

# 전술데이터링크의 동적 TDMA와 정적 TDMA 성능 분석

이 종 관<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> 육군사관학교 사이버전 연구센터

## Performance Analysis of Dynamic TDMA and Fixed TDMA in Tactical Data Link

Jong-Kwan Lee<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> Cyber Warfare Research Center, Korea Military Academy, Korea

(Received 8 February 2018 / Revised 5 June 2018 / Accepted 6 July 2018)

### ABSTRACT

In this paper, a performance comparison of dynamic TDMA and fixed TDMA in tactical data link system is conducted. The performance metric include: delay, queue size and system throughput. To perform comparison of two TDMA schemes, we adopt the modified M/D/1 queueing model. Computer simulation is also performed to verify conducted analytical results.

Key Words : Tactical Data Link(전술데이터링크), Dynamic TDMA(동적 시분할다중접속), M/D/1, Queueing Model(큐잉 모델)

### 1. 서론

NCW(Network Centric Warfare)는 지휘속도의 증가, 빠른 작전템포, 치명성의 극대화, 생존성 증대 그리고 자기 동기화 달성을 위해 센서, 의사결정자, 타격체계를 네트워크로 연결함으로써 최상의 전투력을 창출하는 정보우위의 작전개념이다<sup>1,2)</sup>. 미국을 비롯한 세계 많은 국가들이 NCW라는 새로운 전쟁 패러다임을 구현하기 위해 노력하고 있다. 전술데이터링크(TDL: Tactical Data Link)는 이러한 NCW를 실현하기 위한

핵심기술 중 하나로 작전정보, 피아식별, 표적위치, 표적할당, 무장정보 등 다양한 전술 데이터를 무기체계와 지휘통제체계에 실시간적으로 제공함으로써 전장가시화를 달성하여 효과적인 전투수행을 가능하게 하는 통신 체계이다<sup>3,4)</sup>. 전술데이터링크는 작전 지원 범위, 사용 목적 등에 따라 다양한 종류가 있다. 현재 우리 군은 해상작전을 위해 Link-11 및 ISDL(Inter Site Data Link)을 운용하고 있으며, Link-16을 공중작전에 운용하고 있다.

미군이 합동 및 연합작전에서 군간 또는 국가간 전술 데이터를 공유하기 위해 개발한 Link-16은 1996년부터 배치되기 시작하였으며, 미군 및 북대서양조약기구(NATO), 우리나라 등 많은 국가에서 운용하고 있

\* Corresponding author, E-mail: jklee64@kma.ac.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

다. Link-16은 TDMA, 주파수 도약, 확산 코딩 등의 기술을 통해 전술환경에서 다양한 플랫폼 간 근실시간 정보 전송 및 항재밍, 저피탐 통신을 제공한다<sup>[8]</sup>. 하지만 정적인 TDMA 구조를 사용하기 때문에 가변 데이터 전송률을 제한적으로 지원하고 고속 데이터 전송에는 한계가 있다<sup>[13,14]</sup>. 뿐만 아니라 네트워크를 운용하기 위해서는 사전에 네트워크 설계가 되어야 하며 NU(Network Unit)의 자유로운 네트워크 가입, 탈퇴가 불가능하여 네트워크 운용 측면에서 매우 경직되어 있다. 따라서 다양한 형태의 작전을 지원하기가 제한되고 우발적인 작전 환경의 변화에 민첩하게 대응하기 어렵다.

한편, 최근의 적 도발 양상을 분석해 보면 국가 총력전 성격의 전면전 보다는 천안함 폭침 사건 및 연평도 포격 사건 등과 같이 제한된 지역 및 시간 동안만 전투가 국한되는 국지전 형태의 특징을 볼 수 있다. 이러한 형태의 위협은 전면전에 비해 상대적으로 예측하기가 쉽지 않기 때문에 작전 지원을 위한 사전 네트워크 설계가 무의미하다. 따라서 향후 전술데이터링크는 작전 수행 간 작전 상황 변화에 따라 네트워크를 신속하고 융통성 있게 지원할 수 있어야 한다. 즉, 새로운 플랫폼의 네트워크 가입 및 기존 플랫폼의 자유로운 탈퇴가 가능하여야 하며 각 플랫폼별 가변적인 데이터 전송률을 지원할 수 있는 능력이 요구된다. 이러한 기능을 구현하기 위한 핵심 기술이 동적 TDMA이다. 우리 군은 현재 동적 TDMA가 적용된 전술데이터링크를 운용하고 있지 않지만 Link-22와 같이 최근에 개발된 전술데이터링크에는 동적 TDMA 기술이 적용되어 있다<sup>[7]</sup>. 따라서 미래 적 위협에 보다 효과적으로 대비하기 위해서 우리 군의 작전 환경 및 전술데이터링크 체계를 고려한 동적 TDMA에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 동적 TDMA의 성능을 정적 TDMA와 비교 분석한다. 큐잉 모델을 이용한 수학적 분석과 컴퓨터 모의실험을 통해 지연시간, 큐 크기, 시스템 데이터처리율 등을 분석한 결과 동적 TDMA는 정적 TDMA에 비해 각 NU의 데이터 전송 지연시간이 길어지고, 큐 크기가 다소 커지는 단점이 있다. 하지만 네트워크 환경이 동적으로 크게 변화하고 제어 패킷을 처리하기 위한 시간슬롯의 개수가 데이터 패킷을 위한 시간슬롯의 개수에 비해 과다하지 않으면 시스템 데이터처리량을 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

제2장에서는 본 논문에서 고려한 전술데이터링크의 시스템 모델에 대해서 살펴보고 3장에서는 큐잉 모델을 기반으로 정적 TDMA와 동적 TDMA의 성능을 수학적으로 분석한다. 그리고 모의실험을 통한 성능 분석 결과를 4장에서 살펴본다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

## 2. 시스템 모델

### 2.1 전술데이터링크의 네트워크 모델

각 NU는 1 홉(hop)으로 모든 이웃 NU와 통신이 가능하며 NMU(Network Manger Unit)를 NU 중에서 선정하여 네트워크를 관리한다<sup>[4,5]</sup>. 그리고 예비 NMU를 선정하여 네트워크의 생존성을 강화한다. 또한 전술메시지의 신뢰성 있는 전송을 위해 CSMA(Carrier Sensing Multiple Access) 보다 QoS(Quality of Service) 보장이 상대적으로 용이한 TDMA가 적용된다<sup>[7]</sup>. Fig. 1은 전술데이터링크 네트워크의 일반적인 개념도이다.

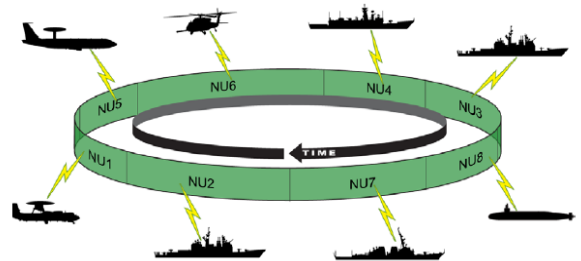


Fig. 1. Concept of tactical data link

### 2.2 정적 TDMA

정적 TDMA는 네트워크 운용 전에 네트워크에 참여할 NU의 시간슬롯을 정적으로 할당하는 기법이다. 네트워크 운용 중에는 할당된 시간슬롯의 변경 및 새로운 NU의 네트워크 참여가 불가하여 매우 경직된 형태로 네트워크가 운용되는 단점이 있다. 하지만 네트워크 운용에 필요한 파라미터들이 사전에 모두 정의되기 때문에 네트워크 운용을 위한 오버헤드가 매우 적다. 따라서 높은 데이터처리율을 달성할 수 있고 구조가 간단하다는 장점이 있다. 그러므로 정적 TDMA는 사전에 치밀하게 계획된 작전을 수행하는데 효과적이다. 현재 공군이 운용 중인 Link-16는 이와 같은 정적 TDMA를 적용하고 있다<sup>[8]</sup>.

Fig. 2(a)는 정적 TDMA의 일반적인 프레임 구조이다. 정적 TDMA의 프레임은 동일한 길이의 시간슬롯으로 구성되어 있고 각 NU는 네트워크 운용 전에 자신이 사용할 시간슬롯을 프레임 내에서 최소한 하나 이상 할당 받는다. 이러한 프레임 구조는 네트워크 운용이 종료될 때까지 변경되지 않고 주기적으로 반복된다. 따라서 NU는 주기적으로 데이터를 전송할 기회를 보장 받는다. 네트워크 운용 중에는 프레임 구조 변경이 불가능하기 때문에 각 NU별로 예상되는 최대 패킷발생률을 기준으로 시간슬롯이 할당된다. 따라서 일반적으로 동적 TDMA에 비해 시간슬롯의 길이가 길다. 본 논문에서 정적 TDMA의 프레임은  $M_f$ 개의 시간슬롯으로 구성되어 있고,  $N$ 개( $N=M_f$ )의 NU가 각각 1개의 시간슬롯을 사용하고, 각 시간슬롯의 길이는  $T_f$ 로 동일하며 한 개의 시간슬롯은  $L$ 개의 패킷을 처리할 수 있다고 가정한다.

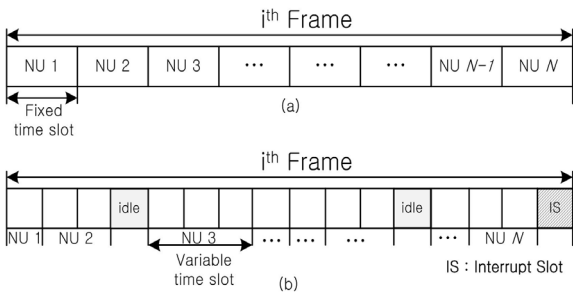


Fig. 2. (a) Frame structure of fixed TDMA (b) frame structure of dynamic TDMA

### 2.3 동적 TDMA

Link-11을 대체할 목적으로 개발된 Link-22에 적용된 동적 TDMA는 정적 TDMA와는 다르게 통신 환경의 변화에 따라 각 NU의 시간슬롯의 개수를 동적으로 변경할 수 있다<sup>9)</sup>. 즉 NU는 필요에 따라 시간슬롯을 추가로 할당 받거나 할당받은 시간슬롯을 반납할 수 있다. 뿐만 아니라 네트워크 운용 중에도 새로운 NU의 네트워크 가입 및 기존 NU의 네트워크 탈퇴가 자유롭다. 따라서 네트워크 조건이 동적으로 변경되거나 작전 환경 예측이 어려워 네트워크의 사전 설계가 제한되는 경우에 동적 TDMA의 적용이 적합하다. 하지만 동적 TDMA의 프레임 변경은 오버헤드를 발생시키고, 새로운 NU의 자유로운 네트워크 진입을 보장하기 위해 별도의 시간슬롯을 할애해야 한다<sup>14)</sup>. 따라

서 네트워크 운용이 정적 TDMA에 비해 매우 복잡하고 데이터처리율이 저하될 수 있다.

Fig. 2(b)는 동적 TDMA의 일반적인 프레임 구조를 나타낸다. 각 프레임은 데이터 전송을 위한 시간슬롯과 프레임 구조 변경에 필요한 제어 패킷을 전송하기 위한 IS(Interrupt Slot)로 구성된다. NU의 요구에 따라 할당되는 시간슬롯의 개수가 가변적이기 때문에 Fig. 2(b)에서와 같이 사용되지 않는 유휴슬롯(Idle slot)이 발생할 수 있다. 이러한 유휴 슬롯은 네트워크에 진입하기 원하는 새로운 NU에 할당될 수 있고 매 프레임 별로 프레임 구조가 변경될 수 있다. 프레임 구조의 변경 절차는 다음과 같다.

먼저 프레임 구조 변경을 요구하는 NU는 IS에서 제어 패킷을 NMU에게 전송하고 NMU는 NU의 요구사항을 충족할 수 있는 새로운 프레임 구조를 구성하여 각 NU에게 통보한다. 그리고 네트워크의 신뢰성을 보장하기 위해 NMU는 프레임 정보를 주기적으로 각 NU에 전달한다. 본 논문에서 동적 TDMA의 시간슬롯은  $M_d(=2M_f)$ 개로 구성되어 있으며, 네트워크 초기에는  $N$ 개의 NU가 각각 1개의 시간슬롯을 할당 받는다. 그리고 각 시간슬롯의 길이는  $T_d = T_f/2$ 로 동일하다. 따라서 한 개의 시간슬롯은  $\lfloor L/2 \rfloor$ 개의 패킷을 처리할 수 있다. 그리고  $M_d = 2M_f$ 이기 때문에 정적 TDMA와 동적 TDMA 프레임의 길이는 동일하며  $M_d$ 개의 시간슬롯 중  $\lfloor \alpha M_d \rfloor$ 개의 시간슬롯은 IS로 활용된다. 여기서  $\alpha$ 는 0과 1 사이의 값이다. 한편, NU의 패킷발생률이 일정 수준 이상이 되면 새로운 시간슬롯을 NMU에 요청하고 일정 수준 이하가 되면 운용 중인 시간슬롯의 일부를 반납할 수 있다.

## 3. 수학적 분석

본 장에서는 정적 TDMA와 동적 TDMA의 성능을 각각 패킷 지연시간, 큐 사이즈, 데이터 처리량 측면에서 분석한다. Table 1은 성능분석에 사용되는 주요 기호들을 나타낸다. 기호와 함께 사용되는 아래 첨자  $f, d$ 는 각각 정적 TDMA, 동적 TDMA를 의미한다.

### 3.1 지연시간 및 큐 사이즈

#### 3.1.1 정적 TDMA

패킷이 한 개 프레임당  $\lambda$ 의 파라미터를 갖는 푸아송(Poisson) 분포로 발생하고, 각 NU는 프레임당  $L$ 개

Table 1. Notation

$NU$	네트워크 가입자
$F$	프레임의 길이
$M$	시간 슬롯의 개수
$L$	패킷의 개수
$Q$	큐의 크기
$N$	NU의 개수
$S$	한 개 NU의 데이터 처리량
$T$	시간 슬롯 하나의 길이
$D$	지연 시간

의 패킷을 FIFO(First In First Out) 방법으로 처리하면 각 NU는 하나의 서버를 갖는 M/D/1 모델과 유사하다. M/D/1 모델은 패킷이 도착했을 때 서버가 유휴(idle) 상태이면 도착한 패킷을 바로 처리한다. 하지만 정적 TDMA는 패킷이 도착하였을 때 서버가 유휴 상태라 하더라도 바로 패킷을 처리하지 않고 자신의 시간슬롯 순서가 될 때까지 대기한다. 따라서 NU에 패킷이 도착한 후 처리되는데 소요되는 총 지연시간  $D_f$ 는 NU에 새로운 패킷이 도착하고 해당 NU의 시간슬롯 차례가 될 때까지 대기하는 시간( $T_w$ )과 자신보다 먼저 도착한 패킷들이 처리되는데 소요되는 큐 대기시간( $W_q$ ) 그리고 자신의 패킷이 처리되는 서비스 시간( $T_f/L$ )의 합이다<sup>[10,11]</sup>.

프레임의 길이를  $F$ 라 하면 새로운 패킷은 프레임 내에서 균등분포(Uniform distribution)로 도착하므로  $T_w = 0.5F$  이다. 한편 큐 대기 시간은 M/D/1 모델의 큐 대기 시간과 동일하기 때문에 다음과 같다<sup>[7]</sup>.

$$W_q = \frac{\rho \bar{x}}{2(1-\rho)} = \frac{\rho}{2(1-\rho)} F \quad (1)$$

여기서  $\rho = \lambda/L$ 이고  $\bar{x}$ 는 서비스 시간이다. 따라서 정적 TDMA에서 NU의 총 지연시간  $D_f$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D_f &= \frac{1}{2} F + W_q + \frac{T_f}{L} \\ &= \frac{1}{2} M_f T_f + \frac{\rho}{2(1-\rho)} M_f T_f + \frac{T_f}{L} \\ &= T_f \left[ \frac{1}{L} + \frac{M_f}{2(1-\rho)} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $F$ 는 프레임 길이,  $M_f$ 는 시간슬롯의 개수이다. 그리고 총 지연시간을 서비스 시간  $T_f$ 로 나누어 정규화한 총 지연시간은 다음과 같다.

$$\hat{D}_f = \frac{D_f}{T_f} = \frac{1}{L} + \frac{M_f}{2(1-\lambda/L)} \quad (3)$$

수학적 분석을 간략화하기 위해 본 논문에서는  $\lambda$ 의 수준을 크게 두 가지 즉 패킷 발생률이 큰 경우( $\lambda_L$ )와 작은 경우( $\lambda_S$ )로 구분한다.  $\lambda_S$ 로 패킷이 도착할 확률이  $\beta$ 이고  $\lambda_L$ 로 패킷이 도착할 확률이  $(1-\beta)$ 라 하면 정적 TDMA의 지연시간은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$D_f = \beta \hat{D}_f|_{\lambda=\lambda_S} + (1-\beta) \hat{D}_f|_{\lambda=\lambda_L} \quad (4)$$

한편, 정적 TDMA에서 각 NU의 평균 큐 사이즈  $Q_f$ 는 프레임당 평균이  $\lambda$ 인 푸아송 분포로 패킷이 발생하고 매 프레임당  $L$ 개의 패킷이 처리되기 때문에 M/D/1으로 모델링할 수 있고 다음과 같이  $\lambda$ 와  $L$ 로 표현할 수 있다<sup>[12]</sup>.

$$Q_f = \frac{\rho}{1-\rho} - \frac{\rho^2}{2(1-\rho)} = \frac{\lambda(2L-\lambda)}{2L(L-\lambda)}, \lambda < L \quad (5)$$

그리고  $\lambda_S$ 로 패킷이 도착할 확률이  $\beta$ 이고  $\lambda_L$ 로 패킷이 도착할 확률이  $(1-\beta)$ 라 하면 정적 TDMA의 평균 큐 사이즈는  $\beta Q_f|_{\lambda=\lambda_S} + (1-\beta) Q_f|_{\lambda=\lambda_L}$ 와 같다.

### 3.1.2 동적 TDMA

동적 TDMA는  $\lambda$ 에 따라 각 NU가 할당 받는 시간슬롯의 개수를 조정할 뿐 아니라 새로운 NU의 진입이 자유로운 특징이 있다. 패킷발생률이  $\lambda_L$ 일 때 NU가 할당 받는 시간슬롯의 개수는 패킷발생률이  $\lambda_S$ 일 때보다 2배 많고 프레임 내의 IS 개수는  $\lceil \alpha M_d \rceil$ 라 가정한다.

먼저  $\lambda_S$ 인 경우를 고려해보자. 2장 시스템 모델에서 정의한 것과 같이  $\lambda_S$ 인 경우의 시간슬롯의 길이와 시간슬롯의 개수는 각각  $T_d = 0.5 T_f$ 이고  $M_d = 2 M_f$ 이다. 그리고 한 프레임당 처리할 수 있는 패킷의 수는  $\lfloor L/2 \rfloor$ 개다.  $L$ 이 짝수인 경우  $\lfloor L/2 \rfloor = L/2$ 이고 홀수인 경우  $\lfloor L/2 \rfloor = (L-1)/2$ 이다. 따라서 서

비스시간으로 정규화한 총 지연시간은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\widehat{D}_{d,low} = \begin{cases} \frac{1}{L} + \frac{M_f}{1-2\lambda_s/L} & , L \text{ is even} \\ \frac{1}{L} + \frac{M_f}{1-2\lambda_s/(L-1)} & , otherwise \end{cases} \quad (6)$$

$\lambda_L$ 인 경우는  $\lambda_S$ 인 경우에 비해 NU가 시간슬롯을 2배로 할당받기 때문에 정규화한 총 지연시간은 식 (3)과 동일하다. 즉,  $\widehat{D}_{d,high} = \widehat{D}_f|_{\lambda=\lambda_L}$  이다.  $\lambda_S$ 로 패킷이 도착할 확률을  $\beta$ 라 하면 동적 TDMA의 정규화한 총 지연시간은 다음과 같다.

$$\widehat{D}_d = \beta \widehat{D}_{d,low} + (1-\beta) \widehat{D}_{d,high} = \beta \widehat{D}_{d,low} + (1-\beta) \widehat{D}_f|_{\lambda=\lambda_L} \quad (7)$$

식 (3), (6)에서 보는 바와 같이  $\widehat{D}_{d,low}$ 는  $\widehat{D}_f|_{\lambda=\lambda_S}$ 에 비해 항상 크기 때문에 식 (7)에서  $\beta$ 가 0인 경우를 제외하고  $\widehat{D}_d$ 는  $\widehat{D}_f$ 보다 항상 크다. 한편, 동적 TDMA에서  $\lambda_S$ 인 경우와  $\lambda_L$ 인 경우의 큐 크기는 각각 다음과 같다.

$$Q_{d,low} = \frac{\lambda_s(L-\lambda_s)}{L(L-2\lambda_s)}, \frac{2\lambda_s}{L} < 1 \quad (8)$$

$$Q_{d,high} = \frac{\lambda_L(2L-\lambda_L)}{2L(L-\lambda_L)}, \frac{\lambda_L}{L} < 1 \quad (9)$$

따라서  $\lambda_S$ 로 패킷이 도착할 확률이  $\beta$ 라고 하면 동적 TDMA의 평균 큐 사이즈  $Q_d$ 는 다음과 같다.

$$Q_d = \beta Q_{d,low} + (1-\beta) Q_{d,high} \quad (10)$$

그런데  $Q_{d,low}$ 는 정적 TDMA에서 패킷도착률이  $\lambda_S$ 일 때의 평균 큐 크기인  $Q_f|_{\lambda=\lambda_S}$ 보다 항상 크기 때문에 식 (10)에서  $\beta$ 가 0인 경우를 제외하고 동적 TDMA의 평균 큐 크기가 정적 TDMA에 비해 항상 크다.

정적 TDMA와 동적 TDMA를 변형된 M/D/1 모델을 이용하여 NU의 지연시간 및 큐 크기를 분석한 결과, 동적 TDMA를 적용했을 때 NU는 지연시간과 큐 크

기 측면에서 정적 TDMA에 비해 성능이 저하되는 것을 알 수 있다.

### 3.2 시스템 데이터처리량

시스템 데이터처리량은 네트워크에 참여하는 모든 NU의 데이터 처리량의 합으로 정의한다. 동적 TDMA의 하나의 시간슬롯에서의 데이터처리량을  $S$ 라 하자. 네트워크에 참여하는 NU의 수는  $N(=M_d/2)$ 이기 때문에 할당된 시간슬롯이 항상 데이터처리에 사용되고 가정하면 정적 TDMA의 시스템 데이터처리량의 최대치는  $2NS$ 가 된다. 하지만 발생하는 데이터의 비율에 따라 시간슬롯이 데이터를 처리하지 않는 유휴상태일 때가 있기 때문에  $\beta$ 가 0보다 크면 시스템 처리량은  $2NS$ 보다 작아진다.

반면 동적 TDMA에서 IS의 개수는  $\lceil \alpha M_d \rceil$ 이고 네트워크에 참여하고 있는 NU의 개수는 정적 TDMA와 마찬가지로  $N$ 이다.  $\lambda_S$ 인 경우 기존 NU에 할당되지 않은 시간슬롯을 새로 진입하는 NU들이 모두 사용한다고 가정하면 동적 TDMA의 시스템 데이터처리량은 다음과 같다.

$$S_{d,low} = NS + (M_d - N - \lceil \alpha M_d \rceil)S \quad (11)$$

식 (11)에서  $NS$ 는 기존 NU에 의한 데이터처리량이고  $(M_d - N - \lceil \alpha M_d \rceil)S$ 는 새로 진입한 NU에 의한 데이터처리량을 의미한다. 한편,  $\lambda_L$ 인 경우 IS를 제외한 시간슬롯에서 각 NU들이 시간슬롯을 할당 받기 때문에 시스템 데이터처리량은 다음과 같이 표현된다.

$$S_{d,high} = (2N - \lceil \alpha M_d \rceil)S \quad (12)$$

따라서 식 (11), (12)에 의해서  $\lambda$ 의 상태를 고려한 동적 TDMA의 시스템 처리량은 식 (13)과 같이 정리된다.

$$S_d = \beta S_{d,low} + (1-\beta) S_{d,high} = (2N - \lceil \alpha M_s \rceil)S \quad (13)$$

Fig. 3은 시스템 처리량을 정적 TDMA의 시스템 데이터처리량으로 정규화하여 정적 TDMA와 동적 TDMA를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 동적 TDMA의 시스템 데이터 처리량은  $\alpha$ 가 작고  $\beta$ 가 클수

록 증가한다. 그리고  $\alpha$ 가 크고  $\beta$ 가 작은 경우에는 정적 TDMA에 비해 시스템 데이터처리량이 작아지는 것을 알 수 있다.  $\alpha$ 가 클수록 제어 패킷을 전송하기 위한 슬롯이 많아지고 데이터 패킷을 전송하기 위한 시간슬롯은 적어지기 때문에 시스템 데이터처리율은 감소하게 된다. 그리고  $\beta$ 가 0에 가까워지면 정적 TDMA의 시스템 데이터처리율이 동적 TDMA의 시스템 데이터처리율보다 높아진다. 하지만  $\beta$ 가 증가할수록 동적 TDMA가 더 높은 시스템 데이터처리율을 나타낸다. 즉,  $\alpha$ 와  $\beta$ 에 의해서 시스템 처리량에 대한 성능이 크게 좌우됨을 알 수 있다.

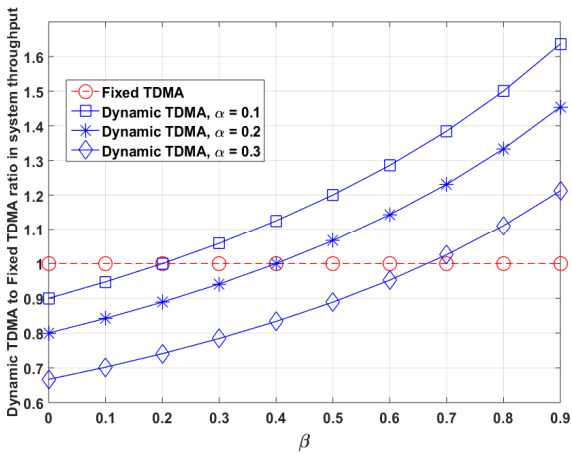


Fig. 3. Dynamic TDMA to fixed TDMA ratio in system throughput(theoretical result)

#### 4. 모의 실험

모의실험에서 동적 TDMA는 패킷 발생률( $\lambda_S, \lambda_L$ )에 따라 2가지 형태의 TDMA 구조로 운용된다. TDMA 구조를 변경하기 위한 제어패킷은 IS를 통해 전달되며 TDMA 구조는 항상 성공적으로 변경된다고 가정한다. 또한 할당되지 않은 유휴 시간슬롯들은 네트워크에 새로 진입하는 NU들에 모두 할당되어 데이터 전송에 사용된다. 그리고 전체 시간슬롯 중 제어패킷을 전송하기 위한 시간슬롯의 개수와 패킷발생율의 변화가 네트워크 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해  $\alpha$  값을 0부터 0.3까지 0.1씩 증가시키고,  $\beta$  값도 0부터 0.9까지 0.1씩 증가시키며 실험 하였다. 한편 정적 TDMA는 한 개의 TDMA 구조로 운용되고 예상되

는 최대 패킷발생율을 기준으로 시간슬롯을 할당하기 때문에  $\lambda_L$ 을 기준으로 시간슬롯을 할당한다. 그리고 패킷발생율이  $\lambda_S$ 로 변경되어도 TDMA 구조는 변경되지 않는다. 따라서 새로운 NU의 진입이 불가능하고 IS 슬롯은 존재하지 않는다.

현재 운용하고 있는 전송데이터링크를 고려하여 프레임 길이 및 시간슬롯 길이, 데이터 처리율, 메시지 크기를 선정하였다. Table 2는 모의실험에 사용한 주요 파라미터 값이다. 실험은 MATLAB을 이용하여 푸아송 분포를 따르는 랜덤값을 매 프레임마다 발생시키며 수행되었다.

Table 2. Parameters for simulation

Parameters	Values (Fixed / Dynamic TDMA)
Number of slots	100 / 200
Number of NUs	10
Slot time	48 msec / 24 msec
Frame time	4.8 sec
Data rate	19.6 Kbps
Message size	72 bit
$\alpha$	0.1, 0.2, 0.3
$\beta$	0 ~ 0.9

#### 4.1 지연시간

Fig. 4는 동적 TDMA와 정적 TDMA에서 NU의 평균 지연시간을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 정적 TDMA가 가장 적은 지연시간을 나타내고 있다. 이는 3장에서의 수학적 분석 결과와 일치한다. 정적 TDMA는 최대 패킷발생율을 고려하여 충분한 시간슬롯을 할당받았기 때문이다. 반면 동적 TDMA는  $\alpha$ 가 클수록 지연시간이 크게 증가한다.  $\alpha$ 가 커짐에 따라 각 NU가 할당 받을 수 있는 시간슬롯의 개수가 줄어들기 때문이다. 반면  $\alpha$ 가 작으면 각 NU에 할당할 시간슬롯이 상대적으로 많아지기 때문에 지연시간이 그만큼 줄어든다. 따라서 동적 TDMA에서 지연시간을 최소화하기 위해서는  $\alpha$ 를 최소화해야 한다. 그리고  $\beta$ 가 증가할수록 패킷발생율이 낮은 경우의 비율이 높기 때문에 전반적으로 지연시간이 줄어든다.

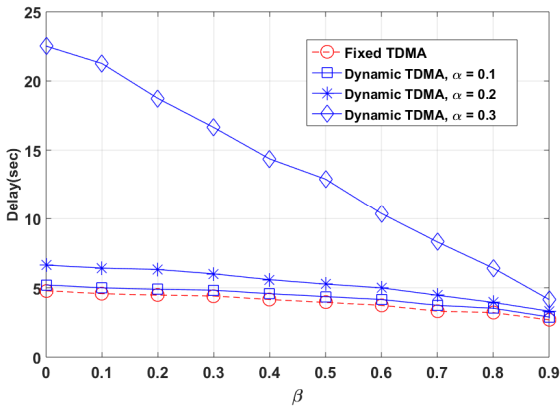


Fig. 4. Delay in dynamic TDMA and fixed TDMA

#### 4.2 큐 크기

Fig. 5는 동적 TDMA와 정적 TDMA에서 NU의 평균 큐 크기를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 정적 TDMA의 NU는 패킷 발생률과 무관하게 항상 충분한 시간슬롯을 보유하고 있기 때문에 큐의 크기가 가장 작다. 반면 동적 TDMA의 NU는 패킷 발생률이 낮아지면 보유하고 있는 시간슬롯의 개수가 줄어들어 정적 TDMA에 비해 큐 크기가 다소 증가하게 된다. 그리고  $\beta$ 가 증가할수록 패킷발생률이 낮은 경우의 비율이 높기 때문에 전체적으로 큐의 크기가 줄어들게 된다. 또한  $\alpha$ 가 클수록 NU에 할당되는 시간슬롯의 개수가 적어지므로 큐의 크기가 증가하게 된다. 3장에서 수학적 분석을 통해 살펴본 것과 같이  $\beta$ 와 무관하게 동적 TDMA가 정적 TDMA에 비해 항상 NU의 큐 크기가 크다.

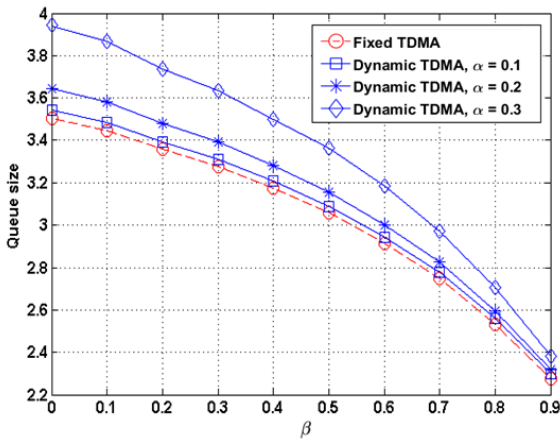


Fig. 5. Queue size in dynamic TDMA and fixed TDMA

#### 4.3 시스템 데이터처리량

Fig. 6은 동적 TDMA와 정적 TDMA의 시스템 데이터처리량의 상대비를 나타낸다. 그림에서 1보다 큰 값은 동적 TDMA가 정적 TDMA에 비해 시스템 데이터처리량이 크다는 것을 의미하고 1보다 작은 값은 동적 TDMA가 정적 TDMA에 비해 시스템 데이터처리량이 작다는 것을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이  $\beta$ 가 증가하고  $\alpha$ 가 작을수록 동적 TDMA의 시스템 데이터처리량이 정적 TDMA에 비해 크게 증가한다. 이는  $\alpha$ 가 작을수록 NU에 할당할 수 있는 시간슬롯의 개수가 늘어나고  $\beta$ 가 증가할수록 유휴 시간슬롯이 많이 발생하여 이를 새로 진입하는 NU에 할당할 수 있기 때문이다. 하지만  $\alpha$ 가 크거나  $\beta$ 가 작은 경우에는 정적 TDMA에 비해 동적 TDMA의 시스템 데이터처리량이 오히려 작아질 수 있다. 이와 같은 경향은 제3장의 수학적 분석 결과와 일치한다.

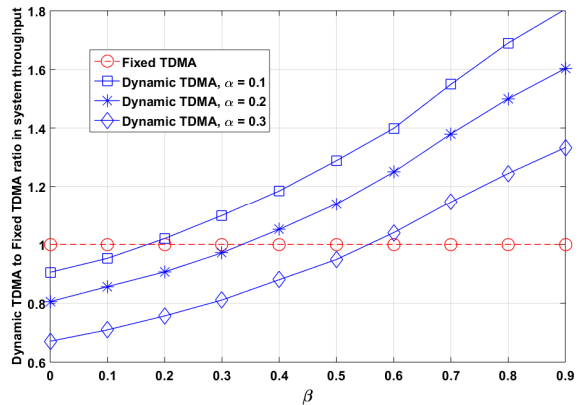


Fig. 6. Dynamic TDMA to fixed TDMA ratio in system throughput(simulation result)

### 5. 결론 및 토의

수학적 분석 및 컴퓨터 모의실험을 통해 전송데이터링크 환경을 고려한 정적 TDMA와 동적 TDMA의 성능을 비교 분석하였다. 동적 TDMA를 적용했을 때 정적 TDMA를 적용한 경우에 비해 각 NU의 지연시간 및 큐 크기가 증가한다. 하지만 Fig. 4와 5에서 살펴본 바와 같이 프레임의 전체 시간슬롯 중 10% 이하를 IS으로 사용하면 정적 TDMA와 유사한 성능을 구현할 수 있다. 그리고 시스템 데이터처리량 측면에

서  $\alpha$ 가 충분히 작고  $\beta$ 가 큰 경우 동적 TDMA가 정적 TDMA에 비해 매우 우수한 성능을 나타내었다. 따라서  $\alpha$ 가 충분히 작아질 수 있도록 MAC 프로토콜을 설계하고 네트워크 운용 시  $\beta$ 를 고려하여 동적 TDMA를 적용하여야 한다.

한편, 적의 위협이 유동적이고 다변화되고 있기 때문에 융통성 있는 작전을 지원하기 위한 동적 TDMA의 적용은 필수적이다. 동적 TDMA가 정적 TDMA에 비해 융통성 있는 네트워크 운용이 가능하지만 시스템이 복잡해지고 이를 구현하기 위한 오버헤드가 발생하기 때문에 특정 조건에서는 정적 TDMA에 비해 성능이 저하될 수 있다. 하지만 앞서 살펴본 바와 같이 동적 TDMA의 성능을 좌우하는 주요 파라미터들을 적절히 선택하면 정적 TDMA에 비해 우수한 성능을 구현할 수 있다. 따라서 최적화된 네트워크 성능을 구현하기 위해서는 동적 TDMA와 정적 TDMA를 작전 환경에 따라 적응적으로 적용할 수 있어야 한다. 이를 위해서 실제적인 다양한 군 작전 모델에 기반한 동적 TDMA 기법에 대한 연구가 필요하다.

## References

- [1] Tae Gong Lee, et. al., "NCW Theory and Application," Hongrung Publishing Co., 2008.
- [2] D. S. Aberts, J. J. Garstka and F. P. Stein, "Network Centric Warfare: Developing and Leveraging Information Superiority," CCRP, 2000.
- [3] Jong-Sung Kim, et. al., "The Introduction of Tactical Data Link and Development Trend," Journal of KIISE, Vol. 25, No. 9, pp. 18-27, Sep. 2007.
- [4] F. Xie, Z. Feng and Z. Wei, "Connectivity Guaranteed Cluster Header Selection Scheme based on Spectra Analysis of Graph," 2011 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing(WCSP), Nanjing, pp. 1-5, 2011.
- [5] J. Baek, S. K. An and P. Fisher, "Dynamic Cluster Header Selection and Conditional Re-Clustering for Wireless Sensor Networks," in IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 56, No. 4, pp. 2249-2257, November 2010.
- [6] Seung-Chun Kim, "K-JTDLS Development Trend," Defense Technical Information, Vol. 9, April, 2008.
- [7] M. J. Ryan and M. R. Frater, "Tactical Communications for the Digitized Battlefield," Artech House, 2002.
- [8] Northrop Grumman Corporation, "Understanding Link-16: A Guidebook for New User," Sep. 2001.
- [9] Northrop Grumman Corporation, "Link-22 Guidebook," July, 2009.
- [10] R. Rom and M. Sidi, "Multiple Access Protocols: Performance and Analysis," Springer-Verlag, New York, 1990.
- [11] F. S. Hillier and B. Jabbari, "Analysis of the Fixed-Assigned TDMA Technique with Finite Buffer Capacity," IEEE Transaction on Communications, Vol. Com-35, No. 7, pp. 724-729, July 1987.
- [12] L. Kleinrock, "Queueing Systems, Volume 1: Theory," Wiley-Interscience, 1975.
- [13] Chang-Woon Park, et. al., "Dynamic TDMA for Tactical Data Transmission in Wireless Networks," The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences(J-KICS), Vol. 35, No. 11, pp. 1640-1649, Nov. 2010.
- [14] Jong-Kwan Lee, Kyu-Man Lee and Jaesung Lim, "Distributed Dynamic Slot Assignment for Fast Broadcast Transmission in Tactical Ad Hoc Networks," IEEE MILCOM, Nov. 2012.