

# 무선 네트워크에서 자연계 동기화 현상을 모방한 자율적 부하 균형 기법

박재성\*

## Autonomous Load Balancing Method in a Wireless Network Inspired by Synchronization Phenomena in the Nature

Jaesung Park\*

요약

본 논문에서는 자연계에 존재하는 동기화 현상에 착안하여 무선 네트워크를 위한 자율적 부하균형 기법을 제안한다. 이를 위해 본 논문에서는 무선 접속 서비스를 제공하는 셀 사이의 부하균형 문제를 자연계 동기화 현상을 이용하여 모델링 한 후 각 셀들이 이웃 셀과의 부하 차이에 따라 자율적으로 부하를 분배하기 위한 알고리즘을 설계한다. 모의실험을 통해 제안 기법을 이용하여 각 셀들이 자신의 지역적 정보만을 이용하여 자율적으로 부하 분배 여부를 결정하더라도 셀 간 부하균형을 이룰 수 있다는 것을 검증하였다.

**Key Words** : Synchronization model, nature-inspired approach, distributed control, cell load balancing.

### ABSTRACT

Inspired by the synchronization phenomena observed in the Nature, we propose an autonomous load balancing method for a wireless network. We model the load balancing problem of cells providing wireless access services as a synchronization problem in the Nature and design an algorithm for each cell to distribute loads in a self-determining way based on the load differences among its neighbor cells. Through simulations, we verify the feasibility of the proposed method in that cell loads can be balanced efficiently even if cells make decision autonomously using their local information.

### 1. 서론

무선 접속 네트워크는 가변적인 무선 통신 환경에서도 무선 자원을 효율적으로 이용하여 사용자에게 최대의 무선 데이터 속도를 제공할 수 있어야 한다. 이를 위해 다중 안테나, 다중 접속 방식, 송신전력 제어, 스케줄링, 링크 적응 등 다양한 무선 자원 관리 기법들이 개발되어 왔다. 이들은 무선 접속 서비스를 제

공하는 셀과 무선 접속 단말 사이에 적용되어 시스템 효율을 증대시켜 왔다. 반면에 네트워크 전체의 관점에서 살펴보면 각 셀에게 부과되는 부하의 불균형으로 인해 네트워크 전체 자원의 이용 효율이 감소될 수 있다<sup>[1]</sup>. 즉, 일부 셀의 부하가 높고 다른 셀의 부하가 낮은 경우 저부하 셀에 비해 과부하인 셀이 단말에게 제공하는 데이터 속도는 상대적으로 낮아진다. 이 경우 과부하 셀의 부하를 저부하 셀로 분배하게 되면 네

※ 본 연구는 2015년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(NRF-2011-0007076)의 지원과 경기도의 경기도지원협력 연구센터(GRRC) 사업[(GRRC 수원2015-B2)]의 일환으로 수행되었습니다.

• First Author : The Univ. of Suwon Department of Information Security, jaesungpark@suwon.ac.kr, 중신회원

논문번호 : KICS2015-09-281, Received September 1, 2015; Revised October 30, 2015; Accepted October 30, 2015

트위크 자원의 전체 이용 효율성을 증대시킬 수 있다<sup>12,31</sup>. 이와 같은 이득을 얻기 위해서는 셀 사이에 부하를 균형있게 분담하기 위한 기법이 요구된다.

다른 한편으로는 무선접속 네트워크의 복잡성이 증가함에 따라 네트워크 설계, 포설 및 운영을 자율화하여 네트워크 운영 효율을 극대화하기 위한 노력이 표준화 기구를 통해 활발히 진행되고 있다<sup>34</sup>. 네트워크 자원의 효율적인 이용 방안은 시스템 자원의 이용 효율 혹은 사용자의 서비스 품질을 최대화하기 위한 최적화 문제로 정의된다. 그러나 단말과 셀의 밀도 및 셀 계층의 수가 증가하여 제어에 필요한 정보의 양이 많아지고 MTC (Machine Type Communication)와 같은 새로운 유형의 통신 타입에 의해 네트워크에 요구되는 서비스 품질의 종류가 다양화되며 통신 사업자가 관리하지 않는 개인 스몰 셀들로 인해 네트워크 토폴로지가 비정형화됨에 따라 중앙 집중형 관리 구조는 필요한 시간에 맞춰 최적의 솔루션을 제공하기 어렵게 된다. 이에 따라 분산적 제어 및 관리를 통해 네트워크의 확장성을 보장하며 네트워크 효율의 최대화 및 강건성을 보장하기 위한 자가 구성, 자가 최적화, 자가 힐링과 같은 지능형 자율 제어 기술에 대한 관심이 급증하고 있고 셀 간 자율적 부하 균형 기법은 이와 같은 네트워크 자율 제어에 중요한 부분을 차지하고 있다.

본 논문에서는 자연계에 존재하는 동기화 현상에 착안하여 셀 사이의 자율적 부하균형(load balancing) 기법을 제안한다. 자연계모방 기술은 다양한 생명체의 행동 양식이나 생체 조직의 제어 방식을 관찰하고 모델링하여 공학적 문제 해결에 적용한 것이다<sup>51</sup>. 자연계의 생명체는 생명 유지와 종족 보존을 위한 최적의 형태로 환경변화에 끊임없이 적응해 왔다. 자연계에서 관찰되는 많은 현상은 생명체를 구성하는 세포 혹은 생물 집단을 구성하는 개체들이 간단한 동작 원칙에 따라 정보가 제한적으로 제공되며 동적으로 변화하는 환경에서 자율적이고 독립적으로 반응하더라도 생명체 혹은 개체들의 집단 측면에서는 최적의 특징을 나타내는 특성을 보인다. 이처럼 오랜 시간 진화된 자연계 현상을 모델링한 자연계모방 모델들은 태생적으로 자율성, 분산성, 강인성 확장성을 가지고 있으며 복잡도가 큰 문제에 대한 해를 빠르게 찾을 수 있다는 장점을 가진다.

본 논문에서는 셀 간 부하 균형 문제와 자연계 동기화 현상의 유사성을 기반으로 셀 간 부하를 균등하게 분배하기 위한 분산적 적응 최적화 알고리즘을 설계한다. 자연계 동기화 현상은 상호작용하는 집단을

구성하는 개체들 사이에 발생된다. 본 논문에서는 부하균형을 맞추기 위해 자신의 부하상태를 교환하는 셀들의 집단을 정의하고 이들이 부하를 균일하게 맞추기 위한 과정을 동기화 과정으로 모델링한다. 이를 위해 자연계 동기화 현상에 대한 수학적 모델들 중에서 각 진동자 (phase oscillator)의 위상각 동기화 모델인 쿠라모토 모델<sup>61</sup>을 적용한다. 이를 통해 제안 기법은 각 셀이 1-홉 이웃 셀의 정보만을 이용하여 과부하 셀이 분배해야 할 부하의 양과 저부하 셀이 수용해야 하는 부하의 양을 자율적으로 결정한다. 제안한 부하 균형 기법의 타당성을 검증하기 위한 모의실험 결과 셀들은 지역적 정보만을 이용한 자율적 부하 분배 결정을 통해서도 이웃 셀과 부하 균형을 맞출 수 있다는 것을 보였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 무선 네트워크에서 제안된 부하 분배 기법들을 분석하고 3장에서는 자연계 모방 기술을 이용한 셀 부하 균형 방안을 기술한다. 이를 위해 우선 자연계 동기화 모델을 소개하고 셀 간 부하를 균형 있게 유지하는 문제와 자연계 동기화 문제의 유사성을 분석한 후 이를 이용한 셀 부하균형 기법을 제시한다. 4장에서는 모의실험을 통해 제안기법의 타당성을 보이고 5장에서 결론 및 추후 연구방향을 제시한다.

## II. 관련연구

3GPP에서는 자율적 이동통신 네트워크의 구성, 운영 및 관리를 위한 기능들을 Rel.8부터 표준에 포함시키고 있으며 이중에 자율적 최적화 기술로 MLB (Mobility Load Balancing)을 정의하고 있다<sup>17,81</sup>. MLB는 단말의 트래픽 요구사항에 따라 셀들의 커버리지 영역을 동적으로 변경하여 셀 간 부하를 균등하게 맞추기 위한 방법이다. 즉, MLB는 과부하인 셀의 커버리지를 줄이고 저부하인 셀의 커버리지 영역을 넓힘으로써 과부하인 셀에 접속한 단말을 저부하인 셀로 핸드오버 하도록 유도하고 이를 통해 셀 간 부하 균형을 맞춘다. 그러나 3GPP는 네트워크 자율 관리 기법에 대한 사용 시나리오와 이를 구현하기 위한 인터페이스 및 정보 요소만을 표준화하고 알고리즘 부분은 구현이슈로 두고 있다.

LTE/LTE-A 네트워크를 대상으로 MLB 기능을 구현하기 위한 다양한 방안들이 제안되었다<sup>9-121</sup>. 이들 기법들은 대부분 네트워크 성능 지표를 최적화하기 위해 최적의 셀과 단말 사이의 어소시에이션 (association) 집합을 결정하는 방안을 제시하고 있다.

일반적으로 이와 같은 최적화 문제는 NP-hard 하므로 이들은 최적화하려는 네트워크 성능 지표에 따라 최적화 문제 해결을 위한 휴리스틱한 알고리즘을 제안하고 있다. [9]에서는 단말의 핸드오버를 최적화하기 위한 적응적 핸드오버 마진 결정 방법을 제안하였으며 이들 통해 네트워크 파라미터를 자동으로 튜닝함으로써 네트워크 성능을 향상할 수 있다는 것을 보였다. 그러나 이들 기법은 언제 어떤 셀의 핸드오버 마진을 얼마만큼 조절해야 최적의 결과를 얻을 수 있는지 알기 어렵다. [10]에서는 부하 균등 분배 동작 이후 이득과 손실을 나타내기 위한 효용성 함수를 정의한 후 이를 최대화하기 위한 게임이론적 방안을 제시했다. 그러나 [10]에서 제안한 알고리즘은 많은 파라미터들을 이용하므로 구현 비용이 크고 효용성 함수의 물리적인 의미가 모호하며 셀 자원이 고정적으로 할당되는 음성호에 대한 결과만을 제시하고 있다. 서비스 품질 요구 사항이 상이한 트래픽이 혼재할 때 시스템의 전체 효용성 최대화를 위한 적응적 셀 부하균형 알고리즘이 [11]에서 제안되었다. 사용자의 서비스 품질 요구 사항으로 CBR (Constant Bit Rate) 트래픽 클래스와 BE (Best Effort) 트래픽 클래스를 고려하였다. 트래픽 특성을 고려하여 CBR 트래픽 클래스의 경우 CBR 트래픽에 의한 셀 부하 측면에서 셀 간 Jain의 공정성 인덱스를 최대화하는 것을 목적으로 설정하였고 BE 트래픽 클래스의 경우 시스템이 제공하는 전체 처리율 (throughput)에 대한 유용성 함수를 최대화 하는 것을 목적으로 설정하였다. 이와 같은 다수의 목적 함수를 가지는 최적화 문제를 해결하기 위해 트래픽 우선 순위에 따른 순차적 최적화 방법을 제안하였다. 그러나 이들의 목적은 시스템 전체의 유용성 최대화를 위한 셀과 단말과의 최적의 어소시에이션 조합을 찾기 위한 것으로 BE 사용자들에게 최소의 데이터 전송율을 제공하지 못 할 수 있으며 알고리즘의 수렴성에 대한 고찰이 필요하다. [12]에서는 Q-learning을 기반으로한 분산 MLB 기법을 제안하였다. 이들은 최적의 핸드오버 마진을 핸드오버로 인한 부정적인 영향을 최소화하면서 셀의 과부하를 해소하기 위한 양으로 정의하고 셀의 부하 변화에 따른 학습을 통해 적응적으로 최적의 핸드오버 마진을 결정한다. 그러나 이들은 셀 부하균형 문제를 QL 문제로 모델링하기 위해 셀 부하를 몇 개의 밴드로 구분하여 각 셀 부하 상태별로 동작을 달리 할 수 있게 하였다. 그러나 셀 부하는 연속적인 값을 가지므로 이와 같은 불연속화는 밴드의 수에 따라 성능이 달라질 수 있다.

자율적 셀 부하 균형 기법에 의한 부작용을 최소화

하기 위해서는 셀 부하 균형 기법은 실제 필요가 있을 경우에만 활성화되어야 한다. 이를 위해서는 셀의 과부하 상태를 정확하게 검출하는 방안이 필요하다. 그러나 무선 네트워크에서 셀은 매순간 가용한 모든 자원을 셀을 이용하는 단말들에게 할당한다. 즉, 소수의 단말이 셀을 이용하더라도 셀은 이들에게 모든 자원을 할당하기 때문에 사용 자원량을 기반으로 한 셀 과부하 판별법은 정확하지 않다. MLB를 위한 셀 과부하 판별 방안이 [13,14]에서 제안되었다. 그러나 이들은 셀 부하를 과대평가하기 때문에 불필요한 MLB가 발생되게 된다.

### III. 제안 기법

#### 3.1 동기화 모델

신경망이나 반딧불이들의 집단과 같은 다수의 동기화 시스템들은 펄스 결합 진동자 (PCO: Pulse Coupled Oscillator)들의 네트워크로 모델링 할 수 있다<sup>[15]</sup>. 각각의 진동자는 다른 진동자들의 펄스를 관찰하고 이들과 동기화되기 위해 자신의 진동 행태를 적응시키며 이와 같은 현상을 응용한 분산 시간 동기화 기법들이 제안되었다<sup>[16,17]</sup>. PCO 모델의 대표 모델 중 하나는 쿠라모토 모델이다<sup>[3]</sup>. 쿠라모토 모델은 진동하는 노드들의 고유 진동 주파수가 다르더라도 이들 노드들의 집단이 동기화되는 집단적 동기화 현상을 기술하기 위해 제안되었으며 네트워크에서 지역적 동기화 방안 및 군집 검출 기법 등에 적용되어 왔다<sup>[18,19]</sup>. 이와 같은 쿠라모토 모델은 다음과 같이 기술된다. 각 진동자  $i$ 의 고유 주파수를  $w_i$ , 위상각을  $\theta_i$ , 진동자  $i$ 와  $j$  사이의 연관 계수를  $K_{ij}$ ,  $i$ 의 이웃 진동자의 집합을  $N_i$ 라고 하면  $\theta_i$ 의 변화는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{d\theta_i}{dt} = w_i + \frac{1}{|N_i|} \sum_{j \in N_i} K_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i) \quad (1)$$

쿠라모토 모델에서 각 진동자는 이웃 진동자들과 정보 교환을 통해 자신의 주파수를 독립적으로 결정하지만 결과적으로 모든 노드들의 주파수는 동기화된다.

무선 네트워크에서 셀 간 부하를 균형있게 만드는 문제는 셀 간 부하를 분산적인 방법에 의해 동일하게 설정 (i.e. 동기화)하는 것이다. 즉, 각 셀의 부하를 진동자의 위상각으로 표기하면 자연계 동기화 현상은 셀 간 부하를 균형있게 설정하기 위한 문제와 유사성

이 크다. 본 논문에서는 이와 같은 유사성에 착안하여 쿠라모토 모델을 이용한 셀 간 부하 균형 기법을 제시한다.

3.2 자연계 동기화 현상 모방 셀 부하 균형 방안

본 장에서는 자연계 동기화 현상 모델을 이용한 셀 간 부하 균형 방안을 기술한다. 알고리즘 기술에 사용된 주요 기호들은 표 1에 표기하였다.

셀 부하균형을 위해서는 과부하인 셀은 분배해야 할 부하의 양과 이를 수용할 이웃 셀을 결정해야 하며, 이웃 셀에 비해 부하가 상대적으로 낮은 셀은 수용 가능한 부하의 양을 결정해야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 각 진동자의 위상이 동기화되는 현상을 이웃 셀들 사이의 부하균형을 맞추는 과정으로 모델링한다. 모든 셀들의 타입이 동일하다고 가정하여  $w_i = 0$ ,  $K_{ij}$ 를  $K$ 로 동일하게 적용한다.  $N_i$ 를  $i$ 의 이웃 셀의 집합으로 표기하고 위상각을  $i$ 의 부하  $\rho_i$ 로 모델링하면 이웃 셀과의 부하균형을 위한 셀  $i$ 의 부하 변동 가능량  $\Delta_i$ 는 식 (1)에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta_i = \alpha \frac{K}{|N_i|} \sum_{j \in N_i} \sin(\rho_j - \rho_i) \quad (2)$$

$\alpha \in (0, 1]$ 는 양수로서 제어 가능한 부하량의 크기를 조정하기 위해 사용된다.  $0 \leq \rho_i \leq 1$  이므로  $|\rho_j - \rho_i| \leq 1$ 가 되고  $\sin(\rho_j - \rho_i)$ 는  $\rho_j - \rho_i$ 에 대한 증가함수가 된다. 따라서  $\Delta_i > 0$ 이면 이웃 셀과

의 부하균형 (i.e., 동기화)을 위해  $i$ 의 부하는  $\Delta_i$  만큼 증가해야 한다. 따라서,  $\Delta_i > 0$ 인 경우  $i$ 는 이웃 셀들보다 상대적으로 부하가 낮으며 이웃 셀들로부터  $\Delta_i$ 만큼의 부하를 수용할 수 있다는 것을 의미한다. 반대로  $\Delta_i < 0$ 이면 부하 균형을 위해  $i$ 는  $\Delta_i$ 만큼  $\rho_i$ 를 감소해야 한다. 따라서 이 경우는  $i$ 가 이웃 셀들보다 부하가 크며 이웃 셀과의 부하균형을 맞추기 위해서는  $\Delta_i$ 만큼의 부하를 감소해야 한다는 것을 의미한다.

이웃 셀의 부하 변동 가능양만을 이용한 자율적 부하 분배 기법을 그림 1에 도시하였다. 셀  $i$ 는 일정 시간 동안 사용된 평균 자원양  $u_i$ 을 측정한다. 시간을 자원 이용량 측정 주기  $T$ 로 불연속화하고 셀  $i$ 의 최대 자원양을  $R_i^{max}$ 로 표기하면, 시간  $t$ 에서  $i$ 의 부하  $\rho_i(t)$ 는  $u_i/R_i^{max}$ 가 된다. 셀  $i$ 는 자신의  $\Delta_i$ 를 계산하여 이웃 셀에게 전송한다 (line 0). 만일 자신의 부하가 임계값 이상이고 (i.e.  $\rho_i(t) > \rho_{th}$ )  $\Delta_i < 0$ 인 셀  $i$ 는 부하 균등 분배를 위해 이웃 셀들에게 자신

표 1. 사용한 주요 기호들의 의미  
Table 1. Notations used.

Symbol	Meaning
$\Delta_i$	The amount of load changeable. If $\Delta_i > 0$ , cell $i$ is relatively underloaded compared to its neighbors. Thus, it can absorb $\Delta_i$ amount of load. Otherwise, cell $i$ wants to release $\Delta_i$ amount of load.
$\rho_i$	load of a cell $i$ .
$\rho_{th}$	load threshold value.
$N_i$	set of neighboring cells of a cell $i$ .
$\hat{N}_i$	sorted set of $N_i$ . The member of the set is sorted in an descending order according to $\Delta_j$ ( $j \in N_i$ ).

0: at each period  $T$ , each cell  $i$  ( $i \in N$ , where  $N$  is the set of cells in the system) calculates  $\Delta_i$  and sends it to its neighbors, where

$$\Delta_i = \alpha \frac{K}{|N_i|} \sum_{j \in N_i} \sin(\rho_j - \rho_i)$$

1: if ( $\rho_i > \rho_{th}$  &&  $\Delta_i < 0$ )

2: sort  $N_i$  in an descending order according to  $\Delta_j$  ( $j \in N_i$ ) into  $\hat{N}_i$

3:  $j = 0$ ;

4:  $\Delta_{ho} = -\Delta_{\rho_i}$ ;

5: while ( $(\Delta_{j \in \hat{N}_i} > 0)$  ( $\Delta_{ho} > 0$ ))

$$l_{ho} = \min(\Delta_j, \Delta_{ho});$$

$$\rho_j += l_{ho}; \rho_i -= l_{ho};$$

$$\Delta_{ho} -= l_{ho};$$

$$j ++;$$

6: end while

7 end if

그림 1. 자율적 부하균형 기법.  
Fig. 1. Autonomous load balancing method.

의 부하 분배를 시작한다 (line 1).  $\rho_i$ 가 임계값 이상이면  $i$ 는 이웃 셀들을 부하 변동 가능양  $\Delta_j (j \in N)$ 에 따라 내림차순으로 정렬한 후  $\Delta_j$ 의 크기에 따라  $\Delta_i$ 를 분배한다 (line 2-4). 부하 분배는  $i$ 의 과부하를 수용할 수 있는 이웃 셀에게만 이루어져야 하므로  $\Delta_i$ 의 분배 과정은  $\Delta_i$ 가 모두 분배되거나  $\sum_{j \in \hat{N}_i \wedge \Delta_j > 0} \Delta_j$  만큼  $\Delta_i$ 를 이웃 셀에게 분배할 때까지 반복된다 (line 5).

#### IV. 성능 평가

본 절에서는 모의실험을 통해 제안 기법의 성능을 평가한다. 각 셀이 서비스하는 셀의 모양을 정육각형으로 설정하였고 각 셀의 이웃 셀의 수가 6개가 되도록 36개의 셀을 포설하여 벌집 모양의 토폴로지를 구성하였다. 각 셀의 번호는 중앙 셀  $n_0$ 로부터 시작하여 시계 방향으로 설정하였다. 과부하를 판단하기 위한 임계값  $\rho_{th}$ 는 0.7로 설정하였으며 모든 셀의 최대 자원양  $R_i^{max}$ 를 1로 동일하게 설정하였다.

특정 무선접속 시스템의 영향을 고려하지 않고 제안 기법의 타당성을 검증하기 위해 셀  $n_0, n_7, n_9, n_{11}, n_{13}, n_{15}, n_{17}$ 을 과부하 셀로 지정하여 이들의 초기 부하는  $[\rho_{th}, 1]$ 에서 균일 (uniform) 분포에 따라 설정하였으며 이 외의 셀들의 부하는  $[0, \rho_{th}]$ 에서 균일분포에 따라 설정하였다. 실험 시작 이후 제안 기법에 의한 자율적 부하 분배에 의해 초기 과부하 셀의 부하가  $\rho_{th}$ 이하가 되면 다시  $[\rho_{th}, 1]$ 에서 균일 분포에 따라 임의로 부하를 설정하여 과부하 상태로 변경시키면서 셀들의 부하 변화량을 고찰하였다.

그림 2는  $K=1, \alpha=0.1, T=1s$ 인 경우 토폴로지의 중앙에 위치한  $n_0 \sim n_6$ 의 부하 변동을 나타낸다. 초기 과부하인  $n_0$ 의  $\rho_0=0.95$ 는 제안 기법에 의해 이웃 셀에게 분배된다. 그림에서 보는 바와 같이 초기에  $n_6$ 와  $n_5$ 의 부하가 다른 셀에 비해 상대적으로 낮기 때문에  $n_0$ 의 부하는 이들 셀에게 분배되며  $t=5$ 에서  $\rho_0 < \rho_{th}$ 로 안정화 된다.  $t=6$ 에서  $\rho_0$ 가 0.78로 상승하면  $\Delta_0$ 는 이웃 셀들에게  $\Delta_j \in \{n_1, \dots, n_6\}$ 에 따라 순차적으로 분배된다.  $n_1$ 의 경우  $n_0$ 의 다른 이웃 셀에 비해 부하가 높기 때문에  $\Delta_1$ 가 이들보다 상

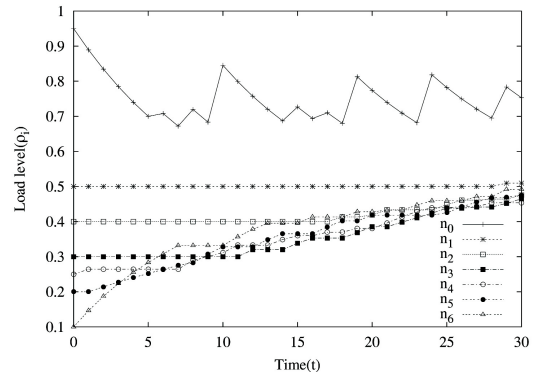


그림 2. 셀의 부하수준 변화도  
Fig. 2. Dynamics of load level of cells

대적으로 작다. 따라서  $n_0$ 의 과부하는  $n_1$ 에게는 전달되지 않으므로  $\rho_1$ 는 일정하게 유지된다.

그림 3은  $\alpha$ 가 시간에 따른  $n_0$ 의 부하 변동에 미치는 영향을 보여준다.  $\alpha$ 가 증가하면  $\Delta_i$ 가 증가한다. 즉, 각 셀의 부하 변동 가능양은  $\alpha$ 에 따라 증가한다.  $n_0$ 는 초기 과부하 셀이므로  $n_0$ 가 한번에 감소시키고 싶은 부하양  $\Delta_0$ 는  $\alpha$ 에 따라 증가하며 이웃의 저부하 셀들이  $\Delta_0$ 를 수용할 수 있다면 한번에 많은 양의 부하를 이동시키게 된다. 따라서  $\alpha$ 가 증가할수록 과부하인 셀의 부하를 빠르게 감소시킬 수 있다.  $\alpha$ 에 따른 과부하 해소 시간을 비교하기 위해 그림 4에 셀 간 부하 균형 인덱스를 도시하였다. 시스템을 구성하는 셀의 집합을  $N$ , 셀  $i$ 의 이웃 노드들의 평균 부하를  $\bar{\rho}_i$ 로 표기하면 셀 간 부하 균형 인덱스는  $\sum_{i \in N} (\rho_i - \bar{\rho}_i)^2$ 으로 정의된다. 그림에서 보는 바와

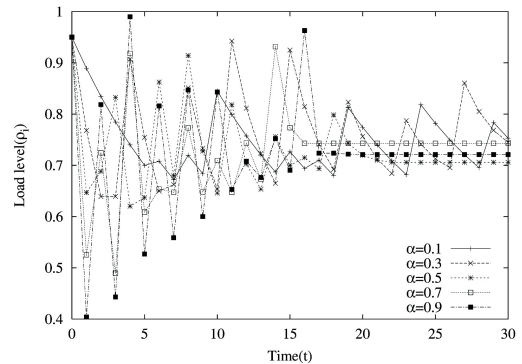


그림 3.  $\alpha$ 에 따른 혼잡한 셀의 부하수준 변화도  
Fig. 3. Dynamics of load level of an overloaded cell according to  $\alpha$

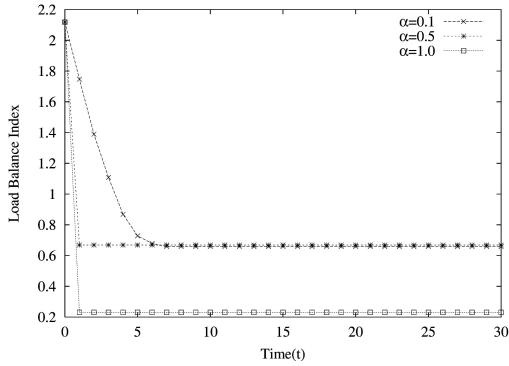


그림 4.  $\alpha$ 에 따른 혼잡한 셀의 부하수준 변화도  
Fig. 4. Dynamics of load level of an overloaded cell according to  $\alpha$

같이  $\alpha$ 가 증가할수록 셀 간 부하 균형 인덱스가 빠르게 감소한다.

기존 연구에서 과부하 셀  $i$ 가 한번에 과도하게 많은 부하를 이웃 셀에게 이동시키면 셀들 사이의 부하가 진동할 확률이 커졌다. 즉, 시간  $t$ 에서 과부하인 셀  $i$ 로부터  $\Delta_i$  만큼의 부하를 넘겨 받은  $i$ 의 이웃 셀  $j$ 는 과부하가 될 확률이 커지며 시간  $t+1$ 에서 자신의 이웃 셀에게  $\Delta_j$ 만큼 부하를 분배하려 하고 이와 같은 현상이 반복되는 경우 셀들의 상태는 과부하 상태와 저부하 상태를 진동하게 될 확률이 커진다. 그러나 제안 기법은 이웃 셀들이 수용 가능한 부하량을 고려하여 과부하인 셀의 부하를 다수의 이웃 셀들에게 분배하므로 이와 같은 부하 진동 현상이 발생하지 않는다. 이와 같은 특성을 보이기 위해 그림 5에서 그림 8에  $K=1, T=1s$ 인 경우  $\alpha$ 에 따른 토폴로지의 중앙에 위치한  $n_0 \sim n_6$ 의 부하 변동을 도시하였다.

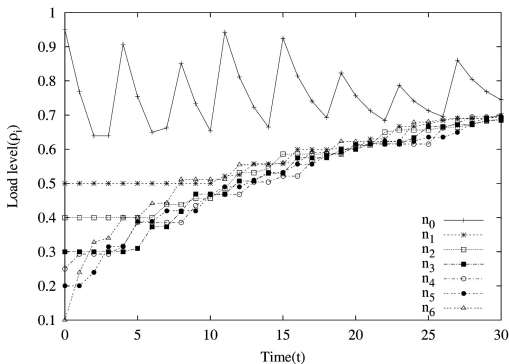


그림 5. 셀의 부하수준 변화도 ( $\alpha=0.3$ )  
Fig. 5. Dynamics of load level of cells ( $\alpha=0.3$ )

모의실험에서 과부하 셀의 부하가 이웃 셀에게 분배되어 저부하 상태가 되면 다시 과부하 시켰다. 따라서 시간이 지나감에 따라 시스템에 부과되는 전체 부하는 증가한다. 그림에서 보는 바와 같이  $\alpha$ 가 증가할수록 과부하인  $n_0$ 의 부하는 이웃들에게 빠르게 흡수

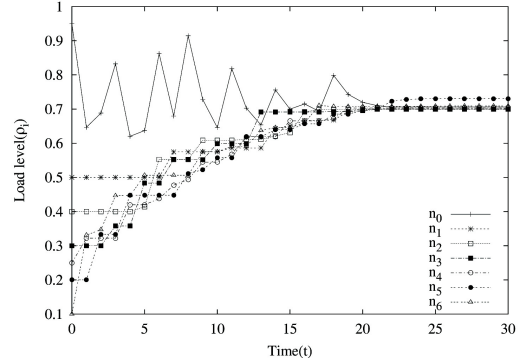


그림 6. 셀의 부하수준 변화도 ( $\alpha=0.5$ )  
Fig. 6. Dynamics of load level of cells ( $\alpha=0.5$ )

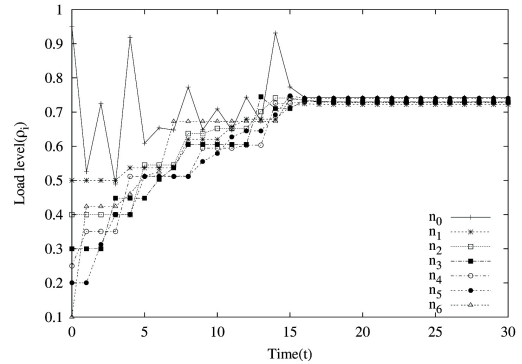


그림 7. 셀의 부하수준 변화도 ( $\alpha=0.7$ )  
Fig. 7. Dynamics of load level of cells ( $\alpha=0.7$ )

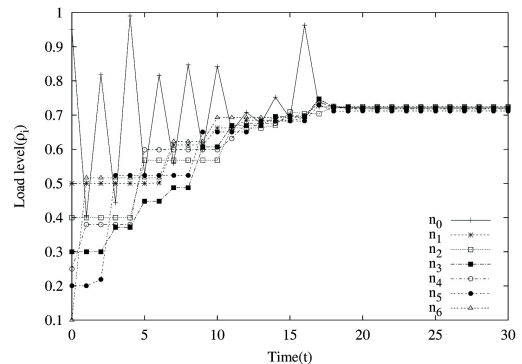


그림 8. 셀의 부하수준 변화도 ( $\alpha=0.9$ )  
Fig. 8. Dynamics of load level of cells ( $\alpha=0.9$ )

된다. 따라서  $n_0$ 가 다시 과부하 상태로 초기화 되는 시간 간격은  $\alpha$ 가 증가할수록 작아지며 이 시간 동안 저부하 상태인  $n_0$ 의 이웃 셀들은  $n_0$ 의 부하를 흡수하여 부하가 증가한다. 따라서  $n_0$ 가 다시 과부하 상태로 초기화되어 시스템에 부과되는 부하양이 증가할수록  $n_0$ 와 이웃 셀들 사이의 부하 차이는 작아지고  $\alpha$ 에 따라  $\Delta_0$ 가 커지더라도  $n_0$ 의 이웃 노드들이 수용할 수 있는 부하양은  $(\sum_{\{j \in \hat{N}_i \wedge \Delta_j > 0\}} \Delta_j)$  작아지기 때문에  $n_0$ 는 최대  $\sum_{\{j \in \hat{N}_i \wedge \Delta_j > 0\}} \Delta_j \ll \Delta_0$ 만큼의 부하만 분배할 수 있게 된다. 그림 5에서 그림 8에서 볼 수 있는 것처럼 시스템의 부하가 증가할수록 모든 셀의 부하는  $\rho_{th}$ 로 수렴하며 셀 간 부하가 진동하지 않는 것을 볼 수 있다.

### V. 결론

본 논문에서는 자연계 동기화 현상을 이용하여 무선 네트워크에서 셀 사이의 부하균형을 위한 자율적 제어 방안을 제안하였다. 모의실험을 통해 제안 기법은 셀의 지역적 정보를 이용한 자율적 결정을 통해 과부하인 셀을 저부하인 셀에게 분배함으로써 네트워크 부하를 동기화 한다는 것을 보였다. 추후 연구로는 모델 파라미터들의 변화가 부하 분배 범위에 미치는 영향 분석과 운영 환경에 따른 동적인 파라미터 결정 방법이 요구된다. 또한 제안 알고리즘을 LTE 시스템의 MLB와 같은 특정 프레임워크에 적용하기 위한 방안 마련이 요구된다.

### References

[1] H. Lee, "Optimal cell selection scheme for load balancing in heterogeneous radio access networks," *J. KICS*, vol. 37, no. 12, pp. 1102-1112, Dec. 2012.

[2] M. Hong and S. Park, "Load balancing scheme for heterogeneous cellular networks using e-ICIC," *J. KICS*, vol. 39, no. 5, pp. 280-292, May 2014.

[3] W. Kim, J. Lee, and Y. Suh, "Adaptive periodic MLB algorithm for LTE femtocell networks," *J. KICS*, vol. 38, no. 9, pp. 764-774, Sept. 2013.

[4] 3GPP, TS 32.500, "Telecommunication Management; Self-Organizing Networks (SON); Concepts and Requirements (Release 11)," V11.1.0, Dec. 2011.

[5] Y. Xiao, *Bio-Inspired Computing and Networking*, CRC Press, 2011.

[6] Y. Kuramoto, *Chemical Oscillations, Waves and Turbulence*, Dover Publications, 2003.

[7] 3GPP, TS 36.300, "Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) and evolved universal terrestrial radio access (E-UTRAN); Overall description; Stage 2," V8.3.0, Dec. 2007.

[8] 3GPP, TR 36.816, *Evolved study on management of evolved universal terrestrial radio access network (E-UTRAN) and evolved packet core (EPC)*, V11.2.0, Dec. 2011.

[9] R. Nasri and Z. Altman, "Handover adaptation for dynamic load balancing in 3GPP long term evolution systems," in *Proc. IEEE MoMM'07*, pp. 145-153, Dec. 2007.

[10] A. El-Halaby and M. Awad, "A game theoretic scenario for LTE load balancing," in *Proc. IEEE Africon 2011*, pp. 1-6, Sept. 2011.

[11] H. Wang, L. Ding, P. Wu, Z. Pan, N. Liu, and X. You, "Dynamic load balancing in 3GPP LTE multi-cell networks with heterogeneous services," in *Proc. IEEE CHINACOM 2010*, pp. 1-5, Aug. 2010.

[12] S. S. Mwanje and A. Mitschele-Thiel, "Minimizing handover performance degradation due to LTE self organized mobility load balancing," in *Proc. IEEE VTC Spring 2013*, pp. 1-5, Jun. 2013.

[13] A. Lobinger, S. Stefanski, T. Jansen, and I. Balan, "Load balancing in downlink LTE self-optimizing network," in *Proc. IEEE VTC Spring 2010*, pp. 1-5, May 2010.

[14] R. Kwan, R. Arnott, R. Ratersion, R. Trivisonno, and M. Kubota, "On mobility load balancing for LTE systems," in *Proc. IEEE VTC Fall 2010*, pp. 1-5, Sept. 2010.

[15] R. E. Mirollo and S. H. Strogatz, "Synchronization of pulse coupled biological oscillators," *SIAM J. Appl. Mathematics*, vol.

50, no. 6, pp. 1645-1662, Dec. 1990.

- [16] Y. Hong and A. Scaglione, "A scalable synchronization protocol for large scale sensor networks and its applications," *IEEE J. Sel. Area in Commun.*, vol. 23, no. 5, pp. 1085-1099, May 2005.
- [17] J. Degesys, I. Rose, A. Patel, and R. Nagpal, "DESYNC: self Organizing desynchronization and TDMA on wireless sensor networks," in *Proc. 6th Int. Symp. Inf. Process. in Sensor Netw.*, pp. 11-20, Apr. 2007.
- [18] A. Arenas, A. Díaz-Guilera, and C. J. Pérez-Vicente, "Synchronization reveals topological scales in complex networks," *Physical Rev. Lett.*, vol. 96, no. 11, pp. 114102-114106, Mar. 2006.
- [19] S. Boccaletti, M. Ivanchenko, V. Latora, A. Pluchino, and A. Rapisarda, "Detecting complex network modularity by dynamical clustering," *Physical Rev. E*, vol. 75, no. 4, pp. 045102-045106, Apr. 2007.

**박재성 (Jaesung Park)**



2001년 2월 : 연세대학교 전기  
전자공학과 박사  
2001년~2002년 : University of  
Minnesota (PostDoc.)  
2002년~2005년 : LG전자 선임  
연구원  
2015년~현재 : 수원대학교 정보  
보호학과 교수

<관심분야> 네트워크 자원 관리, 설계, 및 분석