

# 한국형 합동전술데이터링크 구축을 위한 Link-16 PHY/MAC 기술 분석

박형원 | 노홍준 | 임재성  
아주대학교

## 요약

미래의 전쟁은 적 보다 더 나은 상황인식(SA: Situation Awareness)을 통한 정보우위를 기반으로 전쟁을 수행하는 네트워크 중심전(NCW: Network Centric Warfare)으로 작전 수행 개념이 빠르게 변하고 있다. 이에 따라 네트워크 중심전을 실현하기 위한 핵심 기술인 전술데이터 링크의 중요성이 크게 부각되고 있으며, 한국군은 자주 국방을 이루기 위한 한국형 전술데이터 링크를 개발 및 구축하기 위한 계획을 진행하고 있다.

본 원고에서는 한국형 합동전술데이터링크 구축을 위해 현재 미군에서 운용하고 있는 최신 전술데이터링크 기술인 Link-16 시스템의 핵심 요소기술인 PHY계층과 MAC계층에 관하여 살펴본다. 먼저 PHY 계층의 송·수신기 구조를 분석하여 전술웨이브폼의 성능을 알아본다. 다음으로는 MAC 계층에서의 자원할당방식을 알아보고, 최근 해군에서 개발 중인 Link-22 시스템의 특징을 살펴봄으로써 Link-16 MAC 계층 기술의 발전방향에 대해 살펴본다. 마지막으로 이러한 기술 분석과 함께, Link-16의 PHY 및 MAC 계층 기술들의 성능을 시뮬레이션을 통해 분석함으로써 한국형 전술데이터링크 구축을 위해 필요한 기술요소들의 실질적인 성능에 대해 알아본다.

## 1. 서론

미래의 전쟁 개념은 플랫폼 중심전에서 네트워크 중심전

(NCW: Network Centric Warfare)으로 빠르게 바뀌고 있다 [1]. 현대전에서 승패의 주요 결정요소는 플랫폼의 민첩성 또는 보유 무기의 사거리가 아니라 적보다 더 나은 상황인식(SA: Situational Awareness) 및 유지 능력, 실시간 지휘통제 능력, 목표물에 대한 정밀타격 능력 등이다. 이러한 능력을 활용하여 전쟁을 수행하는 것이 네트워크 중심전의 개념이다.

따라서 네트워크 중심전에서는 센서 체계, 지휘통제체계, 타격체계가 네트워크를 통한 상황인식을 공유하고 이를 통해 협동교전 및 정밀타격을 수행하여 전쟁 수행능력을 극대화한다. 다수의 체계들은 위성을 통한 우주 네트워크, 공중 유닛들을 연결하는 공중 네트워크, 정찰 및 감시를 수행하는 센서 네트워크, 지상 유닛들과 지휘본부를 연결하는 지상 네트워크 등으로 구성되며, 네트워크를 통하여 체계 간의 국지 전술 상황자료 상호 전파, 수집된 상황자료의 융합, 공통 상황인식에 의거한 지휘통제 및 교전이 지원된다. 이때 체계간의 지휘·통제를 위한 통신 수단으로써 전술데이터링크(TDL: Tactical Data Link)가 사용된다.

전술데이터링크는 전술적 수준의 작전을 수행하기 위해 필요한 각종 전술데이터를 가용한 통신망을 이용하여 신속하고 정확하게 활용될 수 있도록 제공한다. 이를 위해 전술데이터링크는 C4ISR(Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance)-무기체계 간 전술데이터 교환을 위해 필요한 실시간 통신망의 역할을 담당한다[2]. 특히 전술데이터링크는 무기체계의 전투력 상승 및 시너지 효과, 현대전에서의 화두인 상호운용성 확보를 제공하며, 실시간 전술정보분배 및 지휘통제

능력 확보를 위한 핵심적인 체계로 인식되고 있다.

미군은 전술데이터링크의 중요성을 일찍부터 통감하고 지난 1960년대 말부터 지속적으로 이를 개발하고 있으며, 최근에 수행된 아프가니스탄전, 이라크전 등의 전쟁을 통해 그 유용성과 효용성이 입증되었다. 미군에서는 현재 전술데이터 링크를 통해 다수의 지휘통제 및 무기체계를 연동하고 있으며, 각 군단간 표준화된 메시지를 사용하여 합동작전에서도 상호간에 전술데이터를 공유 및 교환할 수 있도록 정의하고 있다. 미군은 2015년까지 주요 전술데이터링크를 J-시리즈 계열인 Link-16, VMF, Link-22로 전환할 계획이다.

한국군의 전술데이터링크는 해군과 공군 중심으로 구성되어 있다. 해군은 해군전술정보 체계(KNTDS: Korea Naval Tactical Data System)를 기반으로 대부분 Link-11과 Link-14 체계로 갖추어져 있으며, 미군전력과 공군의 중앙방공통제소(MCRC: Master Control and Reporting Center)와 연결되어 있다. 공군은 현재 MCRC를 기반으로 레이더 기지와 방공포 통제소를 운용하는 수준의 전술데이터링크 체계를 사용하고 있다. 전투기를 포함한 대부분의 공중 전력을 연결하는 전술데이터링크는 부재한 실정이다. 특히 전술데이터링크 체계 측면에서 육군은 무기체계와 타군과의 연결체계가 부족하기 때문에 현재 우리나라의 전술데이터 링크 체계는 독자적인 운용이 불가능하다.

이에 따라 한국군은 합동작전 및 연합작전 수준에서 독자적인 운용이 가능한 한국형 전술데이터링크 체계 구축을 위해 합동전술데이터링크시스템(JTDL: Joint Tactical Data Link System)을 개발하기 위한 노력을 진행하고 있다. 2단계에 걸쳐 개발 예정인 합동전술데이터링크시스템은 현재 2011년까지 기존 무전기 네트워크를 이용하여 합동작전의 필수정보를 교환할 수 있는 기본적인 체계를 구축하고 2011년부터 격자형 그리드 네트워크를 통한 진화된 데이터링크 체계를 구축할 것을 목표로 하고 있다. 이러한 합동전술데이터링크 시스템의 성공적인 개발을 위해서는 한국의 자주적 국방 능력 확보를 위한 독자적인 전술데이터링크 핵심요소 기술의 확보를 통한 체계 구축능력 확보가 필수적이다.

본고에서는 현재 미군에서 운용하고 있는 최신 전술데이터링크 기술인 Link-16 시스템의 무선 통신을 위한 핵심 계층인 PHY 계층과 MAC 계층에 관한 분석을 통해 한국형 전술데이터링크 구축에 필요한 요소 기술을 알아본다. 이를

위해 Link-16 시스템의 송·수신기 구조와 제공하는 자원할당 방식에 관해 분석한다. 뿐만 아니라, Link-16 시스템의 시뮬레이션을 통해 이러한 기술 요소의 속성에 관해 살펴보고, 한국형 전술데이터링크 확보를 위해 필요한 기술요소에 관해 알아본다.

## II. 전술데이터링크 시스템

### 1. Link-16 시스템

Link-16은 감시와 지휘, 통제(Surveillance and Command and Control)정보를 다양한 지휘통제 시스템 및 무기체계의 플랫폼 간 교환함으로써 작전 효용성을 향상시키기 위한 통신, 항법 및 식별 시스템이다. 이를 위해 다양한 플랫폼 간 정보 전달 시, Link-16은 고용량 전송 및 항재밍이 가능한 다중접속 기능을 제공한다. 이러한 Link-16은 북대서양조약기구(NATO: North Atlantic Treaty Organization)의 전술데이터링크로 채택되어 사용되고 있으며, 북대서양 조약기구의 STANAG 5516과 MIL-STD-6016에서 Link-16 네트워크와 TADILJ 메시지에 관해 기술하고 있다[3].

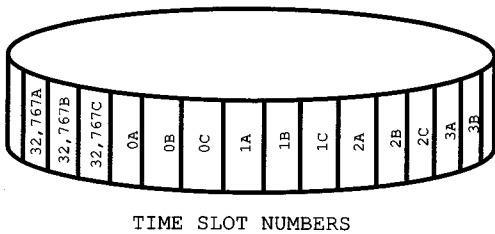
Link-16은 주파수 도약(FH: Frequency Hopping) 시분할 다중접속방식(TDMA: Time Division Multiple Access)을 기반으로 한다. Link-16 TDMA시스템의 기본 통신 단위는 net이며, net는 데이터 메시지가 전송되는 time slot으로 구성되어 있다. 일반적으로 사용자는 데이터 전송 시 특정 net중 하나의 net에 참여하여 데이터를 전송하지만, 매 slot마다 서로 다른 net에 참여하여 데이터를 전송할 수 있다. 각 net에서는 하루를 12.8분 간격으로 나누어 작업을 수행한다. 이 때 12.8분으로 나뉘어진 단위를 epoch라 하며, 따라서 하나의 net에서 하루는 112.5개 epoch로 구성된다. 각 epoch는 7.8125ms의 간격을 갖는 slot으로 나뉘므로 초당 128개의 slot을 할당 할 수 있다.

따라서 하나의 epoch는 총 98,304 개의 slot으로 구성된다. 각 epoch에서 이들 slot은 각각 32,768개의 slot을 갖는 A, B, C의 3개 셋으로 나뉘며, 각 slot은 셋과 slot number로 구분된다(e.g., 0A). 이러한 Link-16의 TDMA 자원 단위를 표로 정리하면 다음 <표 1>과 같다.

〈표 1〉 Link-16의 TDMA 자원 단위

1일	= 24시간
	= 112.5 Epoch
1 Epoch	= 12.8 분
	= 98,304 Time Slot
	= 3개 셋 (A, B, C)
1 Time slot	= 32,768 Time Slot/셋
	= 7.8125ms

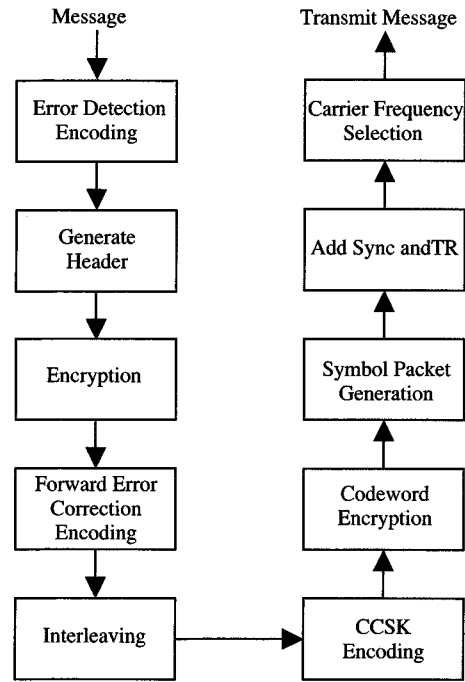
이 때 3개 셋의 slot들은 각각 인터리빙되어 전송되므로, 셋 A의 n번째 slot(nA)은 셋 C의 n-1번째 slot((n-1)C) 뒤에 전송되며, nA가 전송된 후에는 셋 B의 n번째 slot(nB)이 전송된다. 이처럼 Link-16에서는 규격화 되어 있는 네트워크 구조를 갖고 있기 때문에 현재 시간을 기준으로 epoch, 셋, time slot의 번호를 순차적으로 계산하여 slot을 할당한다. 이러한 Link-16의 net 구조는 다음 (그림 1)과 같다.



(그림 1) Link-16 TDMA의 net 구조

다음 (그림 2)는 Link-16 단말의 송신단 구조를 도시한 그림이다.

Link-16 TDMA 네트워크에서 메시지는 채널 코딩 전에 12비트의 오류 검출을 위한 패리티 비트를 추가한다. 패리티 비트는 210비트의 데이터와 35비트의 헤더 중 Track number와 Source field를 나타내는 15비트 정보를 포함한 225비트 데이터를 기반으로 생성된다. 이 때 패리티 비트와 데이터는 각각 동일한 크기인 4비트와 70비트의 3개 그룹으로 나뉘며, 3개의 패리티 비트 그룹에 패딩 1비트가 추가된 5비트의 패리티 비트 그룹이 각 데이터 그룹과 결합되어 75비트 워드의 기본 전송단위를 구성한다. 생성된 워드는 통



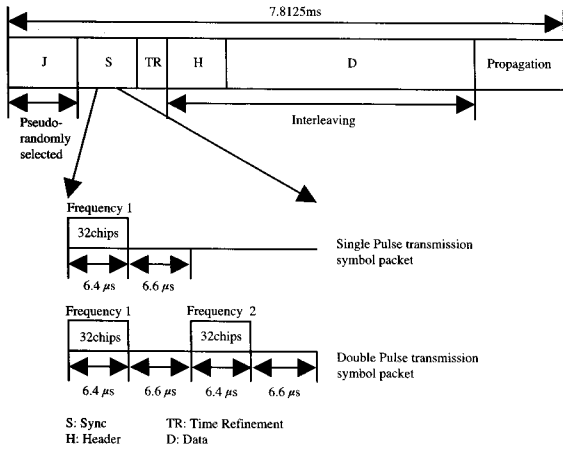
(그림 2) Link-16 단말의 송신 구조

신 모드의 종류에 따라 암호화 과정을 거친 후 Reed Solomon(RS) 코드를 통해 채널 코딩된다. 35비트 헤더와 3개의 75비트 데이터 워드는 각각 RS(16,7)과 RS(31,15)의 코드를 통해 채널 코딩된다. Link-16에서는 전송 시 5비트 단위의 심볼로 변조하여 전송하므로, 채널 코딩 역시 5비트 심볼 단위로 처리된다. 즉, 35비트 헤더와 75비트 데이터 워드는 각각 7개와 15개의 심볼로 간주되어 9개와 16개 심볼이 추가된다. 따라서 헤더와 3개의 데이터 워드는 각각 16과 31 심볼 블록이 된다. 생성된 헤더와 데이터에 대한 심볼 블록은 동시에 인터리빙 된다.

인터리빙 된 전체 데이터는 5비트의 각 심볼마다 32칩 길이를 갖는 시퀀스에 CCSK(Cyclic Code Shift Keying)를 통해 코딩된다. 생성된 CCSK의 각 칩은 MSK(Minimum Shift Keying)방식을 통해 펄스로 변조되며, 0.2μs의 전송시간을 갖는다.

따라서 32칩 시퀀스는 6.4μs의 전송 시간을 갖는 펄스로 변환된다. 각 펄스는 6.4μs의 전송 시간과 6.6μs의 휴지 시간을 갖기 때문에 13μs의 전송 주기를 갖는다. 변조된 펄스는

다시 한번 네트워크의 통신 모드에 따라 암호화가 수행된다. 다음 (그림 3)은 생성된 데이터가 전송되는 기본적인 Link-16 TDMA 시스템에서 slot의 구조를 나타낸 그림이다.



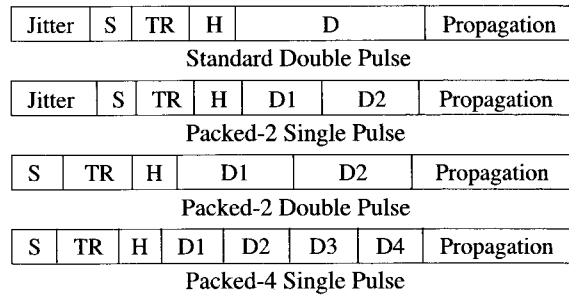
(그림 3) Link-16 Time slot의 기본 구조

(그림 3)에서 jitter는 펄스 전송을 시작하기 전에 송·수신단 사이에서 랜덤하게 선택된 시간 지연이다. Jitter는 송·수신단 사이에서 난수 과형을 발생시켜 항재밍 효과를 제공하는 역할을 하며 Link-16의 통신 모드의 종류와 메시지 구조에 따라 사용되지 않을 수 있다.

S는 동기화(Synchronization)를 위해 사용되는 16개의 DP 형태의 심볼 패킷이며, TR(Time Refinement)과 H(Header)는 각각 4, 16개의 DP구조로 패키징된 심볼 패킷으로 구성되어 있다. D는 데이터 심볼 패킷이 전송되는 구간이다. 각각의 심볼 패킷은 펄스 형태로 전송되며, 하나의 심볼 패킷을 나타내는 펄스의 반복 전송 유·무에 따라 Double Pulse(DP)모드와 Single Pulse(SP)모드의 두 가지 패키징 구조를 갖는다. (그림 3)에 나타나듯이 DP 형태의 심볼 패킷은 생성된 펄스가 반복되어 2번 전송된다. 따라서 전송 주기는 26μs 이며, 반복된 2개의 펄스는 서로 다른 주파수를 통해 전송된다. 이러한 구조를 통해 페이딩이나 재밍에 보다 강한 특성을 제공할 수 있다. 때문에 모든 메시지 구조에서 헤더는 DP형태로 전송된다. Propagation 구간은 Link-16 네트워크의 참여자 간 데이터 전송 시 전송 지연에 의한 문제를 방지하기 위한 가드 시간으로 최대 300nm에서 500nm의

거리 차가 있는 참여자 간 전송 지연을 보장해 줄 수 있는 값으로 선택 가능하다.

Link-16 TDMA 네트워크에서는 생성된 펄스의 반복 유무와 각 slot마다 전송될 심볼 블록의 개수에 따라 slot에서 전송되는 메시지의 구조가 4가지로 구분된다. 각각의 방식에 따른 메시지 구조는 다음 (그림 4)와 같다.



(그림 4) Link-16 TDMA 메시지 구조

Standard Double Pulse(STD/DP) 구조에서는 3개의 심볼 블록이 DP 형태로 전송된다. 하나의 심볼 블록이 31개의 심볼 패킷으로 구성되어 있고, DP형태이기 때문에 2번 반복되므로, 결국 3개의 심볼 블록을 전송하는 SPD/DP 구조에서는 할당된 slot에서 데이터 전송을 위해 186(2·3·31)개의 펄스를 전송한다. 이와 함께 동기화(2·16)와 TR(2·4) 그리고 헤더(2·16) 전송을 위한 72개 펄스가 더해진 총 258개의 펄스가 전송된다. Packed-2 Single Pulse(P2SP) 모드와 Packed-2 Double Pulse(P2DP)모드에서는 6개의 심볼 블록이 각각 SP와 DP 형태로 전송된다. P2SP 모드는 펄스가 반복되어 전송되지 않기 때문에 STD/DP모드와 동일하게 할당된 slot내에서 258개의 펄스를 전송하지만, 2배의 데이터를 전송할 수 있다. 반면 SP형태의 펄스 전송은 재밍이나 페이딩에 보다 약한 구조이다. P2DP 구조는 STD/DP 구조보다 2배의 심볼 블록을 동일한 DP형태로 펄스를 전송하기 때문에 slot 내에서 총 444(32+8+32+186+186)개의 펄스가 전송된다. 이를 전송하기 위해 jitter 구간을 삭제하여 전송 시간을 확보한다. Packed-4 Single Pulse(P4SP)구조에서는 12개의 심볼 블록이 전송된다. 펄스가 반복되어 전송되지 않기 때문에 slot내에서 전송되는 펄스의 수는 P2DP구조와 동일한 444개이다. P4SP구조 역시 펄스를 전송하기 위한 시간

확보를 위해 P2DP구조와 마찬가지로 jitter 구간이 없다. 이와 같은 메시지 구조에서 STD/DP구조의 effective data rate는 다음과 같다.

$$r_{STD/DP} = \frac{3blocks}{slot} = \frac{3blocks}{slot} \cdot \frac{70bits}{block} \cdot \frac{128slots}{sec} \quad (1)$$

$$= 26,880 bps$$

따라서 P2SP와 P2DP구조는 53,760bps의 effective data rate를 지원하고 P4SP구조는 107,520bps를 지원한다.

Link-16 네트워크는 주파수 도약과 데이터 암호화 유·무에 따라 3가지 통신 모드로 나뉜다. 각각의 모드는 다음 <표 2>와 같다.

<표 2> Link-16 통신 모드

Communication Mode	Frequency Hopping	Data Encryption
1	O	O
2	X	O
3	Not Used	Not Used
4	X	X

Link-16의 통신 모드의 분류는 4가지이지만, 모드 3은 사용하지 않기 때문에 3가지 통신 모드가 사용되고 있다. 통신모드 1은 주파수 도약과 데이터 암호화를 모두 적용하는 반면, 통신모드 2는 암호화만을 적용하고 통신모드 4는 주파수 도약과 데이터 암호화 모두를 사용하지 않는다. Link-16 네트워크에서 사용하는 주파수 대역은 960MHz에서 1215MHz 사이의 L밴드를 사용한다. 그러나 통신 모드 2와 4를 사용하는 경우는 모든 통신이 969MHz 대역을 통해 이루어진다. 통신 모드 1의 경우 주파수 도약을 수행한다. Link-16 네트워크에서 사용하는 대역에는 피아식별을 위해 사용되는 대역이 포함되어 있는 관계로 이를 제외한 나머지 대역을 3MHz 대역폭으로 나누어 총 51개 채널을 구성한다. 매 펄스 전송마다 서로 다른 채널을 도약하여 전송하기 때문에, 주파수 도약률은 77000회/sec가 된다. 이와 같은 절차를 거쳐 메시지는 Link-16 TDMA 네트워크에 적합한 신호가 된다.

Link-16 TDMA 네트워크에서 메시지 전송을 위한 slot 할당은 participation group(PG)에 의해 결정된다. 각각의 PG로 서로 다른 통신 채널이 할당되며, PG는 네트워크의 목적이

나 전파전달 경로에 따라 구성될 수 있다. 구성된 PG의 자원 요구량에 따라 slot이 할당된다. 따라서 PG의 용량은 할당된 slot 수에 의해 영향을 받는다. 할당 단위는 Recurrence Rate Number(RRN)에 의해 결정된다. 이는 하나의 epoch내에서 할당 받는 slot의 수를 나타내는 값으로, 2RRN이 하나의 epoch에서 해당 PG로 할당된 slot의 수를 나타낸다. 각 PG로 할당되는 net number와 slot의 수는 참여자의 요구량에 따라 동적으로 할당 가능하다. 각각의 PG로 할당된 slot을 사용하는 방식은 Dedicated access mode, Contention access mode와 Time slot Reallocation(TSR) access mode의 3가지로 구분 된다. Dedicated access mode는 주기적으로 발생하는 메시지를 전송하기 위한 모드로 해당 PG내에서 일정한 주기의 slot을 할당 받아 메시지를 전송한다. Contention access mode는 메시지 발생 시 PG로 할당된 slot을 랜덤하게 선택하여 데이터를 전송하는 방식이다. TSR access mode는 PG의 참여자 간 데이터 요구량을 측정하여 각각의 사용자에게 요구량에 맞추어 slot을 분배해주는 방식이다. 이 때 전체 요구량이 PG에 할당된 용량을 넘을 경우, 각 사용자의 요구량에 비례하여 할당량을 줄임으로써 slot을 분배한다.

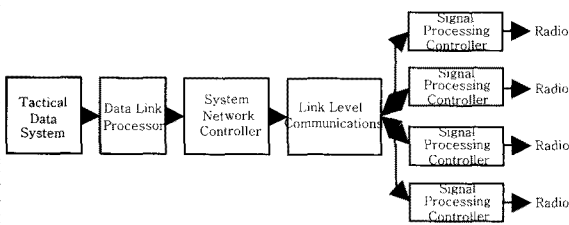
## 2. Link-22 시스템

Link-22는 기존 Link-11을 대체하기 위해 1990년 NATO Improved Link Eleven(NILE) 프로젝트로 개발되기 시작하였다. Link-22는 Link-11을 대체할 뿐만 아니라, 해상 환경에서 기존 Link-16으로 지원할 수 없었던 BLOS(Beyond Line Of Site) 문제를 해결하며 해상 환경에서 문제가 될 수 있는 Link-16의 속성을 수정하고 몇 가지 기술요소들을 보완하여 해상환경에서 Link-16에 준하는 전술데이터 링크를 제공하는 것을 목표로 하는 시스템이다. 본 장에서는 Link-22의 기술 요소 중 Link-16을 보완할 수 있는 요소들을 살펴본다.

먼저 Link-22는 NCW 전장환경에서 전술데이터링크의 생존성 향상을 위해 항재밍 능력과 대전자전 능력을 크게 강화하였다. 이를 위해 기본적인 에러 검출과 채널 코딩 이외에 추가적으로 전력 제어 기술과 적용형 안테나 어레이 기술을 추가적으로 제공함으로써 LPI/LPD(Low probability Interception and Detection)속성을 강화하였다.

이와 함께 Link-22는 보다 향상된 네트워크 유연성을 제공한다. 이를 위해 PHY계층에서는 다양한 웨이브폼과 병렬

전송을 지원하며, MAC계층에서는 무선자원의 동적할당 능력을 강화하였다. PHY계층에서는 각 사용자의 전송 환경과 능력, 메시지의 종류 등에 따라 메시지의 크기, 채널 코드의 종류 및 채널 코딩을 변경하여 전송할 수 있는 다양한 웨이브폼을 제공한다. Link-22는 HF 대역과 UHF 대역을 통해 데이터를 전송하며, 이 때 대역별 사용 가능한 웨이브폼에 따라 하나의 네트워크에서 HF 대역에서는 최대 4,053kbps를 지원하며, UHF 대역에서는 최대 12,667kbps 전송률을 지원한다. 더 나아가, Link-22 네트워크는 전송율을 더욱 향상 시키기 위해 사용자가 최대 4개의 서로 다른 네트워크에 참여할 수 있게 구성하였다. Link-22의 시스템 구조는 다음(그림 5)와 같다.



(그림 5) Link-22 시스템 구조

여기에서 tactical data system은 전술메시지를 생성하는 시스템을 가리킨다. Data Link Processor는 Link-22 시스템과의 인터페이스 역할을 하며, System Network Controller에서는 송·수신 메시지 처리를 담당한다.

Link Level Communications에서는 암호화를 제공하며, 4개의 Signal processing controller와 연동되어 동시에 4개의 네트워크와 통신을 할 수 있는 구조로 되어 있다. 또한 Link-22는 LOS와 BLOS 채널환경 모두에 적용할 수 있는 유연성을 제공한다. Link-22에서는 다중 경로 페이딩 채널 환경에 의한 문제를 해결하기 위해 데이터 메시지 전송과 함께 16심볼 크기의 probe 패킷을 전송한다. 이는 송·수신단 사이에서 약속된 형태로 전송되는 일종의 pilot 신호로, 수신단에서는 probe 패킷을 수신하여 송·수신단 사이의 무선 채널 환경을 측정한 후 등화기에 반영한다.

Link-22 TDMA 네트워크에서 통신을 필요로 하는 Nile Unit(NU)들은 하나의 네트워크를 형성하며, 구성된 네트워크는 네트워크에 참여한 NU의 수와 자원 요구량, 그리고 전

송 메시지의 업데이트 주기에 따라 Network Cycle Time(NCT)를 할당 받는다. NCT는 slot 사용 주기를 나타내는 값으로, 구성된 네트워크에 할당되는 slot의 양을 나타낸다. 동일 네트워크에 참여한 NU들은 NCT 내에서 slot을 할당 받으며, 각 NU의 요구량에 따라 서로 다른 수의 slot 할당을 지원할 뿐만 아니라, 서로 다른 크기의 slot 할당도 지원한다. 이를 통해 기존 Link-11과 Link-16에 비해 강화된 동적 자원할당 능력을 제공한다.

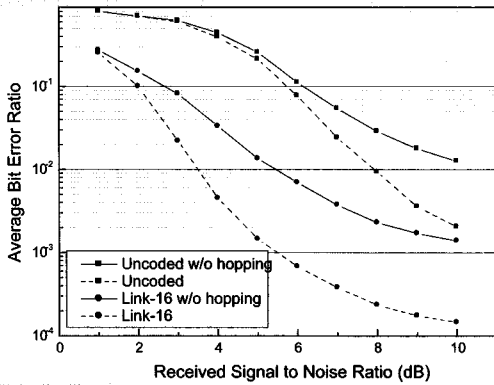
### III. 전술데이터링크 시스템 성능 분석

3장에서는 앞서 살펴 본 Link-16 시스템의 성능을 다양한 모의 실험을 통해 분석한다. PHY계층의 웨이브폼 특성을 비교하여, 한국형 전술데이터링크 구축에 필수적인 기술 요소들에 대해 살펴보고, MAC계층의 성능 분석을 통해 네트워크 운용 시 고려해야 할 속성을 알아본다.

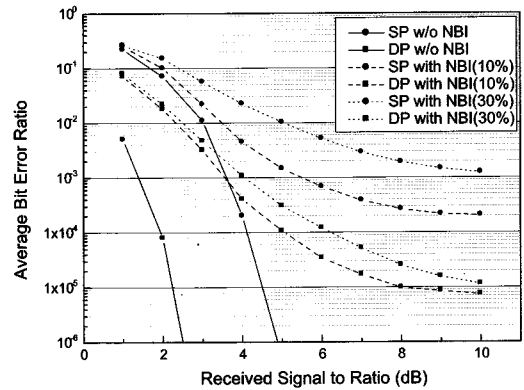
먼저 Link-16 시스템의 웨이브폼의 성능을 비교한다. 시뮬레이션 환경은 LOS가 보장되는 공중 환경을 가정하였다. 무선 채널은 전투기간 LOS 경로와 지상으로의 반사파가 존재하는 2-Ray 모델을 가정하였다. 에러 검출을 위한 CRC 코드와 에러 복구를 위한 Reed-Solomon 코드를 사용한다. 또한 전장 환경에서 발생 가능한 협대역 간섭(Narrow band interference: NBI)을 고려하였다. 다음 <표 3>은 기본적인 시뮬레이션 파라미터를 나타낸다.

<표 3> 시뮬레이션 파라미터

파라미터	설정값
주파수 대역	969-1206MHz (1008-1053/1065-1113MHz제외)
채널 대역폭	3MHz
채널 수	51개
주파수 도약율	약 77000회/sec
채널 코딩	RS(31, 15)
변조 방식	CCSK
통신 모드	1
채널 모델	2-Ray Model
공중 환경	최대 반경 300nm



(그림 6) 수신 SNR에 따른 채널 코딩과 주파수도약 기법의 평균 BER비교



(그림 7) 수신 SNR에 따른 SP와 DP 전송 시스템의 평균 BER비교

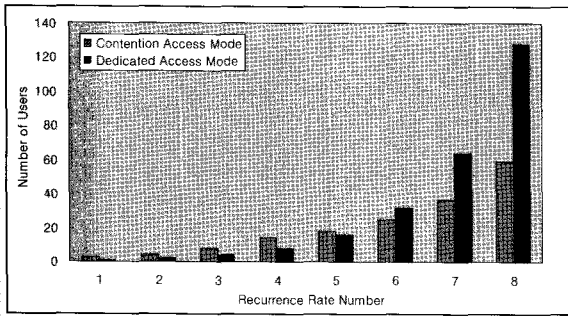
(그림 6)은 Link-16 시스템 웨이브폼의 채널 코딩과 주파수도약 효과를 수신 신호 대 간섭 비(SNR: Signal to Noise Ratio)에 따른 평균 비트 오류율(BER: Average Bit Error Rate)로 비교한 그림이다. 전송 펄스는 단일 펄스로 메시지를 전송하는 SP 형태로 가정하였다. 단일 펄스로 패킷을 전송하기 때문에, 수신단에서의 다이버시티 이득은 없다. NBI는 전체 대역 대비 10% 채널을 점유한다고 가정하였으며, 간섭 신호의 세기는 전송 신호 세기와 동일한 크기라고 가정하였다. NBI는 수신단에서 신호 특성 분석이 불가능하다고 가정하였다. Uncoded w/o hopping의 경우는 Reed Solomon 채널 코딩과 주파수도약을 모두 하지 않은 경우로 그림에서 알 수 있듯이 가장 나쁜 성능을 보인다. 특히 채널 코딩을 하지 않고 주파수도약만 하는 경우인 두 번째 실험 결과와 채널 코딩을 적용하지만, 주파수도약을 하지 않은 세 번째 결과를 비교했을 때 채널 코딩과 주파수도약 중 하나라도 적용하지 않을 경우 마찬가지로 나쁜 평균 비트 오류율을 나타냄을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과에서 나타나듯이 주파수도약과 채널 코딩 유무에 따라 큰 성능 차이가 나며 두 가지 기법을 모두 적용해야 좋은 성능이 나타남을 알 수 있다. 따라서 한국형 전술데이터링크 구축 시 채널 코딩과 주파수도약은 필수적이다.

(그림 7)은 Link-16 시스템의 펄스 전송 형태인 SP와 DP 펄스 전송과 NBI의 크기에 따라 평균 비트 오류율을 수신 신호 대 간섭 비를 기반으로 비교한 그림이다. 먼저 DP 형태의 패킷 전송 환경에서는 서로 다른 주파수 대역으로 펄스를 2번 반복하여 전송하기 때문에 SP 형태의 패킷 전송에 비해

추가적인 다이버시티 이득을 획득할 수 있다. 결과에서 나타나듯이 DP 형태의 패킷 전송을 통해 평균 BER 측면에서 높은 이득을 얻고 있다. 특히 NBI의 효과가 클수록 DP 형태의 패킷 전송의 효율이 좋아짐을 알 수 있다. 간섭이 점유하는 비율을 10%와 30%로 바꿔가며 실험한 결과 그림에서 나타나듯이 DP형태의 패킷 전송은 큰 성능 차이를 보이지 않는 것에 반해 SP 형태의 전송에서는 평균 비트 오류율이 크게 감소함을 알 수 있다. 따라서 적군의 전파 방해가 심한 환경이나, 중요한 전술 데이터 전송 시에는 DP 형태의 패킷 전송이 필요함을 알 수 있다. 이와 같이 한국형 전술데이터링크 구축 시에도 DP 형태와 유사한 오버헤드를 추가하는 형태의 웨이브폼 구성이 필요할 것으로 예측된다.

다음은 Link-16 TDMA 네트워크 환경에서의 네트워크 처리량을 비교한다. 300nm의 반경을 갖는 셀을 균등한 격자 형태로 나눈 네트워크를 가정하였다. 각각의 격자에 하나의 전투기가 위치한다고 가정하였으며, 전투기의 수를 증가시키수록 격자의 개수를 비례하여 증가시켰다. 전투기에서 전송하는 트래픽의 종류는 상향링크의 control backline으로 전송되는 메시지로 가정하였다. 각 전투기에서 메시지 전송 주기는 3초로 가정하였다.

(그림 8)은 비경쟁 기반 접속 방식과 경쟁 기반 접속 방식에서 RRN의 값에 따른 PG의 최대 허용 전투기 수를 비교한 그림이다. 메시지 전송 주기를 3초로 가정하였기 때문에 최소 RRN은 8이다. RRN 값의 증가에 따라 PG에 할당되는 slot의 수가 2배씩 증가하므로 점차 지원 가능한 사용자의 수가



(그림 8) Link-16 TDMA 네트워크의 RRN에 따른 최대 허용 전투기의 수

증가함을 볼 수 있다. 결과에 의하면, 비경쟁 기반 전송 모드에서는 지원 가능한 사용자의 수가 slot의 수와 균등하게 비례하여 증가하지만, 경쟁 기반 전송 모드에서는 균등하게 비례하여 증가하지 않는다. 이는 경쟁에 의한 손실과 전투기 간 거리 차에 따른 표차 효과(Capture effect)로 인한 성능 향상이 원인이다. 때문에 전투기의 수가 많을 경우는 경쟁 기반 전송 모드에서는 할당된 slot에 비해 더 적은 전투기 수가 지원된다. 따라서 slot 할당 시 전투기의 수가 많을수록 비 경쟁 slot 할당이 불리함을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

미래의 전장환경에서 전쟁의 승패는 적보다 빠르게 전장 정보와 지식을 획득하고, 획득된 정보가 다양한 계층의 지휘관에게 신속하게 전달 및 공유되는지에 따라 결정된다. 때문에 다양한 무기 체계 및 감시 체계, 그리고 지휘통제 체계 간 정보 공유를 위한 상호 유기적이며 효과적인 네트워크 연결이 필수적이다. 이를 제공하기 위한 전술데이터 링크의 중요성은 점차 증가하고 있다. 미군은 지난 아프가니스탄전과 이라크전에서 전술 데이터링크의 효용성을 인지하고 최신 전술 데이터링크 기술인 Link-16 체계를 다수의 지휘통제 체계와 무기체계에 적용하고 있다. 현재 한국군은 도입한 무기체계에 따른 개별적인 전술데이터링크를 운용하고 있으며, 이들 간의 상호 운용성이 지원되지 않고 있으며 독자적인 운용이 불가능한 상황이다. 이에 따라 한국군

은 2012년 전시작통권 환수와 맞추어 국산 기술을 이용한 한국형 전술데이터링크 체계를 구축하기 위한 노력을 진행하고 있다. 본 원고에서는 이러한 환경에서 한국형 전술데이터링크를 구현함에 있어 가장 최적의 물 모델이 될 수 있는 Link-16 시스템의 핵심 요소 기술인 PHY계층과 MAC계층에 대해 살펴보았다. 이와 함께 최근 해군에서 기존 Link-11을 대체하여 Link-16에 준하는 성능의 전술데이터링크를 개발하기 위해 개발 중인 Link-22 기술의 특성을 살펴보고 추가로 고려할 기술들을 알아보았다. 마지막으로 Link-16의 PHY계층과 MAC계층의 성능을 모의 실험을 통해 비교하였다. Link-16의 웨이브폼 성능 분석을 통해 한국형 전술데이터링크 구축에 오류 복구를 위한 채널 코딩과 주파수 도약의 중요성을 알아 보았으며, 다양한 형태의 웨이브폼을 운용할 수 있음을 알아 보았다. 또한 Link-16에서 지원하는 다중접속방식의 특성을 분석하여 전술 환경에 따라 네트워크 운용 시 고려해야 할 점을 알아 보았다. 이러한 분석들은 한국군 전술데이터링크 구축을 위한 중요한 밑거름이 될 것이며, 국산 기술을 사용한 합동전술데이터링크 환경을 조성하여 각 군의 무기체계와 지휘통제 체계 간의 상호운용성을 지원하는 체계를 구축하는데 큰 힘이 될 것이다.

본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음.

(IITA-2009-C1090-0902-0003)

#### 참 고 문 헌

- [1] US DoD, "Network Centric Warfare Report To Congress", Jul, 2001.
- [2] 김한동, 최태봉, "전술데이터링크 기술 표준화 동향", 한국통신학회지, 2007년, Oct.
- [3] MIL-STD-6016C, Tactical Digital Information Link(TADIL) Message Standard, 31, Mar, 2004.
- [4] J. Sorroche, "Tactical Digital Information Link-Technical Advice and Lexicon for Enabling Simulation(TADIL-TALES)", 10<sup>th</sup> Int. Command and Control research and



technology Symposium, 2005

- [5] *Understanding Link -16: A Guide for New Users*, Northrop Grumman Corporation, Oct. 2001.
- [6] 전병욱, 김의순, “한국군 전술데이터링크 체계 구축을 위한 제언”, 국방정책연구, 2003년 가을호.
- [7] W. J. Wilson, “Applying Layering Principles to Legacy Systems: Link 16 as a Case Study”, *IEEE Milcom* 2001, vol. 1, Oct. 2001.
- [8] R. LeFever, R. C. Harper, “Performance of high rate Link-22 operation obtained by using quadrature amplitude modulation (QAM)”, *IEEE Milcom* 1999, vol.2, Nov. 1999.
- [9] 박형원, 임재성, “전장환경에서 국소 간섭을 줄이기 위한 다중반송파 시스템 기반의 시간-주파수 단위의 확산 방식”, 한국통신학회 추계학술대회, Nov. 2008.

약 력



박형원

2003년 아주대학교 정보 및 컴퓨터 공학부 학사  
 2005년 아주대학교 정보통신전문대학원 석사  
 2005년 ~ 현재 아주대학교 정보통신전문대학원 박사과정  
 관심분야: 다중접속, 자원할당, 전술데이터링크 시스템



노홍준

2007년 아주대학교 학사  
 2008년 ~ 현재 아주대학교 석사과정  
 관심분야: NCW, 전술데이터링크, Cognitive Radio, Dynamic Spectrum Allocation



임재성

1983년 아주대학교 전자공학과 학사  
 1985년 KAIST 영상통신 석사  
 1994년 KAIST 디지털통신 박사  
 1985년 ~ 1988년 대우통신 종합연구소 신입연구원  
 1988년 ~ 1995년 디지털 정보통신연구소 책임연구원  
 1995년 ~ 1998년 SK텔레콤 중앙연구원 책임연구원  
 1998년 ~ 현재 아주대학교 정보통신 전문대학원 교수  
 2006년 ~ 현재 AJOU-TNRC 센터장  
 관심분야: 이동통신, 무선네트워크, 국방전술통신

