

Mixed-Objective LP 기반의 데이터센터 트래픽 엔지니어링

정태열^o, 유재형, 홍원기

포항공과대학교 컴퓨터공학과

{dreamerty, styoo, jwkhong}@postech.ac.kr,

요 약

데이터센터의 규모가 커지면서 데이터센터 네트워크 관리에 대한 관심이 증대되고 이와 관련해 데이터 센터 트래픽 엔지니어링 기법에 대한 연구가 활성화 되고 있다. 본 논문은 데이터 센터의 자원 이용 효율과 에너지 효율을 동시에 고려하는 트래픽 엔지니어링 기법을 제안하고 이를 위해 데이터센터 네트워크의 주요 관리 목적인 Maximum Link Utilization의 최소화과 에너지 소비 최소화 문제를 Linear Programming 식을 이용해 표현하였으며 이들을 하나의 Mixed-Objective Linear Programming 문제로 나타내었다. 제안한 트래픽 엔지니어링 기법을 사용해 데이터센터 관리자는 네트워크의 상황, 데이터센터 트래픽의 특성, 예산 등을 고려하여 유동적으로 두 가지 트래픽 엔지니어링이 미치는 중요도를 조절할 수 있으며, 만족시켜야 하는 Maximum Link Utilization 상한 또는 에너지 소비의 상한 범위 내에서 트래픽 엔지니어링을 적용할 수 있다.

1. 서론

트래픽 엔지니어링은 일반적으로 네트워크 성능을 최적화 하기 위해 트래픽을 네트워크 경로에 할당하는 기술과 이를 위해 필요한 트래픽 측정, 모델링, 제어 기술 등을 말한다 [1, 2, 3, 4]. 트래픽 엔지니어링은 트래픽을 네트워크 링크에 균등하게 분배함으로써 네트워크 자원 이용 효율을 최대화하고 불균등한 트래픽 할당으로 인해 네트워크 링크에서 혼잡(congestion)이 발생하는 것을 막기 위해 사용되거나, 네트워크의 에너지 효율을 높이기 위해 사용될 수 있다.

데이터센터 네트워크 관리자의 가장 중요한 관심은 자원 이용 효율과 에너지 효율을 높이는 것이고 따라서 이와 관련된 트래픽 엔지니어링 기법들을 데이터센터에 적용하려는 노력이 계속되어왔다. 네트워크의 자원 이용 효율을 높이기 위해서는 모든 스위치와 링크를 활용하여 트래픽을 데이터센터 토폴로지 내에 균등하게 분배해야 하는데 이를 통해 네트워크의 최대 링크 이용률 Maximum Link Utilization (MLU)를 낮출 수 있다. MLU는 데이터센터 링크 중 가장 많은 트래픽이 할당된 링크의 이용률을 의미하며 MLU가 낮을수록 네트워크에 트래픽이 균등하게 분배된 것을 의미한다. 네트워크가 높은 MLU를 가질 경우 링크에 혼잡이 발생할 확률이 높아지므로 MLU는 서비스 품질과 밀접한 관련이 있다. 반면에 에너지 효율을 높이기 위해서는 최소한의 스위치와 링크만을 사용해야 하며 이를 위해 트래픽을 수용할 수 있을 만큼의 스위치와 링크만을 남기고 나머지 스위치와 링크들의 전원을 끄는 방법을 사용해야 한다.

이 두 가지 데이터센터 트래픽 엔지니어링의 목적은 서로 상충되는 것이기 때문에 많은 트래픽 엔지니어링 연구들이 하나의 목적만을 달성하기 위한 제안되었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 각 트래픽 엔지니어링 목적 함수를 선형 계획식 Linear Programming (LP)으로 표현하고 두가지 LP 식을 하나의 다중 목적 함수 Mixed-objective LP로 결합하는 방법을 제안한다. Mixed-objective LP의 최적해는 두가지 트래픽 엔지니어링의 특성을 모두 반영하기 때문에 자원 이용 효율과 에너지 효율을 동시에 고려할 수 있고 관리자가 유동적으로 각 트래픽 엔지니어링의 중요성을 조절할 수 있다.

2. 관련 연구

여러 연구에서 데이터센터 네트워크의 트래픽 경로를 재설정 함으로써 자원 이용 효율을 높이거나 에너지 효율을 높이려는 연구가 진행 되어왔다.

microTE [5]는 데이터센터 네트워크 트래픽의 short-term predictability를 이용하여 최대 링크 이용률을 낮추는 방법을 제안하였다. microTE는 지속적으로 트래픽의 변화를 모니터링 한 후 예측 가능한 트래픽을 가지는 Top-of-Rack Switch 쌍을 찾고 예측한 트래픽을 최적의 경로에 할당함으로써 데이터센터의 자원 이용 효율을 높인다. 하지만 microTE는 fine-grained 트래픽 모니터링 데이터를 얻기 위해 호스트에 별도의 수정을 필요로 하는 단점이 존재한다.

PEFT [6]는 예측하기 어려운 데이터 센터 트래픽 환경에서 최대 링크 이용률을 낮추기 위해 제안

되었다. PEFT가 설치된 각 스위치는 포트를 지나는 트래픽 양을 측정하고 이를 이용해 지역적으로 트래픽의 경로를 결정하는 hop-by-hop 형태의 트래픽 엔지니어링을 실행한다. 하지만 PEFT는 지역적으로 스위치들이 지역 정보를 활용해 트래픽 엔지니어링을 적용하기 때문에 global 최적해를 얻을 수 없고 각 스위치에 설치된 PEFT로 인해 스위치의 로드가 증가한다는 문제점이 있다.

ElasticTree [7]은 데이터센터의 트래픽 양에 따라 필요 없는 스위치와 링크의 전원을 끄으로써 에너지 효율을 높이기 위해 제안되었다. ElasticTree는 트래픽을 수용할 수 있는 네트워크 토폴로지의 최소 부분 집합을 찾기 위해 LP 기반과 휴리스틱 기반의 알고리즘을 사용한다. 하지만 ElasticTree는 데이터센터의 에너지 효율을 높이는 동시에 네트워크의 최대 링크 이용률을 상승시키기 때문에 트래픽이 많이 할당된 링크에서 혼잡이 발생할 가능성이 높아지는 단점이 있다.

지금까지의 데이터센터 트래픽 엔지니어링 기법들은 모두 최대 링크 이용률을 낮추거나 에너지 효율을 높이는 두 가지 목적 중 오직 하나의 목적만을 달성하기 위해 제안되었다. microTE와 PEFT는 최대 링크 이용률을 낮추지만 이를 위해 모든 스위치와 링크를 사용하게 되므로 불필요한 에너지를 낭비하는 부작용이 발생하고, ElasticTree는 에너지 효율을 높이기 위해 최대한 많은 스위치와 링크의 전원을 끄게 되는데 이 때문에 네트워크의 최대 링크 이용률이 상승해 링크의 혼잡이 발생할 확률이 높아지는 부작용이 존재한다. 본 연구에서는 최대 링크 이용률과 에너지 효율이라는 상충되는 두 개의 목적을 동시에 고려하며, 각각의 트래픽 엔지니어링이 적용될 때 발생할 수 있는 부작용을 서로 상호보완 하는 트래픽 엔지니어링 기법을 제안한다.

3. LP 기반의 트래픽 엔지니어링

LP의 수학적 모델은 입력, 의사결정 변수, 제약 조건식, 목적함수로 구성되며 제약 조건식 내에서 목적 함수를 최대화 또는 최소화 하는 최적해를 찾는다. 트래픽 엔지니어링의 MLU 최소화, 에너지 소비량 최소화 문제 또한 LP의 수학적 모델을 이용해 해결할 수 있다 [7, 8]. LP의 global 최적해는 트래픽을 데이터 센터 토폴로지에 존재하는 경로들에 균등하게 분산시키는 문제, 또는 에너지 절감을 위해 트래픽을 최소한의 경로에 할당하여 최소한의 스위치와 링크를 사용하는 문제를 해결한다. LP의 결과는 입력으로 받은 트래픽 매트릭스와 그 트래픽이 할당 되어야 할 네트워크에 존재하는 경로의 매트릭스로 이루어져 있으며 트래픽 엔지니어링 시스템은 이 결과를 이용해 트래픽의 경로를 재설정한다.

3.1. 자원 이용 효율 최적화 LP

자원 이용 효율 최적화 문제는 입력으로 받은 플로우들을 데이터센터 토폴로지에 존재하는 다수의 경로에 할당하는 문제와 동일하며 이는 아래에서 제안하는 LP 식의 해답을 찾음으로써 해결할 수 있다. 본 연구에서 제안하는 자원 이용 효율 최적화를 위한 LP 식은 아래와 같다.

- 입력 (Input)

- 네트워크 토폴로지: $G(V, E)$
- 트래픽 매트릭스: T
- 링크 용량: $\forall (u, v) \in E, c(u, v)$
- 플로우의 경로 집합: $\forall i, P_{T_i} = \{P_{i,0}, \dots, P_{i,j}, \dots, P_{i,l}\}$
- 링크를 포함하는 경로의 부분 집합: $\forall i, P_{T_i}^{(u,v)} \subseteq P_{T_i}$

- 의사 결정 변수 (Decision Variable)

- 최대 링크 이용률: m
- 경로에 할당된 플로우의 트래픽 양: $\forall i, \forall p \in P_{T_i}, f_i(p)$

- 제약 조건식 (Constraints)

- 링크 용량: $\forall (u, v) \in E, \sum_{i=1}^k \sum_{p \in P_{T_i}^{(u,v)}} f_i(p) \leq m \times c(u, v)$
- 수요 충족: $\forall i, \sum_{p \in P_{T_i}} f_i(p) = d_i$

- 목적함수 (Objective)

- Minimize $M = m$ (1)

자원 이용 효율 최적화 문제를 선형계획식으로 해결하기 위해 먼저 LP의 입력이 필요하다. 네트워크 토폴로지 그래프 $G(V, E)$ 는 노드 $u \in V$ 와 링크 $(u, v) \in E$ 로 구성되어 있다. 트래픽 매트릭스 T 는 k 개의 플로우를 포함하며 i 번째 플로우 $T_i=(s_i, t_i, d_i)$ 는 플로우의 source s_i , destination t_i , 트래픽 demand d_i 로 구성된다. $c(u, v)$ 는 (u, v) 의 링크 용량을 나타낸다. $P_{T_i} = \{P_{i,0}, \dots, P_{i,j}, \dots, P_{i,l}\}$ 는 플로우가 할당될 수 있는 가능한 경로의 집합이며 $P_{i,j}$ 는 플로우 T_i 의 j 번째 경로를 의미한다. $P_{T_i}^{(u,v)}$ 는 링크 (u, v) 를 포함하는 경로들로 이루어진 P_{T_i} 의 부분 집합이다.

의사 결정 변수 m 은 네트워크의 최대 링크 이용률을 의미하고 $f_i(p)$ 는 플로우 T_i 를 경로 p 에 할당된 플로우의 트래픽 양을 의미한다. T 에 존재하는 플로우들을 네트워크 토폴로지 $G(V, E)$ 에 할당하기 위해서 자원 이용 효율 최적화 선형계획법은 제약 조건식 링크 용량 조건과 수요 충족 조건을 만족하는 $f_i(p)$ 의 값들을 찾는다.

링크 용량 제약 조건은 경로 p 를 구성하는 링크

(u, v) 에 할당된 플로우들의 트래픽 합이 최대 링크 이용률과 링크 용량의 곱인 $m \times c(u, v)$ 를 넘을 수 없음을 의미한다. 수요 충족 제약 조건은 플로우 T_i 의 source s_i 가 보낸 트래픽의 양과 destination t_i 가 받은 트래픽의 양이 트래픽 demand d_i 와 동일함을 보장한다.

3.2. 에너지 효율 최적화 LP

에너지 효율 최적화 문제는 입력으로 받은 플로우들을 데이터센터 토폴로지의 최소한의 경로에 할당하는 문제와 동일하며 이는 아래에서 제안하는 LP 식의 해답을 찾음으로써 해결할 수 있다. 본 연구에서 제안하는 에너지 효율 최적화를 위한 LP 식은 아래와 같다.

- 입력
 - 네트워크 토폴로지: $G(V, E)$
 - 트래픽 매트릭스: T
 - 링크 용량: $\forall (u, v) \in E, c(u, v)$
 - 플로우의 경로 집합: $\forall i, P_{T_i} = \{P_{i,0}, \dots, P_{i,j}, \dots, P_{i,l}\}$
 - 링크를 포함하는 경로의 부분 집합: $\forall i, P_{T_i}^{(u,v)} \subseteq P_{T_i}$
 - 스위치 집합: $S \subset V$
 - 스위치에 연결된 노드의 집합: $\forall u \in S, V_u$
 - 링크의 에너지 소모값: $\forall (u, v) \in E, a(u, v)$
 - 스위치의 에너지 소모값: $\forall u \in S, b(u)$
- 의사 결정 변수
 - 경로에 할당된 플로우의 트래픽 양: $\forall i, \forall p \in P_{T_i}, f_i(p)$
 - 링크의 On/Off 상태: $\forall (u, v) \in E, X_{u,v}$
 - 스위치의 On/Off 상태: $\forall u \in S, Y_u$
- 제약 조건식
 - 링크 용량: $\forall (u, v) \in E, \sum_{i=1}^k \sum_{p \in P_{T_i}^{(u,v)}} f_i(p) \leq X_{u,v} \times c(u, v)$
 - 수요 충족: $\forall i, \sum_{p \in P_{T_i}} f_i(p) = d_i$
 - 양방향 링크 에너지: $\forall (u, v) \in E, X_{u,v} = X_{v,u}$
 - 스위치-링크 상관관계: $\forall u \in S, \forall w \in V_u, X_{u,w} = X_{w,u} \leq Y_u$
 - 링크-스위치 상관관계: $\forall u \in S, Y_u \leq \sum_{w \in V_u} X_{w,u} = \sum_{w \in V_u} X_{u,w}$
- 목적함수
 - Minimize $E = \sum_{(u,v) \in E} X_{u,v} \times a(u, v) + \sum_{u \in S} Y_u \times b(u)$ (2)

에너지 효율 최적화 문제를 LP 식으로 해결하기 위한 입력으로 자원 이용 효율 최적화와 동일하게 네트워크 토폴로지, 트래픽 매트릭스, 링크 용량, 플

로우의 경로집합을 입력으로 받는다. 그 외에 스위치, 링크의 에너지와 관련된 입력으로 모든 스위치 집합 S , 스위치 V_u 와 연결된 노드의 집합, 링크 (u, v) 의 에너지 소모값 $a(u, v)$, 스위치 u 의 에너지 소모값 $b(u)$ 가 필요하다.

의사 결정 변수 $f_i(p)$ 는 경로에 할당된 플로우의 트래픽 양을 의미하고, $X_{u,v}$ 와 Y_u 는 각각 링크 (u, v) , 스위치 u 의 전원 On/Off 상태를 나타내는 바이너리 의사 결정 변수이다.

링크 용량 제약 조건은 전원이 켜져있는 링크에만 플로우가 할당될 수 있으며 링크에 할당된 플로우들의 트래픽 합이 링크 용량을 넘을 수 없음을 의미한다. 수요 충족 조건은 플로우의 source 가 보낸 트래픽, destination 가 받은 트래픽이 demand d_i 와 동일함을 보장하고, 양방향 링크 에너지 조건은 링크 (u, v) 와 (v, u) 의 전원 상태가 같음을 보장한다. 스위치-링크 상관관계 조건은 스위치 u 의 전원이 켜져있을 경우 이와 연결된 모든 링크 (u, w) 또는 (w, u) 의 전원이 켜져있어야 함을 의미하고, 링크-스위치 상관관계 조건은 스위치 u 에 연결된 모든 링크들이 켜져있을 경우 그 스위치의 전원 또한 켜져있어야 함을 의미한다.

3.3. Mixed-Objective LP

목적 함수(1)과 (2)는 각각 데이터 센터 네트워크의 자원 이용 효율과 에너지 효율을 최적화 하기 위해 제안되었다. 선형 결합 (linear combination)을 이용하면 두 목적 함수를 다중 목적 함수

$$\text{Minimize } Z = \lambda M + (1-\lambda)E/E^{max} \quad (3)$$

로 표현할 수 있다 [9]. 다중 목적함수 Z 는 자원 이용 효율 최적화를 위한 목적 함수 M 과 에너지 효율 최적화를 위한 목적함수 E 의 선형 결합으로 이루어져 있으며 변수 $0 \leq \lambda \leq 1$ 을 가진다. 최대 링크 이용률을 나타내는 $0 \leq M \leq 1$ 과는 달리 E 는 단위 시간당 네트워크 토폴로지에 존재하는 스위치와 링크의 에너지 소모값의 합을 나타내므로 E^{max} 값을 이용해 $0 \leq E/E^{max} \leq 1$ 로 정규화한다. 선형 결합에 이용된 변수 λ 는 각각의 목적 함수 M 과 E 가 다중 목적함수 Z 에 가지는 영향력을 결정짓는다.

$\lambda > 0.5$ 일 때 M 은 E 보다 더 큰 영향력을 가지기 때문에 Z 를 통해 얻은 최적해의 주요 기능은 최대 링크 이용률 M 을 최소화 하는 것이 되지만 선형 결합된 E 로 인해 에너지 소모값을 낮추는 기능 또한 달성하게 된다. 이것은 다중 목적함수 Z 가 M 만을 사용한 트래픽 엔지니어링이 갖는 문제점인 에너지 소모값의 증가라는 약점을 보완해 주는 것을 의미한다.

$\lambda < 0.5$ 일 때 E 는 M 보다 더 큰 영향력을 가지기 때문에 Z 를 통해 얻은 최적해의 주요 기능은 에너지 소모값 E 를 최소화 하는 것이 되지만 선형

결합된 M 으로 인해 최대 링크 이용률을 낮추는 기능 또한 달성하게 된다. 이것은 다중 목적함수 Z 가 E 만을 사용한 트래픽 엔지니어링이 갖는 문제점인 최대 링크 이용률의 증가라는 약점을 보완해 주는 것을 의미한다.

$\lambda=0.5$ 일 때 두 목적 함수 M 과 E 는 Z 에 동일한 영향력을 가진다. 이 때 다중 목적 함수 Z 를 이용해 최대 링크 이용률의 최소화와 에너지 소모값의 최소화라는 두 가지 상충된 목적이 균형을 이루는 최적해를 얻을 수 있다.

3.4. MLU-Bounded LP

MLU-Bounded 선형계획식은 다중 목적함수 (3)의 목적 함수 M 대신 최대 링크 이용률의 상한값 $M^{constant}$ 를 설정함으로써 얻을 수 있고

$$\text{Minimize } Z' = \lambda M^{constant} + (1-\lambda)E/E^{max} \quad (4)$$

와 같이 표현된다. 이 때 (4)는 네트워크 최대 링크 이용률이 상한값 $M^{constant}$ 를 넘지 않는 범위 내에서 에너지 소모값 E 를 최적화하는 문제가 된다. 이를 이용하면 데이터센터 네트워크 관리자는 네트워크가 보장해야 하는 최대 링크 이용률 $M^{constant}$ 를 미리 정해놓고 그것을 만족하는 범위 안에서 에너지 효율 최적화를 위한 트래픽 엔지니어링을 적용할 수 있다.

3.5. Energy-Bounded LP

Energy-Bounded 선형계획식은 다중 목적함수 (3)의 목적함수 E 대신 에너지 소모값의 상한값 $E^{constant}$ 를 설정함으로써 얻을 수 있고

$$\text{Minimize } Z'' = \lambda M + (1-\lambda)E^{constant}/E^{max} \quad (5)$$

와 같이 표현된다. 이 때 (5)는 데이터센터의 스위치와 링크의 에너지 소모값이 상한값 $E^{constant}$ 를 넘지 않는 범위 내에서 최대 링크 이용률 M 을 최적화하는 문제가 된다. 이를 이용하면 데이터센터 네트워크 관리자는 미리 정해놓은 예산 $E^{constant}$ 를 넘지 않는 범위 내에서 최대 링크 이용률을 낮추기 위한 트래픽 엔지니어링을 적용할 수 있다.

4. 검증

제안하는 Mixed-objective LP 와 Bounded LP 식을 검증하기 위해 시뮬레이션을 통해 데이터센터 네트워크 트래픽 매트릭스를 생성하고 이를 입력으로 받아 LP Modeler 를 이용해 최적해를 구한 후 네트워크 토폴로지 매트릭스에 할당하였다. 검증을 위한 데이터센터 네트워크 토폴로지는 $k=4$ 로 구성되는 fat-tree [10] 토폴로지를 대상으로 하였으며 이는 16개의 호스트를 가진다. 각 호스트는 링크 용량의

10~20% 사이의 크기를 가지는 플로우를 2 개씩 생성하며 플로우의 source 와 destination 은 랜덤하게 결정되지만 실제 데이터센터 네트워크의 트래픽 특성을 반영하기 위해 subnet, intra-rack, inter-rack 트래픽 비율이 25:25:50 을 이루도록 하였다. 생성된 트래픽을 이용해 제안한 LP 식을 최적해를 구하기 위해 puLP LP Modeler 와 COIN-or LP Solver 가 사용되었다. 스위치, 링크의 단위 시간당 에너지 소모값은 각각 10, 1로 가정하였다.

표 1 은 다중 목적 함수 (3)이 서로 다른 λ 값을 가질 때 사용된 링크수, 에너지 소모값, 최대 링크 이용률, 에너지 이용률의 변화를 나타낸다. λ 값이 증가할 때 데이터센터의 트래픽 엔지니어링은 최대 링크 이용률을 낮추는 방향으로 진행되지만 이로 인해 더 많은 에너지를 소모한다. λ 값이 감소하면 데이터센터 트래픽 엔지니어링은 에너지 소모를 줄이기 위한 방향으로 진행되지만 네트워크의 최대 링크 이용률은 높아지게 된다.

$\lambda=0$ 일 때의 결과는 에너지 효율 최적화 트래픽 엔지니어링만을 적용했을 때와 동일하다. 이는 표 1 에서 볼 수 있듯이 에너지를 절약하는데 가장 효과적이지만 그로인해 트래픽이 소수의 경로에 집중되어 최대 링크 이용률이 지나치게 증가하게 된다.

$\lambda=1$ 일 때의 결과는 자원 이용 효율 최적화 트래픽 엔지니어링만을 적용했을 때와 동일하다. 이때 네트워크는 트래픽을 가능한 경로에 최대한 분배하여 각 링크가 가지는 최대 링크 이용률을 낮추고 네트워크의 자원을 효율적으로 사용하였지만 그로인해 에너지 이용률이 지나치게 증가하게 된다.

네트워크 관리자는 시간대에 따른 네트워크 트래픽 양의 변화에 따라 유동적으로 λ 값을 변화 시키면서 트래픽 엔지니어링을 적용할 수 있다. 즉, 네트워크 트래픽의 양이 증가하는 시간대에는 높은 λ 값을 이용해 최대 링크 이용률을 낮춤으로써 많은 양의 트래픽을 처리할 수 있게 하고, 트래픽 양이 적은 시간대에는 낮은 λ 값을 이용해 에너지 절감을 초점을 맞춘다.

표 1. 최대 링크 이용률과 에너지 이용률

λ	사용된 링크수	에너지 소모값	최대 링크 이용률(%)	에너지 이용률(%)
0.00	27	142	82	57.26
0.25	29	153	76	62.09
0.50	31	169	54	68.34
0.75	32	176	49	70.97
1.00	38	200	45	80.64

그림 1 은 MLU-Bounded 최적화 문제 (4)에서 서로 다른 최대 링크 이용률 (상한값 $M^{constant} * 100$)과 그에 따른 에너지 이용률의 변화를 나타낸다. MLU-Bounded 선형계획식은 데이터센터 네트워크의 최대 링크 이용률이 미리 설정한 상한값 $M^{constant}$ 를 넘지 않는 범위 내에서 에너지 절감을 최대화 하기 위한

트래픽 엔지니어링을 적용한다. 따라서 요구되는 상한값 $M^{constant}$ 가 낮을 때 더 많은 에너지를 소비하고, $M^{constant}$ 가 높을 때 에너지 소비가 줄어드는 것을 알 수 있다. 데이터센터 관리자는 데이터센터가 제공하는 서비스 특성이나 보장해야 하는 서비스의 품질에 따라 최대 링크 이용률 $M^{constant}$ 의 상한을 유동적으로 설정할 수 있다.

그림 2 는 Energy-Bounded 최적화 문제 (5)에서 서로 다른 에너지 이용률 (에너지 소모값 상한 $E^{constant} / E^{max} * 100$)에 따른 최대 링크 이용률의 변화를 나타낸다. Energy-Bounded 선형계획식은 데이터센터의 에너지 소모값이 미리 설정한 상한값 $E^{constant}$ 를 넘지 않는 범위 내에서 최대 링크 이용률을 낮추기 위한 트래픽 엔지니어링을 적용한다. 요구되는 에너지 이용률 상한값 $E^{constant}$ 이 낮을 때, 즉 적은 에너지 소모값 내에서 데이터 센터를 운영해야 할 때 네트워크는 높은 최대 링크 이용률을 가지게 되고 $E^{constant}$ 가 높을 때, 즉 사용할 수 있는 에너지 소모값이 클 때 네트워크는 낮은 최대 링크 이용률을 갖게 된다. 데이터센터 관리자는 사용할 수 있는 에너지 예산에 따라 에너지 소모값 $E^{constant}$ 의 상한을 유동적으로 설정할 수 있다.

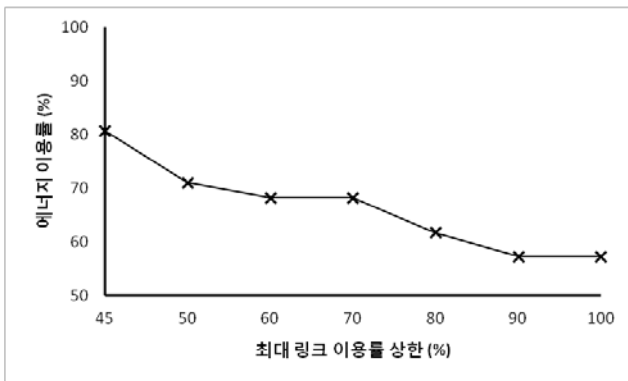


그림 1. MLU 상한에 따른 에너지 이용률 변화

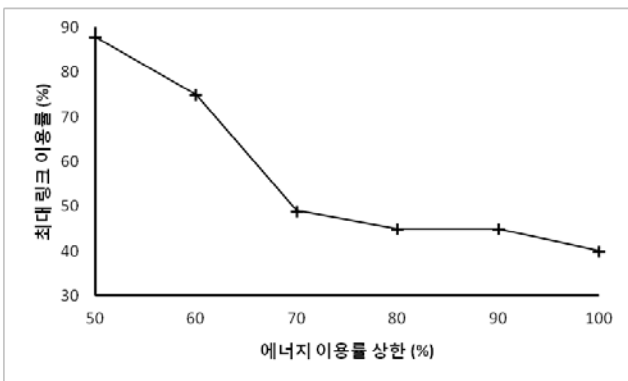


그림 2. 에너지 이용률 상한에 따른 MLU 변화

5. 결론

본 연구에서는 데이터센터 트래픽 엔지니어링을 위해 자원 이용 효율 최적화와 에너지 효율 최적화를 위한 LP 식을 제안하였고 상충되는 두 LP 식을

각각 트래픽 엔지니어링에 활용할 때 발생하는 문제점을 보완하기 위해 두 LP 식의 선형 결합으로 구성되는 Multi-Objective LP 식을 제안하였다. 시뮬레이션 검증을 통해 데이터센터 관리자는 상황에 따라 변수 λ 를 유동적으로 조절 함으로써 트래픽 엔지니어링에서 자원 이용 효율과 에너지 효율이 차지하는 비중을 변화시킬 수 있음을 확인하였고, 최대 링크 이용률의 상한값 또는 에너지 소모값의 상한을 미리 정해놓고 그 상한 값을 만족하는 범위 내에서 나머지 LP 식을 이용해 트래픽 엔지니어링을 적용하는 것도 가능함을 보였다.

향후 연구로 제안한 Multi-Objective LP 식을 통해 얻은 트래픽 엔지니어링의 최적해를 사용하여 실제 데이터센터 트래픽의 경로를 제어할 수 있는 데이터센터 트래픽 엔지니어링 시스템을 구축할 계획이다.

6. 참고 문헌

- [1] D. Awduche, A. Chiu, A. Elwalid, I. Widjaja, and X. Xiao, "Overview and principles of internet traffic engineering." RFC 3272, May 2002.
- [2] Y. Lee and B. Mukherjee, "Traffic engineering in next-generation optical networks," IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 6, no. 3, pp. 16-33, 2004.
- [3] D. Awduche, J. Malcolm, J. Agogbua, M. O'Dell, and J. MacManus, "Requirements for traffic engineering over MPLS." RFC 2702, Sept. 1999.
- [4] D. Awduche, "MPLS and traffic engineering in ip networks," IEEE Communications Magazine, vol. 37, no. 12, pp. 42-47, 1999.
- [5] T. Benson, A. Anand, A. Akella, and M. Zhang, "MicroTE: fine grained traffic engineering for data centers," in Proc. 7th International Conference on emerging Network Experiments and Technologies (CoNEXT '11), Tokyo, Japan, pp. 1-12, Dec. 6-9, 2011.
- [6] F.P. Tso and D. P. Pezaros, "Improving data center network utilization using near-optimal traffic engineering," IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 24, pp. 1139-1148, June 2013.
- [7] B. Heller, S. Seetharaman, P. Mahadevan, Y. Yiakoumis, P. Sharma, S. Banerjee, and N. McKeown, "ElasticTree: Saving energy in data center networks," in Proc. 7th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI '10), San Jose, USA, pp. 1-16, Apr. 28-30, 2010.
- [8] T. C. Hu, "Multi-commodity network flows," Operations Research, vol. 11, no. 3, pp. 344-360, 1963
- [9] R. T. Marler, J.S. Arora, "Survey of multi-objective optimization methods for engineering," Structural and Multidisciplinary Optimization, vol. 26, no. 6, pp. 369-395, 2004.
- [10] M. Al-Fares, A. Loukissas, A. Vahdat, "A scalable, commodity data center network architecture," in Proc. ACM SIGCOMM Conference on Data Communications, Seattle, USA, pp. 63-74, August 17-22, 2008.