

통신망 QoS를 위한 라우팅과 용량 증설의 계층간 최적화 기법

정회원 신 봉 석**, 준회원 이 현 관*, 박 정 민*, 정회원 김 동 민*,
정회원 김 성 룬*, 이 상 일***, 안 명 길***

Cross-layer Design of Routing and Link Capacity Extension for QoS in Communication Networks

Bong-Suk Shin** *Regular Member*, Hyun-kwan Lee* *Associate Member*, Jung Min Park*, Dong Min Kim* *Regular Member*, Seong-Lyun Kim* *Regular Member*, Sang-il Lee***, Myung-kil Ahn***

요 약

본 논문에서는 사용자의 QoS (Quality of Service) 만족을 위해 할당하는 통신 자원에 대한 비용을 최소화하는 기법을 제안한다. 전송 지연이나 손실과 같이 사용자의 QoS를 결정짓는 요소들은 링크 사용률에 의존하게 되므로 링크 사용률에 따른 비용함수를 정의한다. 우선 네트워크 효용 최대화 (Network Utility Maximization) 문제로부터 기본적인 용량 계획 문제를 만들고, 하나의 토폴로지를 예로 들어 기본적인 용량 계획 문제의 해법이 최적의 해법을 제시하지 못한다는 것을 증명한다. 기본적인 용량 계획 문제의 해법을 초기 값으로 설정하고 라우팅과 용량 증설의 계층간 최적화 기법을 통하여 최적의 용량 계획 방법을 제시한다. 이 용량 계획 방법은 점차 증가하고 있는 평균 트래픽 양을 고려했을 때, 어떤 링크에 얼마만큼의 추가 자원이 필요할지에 대한 효과적인 해법을 제시할 수 있다.

시뮬레이션 결과를 통해, 제시한 토폴로지에서도 최소 비용으로 수렴하는 것을 확인한 후에 좀 더 복잡하고 일반적인 네트워크에서도 수렴함을 보인다.

Key Words : Capacity Planning, Routing, Capacity Extension, Cross-layer Design, QoS

ABSTRACT

This paper considers the cost minimization problem to satisfy QoS (Quality of Service) requirements for a given network, in particular when communication resources to each link can be additionally assigned. For the purpose of quantifying QoS requirements such as data transfer delay and packet loss, we introduce the cost function considering both the link utilization factor and the additionally assigned resource. To minimize this cost function, we firstly formulate a Basic Capacity Planning (BCP) problem, a special case of Network Utility Maximization (NUM). We show that the solution of this BCP problem cannot be optimal via a counter example. In this paper, we suggest the cross-layer design of both additionally assigned resource and routing path, whose initial values are set to the result of BCP problem. This cross-layer design is based on a heuristic approach which presents an effective way to plan how much communication resources should be added to support the QoS requirements in future. By simulation study, we investigate the convergence of the cost function in a more general network topology as well as in a given simple topology.

※ 본 연구는 국방과학연구소 연구용역과제(UD080036ED)의 지원 및 관리로 수행되었습니다

* 연세대학교 전기전자공학과 무선자원최적화 연구실(slkim@ramo.yonsei.ac.kr), ** LIG 넥스원 통신연구센터(bongsuk.shin@lignex1.com)

*** 국방과학연구소(happymkahn@add.re.kr)

논문번호 : KICS2009-10-481, 접수일자 : 2009년 10월 26일 최종논문접수일자 : 2010년 12월 3일

I. 서 론

사용자가 요구하는 데이터 전송량이 증가함에 따라 효율적인 통신 자원 할당에 대한 연구의 중요성은 더욱 커지고 있다. 이전의 음성이나 텍스트 형식의 정보와는 다르게 동영상과 같은 멀티미디어 정보들의 전송이 요구됨에 따라 기존에 주어진 통신자원의 효율적인 분배뿐 아니라, 추가적인 통신 자원 할당이 불가피해진 것이다. 하지만 추가로 설치되는 통신 자원은 상당한 비용이 들어갈 수도 있고 무선 통신 자원 같은 경우 정해진 자원의 양이 한정되어 있기 때문에 임의의 통신 자원을 무한정 추가시킬 수 없다. 또한 자원의 추가적인 설치가 오히려 전체 성능을 저하시킬 수 있다는 Braess Paradox를 통신 네트워크 관점에서 설명하고 있는 경우도 있다¹²⁾. 따라서 무조건적인 용량 증설 계획을 세울 것이 아니라, 각 링크의 사용률과 용량 증설에 따르는 비용을 고려한 용량 계획이 필요하다. 본 논문에서는 추가되는 통신 자원과 링크 사용에 따르는 비용을 최소화하기 위한 라우팅과 용량 증설의 계층간 최적화 기법을 제시한다.

주로 라우팅과 링크 용량 증설에 관한 문제들은 각각 독립적으로 고려되어 왔다³⁻⁸⁾. 하지만 해당 링크의 용량을 결정하는 문제와 플로우를 할당할지 말지를 결정하는 라우팅 문제는 서로의 상관관계를 고려했을 때, 동시에 고려되어야 한다. 용량 증설과 플로우 할당 간의 이런 상관관계로 인해 계층간 최적화에 대한 연구들 또한 진행되어 왔다⁹⁻¹³⁾. 논문[12]에서는 최소 비용의 용량 할당과 최소 지연 시간의 플로우 할당 문제를 반복적으로 수행함으로써 지역 최적점을 찾아 가는 알고리즘을 제시하였다. 논문 [13]의 Gerla와 Kleinrock 또한 논문 [12]와 유사한 접근 방법으로, 위 두 가지 문제를 해결하기 위해 4가지 휴리스틱 알고리즘을 제시하였다.

본 논문에서는 링크 사용률을 기반으로 최소 비용의 용량 계획을 위한, 라우팅과 용량 증설의 계층간 최적화 기법을 제시한다. 링크 사용률은 패킷 딜레이와 패킷 손실에 영향을 주는 요인이므로 QoS를 나타내는 메트릭으로 자주 사용되고 있다¹⁴⁾. 논문[15]에서는 링크사용률을 비용으로 활용할 수 있음이 나타나 있다.

지역 최적점에 빠지는 확률을 낮추고 글로벌 최적점으로 수렴할 확률을 높이기 위하여 시뮬레이티드 어닐링 기반의 라우팅 알고리즘¹⁶⁾과 랜덤 서치 기반의 용량 증설 알고리즘을 동시에 고려할 것이다. 전체 비용은 각 링크의 사용에 따른 비용과 추가되는 용량에 따른 비용으로 구성된다. 단순히 용량이 부족한 링크에

자원을 추가 할당하는 방법 이외에, 라우팅과 함께 고려가 되었을 때 더 적은 비용으로 용량 계획을 할 수 있다는 것에 대한 하나의 예를 제시할 것이다. 이를 기반으로 라우팅과 용량 증설의 계층간 최적화 알고리즘을 제시하고 시뮬레이션을 통해 전체 비용의 수렴을 보인다.

제 II 장에서는 계층간 최적화의 필요성과 그 알고리즘에 대해서 소개하고, 제 III 장에서는 소개된 알고리즘의 시뮬레이션을 통해 제시된 기법의 적합성을 증명한다.

II. 라우팅과 용량 증설의 계층간 최적화

2.1 기본적인 용량 계획 문제

2.1.1 네트워크 효용 최대화 (Network Utility Maximization) 문제

네트워크 효용 최대화 (NUM)는 적절한 효용함수를 정의하고 그 효용함수의 합을 최대화하는 전송량을 찾는 기법¹⁷⁾이다. 식 (1)과 같이 수식화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{maximize} \quad \sum_s U_s(x_s) \\ & \text{s.t.} \quad Rx \leq c \\ & \quad \quad x \geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$U_s(x_s)$ 는 각각의 세션 전송량 x_s 에 대한 함수로 정의되는 효용함수이다. 따라서 $\sum_s U_s(x_s)$ 은 총 네트워크 효용이 된다. 제약조건에서의 행렬 R 은 세션 개수만큼의 행과 링크 개수만큼의 열을 가진다. 즉, 행렬 R 은 각 세션이 지나는 라우팅 경로를 나타낸다. x 는 모든 노드가 처리해야 하는 전송량들의 벡터이며 c 는 모든 링크의 용량을 나타내는 벡터이다. 행렬 R 과 벡터 x 를 곱한 값이 링크 용량 벡터인 c 보다 작아야 한다는 것은 실제하는 링크의 용량보다 적은 양의 트래픽이 지나야 한다는 제약조건의 의미가 있다. 또한 모든 전송량은 0보다 크거나 같은 값이어야 한다. 이러한 네트워크 효용 최대화 문제를 이용하여 기본적인 용량 계획 문제를 설계할 수 있다.

2.1.2 기본적인 용량 계획

일반적인 네트워크 효용 최대화 문제에서는 라우팅 행렬과 링크 용량은 고정된 값이다. 즉, 라우팅과 링크 용량이 주어졌을 때 보낼 수 있는 적절한 전송량을 결정하는 문제이다. 이 문제를 링크 용량 증설 문제로 바꾸면 전송량이 주어져 있을 때 적절한 라우팅과 적절

한 링크 용량을 찾는 문제가 된다. 만약 라우팅까지 고정되어 있다면 적절하게 링크 용량만을 변화시키는 기본적인 용량 계획 문제로 단순화할 수 있다. 기본적인 용량 계획 문제는 식 (2)와 같이 수식화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{maximize} \quad \left(\sum_{s \in S} \frac{x_s}{c_l} \right) / L \\ & \text{s.t.} \quad R\mathbf{x} \leq \eta\mathbf{c} \\ & \quad \quad \mathbf{x} \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

L 과 l 은 각각 전체 링크의 개수와 특정 링크 l 을 나타낸다. c_l 은 링크 l 의 용량을 나타내며 S_l 은 링크 l 을 지나는 모든 세션들의 집합을, s 는 특정 세션을 나타낸다. x_s 는 해당 세션을 통해서 보내는 트래픽 양을 나타낸다. 링크 사용률은 특정 링크의 용량 대비 실제 사용량의 비율이다. η 는 링크 사용률의 상한선을 나타내는 값으로 0과 1사이의 값이다.

식 (1)과 (2)의 가장 큰 차이점은 제어 변수가 각각 \mathbf{x} 와 \mathbf{c} 라는 것이다. 식 (2)에서 전체 트래픽 조건을 만족하는 최소의 용량을 도출하면 결국 용량이 부족한 링크에 부족한 만큼의 용량을 추가 할당하는 결과를 얻게 된다.

다음 장에서는 계층간 최적화의 필요성을 강조한 후에 (2)의 결과를 초기값으로 하는 계층간 최적화 알고리즘을 제안할 것이다.

2.2 계층간 최적화의 필요성

2.2.1 네트워크 토폴로지

본 논문에서 제시하고자 하는 라우팅과 용량 증설의 계층간 최적화 기법의 필요성을 설명하기 위해 간단한 네트워크 토폴로지를 하나의 예로 제시한다. 제시하고자 하는 네트워크 토폴로지는 그림 1과 같다.

그림 1은 세 개의 소스 노드 S1, S2, S3가 각각의 목적지 노드 D1, D2, D3에게 0.5, 2, 2 만큼의 트래픽을 보내는 상황이다. 이 때 해석의 편의를 위해 소스 노드에서부터 중간 노드로의 링크 용량과 중간 노드에서부터 목적지 노드로의 링크 용량은 무한대로 가정한다. 그리고 중간 노드들 사이의 링크를 위에서부터 L1, L2라 하고, 그것들의 초기 용량을 각각 1, 2라고 가정한다. 이러한 환경에서는 소스 노드의 트래픽이 L1과 L2 둘 중에 하나를 반드시 거쳐야 하므로, 그림 1과 같이 소스 노드가 내보내는 전체 트래픽의 양이 L1과 L2의 용량의 합보다 클 경우에는 병목 현상이 발생하게 된다. 따라서 그것을 해결하기 위해서는 L1과 L2의 링

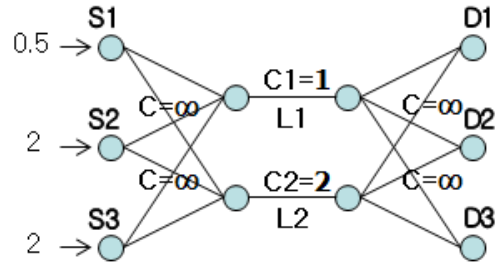


그림 1. 네트워크 토폴로지.
Fig. 1. A network topology.

크 증설이 불가피한 상황이다.

2.2.2 라우팅 알고리즘

본 논문에서는 링크 사용률에 따르는 비용을 최소화 하는 최적화 문제를 다루고 있으므로 링크 사용률을 메트릭으로 사용하는 라우팅 알고리즘을 적용한다. 따라서 링크 사용률을 기반으로 동작하는^[16] 라우팅 알고리즘을 활용할 것이다. 논문 [16]에서는 링크들의 목표 사용률을 만족시키는 라우팅 알고리즘을 위해 시뮬레이션 어닐링 기반의 휴리스틱 방법을 제안하였다.

2.2.3 계층간 최적화의 필요성

그림 1의 토폴로지에 링크 사용량을 최소화시키는 라우팅 알고리즘을 적용한다면 그림 2와 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림 2에서와 같이 L1에는 소스 1로부터의 트래픽이 흐르게 되므로 0.5의 사용률을, L2에는 소스 2와 3의 트래픽이 흐르므로 2의 사용률을 갖게 된다. 최초에 설정되었던 목표 사용률이 1이었으므로 L2의 사용률은 제한 조건을 만족시키지 못하였다. 이런 상황에서 기본적인 용량 계획 문제를 적용하면 그림 3과 같은 결과를 얻게 된다.

그림 3과 같이 기본적인 용량 계획을 실시한 결과는 L2의 용량을 2만큼 올려주는 것이다. 이는 그림 2의 라우팅 알고리즘이 고정된 상태에서 용량 계획을 실시

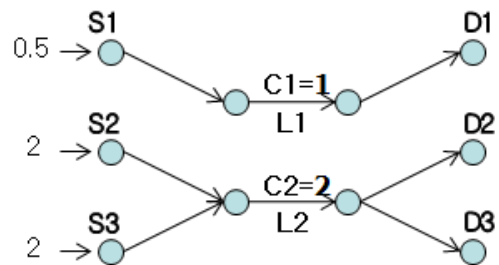


그림 2. 라우팅 알고리즘을 수행한 결과.
Fig. 2. Results of a routing algorithm^[16]

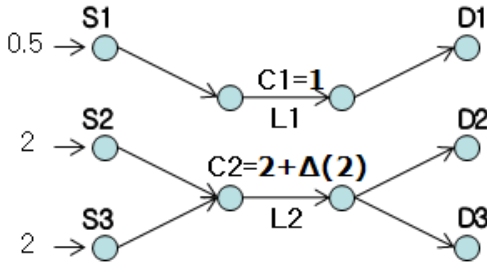


그림 3. 식 (2)의 기본적인 용량 계획 결과.
Fig. 3. Results of the Basic Capacity Planning.

한 것이다. 하지만 모든 라우팅 경로를 고려하여 (그림 1에서는 8개의 가능한 라우팅 경로가 존재한다) 기본적인 용량 계획을 실시한다면 그림 4와 같은 해법도 찾을 수 있다.

그림 4는 그림 2에서 발생하는 문제를 해결하기 위해 L1의 용량을 1.5 증가시키는 해법을 제시하고 있다. 단위 용량 당 링크 증설 비용이 같다면 그림 3에서 제시했던 해법은 그림 4에서의 해법보다 더 많은 비용을 요구하게 된다. 이는 기본적인 용량 증설 계획이 최적의 해법을 제시하지 못하는 것을 보여준다. 따라서 본 논문에서는 그림 4와 같은 해법을 위한 라우팅과 용량 증설의 계층간 최적화 기법을 제시하고자 한다. 식 (2)에서 계층간 최적화 문제를 고려한다면, 라우팅 매트릭스인 R 에 따라 변하는 각 링크에 흐르는 트래픽의 양 x_a , 또한 제어 변수로써 고려되어야 한다.

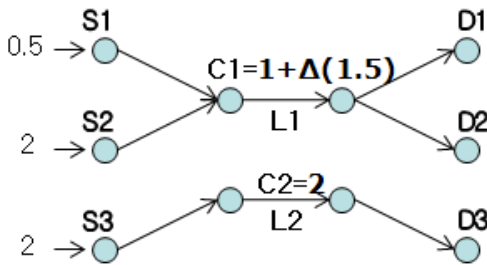


그림 4. 최적의 용량 계획 결과.
Fig. 4. Results of the optimal capacity planning.

2.2.4 비용 함수의 변형

본 논문에서 제시하려는 계층간 최적화 기법을 위한 비용 함수는 논문 [16]에서 제시한 비용 함수를 기본 형태로 할 것이다. 다시 말해, 라우팅 매트릭스로 쓰인 링크 사용률에 따른 비용은 [16]에서 제시한 형식을 따르고 더해지는 링크 용량에 대한 비용을 추가적으로 고려하는 것이다. 논문 [16]에서 제시한 링크 a 의 사용

률과 그 사용률에 대한 비용을 각각 $NU_a(\bar{w})$ 와 $\Phi_a(NU_a(\bar{w}))$ 라고 했을 때, 새롭게 정의 내린 계층간 최적화 기법에서의 링크 사용률과 비용은 식 (3), (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$NU(\bar{w}, \Delta_a) = \frac{l_a(\bar{w})}{\gamma_a(c_a + \Delta_a)} \tag{3}$$

$$\Phi_a(\bar{w}, \Delta_a) = \Phi_a(NU_a(\bar{w}, \Delta_a)) + p_a \Delta_a \tag{4}$$

논문 [16]에서의 \bar{w} 는 링크 웨이트 벡터를 나타내며, 이 값을 기반으로 라우팅 경로가 결정되고 임의의 링크 a 를 지나는 트래픽 요구 값이 결정된다. 링크 용량 증설을 고려하고 있지 않으므로, 링크 사용률은 링크를 지나는 트래픽 요구 값 l_a 을 링크 용량 c_a 로 나눠준 형태가 된다. 반면에 본 논문에서 Δ_a 와 p_a 는 각각 링크 a 에 추가로 더해지는 용량과 링크를 증설하는 데 필요한 단위 용량 당 비용을 나타낸다. 새롭게 정의된 비용 함수 식 (4)에서 앞의 항과 뒤의 항은 각각 용량 증설에 따라서 감소하고 증가하게 된다. 이렇게 정의된 비용 함수 식 (4)를 그림 2에 적용해 볼 수 있다. 제시된 토폴로지에서 링크 사용률에 따르는 비용은 논문 [16]에서 제시된 비용 함수를 따르고 L1과 L2의 용량 증설 비용을 10으로 동일하게 설정하면 L1과 L2의 용량 증설에 따르는 전체 비용을 그림 5와 같은 그래프로 나타낼 수 있다.

그림 5에서 볼 수 있듯이 “Reference values”로 표시한 해가 그림 3의 해를 나타내고 “Optimal values”로 표시한 것 중 왼쪽 것이 그림 4의 해가 된다. 그림 5의 비용 함수에서 알 수 있듯이 기본적인 용량 계획

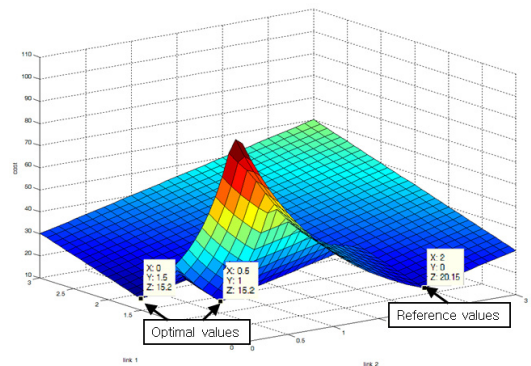


그림 5. 그림 1의 네트워크 토폴로지에서 용량 증설에 따른 비용 함수.
Fig. 5. Cost for increasing link capacity in the topology.

을 하는 것보다 더 적은 비용으로 주어진 트래픽을 모두 처리할 수 있는 해법이 존재한다. 또한 링크 L1과 L2의 링크 용량을 각각 1, 0.5씩 증설시켜 주는 것도 계층간 최적화의 또 다른 해임을 알 수 있다. 이 때, 선택된 최적 경로에서는 소스 노드 1의 트래픽은 링크 L2를 지나게 되고, 소스 노드 2와 3의 트래픽은 각각 링크 L1과 L2를 지나게 된다.

그림 5의 결과로부터 최소 비용을 위한 용량 계획의 최적해를 찾기 위해서는 계층간 최적화가 필요하다는 결론을 얻을 수 있었다. 해석의 편의를 위해 고려하지 않았던 링크들을 모두 용량 증설에 대한 고려 대상으로 넣는다면, 최적해를 찾기까지의 복잡도는 링크의 총 수에 따라 기하급수적으로 증가하게 된다. 따라서 복잡도를 줄이기 위한 추가적인 알고리즘을 제시할 것이다.

2.3 계층간 최적화 알고리즘

논문 [16]의 라우팅 알고리즘에서는 비용 함수를 최소화 하는 최적의 라우팅 경로를 찾아내지만, 네트워크의 기본적인 한계에 의하여 링크 용량의 증설이 불가피할 수 있다. 따라서 우리는 최소의 링크 용량 증설을 통해서, 모든 링크의 목표 사용률을 만족시키는 방법을 제안하고자 한다. 식 (3), (4)를 기반으로 하여 식 (5)와 같은 라우팅 및 용량 증설의 계층간 최적화 식을 만들 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \quad \sum_{a \in A} \phi_a(NU_a(\bar{w}, \Delta_a)) \\ & \text{s.t.} \quad NU_a(\bar{w}, \Delta_a) \leq 1 \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)의 제어 변수는 라우팅 경로를 결정짓는 \bar{w} 와 용량 증설을 나타내는 Δ_a 이다.

2.3.1 반복 알고리즘

임의의 주어진 네트워크에서 특정 링크들의 사용률을 목표값으로 제한하기 위한 방법으로 2.1에서 제시한 기본적인 용량 계획을 이용할 수 있다. 하지만 증설된 용량에 대해 논문 [16]에서 제시한 라우팅 알고리즘은 최초에 용량 증설이 고려되지 않았을 때와는 다른 결과를 가져 올 수 있고 그 결과에 대해서 증설 계획도 다시 달라질 수 있다. 따라서 본 절에서는 라우팅과 용량 증설의 계층간 최적화를 위한 반복 알고리즘을 제시한다. 라우팅과 용량 증설의 상호간 반복 알고리즘을 순서도로 표현하면 그림 6과 같다.

그림 6에서와 같이 본 논문에서 제시하고 있는 반복 알고리즘은 용량 증설량이 0인 상태에서 시작한다. 이

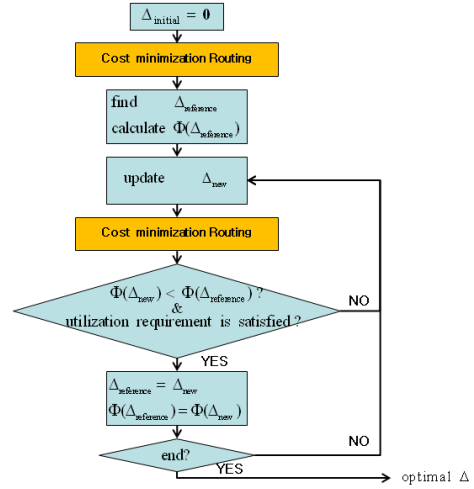


그림 6. 계층간 최적화 알고리즘을 나타내는 순서도.
Fig. 6. A flow chart for cross layer optimization of routing and capacity extension.

때의 해가 기본적인 용량 계획의 해이다. 이것을 참조값으로 하여 이보다 작은 범위에서 새로운 용량 증설량 Δ_{new} 를 임의로 뽑게 되고, 그 후에 새로 뽑힌 Δ_{new} 가 적용된 최소 비용 라우팅 알고리즘을 다시 수행한다. 도출된 비용이 기존의 참조 비용보다 싸고 각 링크의 사용률 또한 조건을 만족 시킨다면 새롭게 뽑은 Δ_{new} 는 새로운 참조값으로 업데이트 되게 된다. 이러한 과정을 특정 종료조건 (본 논문에서는 특정 반복 회수)이 만족 될 때까지 시행한다. 다음 장에서의 시뮬레이션 결과를 통해 최초 시행에서 발생하는 초기 비용부터 최종 결과의 비용까지 수렴하는 것을 확인 할 것이다.

III. 시뮬레이션

본 장에서는 위에서 제시한 계층간 최적화 기법의 시뮬레이션 결과를 살펴본다. 우선 제시한 알고리즘을 그림 2에 적용해보고, 더욱 복잡하고 일반적인 네트워크 토폴로지를 고려해 볼 것이다.

3.1 기본 토폴로지

그림 7은 본 논문에서 제시하고 있는 계층간 최적화 기법을 그림 1의 토폴로지에 적용했을 때, 증설 비용이 최적값으로 수렴해 가는 것을 보여 주고 있다. 그림 1에서 제시하고 있는 토폴로지는 10개의 노드로만 구성 되어 있을 뿐 아니라, 모든 링크의 증설 여부를 고려하지 않았기 때문에 낮은 복잡도로 계산이 가능할 수 있었다.

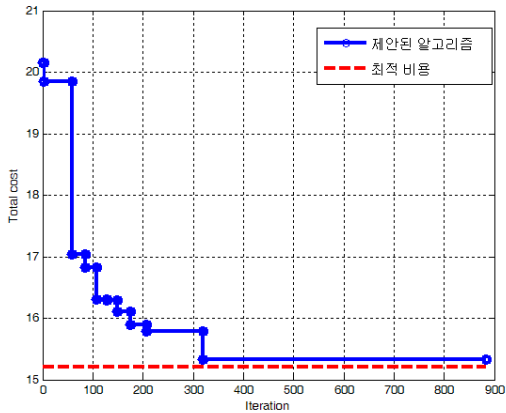


그림 7. 제시된 알고리즘이 그림 1의 토폴로지에 적용되었을 때, 최적의 비용.

Fig. 7. Total cost for the proposed algorithm (Fig 1).

3.2 일반적인 네트워크 토폴로지

그림 8에서는 총 14개의 노드와 22개의 링크로 구성된 그물망 토폴로지를 나타내고 있다. 모든 링크의 용량을 1로 가정하고 각 링크의 목표 사용률을 0.5로 설정할 것이다. 표 1, 2는 각각 총 12개의 세션 정보와 각 링크의 단위 용량 당 설치비용을 나타낸 것이다.

표 1과 2의 세션 정보와 단위 용량 당 비용은 그림 8의 네트워크를 시뮬레이션 하기 위해 임의로 설정한 것으로써 용량 계획을 실시할 때 주어지는 파라미터다. 그림 1과는 다르게 많은 링크와 노드들이 고려된 상황에서 계층간 최적화 기법을 적용하는 것은 높은 복잡도를 요구하게 된다. 따라서 본 논문에서는 복잡도의 감소를 위해서 추가적인 알고리즘을 제안한다.

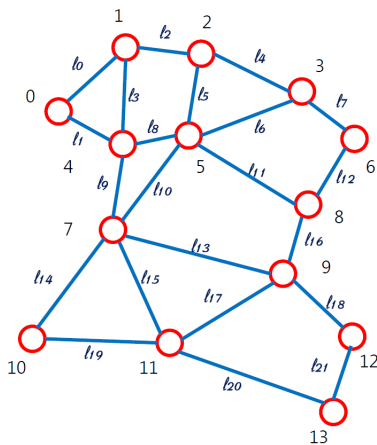


그림 8. 일반적인 네트워크 토폴로지의 예.

Fig. 8. An general topology.

표 1. 그림 8의 네트워크 토폴로지 세션 정보
Table 1. Session information.

세션 번호	시작 노드	종료 노드	트래픽 요구량(bps)
1	0	10	1.5
2	0	9	2
3	0	12	1.4
4	1	10	2.2
5	1	13	1.2
6	2	7	1.5
7	2	12	0.5
8	3	10	3
9	3	12	2.7
10	6	7	1.8
11	8	10	1.5
12	10	13	4

표 2. 그림 8의 네트워크 토폴로지의 단위 링크 당 증설 비용.
Table 2. Cost for the link capacity extension.

링크 번호	단위 링크 설치비용(원)
0	12.4
1	23
2	29.4
3	13.2
4	3.5
5	26.9
6	35.4
7	22.1
8	5.4
9	35
10	24.9
11	5
12	30.1
13	40.1
14	58.2
15	24
16	35
17	8.9
18	24.5
19	9.3
20	11.3
21	23.5

3.2.1 검색범위의 축소

링크 수와 노드 수의 증가에 따라 늘어나는 복잡도를 해결하기 위하여 모든 범위를 검색하기 보다는 실질적으로 최적의 값이 존재할 수 있는 유효한 범위를 검색하면 복잡도를 줄일 수 있다. 예컨대 최초 시행에서 도출된 링크 설치비용이 100이라면 최적의 링크 증설 값이 0에 가깝지는 않을 것이라는 판단을 기반으로 하는 알고리즘이다. 식 (7)은 유효한 범위의 검색범위를 나타내고 있다. 식 (6)과 (7)에서 ref_{cost} 는 최초에

알고리즘이 시작되기 전 초기값으로 설정하고 있는 기본용량증설문제의 해법이 된다. p_i 는 링크 i 를 단위 용량만큼 증가 시키는데에 소요된 비용을 뜻하고 Δ_i 는 링크 i 의 증가된 용량의 양을 나타낸다. 따라서 $\sum_i p_i \Delta_i$ 는 증가된 용량에 대한 비용이 된다. 식 (6)은 총 비용의 범위를 0부터 ref_{cost} 까지 고려하겠다는 의미가 되고 식 (7)은 0부터 1까지의 값을 가지는 α 요소를 고려하여 최적의 값이 있을 법한 지역을 변화 시켜가며 알고리즘을 수행하겠다는 의미이다. α 가 0인 경우에는 전체 해 공간에서 Δ_{new} 를 선택하는 반면에, α 가 1에 가까울수록 선택되는 해공간의 크기가 줄어들게 되어 보다 빠르게 조건을 만족시키는 Δ 값을 찾을 수 있다. 이로써 임의의 해를 선택하는 랜덤 서치 기반의 알고리즘의 수렴속도를 높일 수 있다. 그림 8의 토폴로지에서는 α 값을 0.98로 설정하여 시뮬레이션을 수행한다.

$$0 \leq \sum_i p_i \Delta_i \leq ref_{cost} \tag{6}$$

$$\alpha \cdot ref_{cost} \leq \sum_i p_i \Delta_i \leq ref_{cost} \tag{7}$$

3.2.2 링크 사용률 조건의 완화

링크 사용률 조건의 완화는 특정 링크가 사용률 조건을 만족하지 못하더라도, 그 오차범위가 허용가능하다고 판단되는 범위에서 최적의 해를 도출하는 것을 말한다. 제시한 계층간 최적화 알고리즘에서는 비용 함수의 링크 사용률 초과에 따른 발생 비용 부분을 하향 조정함으로써 링크 사용률 조건의 완화를 구현할 수 있다. 그림 10에서 링크 사용률 조건의 완화 정도에 따른 결과를 제시할 것이다.

3.2.3 시뮬레이션 결과

그림 9와 10은 그림 8의 토폴로지에 계층간 최적화 알고리즘을 적용했을 때의 결과를 분석한 그래프들이다. 그림 9의 경우, 알고리즘의 반복 횟수에 따른 전체 비용함수의 변화를 나타내고 있다.

4개의 그래프는 같은 시뮬레이션을 4번 시행한 것으로, 본 알고리즘은 랜덤서치 방식을 사용하고 있기 때문에 각 시행마다 정확히 같은 결과를 가지지 않음을 알 수 있다. 하지만 반복 횟수가 많아질수록 모든 경우에 대해서 최소 비용인 500에 가까운 값으로 수렴해 가는 것을 확인할 수 있다. 일반적인 네트워크에서 글로벌한 최소 비용을 파악하는 것이 어렵지만, 그림 9

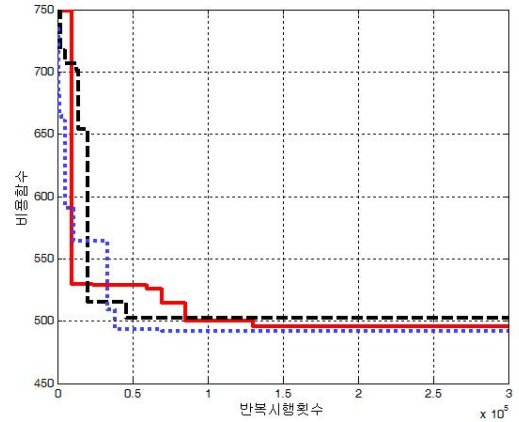


그림 9. 제시된 알고리즘을 그림 8의 토폴로지에 적용한 결과들.
Fig. 9. Total cost for the proposed algorithm (Fig 8).

를 통해 기본 용량 계획법에 비해 본 논문에서 제시하는 계층간 최적화 기법이 전체 비용함수를 많이 낮출 수 있고, 그 값이 500 부근으로 잘 수렴함을 볼 수 있다.

그림 10의 막대그래프는 각 링크에 대한 사용률 조건의 완화 정도에 따른 결과를 보여주고 있다. 가로축은 링크 번호를 나타내고 세로축은 정규화된 링크 사용률을 나타낸다. 가장 왼쪽의 막대그래프는 용량 증설 알고리즘을 사용하지 않고, 최소 비용을 위한 라우팅 알고리즘만을 적용한 결과이다. 두 번째 막대그래프와 세 번째 막대그래프는 각각 링크 사용률 초과에 따르는 비용을 300과 1000으로 설정한 결과이다. 세 번째 막대그래프의 경우에는 어떻게든 모든 링크의 사용률을 목표 값 이하로 낮추는 결과를 얻을 수 있다. 사용률 초과에 따른 비용과 용량 증설에 따른 비용의 차이는 주어진 네트워크가 가지는 특징에 따라서 달라질 수 있다. 두 종류의 비용이 용량 계획 시에 정해진 목

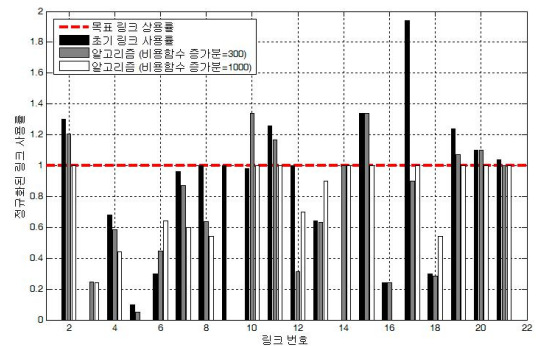


그림 10. 사용률 조건 완화 정도에 따른 각 링크의 링크 사용률.
Fig. 10. link utilization

표에 따라 유연하게 선택될 수 있는 파라미터라는 것을 의미한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 최소의 비용으로 사용자의 QoS를 만족시키는 라우팅과 용량 증설의 계층간 최적화 기법을 제안하였다. 제안된 계층간 최적화 기법은 기본적인 용량 계획 문제의 해를 초기값으로 설정하고 이를 기반으로 한 랜덤서치 기반의 휴리스틱 알고리즘이다. 본 기법은 네트워크를 구성하거나 기 구축된 네트워크 내 평균 트래픽 양이 증가하여 용량 증설이 불가피해졌을 경우에 적용할 수 있다.

링크 사용률을 QoS를 나타내는 지표로 정하고, 이를 목표값 이하로 낮추기 위한 방법을 제시하였다. 이 방법은 링크사용률을 지표로 사용하는 임의의 라우팅과 결합하여 최적의 비용을 찾는 역할을 수행한다. 본 논문에서는 하나의 간단한 토폴로지를 예로 들어, 제시된 계층간 최적화 기법을 통해서 최소 비용의 용량 계획을 할 수 있음을 보였다. 또한 좀 더 많은 노드와 링크로 구성된 일반적인 네트워크 토폴로지를 제시하여 전체 비용의 수렴을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] J. E. Cohen and F. P. Kelly, "A paradox of congestion in a queuing network," *Journal of Applied Probability*, Vol. 27 (3), pp. 730-734, 1990.

[2] Y. A. Korilis, A. A. Lazar, and A. Orda, "Capacity allocation under noncooperative routing," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 42 (3), pp. 309-325, 1997.

[3] R. Boorstyn and H. Frank, "Large scale network topological optimization," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 25 (1), pp.29-47, 1977.

[4] W. Chou, F. Ferrante, and M. Balagangaadhar, "Integrated optimization of distributed processing networks," in Proc. *the National Computer Conference*, pp. 795-811, 1978.

[5] B. Gavish, "A general model for the topological design of computer networks," in Proc. *IEEE GLOBECOM 1986*, pp. 1584-1588, 1986.

[6] B. Gavish, "Topological design of computer communication networks - The overall design

problem," *European Journal of Operational Research*, Vol. 58 (2), pp. 149-172, 1992.

[7] K. Maruyama, L. Fratta and D. T. Tang, "Heuristic design algorithm for computer communication networks with different classes of packets," *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 21 (4), pp. 360-369, 1977.

[8] A. Amiri and H. Pirkul, "Routing and capacity assignment in backbone communication networks," *Computers & Operations Research*, Vol. 24 (3), pp. 275-287, 1997.

[9] B. Gavish and I. Neuman, "A system for routing and capacity assignment in computer communication networks," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 37 (4), pp. 360-366, 1989.

[10] H.-H. Yen and F. Y.-S. Lin, "Near-optimal delay constrained routing in virtual circuit networks," in Proc. *IEEE INFOCOM 2001*, pp.750-756, 2001.

[11] M. Prytz, "On optimization in design of telecommunications networks with multicast and unicast traffic," Ph.D. dissertation, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, Mar. 2002.

[12] K. Maruyama and D. T. Tang, "Discrete link capacity and priority assignment in communication networks," *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 21 (3), pp. 254-263, 1977.

[13] M. Gerla and L. Kleinrock, "On the topological design of distributed computer networks," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 25 (1), pp. 48-60, 1977.

[14] A. Riedl, "A hybrid genetic algorithm for routing optimization in IP utilizing bandwidth and delay metrics," in Proc. *IEEE Workshop on IP Operations and Management 2002*, pp. 160-170, 2002.

[15] S. Chen and K. Nahrstedt, "Distributed Quality-of-Service routing in ad hoc networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 17 (8), pp. 1488-1505, 1999.

[16] S. L. Gong, S. Y. Kim, J. W. Lee, S. L. Lee

and M. K. Ahn, "Link weight optimization for routing considering link utilization in communication networks" in Proc. *IEEE ISGIT 2009*, pp. 1532-1533, 2009.

- [17] F. P. Kelly, A. Maulloo and D. Tan "Rate control for communication networks: Shadow prices, proportional fairness and stability," *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 49 (3), pp. 237-252, 1998.

신 봉 석 (Bong-Suk Shin)

정회원



2008년 2월 경희대학교 전파통신공학과
2010년 2월 연세대학교 전기전자공학과 석사
2010년 3월~현재 LIG 넥스원 통신연구센터연구원
<관심분야> Ad-Hoc 네트워크,

Medium Access Control, Multicast Routing Protocol

이 현 관 (Hyun-kwan Lee)

준회원



2007년 2월 연세대학교 전기전자공학과
2007년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학과 석박사과정
<관심분야> 네트워크 코딩, 무선 자원 관리, MAC layer 설계

김 동 민 (Dong Min Kim)

정회원



2007년 2월 연세대학교 기계전자공학부
2007년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학과 석박사과정
<관심분야> 무선 자원 관리, 정보이론, 네트워크 코딩, 무선 신호간섭 관리

박 정 민 (Jung Min Park)

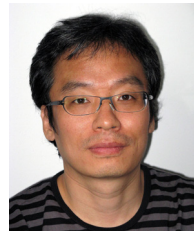
정회원



2006년 2월 연세대학교 기계전자공학부
2007년 8월 연세대학교 전기전자공학과 석사
2007년 9월~현재 연세대학교 전자공학과 박사과정
<관심분야> 네트워크 최적화, 무선 자원 관리, 무선 인지 통신 시스템

김 성 룬 (Seong-Lyun Kim)

정회원



1994년 8월 KAIST 공학박사
1994년~1998년 ETRI 이동통신기술연구단 선임연구원
1998년~2000년 스웨덴 KTH, Dept. Signals, Sensors & Systems 조교수
2000년~2004년 ICU 조교수, 부교수

2004년~현재 연세대학교 전기전자공학부 부교수, 교수

<관심분야> Radio resource management, information theory, robotic network, economics of wireless systems

이 상 일 (Sang-il Lee)

비회원



1996년 2월 성균관대학교 정보공학과 석사
2010년 2월 성균관대학교 전기전자컴퓨터 박사
1996년~현재 국방과학연구소
<관심분야> Modeling & simulation, 네트워크, 이동통신

안 명 길 (Myung-kil Ahn)

비회원



2003년 2월 서강대학교 컴퓨터공학과 석사
2006년~현재 국방과학연구소
<관심분야> Modeling & simulation, 네트워크, 이동통신