

# 허브 네트워크에서의 장거리 공중 전술 통신을 위한 반복 정렬 기반의 자원 스케줄링 기법

이 경 훈\*, 이 동 훈\*, 이 대 흥\*\*, 정 성 진\*\*, 최 형 진\*

## A Resource Scheduling Based on Iterative Sorting for Long-Distance Airborne Tactical Communication in Hub Network

Kyunghoon Lee\*, Dong Hun Lee\*, Dae-Hong Lee\*\*, Sung-Jin Jung\*\*, Hyung-Jin Choi\*

### 요 약

본 논문에서는 허브 네트워크 기반의 장거리 공중 전술 통신을 위한 새로운 자원 스케줄링 기법을 제안한다. 최근 세계 각국에서는 네트워크 중심전 (NCW, Network Centric Warfare)으로 변화하는 현대전의 흐름에 맞추어 공용데이터링크 (CDL, Common Data Link)의 전송속도 및 네트워킹 기능을 향상시키기 위한 기술 개발에 주력하고 있으며, 우리 군도 자립적인 차세대 대용량 CDL 기술 개발에 박차를 가하고 있다. CDL의 대표적 운용 구조인 허브 네트워크에서는 제한된 주파수 대역 내에서 다수의 UAV (Unmanned Aerial Vehicle)들과 대용량의 영상·전술 정보를 동시 다발적으로 교환하기 위해, hybrid FDMA(Frequency Division Multiple Access)/TDMA(Time Division Multiple Access) 구조를 고려할 수 있다. 그러나 UAV 별 상이한 왕복 시간 지연 (RTT, Round-Trip Time) 및 트래픽 크기로 인해 동일 주파수 대역을 점유하는 UAV 간 유휴 시간 자원이 발생하거나 불필요한 패킷 전송 지연이 발생할 수 있으며, 이는 장거리 운용 시 허브 네트워크의 자원 효율을 저하시킨다. 따라서 본 논문에서는 UAV 별 발생하는 RTT와 트래픽 크기를 기반으로 하는 반복적 정렬 알고리즘을 통해 UAV의 시간/주파수 자원을 스케줄링하는 기법을 제안한다. 성능 평가를 통해 제안 기법이 낮은 복잡도로 데이터 처리율과 패킷 지연 측면의 성능 향상이 가능함을 입증하였다.

**Key Words** : CDL, hub network, NCW, resource scheduling, UAV

### ABSTRACT

In this paper, a novel resource scheduling, which is used for hub network based long distance airborne tactical communication, is proposed. Recently, some countries of the world has concentrated on developing data rate and networking performance of CDL, striving to keep pace with modern warfare, which is changed into NCW. And our government has also developed the next generation high capacity CDL. In hub network, a typical communication structure of CDL, hybrid FDMA/TDMA can be considered to exchange high rate data among multiple UAVs simultaneously, within limited bandwidth. However, due to different RTT and traffic size of

\* 본 연구는 2013년도 삼성탈레스(주)의 재원을 지원 받아 수행되었습니다.

\*° First and Corresponding Author: College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, lyky77@skku.edu, 학생회원

\* College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, dh.lee@skku.edu, 학생회원, hjchoi1@skku.edu, 중신회원

\*\* Samsung Thales, dh84.lee@samsung.com, 정회원, sj100jung@samsung.com, 정회원

논문번호 : KICS2014-09-337, Received September 1, 2014; Revised November 7, 2014; Accepted November 7, 2014

UAV, idle time resource and unnecessary packet transmission delay can occur. And these losses can reduce entire efficiency of hub network in long distance communication. Therefore, in this paper, we propose RTT and data traffic size based UAV scheduling, which selects time/frequency resource of UAVs by using iterative sorting algorithm. The simulation results verified that the proposed scheme improves data rate and packet delay performance in low complexity.

## 1. 서 론

최근 현대전은 정보 통신 기술의 발달로 인해 첨단 정보 수집 체계로부터 획득한 정보를 전술 작전에 활용 가능해짐에 따라, 각 세대 간 구성된 네트워크를 통해 전장 상황, 전투 체계 통제, 타격 체계 통제 등의 정보를 교환하여 전투 수행 능력을 향상시키는 네트워크 중심전 (NCW, Network Centric Warfare)으로 변화하고 있으며, NCW 구현의 일환으로 무인기 (UAV, Unmanned Aerial Vehicle) 및 조기 경보 통제기와 같은 감시/정찰 체계로부터 수집한 고음량, 고해상도의 영상정보를 전송하기 위한 공용데이터링크 (CDL, Common Data Link)가 개발되었다. CDL은 영상 및 첩보 정보와 같은 정보정찰감시 (ISR, Intelligence Surveillance Reconnaissance) 정보를 정보 분석 기관에 실시간으로 전송하기 위한 대용량의 고속 데이터링크로서, 네트워크를 통한 정보의 우위를 점유하는 NCW의 구현에 있어 필수적인 요소로 고려되고 있다<sup>1,2)</sup>.

이에 따라, 미국과 같은 일부 해외 국가에서는 MP-CDL (Multi-Platform Common Data Link), DirecNet과 같은 고해상도 영상 정보 전송 및 근접항공지원 (CAS, Close Air Support)과 같은 높은 수준의 네트워크 지원이 가능하고, 최대 500km 이상의 장거리 통신이 가능한 차세대 대용량 CDL의 개발이 활발히 진행되고 있으며<sup>3,4)</sup>, 우리 군도 자립적인 대용량 CDL 체계 개발의 필요성을 인식하고 상용화 단계에 있는 한국형 공용데이터링크인 MPI-CDL (Multi-Platform Image and Intelligence Common Data Link)의 차기 버전 개발에 착수한 상태이다<sup>5,6)</sup>.

그림 1은 대표적인 차세대 대용량 CDL 중 하나인 MP-CDL의 네트워크 운용 모식도를 나타낸다. 이 중, 허브 네트워크 구조는 MP-CDL의 네트워크 운용 형태 중 하나로서, mesh 네트워크에서 요구되는 다수의 UAV 간 복잡한 스케줄링 절차나, 고속 이동성을 갖는 UAV간 통신을 위한 고성능 안테나 추적 기술이 요구되지 않아 차세대 CDL 체계를 위해 필수적으로 고려되는 운용 구조이다.

허브 네트워크 구조를 위한 매체 접근 기법으로는 크게 확률적 기법과 스케줄링 기법이 있다. CSMA (Carrier Sense Multiple Access)는 대표적인 확률적 기법으로, 구현 측면의 오버헤드는 적으나 접근 매체 간 간섭 발생이 불가피한 기법이다. 따라서 대부분의 상용 무선 시스템에서는 상대적으로 높은 구현 복잡도를 갖더라도 간섭 회피 보장이 가능한 스케줄링 기법을 고려하며, 공중 전술 통신에서는 FDMA (Frequency Division Multiple Access) 또는 TDMA (Time Division Multiple Access)가 대표적인 스케줄링 기법으로 널리 사용되고 있다<sup>5,7,8)</sup>.

이 중, MPI-CDL은 FDMA 다중접속 구조를 차용하고 있으며, MPI-CDL과의 시스템 호환성 지원을 위해 차세대 대용량 CDL 체계도 FDMA를 기반으로 다중접속 구조가 설계될 것으로 보인다<sup>9)</sup>. 그러나 UAV 별로 별도의 주파수 자원을 할당하는 일반적인 형태의 FDMA 구조는 제한된 대역폭 내에서 다수의 UAV 들로부터 대용량의 영상 정보를 수신하기에는 통신 효율이 크게 저하될 수 있다. 따라서 FDMA 구조를 기반으로 2개 이상의 UAV가 동일 주파수 대역을 시간적으로 분할하여 점유하는 hybrid FDMA/TDMA 구조를 고려할 수 있다<sup>9)</sup>.

Hybrid FDMA/TDMA를 기반으로 하는 허브 네트워크 구조에서 허브 장비는 전체 주파수 대역을 분할한 후, 이 중 동일한 주파수 대역을 사용하는 UAV들을 결정하여 UAV들 간 시간 축으로 구분하여 자원을

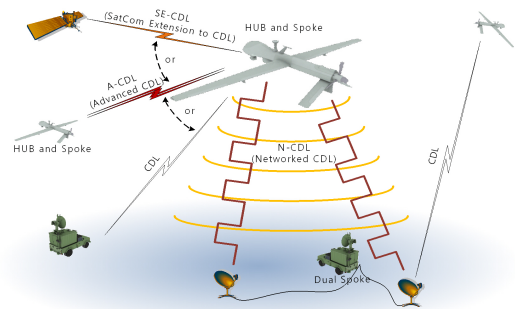


그림 1. MP-CDL 네트워크 운용 모식도<sup>3)</sup>  
Fig. 1. MP-CDL network<sup>3)</sup>

공유하도록 스케줄링을 수행한다. 이때, UAV들과 허브 장비 간 발생하는 왕복 시간 지연 (RTT, Round-Trip Time) 및 UAV의 전송 트래픽의 크기가 각각 상이하게 때문에, 이를 고려하지 않고 자원 스케줄링을 수행할 경우 특정 구간에서 시간적인 유희 자원이 발생하거나, 일부 UAV들의 패킷 전송이 지연되는 문제가 발생 가능하며, 이는 장거리 통신 운용 시 더욱 큰 폭의 성능 열화를 유발한다. 한편, 이러한 문제를 해결하기 위해 각 UAV들의 RTT 및 트래픽 크기를 기반으로 스케줄링을 수행할 수는 있으나, 현재까지 이를 고려한 적절한 스케줄링 방법이 연구된 바는 없다.

따라서 본 논문에서는 UAV의 RTT/트래픽 크기 정보를 기반으로 하는 간단한 형태의 반복 정렬 알고리즘을 통해 UAV들의 자원을 효율적으로 스케줄링하는 기법을 제안한다. 먼저 UAV간 신호 송·수신 과정을 분석한 후, 동일 자원을 사용할 UAV 조합 및 해당 조합 내에서 우선적으로 시간 자원을 스케줄링할 UAV를 결정하기 위한 RTT/트래픽 크기 정보 기반의 조건값 구성 방법을 제안하고, 해당 조건값을 기반으로 하는 반복 오름차순 정렬 알고리즘을 제안하였다. 또한, 제안하는 조건값 적용 시, RTT 크기와 트래픽 크기의 상대적인 차이가 크게 나타나는 일부 UAV들에서 발생할 수 있는 문제를 해결하기 위하여, 반복 정렬 시 적용되는 트래픽 정보의 가중치를 점진적으로 감소시키는 가중치 적용 방안도 함께 제안하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 본 논문에서 고려하는 허브 네트워크 구조 기반의 공중 전송 통신 시스템에 대해 서술하고, III장에서는 일반적인 자원 스케줄링 기법들의 문제점에 대해 분석한다. IV장에서는 RTT/트래픽 크기를 기반으로 하는 반복적 정렬 알고리즘을 통해 기존 기법 대비 향상된 데이터 전송률 및 패킷 전송 지연 성능을 갖는 새로운 자원 스케줄링 기법을 제안한다. V장에서는 기존 및 제안 기법간의 성능 비교를 통해 제안 기법의 우수성을 입증한 뒤, 마지막으로 VI장에서 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서는 허브 네트워크 구조를 갖는 공중 전송 통신 환경을 고려한다. 그림 2에 나타난 바와 같이, 허브 네트워크는 정해진 범위 내 항로에서 느린 속도로 운항하며 중계기의 역할을 수행하는 1개의 공중 허브 장비와, 상대적으로 넓은 범위에서 빠른 이동 속도로 임무를 수행하며 허브 장비와 일대다 형태의 링크를 형성하는  $N$ 개의 공중 장비 (UAV)로 구성되어

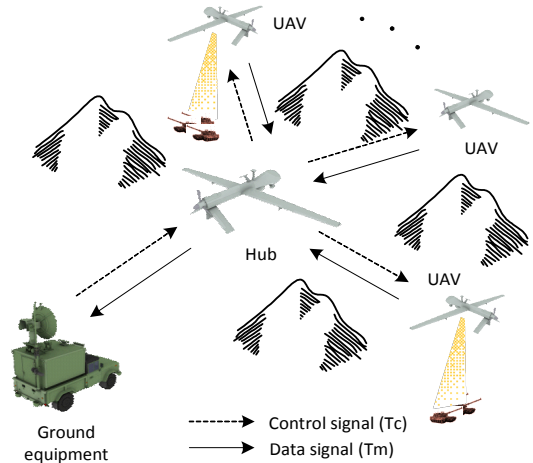


그림 2. 허브 네트워크 구조  
Fig. 2. Hub network structure

있다. 이때, 허브 장비는 전방향성 안테나, UAV는 지향성 안테나를 사용함을 가정한다.

위와 같은 구조 하에서, UAV 기반의 정보·정찰·감시 임무 수행을 위한 대표적인 운용 시나리오는 다음과 같다. 먼저, 지상 장비로부터 제어 신호를 통해 임무를 전달 받은 허브 장비는 UAV들과 주기적으로 레인징 과정을 수행한다. 레인징 과정은 preamble을 포함하는 제어 정보의 교환을 통해 두 장비간 거리를 측정하는 과정으로써, GPS (Global Positioning System) 사용이 불가능할 수 있는 전시 상황에서의 장비 간 동기화를 위한 필수 과정이다. 허브는 preamble 검출을 통해 UAV와의 왕복 시간 지연 (RTT, Round-Trip Time)의 측정이 가능하다. 이후, 허브는 순방향 링크 (Forward Link) 내 Tc (Telecontrol) 채널을 통해 주변 UAV들에게 정찰 지시 및 정보 제공 요청을 위한 제어 신호를 브로드캐스팅한다. 해당 제어 신호에는 허브의 ID, UAV의 ID, 사용 가능한 주파수 대역 정보 및 UAV의 전송 시각 등의 정보가 포함될 수 있다. 이후, UAV들은 적지의 상공에 침투해 임무를 수행하며, 역방향 링크 (Reverse Link) 내 Tm (Telemetry) 채널을 통해 수집된 ISR 정보를 허브 장비에게 전송한다. 정보를 전달받은 허브 장비는 수집된 정보를 지상으로 전송한다<sup>10)</sup>. 본 논문에서는 레인징 과정에서 UAV가 제어 신호를 통해 허브에게 전송할 데이터 트래픽의 크기를 알려줄 수 있음을 가정하고, 순방향 및 역방향 링크는 TDD (Time Division Duplexing) 형태의 이중화 구조를 사용함을 가정한다.

이때, 제한된 대역폭 내에서의 원활한 대용량 ISR 정보 수집을 위하여, 본 논문에서는 그림 3과 같이 2

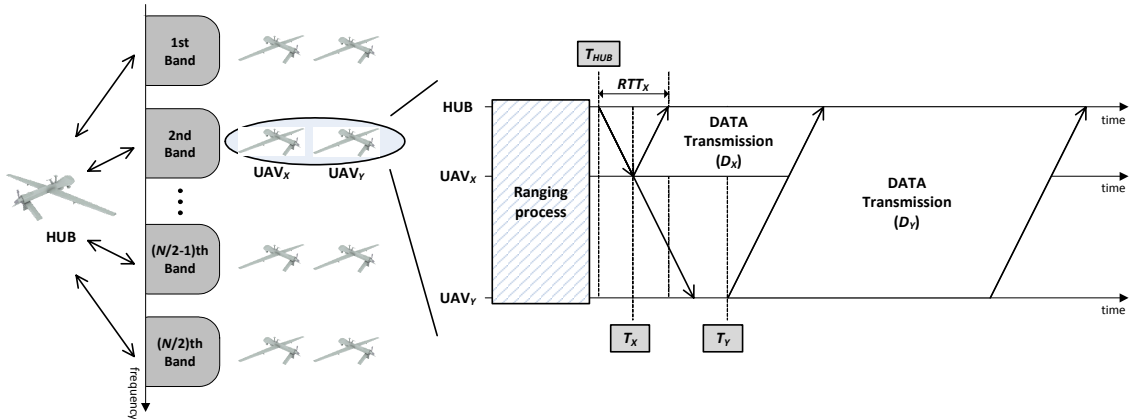


그림 3. Hybrid FDMA/TDMA에서의 자원 스케줄링  
Fig. 3. Resource scheduling in hybrid FDMA/TDMA

대의 UAV들이  $N/2$ 개의 주파수 자원 중 하나의 자원을 점유해 시간적으로 분할 사용하는 hybrid FDMA/TDMA 형태의 다중접속 구조를 가정한다. 이때, 허브 장비는 제어 신호 전송을 통해 동일 주파수 대역을 사용하는 UAV들의 전송 시각을 조정함으로써 UAV들의 신호가 시간적으로 중첩되어 수신되지 않도록 자원을 스케줄링 한다. 예를 들어, UAV<sub>x</sub>는 허브로부터 제어 신호를 수신한 직후 데이터를 전송하도록 식 (1) 과 같이 전송 시각  $T_x$ 를 조정하고, UAV<sub>y</sub>는 UAV<sub>x</sub>와 허브 간 왕복 시간 지연  $RTT_x$  및 UAV<sub>x</sub>의 데이터 트래픽 크기  $D_x$ 를 고려하여 허브와 UAV<sub>x</sub> 간 통신이 완료될 시점에 UAV<sub>y</sub>의 신호가 허브에 수신될 수 있도록 식 (2)와 같이 전송 시각  $T_y$ 를 조정한다.

$$T_x = T_{HUB} + \frac{RTT_x}{2} \quad (1)$$

$$T_y = T_{HUB} + RTT_x + D_x - \frac{RTT_y}{2} \quad (2)$$

그림 4는 본 논문에서 고려하는 프레임 구조를 나타낸다. 이는 MPI-CDL 체계와 유사한 형태의 프레임

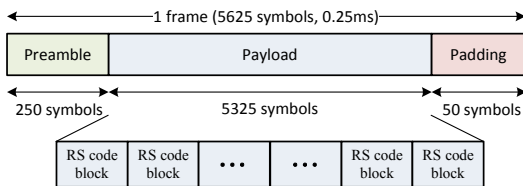


그림 4. 시스템 프레임 구조  
Fig. 4. System frame structure

구조로써, 진행 중인 체계 개발의 일환으로 본 논문에서는 모델의 주요 사양을 근사치로 표기 및 적용하였다. 그림 4에 나타난 바와 같이, 1개 프레임은 크게 preamble, payload, padding 구간으로 구성되어 있다. Preamble 구간에서는 시간/주파수 동기화, AGC (Automatic Gain Control) 및 도플러 추정·보상을 위한 참조 신호가 전송되며, padding 구간은 프레임 전송 시의 전파 지연 및 장비의 이동성을 고려한 보호 구간으로 사용된다. Payload 구간은 영상·제어 정보와 같은 데이터를 전송하는 구간이다.

### III. 일반적인 자원 스케줄링 기법들의 문제점

일반적인 무선 통신 시스템에서는 다중 경로로 인한 페이딩을 고려해 채널 특성이 수신기 입장에서 우수한 주파수 대역에 선택해 자원을 스케줄링한다. 그러나 대부분이 단일 경로 환경인 공중 통신에서는 flat 페이딩을 가정할 수 있으므로, 채널 환경에 따른 선택적인 자원 스케줄링을 적용하더라도 큰 이득을 얻기 어렵다. 본 장에서는 일반적인 장거리 공중 전송 통신 환경에서 고려할 수 있는 자원 스케줄링 기법들에 제시하고, 해당 방법들이 갖는 문제점을 분석한다.

#### 3.1 랜덤 스케줄링

가장 간단한 형태의 스케줄링 기법으로, 별도의 부가 정보를 고려하지 않고 임의의 UAV 2개가 동일한 주파수 자원을 사용하도록 스케줄링하는 기법이다. 해당 기법은 허브 장비에서 복잡한 결정 과정 없이 간단하게 구현 가능하다는 장점이 있으나, 장거리 통신 운용 시 발생하는 상당한 크기의 RTT로 인해 일부

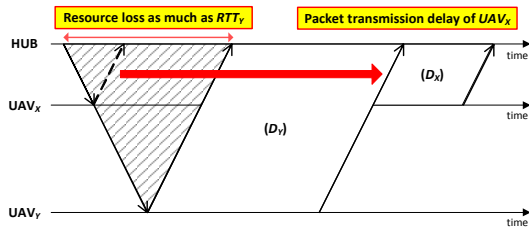


그림 5. 랜덤 스케줄링 기법의 문제점  
Fig. 5. Problems of random scheduling

UAV들의 패킷 전송이 지연되거나 허브 네트워크의 자원 사용 효율성이 저하되는 문제가 발생할 수 있다.

예를 들어, 그림 5와 같이 허브와 원거리에 위치한 UAV<sub>y</sub>가 우선적으로 스케줄링된 경우, 허브와 인접한 위치에 있는 UAV<sub>x</sub>가 작은 크기의 데이터를 전송하고자 함에도 불구하고, UAV<sub>y</sub>로 인해 불필요한 패킷 전송 지연이 발생한다. 또한 RTT<sub>y</sub> 만큼의 시간 자원 동안 UAV<sub>x</sub> 및 UAV<sub>y</sub> 모두 데이터 전송이 불가능함에 따라, 자원 사용의 효율성도 저하된다. 따라서 해당 스케줄링 기법은 신속한 정보 전달이 목적인 군정술 운용에 적합하지 않으며, UAV의 위치 및 트래픽 크기가 실시간으로 변화하는 공중 통신 환경을 고려한 합리적인 자원 운용에 한계가 있다.

### 3.2 RTT 크기 기반 스케줄링

랜덤 스케줄링 기법의 문제를 해결하기 위하여, RTT 크기를 기준으로 스케줄링의 시간적 우선순위를 결정하는 방법을 고려할 수 있다. 해당 기법은 식 (3)

$$C_i = RTT_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (3)$$

이후, P<sub>H</sub> 집합과 P<sub>L</sub> 집합에서 각각 1개씩의 UAV들을 선택하여 동일 주파수 대역에 grouping하고, 해당 주파수 자원 안에서는 P<sub>H</sub> 집합에 정렬되었던 UAV들을 우선적으로 스케줄링한다. 이는 원거리 UAV로 인해 근거리 UAV의 패킷 전송이 지연되는 문제를 해결할 뿐만 아니라, 유휴 자원 구간 동안 근거리 UAV의 트래픽 전송을 가능하게 함에 따라 자원 효율성도 개선되는 효과가 있다. 이때, UAV grouping 방법 (Step 3)으로는 그림 6에 제시된 바와 같이 UAV 그룹에서 발생하는 유휴 자원 구간의 크기 (RTT<sub>y</sub>-RTT<sub>x</sub>)가 모두 유사하도록 하는 기법을 고려한다. 이는 통신 효율 개선 효과를 모든 UAV 그룹에서 동등하게 얻도록 하기 위한 기법이다.

이와 같이, 해당 기법은 허브-UAV 간 동기화 과정에서 획득 가능한 RTT 정보들을 이용해 오름차순 정렬을 하는 비교적 간단한 알고리즘으로 구현 가능하다는 장점이 있으나, UAV들이 전송할 트래픽 크기 정보를 반영하지 않기 때문에 자원 효율성 저하 및 패

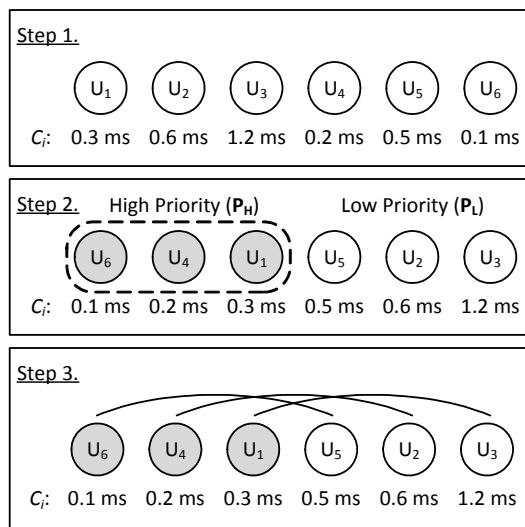


그림 6. RTT 크기 기반 스케줄링 기법  
Fig. 6. RTT size based scheduling

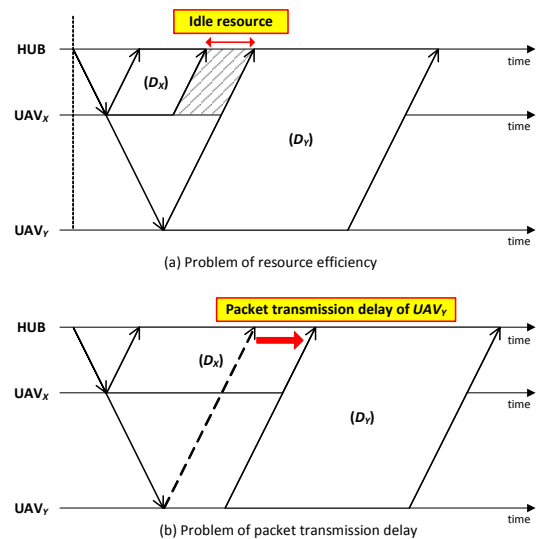


그림 7. RTT 크기 기반 스케줄링 기법의 문제점  
Fig. 7. Problems of RTT size based scheduling



킷 전송 지연 문제가 다소 남아있는 상태이다. 그림 7은 RTT 크기 기반 스케줄링 기법을 이용해 허브와 근 거리에 위치한 UAV<sub>x</sub>와 원거리에 위치한 UAV<sub>y</sub>가 동일 주파수 대역에 스케줄링된 경우를 나타낸다. 이때 그림 7.(a)와 같이 UAV<sub>x</sub>의 트래픽 크기 D<sub>x</sub>가 상당히 작은 경우, UAV<sub>x</sub>의 데이터 전송은 완료되었으나 허브-UAV<sub>y</sub>간 존재하는 RTT<sub>y</sub>로 인해 RTT<sub>y</sub>-(RTT<sub>x</sub>+D<sub>x</sub>)만큼의 유휴 자원이 여전히 발생한다. 또한, 그림 7.(b)와 같이 UAV<sub>x</sub>의 트래픽 크기 D<sub>x</sub>가 상당히 큰 경우에는 UAV<sub>x</sub>의 데이터 전송으로 인해 UAV<sub>y</sub>의 패킷 전송이 다소 지연될 수 있다.

#### IV. 제안하는 자원 스케줄링 기법

3.2절에서 언급된 문제점들을 해결하기 위하여, 각 UAV들이 전송 예정인 데이터 트래픽의 크기 정보를 함께 고려하는 스케줄링 기법을 고려할 수 있으나, RTT/트래픽 크기 정보를 모두 활용하여 자원 스케줄링을 수행하는 방법은 현재까지 제안된 바 없으며, 가능한 모든 경우의 수를 고려하기에는 연산 복잡도가 상당히 크기 때문에 실제 구현이 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 RTT/트래픽 크기 정보를 기반으로 하는 간단한 형태의 반복적 정렬 알고리즘을 통해 기존 기법 대비 통신 효율 증대 및 패킷 전송 지연 저감이 가능한 새로운 스케줄링 기법을 제안한다.

##### 4.1 RTT/트래픽 크기 기반의 조건값 구성 방법

그림 7에 나타난 바와 같이, 스케줄링 수행 시 발생 가능한 유휴 자원의 크기 M 및 패킷 전송 지연의 크기 K는 식 (4)와 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} & \text{if } RTT_y - (RTT_x + D_x) > 0, \\ & \quad [RTT_y - (RTT_x + D_x)] \rightarrow M, \\ & \text{else if } RTT_y - (RTT_x + D_x) < 0, \\ & \quad [(RTT_x + D_x) - RTT_y] \rightarrow K \end{aligned} \quad (4)$$

그렇기 때문에, M 및 K를 동시에 저감하기 위해서는 식 (5)의 조건을 만족하도록 동일 주파수 대역을 사용할 UAV 조합 (U<sub>x</sub>, U<sub>y</sub>)들을 결정해야 한다.

$$\begin{aligned} & \{ \dots, (\hat{U}_x, \hat{U}_y), \dots \} \\ & = \arg \min_{x \in P_H, y \in P_L} \left[ \sum |RTT_y - (RTT_x + D_x)| \right] \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에 나타난 바와 같이, M 및 K를 최소화하기 위해서는 P<sub>H</sub> 집합 UAV들의 RTT와 트래픽 크기를 합한 값이 P<sub>L</sub> 집합의 RTT와 근사값을 보여야 한다. 따라서 이를 고려한 자원 스케줄링을 수행하기 위해, 그림 6의 스케줄링 과정에서 오름차순 정렬 시 고려하는 조건값 C를 식 (6)과 같이 변경해야 한다.

$$C_i = \begin{cases} RTT_i + D_i, & \text{if } i \in P_H \\ RTT_i, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (6)$$

이때, 조건값 C<sub>i</sub>를 토대로 오름차순 정렬 후, UAV는 자신이 속한 우선순위 집합 (P<sub>H</sub> 또는 P<sub>L</sub>)에 따라 조건값 C<sub>i</sub>를 변경해야 하며, 이로 인해 변경된 조건값 C<sub>i</sub>를 기준으로 오름차순 정렬을 재수행해야 한다. 이와 같은 과정은 모든 UAV들의 조건값이 변하지 않을 때까지 반복적으로 수행한다.

##### 4.2 성능 개선을 위한 트래픽 가중치 적용 방안

그러나, 식 (6)의 조건값을 토대로 정렬을 수행하면, RTT와 트래픽 간 차이가 상대적으로 크게 발생하는 일부 UAV들은 특정 우선순위 집합으로 수렴하지 못할 수 있다. 예를 들어, 근거리 UAV가 상대적으로 큰 트래픽을 갖거나, 원거리 UAV가 상대적으로 작은 트래픽을 가질 경우, 트래픽 크기의 반영 여부에 따라 정렬된 우선순위 집합이 계속적으로 변경될 수 있으며, 이로 인해 제안 기법의 성능이 열화될 수 있다. 따라서 제안 기법에서는 반복 수행되는 오름차순 정렬 시, 식 (7)과 같이 P<sub>H</sub> 집합의 조건값에 적용되는 트래픽 크기 D<sub>i</sub>의 가중치를 점진적으로 감소시켜 적용하는 방법을 제안한다.

$$C_{(i,k)} = \begin{cases} RTT_i + [(I-k)/I] \times D_i, & \text{if } i \in P_H \\ RTT_i, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (7)$$

여기서, C<sub>(i,k)</sub>는 k번째 반복 정렬 시 i번째에 정렬된 UAV의 조건값을 나타내며, I는 최대 반복 정렬 횟수를 나타낸다. 이와 같은 가중치 적용 방법을 통해, (RTT<sub>i</sub>+D<sub>i</sub>) 또는 RTT<sub>i</sub> 값이 상대적으로 작은 UAV들이 높은 우선순위를 갖는 집합 P<sub>H</sub>에 정렬될 확률이 높아진다. 이는 즉, 제안 기법이 RTT 크기 기반 스케줄링 기법의 조건을 최소한으로 만족시키고 동시에, 일부 UAV들이 특정 집합에 수렴되지 못하는 문제없이 RTT/트래픽 크기 정보 기반의 자원 스케줄링이 가능함을 의미한다.

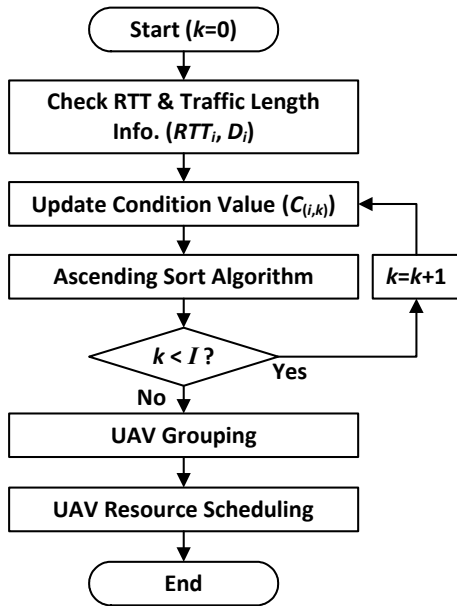


그림 8. 제안 기법의 흐름도  
Fig. 8. Flow chart of the proposed method

한편, 제안 기법의 시간 복잡도는 Big O notation에 의해  $O(N^2)$ 로 표기될 수 있다. 이는 일반적인 삽입 정렬 알고리즘에서 정렬 횟수에 따라 가중치만 달라지는 형태이므로 삽입 정렬과 동일한 시간 복잡도를 나타내며, 따라서 제안 기법이 낮은 복잡도 내에서 구현이 가능함을 보인다. 마지막으로, 그림 8은 제안 기법 수행을 위한 허브 장비의 동작 흐름도를 나타낸다.

### V. 성능 평가

본 장에서는 수식 분석, 컴퓨터 모의 실험 및 시간 복잡도 비교를 통해 기존 기법과 본 논문에서 제안하는 기법을 비교 분석하고, 제안 기법의 성능 개선 정도를 평가하였다.

#### 5.1 수식적 분석을 통한 비교

식 (4) 및 식 (5)에 의하면, 반복 정렬 기반의 스케줄링 수행 후 발생 가능한 유휴 자원의 크기  $M$  및 패킷 전송 지연의 크기  $K$ 의 총합  $E$ 는 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned}
 E &= M + K \\
 &= \sum_{x \in P_t, y \in P_H} |RTT_y - (RTT_x + D_x)| \\
 &= \sum_{x=1}^{N/2} |RTT_{x+N/2} - (RTT_x + D_x)|
 \end{aligned} \tag{8}$$

이때, 식 (5)와 같은 최소화 함수를 고려한다면, 각 스케줄링 기법은 각각 식 (9) 및 식 (10)과 같이 근사화할 수 있으며, 이로 인해 스케줄링 기법에 따라 상이한  $E$ 의 크기를 갖게 된다.

$$\begin{aligned}
 E^{RTT} &= \sum_{x=1}^{N/2} |RTT_{x+N/2} - (RTT_x + D_x)| \\
 &= \sum_{x=1}^{N/2} |(RTT_{x+N/2} - RTT_x) - D_x| \\
 &\approx \sum_{x=1}^{N/2} |D_x|
 \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
 E^{Prop} &= \sum_{x=1}^{N/2} |RTT_{x+N/2} - (RTT_x + D_x)| \\
 &\approx 0
 \end{aligned} \tag{10}$$

여기서  $E^{RTT}$ 는 RTT 크기 기반 스케줄링,  $E^{Prop}$ 는 제안하는 스케줄링 기법의  $E$ 를 나타낸다. 랜덤 스케줄링의  $E^{Rand}$ 는 별도의 근사화 과정이 없기 때문에 식 (8)의 결과와 동일하다. 따라서 각 기법들의  $E$ 는 확률적으로  $E^{Rand} > E^{RTT} > E^{Prop}$ 와 같은 크기 순서를 갖게 되므로, 제안 기법이 기존 기법들 대비 허브 네트워크의 통신 효율성 저하를 유발하는 요인들인  $M$  및  $K$ 의 크기가 확률적으로 작음을 대략적으로 확인할 수 있다.

#### 5.2 컴퓨터 모의 실험을 통한 성능 비교

표 1은 모의 실험에 적용된 주요 파라미터들을 나타낸 것이다. 모의 실험은 그림 4에 제시된 MPI-CDL 프레임 구조를 기반으로 하며, 허브 장비 기준 최대 200 km 또는 500 km 거리 범위 내에 UAV들이 위치하고, 각 UAV들은 최대  $L$  ms 크기의 데이터 트래픽을 전송하는 운용 환경을 가정하였다. 이때, 모의 실험의 간소화를 위해, 신호 송·수신 시 발생하는 UAV 및 허브의 이동 속도는 고려하지 않았으며, 매 스케줄링 수행 시 UAV들의 위치와 트래픽 크기를 임의로 변화시켜가며 성능 분석을 수행하였다. 또한, 레인징 및 AGC를 포함하는 모든 신호 처리 과정은 이상적인 성능을 가정하였다.

본 논문에서는 네트워크의 전송률 이득 및 최대 패킷 지연 시간을 성능 지표로 고려하였다. 네트워크의 전송률 이득은 랜덤 스케줄링 기법 대비 전체 주파수 대역에서 추가적으로 발생하는 여유 시간 자원을 MPI-CDL 프레임의 전송률을 기준으로 변환한 성능 지표로, 해당 스케줄링 기법을 통해 얻을 수 있는 자원 사용 효율성 측면의 이득을 확인할 수 있다. 또한,

표 1. 모의 실험 파라미터  
Table 1. Simulation parameters

Parameter	Value
The number of UAV ( $N$ )	30
The number of hub	1
Max. propagation delay ( $R=RTT/2$ )	200 km, 500 km
Position of hub	The center of R km radius circle
Position of UAVs	Uniformly random distribution in R km radius circle
Data traffic length	Uniformly random distribution within $0 \sim L$ ms
The number of frequency resource ( $N/2$ )	15
Bandwidth	28 MHz per 2 UAVs
Modulation scheme	8 PSK
Code rate of RS-CC	RS: (216,200), CC: 3/4

최대 패킷 지연 시간은 패킷 전송이 가장 늦게 완료된 UAV의 패킷 전송 완료 시각을 나타내는 성능 지표로, 신속한 정보 전달이 목적인 군전술 통신 운용을 고려한 성능 지표이다.

그림 9 및 그림 10은 발생 가능한 최대 트래픽 크기에 따른 네트워크의 전송률 이득을 보인다. 200 km 반경의 허브 네트워크 환경에서는 20회 반복 정렬한 제안 기법 적용 시,  $L=6.4$  ms 기준으로 랜덤 스케줄링 기법 대비 약 0.046 Mbps, 500 km 반경 환경에서는 약 0.1 Mbps의 성능 이득이 발생함을 확인할 수 있다. 이는 추가적인 자원 할당 없이 간단한 형태의

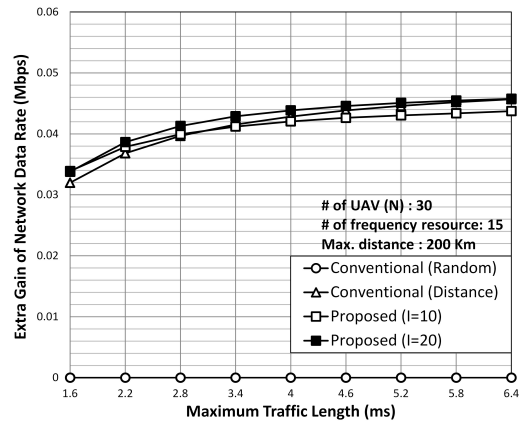


그림 9. 네트워크 전송률 이득 성능 비교 (R=200 km)  
Fig. 9. Performance comparisons of network data rate gain (R=200 km)

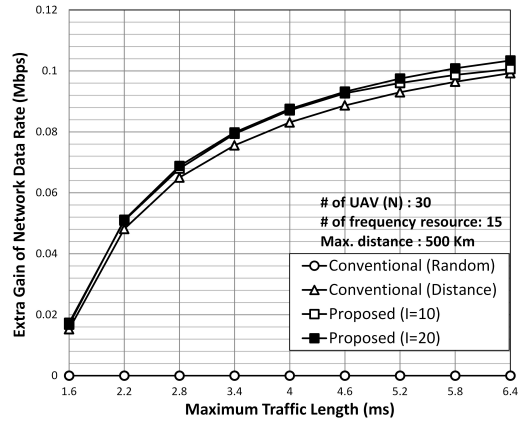


그림 10. 네트워크 전송률 이득 성능 비교 (R=500 km)  
Fig. 10. Performance comparisons of network data rate gain (R=500 km)

자원 스케줄링 기법 적용으로 획득 가능한 전송률 이득이라는 측면에서 큰 의미가 있으며, 대용량의 영상 정보를 burst 형태로 전송할 경우 제안 기법이 더욱 큰 이득을 보임을 확인할 수 있다.

그림 11 및 그림 12는 발생 가능한 최대 트래픽 크기에 따른 최대 패킷 지연 시간을 보인다. 기존의 RTT 기반 스케줄링 기법은 랜덤 스케줄링 기법 대비 약간의 성능 이득을 보이는 반면, 200 km 반경의 허브 네트워크 환경에서 20회 반복 정렬한 제안 기법 적용 시,  $L=6.4$  ms 기준으로 랜덤 스케줄링 기법 대비 약 1.85 ms, 500 km 반경 환경에서는 약 1.62 ms 만큼 최대 패킷 지연 시간의 저감이 가능함을 확인할 수 있다. 제안 기법을 통해 가장 오랜 시간이 소요되는 패킷 전송 시간이 단축됨에 따라, 대용량 트래픽 전송

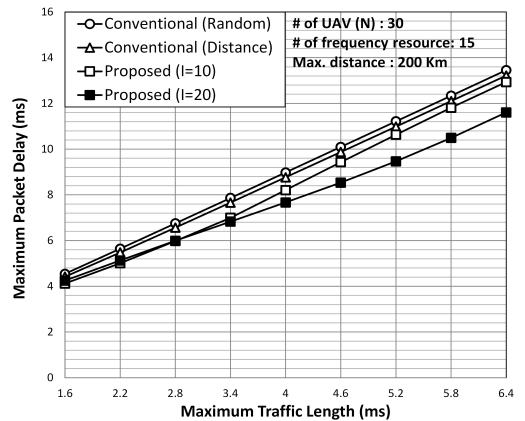


그림 11. 최대 패킷 전송 지연 성능 비교 (R=200 km)  
Fig. 11. Performance comparisons of maximum packet delay (R=200 km)



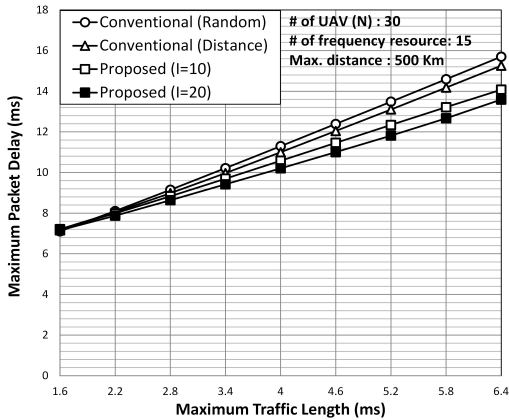


그림 12. 최대 패킷 전송 지연 성능 비교 (R=500 km)  
 Fig. 12. Performance comparisons of maximum packet delay (R=500 km)

을 고려하는 실시간 전송 통신 시스템의 운용이 더욱 용이해질 수 있음을 확인하였다.

그림 13 및 그림 14는 발생 가능한 최대 트래픽 크기에 따른 scheduling 오류율 (SER, scheduling error rate)을 보인다. 이는 제안 기법의 정확도를 증명하기 위한 성능 지표로서, 제안 기법이 기존 기법들 대비 전체 네트워크 처리율 측면의 이득이 발생하지 못한 경우 scheduling 오류가 발생하였다고 본다. 그림 13 및 그림 14에 나타난 바와 같이, 제안 기법은 랜덤 스케줄링과 비교 시 90% 이상의 scheduling 성공률을 보이며, RTT 크기 기반 스케줄링 기법과 비교 시에도 우수한 scheduling 성공률을 보임을 확인할 수 있다.

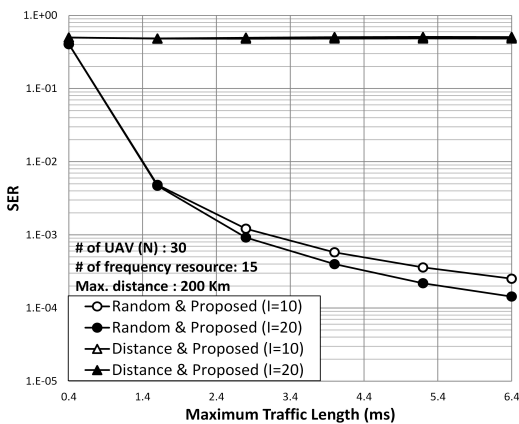


그림 13. Scheduling 오류율 성능 비교 (R=200 km)  
 Fig. 13. Performance comparisons of scheduling error rate (R=200 km)

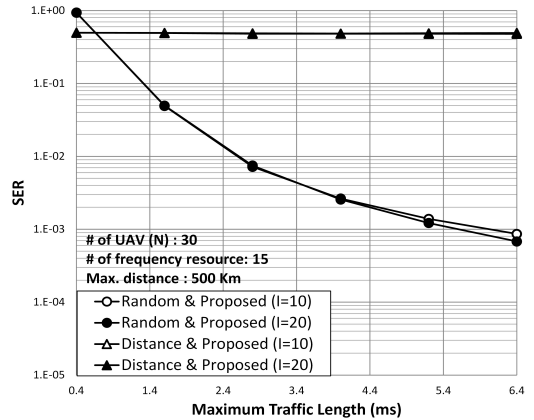


그림 14. Scheduling 오류율 성능 비교 (R=500 km)  
 Fig. 14. Performance comparisons of scheduling error rate (R=500 km)

## VI. 결 론

본 논문에서는 허브 네트워크 기반의 장거리 공중 전송 통신을 위한 새로운 자원 스케줄링 기법을 제안하였다. 본 논문에서 고려하는 시스템은 제한된 대역폭 내에서 대용량 데이터의 신속한 전송이 요구되며, 이로 인해 동일 주파수 대역을 2개 이상의 UAV들이 효율적으로 공유하여 사용할 수 있도록 하기 위한 스케줄링 기법이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 허브와 UAV간 왕복 시간 지연인 RTT 크기 정보와 UAV가 전송하고자 하는 데이터 트래픽의 크기 정보를 기반으로 조건값을 구성하여 오름차순 정렬을 수행하고, 정렬된 조건값으로 기반으로 우선순위를 부여하여 UAV들의 자원을 스케줄링하는 방법을 제안하였다. 또한, 제안 기법 적용 시 RTT 크기와 트래픽 크기가 상대적으로 큰 차이를 갖는 UAV들이 정렬되지 못하는 문제를 보완하기 위하여, 반복적인 오름차순 정렬 시 트래픽 크기의 가중치를 점진적으로 감소시켜가는 가중치 적용 방안을 제안하였다. 모의 실험을 통한 성능 비교 분석을 바탕으로 제안된 스케줄링 기법이 장거리 공중 전송 통신을 효과적으로 수행할 수 있음을 입증하였다.

## References

[1] E. S. Kim, "Concept of tactical data link employment and next C4ISR system," *Quart. J. Defense Policy Stud.*, vol. 74, pp. 49-83, 2007.

- [2] J. S. Kim, S. J. Kim, and M. Y. Lim, "Overview of tactical data link technology," *J. KISSE*, vol. 74, no. 9, pp. 18-28, 2007.
- [3] DOT&E, *Director, operational test and evaluation annual report FY*, 2003.
- [4] The Open Group, "2012 MILCOM direct technical panel," in *Proc. MILCOM 2012*, Nov. 2012.
- [5] W. Kang, J. Song, K. Lee, D.-H. Lee, S.-J. Jung, and H.-J. Choi, "Analysis of common data link technology trends for the next generation Korean common data link development," *J. KICS*, vol. 39C, no. 4, pp. 209-222, Mar. 2014.
- [6] Y.-J. Ryu, J.-H. Ryu, and U.-Y. Pak, "Aeronautical link availability analysis for the multi-platform image & intelligence common data link," *J. KICS*, vol. 37C, no. 10, pp. 965-976, Oct. 2012.
- [7] B. R. Hamilton, "Tradeoffs in coordination and performance in medium access scheduling," in *Proc. IEEE Aerospace*, pp. 1-6, Mar. 2014.
- [8] H. Baek, J. Lim, J. Koo, and I. Oh, "Inter-transmitter distance-based guard time control scheme in airborne tactical TDMA networks with long propagation delay," *J. KICS*, vol. 37C, no. 11, pp. 1104-1111, Nov. 2012.
- [9] W. Yadong, W. Qin, Z. Xiaotong, X. Jinwu, and W. Ruofei, "A Hybrid TDM-FDM MAC protocol for wireless sensor network using timestamp self-adjusting synchronization mechanism," in *Proc. IEEE PIMRC*, pp. 1-5, Sept. 2007.
- [10] J. M. Chung, K. C. Park, T. Y. Won, U. H. Oh, D. C. Ko, S. J. Hong, C. B. Yoon, H. Kim, and U. Y. Pak, "Standardization strategy for the image and intelligence common datalink," *J. KIC. Mag.*, vol. 28, no. 4, pp. 41-50, Apr. 2011.

이 경 훈 (Kyunghoon Lee)



2011년 2월 : 성균관대학교 정보통신공학부 졸업  
 2013년 2월 : 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사  
 2013년 3월~현재 : 성균관대학교 IT융합학과 박사과정  
 <관심분야> 무선통신, 이동통신, D2D 통신, 협력 통신 기술

이 동 훈 (Dong Hun Lee)



2014년 2월 : 홍익대학교 전자전기공학과 졸업  
 2014년 3월~현재 : 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정  
 <관심분야> 무선통신, 이동통신, 협력 통신 기술

이 대 흥 (Dae-Hong Lee)



2006년 2월 : 성균관대학교 전자전기공학과 졸업  
 2008년 2월 : 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사  
 2008년 10월~현재 : 삼성탈레스 근무  
 <관심분야> 전자공학, 통신공학, 군통신

정 성 진 (Sung-Jin Jung)



2001년 2월 : 조선대학교 전자공학과 졸업  
 2001년 4월~현재 : 삼성탈레스 근무  
 <관심분야> 전자공학, 통신공학

최 형 진 (Hyung-Jin Choi)



1974년 2월 : 서울대학교 전자공  
학과 졸업

1976년 2월 : 한국과학기술원 전  
기전자공학과 석사

1976년 3월~1979년 7월 : (주)금  
성사 중앙연구소 연구원

1979년 9월~1982년 : 12월 미국

Univ. of Southern California 전기공학과 (공학박사)

1982년 10월~1989년 2월 : 미국 Lincom Corp. 연구원

1989년 3월~현재 : 성균관대학교 정보통신대학 교수  
<관심분야> 디지털통신, 무선통신, 이동통신, 위성통신

및 동기화 기술을 포함한 MODEM 기술