드의 특성에 따라 다르며, 각 노드들은 여러 단계의 전송 우선순위를 가질 수 있다.

본 논문에서 주기는 프레임 길이 12초의 약수인 1초, 2초, 3초, 4초, 6초, 12초의 총 6가지로, 우선순위는 HPN, LPN의 2단계로만 구분되어 있다고 가정한다. 그림 3에 이와 같은 환경을 예시로 도시 하였다.

그림 3에서는 NTR 노드를 중심으로 가시선 범위 내에 노드 B, C가 있고, 노드 B, C로부터 각각 가시

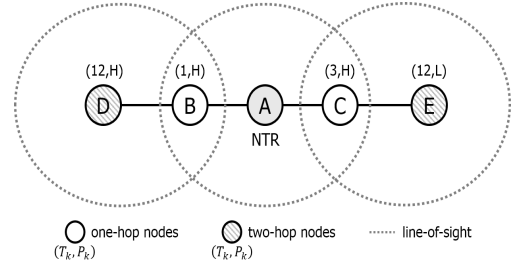


그림 3. 공중 전술 데이터링크 환경 설명  
Fig. 3. Description of airborne TDL environment

선 범위에 있는 노드 D, E가 있다. 각 노드는 메시지의 전송 주기( $T_k$ )와 전송 우선순위( $P_k$ )에 따라 메시지를 전송한다. 표 1에는 본 논문에서 사용하는 심볼과 그 설명을 정리하였다.

표 1. 심볼 및 설명  
Table 1. Symbols and their description

Symbol	Description
$T_k$	Period attribute of the node $k$ $T_k = \{0, 1, 2, 3, 4, 6, 12\}$ (0 when vacant)
$T_{i,j}$	Period attribute of an assigned node at $i$ th subframe, $j$ th time slot column
$P_k$	Priority attribute of the node $k$ $P_k = \{0, 1\}$ LPN: 0, HPN: 1
$I_k$	ID attribute of node $k$ $I_k = \{1, 2, 3, \dots\}$
$D_k$	Data packet transmission time of node $k$
$W_k$	Waiting time of node $k$
$L_f$	Total length of frame
$L_{beacon}$ $L_{TDMA}$ $L_{RA}$	Total time length of a beacon, TDMA, RA segment
$N$	The number of time slots in a TDMA segment

#### 3.1 프레임 구조

그림 4에는 상황인식 공유 메시지의 동적 할당을 위한 프레임 구조를 보여준다. 12초 시간의 길이를 갖는 프레임은 1초 길이의 12개의 서브프레임으로 구성되었다. 대표적으로 사용하는 전술데이터링크인 Link-16가 채택하고 있는 12초 단위의 기본 프레임 구조를 유지함으로써 호환성을 유지하도록 하였다. 그리고 ADS-B 메시지와 같이 가장 짧은 주기가 1초인

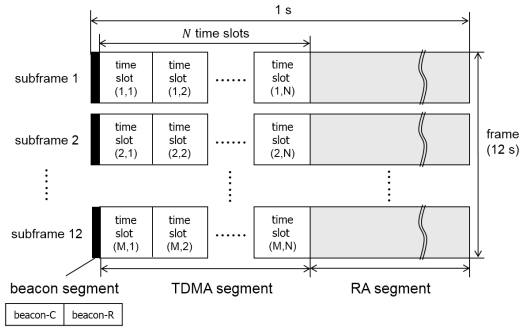


그림 4. 상황인식 공유를 위해 제안하는 프레임 구조  
Fig. 4. Proposed frame structure

전송 주기를 만족시키는 데 적합하도록 서브프레임 길이를 1초로 정하였으나, 필요에 따라 그 길이가 0.5 초인 24개의 서브프레임 등으로 수정될 수 있다. 각 서브프레임은 크게 비콘 구간, 랜덤액세스 구간, TDMA 구간으로 나누어져 있다.

비콘 구간에서는 네트워크를 관제하는 코디네이터 노드가 주기적으로 비콘 신호를 보낸다. 비콘 패킷은 시간 동기 정보, 프레임의 시간 정보, 각 노드의 슬롯 요청, 슬롯 추가 요청, 슬롯 해제 요청 등에 대한 승인/거절 정보 등의 정보를 포함하고 있다. 따라서 모든 노드들은 비콘을 통해 시간 동기를 획득하고, 프레임의 길이를 알 수 있으며, 데이터 패킷을 보내기 위한 타임 슬롯의 시작과 끝나는 시간 정보 등을 알 수 있다.

비콘 구간은 beacon-C와 beacon-R로 구성되어 있는데 beacon-C는 코디네이터가 비코닝을 하는 구간이며, beacon-R은 싱글 홉 노드가 코디네이터의 비코닝을 멀티 홉 노드로 릴레이 하여 코디네이터로부터의 전파 가능한 네트워크 범위를 연장시킬 수 있도록 설계된 구간이다.

TDMA 구간은 12개의 각 서브프레임 당  $N$ 개의 타임 슬롯으로 구성되어 있는데 설계에 의해 미리 할당 받은 노드들의 메시지 전송이 이루어질 수 있다. 또한 랜덤액세스 구간을 통해 TDMA 구간의 타임 슬롯을 예약한 노드들이 상황인식공유 메시지를 전송할 수 있다. 이 때 각 타임 슬롯 사이에는 메시지의 충돌을 막기 위한 가드타임이 존재한다. TDMA 구간은 비경쟁 기반의 구간으로써 예약 또는 사전 할당된 노드들에게 신뢰성 있는 상황인식 메시지 전송을 보장한다.

랜덤액세스 구간은 각 노드들이 슬롯 예약 및 상황인식공유를 위해 랜덤하게 접근하여 메시지를 보내는 구간이다. 이 구간은 ALOHA 기법과 같이 패킷을 보내는 시작점을 기준으로 하여 전 구간을 슬롯 구분 없

이 사용한다. 각 노드들은 랜덤액세스 구간 내의 임의의 구간에 랜덤하게 접근하여 슬롯 예약을 위한 패킷을 전송할 수 있다. 또한 TDMA 구간을 HPN이 모두 점유하는 등으로 LPN이 TDMA 구간을 사용할 수 없는 경우, 슬롯을 할당 받지 못한 노드는 임시로 상황인식 공유 메시지를 전송할 수 있다.

### 3.2 슬롯 할당

새로운 노드가 네트워크에 가입하여 상황인식 메시지 전송을 위한 전 단계로써 슬롯 할당을 요청하는 순서를 그림 5에 나타내었다. 이 때, 네트워크 가입을 위한 시간 동기 등의 절차는 적절히 행해졌다고 가정한다.

새로운 노드는 프레임 오버헤어링을 통해 비콘 및 TDMA 구간의 슬롯 할당 정보를 알 수 있다. 따라서 TDMA 구간에 어떤 타임 슬롯이 비었는지, 어떤 노드가 사용하고 있으며 그 노드의 주기, 우선순위, ID 등을 알 수 있다. 주기 정보를 알고 있기 때문에 한 프레임만 오버헤어링을 한다면 전체 프레임 중 빈 슬롯 정보를 모두 획득할 수 있다. 새로운 노드  $k$ 가 그 주기에 맞는 빈 슬롯을 검색하는 방법은 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^{L_f} T_{i,j} = 0 \tag{1}$$

$$i = x + (n-1) * T_k \tag{2}$$

$$\sum_{x=1}^{T_k} T_{x+(n-1)*T_k,j} = 0 \tag{3}$$

이 때,  $n = \{1, \dots, \lfloor L_f / T_k \rfloor\}$ ,  $j = \{1, 2, \dots, N\}$ ,  $T_k = T_{i,j} = \{0, 1, 2, 3, 4, 6, 12\}$ 이다. 수식 (1)은  $j$

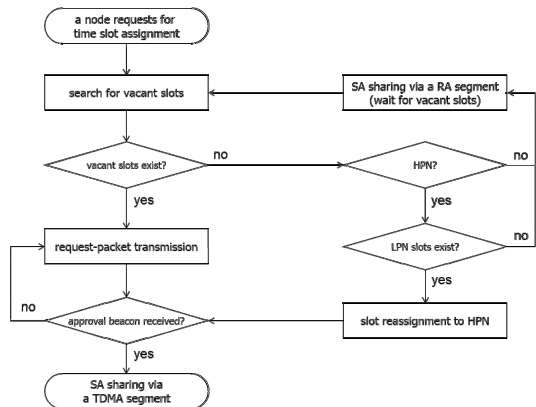


그림 5. 제안된 슬롯 할당 기법 순서도  
Fig. 5. Flowchart of proposed slot assignment scheme

번째 열의 타임 슬롯들의 주기 속성( $T_{i,j}$ )이 전부 0인 경우, 즉 특정 타임 슬롯 열이 모두 비어 있는 경우를 찾는 수식이다. 다시 말하면 각 서브프레임은 1초이므로 동일한 타임 슬롯 열에 있는 1초 주기의 타임 슬롯들이 모두 비어있는 경우를 검색하는 것이다. 이 식을 모든 주기 속성으로 확장시키기 위해 수식 (2)에서는  $i$ 를 주기에 알맞은 수로 한정하였다. 수식 (3)은 수식 (1)과 수식 (2)를 조합한 식으로써 주기 속성에 따라 빈 슬롯을 검색할 수 있으며, 그 서브프레임 번호  $i$ , 타임 슬롯 열 번호  $j$ 를 알 수 있다.

빈 슬롯을 발견한 경우에 노드  $k$ 는 검색한 서브프레임 번호  $i$ , 타임 슬롯 열 번호  $j$ 를 지정하여 노드의 속성( $T_k, P_k, I_k$ )과 함께 랜덤액세스 구간을 통해 타임 슬롯 요청 패킷을 전송한다. 이를 수신한 코디네이터는 노드  $k$ 의 슬롯 할당 요청이 유일한 경우에만 비콘을 통해서 노드  $k$ 에게 슬롯 할당을 승인하며, 노드  $k$ 는 비콘을 수신한 이후부터 TDMA 타임 슬롯을 그 주기에 따라 점유하여 사용할 수 있다.

코디네이터노드가 요청에 대해 비콘으로 거절 메시지를 송신한 경우에는 노드는 다시 슬롯할당정보를 오버헤어링 하여 할당 가능한 슬롯에 대한 요청을 다시 한다. 다만 랜덤액세스의 특성상 요청하는 패킷이 다른 요청 패킷과 충돌이 발생할 수 있는데, 패킷 충돌로 인하여 요청 메시지에 대한 승인 메시지 또는 거절 메시지 수신에 실패한 노드들은 승인 메시지가 거절 메시지를 수신할 때 까지 다음 서브프레임에 요청 메시지를 재전송한다.

### 3.3 슬롯 교환을 통한 할당(재할당)

만약, 노드  $k$ 가 수식 (3)을 통해서 빈 슬롯을 발견하지 못하였는데 노드  $k$ 가 HPN인 경우에는 슬롯 교환을 통해서 타임 슬롯을 할당받을 수 있다. LPN을 슬롯 해제시켜 랜덤액세스 구간에서 상황인식 공유를 하도록 하고 HPN인 노드  $k$ 에게는 비워진 슬롯을 차지하도록 한다. 새로운 노드  $k$ 는 수식 (4)를 이용하여 그 주기에 맞는 교환 가능한 슬롯을 검색한다.

$$\sum_{x=1}^{P_k} P_{x+(n-1)*P_k, j} = 0 \tag{4}$$

교환 가능한 슬롯을 발견한 경우에 노드  $k$ 는 검색한 서브프레임 번호  $i$ , 타임 슬롯 열 번호  $j$ 를 지정하여 노드의 속성( $T_k, P_k, I_k$ )과 함께 랜덤액세스 구간을 통해 타임 슬롯 교환 요청 패킷을 전송한다. 이를 수신한 코디네이터는 노드  $k$ 의 슬롯 교환 할당 요청이 유일한 경우에만 비콘을 통해서 노드  $k$ 에게 대기 명령을 내린다. 대기 명령을 수신한 노드  $k$ 는 슬롯 교환 대기상태를 유지하며, 코디네이터 노드는 슬롯을 점유하고 있는 노드들에게 슬롯 해제 비콘을 전송한다. 슬롯 해제 비콘을 수신한 노드들은 코디네이터 노드에게 ACK (acknowledge) 패킷을 전송하여 승인 해제의사를 표시해주고 랜덤액세스 구간으로 이동하여 상황인식 공유를 한다. 모든 노드에 대한 ACK 패킷은 수신한 코디네이터는 노드  $k$ 에게 슬롯 교환 승인 비콘을 전송하고, 노드  $k$ 는 이 비콘을 수신한 이후부터 TDMA 타임 슬롯을 그 주기에 따라 점유하여 사용할 수 있다. 타임 슬롯 재할당을 위한 슬롯 교환 요청 통지 절차는 그림 6에 도시하였다.

### 3.4 랜덤액세스 구간을 통한 임시상황인식 공유

#### 3.4.1 경쟁 기반의 상황인식 공유

만약 타임 슬롯을 할당받으려 하는 노드  $k$ 가 오버헤어링을 통해 슬롯사용정보를 확인한 결과 자신이 사용할 수 있는 슬롯이 없거나, LPN이라서 교환 요청 자체가 불가능한 경우, 또는 HPN이지만 교환 요청을 통해서도 타임 슬롯 확보가 불가능한 경우에는 해당 노드는 랜덤액세스 구간을 통해 직접 상황인식공유 메시지를 전송하게 된다. 결국 이 구간에는 우선순위가 낮은 LPN 노드들이 차지할 확률이 높는데 랜덤 액세스 구간의 특성상 충돌의 가능성으로 인하여 매 주기마다 메시지 전송을 보장할 수는 없지만, 일부 주기를 건너뛰면서라도 상황인식 공유 메시지 전송이 가능하다. LPN은 우선순위가 낮은 메시지로써 우선순위가 높은 LPN 메시지보다는 주기성 보장의 필요성이 다소 떨어진다 할 수 있으므로, 슬롯 개수의 유한성으로 인한 제약이 있는 환경에서 TDMA 슬롯 점유를 통한 신뢰성 있는 메시지 전송 기회를 HPN에게 보장하는 것이 상황인식 공유를 위해 더 타당한 선택이라 할 수 있다.

랜덤액세스 구간을 통해 임시 상황인식 공유 메시지를 전송하면서도 동시에 계속적인 슬롯 할당 정보

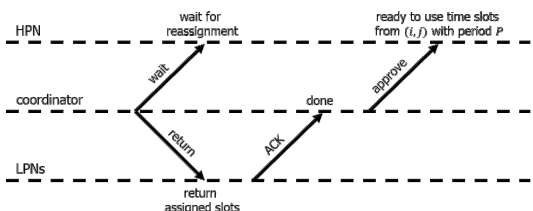


그림 6. 타임 슬롯 재할당시 슬롯 교환 요청 통지 절차  
Fig. 6. Notification procedure for slot reassignment

오버헤어링을 통해 자신이 사용할 수 있는 슬롯이 있다면 요청하여 예약 기반의 상황인식공유를 할 수 있으므로 상황의 변화에 따라서 타임 슬롯을 요청 받아서 신뢰성 있는 전송을 하게 될 수 있다.

3.4.2 부하 분산을 위한 서브프레임 선택 방법

타임 슬롯을 요청하는 노드는 슬롯 요청 패킷을 서브프레임 1번부터 12번 중 하나에서 데이터를 전송하게 된다. 그런데 제안된 기법에서는 요청하고자 할 때 즉시 요청 패킷을 보내도록 설계가 되어 있어 네트워크가 시작될 때나 연결 해제 후 재연결될 때 등의 경우에 특정 서브프레임에 부하가 집중될 가능성이 존재한다. 부하가 일부 서브프레임에 집중되면 해당 서브프레임에 요청패킷들의 충돌률이 증가함으로써 슬롯 할당 시간이 지연된다. 이를 방지하기 위해 제안하는 부하 분산 기법은 다음과 같다.

모든 노드들은 고유의 ID를 가지고 있으며 이 ID는 자연수로 이루어진 수로써 중복되지 않는다. 어떤 노드  $k$ 의 고유의 ID를  $I_k$ , 주기를  $T_k$ 라고 하면, 각 요청 노드의 전송 대기시간( $W_k$ )은 수식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$W_k = I_k \text{ mod } T_k \tag{5}$$

따라서 각 노드들은 각자의 고유의 ID에 따라서 일정 시간만큼 대기를 한 후에 슬롯 요청 패킷을 전송한다. 한 번 전송 대기시간( $W_k$ )이 정해진 경우에는 각 노드는 각각의 주기에 따라서 슬롯 요청 패킷을 전송하므로, 패킷 전송 시간( $D_k$ )은 수식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 이 때,  $n$ 은 1 이상의 자연수이다.

$$D_k = W_k + n * T_k \tag{6}$$

패킷 전송 시간( $D_k$ )에 따라서 노드들이 패킷을 전송하는 경우, 모든 노드들이 동시에 패킷 전송을 요청하고자 하더라도, 각 노드들은 주기적 특성과 ID( $I_k$ )

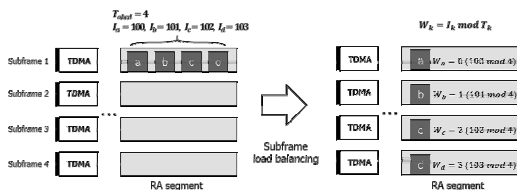


그림 7. 부하 분산 기법 설명  
Fig. 7. Description of load balancing scheme

에 따라서 결정되는 대기시간( $W_k$ )에 의해 서브프레임에 고르게 패킷이 분산된다. (그림 7)

3.5 슬롯 할당 예시

제안 기법의 이해를 돕기 위해 타임 슬롯이 노드 B부터 노드 G에게 할당되어있는 환경에서 새로운 노드인 H, I, J, K가 순서대로 할당을 요청할 경우를 그림 8에서 예로 들어 설명하였다. 12개의 서브프레임 중, 설명에 필요한 6번 서브프레임까지만 나타내었고 7번부터 12번 서브프레임은 생략하였다.

새로 네트워크에 가입한 노드 H는 주기가 3초, 우선순위 속성이 LPN인 노드이다. 이 노드는 수식 (3)을 이용하여 [2, N-1] 타임 슬롯부터 3초 주기로 빈 슬롯이 있다는 것을 발견하였고 이에 따라 타임 슬롯을 요청하여 할당받게 되었다. 그림 중 “o”로 표시한 부분이 노드 H가 할당받게 된 타임 슬롯들이다. 노드 I는 주기가 12초, 우선순위 속성이 HPN인 노드로서 수식 (3)을 이용하여 타임 슬롯 [4, N-3]부터 12초 주기의 비어있는 타임 슬롯들을 발견 후 요청하여 할당받아 사용하게 되었으며 할당 받은 타임 슬롯은 “x”로 표시하였다. 노드 J는 주기가 1초, 우선순위 속성이 HPN인 노드인데 수식 (3)을 이용하여 비어있는 슬롯을 검색한 결과 비어있는 슬롯이 없다. 따라서 주기가 1초로써 모든 세로 열의 우선순위 속성이 LPN인 노드를 검색해야 하는데, 수식 (4)를 통해 교환 가능한 LPN 노드들이 있는지를 검색한 결과, 교환 가능한 N 타임 슬롯 열을 발견하였다. N 타임 슬롯 열은 우선순위 속성이 모두 LPN으로써, 이 열을 차지하고 있는 노드 G를 랜덤 액세스 구간으로 이동시키고 HPN인 노드 K에게 이 열의 슬롯들을 사용할 수 있도록 할당해준다. 마지막으로 노드 K는 수식 (3)을 이용한 결과 빈 슬롯을 발견하지 못하였고, LPN이므로 슬롯 교환을 시도할 수 없다. 따라서 랜덤 액세스 구간을 통해서 임시적인 상황인식 공유를 하게 된다.

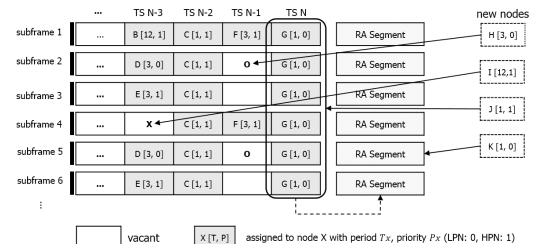


그림 8. 슬롯 할당 예시  
Fig. 8. Example of slot assignment

#### IV. 모의실험

제안한 기법의 성능을 분석하기 위하여 MATLAB 을 활용한 10,000회의 모의실험 평균값을 결과로 사용하였다. 시뮬레이션에서 사용되는 인자들과 그 값을 표 2에 표시하였다.

표 2. 시뮬레이션에서 사용되는 인자와 그 값  
Table 2. Simulation parameters and values

Parameters	Values
Data rate	115.2 kbps
Beacon packet	1500 bits/packet (13.021 ms)
SA message	276 bits/message (2.396 ms)
Request packet	50 bits/packet (0.434 ms)
$L_{RA}$	0.1, 0.2, 0.3 (s)
$T_{node}$	1, 2, 3, 4, 6, 12 (s)
$P_{node}$	0 (LPN), 1 (HPN)

##### 4.1 슬롯 할당

제안된 기법의 슬롯 할당에 걸리는 시간 성능을 평가하기 위해 제안된 기법의 랜덤액세스 구간의 길이가 각각 0.1, 0.2, 0.3초인 경우에서 실험을 실시하였다. 성능 판단의 기준으로 동등한 비교를 위하여 1초 프레임을 기준으로 수정된 USAP-MA(그림 1 하단)와 비교를 하였다. 이 때, 최악의 경우를 기준으로 하여 모든 슬롯 요청은 1번 서브프레임에서 이루어지는 것으로 가정하였다.

그림 9에서는 슬롯을 요청하는 노드에 따라 슬롯 할당에 걸리는 시간을 나타낸다. 제안된 기법에서는 랜덤액세스 구간의 길이에 무관하게 USAP-MA에 비

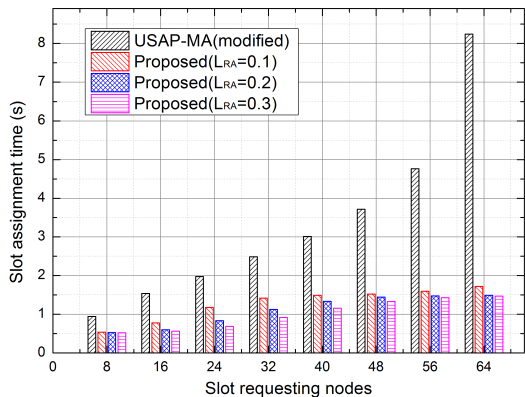


그림 9. 슬롯 할당 소요 시간  
Fig. 9. Elapsed time for slot assignment

해 슬롯 할당 시간이 적게 걸린다. 또한 랜덤액세스 구간의 길이가 길수록 슬롯 할당에 걸리는 시간이 짧아지나, 요청노드가 8개에서 64개로 증가하는 동안  $L_{RA} = 0.1$ ,  $L_{RA} = 0.2$ ,  $L_{RA} = 0.3$ 일 때 각각 1.186 초, 0.9665초, 0.9472초만큼 요청시간이 증가한데 비해, USAP-MA에서는 7.2988초가 증가하여 요청시간의 증가폭이 약 7배 정도의 차이가 나므로, 요청 노드가 많아질수록 그 성능의 차이가 더 커짐을 알 수 있다.

##### 4.2 슬롯 재할당

HPN의 경우 빈 슬롯을 검색하였으나 발견하지 못한 경우, LPN과의 슬롯 교환을 통한 재할당을 할 수 있다. 재할당 수행시 전체 할당 노드 중 TDMA 슬롯을 점유하는 HPN과 LPN의 비율이 어떻게 변화하는지 알아보는 모의실험을 실시하였다. 모의실험에서는 HPN과 LPN의 수를 랜덤하게 생성하여 서브프레임 1번에서 1,000 개의 요청 패킷을 송신하였다. 그림 10에서는 슬롯 교환에 따른 HPN의 슬롯 할당률을 LPN과의 비율로 나타내었다. 실험 결과 1번 서브프레임부터 9번 서브프레임까지는 HPN과 LPN의 비율 차이가 크지 않아 그 비율이 모두 비슷하게 증가하였다. 그러나 9번 서브프레임 이후부터는 HPN은 비율이 증가한 반면, LPN의 비율은 감소하였다. 이는 9프레임부터는 더 이상 빈 슬롯에 할당이 불가하여 슬롯 교환을 통해 LPN의 슬롯이 HPN에게 재할당 되었기 때문이다.

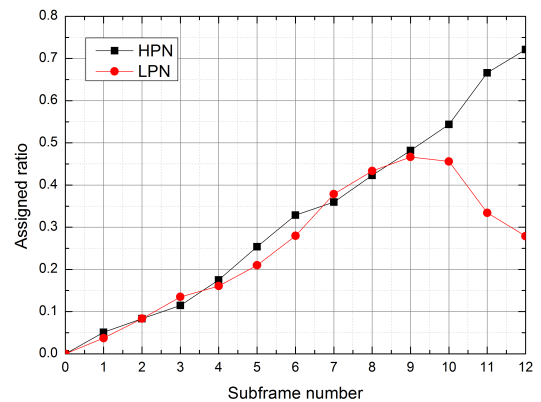


그림 10. HPN과 LPN의 할당 비율  
Fig. 10. Assigned ratio of HPN and LPN

##### 4.3 슬롯 미할당시 임시 상황인식 공유

슬롯을 할당받지 못하더라도 랜덤액세스 구간을 통한 임시 상황인식 공유가 가능하다. 랜덤액세스 구간에서 상황인식 메시지 공유할 경우의 성공률을 알아보기 위해 하나의 서브프레임의 랜덤액세스 구간에서



메시지 수를 증가시키며 실험을 진행하였다.

그림 11은 랜덤액세스 구간의 메시지 전송에 따른 수신 성공률을 나타낸다. 슬롯할당을 받지 못하여 임시 메시지전송을 하는 경우에 충돌에 따른 영향을 보여준다. 랜덤액세스 구간의 길이가 증가할수록 수신 성공률이 높아지며, 전송하는 메시지의 수가 많을수록 수신 성공률이 저하되는데, 메시지가 10개이고  $L_{RA} = 0.1$ ,  $L_{RA} = 0.2$ ,  $L_{RA} = 0.3$  일 때 각각 성공률이 0.8355, 0.9398, 0.9696로 점차 증가하였으며,  $L_{RA} = 0.1$  일 때 0.8355였던 성공률이 100개일 때에는 각각 0.0965로 약 88% 감소하였다.

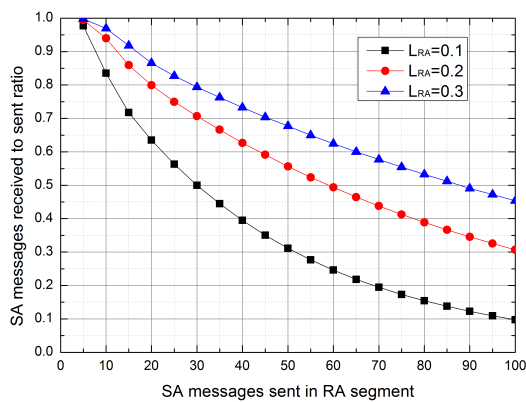


그림 11. 랜덤액세스 구간의 SA 메시지 전송 성공률  
Fig. 11. SA messages transmission success rate

#### 4.4 서브프레임간 부하 분산

네트워크가 구성된 직후나 네트워크 재설정시 등에서 네트워크 부하가 한 서브프레임에 모두 집중될 케이스와 부하 분산 방법이 적용된 케이스의 성능을 비교하였다. 실험은 1번 서브프레임에 슬롯 요청 패킷을 전송시킨 후 슬롯 할당에 걸리는 시간을 기준으로 부하 분산 기법의 효과를 판단한다.

표 3에서는 슬롯 할당 요청 패킷의 집중으로 인한 최악의 경우 및 부하 분산에 따른 효과를 비교하여 보여준다. 특정 서브프레임에 부하가 집중될 경우 최악의 경우에는 100%까지 부하가 집중될 수 있다. 그러나 부하 분산 기법 적용 이후에는 평균 8.28%의 부하 집중률을 보인다. 그림 12에서는 부하분산 기법의 적

표 3. 서브프레임 1에서 전송되는 요청 패킷의 평균 비율  
Table 3. Average request packets ratio in the subframe 1

Worst case	Proposed (load balanced)	Difference
100 %	8.28 %	91.72 %

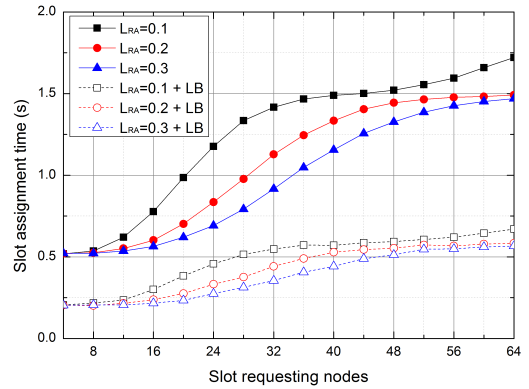


그림 12. 부하 분산 여부에 따른 슬롯 할당 시간  
Fig. 12. Slot assignment time with/without load balancing

용에 따른 슬롯 할당 시간의 감소를 보여준다. 랜덤액세스 구간의 길이에 무관하게 부하 분산 효과로 슬롯 할당에 걸리는 시간이 평균 61% 감소하였다.

## V. 결론

본 논문에서는 긴 전송 지연 시간으로 인한 슬롯의 사용성을 개선하기 위하여 가드타임이 없는 랜덤액세스 구간을 사용하는 것을 제안하였으며, 랜덤액세스 구간은 슬롯 할당을 받지 못한 경우에도 상황인식 공유를 할 수 있는 공간으로써의 추가적인 기능도 부여하였다. 또한 동적 슬롯 할당 및 해제가 가능하도록 하여 정적인 TDMA 구조의 문제점을 개선하였으며, 특정 서브프레임에 부하가 집중될 경우에 대비한 부하 분산 기법을 제안하였다. 제안된 기법을 이용하는 경우 우선순위가 높은 정보의 TDMA 타임 슬롯 점유를 통한 신뢰성 있는 상황인식 공유가 가능할 뿐만 아니라 우선순위가 낮은 정보의 최소한의 전송 보장이 가능하다. 따라서 상황인식 능력 향상을 통한 NCW 환경에서의 작전 임무 수행 능력 증대에 기여할 수 있다. 향후 제안된 기법을 분산형 구조로 확장시켜 트래픽이 많이 발생하는 경우나 작전 중 상황 등에 따라 중앙집중형 기법과 분산형 기법을 상황에 따라 전환할 수 있는 기법에 대한 연구를 수행할 예정이다.

## References

- [1] US DoD, *Network Centric warfare report to congress*, 2001.
- [2] Northrop Gruman Corporation, *Understanding*

Link-16, 2001.

- [3] K. Samuelson, E. Valovage, and D. Hall, "Enhanced ads-b research," *IEEE Aerospace Conf.*, vol. 22, no. 5, pp. 35-38, 2006.
- [4] J. Yu, et al., "Group-based frequency hopping scheme for improving multi-net performance of link-16 waveform with limited frequency band," *J. KICS*, vol. 41, no. 1, pp. 110-121, 2016.
- [5] C. Xuelin, et al., "An overview of slot assignment (SA) for TDMA," *IEEE ICSPCC*, pp. 1-5, Sept. 2015.
- [6] J.-K. Lee, et al., "Artificial collision-based dynamic slot assignment for in-band control networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 11, pp. 5985-5998, 2014.
- [7] S. Ramanathan, "A unified framework and algorithm for (T/F/C) DMA channel assignment in wireless networks," *INFOCOM'97*, vol. 2, pp. 900-907, Apr. 1997.
- [8] K. Lee, et al., "Performance analysis of link-16 waveform considering frequency remapping under PBNJ," *J. KICS*, vol. 38, no. 11, pp. 955-965, 2013.
- [9] H. Baek, et al., "Reliable dynamic TDMA scheme with new packing method for image transmission over link-16," *J. KICS*, vol. 37, no. 11, pp. 1045-1053, 2012.
- [10] H. Baek, et al., "Enhanced MAC protocol with new packing for imagery transmission in link-16," *MILCOM*, pp. 891-896, Oct. 2014.
- [11] Y. Lee, et al., "Multiple slot reservation for rapid data traffic transmission in the satellite random access channel," *J. KICS*, vol. 40, no. 10, pp. 1889-1899, 2015.
- [12] C. D. Young, "USAP multiple access: dynamic resource allocation for mobile multihop multichannel wireless networking," *MILCOM*, vol. 1, pp. 271-275, Feb. 1999.

**양 경 석 (Kyeongseok Yang)**



2014년 2월 : 아주대학교 미디어학 학사  
 2015년 3월~현재 : 아주대학교 소프트웨어특성화대학원 석사과정  
 <관심분야> 무선네트워크

**백 호 기 (Hoki Baek)**



2006년 2월 : 아주대학교 정보 및 컴퓨터공학 학사  
 2008년 2월 : 아주대학교 정보통신공학 석사  
 2014년 2월 : 아주대학교 컴퓨터공학 박사  
 2014년 3월~2015년 2월 : 아주대학교 장위국방연구소 선임연구원  
 2015년 3월~현재 : 아주대학교 국방디지털융합학과 특임교수  
 <관심분야> 전술데이터링크, 다중 접속, 시간동기, 위치인식, 무선네트워크

**박 경 미 (Kyungmi Park)**



2005년 : 고려대학교 전기전자전파공학부 학사  
 2007년 : 고려대학교 전파공학과 석사  
 2007년 2월~현재 : 국방과학연구소  
 <관심분야> 전술데이터링크

임재성 (Jaesung Lim)



1983년 2월 : 아주대학교 전자공학 학사  
1985년 2월 : KAIST 영상통신 석사  
1994년 2월 : KAIST 디지털통신 박사  
1998년 3월~현재 : 아주대학교

소프트웨어학과 정교수

2004년 3월~현재 : 아주대학교 국방전술네트워크 연구센터장

<관심분야> 이동 및 위성통신, 무선네트워크, 국방전술통신

박지현 (Ji Hyeon Park)



2003년 : 부산대학교 정보컴퓨터공학 학사  
2005년 : 부산대학교 컴퓨터공학 석사  
2005년 2월~현재 : 국방과학연구소  
<관심분야> 전술데이터링크