

에너지 절감 라우팅 기술 연구 동향

박홍식, 이은정, 김영민*

KAIST, *한국전자통신연구원

요약

본 고에서는 최근 전세계적으로 주목 받고 있는 에너지 절감 기술 분야 중 네트워크 레벨에서의 에너지 절감을 위한 핵심 기술인 에너지 절감 라우팅 기술의 연구 동향에 대해 소개한다. 이를 위해 먼저 망에서의 에너지 소비 최소화 문제 (EMN problem)를 정의하고, 이를 해결하기 위한 에너지 절감형 라우팅 기술에 대해 조사 분석한다. 그후, NS-2 시뮬레이션을 통해 에너지 절감 라우팅 기술간의 에너지 절감 측면의 성능을 비교 분석한다.

I. 서론

최근 들어 전세계적으로 환경 문제의 심각성이 대두됨에 따라 이산화 탄소 배출을 줄이고자 하는 노력이 활발히 이루어지고 있다. 현재, 네트워크 분야의 탄소 배출은 전 세계 탄소 배출의 2% (예를 들어, 항공 산업과 비슷한 수준)를 차지하고 있으며, 향후 미래 트래픽 증가와 더불어 10~15%까지 상승할 것이라 예견하고 있다 [1, 2]. 따라서, 이러한 흐름에 발맞춰 네트워크 분야에서도 에너지 절감을 통해 이산화탄소 배출을 줄이는 노력이 시급히 필요하다.

하지만, 현재 IP 망은 가용성 및 지연 품질 등 만 고려하여 설계되어 있기 때문에 효율적인 에너지 소비에 대한 고려가 없어 에너지 낭비가 심각한 실정이다 [3, 4]. 또한, 최근 새롭게 등장한 멀티미디어 및 소셜 네트워크 서비스 (예를 들어, 트위터, 페이스북 등)의 확산은 높은 대역폭과 낮은 지연을 요구하는 서비스 특성으로 인하여 에너지 요구를 더욱 증가시키고 있으며 IP 망의 불확실성을 더 가중시켜 에너지를 낭비하는 결과를 초래할 것이다. 따라서, 이를 해결하기 위해서는 망에서 소비되는 에너지를 인지하고, 이를 토대로 에너지를 절감하면서 서비스 품질 또한 보장할 수 있는 새로운 라우팅 기술에 대한 연구가 심도 있게 이루어져야 한다.

현재 망에 널리 쓰이는 Open Shortest Path Protocol (OSPF) 알고리즘의 경우 에너지 소비 상태에 대한 고려 없이 링크의 가중치와 망 토폴로지 정보만을 이용하여 경로를 설정한다. 더욱이, 동작 알고리즘은 단대단 기반의 최단거리를 찾아 경로를 설정하는 방식이기 때문에 망에 가해진 트래픽의 양이 많을 경우 서비스가 요구하는 품질을 만족시키지 못한다는 한계를 가지며, 이는 결국 에너지를 낭비하는 결과를 초래한다.

최근, 이러한 한계를 극복하기 위해 에너지 절감을 위한 라우팅 기술로서 GreenOSPF 알고리즘과 Integer Linear Programming (ILP) 기반의 휴리스틱 알고리즘, 에너지 프로파일 기반의 Energy-Aware Routing (EAR) 알고리즘, 생태계 기반의 Ant colony optimization based Energy Saving Routing (A-ESR) 알고리즘 등이 연구되고 있다 [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

본고에서는 망에서의 에너지 소비 최소화 문제를 정의하고, 이를 해결하기 위한 에너지 절감 라우팅 기술의 연구 동향에 대해 살펴본다. 또한, NS-2 시뮬레이션을 통해 에너지 절감 라우팅 기술의 에너지 절감 측면의 성능을 분석한다.

II. 에너지 소비 최소화 문제 (EMN problem)

본 장에서는 망에서 에너지를 최소화하는 문제를 에너지 소비 최소화 문제 (EMN problem)로 정의하고, 이에 대하여 상세히 기술한다.

1. 문제 정의

망에서 에너지 절감을 위한 에너지 소비 최소화 문제 (Energy Minimization of Network problem)는 수식(1)과 같이 정의된다. 망을 그래프 $G=(V, L)$ 로 가정하면, 망에서의 에너지 소비 최소화 문제는 망에 속한 모든 노드의 에너지와 망에 속한 각각의 노드가 가진 링크에서 소비되는 에너지의 합을 최소화 하는 문제로 나타낼 수 있다. 이를 노드에 대한 공통 합으

로 묶으면 수식(2)와 같이 망에 속한 각 노드에서 총 소비되는 에너지 합을 최소화하는 문제로 나타낼 수 있다. 이때, V 는 노드를 L 는 링크를 의미한다. 즉, 각 노드에서 총 소비되는 에너지는 노드 i 자체의 에너지인 $e_v(i)$ 와 노드 i 에 연결된 모든 링크에서 소비되는 에너지의 합인 $\sum_{j \in N_i} e_l(l_{ij})$ 의 합으로 구할 수 있다.

$$\min \left(\sum_{i \in V} e_v(i) + \sum_{i \in V} \sum_{j \in N_i} e_l(l_{ij}) \right) \quad (1)$$

$$= \min \sum_{i \in V} \left(e_v(i) + \sum_{j \in N_i} e_l(l_{ij}) \right) \quad (2)$$

2. 문제 해결을 위한 접근 방식

앞서 정의한 망에서의 에너지 최소화 문제를 해결하기 위해서는 1)지역적인 최적화 접근 방식으로 각 노드에서 총 소비하는 에너지를 최소화하는 방법과 2)전체적인 최적화 접근 방식으로 망 전체에서 총 소비되는 에너지를 최소화 하는 방법이 있다. 현재 망 장비의 경우 트래픽 부하가 적을 경우 최대 에너지를 사용하는 방식으로 운영되고 있다. 따라서, 실제 노드 자체의 전원을 끄는 것은 어려우므로 노드에서 소비되는 에너지의 최소화를 위해서는 노드에 연결된 링크들의 트래픽 부하가 0이 되게 만드는 방법이 실현 가능한 방법이다. 즉, 노드에서 총 소비되는 에너지의 최소화 방법은 노드의 활성화된 링크의 개수를 최소화하는 것이 최적의 방법이라 할 수 있다. 그러므로, 에너지 절감 라우팅 기술은 활성화된 링크의 개수를 최소화 할 수 있어야 한다.

Ⅲ. 에너지 절감 라우팅 기술

본 장에서는 에너지 절감 라우팅 기술의 연구 동향에 대해 살펴본다. 또한, 각 알고리즘의 동작 방법 및 장단점 분석을 통해 향후 에너지 절감 라우팅 기술의 발전 방향에 대해 모색한다.

1. GreenOSPF 알고리즘

GreenOSPF 알고리즘은 망에서 활성화된 링크의 개수를 최소화하는 것을 목표로, 기존의 OSPF 알고리즘을 조금 수정하여 손쉽게 망에 구현할 수 있도록 제안된 알고리즘이다 [6]. 이 알고리즘은 대표 노드 (Exporter router, Er)를 선출하고, 그 노드에 의해 계산된 Shortest Path Tree (SPT)를 대표 노드에 연결된 이웃 노드들이 함께 공유하는 OSPF 알고리즘 기반의 에너지

절감 라우팅 기술이다. 이 알고리즘의 동작 방법은 크게 세 단계로 나뉜다. 먼저, 1단계에서는 노드에 연결된 링크의 개수를 기반으로 망에서 대표 노드들을 선출하고, 선출된 대표 노드들은 자신을 중심으로 SPT를 계산한다. 다음으로, 2단계에서는 대표 노드에 연결된 이웃 노드들이 SPT를 계산하는데, 이때 자신을 중심으로 SPT를 계산하는게 아니라 자신의 대표 노드를 중심으로 SPT를 계산한다. 이때 계산된 SPT를 Modified Path Tree (MPT)라 부른다. 이를 통해, 대표 노드와 대표 노드에 연결된 이웃 노드들은 같은 SPT를 가지게 된다. 즉, 트래픽을 전달하는 경로가 동일하게 된다는 의미이다. 이렇게 이웃 노드들이 MPT를 계산하는 동안, 남은 노드들은 자신을 중심으로 SPT를 계산한다. 이렇게 3단계를 모두 마치면 대표 노드와 남은 노드들은 자신을 중심으로 한 SPT를 가지게 되고, 대표 노드에 연결된 이웃 노드들은 대표 노드를 중심으로한 MPT를 가지게 된다. 따라서, 대표 노드와 그 이웃 노드들이 같은 SPT를 가지게 됨으로 사용되지 않는 링크의 개수를 증가 시킬 수 있다.

〈그림 1〉은 GreenOSPF 알고리즘의 이해를 위한 예시이다. 〈그림 1〉의 (a)는 예제로 제시된 망이며, 총 9개의 노드와 16개의 링크로 이루어져 있다. 예를 들어, 주어진 망에서 R1이 대표 노드일 경우 R1은 〈그림 1〉의 (b)와 같은 SPT를 가진다. R1의 이웃 노드인 R2의 경우 기존의 OSPF 알고리즘 기반으로 계산한 SPT는 〈그림 1〉의 (c)와 같지만 GreenOSPF 알고리즘 기반으로 계산한 MPT는 〈그림 1〉의 (d)와 같으며 이는 〈그림 1〉의 (a)와 같은 형태를 지닌다. 여기서 기존 OSPF 알고리즘 기반의 SPT를 사용할 경우 R1, R2의 SPT를 합한 형태의 SPT가 사용되어 총 12개의 링크를 사용하지만, GreenOSPF 알고리즘 기반의 MPT를 사용할 경우 대표 노드의 SPT와 동일한 형태의 SPT가 사용되어 총 8개의 링크를 사용한다. 즉, 기존 OSPF 알고리즘에 비해 4개의 링크를 더 적게 사용할 수 있다.

이와 같이 GreenOSPF 알고리즘은 기존 OSPF알고리즘을 조금만 수정하면 되므로 실제 망에서의 구현이 쉽고, 실현 가능한 알고리즘이다. 또한 기존 OSPF 알고리즘에 비해 에너지 절감 효과가 있다. 하지만, GreenOSPF 알고리즘을 이용하는 알고리즘의 경우 SPT 계산에 이용되는 대표 노드 선정 시 망의 트래픽 정보나 Quality of Service (QoS) 정보 등을 고려하지 않고 단지 연결된 링크의 개수가 많은 노드를 대표 노드로 선출함으로써, 최적화된 대표 노드를 선출하지 못하여 에너지 소비의 최소화를 달성하기 어렵다는 한계를 지닌다. 또한, 이웃 노드들이 대표 노드와 동일한 SPT를 공유한다 하더라도 모든 노드들의 입장에서 이 알고리즘을 도입하면 에너지 절감효과가 미비할 수 있다. 더불어, GreenOSPF 알고리즘의 경우 OSPF 프로토콜의 수정 버전이므로 SPT의 재계산은 링크 상태 업데이트

메시지에 의해서만 이루어진다. 이 메시지는 최소 5분 간격으로 보내지기 때문에 그 시간 동안 변화된 트래픽 부하 변화 및 QoS 상태 변화를 수용하지 못할 뿐만 아니라 에너지 낭비 또한 초래할 수 있다.

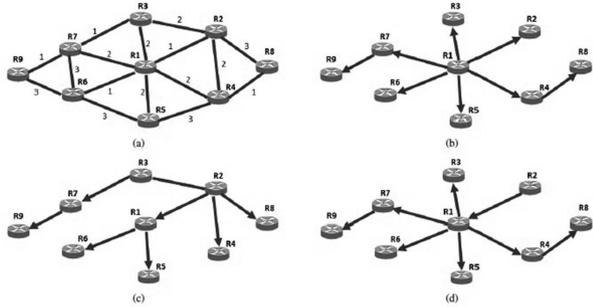


그림 1. GreenOSPF 알고리즘 예시
(a) 예제 망, (b) R1의 SPT, (c) R2의 SPT, (d) R2의 MPT

2. ILP 기반의 휴리스틱 알고리즘

망 전체의 에너지 소비 최소화를 위한 ILP기반의 휴리스틱 알고리즘은 집중형 기반의 정적인 방식으로 망 토폴로지 정보와 인가될 트래픽 정보를 사전에 모두 안다는 가정 하에 활성화될 링크와 비 활성화될 링크를 결정한다 [7, 8]. 이 알고리즘의 동작 방법은 먼저, 에너지 소비가 큰 순서대로 노드를 정렬한 후, 크게 두 단계로 나뉘어 수행된다. 1단계에서 전원을 끌 수 있는 노드들을 선정하여 전원을 끄고, 다음으로 2단계에서 전원을 끌 수 있는 링크 (즉, 비 활성화될 링크)를 선정한다. 자세한 동작 방법은 <그림 2>와 같다. 먼저, 현재 노드를 끄고, 최단 거리를 점검하는데 이때 네트워크 연결성이 보장되지 않으면 현재 노드를 다시 켜고, 네트워크 연결성이 보장될 경우 OSPF 알고리즘을 이용하여 모든 링크 플로우의 경로를 계산하여 비 활성화될 링크를 결정한다. 이때, 현재 노드가 트래픽 혼잡 상황에 처할 경우 다시 현재 노드를 켜고, 아닐 경우 비활성화될 링크의 전원을 끄고, 다음 노드로 이동한다. 이 단계들을 에너지 소모가 큰 순서대로 정렬된 모든 노드들에 대해 수행한다. 따라서 이 알고리즘의 경우 계산을 위해 모든 정보를 알아야 하므로 실제 망에서의 구현 가능성이 떨어지며, 수집된 정보의 정확성에

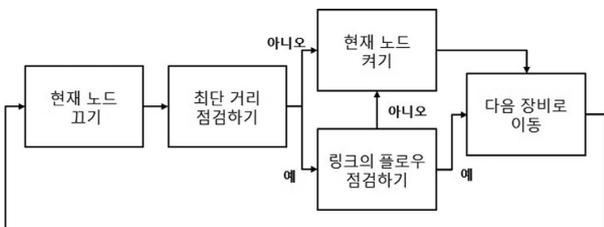


그림 2. ILP 기반의 휴리스틱 알고리즘

따라 에너지 소비의 최소화 결정된다는 한계를 지닌다. 더불어, 집중형 기반으로 동작되기 때문에 링크의 활성화 여부를 결정하는데 많은 시간이 소모되며, 정적인 방식으로 인해 실제 망 상태 변화에 대한 수용이 어려워 에너지 소비 절감 측면에서 최적화된 방안이라 보기 어렵다.

3. 에너지 프로파일 기반의 EAR 알고리즘

에너지 프로파일 기반의 EAR 알고리즘은 에너지 프로파일을 고려하여 플로우가 지나가는 경로의 에너지 프로파일을 보고 에너지 값이 최소화 되는 경로를 선택하는 알고리즘으로서 집중형/분산형 방식으로 구현 가능한 에너지 절감 라우팅 기술이다 [9]. 이 알고리즘에서 고려하고 있는 에너지 프로파일이란 트래픽 부하에 따른 에너지 소비 특성을 나타내는 그래프이며, 이는 에너지 절감 기술들(예를 들어, IEEE 802.3az, Dynamic Voltage Scaling)에 의해 로그 함수나 큐빅 함수와 같은 형태를 가질 수 있다. <그림 3>에서 보듯이 에너지 프로파일 기반의 EAR 알고리즘은 각 노드의 에너지 프로파일과 실제 노드의 트래픽 부하를 고려하여 에너지 소비가 가장 적은 경로로 트래픽의 경로를 설정하는 방안이다. 이 알고리즘은 미래 발전 기술을 수용할 수 있도록 에너지 프로파일을 고려했다는 점에서 우수하지만 에너지 프로파일을 이용해 망 전체 에너지를 최소화하는 방법에 대해 구체적으로 제시하지 않고 있다. 또한, 성능 검증에 있어서도 기존 OSPF 알고리즘만을 상대 비교 하였으며, 에너지 소비측면에서도 에너지 절감효과가 미비하다.

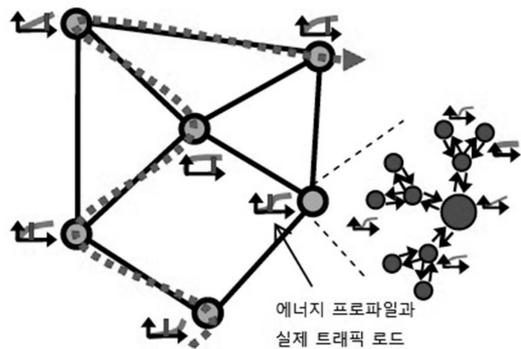


그림 3. 에너지 프로파일 기반의 EAR 알고리즘

4. 생태계 기반의 A-ESR 알고리즘

생태계 기반의 A-ESR 알고리즘은 인공 개미를 이용하여 측정된 지연 품질 기반의 페로몬 테이블 값과 트래픽 집중도 값을 통해 에너지 소비를 최소화하는 에너지 절감 라우팅 기술이며, 이를 위한 노드의 구조는 <그림 4>와 같다 [10, 11, 12, 13, 14].

이 알고리즘에 사용되는 트래픽 집중도 개념은 현재 링크의 트래픽 부하를 노드 전체의 트래픽 부하로 나눈 값으로 수식(3)과 같이 정의되며, 트래픽 집중도 값 $C(in)$ 이 1에 가까울수록 노드 i 의 에너지 소비와 커진 링크의 수가 최소화된다는 특성을 가진다. 여기서, n 는 현재 선택된 노드를, N_i 는 노드 i 의 이웃 노드들의 집합을 나타내며, t_{in} 은 노드 i 와 노드 n 을 연결하는 링크에 인가된 트래픽 량을 의미한다.

$$C(in) = \frac{t_{in}}{\sum_{j \in N_i} t_{ij}}, n \in N_i \quad (3)$$

또한, A-ESR 알고리즘은 자연 품질을 고려하기 위해 ACO 알고리즘을 도입하여 인공 개미를 통해 자연 품질을 측정하고, 측정된 값을 통해 자연 품질 통계 모델과 페로몬 테이블을 업데이트 한다. 이때, 페로몬 값이 클수록 자연 품질이 좋음을 나타낸다 (즉, 자연 품질이 좋음은 자연이 짧음을 의미한다). 이와 같이 도착 노드가 d 인 패키지가 현재 노드 i 에 도착하면 트래픽 집중도 값과 페로몬 값을 기반으로 수식(4)를 이용하여 이웃 노드 n 으로의 라우팅 확률을 계산하고, 가장 큰 확률 값을 가지는 이웃 노드를 패키지의 전송 경로로 설정한다. 이때, β 값은 0과 1사이의 값을 가지며, 에너지 절감 가중치로 사용된다. 이 값이 1에 가까우면 에너지 절감 효과가 크다.

$$p_{ind} = \beta C(in) + (1 - \beta) \frac{\tau_{ind}}{\sum_{j \in N_i} \tau_{ijd}} \quad (4)$$

이 알고리즘은 에너지 절감뿐만 아니라 자연 품질도 고려하여 사용자에게 좋은 서비스 품질을 제공할 수 있다는 장점이 있지만 β 값에 따라 에너지 절감 정도가 달라지기 때문에 최적화된 β 값을 찾는 방법에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

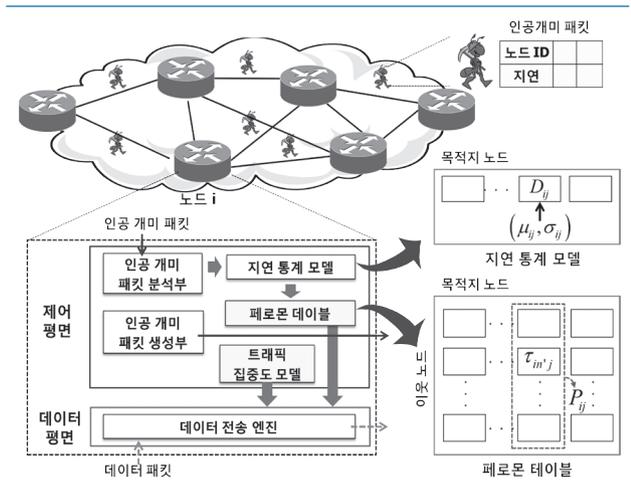


그림 4. 생태계 기반의 A-ESR을 위한 노드 구조

IV. 성능 검증

본 장에서는 NS-2 시뮬레이터를 이용하여 III장에서 기술한 에너지 절감 라우팅 기술의 알고리즘을 구현하고, 시뮬레이션 을 통해 에너지 절감 측면에서의 성능 분석 결과를 기술한다.

1. 시뮬레이션 환경

먼저, 시뮬레이션을 위해 사용된 망 토폴로지 그림은 <그림 5>와 같으며, <표 1>은 시뮬레이션에 사용된 토폴로지 특성 및 정보를 나타낸다. 실제 망에서의 성능 분석을 위해 Rocketful 프로젝트 연구를 통해 획득한 실제 망의 토폴로지를 이용하여 시뮬레이션을 수행했다 [15, 16].

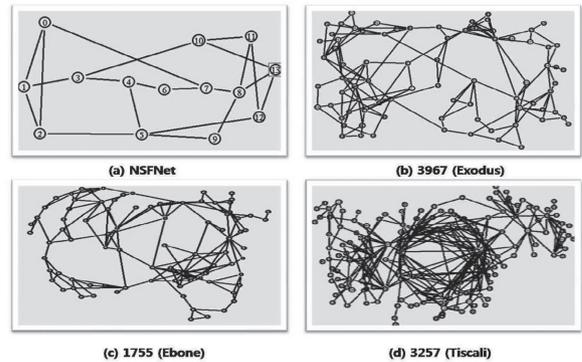


그림 5. 시뮬레이션을 위한 망 토폴로지
(a)NSFNet, (b) 3967(Exodus), (c) 1755 (Ebone), (d) 3257(Tiscali)

<그림 5>에서 보듯이 시뮬레이션에 사용된 망 토폴로지는 NSFNet, AS 3967 (Exodus), AS 1755 (Ebone), AS 3257 (Tiscali) 이며, 이를 통해 망의 특성에 따른 에너지 절감 정도를 분석하고자 한다. <표 1>에서 보듯이 NSFNet의 경우 랜덤 망의 한 예로서 사용하였으며, 나머지 망의 경우 스케일 프리 특성을 가진다. 여기서, 랜덤 망의 경우 노드에 연결된 평균 링크 수를 알 수 있지만 스케일 프리 망의 경우 많은 링크를 가진 몇 개의 허브와 나머지 노드들로 이루어져 있기 때문에 노드에 연결된 평균 링크 수를 알 수 없다는 (척도 없음) 차이점이 있다. 이러한 환경하에 성능 검증을 위해 트래픽 부하를 0.2로 설정하고, 플로우를 랜덤하게 생성하기 위하여 플로우의 세션 유지 시간과 플로우 요구 대역폭 값을 랜덤하게 선택하게 하여 트래픽을 생성하여 망에 인가하였다. 그리고, 앞서 소개한 에너지 절감 라우팅 기술 중 기존의 라우팅 기술인 OSPF 알고리즘과 에너지 절감 라우팅 기술인 GreenOSPF 알고리즘, 그리고 생태계 기반의 에너지 절감 라우팅 기술인 A-ESR 알고리즘에 대해 성능 비교를 실시했다.

표 1. 망 토폴로지 특성 및 정보

망 특성	망 토폴로지	노드 개수	링크 개수
랜덤	NSFNet	14	42
스케일 프리	AS 3967 (Exodus)	79	294
	AS 1755 (Ebone)	87	322
	AS 3257 (Tiscali)	161	656

2. 에너지 절감 측면의 성능

세가지 라우팅 알고리즘에 대해 에너지 절감 측면에서의 성능 분석을 위하여 수식(5)와 같이 “에너지 절감율(=η)”을 정의하였다. 이때, t_{on_i} 은 시뮬레이션 전체 시간 동안 링크 l_i 이 켜있는 시간을, t_{off_i} 는 시뮬레이션 전체시간 동안 링크 l_i 이 꺼져있는 시간을 의미한다. 따라서, η의 값이 클수록 에너지 절감 효과가 크다.

$$\eta = \sum_{l \in L} \frac{t_{off_i}}{t_{on_i} + t_{off_i}} \quad (5)$$

〈그림 6〉은 망 토폴로지에 따른 에너지 절감율을 퍼센트로 나타낸 그래프이다. 여기서, ○는 OSPF 알고리즘을, □는 GreenOSPF 알고리즘을, X는 A-ESR 알고리즘을 나타낸다. 이때, GreenOSPF 알고리즘의 경우 Er값(=대표 노드 수)은 전체 노드 개수의 5%로 가정하였고, β값은 0.4로 설정했다. 그림에서 보듯이, A-ESR 알고리즘이 다른 알고리즘에 비해 에너지 절감 효과가 가장 크며, 이는 인공 개미를 통해 동적으로 변화하는 망 환경에 잘 적응 할 수 있었기 때문이다. 한편, 랜덤 망 형태인 NSFNet보다 스케일 프리망 형태인 Exodus, Ebone, Tiscali에서 에너지 절감 효과가 더 큰 것을 알 수 있으며, 이는 앞서 설명한 스케일 프리망의 특성에 기인한다. 스케일 프리 망의 노드 중 허브 노드는 연결된 링크가 많기 때문에 잠정적으로

링크의 전원을 끌 수 있는 후보 링크가 많다는 의미로 볼 수 있다. 따라서, 이러한 허브 링크로 인해 에너지 절감 효과가 더욱 크게 나타나는 것이다.

V. 결론 및 정리

본 고에서는 통신망에서의 에너지 소비 최소화 문제를 정의하고 이를 해결하기 위한 방안으로 에너지 절감 라우팅 기술의 연구 동향에 대해 살펴보았다. 또한, NS-2 시뮬레이션을 통해 에너지 절감 라우팅 기술의 에너지 절감 효과에 대한 성능을 분석하였다. 본고에서 살펴보았듯이 현재 에너지 절감 라우팅 기술들은 주로 에너지 소비 최소화에만 집중되는 경향이 있으며, 서비스 품질 보장 측면에 있어서 한계점을 지니고 있다. 또한, 트래픽 부하에 따른 에너지 소비 특성을 나타내는 에너지 프로파일을 고려하지 않고, 트래픽 부하가 적을 경우에도 최대 에너지를 소비하는 망 장비만을 고려하고 있다. 따라서, 향후 에너지 절감 라우팅 기술은 다양하고 새로운 서비스의 원활한 수용을 위해 에너지 소비뿐만 아니라 단대단 지연, 패킷 손실율과 같은 서비스 품질 요소도 함께 고려하여 사용자의 체감 품질도 보장 가능해야 한다. 더불어, 향후 에너지 절감 기술이 장착되어 동작할 망 장비를 위하여 에너지 프로파일 특성도 고려해야 할 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업 (NIPA-2012-H0301-12-1004) 및 한국산업기술평가관리원의 IT R/D 사업 (KI001810039160)의 연구 결과로 수행되었다.

본 논문은 [10], [11]에서 출판된 내용의 일부를 포함하고 있다.

참고 문헌

- [1] In Proceeding of the Vision and Roadmap Workshop on Routing Telecom and Data Centrs Toward Efficient Energy Use, Oct. 2008.
- [2] Recommendation on “Framework of energy saving for future networks,” Recommendation ITU-T Y.3021, Jan. 2012.
- [3] M. Gupta and S. Singh, “Using low-power modes for energy conservation in Ethernet LANs,” in Proc. IEEE

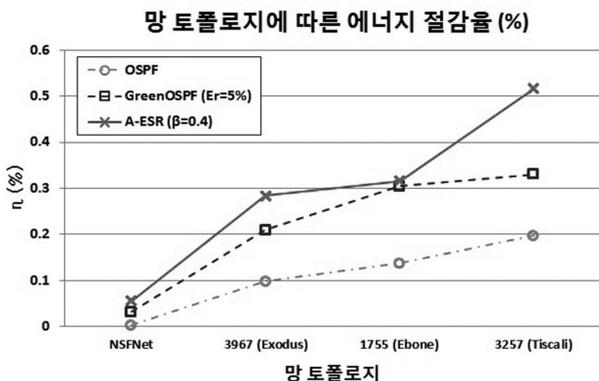


그림 6. 망 토폴로지에 따른 에너지 절감율

Int. Conf. on Computer Commun. 2007 (IEEE INFOCOM 2007), pp. 2451-2455, Anchorage, Alaska, May 2007.

[4] M. Andrews et al., "Routing for energy minimization in the speed scaling model," in Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Commun. 2010 (IEEE INFOCOM 2010), pp. 1-9, San Diego, USA, Mar. 2010.

[5] N. J. Choi, "그린터치의 에너지 효율성 개선 연구 동향," 한국통신학회지(정보와통신), vol. 29 no. 6, pp. 34-40, May 2012.

[6] A. Cianfrani et al., "An energy saving routing algorithm for a Green OSPF protocol," in Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Commun. Workshops 2010 (IEEE INFOCOMW 2010), pp. 1-5, San Diego, CA, Mar. 2010.

[7] L. Chiaraviglio et al., "Reducing power consumption in backbone networks," in Proc. IEEE Int. Conf. on Commun. 2009 (IEEE ICC 2009), pp. 1-6, Dresden, Germany, June 2009.

[8] L. Chiaraviglio et al., "Energy-aware backbone networks: a case study," in Proc. IEEE Int. Conf. on Commun. Workshops 2009 (IEEE ICCW 2009), pp. 1-5, Dresden, Germany, June 2009.

[9] JCC. Restrepo et al., "Energy profile aware routing," in Proc. IEEE Int. Conf. on Commun. Workshops 2009 (IEEE ICCW 2009), pp. 1-5, Dresden, Germany, June 2009.

[10] Y. M. Kim et al., "Ant colony optimization based self-organizing QoS framework in IP networks," IEEE Comm. Let., vol. 14, no. 11, pp. 1074-1076, Nov. 2010.

[11] E. J. Lee, Y. M. Kim, H. S. Park, "미래 그린 망을 위한 ACO(Ant Colony Optimization) 기반의 에너지 절감형 라우팅 기법," in Proc. The 21th Joint Conf. on Commun. and Info. 2011 (KICS JCCI 2011), Busan, Korea, May 2011.

[12] J. S. Ahn, E. J. Lee, et. al, "OpenFlow 기반의 SDN 응용 시나리오 연구," in Proc. The 22th Joint Conf. on Commun. and Info. 2012 (KICS JCCI 2012), Kwangwon do, Korea, April 2012.

[13] M. Dorigo and T. Stutzle, "Ant Colony Optimization," A Bradford Book, The MIT Press, 2004.

[14] F. Dressler and Ozgur B. Akan, "Bio-inspired networking: from theory to practice," IEEE Commun. Mag., vol. 48, no. 11, pp. 176-183, Nov. 2010.

[15] Rocketfuel Project [Online]. Available <http://www.cs.washington.edu/research/networking/rocketfuel/>

[16] N. Spring et al., "Measuring ISP topologies with Rocketfuel," IEEE/ACM Trans. On Networking, vol. 12, no.1, pp. 2-16, Feb. 2002.

약 력



박 홍 식

1977년 서울대학교 공학사
 1986년 KAIST 공학 석사
 1995년 KAIST 공학 박사
 1977~1997년 한국전자통신연구원 책임연구원
 1998~현재 KAIST 전자전기공학과 교수
 관심분야: BcN엔지니어링, QoS, 에너지 절감,
 생태계 기반 트래픽 제어 기술,
 네트워크 코딩, 소셜 네트워크,
 에너지 측정



이 은 정

2006년 경북대학교 공학사
 2008년 KAIST 공학 석사
 2008년~현재 KAIST 공학 박사
 관심분야: 에너지 절감 라우팅 기술,
 생태계 기반 트래픽 엔지니어링,
 에너지 측정, QoS 보장 기술



김 영 민

2004년 전남대학교 공학사
 2006년 KAIST 공학 석사
 2011년 KAIST 공학 박사
 2011년~현재 한국전자통신연구원 연구원
 관심분야: 플로우 기반 라우터,
 생태계 기반 트래픽 엔지니어링,
 DDoS 검출 시스템 개발, 가상 클라우드