

논문 2014-51-5-10

IP Network에서 QoS Aware Energy Saving(QAES)을 위한 링크 절약 라우팅의 한 방법 및 특성

(A Strategy of the Link Saving Routing and Its Characteristics for
QoS Aware Energy Saving(QAES) in IP Networks)

한 치 문*, 김 상 철**

(Chimoon Han[Ⓒ] and Sangchul Kim)

요 약

오늘날 ICT 네트워크에서 에너지 소모는 전체 에너지 소모의 10% 내외로, 가까운 미래에 에너지가 현저하게 증가 할 것으로 예측되고 있다. 본 논문에서는 네트워크 품질을 보장하면서 에너지 절감이 가능한 방법을 검토한다. IP 네트워크에서 처리하는 총 트래픽 량이 일정 값 이하가 될 때, 네트워크 내의 특정 링크를 sleep 상태로 하여, 링크 양단의 NIC(Network Interface Card)에서 소모되는 에너지를 절감시키는 방안이다. 본 논문에서는 sleep 상태로 둘 링크를 최대한 도출하고, 이로 인한 노드의 경로(SPT: Shortest Path Tree)변경이 최소화되도록 한다. 우선 target 링크를 선정하고, 선정된 target 링크가 sleep 상태로 두는 것이 가능한지를 위임/수탁 라우터 기반의 heuristic 라우팅 방안에 의해 결정하는 방법을 제안한다. 위임/수탁 라우터 기반의 heuristic 라우팅 방안에서, 시뮬레이션을 통해 min_used traffic 및 min_path의 입력 유형의 특성을 평가한다. Min_used traffic 입력을 이용한 heuristic 방식이 min_path 입력 방식에 비해 링크 절약 효율은 대체적으로 5% 정도 우수하지만, 각 노드의 SPT의 길이는 반대로 평균 약 0.2홉 정도 증가하고 있다. 그러나 이 두 방식은 random 입력 방식에 비해 링크 절약 효율과 SPT 경로 감소 면에서 상당히 우수하다. 또한 본 알고리즘 수행 중 링크 freezing 방법에 따라 링크 절약 효율이 최대 80% 정도 향상되므로 에너지 절감 효과가 크다. 따라서 본 논문에서 위임/수탁 라우터 기반의 heuristic 라우팅 방안을 적용하여 네트워크 품질 유지하면서 에너지를 절약 할 수 있음을 확인 한다.

Abstract

Today the energy consumption of ICT networks is about 10% of the worldwide power consumption and is predicted to increase remarkably in the near future. For this reason, this paper studies energy saving strategies assuring the network-level QoS. In the strategies, the energy consumption of NIC(network interface card) on both endpoint of links decreases by selecting links and making them sleep when the total traffic volume of the IP network is lower than a threshold. In this paper, we propose a heuristic routing algorithm based on so-called delegating/delegated routers, and evaluate its characteristics using computer simulation considering network-level QoS. The selection of sleep links is determined in terms of the number of traffic paths (called min_used path) or the amount of traffics(called min_used traffic) through those links. To our experiment, the min_used traffic method shows a little better energy saving but the increased path length compared to the min_used path method. Those two methods have better energy saving characteristics than the random method. This paper confirms that the delegating/delegated router-based routing algorithm results in energy saving effects and sustains network-level QoS in IP networks.

Keywords: QoS Aware Energy Saving, Heuristic, Delegating/Delegated Router, Link saving, Energy reduction

* 정회원, 한국외국어대학교 전자공학과
(Department of Electronics Engineering, Hankuk University of Foreign Studies)

** 정회원, 한국외국어대학교 컴퓨터공학과
(Department of Computer Engineering, Hankuk University of Foreign Studies)

Ⓒ Corresponding Author(E-mail: cmhan@hufs.ac.kr)

※ 이 논문은 2011년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임.
(NRF-2011-0010070)

접수일자: 2014년2월7일, 수정일자: 2014년4월2일, 수정완료: 2014년4월24일

I. 서 론

오늘날 인터넷에서 에너지 소비 절약에 관한 주제가 가장 중요한 도전 중의 하나로 자리를 매김하고 있으며, 이는 네트워크 하부 구조의 에너지 효율에 관한 연구를 유도 하고 있다. ICT 분야의 에너지 소모가 전 세계 전력 소모의 8%를 차지하고 있으며, 특히 네트워크 분야의 에너지 소모는 ICT 에너지 소모의 약 15% 정도로 추정하고 있다^[1].

지금까지 IP 네트워크 설계는 피크 시간대의 트래픽을 기준으로 하고, 최우선적으로 QoS를 제공할 목적으로 네트워크가 over-provision으로 설계되었다. 특히 밤 시간대의 트래픽은 낮 시간대의 트래픽 량의 30% 이하인 것으로 알려져 있다. 따라서 이러한 상황에 대비하여, 네트워크 레벨에서 에너지 절감 방법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.^[2-5]

네트워크 레벨의 에너지 절감을 위한 기본 개념은 낮은 트래픽 동안에, 네트워크 라우터 간에 서로 협력하여 네트워크(라우터 및 링크)의 일부분만 이용하고, 나머지 부분은 sleep 상태로 두는 방안을 찾는데 있다. 이러한 연구 중에 관심을 끌고 있는 것은 기존의 OSPF 프로토콜을 변경하여 네트워크 링크의 이용 효율을 높이고, sleep 상태로 둘 링크를 선별하여 에너지를 절감하는 것이다.^[6-8] 이는 오늘날 인터넷이 여러 개의 AS(Autonomous System)과 이들 사이를 백본 네트워크로 구성되어 있으며, AS내에서 OSPF(Open Shortest Path First) 프로토콜을 사용하고 있기 때문에 가능하다. 그리고 라우터간 변경된 토폴로지 정보를 이용함으로써 energy aware 라우팅을 실현 할 수 있다.^[7] OSPF 프로토콜에서는 네트워크 내의 개개의 라우터가 Dijkstra 알고리즘을 이용하여, 라우터 자신에서 다른 모든 라우터까지 가장 최단거리로 도달 할 수 있는 경로 SPT(Shortest Path Tree)를 제공하고 있다. 따라서 네트워크 내에서 트래픽을 라우팅하기 위해 사용하는 링크는 적어도 하나의 SPT에 속해 있다.

IP 네트워크의 에너지를 절감하기 위해, 네트워크가 처리하는 총트래픽 량이 일정 값 이하로 떨어질 때, 네트워크 내의 특정 노드 혹은 링크를 sleep 상태로 두으로써 에너지를 절약하는 방법이 연구되어 왔다. 한 개의 노드나 링크가 sleep 상태가 되면, 라우팅 프로토콜에 의해 새로운 SPT가 결정되도록 재 라우팅이 이루어

진다. 이때 재 라우팅으로 인한 새로운 경로의 지연 증가, 그리고 네트워크 레벨의 QoS를 고려하여야 한다.

이러한 점을 고려하여 본 논문에서는 운용 중에 있는 네트워크 링크의 수를 감소시켜, 그 감소된 링크 양단에 설치된 NIC(Network Interface Card)를 sleep 상태로 두으로써 에너지를 절감 할 수 있다. 따라서 IP 네트워크에서 sleep 상태로 둘 링크 수를 가능한 최대로 하고, 이에 따른 특성의 변화를 최소화 할 수 있는 방법을 연구한다. 제II장에서는 관련 연구 내용을 설명하고, 제III장에서는 네트워크 레벨의 QoS가 보장되고 에너지 절약 효과가 우수하고, 구현이 간단한 알고리즘으로 위임/수탁 라우터 기반의 에너지 절약 라우팅 알고리즘을 제안하고, 그의 동작 원리 및 방식에 대해 설명한다. 제IV장에서는 제안한 방식의 특성을 시뮬레이션을 통해 분석하고, 방식 별로 특성을 비교 평가 한다. 제V장에서 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

1. 일반 사항

IP 네트워크에서 AS 라우팅 프로토콜은 OSPF 프로토콜을 이용하며, 이는 LSA (Link State Advertisements) 메시지로 라우터의 상태를 알려준다. LSA 메시지는 flooding 메커니즘에 의해 모든 노드에 도착하며, 네트워크 내의 모든 라우터는 LSA 데이터 베이스에 의해 일관성을 유지한다. 그리고 각 라우터는 Dijkstra 알고리즘에 의해 SPT를 계산하고, 목적지를 위해 다음 홉을 선택하여 자신의 라우팅 테이블을 만든다.

IP 네트워크는 방향성 가중치 그래프(weighted graph)로 표현 할 수 있으며, 그 기호로 $G(N, E, W)$ 라 하자. 여기서 N 는 노드(라우터)의 집합이고, E 는 단방향 링크의 집합, W 는 각 링크에 관련된 가중치의 집합이다. 간단히 표현하기 위해 중계 네트워크는 없다고 가정한다. 그리고 $R = \|N\|$ 및 $L = \|E\|$ 는 집합 N 및 E 의 원소라 하자. 각 방향 링크에 대해, $l \in E, s(l), e(l), w(l)$ 은 각각 시작 노드, 끝 노드, 링크에 관련된 가중치라 하자. 각각의 라우터($r \in N$)는 자신의 SPT, $SPT(r)$ 을 계산한다. 네트워크에서 액티브 링크의 집합 E_A 는 적어도 하나의 SPT에 속하는 링크의 집합이며, E_A 의 원소는 식(1)과 같이 주어진다.

$$L_D = \| E_A \| = \| \cup_{r \in N} SPT(r) \| \quad (1)$$

식(1)에서 직관적으로 $L_D \leq L$ 임을 알 수 있으며, IP 네트워크에서 임의의 두 라우터 사이에 트래픽을 전달하기 위해 필요한 최소 단 방향 링크의 수는 네트워크의 연결성만 보장해 주면 된다. 따라서 식(2)로 주어진다.

$$L_{\min} = 2(R-1) \quad (2)$$

IP 네트워크에서 트래픽 전달에 이용되는 링크의 수를 줄여서 에너지를 절약하는 것이 기본 개념이다. 그러므로 다양한 에너지 절약 방법에 의해 식(1)에서 구한 액티브 링크의 수를 감소시킬 수 있다. 이때 IP 네트워크에서 Energy Aware Routing(EAR) 방식에 의해 sleep 상태로 둘 수 있는 링크의 수를 L_e 라 하자. 그러면 EAR에 의해 얻을 수 있는 에너지 절약 파라미터 η_e 을 식(3)과 같이 정의 할 수 있다.

$$\eta_e = L_e / (L_D - L_{\min}) \quad (3)$$

2. 관련 연구

IP 네트워크는 라우터와 이들 사이를 연결하는 링크로 구성되어 있으며, 대부분의 링크는 광섬유를 이용하고 있다. 그리고 라우터 구조는 2 계층 IP over WDM 형태로, 논리적인 IP 토폴로지가 광 WDM (Wave Division Multiplexer) 네트워크로 맵핑되고, 단일 방향인 각 IP 링크는 고정된 WDM 광 패스에 대응되어 있다. 그리고 라우터 구조는 대체적으로 라우팅 기능을 담당하는 스위치 (switch fabric) 및 제어부분, 링크 인터페이스 기능인 NIC (Network Interface Card)로 구성되어 있다. 이러한 IP 네트워크 구조에서 에너지를 절약하기 위해, 특정 트래픽 조건 하에서 링크 양단의 NIC 혹은 라우터 전체를 sleep 상태로 두는 방법이 있다.

에너지 절약을 최대화하기 위해, 네트워크가 소모하는 전체 에너지가 최소가 되도록 네트워크 내의 노드 및 링크의 수를 최적화하는 방법을 주로 이용하고 있다.^[5] 참고 문헌^[5]에서는 노드가 링크보다 일반적으로 에너지 소모가 크다는 사실에 주목하여 우선 노드의 수를 최적화하고, 다음에 링크의 수를 최적화하는 방법을 취하고 있다. 그리고 최적화 한 후, 새로 구성된 네트워

크에 대해 재 라우팅 기능을 수행하고 있다. 역시 최적화는 heuristic 방법을 사용하였고, 이와 같은 방법에 의해 에너지 절약 효과가 30% 정도이다. 그러나 단점으로는 노드나 링크가 감소 될 때마다 재 라우팅을 수행하여야 하는 부담이 있다.

만약에 IP 네트워크를 구성하는 라우터 및 링크 내의 일부 기능을 sleep/active 상태로 둘 수 있고, 이러한 기능이 외부 신호에 의해 sleep에서 active로 천이가 가능하고, 또 기능별로 서로 상이한 에너지 프로파일을 가지고 있다면, OSPF 프로토콜에서 경로 설정 알고리즘을 수정하여 에너지 소모를 최소화 하는 방법도 있다. 이 방법은 라우터에서 기능별로 갖는 에너지 프로파일 모델이 아직 현실화 되어 있지 않다.

또 기존 IP 네트워크에서 적용하는 OSPF 프로토콜의 최소한 변경만으로, 네트워크의 액티브 링크 수를 최적화하기 위해 max_compatibility heuristic 알고리즘을 제시하고 있다^[8]. 특히 이 방법은 경로 대체 링크를 결정하기 위해, “move” 용어를 사용하고 있으며, 이러한 move를 어떻게 선택하느냐가 중요하다. 따라서 에너지 절약이 최대가 되도록 move의 집합을 구하는 문제이며, max_compatibility heuristic에 의해 찾고 있다. 이 알고리즘은 최대 에너지 절약 관점에서 결정되어야 하며, 알고리즘이 복잡하다는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 네트워크 레벨의 QoS을 고려한 에너지 절감 라우팅의 한 방안으로, 간략하고 에너지 절감 특성이 우수한 위임/수탁 라우터 기반 라우팅 방안을 제안하고, 그 특성을 분석한다.

III. QoS_Aware_Energy_Saving(QAES)을 위한 라우팅의 한 방법

1. 위임/수탁 기반 라우팅 개념 및 원리

QAES을 위한 라우팅 프로토콜에서는 IP 인터페이스 (혹은 링크)를 가장 많이 sleep 상태로 두면서, IP 네트워크가 제공하는 QoS(Quality of Service)를 만족할 수 있도록 하는 것이다. 그러므로 경로의 위임/수탁 기능을 수행하는 위임/수탁 라우터를 결정하고, 라우팅 경로(SPT)를 새로이 변경하는 방식이 가장 바람직스럽다. 따라서 sleep 링크 양단의 NIC가 sleep 상태에 들어감으로써 에너지가 절감되고 있다. 이러한 전략은 통상 IP 네트워크에서 OSPF 프로토콜이 정상적으로 동작하

지만, IP 네트워크가 처리하는 전체 트래픽 량이 특정 값 이하가 되면 자동적으로 Green-OSPF 프로토콜이 동작하도록 한다. 이때 IP 네트워크의 일부 링크가 sleep 상태로 되어 에너지 소모가 절약되는 것이다. OSPF 프로토콜은 LSA DB 등에 의해 링크의 상태를 항상 감시 할 수 있으므로, IP 네트워크 내의 각 링크를 통해 전달되는 총 트래픽 량 및 경로(path) 수를 파악 할 수 있다.

본 논문에서 IP 네트워크에서 sleep 상태로 둘 target 링크 선정, 이에 따른 라우팅 경로의 최소 변경과 sleep 상태로 둘 최대 링크를 결정하는 한 방안을 제안하고, 그의 특성을 분석한다.

IP 네트워크에서 sleep 상태로 둘 target 링크 선정은 네트워크에서 요구하는 QoS를 만족시키면서 에너지 소모를 최소화 할 수 있어야 한다. 따라서 target 링크의 선정은 heuristic 방법에 의존 할 수밖에 없다. 그러므로 여기서는 target 링크가 결정되었다고 가정하고 target 링크로 인해 관련 라우터의 SPT 변경 절차를 설명한다.

Target 링크가 잠정 결정되면, target 링크의 시점(start) 라우터와 끝점(end) 라우터 그리고 이 target 링크가 담당하고 있는 트래픽을 대체 할 수 있는 경로를 선택한다. 다음에 알고리즘 절차에 따라 시점(start) 라우터의 SPT를 변경하고, 그 변경된 경로에 따른 네트워크의 QoS를 만족하면 target 링크를 sleep 상태로 둔다. 본 논문에서는 target 링크의 시점(start) 라우터가 target 링크에 흐르는 트래픽을 이웃 라우터에 위임하여 전달하므로, 시점(start) 라우터를 위임 라우터(delegating router: DgR), 트래픽을 위임 받는 라우터를 수탁 라우터(delegated router: DdR)라 한다. 이러한 절차를 트래픽 위임 과정(delegation procedure)이라 한다.

IP 네트워크에서 target 링크의 결정 방법에 따라 sleep 상태로 놓일 링크의 수가 달라 질 것이다. 따라서 target 링크를 결정하는 최적의 해법이 필요하지만, 이는 NP hard 문제로 알려져 있으므로 heuristic 방법에 대해 검토한다. IP 네트워크의 각 링크는 정상적인 상태에서 Dijkstra 알고리즘에 의해 한 개 또는 여러 개의 경로(path)로 이용되고 있는지, 또는 전혀 이용되지 않을 수도 있다. 이때 링크의 양단의 인터페이스(NIC: Network Interface Card)는 경로(path)의 수나 트래픽 량에 관계없이 항상 on 상태이므로 에너지 소모는 동일

하다. 따라서 양단의 NIC를 sleep 상태로 두기 위해, 이 링크를 이용하는 트래픽을 다른 경로로 변경하여야 한다. 이때 경로 변경은 기존 IP 네트워크의 상태에 최소한의 영향을 주는 방향으로 진행되어야 한다. 따라서 target 링크는 ①최소 사용 경로(min_used Path), ②최소 사용 트래픽(min_used traffic), ③임의 방법(random) 등으로 선택적으로 사용하여, 네트워크의 QoS 조건을 만족하는지 조사하여 링크의 sleep 상태를 결정 할 수 있다.

IP 네트워크에서, 최우선적으로 가장 적은 사용 경로(path) 또는 가장 적은 트래픽 량을 사용되는 링크를 target 링크로 정하면, IP 네트워크 내의 QoS 품질 및 현 네트워크 상태에 최소의 영향을 줄 것으로 기대된다. 따라서 IP 네트워크에서 OSPF 프로토콜의 LSA DB의 도움을 받아, 각 링크가 처리하는 경로의 수 및 처리하는 트래픽 량에 따른 오름차순으로 링크를 정렬하여 각 sorting DB에 저장한다. Sleep 상태로 둘 링크를 찾기 위해, 각 sorting DB로부터 순차적으로 링크를 선택하여 target 링크로 정하고, 위임/수탁 라우터를 이용하여 target 링크에 흐르는 트래픽을 대체할 새로운 링크를 찾는 위임 절차 과정을 수행한다. 이를 위임/수탁 라우터 기반의 QoS_Aware_Energy_Saving(QAES) heuristic 방안이라 한다.

본 장에서는 그림 1을 이용하여 위임/수탁 라우터 기반의 QAES heuristic 방안의 기본 동작을 설명한다. 여기서 노드(라우터)는 y, k, i, e, x, f, h, g 이며, target 링크를 l_{ix} 라 하자. 링크 l_{ix} 의 시점 노드는 라우터 i이고, 링크 l_{ix} 의 끝점 노드는 라우터 x이다. 이때 노드 i가 링크 l_{ix} 을 대체 할 다른 링크를 찾아서, 링크 l_{ix} 에 흐르는 트래픽을 다른 노드에 위임하여야 한다. 따라서

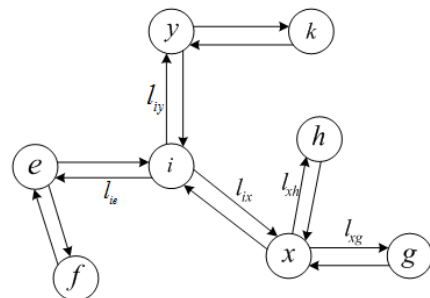


그림 1. DgR 및 DdR 라우터의 선택방법 예
Fig. 1. A selection example of DgR and DdR router.

노드 i 는 위임 라우터 즉 DgR 라우터가 되며, 링크 l_{ix} 을 대체 할 다른 링크를 찾아야 한다. 그림 1에서 보면, 노드 i 와 인접인 노드 e 와 노드 y 로 향하는 링크 즉 l_{ie} 와 l_{iy} 를 대여 링크로 이용 할 수밖에 없다. 따라서 노드 e 와 노드 y 만이 target 링크의 트래픽을 위임 받을 수 있으므로 수탁 라우터 즉 DdR 라우터가 될 수 있다. 본 방식에서 DdR 라우터의 후보 조건은 다음과 같다. 여기서 target 링크는 임의 노드 s 에서 임의 노드 e 로 향하는 링크 $t_{link} < s, e >$ 로 표현한다.

조건①: DdR 라우터는 DgR 라우터의 이웃이어야 하고, target 링크 $t_{link} < s, e >$ 을 경유하는 모든 flow들이 대여 링크 및 DdR 라우터를 경유하여도 원래의 목적지에 도달하는 경로가 있어야 한다. 그리고 DdR 라우터가 결정되면, 원래 target 링크 $t_{link} < s, e >$ 을 경유하는 flow 들은 target 링크 시점 노드에서 대여 링크를 통해, DdR 노드의 SPT를 이용하여 목적지에 전달한다. 즉 DgR 라우터는 DdR 라우터의 SPT를 이용하여 DgR 라우터 자신의 경로를 변경한다. 즉 MPT(Modified Path Tree)를 구성한다. 이때, target 링크 $t_{link} < s, e >$ 를 경유하는 각 flow 들이 target 링크 끝점에서 각 목적지까지 경로는 대여 링크를 경유하여 DdR 라우터에서 각 flow의 목적지 라우터까지의 경로로 대체된다. 이때 대체 경로 및 DdR 라우터의 SPT 일부를 freezing 하는 방법에 따라, DgR 라우터의 새로 변경된 MPT가 원래의 SPT보다 길이가 증가한다.

조건②: DgR 라우터는 트래픽 위임 과정(delegation procedure)에 의해 한번 변경된 경로 즉 MPT가 유지되는 한, DgR 라우터를 시점으로 하는 또 다른 target 경로에 대해서도 트래픽 위임 과정을 수행 할 수 있다. 이때 DdR 라우터의 결정은 이미 선정된 DdR 라우터를 우선적으로 정한다.

조건③: 트래픽 위임 과정(delegation procedure)에 의해 이미 DgR 라우터 기능을 수행한 라우터가 다음 조건을 만족 할 때, transient-DdR(t-DdR) 라우터 기능을 수행한다고 한다. 이 경우, target 링크를 통한 flow들이 t-DdR 라우터를 통해 원래 목적지로 가는 경로가 존재하여야 수행한다.

그림 1에서, 노드 e 및 노드 y 의 SPT가 조건①을 만족하면, 둘 다 DdR 라우터의 후보가 된다. 이 경우 두 노드 e 및 노드 y 중에 이미 DgR 및 t-DgR를 수행한

노드를 우선적으로 선택한다. 그렇지 않을 경우, 노드 i 에서 노드 e 및 노드 y 로 연결된 링크의 코스트가 적은 노드가 우선적으로 DdR 라우터가 된다.

조건④: DdR 라우터의 SPT에 포함되면서 이미 freezing된 링크와 DgR 라우터에서 DdR 라우터까지의 링크, 즉 target 링크를 위한 대여링크는 이후 트래픽 위임 절차에서 target 링크가 될 수 없다.

위의 조건을 그림 1에서 설명하기 위해, 최소 경로를 갖는 링크, 즉 target 링크 l_{ix} 라고 하자. 라우터 i 와 라우터 e 사이에 링크 l_{ie} 가 존재하고, 노드 e 는 상기 조건①을 만족한다면, 링크 l_{ie} 가 target 링크 l_{ix} 의 대여 경로로 된다. 이때 라우터 i 는 링크 l_{ix} 로 전달되는 트래픽을 링크 l_{ie} 를 통해 전달되도록, 라우터 e 을 원점(root)으로 한 SPT를 이용하여 라우터 i 의 SPT 일부를 변경하여 새로운 경로 MPT를 만든다. 변경 후 각 링크에 흐르는 flow의 용량을 예측한다.

이때 각 링크의 flow 용량과 노드의 처리 용량, 식(4)와 식(5)을 만족하는지 검사한다. 만약에 식(4)와 식(5)을 동시에 만족하면, target 링크 l_{ix} 는 sleep 상태로 두고, 이 링크(실행한 target 링크)와 함께 DdR 라우터의 SPT 일부의 링크를 marking(freezing) 하고, 다음 단계의 target 링크 설정(선택) 시에 제외시킨다.

IP 네트워크 내에서 각 링크 및 노드에 흐르는 flow 총량은 식(4)와 식(5)로 나타낼 수 있다. 식 (4)는 단방향 링크에서 처리하는 총 트래픽 량이며, 식(5)는 노드에서 처리하는 총 트래픽 량을 나타낸다. 여기서 노드 j 는 노드 i 의 이웃 노드의 집합이다.

$$f_{ij} = \sum_{s=1}^N \sum_{d=1}^N f_{ij}^{sd} \leq \alpha C_{ij} \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^N f_{ij} + \sum_{i=1}^N f_{ji} \leq \beta C_{ni} \quad \forall j \in i_{\neq} \text{ighbor node} \quad (5)$$

여기서 f_{ij} : 링크 l_{ij} 에 흐르는 트래픽 량

C_{ij} : 링크 l_{ij} 의 최대 처리 용량

C_{ni} : 노드 i 의 최대 처리 용량

$\alpha: 1 \leq \alpha \leq 1, \beta: 1 \leq \beta \leq 1$

$s \in N, d \in N,$

s : source node, d : destination node

N : number of node

다음 단계로 전 단계의 sorting DB에서 marking (freezing)된 링크를 제외하고, 다음 최소의 값 (경로 수 혹은 트래픽 량)을 갖는 링크를 target 링크로 선택하여, 앞서 설명한 방법과 동일하게 DgR 라우터와 DdR 라우터를 선택하고 상기 실행한 과정을 반복 수행한다. 만약에 식(4)와 식(5)를 만족하지 않으면, 설정한 target 링크를 active 모드로 두고, 다음 단계로 계속 진행한다. 이러한 과정은 IP 네트워크 내의 모든 링크에 대해 수행한다.

2. QAES 기반의 위임/수탁 기능의 Heuristic 알고리즘

IP 네트워크는 기본적으로 OSPF 프로토콜을 기반으로 동작하고 있지만, IP 네트워크가 처리하는 총 트래픽 부하가 일정 값 이하가 되면, QAES 기반의 위임/수탁 기능을 갖는 G-OSPF 프로토콜이 동작한다. 여기서는 QAES 기반의 위임/수탁 기능의 heuristic 알고리즘을 제시하고, 그의 기능에 대해 설명한다. 주어진 IP 네트워크의 각 노드(라우터)는 Dijkstra 알고리즘에 의해 모든 라우터에 도달 가능한 SPT(Shortest Path Tree)를 계산하고, 그 경로 테이블을 각각의 라우터에 저장하여 보관하고 있다. 따라서 각 입력(ingress) 라우터에 입력된 트래픽은 각 목적지 출력(egress) 라우터로 최적 경로가 설정되어 있으며, 네트워크 내의 특정 라우터(coordinator)에 의해 QAES 에너지 절약 알고리즘 동작한다.

본 알고리즘의 동작 모드는 target 경로 선택 방법, 그리고 동작 과정에서 특정 링크의 freezing 방법에 따라 알고리즘의 특성이 다르다. 따라서 본 알고리즘의 동작 모드를 3 가지 유형으로 정의하고, target 경로 선택에 따른 특성을 조사하고 최적의 방법을 제시하는 것이 주목적이다. 본 알고리즘의 입력은 IP 네트워크 구조(N :노드, E :링크)와 입력 트래픽이며, 출력은 네트워크의 MPT 및 sleep 상태에 있는 링크의 수, 그리고 알고리즘 수행에 따라 증가된 경로의 hop 수로 나타난다.

본 알고리즘의 pseudo-code는 그림 2와 같으며, 초기 조건은 다음과 같다. 네트워크내의 모든 링크는 "false" 상태로 두고, 각 링크를 입력모드($min_used\ path$, $min_used\ traffic\ volume$, $random$)에 따라 오름차순 혹은 임의의 순서로 정렬하여 $\{l_1, l_2, \dots, l_E\}$ 의 형태로 만든다.

Initial condition:
 - each edge(link) in E set the freezing mode of the edge to "false."
 - sort all the edges(links) in E according to increasing order of (the number of paths, the volume of traffic, random) through each edge(link).
 $\rightarrow \{l_1, l_2, \dots, l_E\}$

1. for $i = 1$ to $|E|$ do
2. if the freezing mode of is "true", then
3. continue
4. let $l_i = \langle s, e \rangle$, //where $s \in N$ and $e \in N$ s:stat node, e:end node
5. find the list C of nodes d . // find candidates as a DdR

$d \neq s, d$ is a neighbor node of s , link $\langle s, d \rangle$ is not in "sleep" state, and the freezing mode of link $\langle s, d \rangle$ is "false".

6. arrange all nodes in C
7. find all edge(destination) nodes b of G and list in B

such that path from node s to edge(destination) node b is passing edge $\langle s, e \rangle$. then, let B the list of such nodes.

8. for each node d in C do
9. check whether there exists a path from s to each node b in B

such that edge $\langle s, d \rangle$ is in the path but edge $\langle s, e \rangle$ is not in the path.

10. if so, then
11. save SPT of s .
12. modify SPT of s

in a way that
 for each b in B ,
 suppose the routing element for b is $[e, b]$.
 replace $[e, b]$ by $[d, b]$.
 end for

13. recompute the flow volume of each(destination) edge of G
14. if volume of all edges and nodes meet eq.4 and eq.5 then
15. put the edge $\langle s, e \rangle$ in "sleep" state.
 //edge $\langle s, e \rangle$ is called as $t_{link}(s, e)$
16. set freezing mode of edge $\langle s, d \rangle$ to "true".
 // method-1
17. label nodes s as "DgR" if s is unlabeled,
 or as "Dg/DdR" if s is "DdR."
18. label node d as "DdR" if d is unlabeled,
 or as "Dd/DgR" if d is "DgR"
19. break
20. else
21. restore SPT of s using the saved SPT of 11).
22. end if // 14)
23. end if //10
24. end for //8
25. end for //1
26. Output the modified SPT's of all nodes in network G ,
 and the list of edges in "sleep" state.
27. End

그림 2. Pseudo Code of Heuristic Algorithm
Fig. 2. Pseudo code of heuristic algorithm.

그림 2는 정렬된 각 링크들에 대해 target 링크로 적합한지를 순차적으로 검사하고, sleep 링크로 선별하는 과정을 나타내고 있다. 라인 1에서 라인 3까지는 각 링크가 freezing 되어 있으면, target 링크로 선정하지 않는다. 라인 4에서 링크가 target 링크로 잠정 결정되면, 라인 5에서 DdR 라우터 후보를 찾고, 라인 6에서


```

set freezing mode of edge <s, d> to "true". // method-1
set freezing mode of edge <s, d> to "true" // method-2
for each node b in B,
    set freezing mode of all edges of path from n to b to "true"
end for
set freezing mode of edge <s, d> to "true" // method-3
for each node b in B,
    set freezing mode of all edges on path from d to b to "true"
end for
for each boundary node c of G
    find the path from c to s.
    set freezing mode of all edges on the path to "true"
end for
    
```

그림 3. 각 방식에 대한 pseudo 코드
 Fig. 3. Pseudo code of each method.

DdR 라우터 후보들의 우선순위를 정한다. 라인 7에서는 target 링크를 통해 흐르는 flow의 목적지 노드를 찾는다. 라인 8에서는 각 후보의 DdR 라우터를 경유하여 라인 7에서 구한 flow의 목적지로 가는 경로가 있는지 조사한다. 라인 10에서 12까지는 경로가 존재하면, target 링크의 시작점 라우터 즉 DgR 라우터의 SPT를 변경하고, 라인 13에서 네트워크의 링크 및 flow 용량을 계산하여 식(4)와 식(5)을 만족하는지 조사한다. 만약에 만족하면 target 링크는 sleep 상태로 두고, 관련된 링크의 freezing 상태를 결정한다. 이때 링크의 freezing 범위 및 방법에 따라 네트워크의 에너지 절감 특성이 다르다. 그러므로 본 논문에서는 그림 3과 같이 3가지의 freezing 방식에 대해 분석한다.

방식①: 대역 링크(delegating link)만 freezing 시킨다.

방식②: 대역 링크(delegating link) 및 DdR 라우터에서 각 flow의 목적지 라우터까지 가는 모든 경로를 freezing 시킨다.

방식③: 방식②이외에 각 flow의 source 라우터에서 DgR 라우터까지의 경로를 추가하여 freezing 시킨다.

3가지 방식에 대해서는 그림 2의 라인 16에 그림 3의 내용으로 변경함으로써 가능하다. 만약에 식(4)와 식(5)의 조건을 만족하지 못하면 라인 21처럼 경로를 원상복귀하고, 다음 순위의 DdR 라우터 후보에 대해 순차 수행한다. 그래도 조건을 만족하지 못하면 다음 순위의 target 링크를 찾아 반복하며, 모든 링크에 대해 완료하면 종료한다.

본 논문에서는 그림 3과 같은 3가지 방식에 대해, 3가지 target 링크 선정 유형 별로 sleep 링크의 수(링크 감소 특성) 및 경로 증가 특성에 대해 조사한다.

VI. 특성 분석 및 평가

1. 시뮬레이션 네트워크 모델

QAES 기반 위임/수탁 기능의 heuristic 해법의 특성을 파악하기 위해 시뮬레이션 네트워크 모델을 그림 4와 같이 구성하였다. 그림 4는 44개의 노드와 124개의 단방향 링크로 구성되어 있다. 22개의 ingress/egress (edge) 노드에 입력 컴퓨터 혹은 사설망이 접속되며, edge 노드의 입출력 링크의 속도는 동일하다고 가정하고, 코어 네트워크의 링크 속도는 edge 링크 속도보다 동일하거나 높을 수도 있다.

그림 4에 표시한 모든 링크는 양 방향성을 가지고 있다. 시뮬레이션을 간단히 하기 위해 모든 링크의 에너지 소모도 동일하다고 가정한다. 각 edge(ingress) 노드에 인가된 트래픽은 임의의 비율로 서로 다른 목적지 edge(egress) 노드로 전달된다. 각 링크 및 노드의 최대 부하는 일정 값(예) 이하로 설정하고, 본 알고리즘의 특성 비교를 위해 식(3)에서 제시한 파라미터 η_e 을 사용

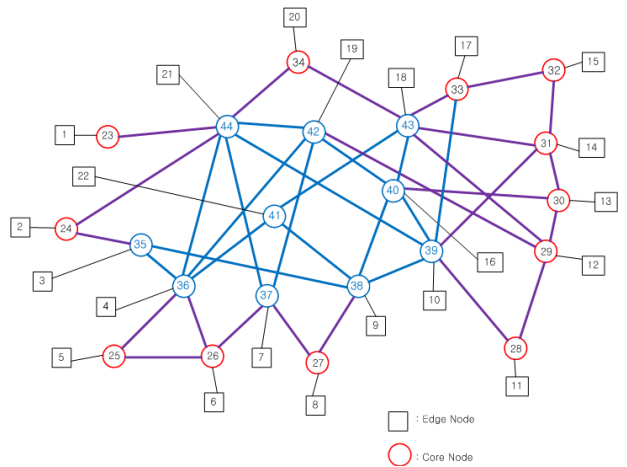


그림 4. 네트워크 시뮬레이션 모델
 Fig. 4. Network simulation model.

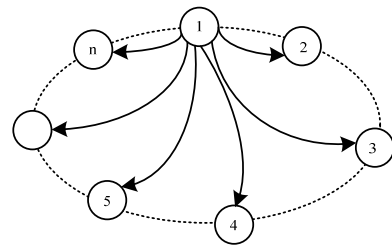


그림 5. 순차 차등 트래픽 분배의 개념도(노드 1에서)
 Fig. 5. Description of circular traffic distribution. (at node 1)

한다. 시뮬레이션은 C++ 언어를 사용하였으며, 이때 사용한 트래픽 패턴은 다음과 같다.

그림 5의 네트워크 모델에서 각 edge(ingress) 노드에 입력되는 트래픽은 모든 edge(egress) 노드로 출력되며, 이때 입력되는 트래픽은 3가지 유형으로 가정하였다.

① 트래픽 유형 I(Uniform Traffic Pattern)

Ingress 라우터에 입력되는 트래픽은 네트워크를 통해 균등한 비율로 모든 egress 라우터로 전달된다.

② 트래픽 유형 II(Circular Traffic Pattern)

Ingress 라우터에 입력되는 트래픽은 목적지 egress 라우터로 그림 5와 같이 순차 분배된다. 그림 5에서는 edge 노드를 n개로 가정하였으며, 노드 1에서 입력된 트래픽은 네트워크를 통해 노드 2로는 입력 트래픽량의 $1/\sum_{i=1}^n i$ 이고, 노드 3로는 $2/\sum_{i=1}^n i$ 등으로 순차 차등 분배되어 전달되는 것을 말한다. 노드 2로 입력되는 트래픽은 노드 3로는 입력 트래픽량의 $1/\sum_{i=1}^n i$, 노드 4로는 $2/\sum_{i=1}^n i$ 등으로 순차 차등 분배되어 전달된다. 모든 ingress 라우터에서 동일한 방법으로 입력되는 트래픽 량을 이상과 같이 egress 라우터로 순차 차등 분배되는 것을 의미한다.

③ 트래픽 유형 III(Random Traffic Pattern)

각 ingress 라우터에서 모든 egress 라우터로 향하는 트래픽 비율이 어떠한 형태를 갖지 않고 자유로운 비율로 전달되는 트래픽 유형을 말한다.

앞 장에서 제시한 3가지 freezing 방식에 대해, 상기 설명한 트래픽 유형에 대한 특성을 조사한다. 이때 알고리즘에 적용되는 입력 조건은 최소 경로를 갖는 링크 순으로 정렬한 min_path 입력, 최소 트래픽 량을 운반하는 링크 순으로 정렬한 min_used 입력과 랜덤하게 링크를 정렬한 random 입력이다.

2. 특성 분석 및 평가

시뮬레이션에서 코아 링크의 속도는 edge 링크의 1.5배로 하였으며, 앞 장에서 설명한 것과 같이 freezing 범위에 따라 3가지 방식으로 하였다. 각 ingress 노드에 가해지는 트래픽은 트래픽 유형 I, 입력 부하는 $\rho_i = 0.1$, 내부 링크의 트래픽 용량은 $\rho_l = 0.9$ 로 제한하고, 시뮬레이션 한 결과를 표 1에 요약하였

표 1. 시뮬레이션 결과 요약(uniform traffic)
Table 1. Summary of simulation results.
(in case of uniform traffic)

Heuristic type 항목	Min-used Path			Min-used Traffic			Random		
	전체 노드 수	44			44			44	
전체 링크 수	124			124			124		
사용 링크 수(적용 전)	123			123			123		
알고리즘 적용 후 결과	방식1	방식2	방식3	방식1	방식2	방식3	방식1	방식2	방식3
사용 링크 수	92	101	115	92	101	115	93	104	119
효율 (η_e (%))	0.84	0.59	0.22	0.84	0.59	0.22	0.80	0.49	0.11
경로당 평균 증가 홉 수	1.33	0.59	0.11	1.33	0.59	0.11	1.30	0.55	0.14

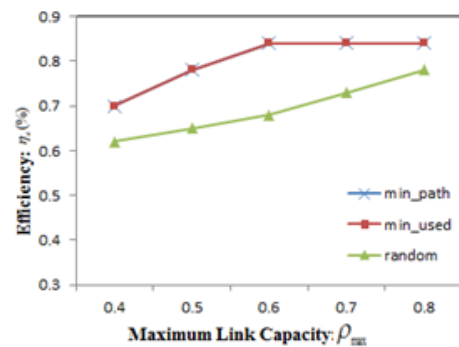


그림 6. 입력 유형별 에너지 절감 효율 η
($\rho_i = 0.1$, method-I)

Fig. 6. Efficiency η of QAES on input sorting type.

다. 표 1에서 보면, min_path 및 min_used 기반의 입력은 결과가 동일하고, random 입력은 링크 감소 효율이 min_path 및 min_used 입력보다 떨어진다. 그 이유는 트래픽 유형 1에서는 min_path 및 min_used 기반 heuristic 입력에서, 정렬한 입력 값(sorted link value)이 동일하기 때문이다. 링크 감소 효율은 방식 1이 84%, 방식 2는 59%, 방식 3은 22% 이지만, 이로 인해 경로의 평균 홉 수는 각각 1.3홉, 0.6홉, 0.1홉의 증가로 손해를 보고 있다.

다음에 min_path, min_used, random 입력 heuristic 유형에 대해 링크 감소 특성을 방식 1로 조사하였으며, 그 결과를 그림 6에 나타냈다. 입력은 트래픽 유형 I이며, 가로 축은 링크의 최대 용량, 세로축은 링크 감소 효율 $\eta(\%)$ 을 나타냈다. Min_path나 min_used형 입력은 링크 감소 효율이 random형 입력보다 높으므로, 에너지 절약 특성이 우수함을 알 수 있다.

그림 7은 min_path 입력에 대해 각 방식별 감소 효율을 나타내고 있다. 감소 효율은 방식 1이 가장 우수하고, 다음은 방식 2와 방식 3의 순으로 링크 감소 효율

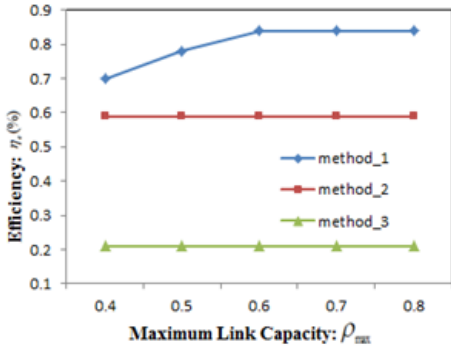


그림 7. 방식 별 에너지 절감 효율 ($\rho_i = 0.2$, min-path)

Fig. 7. Efficiency η_i of each method on min-path. ($\rho_i = 0.2$, min-path)

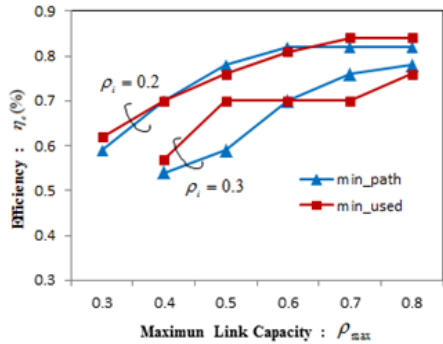


그림 8. Heuristic 입력 유형별 절감 효율 (방식 1, circular traffic)

Fig. 8. Efficiency η_i of each heuristic input type. (in case of method-1 and circular traffic)

이 높다. 그 이유는 링크의 freezing 범위가 역 순으로 크기 때문에 sleep 모드로 만들 링크의 수가 줄어들기 때문이다.

그림 8은 방식 1에서, 트래픽 유형 II(Circular Traffic)에 대한 heuristic 입력 유형별 링크 절감 효율을 나타냈다. 입력 부하가 $\rho_i = 0.2$ 일 때, 대체로 min_used 기반 입력이 우수함을 알 수 있다. 그러나 입력 부하가 $\rho_i = 0.3$ 일 때, 최대 제한 링크 부하 ρ_{max} 가 일정 값 이상이면 min_path 기반 입력이 약간 우수함을 알 수 있다. 이는 특정 트래픽 패턴에 의존하며, 전반적으로는 min_used 기반 입력이 전반적으로 약간 우수하다 것을 알 수 있다.

그림 9는 입력 트래픽은 트래픽 유형 II에 대해, heuristic 입력별 링크 감소 효율을 방식 2 및 방식 3에 대해 나타냈다. 방식 2에서는 min_used 입력이 min_path 입력보다 전반적으로 약간 우수하며, random

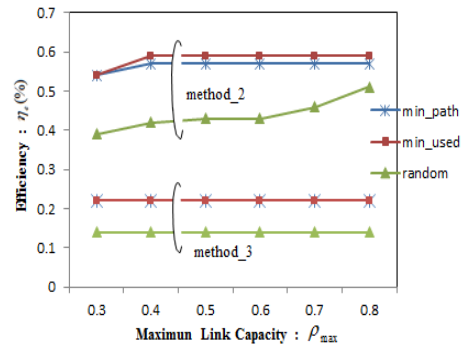


그림 9. Heuristic 입력 유형별 감소 효율 ($\rho_i = 0.2$, circular traffic)

Fig. 9. Efficiency η_i of each heuristic input. ($\rho_i = 0.2$, circular traffic)

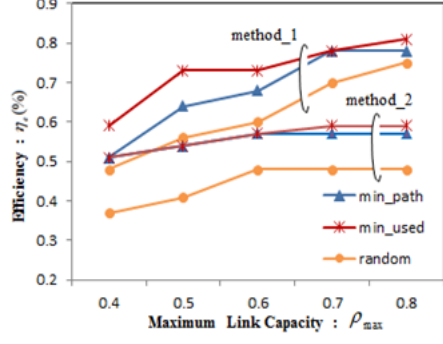


그림 10. Heuristic 입력 별 감소 효율 ($\rho_i = 0.3$, random traffic)

Fig. 10. Efficiency η_i of each heuristic input. ($\rho_i = 0.3$, random traffic)

입력보다 확실히 우수하다. 방식 3에서는 min_used 및 min_path 입력은 결과가 동일하다. 그 이유는 소규모 네트워크에서는 링크 freezing 범위가 넓어 sleep 상태가 될 링크를 제한되기 때문이며, 대규모 네트워크에서는 차이가 있을 것이라 본다. 그러나 random 입력은 링크 감소 효율이 전반적으로 낮음을 알 수 있다.

그림 10은 트래픽 유형 III에 대해 링크 감소 효율을 분석하였다. 그 결과는 min_used 입력이 다른 두 heuristic 입력보다 링크 감소 효율이 좋다.

각 heuristic 입력을 네트워크에 적용한 후, 증가된 경로의 특성을 파악하기 위해, 트래픽 유형 III에 대해 조사하였다. 그 결과를 그림 11에 평균 증가된 홉 수로 나타냈다. 각 노드의 입력 ρ_i 는 0.3이며, 방식 1 및 방식 2에 대해 나타냈다. 그 결과 min_path 입력에서 증가된 홉 수가 가장 적고, 다음은 min_used 입력임을 알 수 있다. 그러나 링크 절감 효율 면에서 그 반대의

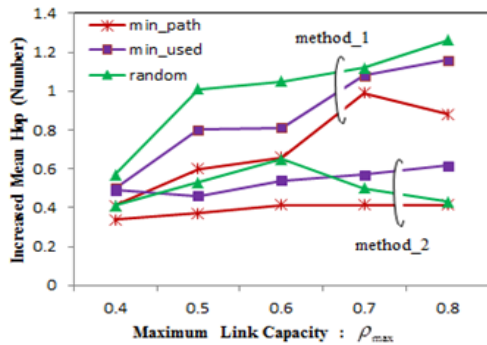


그림 11. Heuristic 입력별 증가 홉 수 ($\rho_i = 0.3$, random traffic)

Fig. 11. Increased mean hops of each heuristic input. ($\rho_i = 0.3$, random traffic)

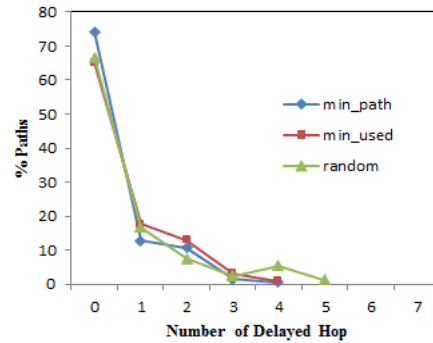


그림 13. Heuristic 입력 별 SPT의 지연된 경로 비율 ($\rho_i = 0.2$, 방식 2, random traffic)

Fig. 13. Delayed hop rate of SPT on each input heuristic. ($\rho_i = 0.2$, method 2, random traffic)

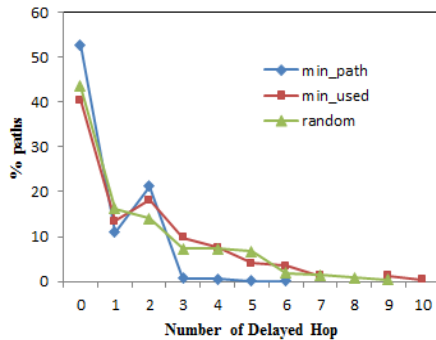


그림 12. Heuristic 입력 별 지연된 SPT 경로 비율 ($\rho_i = 0.2$, 방식 1, random traffic)

Fig. 12. Delayed hop rate of SPT on each input heuristic. ($\rho_i = 0.2$, method 1, random traffic)

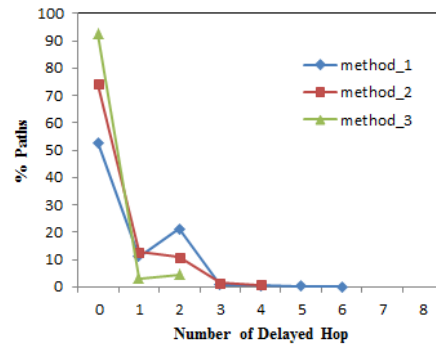


그림 14. 방식 별 SPT의 증가된 경로 비율 ($\rho_i = 0.2$, min_path 및 random traffic)

Fig. 14. Delayed hop rate of SPT on each method. ($\rho_i = 0.2$, min_path and random traffic)

결과를 가져 왔으며, 이는 링크의 절약 효율을 증가되지만 홉 수의 증가로 지연 면에서 손해를 보고 있음을 알 수 있다.

그림 12는 방식 1에서 각 heuristic 입력에 대해 증가된 링크의 특성을 hop 수로 나타냈다. 본 알고리즘 적용 후, 경로가 전혀 변하지 않는 비율은 min_path가 가장 높고, 그 다음이 min_used 이다. Min_path 방안은 6홉 이상 증가하지 않지만, min_used 방안은 10홉까지 증가하는 경로도 있다. 그리고 SPT의 경로 무 변화율은 min_path 입력에서 55% 그리고 min_used 입력에서 45% 정도이며, random의 입력 경우는 40% 정도가 임을 알 수 있다.

그림 13은 방식 2에서 그림 12와 똑 같은 방법으로 조사하였다. 홉 수의 증가는 min_path가 min_used 보다 증가된 경로의 홉 수가 적음을 알 수 있다. 두 경우 모두 최대 4홉 이내로 제한됨을 알 수 있다. 방식 2는

방식 1보다 경로 감소에 의한 에너지 절약 효과는 낮지만, SPT의 홉 수의 약 70% 정도는 변화하지 않음을 알 수 있다. 따라서 경로 증가와 에너지 절약이라는 두 관점에서 trade off 하여야 한다.

Min_path, min_used, random 입력 heuristic 유형에 대해 SPT의 증가 특성을 그림 14 및 그림 15에 나타냈다. 그 결과에 의하면, 방식 3은 최대 경로 증가를 최대 2홉을 이내로 제한됨을 알 수 있다. 그러나 링크 절약에 의한 에너지 효율은 제일 낮다. 그 이유는 heuristic 알고리즘 수행 시, sleep 상태로 만들 링크를 찾은 후에 freezing 범위를 다른 방식보다 크게 정하기 때문이다. 이 방식은 기존의 OSPF 프로토콜의 변경을 최소화하여 적용 할 수 있는 장점을 가지고 있다.

지금까지 실험한 결과를 요약하면, 링크 감소 특성은 min_used heuristic, min_path heuristic, random heuristic 입력 순으로 가장 효율이 좋다. Min_used

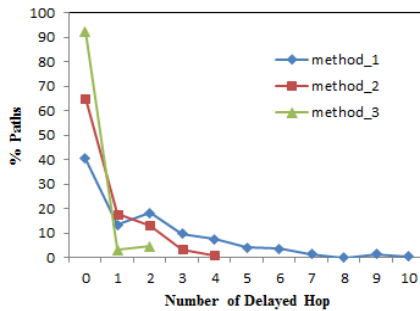


그림 15. 방식 별 SPT의 증가된 경로 특성
($\rho_i = 0.2$, min_used, random traffic)

Fig. 15. Delayed hop rate of SPT on each method.
($\rho_i = 0.2$, min_used, random traffic)

heuristic 입력인 경우, 방식 1에서는 80%, 방식 2에서는 60%, 방식 3에서는 22% 정도 링크 감소 효율을 얻을 수 있었다.

다음으로 min_path heuristic 입력 방안이며, 이는 링크 감소 효율에서 min_used heuristic 입력과 별 차이가 없지만 다소 효율이 낮음을 알 수 있었다. 그러나 각 방안에서 효율이 증가하면, 동시에 경로의 길이도 함께 증가함을 알 수 있었다. QAES 기반의 위임/수탁 기능의 heuristic 알고리즘은 LSA DB의 min_path나 min_used 정보를 이용하여, sleep 상태에 둘 target link가 즉시 선택되어 알고리즘 수행이 간단하다.

V. 결 론

IP 네트워크 자원(resource)은 일일 및 시간 트래픽의 변동을 무시하고 피크 시간대의 트래픽을 기반으로 설계되었다. 이를 고려한 에너지 절약 모델로, 본 논문에서는 IP 네트워크가 제공하는 QoS(Quality of Service)를 만족하면서 경로의 위임/수탁 기능을 수행하는 QAES 기반의 위임/수탁 기능의 heuristic 알고리즘을 제안하고, 그 특성을 평가하였다. 제안한 방식은 sleep 모드에 둘 target 링크 선정 방법과 target 링크 확정 후 관련 링크를 freezing 시키는 범위에 따라 3가지 방법을 나타냈고, 그 특성을 평가하였다. 본 논문에서 제안한 전략은 통상 IP 네트워크가 정상적으로 동작하지만, IP 네트워크가 처리하는 총 트래픽량이 특정 값 이하가 되면 자동적으로 동작하는 G-OSPF 프로토콜 개념이다.

시뮬레이션 결과, 링크 감소 특성은 min_used

heuristic, min_path heuristic, random heuristic 입력 순으로 가장 효율이 높았다. 그러나 효율이 증가하지만, 반면에 알고리즘 수행에 따라 경로가 증가함을 알 수 있다. 알고리즘 적용 전 경로에 가장 가깝고, 최대로 증가되는 홉 수가 가장 적은 방안은 min_path heuristic 입력임을 알 수 있었다. Min_used heuristic이나 min_path heuristic 입력 방식을 사용하면, 네트워크가 사용하는 에너지를 감소시키면서 경로 증가를 일정 범위 이내로 제한시킬 수 있음을 확인 하였다. 따라서 제안한 방안들을 혼용하여 사용하면 네트워크가 제공하는 성능을 최대한 만족시키면서 사용 에너지를 감소시킬 수 있음을 확인 할 수 있었다.

또 금후 과제로 대형 IP 네트워크의 정보를 기반으로 본 논문에서 제시한 방법에 대해 자세한 특성 파악이 필요하며, 실제 적용 가능하도록 기존 네트워크 라우팅 프로토콜인 OSPF와 연계성 등이 더 연구 등이 필요하다. 이에 대한 연구도 진행되어야 한다.

REFERENCES

- [1] M.Pickavet, W.Vereecken, et al. "Worldwide energy needs for ICT:the rise of power-aware networking," 2008 IEEE ANTS.
- [2] K. W. Roth, F. Goldstein, et al., "Energy Consumption by Office and Telecommunication Equipment in Commercial Buildings-Volume I: Energy Consumption Baseline," Tech. Rep. 72895-00, Arthur D. Little, Inc, Jan. 2002.
- [3] Gupta, M. and Singh, S., "Dynamic Ethernet Link Shutdown for Energy Conservation on Ethernet Links," IEEE ICC 2007
- [4] Juan Camilo Cardona Restrepo et al., "Energy Profile Aware Routing," IEEE ICCW 2009.
- [5] Chiaraviglio, L. Mellia, M.and Neri, F., "Reducing Power Consumption in Backbone Networks," Communications, 2009. ICC '09. IEEE International Conference on, Issue Date: 14-18 June 2009.
- [6] Antonio Cianfrani, Vincenzo Eramo, et al., "An Energy Saving Routing Algorithm for a Green OSPF Protocol," IEEE INFOCOM 2010.
- [7] Antonio Cianfrani, Vincenzo Eramo, et al., "An OSPF Enhancement for energy saving in IP Networks," IEEE INFOCOM 2011.
- [8] Antonio Cianfrani, Vincenzo Eramo, et al., "An

OSPF-Integrated Routing Strategy for QoS-Aware Energy Saving in IP Backbone Networks," IEEE Transactions on Network and Service Management, March 2012.

— 저 자 소 개 —



한 치 문(정회원)-교신저자
1990년 The University of Tokyo,
전기공학전공, 공학박사
1977년 2월~1983년 3월 KIST
연구원
1983년 4월~1997년 2월: ETRI
선임 및 책임연구원, 교환
기술연구단 계통연구부장
역임

1997년 3월~현재 한국외국어대학교 전자공학과
교수

<주관심분야 : 에너지 saving 네트워크, 차세대
인터넷, 센서 네트워크, 네트워크 보안, 네트워크
설계 및 성능 분석 등>



김 상 철(정회원)
1994년 미시간 주립대학교 컴퓨터
공학전공, 공학박사
1983년 3월~1994년 8월 ETRI
연구원

1994년 9월~현재 한국외국어대
학교 컴퓨터공학과 교수

<주관심분야 : 센서 네트워크, 차세대 인터넷, 계
임 AI, 멀티미디어시스템 등>