

자연계 동조 현상의 이해와 공학적 활용 방안

최현호

국립한경대학교

요약

본고에서는 자연계에 존재하는 동조 현상을 이해하고 공학적으로 활용하기 위하여 동조 현상에 관한 대표적인 수학적 모델을 살펴보고 동조의 원리를 분석한다. 또한 동조 현상을 공학적으로 활용한 주요 사례를 살펴봄으로써 자연계를 모방한 동기화 방식의 장단점을 분석하고 자연계 모방 기술의 필요성을 역설한다. 아울러 동조 현상을 공학적으로 활용하는데 필요한 향후 연구 이슈를 제시한다.

I. 서론

서로 동조(synchronization)하는 경향은 우주에서 가장 일반적인 경향이다 [1]. 동물에서 사람에 이르기까지, 원자에서 행성에 이르기까지 모두 그렇다. 수천 마리의 반딧불이는 서로 동조해서 반짝이며, 기러기 떼는 우아하게 편대 비행을 한다. 공연장의 박수 소리는 시간이 지남에 따라 하나의 소리를 내며, 오랜 시간을 함께 지내는 여성들의 월경 주기는 같아진다. 생명유지를 위해 심장의 수천 개의 박동조절 세포는 동조해서 발화한다. 무생물도 동조가 가능하다. 레이저 빔은 동조해서 고동치는 수조 개의 원자들이 위상과 주파수가 같은 광자를 방출하는 데서 생겨난다. 우리가 달의 한쪽 면만 볼 수 있는 것도 지구와 달의 중력에 의해 달의 공전과 자전 주기 사이에 동조가 일어났기 때문이다.

이와 같이 동조는 의식이 있는 생명체뿐만 아니라 세포나 원자와 같이 의식이 없는 존재들 사이에서도 일어난다. 중요한 점은 이들은 지도자가 지휘하는 것도 아니고 주변 환경에서 단서를 얻는 것도 아닌데 리듬을 서로 일치시킨다는 것이다. 다시 말해, 모든 경우에 동조의 이러한 질서는 창발(emergence, 없던 데서 저절로 발생)한다[2].

반딧불이, 새와 물고기 떼, 박동조절 세포들은 모두 진동자(oscillator)의 집단으로 모델링 된다[3]. 진동자는 어느 정도 규

칙적인 시간 간격으로 스스로를 계속 되풀이하는 존재를 의미한다. 주기적으로 반딧불이는 반짝이고, 새들은 위치를 조정하고, 박동조절 세포들은 방전한다. 또한 둘 이상의 진동자들이 물리 또는 화학적 과정을 통해 서로 영향을 미칠 수 있다면 이것들은 서로 연결되어 있다고 한다. 반딧불이들은 빛으로 통신하고, 새들은 가시거리 내에서 서로의 위치를 확인하며, 박동조절 세포들은 전류를 앞뒤로 통과시킨다. 이와 같이 자연은 진동자들이 서로 통신할 수 있도록 가능한 모든 채널을 이용한다. 그리고 이러한 통신의 결과는 흔히 동조로 나타난다.

지금까지 자연계의 다양한 동조 현상은 많은 관심을 받으며 이론적인 연구와 함께 여러 공학 분야로 적용되어왔다[4][5][6]. 대규모 분산 네트워크에서의 시간 동기화 및 스케줄링, 센서 네트워크에서의 분산 퓨전(fusion), 다양한 네트워크 토폴로지를 고려한 신속한 컨센서스(consensus)의 도출, 멀티 비히클(multi-vehicle)의 분산 대형(formation) 제어, 비선형 최적화 문제의 풀이 등이 그 예이다. 최근 수년간의 통신 기술의 발달로 인해 네트워킹이 가능한 노드 수가 급격히 증가함에 따라 노드 간 협력을 통해 공동의 목적을 달성하고자 하는 응용이 늘어나고 있다. 하지만 다수의 노드를 중앙에서 관리하는 기존 접근 방식은 비용, 복잡도, 가용자원, 성능 측면에서 한계가 존재한다. 따라서 동조 현상과 같이 복잡하고 제한적인 환경에서도 주어진 목적을 효과적으로 달성하는 자연계 질서 현상을 모방한 접근 방식이 복잡한 공학적 문제의 해결책으로 더욱 주목을 받고 있다.

본고에서는 자연계에 존재하는 동조 현상을 이해하고 공학적으로 활용하기 위해 동조 현상에 대한 대표적인 수학적 모델을 살펴보고 동조의 원리를 파헤친다. 다음으로 공학 시스템에서 동조 현상이 활용된 주요 사례를 살펴봄으로써 자연계 모방 동기화 방식의 장단점을 분석하고 자연계 모방 기술의 필요성을 제시한다. 마지막으로 동조 현상을 공학적으로 활용하는데 필요한 연구 이슈에 대해서 논의한다.

II. 동조의 원리

본 장에서는 대표적인 동조에 관한 이론적인 연구를 살펴봄으로써 동조의 원리 및 발생 조건을 이해한다.

1. Reynolds의 군집 행동 모델

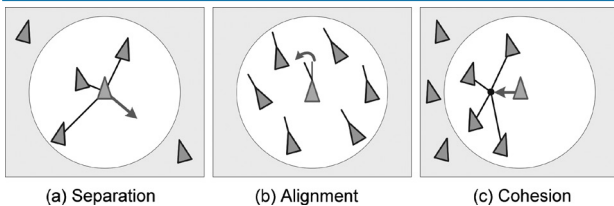


그림 1. 군집 행동 모델의 세가지 원리

Reynolds는 처음으로 새, 물고기, 짐승 떼와 같은 군집(flock)에 대한 행동 모델을 만들고 컴퓨터 애니메이션을 통해 그들의 움직임을 보여주었다[7]. 기본적으로 군집의 움직임은 <그림 1>과 같은 세가지 원리를 따르며 이를 통해 군집 안의 각 개체는 자신의 위치와 속도를 스스로 결정한다고 보았다. 세가지 원리 중, 분리성(separation)은 각 개체가 주변 개체들과 서로 떨어져 일정 간격을 유지하려는 성질을 의미하며, 정렬성(alignment)은 각 개체가 주변 개체들의 이동 방향의 평균값으로 자신의 이동 방향을 결정하려는 성질을 의미하며, 결합성(cohesion)은 각 개체가 주변 개체들과 너무 떨어지지 않도록 자신의 위치를 주변 개체들의 평균 위치로 이동시키려는 성질을 의미한다. 이때 주변 개체들은 개체들 간의 물리적인 거리와 각 개체의 시야각에 따라 결정되며 인식되지 못하는 다른 개체들은 계산에서 제외된다. 이와 같은 세가지 규칙에 의해 군집 속의 각 개체는 자신의 위치와 속도를 주변 개체들의 위치와 속도의 평균값에 맞춘다. 시간이 지나면 이들은 서로 동일한 간격을 유지하면서 같은 속도로 움직이게 된다. 즉, 각 개체들은 간격과 속도 측면에서 동조가 발생한다.

2. Peskin의 박동조절 세포 모델

Peskin은 심장 박동조절 세포(cardiac pacemaker cell)를 축전기와 저항의 병렬 회로로 추상화하였다[8]. 이 전기회로는 <그림 2>에 나타난 것과 같이 완전한 상승 곡선을 따라 충전되며, 전압이 역치(threshold)에 다다르면 방전(fire)한다. 이후 다시 전압이 올라가기 시작하고 새로운 주기가 반복된다. 이는 심장의 박동조절 세포가 주기적으로 방전하고 전압이 바닥으로 되돌아가는 것을 모방한 것이다.

Peskin은 심장 박동 현상을 이러한 수학적 진동자의 거대한

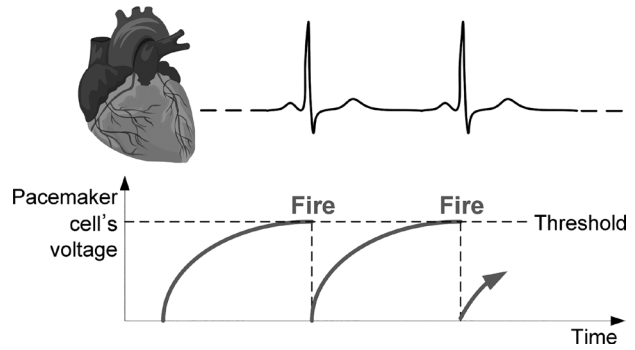


그림 2. 심장 박동조절 세포 모델

네트워크로 이상화 하였다. N 개의 진동자 중 i 번째 진동자의 전압 상태변수 x_i 는 다음과 같이 모델링 된다.

$$\frac{dx_i}{dt} = S_0 - \gamma x_i, \quad 0 \leq x_i \leq 1, \quad i = 1, \dots, N \quad (1)$$

여기에서 S_0 는 초기값에 관계되며, γ 는 소실률(dissipation)을 나타낸다. i 번째 진동자는 $x_i = 1$ 일 때 방전하고 $x_i = 0$ 으로 회귀한다. 진동자들은 방전에 의해 서로 영향을 주고 받는데, 한 진동자가 방전하면 이를 인지한 다른 진동자들은 연결 강도(coupling strength) ε 만큼 전압이 올라가거나 역치를 넘어서면 방전하게 된다. 이와 같은 규칙은 다음과 같이 표현된다.

$$x_i(t) = 1 \rightarrow x_j(t^+) = \min(1, x_j(t) + \varepsilon) \quad \forall j \neq i \quad (2)$$

Peskin은 모든 진동자가 똑같으며(즉, 같은 충전 곡선을 가짐) 서로 똑같은 강도로 연결되어 있다는 가정 하에 가장 단순한 두 개의 진동자는 임의의 초기 조건에서도 항상 수렴하여 동시에 방전함을 증명하였다.

3. Strogatz의 Pulse-Coupled Oscillator 모델

Strogatz는 동조 현상을 만들어내는 각 개체를 펄스로 연결된 진동자(Pulse-Coupled Oscillator; PCO)로 모델링 하였다[9]. PCO는 내부에 시계를 하나 가지며 정해진 주기에 따라 펄스를 방출하면서 진동자들 사이의 미디어를 통해 다른 진동자로부터의 펄스를 수신할 수 있다. 주변 진동자로부터 펄스를 수

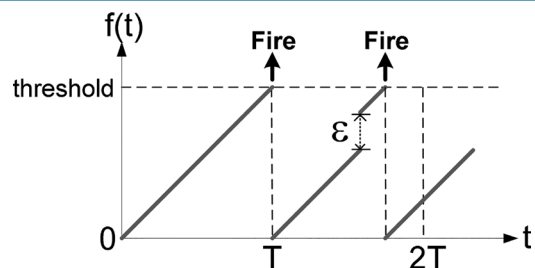


그림 3. PCO의 위상 동기화 과정

신하면 각 진동자는 자신의 시계를 조정하며, 적절한 시계 조절 규칙하에서 시간이 지남에 따라 동조가 출현한다.

〈그림 3〉은 PCO의 위상 동기화 과정을 보여준다. PCO모델에서 모든 노드는 고정된 시간 주기 T 를 가진 진동자로 행동한다. 진동자는 내부 시간 위상 t 를 갖고 0부터 시작하여 $t=T$ 가 될 때까지 일정 비율로 증가한다. $t=T$ 가 되었을 때 노드는 방전을 하고 $t=0$ 으로 초기화한다. 이때 방전을 감지한 주변 노드들은 자신의 위상 t 를 앞으로 조절하여 방전까지의 시간을 줄인다. 새로운 위상 값 t_{update} 는 다음 식으로 결정된다.

$$t_{update} = f^{-1}(f(t) + \varepsilon) \quad (3)$$

여기에서 방전 함수라고 불리는 f 는 매끄러우며 점진적으로 증가하는 오목(concave) 함수여야 하며, 증가량 ε 는 1보다 작은 양수이다. 아울러 식 (3)으로 결정되는 t_{update} 값이 T 보다 크게 되면 노드는 즉시 방전하고 $t=0$ 으로 초기화된다. 이와 같은 규칙에 의해 서로 다른 t 값으로 시작한 노드들은 시간이 지남에 따라 위상 t 가 모두 같아진다.

Strogatz는 Peskin의 두 개의 진동자 모델을 N 개로 일반화하여 모든 진동자가 동일하며 서로 연결되어 있다는 가정하에서 임의의 초기값에서도 N 개의 진동자는 항상 동기가 일치하게 됨을 증명하였다. 하지만 PCO 모델은 현실적인 관점에서 잡음이나 펄스의 송수신 지연이 존재할 때는 동기가 이루어지지 않음이 확인되었다[10].

4. Kuramoto의 반딧불이 모델

Kuramoto는 동일한 진동자들이 서로 약하게 연결되어 있으며 진동자들의 상호작용이 위상 차이의 사인함수에 의존한다고 가정하여 반딧불이의 동조 현상을 다음과 같이 모델링 하였다 [11][12][13].

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i - \frac{K}{N} \sum_{j=1}^N \sin(\theta_i - \theta_j), \quad i = 1, \dots, N \quad (4)$$

여기에서 θ_i 는 각 개체의 위상을 나타내고, ω_i 는 각 개체의 고유 주파수를, K 는 결합력의 세기를 나타낸다. 동기화가 이루어지지 않은 초기 상태에서 각 개체들은 고유 주파수에 따라 진동하며 위상 값이 서로 다르다. 하지만 시간이 지남에 따라 $\sin(\theta_i - \theta_j)$ 에 의한 상호작용을 통해 각자의 위상에 변화가 생기고 결국에는 〈그림 4〉와 같이 모든 개체의 위상이 같아지는 동조가 발생한다.

Kuramoto 모델은 Strogatz 모델과는 달리 서로 다른 고유 주파수를 가진 진동자를 고려하였으며 진동자의 상호 작용을 사인함수로 한정하였다. 이로 인하여 Kuramoto 모델은 비선

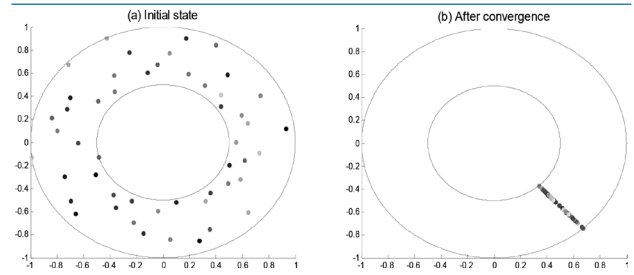


그림 4. Kuramoto 모델에 따른 위상 동기화 현상

형 모델임에도 불구하고 수학적으로 정확한 풀이가 가능하다. Kuramoto 모델은 완전히 연결된(fully-connected) 네트워크에서 K 값이 충분히 큰 경우에 임의의 초기값에 대해서 동조를 달성한다[14]. 하지만 진동자간 고유 주파수의 차이가 어느 이상으로 크거나 시간 지연이 존재할 때 동기화는 항상 보장되지 않는다[15].

5. Cucker-Smale의 플로킹 모델

Cucker와 Smale은 새들이 무리 지어 나는 원리를 다음과 같이 수학적으로 모델링 하였다[16].

$$v_i(t+1) - v_i(t) = \frac{\lambda}{N} \sum_{j=1}^N \psi(|x_j - x_i|)(v_j - v_i) \quad (5)$$

여기에서 x_i 와 v_i 는 각각 i 번째 새의 위치와 속도를 나타내며, N 은 전체 새의 개수, λ 는 새들 간 결합력의 세기, ψ 는 두 개체 간의 거리를 입력으로 받아 통신 범위를 나타내는 함수이다. 예를 들어, 각 새가 일정 거리 r 내에 있는 이웃 새들의 정보만 알 수 있다면 $|x_j - x_i| \leq r$ 인 경우에는 $\psi=1$ 이 되고 이외에는 $\psi=0$ 이 된다. 이와 같이 Cucker-Smale의 플로킹 모델은 각 새가 인지한 이웃 새들의 속도의 평균으로 자신의 속도를 맞추는 방식을 나타낸 것으로 Reynolds의 군집 행동 모델의 수학적 표현이라 할 수 있다.

Cucker-Smale은 다양한 ψ 함수를 고려하였는데, 경로 손실(path loss)이 거리에 반비례하여 존재하는 일반적인 ψ 함수에 대해서 동조 조건을 밝혔다[16][17]. 또한 식 (5)에 의한 수렴 값은 새들의 초기 속도 값의 평균이 되며, 수렴 시 각 개체의 위치는 발산하지 않고 일정 공간 내에 존재함을 증명하였다. 이러한 Cucker-Smale 모델의 수렴 특성은 다음과 같이 표현된다.

$$v_c := \lim_{t \rightarrow \infty} v_i(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i(0), \quad \text{for } \forall i \quad (6)$$

$$\sup_{0 \leq t < \infty} |x_i(t) - x_j(t)| < \infty, \quad \text{for } \forall i \neq j \quad (7)$$

〈그림 5〉는 Cucker-Smale 플로킹 모델에 따른 새떼의 동기

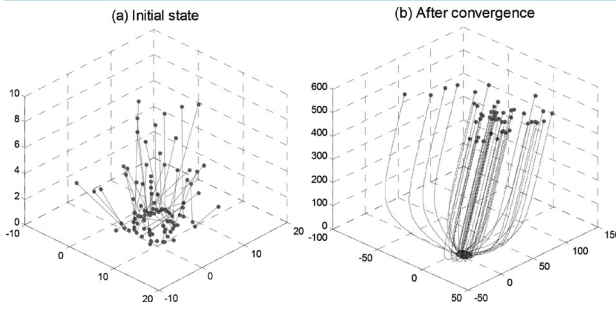


그림 5. Cucker-Smale 플로킹 모델에 따른 3차원 공간상에서 새떼의 동기화 현상

화 현상을 보여준다.

6. Olfati-Saber의 컨센서스 모델

다중 에이전트(multi-agent) 네트워크와 같은 동적(dynamic) 시스템에서는 동조와 같은 의미로 컨센서스라는 용어를 사용한다[18]. 컨센서스는 각 에이전트의 상태에 의존하는 어떠한 값이 서로 일치함을 의미한다. 컨센서스 알고리즘은 컨센서스를 위해 각 에이전트가 행동하는 규칙을 일컫는데, 일반화된 컨센서스 알고리즘은 선형 시스템의 형태로 연속시간과 이산시간에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij}(x_j(t) - x_i(t)) \quad (8)$$

$$x_i(k+1) = x_i(k) + \varepsilon \sum_{j \in N_i} a_{ij}(x_j(k) - x_i(k)) \quad (9)$$

여기에서 $x_i(t)$ 는 t 시간에 노드 i 의 상태 값, a_{ij} 는 두 노드 i 와 j 간의 연결 강도, $\varepsilon > 0$ 은 스텝 크기를 나타낸다. 두 식에 따르면 각 노드의 상태 값의 변화는 주변 노드들과의 차이의 총합에 의해 결정되는데, 이로 인하여 시간이 지남에 따라 각 노드의 상태 값은 다음과 같이 모든 노드의 초기값의 평균으로 수렴한다.

$$\alpha = \frac{1}{N} \sum_i x_i(0) \quad (10)$$

이와 같은 컨센서스 알고리즘의 형태와 수렴 결과는 Cucker-Smale의 결과와 일치한다.

컨센서스 모델에 대해서는 많은 이론적인 연구가 진행되었는데, 수렴 속도에 대한 결과가 주목할만하다. 간단히 식 (8)과 (9)는 다음과 같은 행렬 식으로 변환될 수 있다.

$$\mathbf{x}' = -\mathbf{L}\mathbf{x} \quad (11)$$

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{P}\mathbf{x}(k) \quad (12)$$

여기에서 행렬 $\mathbf{L}$ 을 Laplacian, $\mathbf{P}$ 를 Perron이라 부르며, 이들은 네트워크 토폴로지에 따라 결정되는 값이다. 이때 컨센서스 알고리즘의 수렴 속도는 행렬 $\mathbf{L}$ 의 두 번째로 작은 고유값(eigenvalue)과 행렬 $\mathbf{P}$ 의 두 번째로 큰 고유값에 의존하여 결정된다 [18].

7. 동조의 시스템 모델

지금까지 살펴본 동조에 관한 연구에서는 자연계 동조 현상을 모방하여 각 개체의 동작을 수학적으로 모델링하고, 참여 노드 수, 초기값, 네트워크 토폴로지, 노드간 연결 강도, 지연, 잡음, 경로 손실 등의 조건에 따라 수렴 여부, 수렴 값, 수렴 속도의 성능을 이론적으로 분석하였다. 동조 알고리즘의 핵심은 각 노드가 이웃 노드의 정보만을 이용하여 자신의 정보를 새롭게 갱신하는 과정을 반복한다는 것이며, 이 갱신 방법은 다양한 형태가 될 수 있지만 수렴 값을 초기값의 평균으로 유일하게 결정할 수 있다는 관점에서 지역적인 평균(local average) 알고리즘이 가장 보편적인 동조 알고리즘이라 할 수 있다. 이와 같은 동조 현상은 그림 6과 같이 입출력을 가진 일반화된 시스템으로 모델링 할 수 있다.

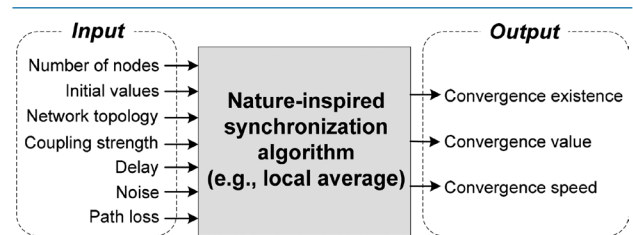


그림 6. 동조의 시스템 모델

Ⅲ. 공학적 활용 방안

본 장에서는 자연계 동조 현상을 기반으로 한 다양한 공학적 응용에 관한 연구를 살펴본다.

1. 분산 시간 동기화

이동 애드혹, 무선 매쉬, 멀티홉, 센서 네트워크와 같이 참여 노드 수가 많고 노드의 이동 및 진출입에 따라 네트워크가 동적으로 변하는 환경에서는 기존 중앙 집중적인 동기화 방식보다는 자연계를 모방한 분산 동기화 방식이 더 적합하다. 관련하여 다음과 같은 다양한 연구가 진행되었다. 대규모 네트워크에 반딧불이 알고리즘을 적용하여 노드 전송 시간을 동기화 하는 방

법이 제안되었다[19][20]. 대규모 센서 네트워크에 Strogatz의 PCO 모델을 적용하여 노드 수에 따른 동기 성능을 분석하고, 에너지 효율과 수렴 속도의 트레이드오프(tradeoff)에 따라 최적화를 수행하였다[21]. 이동 애드혹 네트워크에서 노드 배치와 이동성을 이용하여 분리된 네트워크 간의 시간 동기를 맞추는 기법이 제안되었다[22]. 다수의 노드가 서로 다른 반송 주파수를 갖는 메시 네트워크에서 다중 주파수 옵션 문제를 해결하기 위해 생체모방 알고리즘을 이용한 분산 주파수 동기화 기법이 제안되었다[23]. 아울러 노드간 시간 지연이 발생하고 모두 연결되어 있지 않은 현실적인 상황에서 동기화 방법이 제안되었다[15][24].

2. Desynchronization

Desynchronization (DESYNC)은 진동자를 같은 시간 위상으로 수렴하게 만드는 것과는 반대로 서로 가능한 멀리 떨어져서 방전하게 만드는 것이다. 즉, 노드간 위상 차이를 모두 동일하게 만드는 것으로, 동조의 대상이 위상 값 자체에 있는 것이 아니라 노드간 위상 차이에 있다. 시간과 이벤트의 DESYNC를 위해 PCO 모델 기반의 분산 DESYNC 알고리즘이 제안되었다[25][26]. <그림 7>과 같이 각 진동자는 자신의 방전 바로 이전과 이후의 방전만을 듣고 두 이웃의 방전 시간의 중간지점으로 자신의 위상을 맞춘다. 이러한 과정을 반복함으로써 DESYNC가 달성된다.

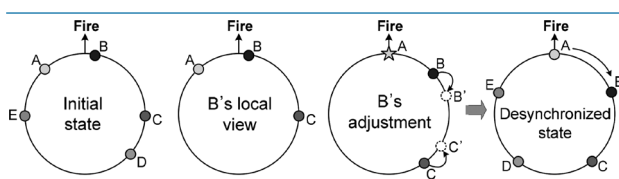


그림 7. DESYNC 알고리즘

DESYNC 알고리즘을 Time Division Multiple Access (TDMA) 스케줄링에 적용함으로써 접속 충돌 없이 분산적으로 자원을 공평하게 할당하는 round-robin 스케줄링 방식이 제안되었다[25][26]. 이 DESYNC 기반의 TDMA 스케줄링은 큰 부하에서도 높은 처리율을 제공하며, 스케줄링 시그널링이 필요 없어 제어 오버헤드가 발생하지 않는다. 또한 DESYNC를 멀티홉 네트워크에 적용하여 노드가 임의로 진입하거나 이탈하는 상황에 맞춰 노드간 전송 시간 간격을 유동적으로 조절하는 분산 스케줄링 방법이 제안되었다[27]. 아울러 DESYNC 알고리즘을 확장하여 각 노드가 두 개의 클락을 운용하게 함으로써 비례공평(proportional fair) 스케줄링을 가능하게 만들었다[28].

3. 센서 네트워크에서의 분산 퓨전

센서 네트워크에서는 각 노드에서 센싱된 정보를 중앙에서 모두 수집하여 한꺼번에 계산하는 것보다 중간 노드에서 센싱 정보의 퓨전을 통해 전송 정보량을 줄이는 것이 필요하다. 특히 노드 수가 증가할수록 전달해야 하는 센싱 정보가 급속하게 늘어나므로 네트워크 곳곳에서 센싱 정보의 퓨전이 더욱 요구된다. 센싱 정보의 퓨전은 다수의 센서 노드가 협력적으로 의사 결정을 하는 과정이며 노드간 컨센서스를 이루어 하나의 유용한 정보를 뽑아내는데 목적이 있다.

칼만(Kalman) 필터를 구현하기 위해 센서 네트워크에서 분산적으로 평균을 구하는 다양한 방법이 제시되었다[29][30]. 또한 네트워크 노드간 컨센서스를 통해 평균을 구하는 방식으로 선형 least-squares estimator (LSE)가 제안되었다[31]. 센싱 정보의 평균을 보다 효율적으로 계산하기 위해 새로운 저역통과 및 고역통과 컨센서스 필터가 제안되었다[32].

4. 빠른 동조를 위한 네트워크 설계

자연계 모방형 동조 알고리즘은 반복 연산(iteration)이 필요하여 원하는 수렴 값을 얻기까지 시간이 소요된다. 이러한 단점을 극복하기 위해 빠른 동조를 이루기 위한 네트워크 설계 문제가 최근 주목을 끌게 되었다. [33]에서는 각 연산마다 평균을 취할 때 곱해지는 가중치(weight)를 가변하여 동조 알고리즘의 수렴 시간을 줄이는 연구를 수행하였다. 다른 접근 방식으로 가중치는 고정시키고 네트워크 토폴로지를 다르게 구성함으로써 보다 빠른 동조를 이끌어 내는 방안이 연구되었다 [34][35]. 주어진 네트워크 토폴로지에서 임의의 노드들을 재연결하는(rewiring) 방법으로 좁은 세상(small-world) 네트워크를 만

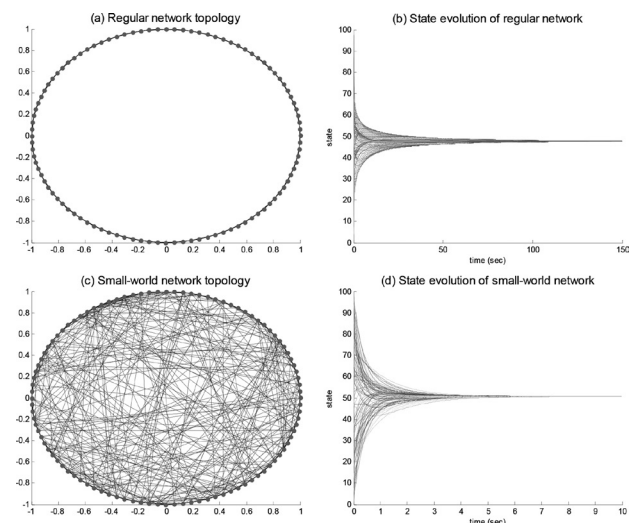


그림 8. 정규 네트워크와 좁은 세상 네트워크의 수렴 속도 비교

들었을 때 동조 속도가 획기적으로 줄어드는 것이 확인되었다. <그림 8>은 3홉 내의 노드끼리만 연결되어 있는 정규(regular) 네트워크와 이에 임의적으로 300개의 노드간 연결을 추가한 좁은 세상 네트워크에서 수렴 속도의 차이를 보여준다.

5. 분산 대형 제어

멀티 비히클 시스템은 상업적 또는 군사적인 응용에 있어서 매우 중요한 네트워킹 시스템이다. 다수의 차량을 대형을 갖추어 자율 주행하게 만드는 일은 노드간 협력을 요구하며, 이때 모든 차량은 공동의 임무를 달성하기 위해 서로 동조해야 할 필요성이 있다. 멀티 비히클의 분산 대형 제어가 동조 문제임을 밝히고 설계를 위한 이론적인 프레임워크가 개발되었다[36]. 또한 우주공간에서의 랑데부(rendezvous) 문제는 서로 상호작용을 하는 여러 개체들의 위치에 대한 동조 문제로 해석된다[37][38]. 랑데부 문제는 네트워크 토폴로지에 따른 수렴 여부가 중요하며 수렴 값에는 무관하다. 또한 충돌 및 장애물을 회피하는 플로킹 알고리즘의 설계 및 분석을 위한 이론적인 프레임워크가 개발되었다[39]. 플로킹을 위해서는 개체들간의 상호작용뿐만 아니라 장애물과의 관계도 같이 고려해야 하는데, 이때 동조 알고리즘의 역할은 각 개체가 주변 정보만을 가지고 서로 그리고 장애물과 부딪히지 않으면서 전체 개체의 속도를 동일하게 만드는 데 있다.

6. 최적화 문제의 해법

군집 지능(swarm intelligence)을 모방하여 Particle Swarm Optimization (PSO) 및 Ant Colony Optimization (ACO)과 같은 다양한 메타휴리스틱(metaheuristic) 최적화 방법이 제안되었다[40]. 이러한 최적화 기법은 다차원 해 공간을 다수의 파티클이 서로 정보를 교환하면서 반복적으로 탐색하면서 좀 더 최적에 가까운 해를 찾아나가는 방법이다. 이는 다수의 개체가 분산적으로 상호작용을 하면서 하나의 최적점으로 수렴해나간다는 점에서 동조 현상과 비슷하지만, 지역적으로 관심 정보의 평균을 취해나가는 동조의 기본 알고리즘을 따르지 않는다.

어떤 최적화 문제에서는 특정 변수를 동조 시키는 것 자체가 최적의 해법임이 밝혀졌다[41][42]. 각 개체가 추구하는 값이 서로 연대성(solidarity property, 한 개체의 값의 증감은 나머지 모든 이들의 값에 감증을 야기함)을 가지며, 목적 함수(max-min objective problem)가 이들 값의 최소값을 최대화하는 것일 때 최적 해법은 이들 값을 동일하게 만드는, 즉 동조시키는 것임을 증명하였다. 이와 같은 정리를 이용하여 [41]에서는 무선 멀티홉 네트워크에서 종단간(end-to-end) 전송률을 최대화

하는 분산 송신전력제어 알고리즘을 제안하였다. 무선 네트워크에서 각 링크 전송률은 상호 간섭으로 인해 연대성을 갖는다. 또한 멀티홉에서 종단간 전송률은 각 구성 링크의 전송률 R_{ij} 의 최소값으로 결정되므로 멀티홉 종단간 전송률 최대화 문제는 다음과 같은 최대-최소 형태의 목적함수를 갖는다.

$$\max_{\mathbf{p}} R_{e2e} = \max_{\mathbf{p}} \min\{R_{12}, R_{23}, \dots, R_{n(n+1)}\} \quad (13)$$

여기에서 벡터 $\mathbf{P}$ 는 n 개의 송신 노드의 송신파워 값을 나타낸다. 따라서 최적 해법은 각 링크의 전송률을 모두 동일하게 만드는 것이며, 이를 위해 Cucker-Smale의 플로킹 모델을 기반으로 다음과 같은 링크 전송률의 동조 알고리즘을 제안하였다.

$$R_{ij}(t+1) - R_{ij}(t) = \frac{1}{n} \sum_{\forall k, l=k+1} \psi(|x_k - x_l|)(R_{kl}(t) - R_{ij}(t)) \quad (14)$$

이와 같이 매 순간 결정되는 링크 전송률을 맞추기 위해 각 송신 노드는 송신전력제어를 수행하게 된다.

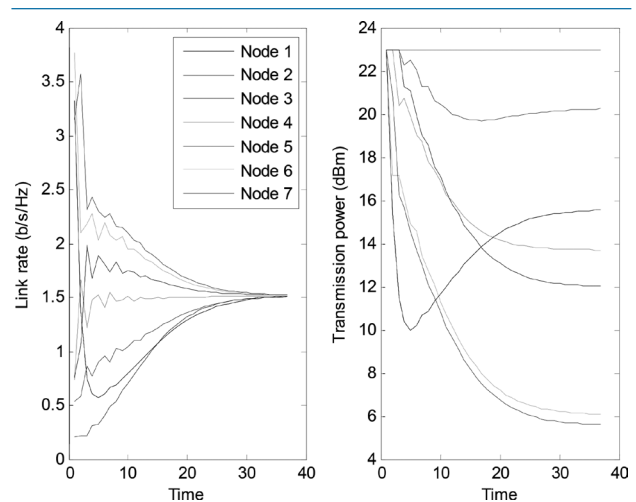


그림 9. 멀티홉 종단간 전송률 최적화 문제에서 시간에 따른 링크 전송률과 송신전력의 변화

<그림 9>는 [41]의 멀티홉 종단간 전송률 최적화 문제에서 시간에 따른 링크 전송률의 동조 현상과 송신전력 값의 변화 양상을 보여준다. 제안 알고리즘은 기본적으로 Cucker-Smale의 플로킹 모델을 따르므로 수렴을 보장받는다. 아울러 주목할 만한 점은 링크 전송률의 동조가 이루어질 때 초기에 가장 좋은 링크 상태를 가진 노드는 가장 낮은 송신전력을 사용하고, 초기에 가장 나쁜 링크 상태를 가진 노드는 최대 송신전력을 사용한다는 점이다. 높은 송신전력을 사용할수록 간섭을 더 많이 주기 때문에 가장 좋은 링크를 가진 송신 노드는 가장 낮은 송신전력을 사용하여 간섭을 덜 끼침으로써 다른 링크들의 전송률을 높여주는 것이 최적 전략이다. 이는 새들이 떼를 지어 이동할 때 가장 힘이 좋은 새가 공기 저항이 센 선두에 위치함으로써 뒤

따라 오는 약한 새들의 힘이 덜 들도록 도와주는 이치와 같다고 볼 수 있다. 새 떼도 공기저항으로 인해 새들의 위치 벡터는 연대성을 가지며, 낙오 없이 다 같이 멀리 날아가고자 하는 최대-최소 형태의 목적을 가지므로 새들이 속도를 서로 맞추면서 날아가는 동조 현상은 생존에 있어서 그들의 목적을 달성하기 위한 최적 해법임을 역으로 이해할 수 있다[42].

IV. 자연계 모방 동조 방식의 특징

본 장에서는 기존의 중앙 집중형 및 분산형 동기화 방식과 자연계 모방 기반의 동기화 방식의 특징 및 장단점을 비교 분석한다.

중앙 집중형 방식의 동기화는 중앙의 글로벌 시계를 이용하는 것으로 Global Positioning System (GPS) [43]나 Network Time Protocol (NTP) [44]이 이에 해당한다. 모든 노드는 중앙에서 제공하는 단일 시간을 듣고 자신의 시간을 맞추으로써 동기를 달성한다. 높은 신뢰성으로 정확한 동기화가 가능하지만, 하드웨어 비용 및 에너지 소비 측면에서 높은 비용을 요구한다. 또한 동기 성능이 중앙 시스템과의 거리와 관련되어 네트워크 확장성에 제한이 있다.

기존의 Reference Broadcast Synchronization (RBS) [45]은 생체 모방에 의하지 않은 대표적인 분산형 동기화 방식이다. RBS는 중앙의 글로벌 시계에 얽매이지 않고 네트워크 노드 상호간에 동기를 만들어낸다. 따라서 중앙 시스템으로의 접속 지연 없이 정확하게 동기를 맞출 수 있다. 하지만 이를 위해서는 각 노드의 시간 정보가 다른 모든 노드와 공유되어야 하고, 이로 인해 노드간 많은 데이터 교환이 필요하다. 노드가 많아질수록 멀티홉 RBS가 요구되며 데이터 교환 오버헤드가 증가하여 성능 감소가 발생한다.

이러한 방식들과는 다르게, 생체 모방에 의한 동조방식은 대규모 네트워크에서 노드 수에 관계 없이 분산적이고 효율적으로 동기화를 달성할 수 있다. <표 1>는 기존 동기화 방식과 생체 모방 동기화 방식의 특징 및 장단점을 보여준다.

V. 자연계 모방 기술로의 패러다임 변화

우리가 동조 현상에 관심을 갖는 이유는 먼저 동조가 출현하는 자연 환경이 주어진 공학 문제의 환경과 유사하기 때문이다. 동조는 수 많은 개체 속에서 발생하며, 각 개체는 주변 상황만 고려하여 어떻게 행동할지를 스스로 결정하므로 완전한 분산화

표 1. 기존 동기화 방식과 자연계 모방 동기화 방식의 비교

항목	기존 중앙 집중형 및 분산형 동기화 방식	자연계 모방 동기화 방식
신뢰성	높은 신뢰성 및 정확도, 짧은 수렴 시간	신뢰성 보장 가능, 대규모 네트워크 상황에서도 정확한 동기화
확장성	노드 수 및 홉 수에 의해 제한됨	많은 노드 수 및 큰 변화에도 확장성 유지
강건성	클러스터 헤드의 고장 등 네트워크 토폴로지 변화에 취약함	열악한 통신환경이나 네트워크 토폴로지 변화에 강건함
비용	매우 높음 (상위 계층의 메시지 교환 필요)	낮음 (데이터 교환 양이 적음, 상위 계층 프로토콜 없이 물리 계층에서의 펄스 교환만으로도 동작 가능)
복잡도	HW/SW 복잡도 매우 높음	HW/SW 복잡도 낮음 (메모리에 다른 노드의 시간정보를 저장할 필요 없음)
성능영향요소	동기 정확성이 루트 노드와의 거리에 의존	노드 밀집도, 연결 강도, 지연, 잡음, 경로 손실, 변조 방식 등에 의해 영향을 받음
장점	신뢰성 높음, 적절한 노드 수에서 효과적, RBS방식의 경우 글로벌 시계에 의존하지 않음	확장성 및 강건성 높음, 비용 및 복잡도 낮음, 많은 노드 수에서 효과적
단점	중앙 집중형의 경우 토폴로지 상 상위 계층의 노드 성능이 열악함, 분산형의 경우 많은 데이터 교환 요구	송수신 지연이 큰 경우 동기화가 불가능, 약한 연결 강도 및 적은 노드 수에서는 동기 속도 느려짐

경에서 발생한다. 또한 장애물이나 적의 출현, 노드의 진출입과 같이 시간에 따라 변하는 동적 환경에서도 동조를 잘 이끌어낸다. 이러한 동조의 발생 환경은 대규모 네트워킹, 분산, 동적 환경에서 발생하는 다양한 공학 문제에 영감을 불러 일으킨다.

두 번째로 생명체가 동조를 하는 목적이 우리가 원하는 공학 문제의 목적과 같다고 해석될 수 있기 때문이다. 군집을 이루는 곤충, 새, 물고기, 짐승 떼들은 이동, 짝짓기, 적으로부터의 보호, 효율적인 먹이 찾기 등을 위해 동조를 한다고 알려져 있다 [3]. 이들은 서로 연대성을 가지며 공동의 목적을 갖고서 동조를 수행한다. 그 목적은 생존을 위한 것으로 이들 집단은 인류보다 훨씬 오랜 기간 동안 지구상에서 진화하면서 생존을 위한 최적의 전략으로 동조를 선택했다고 볼 수 있다. 마찬가지로 센서 네트워크, 멀티 비하클 시스템, 멀티홉 네트워크와 같은 시스템에서는 다수의 노드가 서로 연대하여 하나의 공동의 목적을 달성해야 한다. 이들의 목적은 유용한 정보의 빠른 취득, 다 같이 멀리 이동, 종단간 전송률의 최대화이며, 이러한 목적은 하나의 노드 수준에서 성능을 극대화하는데 있는 것이 아니라 전체적인 관점에서 성능을 극대화하는데 있다. 따라서 이러한 공학 시스템의 목적은 군집 생명체들이 추구하는 목적과 상응

한다고 볼 수 있으며, 군집이 그들의 목적 달성의 최적 해법으로 동조를 선택한 것과 같이 공학 시스템에서도 유사한 목적의 최적 해법으로 동조를 선택하여 시도해 보는 것이 타당하다.

마지막으로 자연이 만드는 동조 방법은 인간이 만든 어떠한 중앙 집중형 방식이나 분산 방식보다 효율적이기 때문이다. 수 천 개 이상의 만듦불이는 한정된 자원 상황에서 매우 빠르고 효과적으로 동조 현상을 만들어 낸다. 이들은 매우 단순한 방식을 사용하여 빠른 시간 내에 동조를 달성한다. 따라서 이들 방식을 모사한다면 고려하는 공학 시스템에서도 한정된 자원 상황에서 저복잡도 및 저비용으로 유사한 성능을 얻을 수 있다.

자연계 모방 기술이 기존 접근 방식대비 의미가 생기는 시발점은 시스템을 구성하는 노드 수가 어느 이상으로 많아질 때이다. 통신 네트워크 기술의 발전으로 네트워크로 연결된 노드 수는 매년 급격하게 증가하고 있다. 노드 수의 증가는 자원 부족을 가속화 시키고 중앙 관리에 많은 비용을 유발한다. 한정된 노드 수를 고려하여 개발되었던 기존 중앙 집중형 기술들은 대규모 노드 수에서는 더 이상 동작이 불가능하거나 원하는 성능을 보장할 수 없다. 따라서 자연스럽게 분산형 시스템으로의 전환이 요구된다. 하지만 중앙 집중형 패러다임 하에서 개발된 분산 시스템 기술은 노드 수 증가에 따른 한계를 여전히 갖고 있으며 완전한 분산을 이루지 못하여 환경 변화에 취약하다[45]. 이에 따라 새로운 분산 시스템으로의 패러다임의 전환이 필요하며 이에 대한 효과적인 방법론으로 자연의 군집 생명체가 갖는 분산 알고리즘에 주목할 필요가 있다.

Ⅵ. 향후 연구 이슈

본 장에서는 자연계 동조 현상을 공학적으로 활용하는데 고려해야 할 향후 연구 이슈에 대해서 살펴본다.

1. 수렴 성능 관련 이슈

동조 알고리즘은 동적으로 변하는 환경에서 반복 연산을 수행하므로 수렴 관련된 성능이 매우 중요하다. 주어진 노드 수, 초기값, 네트워크 토폴로지, 연결 강도 등에 따라 수렴 여부, 수렴 값, 수렴 속도를 이론적으로 구하거나 경향을 파악해야 한다. 수렴 속도를 빠르게 하기 위해서는 로컬(local)하게 연결되어 있는 정규 네트워크뿐만 아니라 랜덤 네트워크, 좁은 세상 네트워크, 대규모 네트워크와 같은 다양한 네트워크 환경에서 실험을 해보고 빠른 동조를 이끌어 낼 수 있는 네트워크 토폴로지를 설계해야 한다.

지금까지의 연구 결과로 모든 노드가 완전히 연결된 네트워크에서는 노드 수 및 초기값에 관계없이 항상 수렴이 보장되고 알려져 있다[9]. 따라서 수렴을 보장하기 위해서는 임의적으로 네트워크를 완전히 연결된 상황으로 만들어 주거나, 지역적으로 완전히 연결된 네트워크가 되도록 클러스터링을 수행하고 지역별로 수렴된 정보를 가지고 다시 상위에서 동조를 수행하는 계층적인 방법도 고려할 수 있다.

아울러 수렴 속도는 수렴 값의 정확도와 트레이드오프 관계에 있다. 현실적으로 수렴 값을 실수(real value)로 놓지 않고 이산적인 레벨(level)로 둔다면 그 레벨의 개수에 따라 수렴 속도를 조절할 수 있다. 예를 들어 전송률의 동조에 있어서 수렴되는 값은 실제로는 Modulation and Coding Scheme (MCS) 레벨로 매핑이 되므로 MCS 레벨 개수에 따라 수렴 속도를 조절할 수 있으며, 반대로 요구되는 수렴 속도에 따라 MCS 레벨의 개수를 결정할 수도 있다.

2. 환경 제약에 따른 이슈

실제 환경에서 발생하는 경로 손실, 잡음, 송수신 지연, 패킷 손실 등은 동조에 영향을 미친다. 경로 및 패킷 손실로 인한 연결 강도의 약화는 수렴 속도에 영향을 미치며, 지연 및 잡음은 동기화를 방해하는 주요 요인이다[10]. 따라서 현실 시스템에 동조 알고리즘을 적용할 때에는 실제 환경에서 발생하는 이러한 장애 요인들을 모두 고려하여 알고리즘을 설계해야 한다.

송수신 지연으로 인해 수신 노드는 즉각적인 반응을 하지 못하고 이로 인해 동조가 이뤄지지 않을 수 있다. 세부적으로 지연은 전송 지연, 디코딩 지연, 전파 지연으로 나뉘는데, 이들의 통계적인 수치를 고려하여 지연을 고려한 동조 알고리즘을 재설계해야 한다. 아울러 통신 노드는 송신을 하면서 동시에 수신을 할 수 없기 때문에 방전 중에는 다른 노드의 방전을 인식할 수 없다. 이와 같은 무선 통신 환경의 난청(deafness) 문제로 인해 방전 주기를 서로 엇갈리게 조절해야 한다.

지금까지의 연구는 모두 동일한 규칙을 따르는 동종의(homogeneous) 진동자만을 다루어왔다. 하지만 현실적으로는 네트워크의 이질성으로 인해 다른 동조 규칙을 따르는 이종의(heterogeneous) 진동자들이 같은 상황에 공존할 수 있으며 이들이 서로 협력하여 공동의 목적을 달성하고자 할 때 동조할 수 있는 알고리즘에 대한 연구가 필요하다.

Ⅱ장에서 살펴 보았던 동조 알고리즘의 실제 동작을 위해서는 주변 노드간 정보 교환이 주기적으로 필요하며 이로 인한 시그널링 오버헤드가 발생한다. 이러한 오버헤드 비용을 고려하여 언제 자연계 모방 기반의 동조 방식을 사용하는 것이 기존 방식

보다 좋은지를 파악해야 하며, 상황에 따라 두 방식을 적응적으로 사용하는 하이브리드 동조 알고리즘 또한 고려할 수 있다.

3. 성능 개선 관련 이슈

네트워크 토폴로지나 무선 환경의 변화에 따라 연결 강도, 가중치, 스텝 사이즈 등과 같은 동조 알고리즘의 운용 파라미터를 최적화함으로써 동조 성능을 향상시킬 수 있다. 다양한 실험을 통해 환경 변수에 따른 적절한 운용 파라미터의 매핑 관계를 찾아야 한다.

네트워크 보안 이슈로 동조를 방해하는 악의적인 노드로부터 시스템의 내성을 높이기 위한 방법이 필요하다. 예를 들어 주변 노드로부터 받은 정보의 평균 값의 최대 편차를 가진 정보를 무시하는 동조 알고리즘을 생각해 볼 수 있다. 불필요한 정보가 있는 경우에 이를 고려한 동조 알고리즘을 고안하고 원하는 수렴 성능을 얻을 수 있는지도 확인해야 한다.

한 노드에 두 개 이상의 진동자가 존재할 때 이를 활용할 수 있는 방안을 고려해봐야 한다. [28]에서는 두 개의 진동자를 활용하여 분산적으로 비례공평 스케줄링을 수행하였다. 여러 개의 진동자가 있을 때 복합적인 동조의 현상을 파악하고 이를 활용하는 새로운 응용을 제안할 수 있다.

리더(leader)를 정하고 리더의 값만 조정함으로써 전체 노드의 값을 원하는 값으로 수렴하게 만들 수 있다. 이러한 방식은 편대 비행시 리더 하나만을 제어하여 나머지 비행체들이 자동적으로 따라오게 만들 수 있다. 또한 리더의 전송률에 맞추어 전체 노드들의 전송률을 분산적으로 제어할 수 있다. 하지만 이와 같이 수렴 값을 리더만을 통해 제어하는 방식은 환경에 따라 수렴 여부를 보장할 수 없으므로 이에 대한 이론적인 연구가 선행되어야 한다.

VII. 결론

본 논문에서는 다양한 자연계 동조 현상의 원리를 파악하고 이들이 어떻게 공학적으로 적용될 수 있는지를 살펴보았다. 네트워크에서의 시간 동기화 방식에 있어서 기존 방식과 자연계 모방 방식의 장단점을 비교해보고, 자연계 모방 동조 기술의 현실화를 위해 필요한 연구 이슈를 제시하였다. 앞으로 네트워킹 가능한 노드 수의 급격한 증가는 자연계와 같은 복잡하며 분산적인 환경을 가속화 시킬 것이다. 따라서 이와 같이 복잡하고 무질서한 환경에서도 질서를 만들며 오랫동안 생명을 유지시켜 온 생체 집단의 기본 원리를 모방하는 것은 자연스러운 흐름이

될 것이다. 앞으로 이들을 공학 시스템에 효과적으로 적용하기 위해서는 현실적인 이슈들을 고려한 다양한 연구가 필요하다.

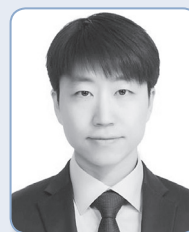
참 고 문 헌

- [1] A. Pikovsky, M. Rosenblum, and J. Kurths, "Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Sciences," Cambridge University Press, 2001.
- [2] 최현호, 이정륜, "생체모방 알고리즘 기반 통신 네트워크 기술," 한국통신학회지(정보와 통신), vol. 29, no. 4, pp. 62-71, Apr. 2012.
- [3] S. H. Strogatz, "Sync: How Order Emerges From Chaos In the Universe, Nature, and Daily Life," Hyperion, Apr 2004.
- [4] F. Dressler, O. B. Akan, "A Survey on Bio-inspired Networking," Computer Networks Journal (Elsevier), vol. 54, no. 6, pp. 881-900, April 2010.
- [5] Z. Zhang, K. Long, J. Wang, and F. Dressler, "On Swarm Intelligence Inspired Self-Organized Networking: Its Bionic Mechanisms, Designing Principles and Optimization Approaches," IEEE Communications Surveys & Tutorials, no. 99, pp. 1-25, July 2013.
- [6] C. Zheng and D. C. Sicker, "A Survey on Biologically Inspired Algorithms for Computer Networking," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 15, no. 3, pp. 1160-1191, Third Quarter 2013.
- [7] C. W. Reynolds, "Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model," ACM Computer Graphics, vol. 21, no. 4, pp. 25-34, 1987.
- [8] C. S. Peskin, "Mathematical Aspects of Heart Physiology," Courant Institute of Mathematical Sciences, New York University, Tech. Rep., 1975.
- [9] R. E. Mirollo and S. H. Strogatz, "Synchronization of Pulse-Coupled Biological Oscillators," SIAM J. Appl. Math., vol. 50, no. 6, pp. 1645-1662, 1990.
- [10] U. Ernst, K. Pawelzik, and T. Geisel, "Synchronization Induced by Temporal Delays in Pulse-Coupled Oscillators," Phys. Rev. Lett., vol. 74, no. 9, pp. 1570-1573, Feb. 1995.
- [11] Y. Kuramoto and H. Araki, ed., "Lecture Notes in

- Physics, International Symposium on Mathematical Problems in Theoretical Physics," Springer-Verlag, New York, 1975.
- [12] S. Strogatz, "From Kuramoto to Crawford: Exploring the Onset of Synchronization in Populations of Coupled Oscillators", *Physica D*, vol. 143, no. 1-4, pp. 1-20, Sep. 2000
- [13] J. A. Acebrón, L. L. Bonilla, C. J. Pérez-Vicente, F. Ritort, and R. Spigler, "The Kuramoto Model: A Simple Paradigm for Synchronization Phenomena," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 77, pp. 137-185, 2005.
- [14] R. Sepulchre, D. Paley, and N. Leonard, "Collective Motion and Oscillator Synchronization," in *Proc. Block Island Workshop Cooperative Control*, Block Island, RI, June 2003.
- [15] A. Papachristodoulou and A. Jadbabaie, "Synchronization in Oscillator Networks: Switching Topologies and Non-homogeneous Delays," in *IEEE Conf. Decision and Control and Eur. Control Conf. (CDC-ECC '05)*, pp. 5692-5697, Dec. 2005.
- [16] F. Cucker, and S. Smale, "Emergent Behavior in Flocks", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 52, no. 5, pp. 852-960, May 2007.
- [17] S.-Y. Ha and J.-G. Liu, "A Simple Proof of the Cucker-Smale Flocking Dynamics and Mean-Field Limit," *Commun. Math. Sci.* vol. 7, no. 2, pp. 297-325, 2009.
- [18] R. Olfati-Saber, J. Fax, and R. Murray, "Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems," *Proc. IEEE*, vol. 95, pp. 215-233, Jan. 2007.
- [19] A. Tyrrell, G. Auer, and C. Bettstetter, "Firefly Synchronization in Ad Hoc Networks," in *Proc. of the MiNEMA workshop*, 2006.
- [20] A. Tyrrell and G. Auer, "Imposing a Reference Timing onto Firefly Synchronization in Wireless Networks," *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 222-226, Apr. 2007.
- [21] Y.-W. Hong and A. Scaglione, "A Scalable Synchronization Protocol for Large Scale Sensor Networks and Its Applications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 5, pp. 1085-1099, May 2005.
- [22] G. A. Puerta, E. A. Aguirre, and M. A. Alzate, "Effect of Topology and Mobility in Bio-inspired Synchronization of Mobile Ad Hoc Networks," *IEEE Latin-American Conference on Communications (LAT-INCOM)*, pp.1-6, Sep. 2010.
- [23] H.-J. Yoo, M.-N. Lee, and Y.-S. Cho, "A Distributed Frequency Synchronization Technique for OFDMA-Based Mesh Networks Using Bio-Inspired Algorithm," *J. Korean Inst. Commun. Inform. Soc. (KICS)*, vol.37B, no. 11, pp 1022-1032, Nov. 2012.
- [24] G. Werner-Allen, G. Tewari, A. Patel, M. Welsh, and R. Nagpal, "Firefly-inspired Sensor Network Synchronicity with Realistic Radio Effects," *Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor System (SenSys'05)*, pp. 142-153, Nov. 2005.
- [25] J. Degeysys, I. Rose, A. Patel, and R. Nagpal, "DESYNC: Self-Organizing Desynchronization and TDMA on Wireless Sensor Networks," in *Proc. of Int. Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, pp. 11-20, Apr 2007.
- [26] A. Patel, J. Degeysys, and R. Nagpal, "Desynchronization: The Theory of Self-Organizing Algorithms for Round-Robin Scheduling," in *Proc. of Int. Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO)*, pp. 87-96, July 2007.
- [27] J. Degeysys and R. Nagpal, "Towards Desynchronization of Multi-hop Topologies," in *Proc. of Int. Conf. on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO)*, pp. 129-138, Oct. 2008.
- [28] R. Pagliari, Y. P. Hong, and A. Scaglione, "Bio-inspired Algorithms for Decentralized Round-Robin and Proportional Fair Scheduling," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 28, no. 4, pp. 564-575, May 2010.
- [29] R. Olfati-Saber and J. S. Shamma, "Consensus Filters for Sensor Networks and Distributed Sensor Fusion," in *IEEE Conf. Decision and Control and Eur. Control Conf. (CDC-ECC '05)*, pp. 6698-6703, Dec. 2005.
- [30] D. P. Spanos, R. Olfati-Saber, and R. M. Murray, "Approximate Distributed Kalman Filtering in Sensor

- Networks with Quantifiable Performance,” in Proc. 4th Int. Symp. Information Processing in Sensor Networks, pp. 133–139, Apr. 2005.
- [31] L. Xiao, S. Boyd, and S. Lall, “A Scheme for Asynchronous Distributed Sensor Fusion Based on Average Consensus,” in Proc. 4th Int. Symp. Information Processing in Sensor Networks, pp. 63–70, Apr. 2005.
- [32] D. Spanos, R. Olfati-Saber, and R. M. Murray, “Dynamic Consensus on Mobile Networks,” presented at the 16th IFAC World Congr., Prague, Czech, 2005.
- [33] L. Xiao and S. Boyd, “Fast Linear Iterations for Distributed Averaging,” Systems & Control Letters, vol. 52, pp. 65–78, 2004.
- [34] D. J. Watts and S. H. Strogatz, “Collective Dynamics of ‘Small-World’ Networks,” Nature, vol. 393, pp. 440–442, Jun. 1998.
- [35] R. Olfati-Saber, “Ultrafast Consensus in Small-World Networks,” in Proc. Am. Control Conf., pp. 2371–2378, Jun. 2005.
- [36] J. A. Fax and R. M. Murray, “Information Flow and Cooperative Control of Vehicle Formations,” IEEE Trans. Autom. Control, vol. 49, no. 9, pp. 1465–1476, Sep. 2004.
- [37] J. Lin, A. S. Morse, and B. D. O. Anderson, “The Multi-Agent Rendezvous Problem,” in Proc. 42nd IEEE Conf. Decision and Control, pp. 1508–1513, Dec. 2003.
- [38] J. Cortes, S. Martinez, and F. Bullo, “Robust Rendezvous for Mobile Autonomous Agents via Proximity Graphs in Arbitrary Dimensions,” IEEE Trans. Autom. Control, vol. 51, no. 8, pp. 1289–1298, Aug. 2004.
- [39] R. Olfati-Saber, “Flocking for Multi-Agent Dynamic Systems: Algorithms and Theory,” IEEE Trans. Autom. Control, vol. 51, no. 3, pp. 401–420, Mar. 2006.
- [40] X.-S. Yang, Z. Cui, R. Xiao, A. H. Gandomi, and M. Karamanoglu, “Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation, Theory and Applications,” 1st Edition, Elsevier, May 2013.
- [41] H.-H. Choi and J.-R. Lee, “Distributed Transmit Power Control for Maximizing End-to-End Throughput in Wireless Multi-hop Networks,” Springer Wireless Personal Communications, Aug. 2013.
- [42] H.-H. Choi and J.-R. Lee, “A Bio-Inspired Transmit Power Control Algorithm for Linear Multi-Hop Wireless Networks,” IARIA International Conference on Networks (ICN) 2014, Feb. 2014.
- [43] J. Mannermaa, K. Kalliomaki, T. Mansten, and S. Turunen, “Timing Performance of Various GPS Receivers,” in Proc. Joint Meeting Eur. Freq. Time Forum and IEEE Int. Freq. Control Symp., pp. 287–290, Apr. 1999.
- [44] D. L. Mills, “Internet Time Synchronization: The Network Time Protocol,” IEEE Trans. Commun., vol. 39, no. 10, pp. 1482–1493, Oct. 1991.
- [45] J. Elson, L. Girod, and D. Estrin, “Fine-grained Network Time Synchronization Using Reference Broadcasts,” SIGOPS Oper. Syst. Rev., vol. 36, pp. 147–163, Dec 2002.

약 력



최 현 호

2001년 KAIST 전기및전자공학과 공학사
 2003년 KAIST 전기및전자공학과 공학석사
 2007년 KAIST 전기및전자공학과 공학박사
 2007년~2011년 삼성종합기술원 전문연구원
 2011년~현재 국립환경대학교 전기전자제어공학과
 조교수
 관심분야: 매체접속제어, 분산자원관리,
 저전력 프로토콜, 생체모방 알고리즘,
 차세대 무선통신시스템