

Robustness Evaluation of Tactical Network based on SNA

Ji-Hye Park*, Soung-woong Yoon*, Sang-Hoon Lee*

*Student, Dept. of Computer Science, Korea National Defense University, Nonsan, Korea

*Professor, Dept. of Computer Science, Korea National Defense University, Nonsan, Korea

[Abstract]

Network robustness is one of the most important characteristics needed as the network. Over the military tactical communication network, robustness is a key function for maintaining attack phase constantly. Tactical Information Communication Network, called TICN, has mixed characteristics of lattice- and tree-type network topology, which looks somewhat weak in the viewpoint of network robustness. In this paper, we search articulation points and bridges in a current Tactical Information Communication Network using graph theory. To improve the weak points empirically searched, we try to add links to create the concrete network and then observe the change of network-based verification values through diminishing nodes. With these themes, we evaluate the generated networks through SNA techniques. Experimental results show that the generated networks' robustness is improved compared with current network structure.

▶ **Key words:** TICN, Network Robustness, SNA, Graph Theory

[요 약]

네트워크 강건성은 네트워크의 가장 중요한 요구특성 중 하나이다. 전술 통신 네트워크에서 강건성은 공격 단계를 지속적으로 유지하는 핵심 기능이다. TICN이라고 하는 육군의 전술 통신 네트워크는 격자형과 트리형 네트워크 토폴로지가 혼합되어 있으며, 트리형 구조는 네트워크 강건성에서 다소 약하다. 따라서 본 논문에서는 그래프 이론을 적용하여 현재 전술 통신 네트워크의 취약점인 단절점과 브리지를 탐색하고 이 부분을 개선하기 위해 기존 네트워크에 링크를 추가하여 네트워크를 생성한다. 이후 SNA 기반 네트워크 강건성 평가를 위해 핵심 노드를 단절하여 각 네트워크의 지표 변화를 관찰한다. 실험 결과, 보완된 네트워크의 강건성이 기존 운용개념 하의 네트워크 구조보다 개선되었음을 보여준다.

▶ **주제어:** 전술정보통신망, 네트워크 강건성, 사회 네트워크 분석, 그래프 이론

-
- First Author: Ji-Hye Park, Corresponding Author: Sang-Hoon Lee
 - *Ji-Hye Park (jhp891223@gmail.com), Dept. of Computer Science, Korea National Defense University
 - *Soung-Woong Yoon (ysw1209@gmail.com), Dept. of Computer Science, Korea National Defense University
 - *Sang-Hoon Lee (07uandme@gmail.com), Dept. of Computer Science, Korea National Defense University,
 - Received: 2019. 08. 07, Revised: 2019. 09. 15, Accepted: 2019. 09. 16.

I. Introduction

미래 작전환경의 변화는 전장을 가시화하고 전투력 운용의 시공간적 제약 요소 극복을 가능하게 한다. 이에 따라 전쟁 수행 양상이 전투효율을 극대화 할 수 있는 네트워크 중심으로 변화하였다. 이것을 네트워크 중심전(NCW, Network Centric Warfare)이라고 하며, 그 정의는 급속히 발전하는 정보통신기술을 이용하여 전장 내에서 지형적으로 산재된 부대들이 강건한 통신망(Robust Network)으로 연결된 네트워크화 된 부대를 형성하는 것이다[1].

강건한 통신망은 강건성(Robustness)으로 측정될 수 있으며, 강건성은 네트워크가 단절되는 상황이나 외부 공격에도 원래의 기능을 유지할 수 있는 정도를 뜻한다[2].

NCW의 개념에 따라 지형적으로 산재된 부대들이 강건한 통신망으로 연결되어 임무를 수행하기 위해서는 전술정보통신망(TICN : Tactical Information Communication Network)과 같은 기반체계의 역할이 핵심이며, 통신망 운용 시점이 유사시라는 점을 감안하면 강건성은 매우 중요한 특성이대[3].

TICN의 네트워크 구조는 격자형과 트리형의 혼합구조로 운용된다. 트리형 구조는 1개의 링크만을 구성하는 것으로 외부 공격이나 전송로의 단절 상황에서 지속적인 지휘통신을 보장할 수 없다[4]. 이에 대한 의문점에서 출발하여 육군의 핵심 기동통신체계인 TICN의 주요 요구특성 중 하나인 강건성[1]에 대해 평가하여 유사시 통신소 파괴, 링크 단절 등의 상황을 대비하여 강건성 향상 방안을 제시하고 기존 네트워크와 강건성이 향상된 네트워크 간 비교를 통해 발전방안을 제시한다. TICN은 전투무선망과 위성체계와 동시 운영되어 상호 보완되지만 본 논문에서는 TICN의 단독운용을 가정 하 연구를 진행하였다.

강건성이 군 체계에서 더욱 중요함을 고려할 때, Scale Free Network 등에 대한 강건성 연구는 활발히 진행되고 있으나[2],[5-7], TICN과 같은 전술 네트워크의 강건성에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 이에 따라 본 논문에서는 TICN체계의 네트워크 데이터를 수집하여 그래프 이론 시각으로 바라보아 네트워크 구조에 대한 Weak Point를 탐색하고, 체계의 특성을 고려하여 강건성 향상 방안을 적용하여 네트워크를 추가 구성하였다. 이로써 기존 네트워크와 추가 생성된 네트워크를 비교 분석하고, 각 네트워크의 핵심 통신소 파괴 상황에서 접속부대통신소의 단절현황 비교를 통해 강건성을 평가하였다.

네트워크 구조 분석을 위해서는 소셜 네트워크 분석(Social Network Analysis; SNA)기법을 적용하였다.

SNA기법은 네트워크의 전체적인 구조나 링크의 특성, 노드의 영향력 관계 등 다양한 지표를 제공한다[3]. 또한 Weak Point 탐색을 위해 그래프 이론의 단절점, 브리지 개념을 적용하였다.

II. Related Work

1. Network Robustness

1.1 Definition of Network Robustness

네트워크의 강건성이란 네트워크가 단절되는 상황이나 외부 공격에도 기능을 수행할 수 있는 능력을 뜻한다[7]. 즉, 네트워크의 강건성은 네트워크의 연결성을 유지하는 능력을 뜻한다. 단절 및 외부 공격이란 노드나 간선이 외적인 요인에 의해 파괴 또는 제거되는 것을 뜻한다[7].

강건성은 TICN의 요구특성 중 하나이며, 그 의미는 '작전 진행간 어떠한 상황에서도 반드시 지휘통제를 보장해야 한다'는 것이다[1].

1.2 Related Work of Network Robustness

네트워크 강건성에 관한 선행연구로, 기존 C4I체계와 향후 구축될 체계를 네트워크 공유범위, 노드와 링크의 가치를 고려한 연결정도, 노드의 가치에 따라 상위 5%의 핵심 노드를 차례로 제거하면서 변화 측정하였으며, 각 노드별 공유되는 정보의 공유범위를 측정하고 각 요소들을 융합하여 네트워크의 효과를 평가하였다. 그 결과 현행 대비 향후 체계가 요소별 상승효과가 나타남에 따라 네트워크의 효과 평가 기준을 제시하였다[3].

또한, Scale-Free Network에서 강건성을 향상시킬 수 있는 방법으로 링크를 추가하는 방법을 제안하였다[7].

김경태(2017)는 서울시 도로 네트워크를 대상으로 SNA의 중심성 지표 중 교통 흐름에 중요한 역할을 하는 매개 중심성 지표를 사용하여 서울 시내 주요 교차로를 식별하고 중심성이 높은 교차로가 단절되었을 때 전체 네트워크 이동 평균경로시간을 측정하여 도로 네트워크의 강건성을 평가하고 주요 교차로에 대해서 집중관리가 필요하다고 제시하였다[2].

이를 종합해보았을 때 강건성에 대한 측정을 C4I체계, Scale-Free Network나 도로 네트워크 등에 적용하였으나 본 논문에서는 핵심 기반체계인 TICN에 적용하여 네트워크의 특성을 고려하여 강건성 측정 방법을 적용하고자 한다.

2. Method of Improving Robustness

2.1 Articulation node and Bridge

그래프 이론에서 단절점(Articulation node)란 그래프 G의 정점들 중에서 그 정점을 그 정점에 부속한 모든 간선들과 같이 삭제하면 최소한 2개의 연결 요소(Connected Component)를 갖는 그래프 G'를 생성하는 정점 v를 말한다[8]. 브리지는 네트워크에서 어떤 하나의 링크가 제거될 때 연결요소의 개수를 증가시키는 요인이 되는 링크를 의미한다[9]. 네트워크에서 단절점과 브리지는 외부공격이나 장애로 단절될 경우 네트워크가 분리되기 때문에 Weak Point이다[8]. 그러므로 이 부분을 탐색하여 보완해야 한다.

2.2 Complement of Articulation node and Bridge search

단절점과 브리지를 제거하는 방법은 링크를 추가하는 방법이 있다[78]. 링크를 추가하는 방안은 세 가지가 있는데, 이는 단절점과 단절점, 단절점과 비단절점, 비단절점과 비단절점을 연결하는 것이다. 단절점에 문제가 발생했을 경우 피해를 보는 것은 단절점으로 인해 분리된 네트워크 집단이기 때문에, 단절점 간의 연결보다 비 단절점들 간의 연결이 필요하다[8]. 그러나, TICN의 장비 가용여부를 고려했을 때 비단절점인 소형부대 통신소 간의 연결이 불가능하다. 또한 단절점이 피해를 보는 경우도 있지만, 장애로 링크만 단절되는 경우도 있다. 그러므로 단절점 간, 단절점과 비단절점 간의 링크를 추가 구성하는 것으로도 강건성이 향상될 수 있음을 실험하고자 한다.

3. Social Network Analysis(SNA)

3.1 Definition of SNA

네트워크의 노드나 링크의 형태를 분석함으로써 네트워크의 전체적인 구조나 링크의 특성, 노드의 영향력 관계 등을 해석 가능하게 하는 분석기법을 소셜 네트워크 분석(SNA)이라 한다[10]. 본 연구에서는 SNA의 분석수준을 네트워크 수준으로 하였으며[11], 네트워크 구조 분석을 위한 지표와 핵심 노드를 식별하기 위해 적용하였다.

3.1 Related Work of SNA

소셜 네트워크 분석 기법의 군 적용 사례로, Anthony Dekker(2002)는 군 C4ISR 아키텍처를 소셜 네트워크 분석을 통하여 정량적으로 평가하는 방안을 제시하였고[12], 지휘통제체계 구조에 대한 시각화[13], 육군 전술통신체계의 핵심노드 식별 알고리즘 제안[14], C4I체계의 네트워크

효과 평가 알고리즘 제안[3] 등이 있다. 또한, 김경태(2017)는 매개 중심성을 적용하여 서울 시내 주요 교차로를 식별하고 지표 값이 높은 노드가 단절되었을 때 전체 네트워크의 이동 평균경로시간에 미치는 영향을 평가하여 서울시 도로 네트워크의 강건성을 평가하였다[2].

III. Searching weak points and improve robustness

1. Experiment Network

TICN은 상급 및 하급, 인접부대 간 정보유통을 위한 전송로와 사용자에게 지휘통신 수단을 제공하고 전장관리정보체계, 감시 및 탐지, 타격자산을 연동하는 체계이다[1].

이 체계의 전송로는 격자형과 트리형으로 구성되어 있다. 격자형은 아래 그림1과 같이 통신소 간의 전송로를 전·후·좌·우의 모든 방향으로 구성하는 형태로 대형 노드 통신소에 적용된다. 또한, 노드 통신소는 지역지원통신소라는 고유명칭으로[4], 여기에서의 '노드'와 네트워크 이론과 그래프 이론의 노드(Node, Vertex)와 다르므로 구분해야 한다. 트리형은 상위 통신소와 하위 통신소 간 1개의 전송로를 구성하는 형태로 소형노드에 적용된다[4]. 트리형 구조는 통신망 설치 및 철수의 신속성과 작전의 유연성에 유리[4]하지만, 외부공격(Attack)과 통신망 장애(Failure)의 경우 접속부대에 통신 지원이 불가하다.

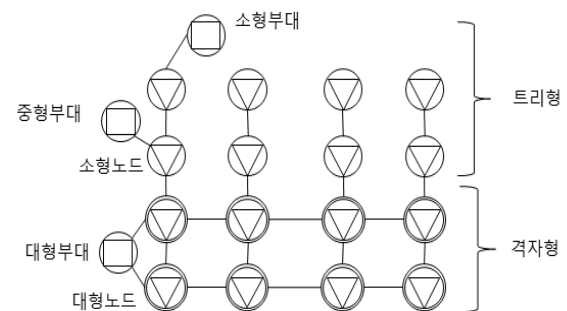


Fig. 1. TICN Structure (Example)

현재의 TICN체계의 구조는 아래 그림2의 (라)다허브형과 트리형이 혼합된 구조이며 링크를 추가하여 (마)전방위형에 근접할 수 있다.

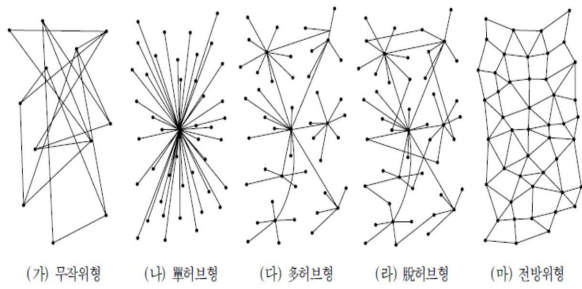


Fig. 2. Classification of Network[15]

2. Searching Articulation nodes and Bridges

단절점을 탐색하기 위해서는 실제 네트워크 구조를 그래프로 표현해야 한다. 장비들이 유기적으로 연결된 통신소는 노드(Node)이고, 통신소와 통신소 간의 전송로는 링크(Link)이다.

통신소들이 전송로로 연결된 그래프에서 단절점을 탐색하기 위해 깊이우선탐색(Depth First Search)을 이용한다. 깊이우선탐색트리 루트 노드의 자식의 수가 2개 이상이면 단절점이다. 또한 그래프에서 임의의 노드를 선택하고 노드마다 두 개의 정보를 기록하면서 깊이우선탐색을 수행하여, 그 정보의 첫 번째는 방문한 순서(Num)이고 두 번째는 자식 노드의 Low 중 최소값을 기록한다. 부모의 Num과 자식이 가진 Low값을 비교하여 부모가 단절점인지 판단한다.[8].

브리지는 단절점 탐색과 마찬가지로 깊이우선탐색을 수행하여 특정 정점에서 부모로 가는 간선이 아닌 간선 중에서 아직 방문하지 않은 노드의 low 번호가 현재 노드의 탐색 번호보다 큰 경우 브리지가 된다[8][16].

3. Adding new Links

네트워크에서 새로운 링크를 추가하면 단절점을 보완할 수 있고, 나아가 강건성이 향상될 할 수 있다[7-8]. 통신망에서 새로운 링크를 추가하는 것은 통신소 간 전송로를 추가 구성한다는 의미이며, 두 통신소 간 링크를 추가하기 위해 각 통신소는 동일 장비와 안테나를 설치하고 제원(주파수 등)을 맞추어 무선 경로를 구성해야 한다[4].

3.1 Linking Additional Area

링크를 추가해야 하는 통신소는 단절점으로 탐색된 통신소 중 소형노드, 중형부대통신소이다. 대형노드통신소는 이미 격자형으로 구성되어 있으며, 소형 부대통신소는 가용 장비가 부족하여 추가 링크 구성이 불가능하다. 그러므로 소형노드와 중형부대 통신소에서 링크를 추가해야 한다.

3.2 Creating Networks

노드별 링크 수용능력을 고려하여 아래 표1과 같이 단계별 네트워크를 생성할 수 있다. NW①은 체계의 운용개념에 따라 구성된 네트워크 구조이다. NW②는 NW①에서 동일 집단 내 인접한 소형 노드 간, 중형 부대통신소 간에 링크를 추가한 네트워크이다. NW③은 NW②의 동일 집단 내 연결에서 추가하여 인접 집단과의 링크를 추가한 것이다. NW①A은 NW①에서 핵심통신소가 단절되었을 경우의 네트워크이다. NW②A, NW③A 역시 NW②, ③에서 핵심통신소 단절 후 네트워크를 표현한 것이다.

Table 1. Steps for Adding Links

| Step | Explanation |
|------|--|
| NW① | Existing Network |
| NW② | NW① + Add Link to SN(Small Node) and MT(Middle Team) |
| NW③ | NW② + Connect SN and MT with adjacent divisions |
| NW①A | Removal of NW① Nodes |
| NW②A | Removal of NW② Nodes |
| NW③A | Removal of NW③ Nodes |

4. Assessing Betweenness Centrality

SNA 분석 요소들은 노드 수가 같더라도 연결구조에 따라 그 값이 다르게 나타난다. 따라서 네트워크의 구조를 분석하고 노드의 가치를 분석할 수 있다[3]. 또한 네트워크의 강건성을 평가하기 위해서는 통신소가 외부 공격으로 단절되어야 하며, 단절 후 네트워크의 변화를 관찰하여 강건성을 평가할 수 있다. 이때 단절되는 통신소는 매개중심성을 적용하여 그 값이 높은 통신소 순으로 선택하였다. 전장상황은 예측 불가능하기 때문에 임의의 통신소를 단절시킬 수 있지만 최악의 상황을 가정하여 핵심 통신소를 단절시켰다[17].

매개중심성은 한 노드가 다른 모든 노드 간의 'Geodesic Path'에 등장하는 횟수를 기준으로 측정된다. 즉, 해당 노드는 다른 노드 쌍 간의 'Path'에 더 많이 나타날수록 더 높은 'Centrality' 값을 가지게 된다. 그래프에서 한 점 x 와 서로 다른 점 y 와 z 가 있을 때, y 에서 z 로 가는 최단 경로의 수를 σ_{yz} 라 하고, x 를 통과하는 최단 경로의 수를 $\sigma_{yz}(x)$ 라 하자. 이때 x 의 매개 중심성 $C_b(x)$ 는 식(1)과 같이 나타낸다[9].

$$C_b(x) = \sum_{y, z \neq x, \sigma_{yz} \neq 0} \frac{\sigma_{yz}(x)}{\sigma_{yz}}, x \in NV \quad (1)$$

TICN 통신망에서 대형, 소형 노드 통신소는 부대통신소들의 접속을 지원하는 지역지원통신소로서, 상하인접 제대와의 통신을 위한 경로를 제공하는 역할을 하기 때문에, 서울 도로 네트워크의 교차로와 같이 매개중심성을 적용[2]하였다. 각 통신소의 매개중심성 값이 높은 순으로 통신소를 단절시켜 네트워크의 변화를 관찰 및 분석한다.

5. Measuring Network Robustness Indices

강건성 평가하기 위해 노드가 제거되었을 때 연결요소 등의 변화가 다른 비교 네트워크 보다 크다면 상대적으로 강건성이 낮은 네트워크이다. 반대로 변화가 작다면 강건성이 높다고 할 수 있다. 서울시 도로 네트워크에서는 교차로 노드의 중심성 값이 높은 순으로 노드를 제거하여 도시 간 평균경로거리의 변화로 강건성을 측정하였다면[2], 본 논문에서는 네트워크의 밀도, 직경, 연결요소, 고립노드, 중심화 지표를 적용한 네트워크 구조 분석과 노드 단절 상황에서 단절되는 접속부대의 감소로 측정하였다.

5.1 Density

네트워크에서 밀도는 노드들 사이에 연결된 정도를 말하며, 전체 노드들의 연결된 개수로 표현된다. 밀도가 높은 네트워크는 노드의 연결 관계가 그만큼 많다는 것이다. 밀도는 0에서 1의 범위 내에서 값을 가진다. 무방향 그래프에서 연결 가능한 노드 수는 $n(n-1)/2$ 이며, 여기서 n 은 노드의 개수이다. 무방향 네트워크의 밀도는 다음의 식으로 구할 수 있다. k 는 네트워크의 실제로 연결된 링크 수이며, 식은 아래와 같다[11].

$$\text{무방향 이진 네트워크의 밀도} = \frac{k}{n(n-1)/2} \quad (2)$$

네트워크에 링크를 추가하면 밀도가 증가한다. 그러나 밀도가 증가할수록 노드가 파괴될 경우 피해보는 링크의 수도 증가하게 된다[18].

5.2 Diameter / Isolated Nodes

직경(Diameter)은 네트워크에서 가장 긴 최단 거리를 갖는 두 노드 사이의 거리를 뜻하며[9], 네트워크에서 가장 멀리 떨어져 있는 두 노드 간의 거리, 네트워크의 지름이라고도 한다[11].

고립노드(Isolated Node)는 연결된 링크가 없는 노드로 네트워크에서 분리되어 연결 관계가 없는 고립된 노드를 뜻한다[11]. TICN에서 고립노드는 모든 링크가 단절된 통신소로, 재접속 등 대책을 강구해야 한다.

5.3 Connected Component

연결요소(Connected Component)는 적어도 한 개 이상의 경로로 연결된 노드들로 구성된 종속 그래프를 뜻한다[9]. 네트워크에서 단절점이나 브리지가 단절되면 연결요소 수가 증가하게 된다. 즉, 1개의 네트워크에서 여러 개의 네트워크로 분리될 수 있다.

5.4 Betweenness Centralization Index

중심화 지표는 매개 중심성 값의 다양성을 계산한 것으로, 네트워크 전체의 중심화 정도를 하나의 값으로 압축한 지표로서 0에서 1까지의 값을 가질 수 있다. 이 값이 클수록 특정 노드의 중심성이 높다는 것을 의미한다[9].

$$\text{Centralization Index} = \frac{\sum_{all\ node} (\max\ centrality - node's\ centrality)}{(nodes - 2)} \quad (3)$$

IV. Data Modeling and Experiment

1. Node and Link data of TICN

TICN의 노드 데이터는 노드통신소와 부대통신소로 구성되어 있다. 노드통신소는 부대통신소의 지원소요에 따라 배치되며, 계획에 따라 통신소별 링크를 최소 1개 이상 구성해야 한다[4]. 링크는 각 통신소 간 장비와 안테나를 설치하여 무선 전송구간을 구성하는 것이다. TICN 네트워크 구조를 나타내기 위해 A집단의 데이터를 수집하였다. 각 통신소 간 링크의 연결 유무에 따라 연결이 있으면 '1', 없으면 '0'으로 표시하여 인접행렬을 생성하고 그래프로 나타냈다. 이 네트워크는 무방향성이며, 이는 각 전송로가 양방향으로 진행이 가능하다는 것이다. 이 표현방법은 주로 통신 네트워크에서 응용된다[8].

통신소는 대형, 소형노드 통신소와 대형, 중형, 소형부대 통신소로 구분되어 있으며, 이들 통신소들은 위계차이 없이 역할이 동일하다고 가정한다. 즉, 부대통신소들도 2개 이상의 링크가 있다면 노드 통신소처럼 경로를 제공할 수 있다는 것이다. 단, 소형부대 통신소는 라우터가 없어 경로를 제공할 수 없다. 통신소 현황은 아래 표2와 같다. 노드는 S001 ~ S113으로 표기한다.

Table 2. Classification of Nodes

| Type | Node | Num |
|-----------------|---|-----|
| Total | | 113 |
| Large Node(LN) | S001 ~ S013, S015, S104 | 15 |
| Small Node(SN) | S014, S016, S017, S106, S108 ~ S113 | 10 |
| Large Team(LT) | S019, S027, S033, S107 | 4 |
| Middle Team(MT) | S020 ~ S023, S025, S026, S028, S029, S031, S032, S035, S105 | 13 |
| Small Team(ST) | Remainder | 71 |

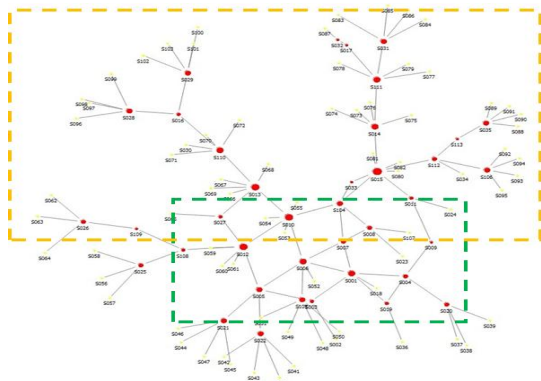


Fig. 3. Network①

위 그림3은 NW①을 시각화 알고리즘을 이용하여 나타낸 것으로, 녹색 점선 사각형 부분은 격자형의 대형노드 통신소 영역이고, 주황색 점선 사각형 부분은 트리형의 소형노드 통신소 영역이다. 시각화 알고리즘은 Kamada & Kawai(K-K)이며, 힘기반 그래프 배치 알고리즘으로 노드들을 2차원 공간에 배치하여 거리를 거의 균등하게 하고, 링크들이 서로 교차하는 것을 최소화하는 방식으로, 링크를 노드들 사이에 존재하는 스프링(Spring)으로 보고 전체 그래프가 하나의 물리적 시스템으로 간주하여 나타낸다 [11]. 시각화 알고리즘을 통해 각 네트워크의 변화를 직관적으로 알 수 있다.

2. Searching Articulation node and Bridge

앞에서 언급한 단절점과 브리지 탐색 방법으로 TICN체계 네트워크의 단절점과 브리지를 탐색한 결과는 다음과 같다. NW①은 현재 운용개념 하 A집단의 통신망을 재구성한 것이며, NW②는 단절점 탐색 결과 동일 집단 내 소형노드, 중형 부대통신소 간 링크 추가, NW③은 인접 집단으로 확장하여 링크를 추가한 네트워크이다. 아래 표3은 각 네트워크의 단절점과 브리지의 변화를 나타낸 것으로,

NW①에서 NW③으로 갈수록 링크의 추가로 단절점과 브리지가 감소하였다.

Table 3. Change of Weak Point

| Division | NW① | NW② | NW③ |
|------------------------|-----|------|-------|
| Network Size | 113 | 113 | 113 |
| Number of Links | 121 | 136 | 142 |
| Increase of Link(%) | - | 5.8% | 4.4% |
| Articulation Node | 33 | 28 | 27 |
| Reduction of A.N(%) | - | -15% | -3.6% |
| Number of Bridge | 96 | 73 | 73 |
| Reduction of Bridge(%) | - | -24% | 0% |

Table 4. Articulation Node Search Result of NW①~③

| NW | Articulation node | | | | | |
|-----|-------------------|----|----|----|----|----|
| | Total | LN | SN | LT | MT | ST |
| NW① | 33 | 10 | 10 | 2 | 11 | 0 |
| NW② | 28 | 9 | 6 | 2 | 11 | 0 |
| NW③ | 27 | 9 | 5 | 2 | 11 | 0 |

표4는 NW①~③의 단절점을 각 통신소별 구분하여 나타내어 단절점이 어느 통신소에서 감소했는지 알 수 있다. 소형노드에서는 단절점이 감소하지만 중형부대 통신소는 감소하지 않았다. 그 이유는 중형부대통신소에 접속된 소형부대 통신소들의 존재 때문이다.

또한, NW③은 NW②와 단절점의 개수가 1개 차이가 난다. 그 이유는 NW②에서 이미 보았던 단절점에 대해 링크를 추가 연결했기 때문이다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 다허브형과 트리형의 혼합구조에서 전방위형으로 구성하기 위해서이다.

아래 표5는 브리지를 탐색한 결과로 각 링크를 구분하여 통신소 간의 브리지가 감소하는지 나타냈다.

Table 5. Bridge Search Result of NW①~③

| Bridge Type | NW① | NW② | NW③ |
|-------------|-----|-----|-----|
| LN-LN | 1 | 1 | 1 |
| LN-SN | 4 | 0 | 0 |
| LN-LT | 0 | 0 | 0 |
| LN-MT | 3 | 0 | 0 |
| LN-ST | 19 | 16 | 16 |
| SN-SN | 5 | 0 | 0 |
| SN-MT | 7 | 0 | 0 |
| SN-ST | 17 | 16 | 16 |
| LT-MT | 0 | 0 | 0 |
| LT-ST | 2 | 2 | 2 |
| MT-ST | 38 | 38 | 38 |
| Total | 96 | 73 | 73 |

NW①에서 NW③까지 브리지 수가 감소하는 부분은 대형노드(LN)-소형노드(SN) 간, 대형노드(LN)-중형부대(MT)

간, 소형노드(SN)-소형노드(SN) 간, 소형노드(SN)-중형부대(MT) 간이다. 소형노드와 중형부대 통신소에서 링크를 추가하였기 때문에 해당 부분에서 브리지가 감소하였다.

3. Comparing Empirical Networks

아래 표6은 NW①~③을 SNA 지표를 통해 비교한 결과이다.

Table 6. Comparison of Networks

| Division | NW① | NW② | NW③ |
|----------------------|--------|-------|-------|
| Network Size | 113 | 113 | 113 |
| Number of Links | 121 | 136 | 142 |
| Articulation Node | 33 | 28 | 27 |
| Bridge | 96 | 73 | 73 |
| Density | 0.019 | 0.021 | 0.022 |
| Diameter | 12 | 11 | 10 |
| Centralization Index | 45.56% | 45.5% | 22.1% |

NW①~③은 노드의 수가 변함이 없고, 링크의 수만 변한다. 동일한 노드에 링크만 변화되었으므로 각 지표의 적용 결과 변화하는 값은 링크의 변화에 따른 결과이다.

NW②, ③에서 링크의 추가로 단절점과 브리지의 수가 감소한다. 단 NW③은 NW②에서 단절점이 보완된 노드에 추가 연결한 것이기 때문에 추가적으로 브리지가 보완되지 않았다.

NW①에서 ③으로 갈수록 링크가 추가되었기 때문에 밀도가 증가하고, 직경은 감소했다. 네트워크의 밀도는 링크의 추가로 상승하지만 네트워크의 일부부분에만 적용되었기 때문에 작은 폭으로 상승하였다. 직경의 감소는 노드 쌍 간의 경로 흡수가 감소한 것을 의미한다. 중심화 지표는 네트워크가 특정 노드에 집중된 정도를 의미하는 것으로, 그 값이 NW③으로 갈수록 그 값이 낮아지며, 이것은 분산형에 가까워져 특정 노드에 대한 집중화 정도가 낮아졌다는 의미이다. 즉, NW③이 ①, ②보다 분산형에 가깝다는 의미이다.

4. Effect of Node Removal

강건성은 핵심 통신소를 식별하고 제거한 결과 네트워크의 변화를 통해 측정할 수 있다. 네트워크 별 핵심 통신소가 제거되었을 때 노드 통신소에 접속한 부대통신소의 단절이 적은 네트워크가 상대적으로 강건성이 크다고 결론을 내릴 수 있다. 통신소 제거는 소형노드와 중형부대 통신소(전체의 20% 차지)만 제거하기 때문에 5%를 적용하여 실험하였다.

4.1 Network Property Analysis

아래 표7, 8은 각 네트워크의 링크가 추가된 부분의 핵심 통신소를 제거한 결과이다. 각 네트워크에서 노드가 제거된 네트워크를 Attack의 'A'를 따서 표기하였다.

Table 7. Removal Result of Betweenness Centrality Top 5% Node

| Division | NW① | NW①A | NW② | NW②A | NW③ | NW③A |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Network Size | 113 | 108 | 113 | 108 | 113 | 108 |
| Number of Links | 121 | 95 | 136 | 104 | 142 | 107 |
| Reduction of Bridge | 21% | | 23% | | 24% | |
| Density | 0.019 | 0.016 | 0.021 | 0.017 | 0.022 | 0.018 |
| Diameter | 12 | 10 | 11 | 11 | 10 | 13 |
| Component | 1 | 4 | 1 | 3 | 1 | 2 |
| Isolated Nodes | 0 | 18 | 0 | 17 | 0 | 17 |

표7에서 NW①A는 NW①에서 핵심 통신소 5%를 제거한 네트워크이다. 이 때 통신소에 비하여 링크가 더 많은 비율로 감소하여 밀도가 감소하는 결과가 나타난다. 즉, NW①에서 NW③으로 갈수록 통신소 단절에서 밀도가 더 큰 폭으로 감소하며, 링크가 증가 할수록 밀도가 높아지고 노드가 삭제되면 노드가 가진 링크가 많아 밀도가 그만큼 크게 감소한다. NW①A는 직경이 감소하였는데 이는 노드 쌍 간 경로의 흡수가 감소한 것으로 네트워크가 분리, 축소되었음을 뜻한다. NW③A의 직경은 증가하였는데, 노드 제거로 남은 링크(우회경로)를 따라 목적지 노드에 도달하기 위해 경로가 신장되었기 때문이다. 연결요소는 NW③A로 갈수록 점차 감소하는데, 단절되는 부대 통신소가 감소된다는 것으로, 더 많은 부대에 지휘통신을 보장할 수 있다는 의미이다. 고립노드는 NW①A ~ NW③A까지 적은 차이를 보이는데, 대부분 소형 부대 통신소이며, 링크가 보완된 부분이 아니기 때문에 노드 파괴에 따른 변화가 없다.

통신소가 파괴되면 네트워크에서 분리된 노드들은 연결 요소에 속하거나 고립노드가 된다. 아래 표9는 연결요소와 고립노드에 속한 통신소를 유형별로 구분하였다.

Table 8. Analysis of Disconnected Nodes

| Division | NW①A | NW②A | NW③A |
|---------------|------|------|------|
| Component | 4 | 3 | 2 |
| SN | 4 | 4 | 1 |
| MT | 4 | 2 | 0 |
| ST | 20 | 12 | 4 |
| Isolated Node | 18 | 17 | 17 |
| SN | 1 | 0 | 0 |
| MT | 0 | 0 | 0 |
| ST | 17 | 17 | 17 |

NW①A의 연결요소는 '4'로, 분리된 3개의 연결요소에 속한 부대통신소는 MT가 4개, ST가 20개이다. NW②A는 연결요소가 '3'으로, 분리된 2개의 연결요소의 부대통신소는 MT 2개, ST 12개이다. NW③A는 MT 0개, ST 4개이다. 즉, 아래 그림4와 같이 NW③으로 갈수록 접속 부대는 증가하고 단절되는 부대는 감소하였다.



Fig. 4. Number of Dis/Connected node for Networks

결론적으로 네트워크 강건성이 NW①보다 NW②가 향상되었고, NW②보다는 NW③이 더 향상되었다고 해석할 수 있다. 아래 그림5~10은 각 네트워크를 시각화 알고리즘을 이용해 나타낸 것이다.

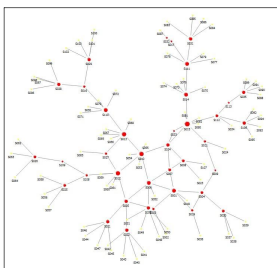


Fig. 5. NW①

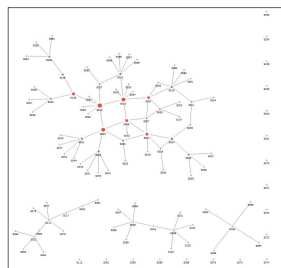


Fig. 6. NW①A

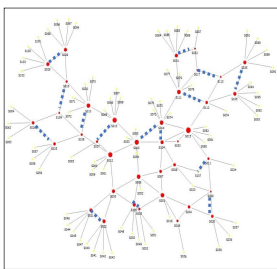


Fig. 7. Network②

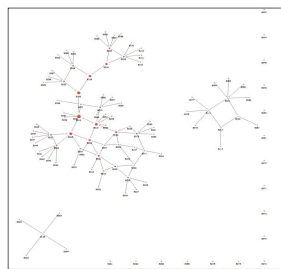


Fig. 8. NW②A

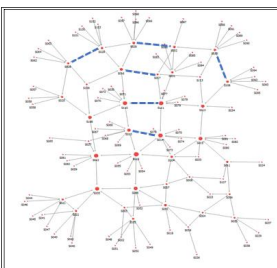


Fig. 9. NW③

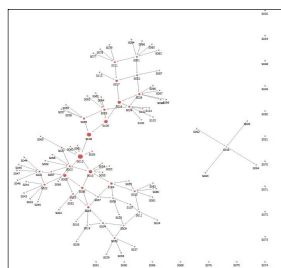


Fig. 10. NW③A

V. Conclusions and Future Work

본 논문에서는 TICN체계의 통신망 구조를 그래프 이론 관점에서 단절점과 브리지를 탐색하고 이를 보완하기 위해 링크를 단계적으로 추가하여 새로운 네트워크를 생성한다. 이후 기존 네트워크와 링크가 추가된 네트워크를 SNA 지표를 적용하여 비교하였다. SNA는 노드를 사람, 기업, 기관 등 사회 네트워크에 적용하는 기법으로 등장하였으나 본 논문에서는 통신 네트워크의 구조 분석에 적용 가능한 지표를 선정하여 적용하였다.

또한, 각 네트워크에서 핵심 통신소가 같은 비율로 단절 되었을 때 어떤 네트워크가 더 기능을 유지하는 능력이 높은지 즉, 어떤 네트워크가 더 강건한지 측정하였다. 노드 통신소가 파괴되면 결국 피해 입는 통신소는 부대 통신소이므로, 부대 통신소의 단절현황으로 강건성을 측정하였다. 실험결과 기존의 트리형 구조 부분에서 단절점이 탐색되었고, TICN의 특성을 고려하여 링크를 추가한 결과 단절되는 부대 통신소가 감소함으로써 강건성이 향상된다는 것을 알 수 있다. 다시 말하면, 트리형 구조가 외부공격이 가해졌을 때 우회경로가 없어 단절되기 때문에 강건성에 취약하다는 결론을 내릴 수 있다.

향후 연구에는 실험 데이터 규모를 A집단에서 3개 집단으로 확장하여 데이터를 수집하고, 통신소의 파괴 비율에 차등을 두어 비교실험을 진행할 계획이다. 또한, 반드시 연결되어야 하는 통신소에 대해 식별하고 그 통신소를 연결하는 링크에 가중치를 산정하여 분석할 계획이다.

REFERENCES

- [1] ROK ARMY Information Communication School, "Description for Operational Concepts of TICN", 2007.
- [2] K.T Kim, J.M Song, "Robustness Assessment of the Road Network in Seoul Using Changes in Average Path Time", Seoul city Research, Vol. 18, No. 2, pp.81-93, 2017. 6
- [3] D.S Kim, G.W Park, S.H Lee "An Algorithm for Evaluating Effects of the C4I System Network based on SNA", Journal of KISS, Vol. 40, No. 4, pp. 243-250, 2013.
- [4] ROK Army Headquarter, "TICN", July. 2017
- [5] H. Dekker, D. Colbert, "Network Robustness and Graph Topology," 27th Australasian Computer Science Conference, Volume 26. pp. 359-368, 2004.

- [6] Jing LIU , Mingxing ZHOU, Shuai WANG, Penghui LIU, "A comparative study of network robustness measures", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, May, 2017.
- [7] Li Li, Qing-Shan Jia, Xiaohong Guan and Hengtao Wang, "Enhancing the Robustness and Efficiency of scale-free Network with Limited Link Addition," Journal of KSII, vol.6, no.5, May, 2012.
- [8] Y. Jeong "Design and Implementation of Articulation Node Search System for the Improvement of Network Weak Point" Sungkyunkwan University, 2011.
- [9] Cyram Inc, "Netminer Module Reference", Ver.4.3, 2017.
- [10] Y. H. Kim, "Social Network Analysis", PARKYOUNGSA, 2011.
- [11] S.S. Lee, 『*Social Network Analysis Methods*』, Seoul : NonHyeong, 2012.
- [12] A.H Dekker, C4ISR Architectures, Social Network Analysis and the FINC Methodology: An Experiment in Military Organisational Structure, Inter report, 2002.
- [13] J.T Jeon, G.W Park, S.H Lee, "C2 System Visualization based on Social Network Analysis Method", Journal of the Korea Society of Computer and Information, Volume 37, No.1, pp 94-48, 2010. 6
- [14] J.H Won, G.W Park, S.H. Lee, "Arms Value Algorithm: Identifying Core Node using Social Network Analysis in C2 System", pp 569-573, KIISE, 2011.
- [15] S. B. Kim, "Search of Network Theory of World Politics", Korean Journal of International Studies, volume 48, No.4, pp.35-61, 2008.
- [16] Harary, F. " Graph Theory". Reading, MA, Addison-Wesley. p. 43, 1969.
- [17] S.J. Lee, H.S. Kim, "A Study on the Robustness of the Bitcoin Lightning Network", Korea Institute of Information Security and Cryptology, Volume 28, No.4, pp 1,009-1,019, 2018. 8
- [18] C.K Jeong, C.G Han, S.H Lee, "Analysis of the network robustness based on the centrality of vertices in the graph", Journal of the Korea Society of Computer and Information, Volume 22, No.3, pp 61-67, 2017. 3

Authors



Ji-Hye Park received the B.S degree in Military Studies from Dajeon University in 2012 and She is a candidate for M.S. degree in Computer Science from Korea National Defense University. She is interested in Database, Social Network Analysis and Data Communication.



Soung-woong Yoon received the B.S. degree in Engineering from Hanyang University in 1992 and M.S. degree in Computer Science and Engineering from Korea National Defense University (KNDU), Korea, in 2004, respectively. Mr. Yoon completed Ph.D course of the Department of Social Informatics at Kyoto University, Japan, in 2014. He is interested in knowledge discovery, information retrieval, big data and Social Network Analysis.



Sang-Hoon Lee received the B.S. degree in Electronic Engineering from Sung Kyun Kwan University, M.S. degree in Computer Science from Yon Sei University, and Ph.D. degree in Information Engineering from Kyoto University, Japan, in 1978, 1987 and 1997, respectively. Dr. Lee joined the faculty of the Department of Computer Science at Korea National Defense University, in 2000. He is currently a Professor in the Department of Computer Science, Korea National Defense University. He is interested in DataBase, Big Data, Social Network Analysis, and Information search.