

항공통신에서 효율적인 RF 주파수 활용을 위한 항공용 TDMA 변형 프로토콜

The Modified Aviation TDMA Protocol for an Improvement in Aeronautical RF Spectrum Utilization

박 효 달*

Hyo Dal Park*

요 약

본 논문에서는 항공교통량이 급증함에 따라 항공통신용 주파수를 효율적으로 활용하려는 방안으로 채널 대역폭을 25 kHz에서 8.33 kHz로 줄이고 매체접속제어 프로토콜은 기존의 CSMA 방식을 사용하려는 유럽 방안과 채널 대역폭을 그대로 유지하면서 4개의 슬롯을 가진 TDMA 방식을 사용하려는 미국 방안의 장점을 살리면서 보다 높은 성능을 갖는 변형된 항공용 TDMA 프로토콜을 제안하였다. 변형된 항공용 TDMA 방식에서는 지대 공 메시지 전송과 공대지 메시지 전송에 각각 다른 채널을 사용하며, 항공기와 지상국 간의 메시지 전송은 항공기가 각자의 그룹에 할당된 메시지 슬롯기간에만 채널 사용을 예약한 후 승인을 받아 전송하는 방식을 따른다. 성능 분석 및 모의 실험 결과, 변형된 항공용 TDMA 프로토콜을 사용하였을 때 보다 높은 채널 효율을 얻을 수 있었으며, 이 결과는 변형된 항공용 TDMA 프로토콜이 항공통신에서 사용하기에 적합하다는 것을 보여준다.

Abstract

In this paper, the modified aviation TDMA protocol that can improve the aeronautical communication spectrum utilization is studied to satisfy the increasing air traffic demands. Currently European states proposed the scheme reducing the channel spacing from current 25 kHz to 8.33 kHz and U. S. FAA proposed the system using TDMA technique that divides access into four parallel circuits. The modified aviation TDMA protocol can complement the defects of these current systems. In modified aviation TDMA protocol, message channel that is used between aircraft and ground station is divided into uplink channel and downlink channel. After receiving the acknowledgement of the reservation request, aircraft sends messages at the allocated slots. Numerical analysis and simulation results show that the modified aviation TDMA scheme has high channel efficiency in the aviation environment.

I. 서 론

항공통신이란 항공기와 지상시설 사이, 지상시설

과 지상시설 사이, 항공기와 항공기 사이의 정보 전달과 교환을 의미한다. 즉, 항공기를 비행 준비 단계에서 목적지에 도착할 때까지 안전하고 효율적이며 보다 경제적으로 운항하기 위해 다양한 정보 교

*인하대학교 전자공학과 (Dept. of Electronics, Inha Univ.)

· 논문번호 : 97-1-5

· 접수일자 : 1997년 10월 5일

· 이 논문은 인하대학교 교내 연구비에 의하여 연구됨.

환이 필요하게 되는데, 이러한 항공 운항에 관련된 정보의 전달과 교환을 항공통신이라 한다.

국제통신연합(ITU)은 처음에 항공용 VHF 통신 주파수의 밴드를 118 MHz~132 MHz로 할당 하였으나, 상위 주파수를 136 MHz로 확장하였으며, 1990년대에 들어와서는 다시 137 MHz로 확장 하기에 이르렀다. 또한, 채널 대역폭을 과거에는 100 kHz를 사용하다가 50 kHz로 줄였으나, 현재는 25 kHz의 대역폭으로 다시 감소하여 사용하고 있는 실정이다. 따라서, 현재 항공통신용으로는 최 하 118 MHz에서 최고 137 MHz의 760개 채널을 이용할 수 있는 실정이다.

그러나, 항공통신의 수요는 계속적으로 증가할 것으로 예상되며, 이에 따른 효율적인 주파수 이용 방안이 요구되어지고 있는 실정이다.

본 논문에서는 채널 대역폭을 1/3로 줄이려는 유럽 국가들의 방안과 TDMA 방식을 사용하려는 미국 연방항공국(FAA) 방안의 장점을 살리면서 보다 높은 성능을 갖는 매체접속제어 프로토콜을 설계하여 앞으로의 항공교통 수요 증가에 효과적으로 대처할 수 있도록 하였으며, 이 프로토콜의 성능을 분석하고, 모의실험을 통한 성능 검증을 실시한 후 기존 방식의 매체접속제어 프로토콜과 비교·분석하였다.

II. 항공용 주파수의 효율적 이용 방안

118 MHz~137 MHz 주파수 대역을 사용하는 항공용 VHF 통신은 현재 25 kHz의 대역폭을 이용하여 통신하고 있으나, 계속적으로 항공교통량이 증가하여 2000년대에는 기존의 시스템으로 전체 항공교통 수요를 충족시킬 수 없는 실정이다. 이에 유럽 국가들은 VHF 주파수의 혼잡을 방지하기 위해 매체접속제어 프로토콜은 기존의 CSMA 방식을 유지하고, 채널 대역폭을 8.33 kHz로 줄여 채널 수를 3배로 늘이는 방안을 연구 중이며, 미국 FAA는 미래의 디지털 음성/데이터통신 시스템을 위해 25 kHz 채널 대역폭을 유지하면서 4개의 시간 슬롯을 갖는 TDMA 방식을 사용하여 4배의 채널 증가 효과를 얻는 방안을 연구 중에 있다[1][2][10][11].

2-1 채널 대역폭 감소 방안

현재 일부 서부 유럽에서는 항공교통량이 폭주하여 1997년 이후에는 항공교통의 혼잡문제가 심각하게 대두될 것으로 예상된다. 따라서, 유럽 국가들은 TDMA 시스템이 구축되는 동안에도 계속적으로 향상된 항공교통 서비스를 제공하기 위해서 현재의 25 kHz 채널 대역폭을 8.33 kHz로 줄여서 채널을 3배로 증가시키려는 방안을 연구 중에 있다. 8.33 kHz로 채널 대역폭을 줄이는 방안은 매체접속제어 프로토콜로 현재의 CSMA 방식을 그대로 사용하는.

채널 대역폭을 줄이기 위해서는 송신기에서 보내는 에너지 폭을 대역폭보다 작게 줄여서 인접 채널의 에너지 레벨을 무시할 수 있을 정도의 폭을 갖도록 해야 한다. 항공통신에서 양측파대 진폭변조(DSB AM) 방식을 사용하여 음성통신을 하는데 필요한 최소의 주파수 대역폭은 이론적으로 전송되는 음성 신호 최대 주파수의 2배이다. 항공통신 상에서 송신기가 보낼 수 있는 최대 음성 주파수는 2.5 kHz로 제한되어 있으므로, 현재 항공용 음성통신을 위해서 최소한 5 kHz의 주파수 대역폭이 필요하게 된다. 그러나, 항공통신에 있어서는 보다 안정적인 통신을 위해 현재의 25 kHz 대역을 3등분한 8.33 kHz의 주파수 대역폭을 사용한다. 양측파대 진폭변조 방식에서의 최대 허용 주파수 대역은 그림 1과 같다.

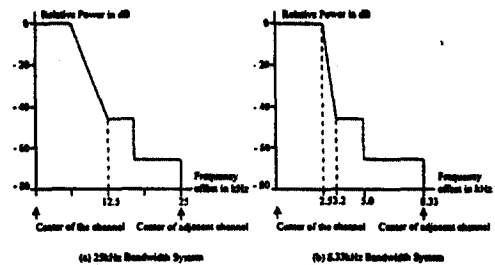


그림 1. DSB-AM 송신기의 최대 허용 주파수 대역
Fig. 1. Maximum transmitter occupied spectrum for a DSB-AM transmission.

이와 같이 대역폭을 8.33 kHz로 감소시키는 방안은 현재의 항공교통관제(ATC) 운영 절차를 그대로 유지하며, 시스템의 교체 비용이 저렴하며, 새로운 기술의 도입이 필요없게 되어 기술적인 위험성이 매우 적은 장점이 있다. 그러나, 송신기의 전송 에너지 폭은 무한정 줄일 수 없기 때문에 지속적인 항공 수요의 증가로 인해 더 많은 채널이 요구된다면 더 이상의 채널 대역폭 감소는 어렵게 되며, 매체접속제어 방식으로 기존의 CSMA 방식을 이용하므로 앞으로의 항공교통관제에 요구되는 메시지 우선순위 기능을 수행할 수 없는 단점이 있다.

2-2 TDMA 디지털 음성/ 데이터 시스템

대역폭을 8.33 kHz로 감소하여 주파수 혼잡 문제를 해결하려는 방안은 장기적인 안목으로 볼 때, 미래의 항공교통관제의 모든 기능을 수용하는데 어려움이 있다. 이에 미국 FAA를 중심으로 그림 2와 같이 현재의 25 kHz 주파수 대역폭을 그대로 유지하면서, 4개의 시간 슬롯으로 나누어진 TDMA 디지털 음성/데이터 방식을 사용하는 방안이 연구되고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 항공용 TDMA 시스템은 하나의 25 kHz 채널에서 프레임마다 공대지와 지대공 전송을 교대로 하여 통신한다.

VHF TDMA 디지털 음성/데이터 시스템은 기본적으로 기존의 VHF 음성통신 기능을 모두 수행

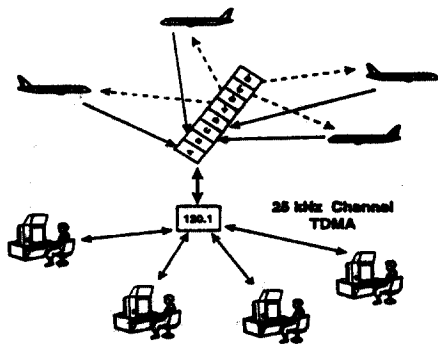


그림 2. 항공용 TDMA 디지털 음성/데이터 시스템
Fig. 2. Aviation TDMA digital voice /data system.

하며, 미래의 종합적인 데이터링크 통신도 지원할 수 있도록 구성되어 있다.

TDMA 시스템의 물리 계층의 특성은 표 1과 같다. 4.8 kbps의 보코더를 사용하면 TDMA 프레임 길이인 120ms 동안의 음성은 576 비트로 표현된다. 그런데, 31.5 kbps의 속도를 가지는 항공통신용 TDMA 구조에서는 1 슬롯 길이인 30ms 중에 사용자 정보 부분으로 576 비트를 필요로 하므로, 실제 음성 120ms가 30ms안에 전송되고, 120ms 시간 동안에 4개 그룹의 각각 다른 120ms 음성을 보낼 수 있게 되어 4배의 채널 증가 효과를 얻을 수 있게 된다.

모든 TDMA 시스템은 120ms 프레임에 기초를 두고 동작하며, 각각의 TDMA 프레임은 그림 3과 같이 30ms 슬롯 4개로 구성된다.

각각의 슬롯이 각각 양방향 공-지 통신을 독립적으로 수행할 수 있으며, 이는 다시 관리 하부채널과 음성/데이터 하부채널로 나누어진다.

TDMA 방식은 지속적인 통신량의 증가에도 새

표 1. TDMA 시스템의 물리계층 특성

Table 1. Characteristics of physical layer of TDMA system.

주파수 대역	118~137 MHz
주파수 채널 대역폭	25 kHz
채널 구조	지대공, 공대지 동일
변조	디지털, D8PSK
보코더 비트율	4.8 kbps
전송 속도	31.5 kbps(10.5 kbaud)

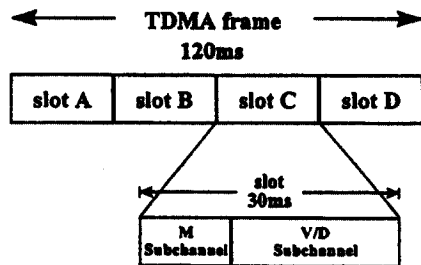


그림 3. TDMA 시스템 프레임 구조
Fig. 3. TDMA system timing hierarchy.

로 주파수를 나눌 필요도 없으며, 매체접속제어 프로토콜로 예약 접속 프로토콜을 사용하기 때문에 예약 요청한 메시지 중에서 긴급한 항공교통관제 메시지를 우선으로 보낼 수 있는 메시지 우선순위 기능도 수행할 수 있는 장점이 있다.

III. 매체접속제어(MAC) 프로토콜 특성 분석

다수의 항공기가 제한된 채널을 효율적으로 사용하여 지상국에 접속하기 위해 경쟁하기 때문에 항공기와 지상국 사이의 다중접속방식을 이용하여 통신로를 설정하며, 이 다중접속 기술들은 트래픽 특성에 따른 시스템의 효율성과 융통성을 높이기 위하여 기본적인 매체접속제어(MAC) 프로토콜과 조합하여 사용하게 된다.[3][4] 패킷 전송을 위한 매체 접속 프로토콜은 크게 고정 할당방식[5], 랜덤 할당방식[6][8][12]과 요구 할당방식[7]으로 나눌 수 있다.

3-1 랜덤 접속 프로토콜

유럽에서 연구 중인 대역폭을 8.33 kHz로 줄이려는 방안에서는 매체접속제어 프로토콜로 현재 사용 중인 CSMA 랜덤 접속 프로토콜을 사용하려고 한다. 현재 항공통신에서는 ARINC 규격서 618에 정의된 non-persistent CSMA를 사용하며 아래와 같은 알고리즘을 가진다.

- ① 만일 MSK 변조된 신호가 VHF 송수신기로부터 아날로그 인터페이스에서 감지되지 않는다면 RF 채널은 사용되고 있지 않다고(idle) 여겨지며 항공기의 데이터통신 관리장비(MU)에서 패킷을 전송한다.
- ② 만일 채널이 사용되고 있다고(busy) 감지되면 MU는 30ms에서 300ms까지의 제한 내에서 일정한 랜덤 분포에 따라 약간의 시간 후로 전송을 지연한다.
- ③ 재스케줄된 시점에서 채널이 사용되고 있지 않다고 감지되어 패킷을 전송할 때까지 이 알고리즘을 반복한다.
- ④ 만일 전송한 패킷에 대한 승인 신호를 수신하

지 못했으면, 충돌이 발생했다고 여겨지며 항공기 MU는 위의 알고리즘에 따라 재전송을 시도한다.

그림 4는 non-persistent CSMA의 전송 방식을 나타내며, 슬롯형 non-persistent CSMA 방식의 채널효율은 식 (1)과 같이 표현된다[6].

$$\begin{aligned}
 S &= \frac{P_s T}{\bar{T}_p + \bar{I}} \\
 &= \frac{TGe^{-G}}{TGe^{-G} + (1 - e^{-G} - Ge^{-G})T + 1} \\
 &= \frac{TGe^{-G}}{(1 - e^{-G})T + 1} \quad (1)
 \end{aligned}$$

식 (1)에서 G는 한 슬롯기간에서의 평균 트래픽으로 전송 준비가 된 항공기의 수를 나타내며 공대지 채널의 실제적인 통신량(offered load)으로 볼 수 있다. S는 채널효율로써 평균 전송 시간(\bar{T}_p)과 평균 채널 휴지 시간(\bar{I}) 중에서 전송에 성공한 시간의 비를 나타낸다.

랜덤 접속 프로토콜은 트래픽이 적은 환경에서는 매우 높은 채널효율을 갖지만, 트래픽이 증가하면 패킷 충돌 횟수가 많아져서 채널효율이 급격히 떨어지는 단점이 있고, 또한, 하나의 채널을 경쟁하여 사용하므로 메시지 우선순위 기능을 수행할 수 없는 단점이 있다.

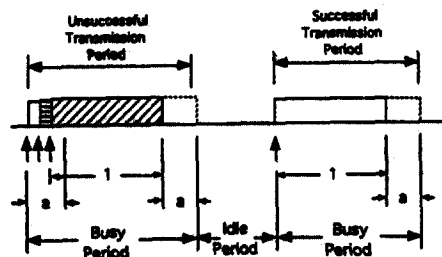


그림 4. Non-persistent CSMA의 전송 방식
Fig. 4. Transmission scheme of non-persistent CSMA.

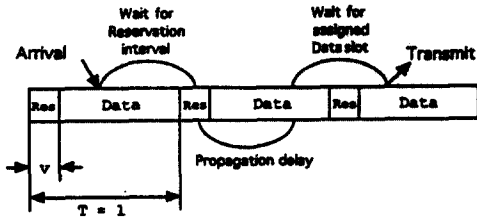


그림 5. 예약 접속 프로토콜의 전송 방식
Fig. 5. Transmission scheme of reservation system.

3-2 예약 접속 프로토콜

미국에서 연구 중인 TDMA 방식은 매체접속 제어 프로토콜로서 예약 접속 프로토콜을 사용한다. 그림 5는 예약 접속 프로토콜의 전송 방식을 나타낸다.

일반적으로 예약 접속 프로토콜의 알고리즘은 다음과 같다.

- ① 항공기는 전송할 메시지가 있으면, 다음번 할 당된 예약 슬롯 기간에 예약 요청 패킷을 전송한다.
- ② 지상국에서는 예약 요청 패킷을 받은 후 사용되는 채널이 없을 경우 예약 승인 신호(ACK)를 보내 주고, 이 신호를 받은 항공기는 승인받은 기간만큼 경쟁없이 메시지 전송 슬롯을 점유하여 통신한다.
- ③ 만약 데이터 전송 채널이 이미 사용 중이라면 지상국에서 예약 실패 신호(NACK)를 항공기에 보내 주고, 이 신호를 받은 항공기는 재스케줄된 예약 슬롯에서 예약 요청을 다시 시도한다.

예약 접속 방식의 채널효율은 예약 요청을 하기 위해 사용되는 랜덤 접속 방식에 따라 다르며, 일반적으로, 예약 슬롯에서는 Slotted ALOHA 방식을 이용하므로 이 때의 채널효율 S_r 는 다음과 같다[7].

$$S_r = \frac{1}{1 + v(\frac{1}{G e^{-G}} - 1)} \quad (2)$$

이 식에서 보는 바와 같이 예약 슬롯의 길이가 한 패킷의 길이에 비해 상당히 작다면, 전체 채널효율은 거의 1이 되어 채널을 낭비없이 효율적으로 사용할 수 있게 된다.

예약 접속 프로토콜 방식은 예약된 메시지에 대한 우선순위 기능을 수행할 수 있지만, 항공통신에서는 메시지 전송 슬롯의 길이가 예약 슬롯의 길이에 비해 그다지 길지 않기 때문에 채널효율이 떨어지는 단점이 있다.

3-3 항공용 예약 접속 프로토콜

3-3-1 변형된 항공용 TDMA 방식 계획

여기서는 유럽에서 연구 중인 채널 대역폭을 1/3으로 나누어서 주파수 분할 다중접속방식(FDMA)을 사용하는 방안과 미국에서 연구 중인 TDMA 방식의 장점을 살리면서 채널 효율을 증대시키고, 메시지 전송 지연시간을 줄이며, 우선순위 처리를 가능하게 하는 접속방식을 제안하여 미래의 항공 상황에 능동적으로 대처할 수 있게 한다.

변형된 항공용 TDMA 방식에서는 그림 6과 같이 지대공 메시지 전송과 공대지 메시지 전송에 각각 다른 채널을 사용한다. 즉, 메시지 채널을 동일한 대역폭을 갖는 두 개의 채널로 나누어 사용한다.

미리 항공교통량을 파악하여 일정한 그룹으로 분류한 후 주파수분할 다중접속방식에서처럼 이들 그

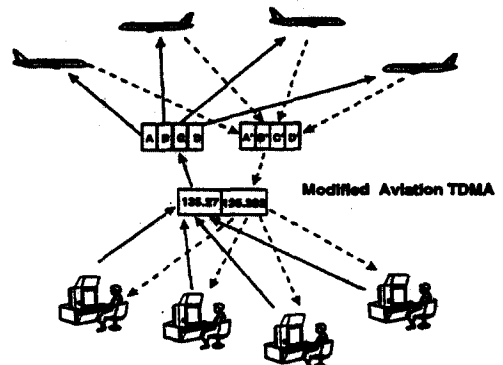


그림 6. 변형된 항공용 TDMA 방식
Fig. 6. Modified aviation TDMA scheme.

그룹마다 다른 주파수를 배정하는 것이 아니라, 하나의 주파수를 4개의 슬롯으로 나눈 뒤 각 그룹마다 자신에게 할당된 슬롯에서 통신하는 TDMA 방식을 따른다. 따라서, 항공기와 지상국간의 메시지 전송은 항공기가 각자의 그룹에 할당된 예약 슬롯기간에만 채널사용을 예약한 후 승인을 받아 전송하는 방식을 따른다.

3-3-2 전송 계획

변형된 항공용 TDMA 방식의 전송 방식은 그림 7과 같으며, 다음과 같은 알고리즘을 따라 수행된다.

- ① 항공기는 전송할 패킷이 있으면, 자기가 속해 있는 그룹에 할당되어 있는 슬롯기간 중 예약 서브 슬롯에서 예약 요청 미니슬롯을 slotted-ALOHA 방식으로 전송하여 예약 요청을 한다. 예약 요청에는 메시지 우선순위와 사용할 슬롯기간 정보가 포함된다.
- ② 지상국에서는 항공기가 보낸 예약 요청 미니슬롯을 체크하여 다른 미니슬롯과의 충돌 여부를 감지한다. 만일 체크가 어려없이 통과되면 다른 미니슬롯과의 충돌이 없었음을 나타내므로 지상국에서는 예약 대기 버퍼를 살핀 후 이 곳이 비어 있으면, 곧바로 예약 승인 신호(ACK-R)를 보낸다. 만일, 예러가 감지되면 이는 다른 미니슬롯과의 충돌이 발생했음을 나타내므로 충돌 신호(NACK-R)를 보낸다.

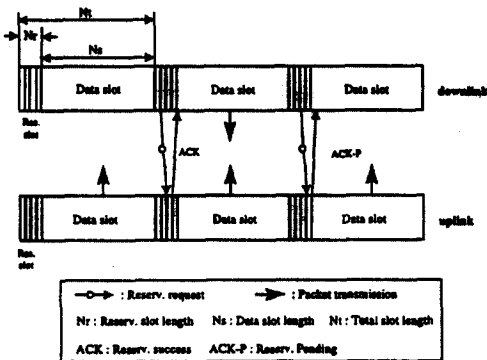


그림 7. 변형된 항공용 TDMA의 전송 방식

Fig. 7. Transmission scheme of modified aviation TDMA.

호(ACK-R)를 보낸다. 만일, 예러가 감지되면 이는 다른 미니슬롯과의 충돌이 발생했음을 나타내므로 충돌 신호(NACK-R)를 보낸다.

- ③ 예약 요청을 한 항공기는 예약 승인 신호를 받으면 즉시 메시지 서브 슬롯의 데이터를 전송하고, 충돌 신호를 받으면 다음번 할당된 슬롯에 재전송을 시도한다.
- ④ 항공기가 데이터를 전송하는 도중에도 할당된 슬롯의 관리 채널에서는 예약 요청이 계속되며, 이때 충돌없이 지상국에 도달한 예약 요청 미니슬롯에 대해 지상국은 예약 처리중 신호(ACK-P)를 보내서 재전송을 하지 않게 하며, 동시에 이 예약 요청 미니슬롯을 지상국의 예약 대기 버퍼에 우선순위에 따라 저장하여 예약된 항공기의 전송이 끝나는 즉시 가장 높은 우선순위를 갖는 요청을 한 항공기에 전송을 허가한다.

3-3-3 재전송 계획

변형된 항공용 TDMA 방식에서 충돌은 무선 채널이 예러가 없는 환경이라고 가정하였을 때 예약 서브 슬롯에서의 패킷 간의 충돌에 의한 것이다. 이렇게 충돌이 발생하였을 경우에 지상국은 항공기에 재전송을 요구하게 된다. 그러나, 계속적으로 충돌이 발생하거나 항공기가 장애물에 의해 가려져 있거나 또는 지상국으로부터 범위 밖이라면 재전송을 하더라도 계속 수신이 불가능하게 된다. 이런 경우를 위해 최대전송허용수(t) 이후 재전송을 중지하도록 한다.

재전송은 충돌에 의한 전송이 실패한 경우와 지상국의 예약 대기 버퍼의 용량(K)이 초과된 경우에 이루어지며, t 번의 재전송 후 전송시도를 포기한다. 만약 한 패킷이 계속적으로 t 번 충돌한다면 충돌 후의 지연시간은 임의의 지연시간에 t 배를 한 값을 갖도록 선택하여 반복되는 충돌의 기회를 빠르게 줄이도록 한다.

IV. 성능 및 결과 분석

변형된 항공용 TDMA 방식에서는 공대지 메시지 전송과 지대공 메시지 전송에 각각 다른 채널을 사용하므로, 공대지와 지대공 채널의 성능을 각각 분석한 후 전체 채널의 성능을 유럽에서 연구 중인 주파수분할 다중접속방식과 미국에서 연구 중인 TDMA 방식과 그 밖의 다른 매체접속제어 방식들과 서로 비교하도록 하겠다. 하나의 프레임을 4개의 그룹이 시분할하여 사용하며 각각의 그룹이 모두 동일한 성능을 나타내므로, 여기서는 대표적으로 한 그룹의 성능을 분석하기로 한다.

4.1 메시지 채널의 성능 분석

공대지 채널에서 채널을 예약할 준비가 된 항공기의 수는 일반적으로 Poisson 분포를 따른다고 볼 수 있다. Poisson 분포에서 k 개의 패킷이 전송될 확률 P_k 는 식 (3)과 같다.

$$P_k = \frac{G^k e^{-G}}{k!} \quad (3)$$

항공기에서 패킷 단위로 메시지를 전송한다고 볼 때, 어떠한 항공기도 예약을 시도하지 않는 경우인 패킷 전송이 없을 확률은 $P_0 = e^{-G}$ 이고, 하나의 항공기만 예약을 시도할 확률은 $P_1 = Ge^{-G}$ 이며, 둘 이상의 항공기가 예약을 시도할 확률은 $1 - P_0 - P_1$ 이다.

한 미니슬롯의 길이를 n , 예약 서브 슬롯의 미니슬롯 수를 N_r , 메시지 서브 슬롯의 미니슬롯 수를 N_s , 예약 대기 버퍼의 크기를 K 라고 할 때, 메시지 서브 슬롯이 사용될 확률은 예약 대기 버퍼의 상태에 따라 다르게 나타난다.

항공통신용 메시지는 크게 표 2와 같은 종류가 있다.[2]

따라서, 예약 대기 버퍼는 평균 2.1슬롯의 메시지 길이를 갖는 M/G/1/K Markov Process[9]에 따라 동작하게 되며 메시지 예약 성공 확률을 λ 때

표 2. 항공통신용 메시지의 종류 및 통계량

	우선순위	길이	통계량
ATC 메시지	1	1 슬롯	60%
FIS 메시지	2	3 슬롯	30%
AOC 메시지	3	6 슬롯	10%

시지 서비스율을 μ 라고 할 때 예약 대기 버퍼가 비어 있을 확률 P_{be} 는 다음과 같다.

$$P_{be} = \frac{1 - \rho}{1 - \rho^{K+1}} = \frac{1 - \frac{21}{10} P_1 N_r}{1 - (\frac{21}{10} P_1 N_r)^{K+1}}$$

여기서, $\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{21}{10} P_1 N_r$ (4)

예약 대기 버퍼가 비어 있을 경우, 예약 서브 슬롯의 $N_r - 2$ 미니슬롯 동안 아무런 예약시도가 없거나 계속 충돌이 발생하면, 메시지 서브 슬롯을 낭비하게 되고, 그 이외에는 메시지 서브 슬롯이 계속 사용된다. 따라서, 이 때 메시지 서브 슬롯이 이용될 확률 P_{sr} 는 다음과 같다.

$$P_{sr} = 1 - (1 - P_1)^{N_r - 2} \quad (5)$$

예약 대기 버퍼에 미리 예약된 메시지가 있을 경우에는 현재 전송하려는 프레임의 예약 서브 슬롯에서 예약을 시도하지 않아도 예약된 메시지에 의해 메시지 서브 슬롯은 계속 이용되므로 이 때의 성공 확률은 1이 된다. 따라서, 메시지 서브 슬롯이 이용될 전체 확률 P_{sr} 는 식 (4), 식 (5)에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{sr} = 1 - P_{be} + P_{be} P_{sr} = \frac{1 + (\frac{21}{10} P_1 N_r - 1)(1 - P_1)^{N_r - 2} - (\frac{21}{10} P_1 N_r)^{K+1}}{1 - (\frac{21}{10} P_1 N_r)^{K+1}} \quad (6)$$

따라서, 공대지 채널의 전체 채널효율 S_{air} 를 식

(4), 식 (5)와 식 (6)을 이용하여 구해 보면 다음과 같이 된다.

$$S_{dt} = \frac{P_u N_s}{N_r + N_s}$$

$$= \frac{N_s \{1 + (\frac{21}{10} P_1 N_r - 1)(1 - P_1)^{N_r - 2} - (\frac{21}{10} P_1 N_r)^{K+1}\}}{(N_r + N_s) \{1 - (\frac{21}{10} P_1 N_r)^{K+1}\}} \quad (7)$$

지대공 채널도 공대지 채널과 마찬가지로 예약 서브 슬롯과 메시지 서브 슬롯으로 구성되어 있다. 지대공 채널의 예약 서브 슬롯에서는 예약 요청을 한 항공기에 이번 프레임에서 전송을 허락할 경우 ACK를 보내 주고, 현재 공대지 채널이 사용되고 있어서 수신한 예약 요청을 지상국의 예약 대기 버퍼에 저장한 후 채널이 사용되지 않을 때까지 기다리도록 할 때는 ACK-P를 전송하며, 예약 요청이 실패했을 경우에는 NACK를 보내서 재전송하도록 알려준다. 메시지 서브 슬롯에서는 예약 요청을 승인받은 항공기가 필요로 한 정보를 전송해 주고, 그 외에는 지상의 여러 항공 관련 기관에서 보내 온 항공 관련 정보를 계속적으로 방송한다고 가정하였으므로, 메시지 서브 슬롯이 낭비되는 경우는 없게 된다.

따라서, 지대공 채널의 채널효율 S_{ur} 는 예약 서브 슬롯의 길이를 제외한 실제로 데이터를 전송하는데 사용되는 메시지 프레임의 길이를 전체 프레임 길이로 나눈 값이 되고, 이 값은 예약 서브 슬롯과 메시지 서브 슬롯의 길이에 따라 다음 식과 같이 항상 일정한 값을 갖는다.

$$S_{ur} = \frac{N_s}{N_r + N_s} \quad (8)$$

하나의 채널을 동일한 대역폭을 갖는 공대지 채널과 지대공 채널로 나누었으므로, 전체 채널효율 S_t 는 공대지 채널효율과 지대공 채널효율의 평균값으로 나타낼 수 있다.

$$S_t = \frac{S_{dt} + S_{ur}}{2}$$

$$= \frac{N_s \{2 + (\frac{21}{10} P_1 N_r - 1)(1 - P_1)^{N_r - 2} - 2(\frac{21}{10} P_1 N_r)^{K+1}\}}{(N_r + N_s) \{1 - (\frac{21}{10} P_1 N_r)^{K+1}\}} \quad (9)$$

4-2 결과 분석

앞에서 구한 변형된 항공용 TDMA 방식에서의 채널효율과 기존의 다른 방식들에서의 채널효율을 비교하고, 몇 가지 파라미터 변화에 따른 채널효율의 변화 등을 살펴보고자 한다.

사용된 파라미터는 실제 트래픽 발생률 g , 전체 트래픽 발생률 G , 전체 슬롯의 길이 N_r , 예약 서브 슬롯의 길이 N_r , 데이터 서브 슬롯의 길이 N_s , 지상국 버퍼의 용량 K , 최대전송허용수 l 등이다. S_{dt} 는 지대공 채널의 효율, S_{ur} 는 공대지 채널의 효율을 나타내고, 전체 대역의 채널효율은 S_t 로 나타낸다.

그림 8은 예약 슬롯의 길이를 4 미니슬롯, 데이터 슬롯의 길이를 20 미니슬롯, 지상국 버퍼의 용량을 100 미니슬롯으로 하였을 때 ($N_r = 4, N_s = 20, K = 100$), slotted-ALOHA, CSMA, R-ALOHA, 항공용 TDMA, 변형된 항공용 TDMA 프로토콜의 전체 트래픽 발생률 G 와 공대지 채널효율 S_{dt} 와의 관계를 보여준다.

각 프로토콜의 최대 채널효율 S 를 살펴보면 slot-

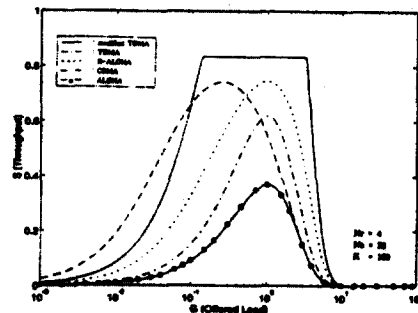


그림 8. 변형된 항공용 TDMA의 공대지 채널효율
Fig. 8. Downlink channel throughput of modified TDMA.

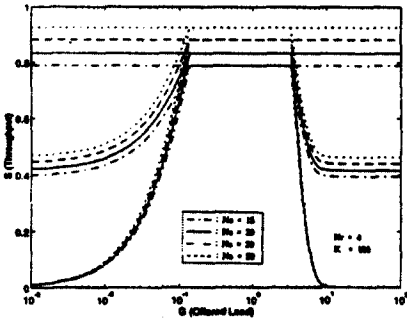


그림 9. 데이터 슬롯 길이의 변화에 따른 채널효율
Fig. 9. Channel throughput as data slot length.

ted-ALOHA의 경우 $G=1.0$ 일 때 0.37, 슬롯형 non-persistent CSMA의 경우 $G=0.26$ 일 때 0.741, R-ALOHA의 경우 $G=1.0$ 일 때 0.744의 값을 가지고, 항공용 TDMA의 경우 $G=1.0$ 일 때 0.618의 값을 가진다. 하지만 변형된 항공용 TDMA의 경우 $G=0.16\sim 3.15$ 사이에서 0.833의 높은 채널효율 값을 계속 유지함을 알 수 있다.

그래프에서 보는 바와 같이 변형된 항공용 TDMA를 적용했을 경우 CSMA 방식에 비해 트래픽이 많은 경우에도 높은 채널효율을 보이며, 예약 방식의 프로토콜에 비해 트래픽이 적은 경우에도 높은 채널효율을 유지함을 알 수 있다.

그림 9는 예약 슬롯의 길이를 4 미니슬롯, 지상국의 버퍼 용량을 100으로 고정하고($N_r=4, K=100$), 데이터 슬롯의 길이를 15, 20, 30, 50 미니슬롯으로 변화시켰을 때($N_r=15, 20, 30, 50$)의 변형된 TDMA 프로토콜의 공대지 채널과 지대공 채널, 전체 채널의 효율을 각각 나타낸다. 그림에서 공대지 채널효율은 트래픽에 따른 변화폭을 일정하게 유지함을 알 수 있다. 따라서, 데이터 슬롯의 길이를 길게 하면 그만큼 예약 슬롯에 인한 낭비가 상대적으로 줄어들게 되어 트래픽에 따른 변화는 없이 전체적으로 채널효율의 최대 값이 향상됨을 알 수 있다.

그림 10은 데이터 슬롯의 길이를 20 미니슬롯, 지상국 버퍼의 용량을 100으로 고정하고($N_r=20, K=100$), 예약 슬롯의 길이를 2, 3, 4, 5 미니슬롯으

로 변화시킬 때($N_r=2, 3, 4, 5$)의 변형된 TDMA 프로토콜의 공대지 채널과 지대공 채널, 전체 채널의 효율을 각각 나타낸다. 그래프에서 공대지 채널효율은 예약 슬롯의 길이가 길어질수록 낮은 트래픽에서의 채널효율은 향상되지만, 기본적으로 낭비되는 예약 슬롯의 비율이 증가하게 되므로 최대 채널효율은 감소함을 알 수 있다. 따라서, 예약 슬롯이 길이를 너무 짧게 하면 낮은 트래픽에서의 채널효율이 감소하고, 예약 슬롯의 길이를 너무 길게 하면 최대 효율이 감소하게 된다.

그림 11은 예약 슬롯의 길이를 4 미니슬롯, 데이터 슬롯의 길이를 20 미니슬롯으로 고정하고($N_r=4, N_d=20$), 지상국 버퍼의 용량을 1, 2, 5, 10, 100으로 변화시킬 때($K=1, 2, 5, 10, 100$)의 변형된

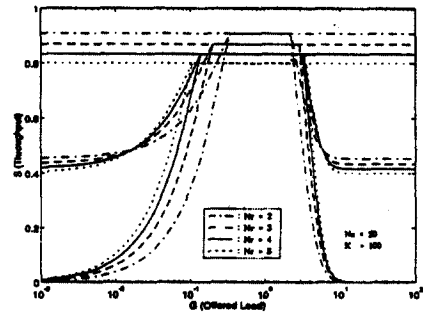


그림 10. 예약 슬롯 길이의 변화에 따른 채널효율
Fig. 10. Channel throughput as reservation slot length.

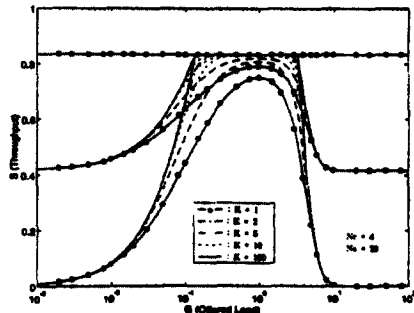


그림 11. 버퍼 용량 K의 변화에 따른 채널효율
Fig. 11. Channel throughput as variable buffer capacity K.

TDMA 프로토콜의 공대지 채널과 지대공 채널, 전체 채널의 효율을 나타낸다.

그래프에서 지대공 채널의 최대 효율 S_m 는 모든 경우에 0.833으로 동일한 값을 가진다. 또한, 공대지 채널효율은 지상국의 버퍼 용량이 커짐에 따라 향상됨을 알 수 있다. 그러나, 어느 정도 지상국 버퍼의 용량이 커지면 채널효율은 더 이상 변화가 없이 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 따라서, 지상국 버퍼의 크기를 최대효율을 갖도록 설정하여 사용하면 경제적이면서 효율적으로 채널을 사용할 수 있게 된다.

V. 모의 실험

여기서는 성능 해석 결과와 항공통신 실제 환경에 변형된 TDMA 프로토콜을 적용해서 얻은 모의 실험 결과를 비교하여 성능 해석 결과를 검증하고, 실제 항공통신에 변형된 TDMA 프로토콜을 적용할 수 있는가에 대해 알아본다.

5. 1 모의실험 수행 계획

모의실험한 시스템은 M 개의 항공기와 버퍼 용량이 K 인 1개의 지구국 사이에 슬롯당 발생률 p 를 가지고 전송할 메시지가 있을 때는 1, 전송할 메시지가 없는 경우 0값을 갖도록 한 bernoulli 랜덤 프로세스에 따라 메시지를 전송한다고 가정하였다. 4장의 성능 해석에서는 Poisson 랜덤 프로세스에 따라 메시지가 도착한다고 가정하였는데 bernoulli 랜덤 프로세스는 슬롯별로 구분된 이산 시간 모델에서 Poisson 랜덤 프로세스와 유사한 해석이 된다. 또한 패킷의 에러 발생은 같은 슬롯에 도착한 다른 패킷과의 충돌에 의해서만 발생하고, 채널에 의한 비트 에러와 페이딩에 의한 에러는 없는 것으로 가정하였다.

항공기와 지상국은 메시지를 패킷 형태로 보내고, 메시지 패킷은 예약 슬롯과 데이터 슬롯으로 나뉜다. 실제 항공용 데이터의 길이를 고려하여 미니슬롯의 길이가 제어신호와 전파왕복지연시간보다 큰 2.5 ms일 때, 한 패킷의 길이는 24 미니슬롯, 예

약 슬롯의 길이는 4 미니슬롯, 데이터 슬롯의 길이는 20 미니슬롯으로 가정하였다. 모의실험 시간은 100,000~300,000 패킷타임 이상으로 수행하여 결과치에 대한 신뢰성을 높였으며, 패킷 충돌에 의한 재전송은 최대 10번까지로 제한하였다. 4장에서 재전송을 포함한 전송횟수(G)를 이용하여 성능 해석을 했기 때문에, 여기서도 패킷발생률과 항공기수 및 재전송을 모두 고려한 전체 패킷발생수(G)를 이용하여 같은 조건으로 실험하였다.

5-2 모의실험 수행 결과

모의실험 수행 결과는 그림 12와 같다.

그림에서 보는 바와 같이 실제 항공통신 환경 하에서 모의실험을 수행한 결과, 4장의 성능 해석 결과와 동일한 값인 $G = 0.16 \sim 3.15$ 사이에서 0.833의 최대 채널효율을 유지함을 알 수 있었고, 전체적으로도 모든 교통량 G 값에서 성능 해석 결과와 거의 일치하였다.

따라서, 현재 항공 무선 통신에서 사용되는 매체 접속방식인 non-persistent CSMA 프로토콜이나 연구 중인 항공용 TDMA 프로토콜 대신에 변형된 항공용 TDMA 프로토콜을 사용하면 채널효율을 대폭 향상시킬 수 있어 미래의 항공교통 수요에 효율적으로 대처할 수 있을 것이다.

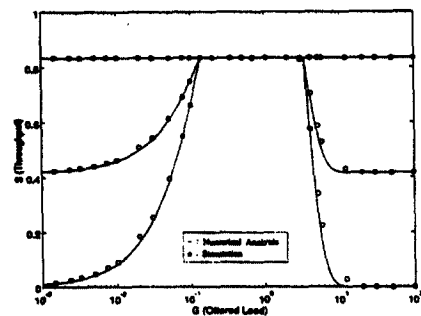


그림 12. 모의실험 결과 ($N_s=4$, $N_t=20$, $N_r=24$, $K=100$)

Fig. 12. Simulation result ($N_s=4$, $N_t=20$, $N_r=24$, $K=100$).

VI. 결 론

본 논문에서는 항공교통량이 증가함에 따라 미래의 항공교통 수요에 효율적으로 대처하고 항공통신용 주파수를 효율적으로 활용하기 위한 방안으로 채널 대역폭을 현재의 25 kHz에서 8.33 kHz로 줄이는 방안과 4개의 슬롯을 가진 TDMA 방식을 사용하는 방안의 장점을 살리면서 보다 높은 성능을 갖는 변형된 항공용 TDMA 프로토콜을 제안하고 성능을 분석한 후 모의실험을 통한 성능 검증을 실시하였다. 변형된 항공용 TDMA 방식에서는 지대공 메시지 전송과 공대지 메시지 전송에 각각 다른 채널을 사용하며, 항공기와 지상국 간의 메시지 전송은 항공기가 각자의 그룹에 할당된 예약 슬롯기간에만 채널 사용을 예약한 후 승인을 받아 전송하도록 설계하였다.

성능 분석 결과, 변형된 항공용 TDMA 방식을 사용했을 경우에는 교통량이 많을 때 채널효율이 낮은 CSMA 방식의 단점과 교통량이 적을 때에 기본적으로 낭비하는 패킷으로 인해 채널효율이 떨어지는 항공용 TDMA 방식의 단점을 보완하며, 교통량이 적은 환경에서는 물론이고, 교통량이 많은 환경에서도 높은 채널효율을 가짐을 알 수 있었다. 모의실험 결과, 성능 분석 결과와 동일한 채널효율을 가짐을 알 수 있었으며, 따라서 변형된 항공용 TDMA 방식을 사용하면 미래의 급증하는 항공교통 수요에 효율적으로 대처할 수 있으리라 생각된다.

앞으로, 본 논문에서 제시한 변형된 항공용 TDMA 방식을 항공통신망(ATN)에 적용할 방법에 대한 연구가 필요하리라 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] "Signal-in-Space Minimum Aviation System Performance Standards(MASPS) for Advanced VHF Digital Data Communications Including Compatibility with Digital Voice Techniques : RTCA/DO-224", RTCA, Inc., 1994.
- [2] "VHF Air-Ground Communications System Improvements Alternatives Study and Selection of Proposals for Future Action : RTCA/DO-225", RTCA, Inc., 1994.
- [3] Raphael Rom, and Moshe Sidi, *Multiple Access Protocols Performance and Analysis*, Springer-Verlag, New York Inc., 1990.
- [4] F. A. Tobagi, "Multiaccess Protocols in Packet Communication Systems", *IEEE Trans. Com.*, pp. 468-488, Apr. 1980.
- [5] Simon S. Lam, "Delay Analysis of a Time Division Multiple Access(TDMA) Channel", *IEEE Trans. Comm.*, pp. 1489-1494, Dec. 1977.
- [6] L. Kleinrock, and F. A. Tobagi, "Packet Switching in Radio Channels : Part I -Carrier Sense Multiple Access Modes and Throughput-Delay Characteristics", *IEEE Trans. Com.*, pp. 1400-1416, 1975.
- [7] Simon S. Lam, "Packet Broadcast Networks-A Performance Analysis of the R-ALOHA Protocol", *IEEE Trans. Computer*, pp. 596-603, July 1980.
- [8] A. Murase, K. Imamura, "Idle-Signal Casting Multiple Access with Collision Detection(ICMA-CD) for Land Mobile Radio", *IEEE Trans. Veh. Tech.*, pp. 45-50, May 1987.
- [9] Alberto Leon-Garcia, *Probability and Random Processes for Electrical Engineering*, Addison-Wesley Publishing Co., 1995.

[1] "Signal-in-Space Minimum Aviation Sys-

박 효 달 (朴孝達)

1978년 2월 : 인하대학교 전자공학과
(공학사)

1987년 : (불)국립항공우주대학 전
자공학과(공학박사)

1983. 9. 1~'84. 7. 31 : 프랑스 국립
과학연구원 소자 연구실 연구원

1984. 9. 1~'87. 7. 31 : 프랑스 국립우주연구소 초고주파 연
구실 연구원

1987. 8. 25~'92. 2. 28 : (주)대한항공 항공기술연구원 수석
연구원

1991~1991 : 위성항행시스템 기초연구 교통부 자문

1992년~현재 : 인하대학교 전자공학과 부교수

1992. 4. 21~현재 : 교통부 위성항행시스템 자문회 자문위원

1993. 5. 18~현재 : 통신위성 우주산업연구회 학술분과 부위
원장

1993. 9~현재 : (주)대한항공 사내대학 교수

1994. 1~현재 : (주)삼성전자 기술대학 교수

1994. 12 : 교통부 비행점검기 도입 기술 평가단 평가위원

1996. 9 : 인천지방해운항만청 VTS 평가위원

1997. 4~현재 : 서울지방항공청 설계자문회 자문위원

1997. 5~현재 : 신공항건설 심의위원회 심의위원

관심분야 : 항공통신 시스템, 초고주파공학, 무선 데이터 통
신