
미래전에서 정보의 네트워크화에 의한 효과 분석

유재영* · 이명노** · 조용건*

Analysis of the Effects that Information is Networked for Future Warfare

Jae-Young Yoo* · Myung-Noh Lee** · Yong-Gun Jo*

요 약

본 논문에서는 효율적이고 효과적인 정보 흐름을 가능하게 해주는 네트워크와 네트워크의 잠재력에 집중하고자 한다. 네트워크 중심 환경하에서 운용되는 군 지휘 통제 시스템을 포함하는 모든 네트워크들은 복잡하게 얽혀있다. 따라서 복잡도의 특성을 이해하고, 그에 따른 효과는 무엇이며, 어떻게 측정할 수 있을지에 대해서 알아본다. 우리는 정보의 접근성에 의한 효과와 네트워크화에 기반하는 중복성에 의한 효과에 대해서 결과를 제시하였다.

ABSTRACT

We focus on the network itself and its ability to enable efficient and effective information flow. All networks are complex to a greater degree, including military command and control systems operating in a network-centric environment. It requires to understand the nature of complexity, what its effects are, and how to quantify them. In this paper, we present the beneficial effects of information accessibility and network-based redundancy into a single metric.

키워드

정보, 네트워크, 접근성, 중복성

Key word

Information, Network, Accessibility, Redundancy

* 광운대학교 대학원 (교신저자, kma6454@nate.com)

** 명지대학교 대학원

접수일자 : 2010. 05. 19

심사완료일자 : 2010. 06. 29

I. 서 론

일반적으로 정보를 수집, 처리, 공유하는 능력은 네트워크의 구조에 의존함에도 불구하고, 군에서는 정보를 처리하고 공유하는 등의 작전 특성만을 평가하는데 집중했었다. 본 논문에서는 효율적이고 효과적인 정보 흐름을 가능하게 해주는 네트워크와 네트워크의 잠재력에 집중한다. 그리고 지나치게 복잡한 네트워크의 부정적인 영향과 복잡도에 의한 장점에 대해서 살펴본다.

네트워크 중심 환경하에서 운용되는 군 지휘 통제 시스템을 포함하는 모든 네트워크들은 복잡하게 얽혀있다. 지금부터 복잡도의 특성을 이해하고, 그에 따른 효과는 무엇이며, 어떻게 측정할 수 있을지에 대해서 알아보려 한다. 물론 과거에도 많은 시도가 있었으나, 만족할 만한 성과는 미비했다[1]. 하지만 복잡도에 의해서 장점과 단점이 모두 있다는 것은 분명한 사실이다.

인터넷과 같은 복합 네트워크의 구조와 특성을 알아보기 위해서 많은 연구들이 있었다[2]. 많은 연구에 의해서 시스템이라는 것은 점점 향상되고 복잡해진다는 것을 알게 되었고, 각각의 행동들은 시스템의 구성물과는 별개라는 것도 알게 되었다[3]. 1965년 Kolmogorov는 복잡도에 대한 유용한 정의를 제안했다. 사물의 복잡도는 그 사물을 묘사할 수 있는 가장 짧은 이진 컴퓨터 프로그램이라는 것이다[4]. 그런데 이것은 1948년 Shannon이 수학적으로 잘 묘사했었던 엔트로피와 거의 같다.

또한 복잡도를 측정하기 위한 많은 방법들도 제안되었다. 하지만 활발한 토의가 진행되고 있는 사실에 비해 구체적인 정의에 대해서는 합의가 이루어지지 않고 있다. 1997년에 Wolpert와 Macrea -dy는 시스템의 시공간적 패턴들이 서로 얼마나 다른 것인지를 측정하는 것이라고 하였고[5], 2002년에 Sporns와 Tononi는 뇌의 복잡도를 측정하기 위해서 기능적으로 분리와 통합을 하는 방법을 소개하였다[6]. 같은 해에 Sole와 Luque는 엔트로피를 기초로 비선형 시스템의 확률적 복잡도를 측정하는 방안을 제안하였다[7]. 궁극적으로 본 논문에서도 지휘결심이 이루어지는 네트워크에 적용가능한 새로운 복잡도 측정 방안을 제안하고자 한다.

II. 정보의 접근성

네트워크는 클러스터에 있는 지휘관들에게 지휘결심에 필요한 정보에 쉽게 접근할 수 있는 능력을 제공해 주어야 한다. 접근성은 정보의 완전성과 밀접하게 관련이 된다고 할 수 있다.

클러스터에서 공유되는 정보 요소들에 대한 완전성을 표현하는 수식은 단순히 전체 정보 요소들의 수와 가용한 정보 요소들의 수 사이의 비율을 의미한다[8]. 즉 클러스터가 실질적으로 정보에 접근할 수 있는 정도를 알려주지는 못한다. 따라서 정보 접근성을 네트워크상에서의 전체 정보 요소들의 수와 접근 가능한 결정적 정보 요소들의 수 사이의 비율로 정의한다. 이 값은 필요한 정보의 불확실성과 연관지을 수 있다. 예를 들어, 적 전투기의 궤적을 추적할 때 출발지점과 도착지점의 거리를 기초로 두 지점간의 연결성을 평가할 수 있다. 어떤 정보 요소가 a_l 일 때 연결성을 k_l 이라고 하면 $0 \leq k_l \leq 1$ 인 범위를 갖으므로, 전체 연결성 k 는 $k \leq n$ 범위를 갖게 된다. n 은 결정적 정보 요소들의 수를 의미하고, $k=n$ 인 경우는 연결성이 아주 강한 경우를 의미한다. 이 경우에 연결성은 확률값은 아니지만, 정보의 불확실성을 반영할 수는 있다.

또한 정보 요소에 대한 완전성 측면의 값을 연결성 값으로 바꾸어주면, 네트워크에서 각 정보들의 이동에 부과되는 비용을 알 수 있다. 즉 어떤 정보가 비싼 경로를 거쳐서 수신되었다면, 정보의 기여도는 낮다고 볼 수 있다. 결국 접근성은 떨어지는 것이다.

네트워크 이론에서 거리를 함수로 간단하게는 경로에 있는 링크 수로 나타낼 수 있고, 조금 더 복잡하게는 경로에 있는 링크와 노드의 개별 능력을 계산해서 나타낼 수도 있다. 링크와 노드 둘다 경로를 구성하는 요소이므로, 후자가 더 실제적인 방법이 된다.

지금부터 관심을 갖는 것은 최단 경로로써 정보 요소 a_l 이 출발해서 도착하는데까지 드는 비용을 d_l 이라 하면, 이 경로에는 최소한 한 개 이상의 링크가 있으므로 $d_l \geq 1$ 범위를 갖는다. 이 값을 이용하면, 연결성은 식 (1)과 같다[1].

$$k_l = \frac{1}{d_l^{w_l}} \quad (1)$$

여기서, d_i 의 중요도를 반영하기 위해서 인수 ω_i 을 포함하였다. 적당한 ω_i 을 결정하기 위해서는 보고된 정보 요소 a_i 의 상대적 중요도가 필요하다. 두 노드가 직접 연결된 경우에 거리 비용 $d_i = 1$ 이므로, 가장 강한 연결성은 $k_i = 1$ 이 된다. 따라서 거리 비용이 증가할수록, 연결성은 0으로 감소한다. $k_i = 0$ 인 경우는 노드간에 경로가 없으므로 $d_i \rightarrow \infty$ 인 경우를 의미한다.

경로에 있는 모든 노드들의 연결성에 대한 세기는 외부의 공격에 대한 링크와 노드의 취약성을 설명해 줄 수 있어야 한다. 연결성의 세기는 최단 경로에서 어느 링크나 노드를 제거했을 때 나타나는 현상을 통해서 알 수 있다. 정보 요소 a_i 을 위한 최단 경로에 있는 노드의 수를 r_i 이라 하고 j 번째 노드를 제거했을 때 나타나는 연결성을 k_{ij} 라고 하면, 노드의 제거로 인해서 연결성이 얼마만큼 줄어드는지를 표현하기 위해서 소모 벡터 \mathbf{L}_i 을 정의하고 식 (2)와 같이 쓴다. 이때, L_{ij} 는 $k_i - k_{ij}$ 를 의미한다.

$$\mathbf{L}_i = [L_{i1}, L_{i2}, \dots, L_{ir_i}]^T \quad (2)$$

벡터 \mathbf{L}_i 은 최단 경로의 취약성을 의미하면서, 정보 요소 a_i 과 관련된 불확실성을 의미하기도 한다. 하지만 벡터는 접근이 어려우므로, 이에 해당하는 스칼라를 사용하기 위해서 식 (3)과 같은 노름(norm)을 사용한다.

$$\|\mathbf{L}_i\| = \sqrt{\mathbf{L}_i^T \mathbf{L}_i} \quad (3)$$

노름이 크다는 것은 최단 경로에서 연결성이 약하고 노드를 제거하기가 쉽다는 것이다. 반면에, 노름이 작으면 최단 경로가 강하게 구성되어 있어서 연결성의 감소가 거의 없음을 의미한다. 이러한 특성을 감안해서, 최종적으로 완성된 연결성은 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$k_i^* = k_i \left(1 - \frac{\|\mathbf{L}_i\|}{\mathbf{L}_i} \right)^{\frac{1}{\rho}} \quad (4)$$

\mathbf{L}_i 는 벡터 \mathbf{L}_i 의 크기이고, ρ 는 네트워크의 신뢰성을 반영하기 위한 확장 파라미터로써 $0 < \rho \leq 1$ 범위를 갖는다[9]. 확장 파라미터는 클러스터링 계수를 일반화

한 것으로서 가장 신뢰성이 높은 네트워크는 모든 노드가 서로 직접 연결된 경우이며, 이때 ρ 는 1이 된다. 따라서 ρ 가 1에 가까운 값을 갖는다는 것은 네트워크에서 경로들이 많이 중복되어있다는 것을 의미하므로, 신뢰성이 높다는 것을 의미한다.

지금까지 연결성을 통해서 정보의 접근성에 대해서 살펴보았는데, 이것을 [8]에서 설명한 완전성과 결합시켜 보자. 기존의 완전성에서 가용한 정보 요소들의 수를 접근 가능한 결정적 정보 요소들에 대한 연결성으로 바꾸면, 식 (5)와 같이 $Y(k)$ 를 얻을 수 있다. 이때 $k = \sum_{i=1}^C k_i^*$ 이고, C 는 클러스터에서 지휘결심에 필요한 정보 요소들의 전체 개수를 의미한다.

$$Y(k) = \begin{cases} \left(\frac{k}{C} \right)^C, & C \neq 0 \\ 1 & \end{cases} \quad (5)$$

III. 네트워크 중복성

네트워크에서 중복성이란 네트워크의 신뢰성과 연관되는데, 신뢰성은 노드의 손실, 시스템 불능, 비효율적인 작전 운용 절차 등이 발생하여도 정보 전송을 가능하게 해주는 능력을 말한다. 또한 네트워크에서는 과다한 정보가 전송될 수도 있는데, 이것을 처리하기 위해서 많은 시간과 자원이 필요하기 때문에 지연을 유발한다.

하지만 많은 정보 제공자들이 보고를 자주 할수록 지휘관은 그것들을 처리하기 위해서 많은 시간이 소요된다. 왜냐하면 추정치의 질을 향상시키는데 기여를 하든지 안하든지 간에 정보를 처리하는 데는 기본적으로 시간 소모가 발생하기 때문이다. 이러한 정보의 과부하 뿐만 아니라 어떤 제공자들은 확인되지 않은 정보를 보고할 수도 있다. 확인되지 않은 정보들은 좋은 것일 수도 있고 나쁜 것일 수도 있는데, 여하튼 그것의 존재 자체가 불확실성을 증가시키고 더 많은 시간을 요구하기 때문에 추정치의 질을 떨어뜨리는 결과를 초래하게 된다.

중복성은 여러 가지 측면을 가지고 있지만, 여러 정보

제공자들에 의한 많은 정보 보고는 정보 요소들에 대한 신뢰성을 증가시킬 수 있다. 그러나 동시에 너무 많은 정보들이 보고되고 공유되면, 불필요한 정보의 보고와 확인되지 않은 보고 등에 의한 정보의 과부하로 인해서 많은 비용을 초래할 수도 있다.

중복성의 효과 측면을 살펴보기 위해서 새로운 변수 $r_i(\theta_i)$ 를 사용한다. 이것은 p_i 개의 출처로부터 정보 요소 a_i 에 대한 보고를 수신함으로써 발생되는 효과를 의미한다[10].

이때 $\theta_i = \sum_{j=1}^{p_i} \theta_{i,j}$ 를 만족하고, $\theta_{i,j} (\in [1, \infty])$ 는 s_j ($1 \leq j \leq p_i$)라는 출처로부터 정보 요소 a_i 의 보고에 대한 신뢰성을 말한다. 새로운 변수에서 θ_i 는 정보 요소 a_i 에 대해서 최소한 하나의 보고만 이루어져도 $\theta_i \geq 1$ 를 보장한다. 또한 모든 출처 s_j 에 대한 신뢰성이 최소이면 $\theta_{i,j} = 1$ 이므로, $r_i(\theta_i) = r_i(p_i)$ 가 된다. $r_i(\theta_i) = 0$ 인 경우는 중복성에 의한 효과가 전혀 없음을 의미한다. 즉, $r_i(\theta_i)$ 가 0인 경우는 정보 요소 a_i 에 대한 보고가 전혀 없거나 오직 하나의 출처로부터 신뢰성이 최저수준 ($\theta_i = \theta_{i,1} = 1$)인 경우와 같으며, 1인 경우는 출처가 여러 개이면서 신뢰성도 높은 경우이다. 접근성과의 관계를 고려하기 위해서 $r_i(\theta_i)$ 는 0에서 1사이의 값을 가지며, 이와 같은 특성들을 반영해서 모델화하면 식 (6)과 같다.

$$r_i(\theta_i) = \begin{cases} 1 - e^{-\delta_i(\theta_i - 1)}, & p_i \geq 1 \\ 0 \end{cases} \quad (6)$$

식 (6)에서 δ_i 는 정보 요소 a_i 의 상대적인 중요도를 반영한다. 매우 신뢰성이 높은 출처로부터 보고가 되면, 큰 가중치를 부여한다. 즉, 어느 한 출처의 신뢰성 $\theta_i (= \theta_{i,1})$ 가 크면, 그 보고에 대한 $r_i(\theta_i)$ 는 1에 근접한다. 그러므로 위 식은 중복성에 의한 효과를 측정할 수 있도록 해줄 뿐만 아니라 보고 출처가 적절한지도 반영해준다. 그림 1은 θ_i 가 일정할 때, 얼마나 빠르게 중복성과 적절성이 수렴하는데 기여하는지를 보여주고 있다.

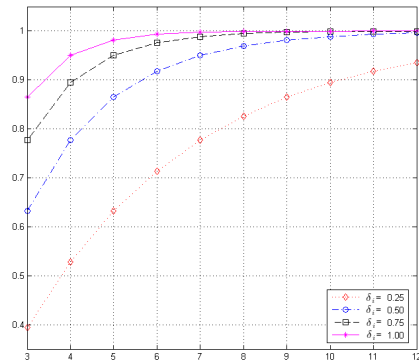


그림 1. δ_i 와 θ_i 에 따른 중복성 효과
Fig. 1 Effects of Redundancy on δ_i and θ_i

표 1. p_i 와 θ_i
Table. 1 p_i and θ_i

p_i	$\theta_{i,1}$	$\theta_{i,2}$	$\theta_{i,3}$	θ_i
1	9	—	—	9
2	2	4	—	6
2	2	10	—	12
3	1	1	1	3

표 1은 그림 1에서 사용된 데이터를 나타낸다. 첫 번째 경우처럼 보고 출처는 하나이지만, 보고 출처가 두 개, 세 개일 때보다 신뢰성이 더 높은 경우도 있다. 그러나 중복성에 관계없이 정보 요소의 중요도가 훨씬 큰 영향을 주고 있음을 볼 수 있다.

클러스터에서 요구되는 각 정보 요소들의 중복성을 알 수 있다면, 전체 정보 요소 집합에 대한 전체 값을 알 수 있다. 네트워크에서 존재하는 전체 정보 요소들의 수가 N 이고, 어느 클러스터에서 결정적으로 필요한 정보 요소의 개수가 C , 클러스터에서 가용한 정보 요소들의 수가 n 이면, $n \leq C \leq N$ 의 관계가 형성된다. 만일, 정보 요소에 대한 출처를 나타내기 위한 벡터를 $\mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_C]^T$ 라 하고 이 벡터로부터 수신되는 보고들을 벡터 $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_C]^T$ 라고 한다면, 전체 중복성에 의한 효과를 일반화해서 식 (7)과 같이 쓸 수 있다.

$$R(\Theta) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^C r_i(\Theta_i) \quad (7)$$

$$= \begin{cases} 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^C e^{-\delta_i(\Theta_i-1)} & , p_i \geq 1 \\ 0 \end{cases}$$

이것을 접근성과 관련해서 설명하면, $n=C=0$ 인 경우에 $\Theta_i=0$ 이므로 $R(\Theta)=0$ 이다. 즉, 접근성이 $Y(k)=1$ 이라 하더라도 중복성에 의한 효과는 전혀 없음을 알 수 있다.

IV. 결합 효과의 측정

정보의 접근성에 의한 효과 $Y(k)$ 와 중복성에 의한 효과 $R(\Theta)$ 를 하나의 단일 수식으로 결합하기 위해서 조건부 모델을 사용한다. 중복성에 의한 효과는 클러스터에서 수신된 정보 요소들과 각 출처의 개수에 의존한다. 그러나 접근성과 중복성은 상관 관계가 매우 약하다. 예를 들어, 클러스터가 정보 접근성은 완벽하지만 중복성에 의한 효과는 0일 수도 있다. 반대로, 매우 제한된 접근성을 가지고 있는 클러스터가 중복성에 의한 효과는 클 수도 있다. 하지만 최소한 하나의 정보 요소에 대한 보고도 없다면 중복성에 의한 효과는 얻기가 불가능하다. 따라서 상관 관계를 쉽게 보여주기 위해서 간단하게 $R(\Theta)/Y(k)$ 를 사용한다. 이 비는 $R(\Theta) \leq Y(k)$ 이고 $Y(k) \neq 0$ 인 경우에만, 0에서 1사이의 값을 갖는다. 그러므로 분모가 0이 되는 제약 조건을 제거하고, 계속해서 [0, 1] 범위의 값을 갖도록 일반화하기 위해서 식 (8)과 같이 수정하여 사용한다.

$$B[R(\Theta)|Y(k)] = c \frac{\alpha + R(\Theta)}{\beta - Y(k)} + d \quad (8)$$

여기서, 파라미터 α 와 β 는 각각 중복성과 접근성 측면에서 상대적인 중요도를 반영한 것으로써, $\beta > 1$ 는 분모가 0이 되지 않도록 해주며, $\alpha \geq 0$, 상수 c 와 d 는 식 (8)이 0에서 1사이의 값을 갖도록 해준다. 이때, 양쪽 유계값을 갖는 조건은 $B[0|0]=0, B[1|1]=1$ 이다.

즉, 결정적 정보 요소에 대한 접근성이 없으면 중복성에 의한 효과를 얻는 것은 불가능하다. 반면에, 접근성이 최대인 조건하에서 중복성이 최대일 때 결합 효과는 최대이다. 추가적으로 $B[1|0]$ 과 $B[0|1]$ 에 대해서 살펴보면, $B[1|0]$ 은 결정적 정보 요소에 대한 접근성이 없다면 중복된 보고에 의한 효과가 발생할 수 없으므로 존재할 수 없다. 마찬가지로 $B[0|1]$ 은 비록 결정적 정보 요소에 대해서 완벽하게 접근할 수는 있지만 중복성에 의한 효과가 전혀 없으므로 의미가 없는 경우이다.

위의 두 가지 유계값 조건을 이용하면 상수 값을 구할 수 있다. $B[0|0]=0$ 으로부터 상수 $d = -c \frac{\alpha}{\beta}$ 를 얻을 수 있고, $B[1|1]=1$ 을 이용하면 상수 c 와 d 는 각각 식 (9)와 같다.

$$c = \frac{\beta(\beta-1)}{\beta+\alpha}, \quad d = -\frac{\alpha(\beta-1)}{\beta+\alpha} \quad (9)$$

따라서 0과 1사이의 범위를 가지면서, 결정적 정보 요소에 대한 접근성과 중복성에 의한 효과간의 상관 관계를 나타내는 식 (8)은 식 (7), (9)를 이용하면 최종적으로 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$B[R(\Theta)|Y(k)] = c \frac{\alpha + R(\Theta)}{\beta - Y(k)} + d \quad (10)$$

$$= \frac{(\beta-1) \left[\alpha \left(\frac{k}{C} \right)^\zeta + \beta \left(1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^C e^{-\delta_i(\Theta_i-1)} \right) \right]}{(\beta+\alpha) \left[\beta - \left(\frac{k}{C} \right)^\zeta \right]}$$

그림 2는 식 (10)을 기초로 정보의 접근성과 중복성에 의한 효과를 결합했을 때의 결과를 보여주고 있다. x축은 정보의 접근성에 의한 효과 $Y(k)$ 이고, y축은 중복성에 의한 효과 $R(\Theta)$, z축이 전체 효과를 의미하고 있다. 그림 2는 단일 클러스터에서 $\alpha=0.5, \beta=1.5$ 인 경우로써, 전체 효과는 α 와 β 에 의해서 조금 달라지기는 하겠지만 접근성과 중복성에 의한 효과가 각각 증가하게 되면, 전체 효과가 증가하는 양상은 그림에서 보는 바와 같이 동일하게 나타나게 된다.

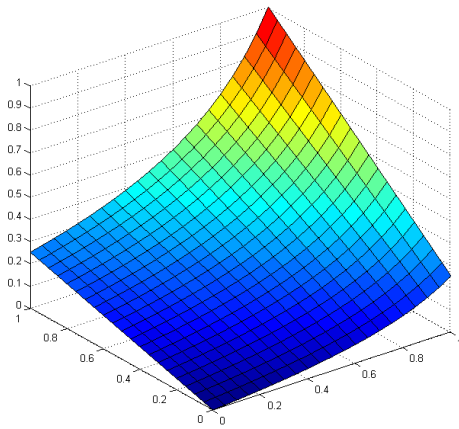


그림 2. 전체 효과
Fig. 2 Total Effects

V. 결 론

지금까지 정보의 접근성에 의한 효과와 네트워크화에 기반하는 중복성에 의한 효과에 대해서 살펴보았다. 세부적인 요소들에 따라서 효과의 정도는 다르겠지만 정보의 속성과 네트워크화가 이루어졌을 때에 전체적인 효과는 상승함을 알 수 있다. 즉 지휘결심에 이루어지는 네트워크에서 적용가능한 복잡도를 측정하는 새로운 방안을 제안하였다.

본 논문에서는 정보가 지휘관의 지휘결심에 어느 정도의 영향을 미치는가에 대해 살펴보기 위해서 정보의 속성과 네트워크 개념을 적용하였다.

참고문헌

[1] Walter L. Perry and Fred D. J. Bowden, “Advanced metrics for network-centric naval operations”, *Battlespace Digitization and Network-Centric Systems III*, Raja Suresh, vol. 5101, pp. 90~101, 2003.

[2] James Moffat, *Complexity Theory and Network Centric Warfare*, US Department of Defense, Command and Control Research Program, 2003.

[3] Philip W. Anderson, “More Is Different”, *Science*, vol. 177, pp. 393~396, 1972.

[4] Andrey N. Kolmogorov, “Three Approaches to the Quantitative Definition of Information”, *Problems of Information Transmission*, vol. 1, pp. 4~7, 1965.

[5] David H. Wolpert and William G. Macready, *Self-Dissimilarity: An Empirical Measure of Complexity*, working paper, Santa Fe Institute, Santa Fe, New Mexico, 1997.

[6] Olaf Sporns and Giulio Tononi, “Classes of Network Connectivity and Dynamics”, *Complexity*, vol. 7, no. 1, pp. 28~38, 2002.

[7] Ricard V. Sole and Bartolo Luque, “Statistical Measures of Complexity for Strongly Interacting Systems”, *Physical Review E*, vol. 1, 27 August 1999.

[8] 유재영, 조용건, “미래전에서 정보가 지휘결심에 미치는 효과 분석”, 한국해양정보통신학회논문지, 제14권, 제1호, pp. 259~266, Jan. 2009.

[9] Giuliana Davidoff, Peter Sarnak and Alain Valette, *Elementary Number Theory, Group Theory, and Ramanujan Graphs*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2003.

[10] 유재영, 조용건, “미래전에서 정보의 네트워크화에 의한 효과 분석”, 한국통신학회 추계종합학술대회, 2009.

저자소개



유재영(Jae-Young Yoo)

2005년 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
2008년~현재 광운대학교 대학원 박사과정

※ 관심분야: 군사/국방과학, 군통신, 네트워크



이명노(Myung-Noh Lee)

1998년 한양대학교 정보통신과
(공학석사)
2009년~현재 명지대학교 대학원
박사과정

※관심분야: NCW, 군통신, 네트워크



조용건(Yong-Gun Jo)

1982년 육군사관학교 전자공학과
(이학사)
1988년 국방대학원 전산학과
(공학석사)

1998년 KAIST 전산학과 (공학박사)

2007년~현재 광운대학교 교수

※관심분야: NCW, 국방아키텍처, 정보보안