

論文

VHF 대양 네트워크를 위한 Ad-hoc 기반 다중접속기법

구자열*, 백호기*, 임재성**

Ad-hoc based Multiple Access Scheme for VHF Oceanic Network

Jayeul Koo*, Hoki Baek* and Jaesung Lim**

ABSTRACT

In oceanic flight routes, HF radio and satellite data links have weather restrictions, long propagation delay and low data throughput. In this paper, we propose oceanic aeronautical communications scheme in the VHF band based on ad-hoc communication. The proposed scheme organizes autonomously a multi-hop network that is divided into multiple local network using aircraft to fly long-distance communication and supports a hybrid type of multiple access, which consists of random access and TDMA (Time Division Multiple Access) scheme. In addition, several algorithms to apply spatial reuse of transmission to multi-hop long range communication environments have been proposed. The proposed system proves performance improvement on delay time as an effective solution to communicate end-to-end on the oceanic flight routes and strengthens the reliability of oceanic aeronautical communication.

Key Words : VHF(Very High Frequency, 초단파), Multi-hop Network(다중홉 네트워크), Oceanic Communication(대양통신), Delay Time(지연시간), Spatial Reuse(공간적 재사용)

1. 서 론

국제 항공수요는 글로벌시대와 더불어 급성장하고 있으며, 국제비행을 통한 승객 및 물류의 수송도 기하급수적으로 증가하고 있다[1]. 대부분의 국제비행은 대양과 극지방을 비행하는 장거리 항로를 이용하고 있으며, 항공기와 지상국 간의 항공교통 통제 및 인터넷 서비스 등 공지 통신 수요도 증가하는 추세다[2].

대양항로를 비행하는 항공기와 지상의 항공교통통제소 또는 항공사 간의 공지통신 수요는 정기적 또는 수시로 발생한다. 급증하는 공지통신 수요를 지원하기 위하여 항공 데이터링크 기술도 발전하고 있는데, 대양항로에서는 HF(High

Frequency) 대역 또는 위성 네트워크를 이용하고 있으나 데이터 전송률이 낮고 기상에 의해 통신이 제한되며 채널 사용료가 과다하다[3].

극지방 항로를 포함한 장거리 대양항로에서의 공지통신은 HF대역 및 위성통신의 제한사항을 극복하기 위하여 항로를 비행하는 항공기들을 활용한 VHF(Very High Frequency)대역 릴레이 통신방안이 연구되어 오고 있다. 위성통신만으로 사용하는 인터넷 서비스를 비행하는 항공기 간 multi-hop ad-hoc 네트워크를 구성하여 병행 활용함으로써 데이터 처리율을 증가시키고 인터넷 서비스를 향상하는 연구가 있었다[4][5]. 특정 대양항로에서의 연구는 북대서양항로에서 비행중인 인접항공기 간 mesh 네트워크를 구성하여 데이터를 릴레이 전송하는 방안이 연구되었으며[6][7], 북태평양항로에서 비행하는 전 항공기들에게 TDMA(Time Division Multiple Access) 방식으로 타임슬롯을 할당하여 릴레이 네트워크를 구성하는 방안이 연구되었다[3]. 이러한 연구들은 릴레이 노드를 선정하는 방안이 구체적이지

2013년 03월 07일 접수 ~ 2013년 03월 22일 심사완료
논문심사일 (2013.03.08, 1차), (2013.03.20, 2차)

* 아주대학교 대학원 박사과정

** 아주대학교 대학원 교수

연락처, E-mail : koo69234@ajou.ac.kr

경기도 수원시 영통구 원천동 산 5번지

않아 인접 항공기를 릴레이 노드로 활용하여 chain topology를 구성함으로써 연결 노드가 과다하여 긴 전파지연시간이 수반되므로 실시간 항공 데이터 전송에는 많은 제한이 따른다.

또한, 릴레이 노드를 최적화하기 위하여 클러스터를 구성하는 기법들이 연구되어 오고 있으나 [8][9][10], 지상 통신환경에서의 연구로 전파지연시간이 긴 장거리 공중 통신환경에서의 연구가 필요하다. 북태평양 비행항로에서 로컬네트워크를 구성하여 전파지연시간을 최소화하기 위한 연구가 있었으나[11], 이는 특정항로에 국한된 통신 기법으로 극지방을 포함한 장거리 대양항로에서 유연하게 적용할 수 있는 데이터링크 연구가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 대양항로를 비행하는 항공기가 VHF대역 채널을 이용하여 지상국과 ad-hoc 통신환경에서 통신하는 방안을 연구하였다. 제안하는 기법은 장거리 통신구간을 비행하는 항공기들이 자율적으로 다중 로컬네트워크로 분할하여 다중 홉(multi-hop) 네트워크를 구성한다. 로컬네트워크 내에서는 랜덤 액세스(random access) 기법으로 영역 내 항공기들의 데이터를 종합하고, TDMA 기법으로 인접 로컬네트워크를 통하여 목적지까지 데이터를 전송한다. 이러한 방법으로 장거리 대양항로를 ad-hoc 통신환경에서 자율적이고 유연하게 로컬네트워크를 구성하여 릴레이 통신함으로써 데이터 전송 노드를 최적화하고 전파지연시간을 최소화하는 구체적인 방법을 제시한다. 또한, 제안된 기법은 공중 통신환경에서 채널을 공간적으로 재사용함으로써 성능을 개선할 수 있다. 본 연구의 성능은 제안하는 통신기법의 전파지연시간을 분석하여 대양항로 통신환경에 적합함을 입증하였다.

본 논문은 2장에서 제안기법을 구체적으로 설명하였으며, 3장에서는 성능을 분석하였고, 4장 결론 순으로 구성하였다.

II. 제안기법

본 논문은 대양 및 극지방의 장거리 대양항로를 비행하는 항공기들을 이용하여 다중 홉 네트워크를 구성, 데이터를 최종 목적지인 지상국까지 릴레이 전송하는 방안을 연구한다. 대양항로는 고도 및 경로가 분리된 여러 개의 항로를 따라 항공기들이 비행하므로 여러 개의 항로를 왕복으로 비행하는 항공기들을 이용하여 자율적으로 다중 로컬네트워크를 구성한다. 로컬네트워크 단위로 데이터를 종합하여 인접 로컬네트워크를

통하여 데이터를 지상국까지 릴레이 전송하며, 주기적으로 발생하는 각 항공기의 위치정보보고는 지상국까지 전송은 물론 인접 항공기가 수신함으로써 공중충돌 방지 등에 활용할 수 있다. 항공기들은 안정된 전파수신범위 내에서 자율적으로 ad-hoc 통신환경을 구성하며, 자유롭게 로컬네트워크의 가입 및 탈퇴를 할 수 있다. 비행 중인 항공기들은 한 개의 정해진 VHF채널을 사용하며, GPS 수신이 가능하고, 데이터는 VDL (VHF Data Link) 모드-3의 31.5kbps의 전송속도를 갖는다고 가정한다.

2.1 다중 로컬네트워크 구성

지상 VHF대역의 원거리통신범위 내에서는 항공기와 지상국 간 직접 통신이 가능하므로, 제안하는 통신구간은 지상의 VHF대역 원거리통신범위를 벗어난 대양항로를 비행하는 항공기들이 그림1과 같이 다중 로컬네트워크를 구성한다. 항공기들은 지상 원거리통신범위를 벗어나면서 자율적으로 로컬네트워크를 구성하여 항로비행 중 데이터를 지상국까지 릴레이 전송하고, 항로비행 후 로컬네트워크를 탈퇴하여 지상 VHF대역 원거리통신에 가입한다. 로컬네트워크 단위로 데이터를 종합하여 릴레이 전송함으로써 전송 노드수를 최적화하여 전파지연시간을 최소화한다. 로컬네트워크 범위는 비행 중인 항공기들의 양호한 통신가능거리를 고려하여 설정한다.

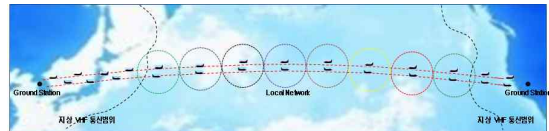


Fig 2. 대양항로에서 로컬네트워크 구성도

로컬네트워크는 그림2와 같이 여러 개의 항로를 비행하는 항공기들이 자율적으로 참여하며, 한 개의 로컬네트워크에는 한 대의 릴레이 노드와 여러 대의 터미널 노드들로 구성된다. 릴레이 노드는 터미널 노드의 데이터를 종합하여 인접 로컬네트워크로 릴레이 전송하는 항공기이다. 터미널 노드는 로컬네트워크 내에서 릴레이 노드에게 데이터를 전송하는 항공기이다. 그림2에서는 여러 개의 항로를 비행하는 항공기들이 로컬네트워크 단위로 데이터 패킷을 종합하여 인접 로컬네트워크의 릴레이 노드를 통하여 목적지까지 전송하는 릴레이 통신을 보여주고 있다. 중복으로 로컬네트워크 범위에 포함되는 터미널 노드는 가장 가까운 릴레이 노드에게 데이터를 전송한다.

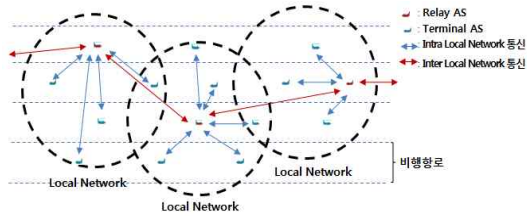


Fig 2. 로컬네트워크 통신

로컬네트워크 통신은 로컬네트워크 내 통신 (intra local network) 과 로컬네트워크 간 통신 (inter local network)으로 구분한다. 그림2에서 푸른 선은 로컬네트워크 내 통신으로 릴레이 노드가 터미널 노드들의 데이터를 종합하며, 터미널 노드들은 자율적으로 자신과 가장 가까운 릴레이 노드에게 데이터 패킷을 전송한다. 붉은 선은 로컬네트워크 간 통신으로 종합된 데이터를 목적지까지 릴레이 전송한다.

전체 프레임 구조는 그림3과 같이 프레임 길이 (Frame Period : FP) 단위로 구성되며, 한 개의 FP 내에서는 로컬네트워크 내 통신과 로컬네트워크 간 통신을 타임슬롯으로 구분한다. 각 항공기들은 대양항로 진입 시 지상국으로부터 GPS 신호로 시간을 동기화한다.

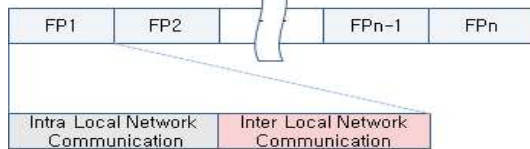


Fig 4. 로컬네트워크 통신 프레임 구조

2.2 릴레이 노드 선정

장거리 항로를 비행하는 항공기들은 비행환경에 적절하고 안정된 통신거리를 확보해야 서로의 통신 접속성을 보장할 수 있다. 비행고도 10km의 공중 무선통신환경에서의 선행 연구된 실험결과[3]은 표1과 그림4와 같으며, 표1에서 제시된 항공기의 탑재 VHF통신제원 및 비행환경에서 거리별 전파 수신신호세기를 그림4와 같이 실제 측정하였다. 수신감도 -98dBm을 기준으로 할 때 387NM까지 전파 수신이 가능하며, 실험결과를 바탕으로 로컬네트워크 운영범위기준을 표2와 같이 3개 범주로 설정하였다. Good상태는 안정된 수신이 가능하고, Normal상태는 비교적 수신이 가능하나, Bad 또는 Disconnect상태에서는 전파 수신이 불안정하다. 따라서 로컬네트워크 운영기준으로 모든 항공기들은 상호 Good상태에서

패킷을 송수신함으로써 네트워크 접속성을 보장하였다.

Table 1. 항공기 VHF 통신제원 및 비행환경

구분		성능 및 환경
송신출력		+45 dBm
수신감도		-98 dBm
송수신 안테나	이득	0 dBi
	방향	무지향성
항공기 속도		250 m/s
비행고도		10 km
실험범위		150 ~ 430 NM

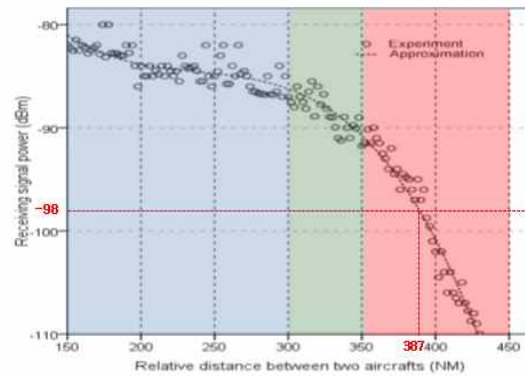


Fig 4. 거리별 VHF 전파수신세기

Table 2. 항공기 전파수신세기 운영범주

0 ~ -86 dBm (0 ~ 300 NM)	~ -90 dBm (~ 350 NM)	~ -90 dBm 이하 (350 NM ~)
Good	Normal	Bad 또는 Disconnect

모든 항공기들은 자신 및 인접 로컬네트워크에 있는 릴레이 노드와의 통신상태를 항상 측정하여 전파수신세기 범주를 자신이 속한 로컬네트워크의 릴레이 노드에게 보고한다. 릴레이 노드는 자신을 포함한 터미널 노드들의 통신상태를 지속적으로 갱신 유지하여 릴레이 노드 재선정 시 참고 자료로 활용한다.

릴레이 노드는 인접 릴레이 노드와 Good상태에서 기능을 수행하다가 Normal상태로 신호세기가 약해지면 영역 내 터미널 노드에게 그 기능을 이관한다. 릴레이 노드 이관은 인접 릴레이 노드의 통신상태가 Good이면서 자신과 거리가 가장 가까운 터미널 노드를 선정, 로컬네트워크 내 통신에서 비콘(beacon) 발송 시 전파하여 다음 FP부터 그 기능을 수행하게 한다. 터미널 노드들은 주변 릴레이 노드의 통신상태가 Good이면서 가장 가까운 릴레이 노드의 로컬네트워크 내 통신에 자율적으로 참여하여 데이터를 전송한다.

2.3 릴레이 기반 통신

로컬네트워크 내 통신은 그림5와 같이 랜덤 액세스 방식으로 이루어진다. 비콘 전송구간, 예약 요청 및 수신상태 보고구간에서는 릴레이 노드가 로컬네트워크 내 터미널 노드들에게 비콘 패킷을 발송하고, 이를 수신한 터미널 노드들은 예약요청 패킷(Request-to-Reservation)을 릴레이 노드에 전송하여 데이터 전송예약과 릴레이 노드와의 통신상태를 보고한다. 이때 터미널 노드들의 대수와 위치가 가변적이므로 slotted ALOHA 기법으로 경쟁하여 패킷을 전송한다. 예약 및 수신상태 전파구간에서는 터미널 노드들의 전송 예약순서 패킷(Grant-to-Reservation)과 전 터미널 노드들의 통신상태를 인접 릴레이 노드에 전파함으로써 릴레이 노드 이관 시 활용한다. 데이터 전송구간에서는 예약순서에 따라 터미널 노드들이 데이터를 릴레이 노드로 전송하게 된다.

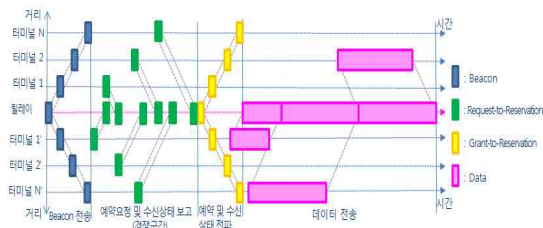


Fig 6. 로컬네트워크 내 통신

각 구간별 패킷의 내용 및 길이는 표3과 같으며, N은 로컬네트워크 내 터미널 노드들의 대수이다. 예약요청 및 수신상태 보고구간의 slotted ALOHA 프레임 구조는 그림6과 같으며, 각 타임슬롯은 예약요청패킷과 가드타임으로 구성된다.

Table 3. 전송패킷 별 내용

전송패킷	내용
Beacon	릴레이노드(8bits) 또는 다음 릴레이노드(8bits)
Request-to-Reservation	터미널노드(8bits) + data duration(3bits) + 지상VHF통신범위 확인(1bit) + 인접 릴레이노드 통신상태(30bits/3대)
Grant-to-Reservation	터미널노드(8bits×N) + 전 터미널노드 통신상태(30bits×N)
단위 Data	destination ID(8bits) + source ID(8bits) + data(84bits)



Fig 6. 예약요청구간 타임슬롯 구조

로컬네트워크 내 통신의 프레임 구조는 그림7과 같다. 장거리 대양항로를 비행하는 전 항공기들은 동일 VHF대역 주파수를 사용하므로 로컬네트워크 간 패킷 충돌을 방지하기 위하여 인접 로컬네트워크와 교차적으로 분리하여 로컬네트워크 내 통신을 수행한다. 각 구간은 비콘 발송, 예약요청 및 수신상태 보고, 예약 및 수신상태 전파, 데이터 전송 순으로 패킷을 전송한다. 예약요청구간 및 예약전파구간의 시간은 로컬네트워크 내 항공기수에 의해 가변적이므로 3장 성능분석에서 다룬다. 데이터를 전송한 터미널 노드들은 릴레이 노드의 로컬네트워크 내 통신을 확인(overhear)하여 미 전송일 경우 전송실패로 판단, 다음 FP에 데이터를 재전송한다.

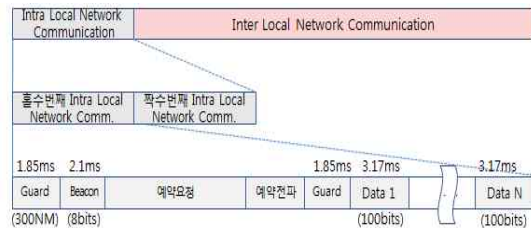


Fig. 8 로컬네트워크 내 통신 프레임 구조

릴레이 노드는 터미널 노드들의 데이터를 종합하여 2개의 큐(정기 데이터, 수시 데이터)에 저장하고, 저장된 데이터는 로컬네트워크 간 통신을 통하여 지상국까지 전송하게 된다. 큐는 전송실패 시 재전송 또는 데이터 갱신을 위해 활용된다. 릴레이 노드는 인접 릴레이 노드의 전송 데이터를 확인하여(overhear) 자신의 데이터가 미 전송일 경우 큐에 저장되어 있는 데이터를 다음 FP에 재전송한다.

전행적인 TDMA 프로토콜은 어떤 시간에 한 개의 노드만 전송이 가능하므로 전송 데이터가 많은 네트워크 환경에서는 병목현상(bottleneck)이 발생한다. 네트워크의 처리율을 개선하기 위하여 인접한 다른 노드들도 동시 데이터 전송이 가능케 하는 전파의 공간적 재사용(spatial reuse) 개념[8][12]의 적용이 요구하다. 본 논문의 통신 환경에서 전 로컬네트워크들은 상호 전파 간섭 및 충돌을 피하면서 공간적으로 재사용하기 위해 표4와 같이 3개의 로컬네트워크마다 데이터 동시 전송이 가능하다.

Table 4. 동시전송 가능 로컬네트워크

로컬네트워크 간 통신 sub-frame	sub-frame 1	sub-frame 2	sub-frame 3
동시 전송이 가능한 로컬네트워크	1, 4, 7,..	2, 5, 8,..	3, 6, 9,..

그림8은 로컬네트워크 1 과 4, 2 와 5, 3 과 6 이 로컬네트워크 간 통신을 동시에 수행하는 서브 프레임 구조를 보여 주고 있다.



Fig 8. 전파의 공간적 재사용

데이터 전송 이후 로컬네트워크 내 통신이 수행되므로 항공기의 전송 데이터가 많을시 로컬네트워크 내 통신은 오버헤드로 존재하게 된다. 따라서 전송 데이터양 및 발생빈도에 따라 그림9와 같이 가변적으로 공간적 재사용 주기(spatial reuse cycle)을 조절할 수 있다.

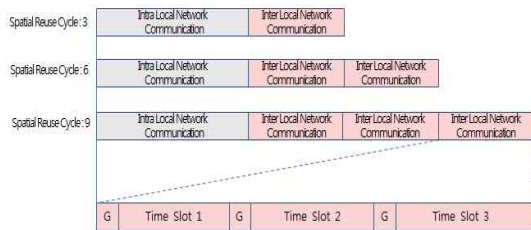


Fig 10. 공간적 재사용 주기별 프레임 구조

2.4 로컬네트워크 가입 및 탈퇴

항공기가 지상의 VHF대역 원격통신범위를 벗어나 장거리 대양항로에 진입 시 로컬네트워크에 가입하게 된다. 항공기들은 미리 정해진 VHF 주파수로 인접 릴레이 노드의 전파 수신세기를 점검하여 Good일 경우 로컬네트워크 내 통신을 수행하여 터미널 노드로 가입하며, Normal일 경우 자신이 릴레이 노드 기능을 수행한다.

항공기들은 대양항로를 벗어날 경우 로컬네트워크를 탈퇴하게 된다. 터미널 노드들은 지상 원격통신범위 진입 시 로컬네트워크 내 통신의 예약요청 패킷으로 보고 후 로컬네트워크를 탈퇴하여 VDL로 지상국과 직접 통신하게 된다. 릴레이 노드는 지상 원격통신범위 내 진입 시에도 계속 기능을 수행하다가 자신의 로컬네트워크 내 전 터미널 노드들이 모두 탈퇴한 것을 확인한 후 자신도 VDL로 전환하여 지상국과 통신하며, 그 과정은 그림10에서 보여주고 있다. 대양항로 중간 구간에서 항공기의 로컬네트워크 임의 가입 및 탈퇴도 위와 같은 과정으로 이루어진다.

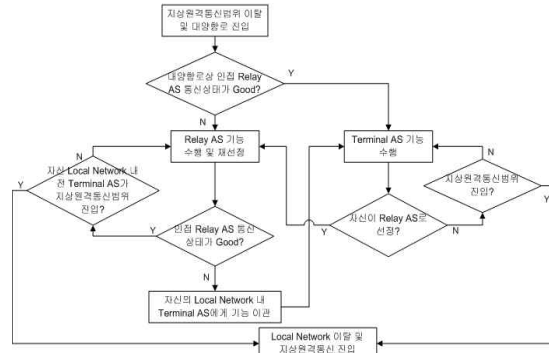


Fig 10. 항공기의 로컬네트워크 가입 및 탈퇴

III. 성능분석

제안하는 통신기법은 장거리대양항로에서 데이터를 릴레이 전송하는 것으로 데이터 전송성능은 전파 지연시간(delay time)이 매우 중요하다. 성능분석은 전파 지연시간의 기대치를 분석하여 장거리 항공통신 운영에 적합함을 입증한다.

제안기법은 랜덤 액세스와 TDMA 기법을 융합한 통신기법으로 각 구간을 구분하여 전파 지연시간을 분석한다. 전체 기대되는 지연시간 $E[D]$ 는 식(1)과 같이 랜덤 액세스 구간의 지연시간 $E[D_{RA}]$ 와 TDMA 구간의 지연시간 $E[D_{TDMA}]$ 의 합이 된다.

$$E[D] = E[D_{RA}] + E[D_{TDMA}] \quad (1)$$

3.1 랜덤 액세스 구간 지연시간 분석

로컬네트워크 내 통신구간에서의 랜덤 액세스 지연시간은 식(2)와 같이 예약요청구간에서 발생하는 패킷의 전송 평균 지연시간 $E[D_{RA,RR}]$ 과 예약요청구간 이후 로컬네트워크 간 통신 이전 구간에서의 전송 평균 지연시간 $E[D_{RA,Intra}]$ 의 합이 된다.

$$E[D_{RA}] = E[D_{RA-RR}] + E[D_{RA-Intra}] \quad (2)$$

$E[D_{RA,RR}]$ 은 식(3)과 같이 한 개의 랜덤 액세스 (random access : RA) 슬롯에 전송되는 패킷들의 전송 평균시간 T'' 와 재전송시간 $E[N_r] \times E[R]$, 그리고 최대전파지연시간으로 구성된다. $E[N_r]$ 은 패킷 재전송 평균치이며 $E[R]$ 은 패킷 전송 간 평균시간이다.

$$E[D_{RA-RR}] = \frac{1}{2} T'' + E[N_r] \times E[R] + T'' + \text{최대전파지연시간} \quad (3)$$

제안하는 통신기법의 프레임 구조는 그림11과

같다. FP 전파시간은 T_{Frame} 이며, 로컬네트워크 내/간 구간의 전파시간은 T_{Intra}/T_{Inter} 이고, 랜덤 액세스 및 TDMA 각 구간의 전파시간은 T_B, T_R, T_G, T_D, T_S 이다. 예약요청구간에서 랜덤 액세스는 slotted ALOHA 기법으로 수행되며, RA 슬롯은 M 개이고, 각 슬롯들은 최대전파지연시간과 전송요청패킷(Request-to-Reservation) 전송시간으로 구성된다. T_{Inter} 구간의 TDMA 타임슬롯은 전파의 공간적 재사용 주기(spatial reuse cycle) 3으로 가정한다.

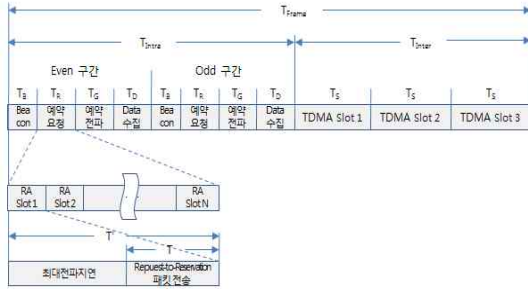


Fig 11. FP 프레임 구조 및 구간별 전파시간

각 구간별 전파시간은 표3과 그림6, 그림7에서 제시한 패킷 길이 및 전송속도에 의해서 정해진다. 한 개의 로컬네트워크를 구성하는 항공기수 (N)은 항공기 간 최소분리간격기준 50NM[3]과 왕복항로를 가정할 때 12대의 항공기로 구성되며, 전 항공기들은 100bits 단위로 데이터를 전송한다면 각 구간별 전파시간은 표5와 같고, 이때 M 값은 타임슬롯의 개수이다.

Table 5. 각 구간별 전파시간

전파구간	전파시간(msec)
T	1.33
T'	3.18
T_B	2.1
T_R	$3.18 \times M$
T_G	13.27
T_D	36.72
T_S	38.1
T_{Intra}	$104.18 + 2(3.18M)$
T_{Inter}	119.85
T_{Frame}	$224.03 + 2(3.18M)$

한 개의 RA 슬롯에 전송되는 패킷들의 전송 평균시간 T'' 는 식(4)와 같이 이루어지며, FP 구간 중 RA 슬롯 이전에 생성된 패킷들을 전체 RA 슬롯들에 균등히 배분하여 전송한다.

$$T'' = T' + \frac{\left(T_{Frame} - \frac{T_R}{2} - T'\right)}{M} \quad (4)$$

Slotted ALOHA 기법에서 패킷은 Poisson 분포를 따라 도착하므로 단위시간당 전송을 시도하는 평균 패킷수 G 는 식(5)와 같이 초당 패킷수 λ 와 패킷 전송시간 T 의 곱이 된다.

$$G = \lambda T \quad (5)$$

G 는 한 개의 RA 슬롯에 도착하는 k 개 패킷의 분포함수로 표현하면 식(6)과 같으며, k 가 1일 때 처리율(throughput) S 가 된다.

$$P[k] = \left| \frac{G^k}{k!} e^{-G} \right|_{k=1} = G \times e^{-G} = S \quad (6)$$

전송에 성공한 패킷 당 전송 시도 평균치 $E[N]$ 은 식(7)과 같으며, 패킷 재전송 평균치 $E[N_r]$ 은 식(8)과 같고, $E[R]$ 은 T_{Frame} 이다.

$$E[N] = \frac{G}{S} = \frac{G}{G \times e^{-G}} = e^G \quad (7)$$

$$E[N_r] = E[N] - 1 = e^G - 1 \quad (8)$$

제안하는 기법은 로컬네트워크 간 패킷충돌을 방지하기 위하여 인접 로컬네트워크를 홀수(odd), 짝수(even)로 구분하여 그림11과 같이 통신한다. $E[D_{RA-Intra}]$ 는 짝수구간에서의 최악의 경우(worst case)와 홀수구간에서의 최상의 경우(best case)의 평균 지연시간을 계산하면 식(9), 식(10), 식(11)과 같다.

$$\text{worst case} : 2T_G + 2T_D + T_B + T_R + \frac{T_R}{2} \quad (9)$$

$$\text{best case} : T_G + T_D + \frac{T_R}{2} \quad (10)$$

$$E[D_{RA-Intra}] : \frac{3T_G + 3T_D + T_B + 2T_R}{2} = \frac{T_{Intra} + T_G + T_D - T_B}{2} \quad (11)$$

이상의 로컬네트워크 내 통신에서의 랜덤 액세스 지연시간을 종합하면 식(12)와 같으며, 변수 M 과 λ 의 함수가 된다.

$$E[D_{RA}] = E[D_{RA-RR}] + E[D_{RA-Intra}] = [(e^{\lambda T} - 1) \times T_{Frame}] + \frac{3}{2} \left[T' + \frac{\left(T_{Frame} - \frac{T_R}{2} - T'\right)}{M} \right] + \left[\frac{(T_{Intra} + T_G + T_D + T_B)}{2} \right] + \text{최대전파지연시간} \quad (12)$$

3.2 TDMA 구간 지연시간 분석

로컬네트워크 간 통신구간에서의 TDMA 지연시간은 각 릴레이 노드마다 예상되는 평균 지연시간 D_{TDMA} 을 합한 것으로 식(13)과 같다.

$$E[D_{TDMA}] = \sum_{k=1}^{\beta} \left\{ \frac{1}{k} \times D_{TDMA}[H_{MAX}(k)] \right\} \quad (13)$$

$H_{MAX}(k)$ 는 데이터의 최종 목적지가 대양항로 양 끝단에 있는 지상국이므로 릴레이 노드 좌우에 위치한 지상국까지의 최대 홉(hop)수를 의미한다. 그림12는 로컬네트워크 간 통신의 릴레이 홉수를 표현한 것으로, 데이터 전송출발(Source) 노드에서 목적지(Destination) 노드까지 중간 홉수를 β 라 할 때, 어느 릴레이 노드의 출발/목적지 노드까지의 홉수 H_L/H_R 중 최대치가 $H_{MAX}(k)$ 이 된다.

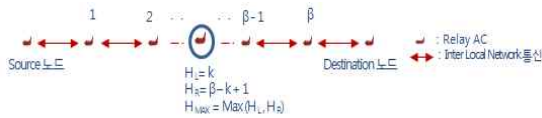


Fig 12. 로컬네트워크 간 통신의 릴레이 홉수

식(13)의 $D_{TDMA}[H_{MAX}(k)]$ 는 릴레이 노드들 간 최대 홉수에 있는 목적지까지의 지연시간이므로 식(3)과 같은 개념으로 계산하면 식(14)와 같다.

$$D_{TDMA}[H_{MAX}(k)] = \frac{1}{2} T_{Inter} + [H_{MAX}(k) - 1] \times T_{Frame} + T_{Inter} + \text{전파지연시간} \quad (14)$$

3.3 성능분석 결과

랜덤 액세스구간의 전파지연시간 $E[D_{RA}]$ 는 식(12)와 같이 RA 슬롯개수 M , 한 개의 로컬네트워크에서 초당 발생하는 패킷개수 λ 의 함수이다. λ 증가에 따른 지연시간 $E[D_{RA}]$ 의 변화는 그림 13과 같이 λ 값이 적을수록 지연시간이 작고, λ 값이 증가되면서 지연시간도 늘어난다. 슬롯개수 M 이 1일 때에 비해 3, 5, 10일 때의 곡선이 λ 값 1,000까지는 비슷하게 증가하지만 그 이상에서는 역전되는 현상이 발생하지만, 그 차이가 1초 이내 미약하게 발생한다.

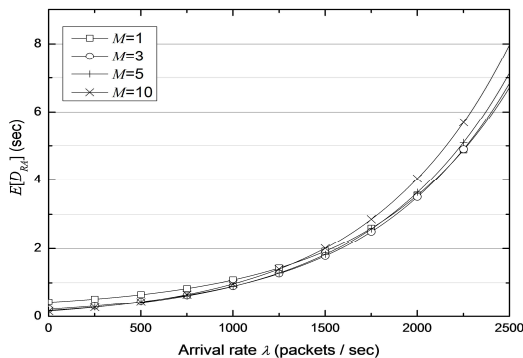


Fig 13. 랜덤 액세스구간에서 전파지연시간

TDMA구간에서의 전파지연시간 $E[D_{TDMA}]$ 는 식(13), (14)와 같이 M 과 릴레이 중간 홉수 β 의 함수이다. β 증가에 따른 지연시간 $E[D_{TDMA}]$ 의 변화는 그림14와 같이 랜덤 액세스구간과 유사하게 β 값이 적을수록 지연시간이 작고, β 값이 증가되면서 지연시간도 늘어난다. 슬롯개수 M 값에 따라 β 값이 증가하면서 지연시간의 차이도 늘어나게 되므로 릴레이 연결 홉수에 따라 적절하게 M 값을 선택하여 적용할 필요가 있다.

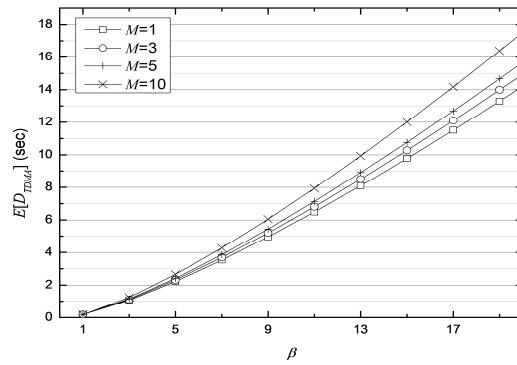


Fig 14. TDMA구간에서 전파지연시간

랜덤 액세스와 TDMA 구간을 종합한 전체 FP 구간에서의 전파지연시간 $E[D]$ 는 식(1), (12), (13)과 같이 변수 M, β, λ 의 함수이다. $M=1,3,5$ 와 $\beta=10,20$ 으로 가정하여 그래프로 그리면 그림15와 같다. 다양한 M 값에 따른 랜덤 액세스구간에서의 지연시간 차이가 미세하므로 주로 TDMA구간에서의 지연시간 차이가 전체 전파지연시간을 좌우하게 된다. $\beta=10$ 일 때에 비해 $\beta=20$ 일 때 지연시간은 2배 이상 차이가 발생하므로 릴레이 연결 홉수가 적을 때 전파지연시간이 감소하게 된다. 장거리 통신환경인 대양항로에서 인접 항공기마다 연결하는 chain topology에 비해 제안하는 기법이 전파지연시간을 최소화함으로써 실시간 데이터 전송에 적합하다고 볼 수 있다.

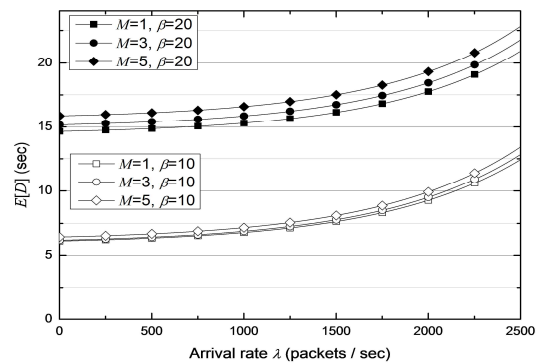


Fig 15. 전체 FP구간에서 전파지연시간

IV. 결 론

대양항로를 비행하는 항공기들은 지상국과의 통신으로 HF대역 또는 위성 네트워크로 통신하고 있으나, 낮은 전송율과 고비용으로 이용하는데 제한이 따른다. 본 연구는 대양 및 극지방의 장거리 항로를 비행하는 항공기들을 이용하여 ad-hoc 환경에서 multi-hop 릴레이 네트워크를 구성하고, 릴레이 홉수를 최소화하여 전파지연시간을 줄이면서 데이터 처리량을 향상하는 방안을 제안하였다. 또한, 장거리통신에서 타임슬롯을 공간적으로 재사용하도록 설계하여 많은 항공기들의 데이터 동시 전송이 가능토록 하였으며, 비행중인 항공기들의 정기적인 위치보고정보를 주변 항공기들이 공유할 수 있으므로 공중충돌 방지에도 활용 가능하다. 제안하는 통신기법을 항공통신의 주요 성능요소인 전파지연시간으로 분석하여 장거리 통신환경인 대양항로에 적합한지를 입증하였다.

참고문헌

- [1] www.boeing.com, "Current Market Outlook", Boeing Company, 2012.
- [2] 국토해양부, "제1차 항공정책기본계획(2010~2014)", 국토해양부, 2009.
- [3] H. D. Tu and S. Shimamoto, "Mobile Ad-Hoc Network Based Relaying Data System", International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC), pp. 33-44, vol. 1, no. 1, April 2009.
- [4] E. Sakhaee, A. Jamalipour, and N. Kato, "Aeronautical Ad Hoc Networks," IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp. 246-251, 2006.
- [5] K. Karras, T. Kyritsis, D. Yannis, and G. Bogdos, "Applicability of Mobile Ad Hoc Networks in an Aeronautical Environment", International Conference RoEduNet, 2007.
- [6] D. Medina, F. Hoffmann, S. Ayaz, and C. Rokitansky, "Feasibility of an Aeronautical Mobile Ad Hoc Network Over the North Atlantic Corridor", IEEE SECON, pp. 109-116, 2008.
- [7] D. Medina, F. Hoffmann, F. Rossetto, and C. Rokitansky, "A Geographic Routing Strategy

for North Atlantic In-Flight Access Via Airborne Mesh Networking", IEEE/ACM Transactions on Networking, pp. 1-14, vol. PP, issue. 99, 2011.

- [8] C. R. Lin and M. Gerla, "Adaptive clustering for mobile wireless networks," IEEE J. Sel. Areas Communication, vol. 15, no. 7, pp. 1265-1275, 1997.
- [9] C. R. Lin and M. Gerla, "Asynchronous multimedia multihop wireless networks," Proc. IEEE INFOCOM, vol. 1, pp. 118-125, 1997.
- [10] R. Ramanathan and M. Steenstrup, "Hierarchically-organized, multihop mobile wireless networks for quality-of-service support," ACM/Baltzer Mobile Networks and Applications, vol. 3, no. 1, pp. 101-119, 1998.
- [11] 구자열, "대양항로에서 장거리 공대지통신을 위한 VHF Relay Network", 한국항공운항학회, vol. 20, no. 3, pp. 22-27, 2012.
- [12] R. Diamant and L. Lampe, "A Hybrid Spatial Reuse MAS Protocol for Ad-Hoc Underwater Acoustic Communication Networks", IEEE International Conference on Communications Workshops(ICC), pp. 1-5, 2010.