

MPLS 네트워크에서의 부하 분산 방안

김 세 린[†] · 송 정 화^{††} · 이 미 정^{†††}

요 약

MPLS(Multi-Protocol Label Switching)는 효율적인 명시적 라우팅(explicit routing)을 지원할 수 있어 트래픽 엔지니어링 가능성을 크게 향상시켰다. 본 논문에서는 이와 같은 MPLS를 이용하여, 좀 더 효율적으로 네트워크 자원을 활용하고 성능을 향상시키는 방안으로서 다중 경로 상에 부하를 분산시키는 방안을 제안하고 이를 LBM(Load Balancing in MPLS networks)이라 명명하였다. LBM은 하나의 진입-진출 라우터 쌍 간에 다중의 LSP(Label Switching Path)를 설정하고, 플로우 단위로 이들 다중의 LSP에 부하를 분산하되 경로의 길이와 부하를 함께 고려하여 부하를 분산한다. 또한, 링크의 효율적인 활용을 위하여 링크의 활용률이 커짐에 따라 더 짧은 경로에 의해서만 사용되도록 제한하고, 더 짧은 경로의 활용률이 커짐에 따라 더 길지만 활용률이 더 낮은 경로를 대체 경로(alternative path) 후보로 고려한다. 시뮬레이션을 통하여 최단 경로 방식 및 기존의 다중 경로를 사용하는 방식들과 성능을 비교한 결과 LBM의 성능이 우수하며, 특히 국부적으로 트래픽이 편중되는 경우 LBM이 효율적으로 대처할 수 있음을 알 수 있었다.

Load Balancing in MPLS Networks

SaeRin Kim[†] · JeongHwa Song^{††} · Meejeong Lee^{†††}

ABSTRACT

MPLS enables efficient explicit routing, and thus provides great advantages in supporting traffic engineering. Exploiting this capability, we propose a load balancing scheme which deploys a multipath routing. It is named LBM (Load Balancing in MPLS networks), and targets at efficient network utilization as well as performance enhancement. LBM establishes multiple LSP (Label Switched Path)s between a pair of ingress-egress routers, and distributes traffic over these LSPs at the flow level. Its routing decision is based on both the length and the utilization of the paths. In order to enhance the efficiency of a link usage, a link is limited to be used by shorter paths as its utilization becomes higher. Longer paths are considered to be candidate alternative paths as the utilization of shorter paths becomes higher. Simulation experiments are performed in order to compare the performance of LBM to that of static shortest path only scheme as well as the other representative dynamic multipath traffic distribution approaches. The simulation results show that LBM outperforms the compared approaches, and the performance gain is more significant when the traffic distribution among the ingress-egress pairs is non-uniform.

키워드 : MPLS, 다중 경로(load balancing), 부하 분산(multipath)

1. 서 론

인터넷 트래픽 엔지니어링은 IP 네트워크 운용의 효율성을 증대시키는 것을 목적으로 하는 일련의 공학적 접근 방식들을 총체적으로 일컫는 말이라 정의할 수 있다[1, 2]. 이와 같은 목적을 위해, 인터넷 트래픽 엔지니어링에서는 일반적으로 주어진 네트워크 토폴로지에 트래픽 요구를 효율적으로 매핑하는 작업을 다룬다. 네트워크 토폴로지 상에 트래픽을 매핑하는 작업을 용이하게 제어하기 위해서는 명시적 라우팅이 요구되는데, 이와 같은 명시적 라우팅을 효율적

으로 지원할 수 있는 MPLS(MultiProtocol Label Switching)가 등장함으로써 트래픽 엔지니어링의 가능성은 한층 더 확대되었다. 전통적인 IP 네트워크에서 명시적 라우팅을 수행하기 위해서는 경로를 구성하는 모든 노드의 주소를 패킷마다 헤더에 명시해야 하므로, 명시적 라우팅을 위한 패킷 당 전송 및 프로세싱 오버헤드가 크다. 그런데, MPLS에서는 짧고 고정된 길이의 레이블을 사용하여 경로를 명시하고 2계층 스위치와 같은 레이블 스위핑에 의하여 패킷을 전달하기 때문에 매우 효율적으로 명시적 라우팅을 지원할 수 있다[3, 4].

트래픽 요구를 매핑하는데 있어서 기존의 홉 바이 홉 라우팅에 기반한 IP 네트워크에서는 일반적으로 목적지 주소가 동일한 모든 트래픽 요구를 하나의 최단 경로에 매핑하였다. 이와 같은 라우팅의 가장 큰 문제점은 네트워크의 일부

* 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R02-2000-000-00078-0) 지원으로 수행되었음.

† 정 회 원 : 삼성전자(주) CTO전략실 소프트웨어센터 근무

†† 준 회 원 : 이화여자대학교 과학기술대학원 컴퓨터학과

††† 정 회 원 : 이화여자대학교 컴퓨터학과 교수

논문접수 : 2002년 7월 4일, 심사완료 : 2002년 9월 5일

에는 전혀 트래픽 부하가 없는 반면 최단 경로 상의 링크에서는 혼잡이 발생하는 트래픽 분포 불균형이 발생할 수 있다는 것이다[5]. 이와 같은 불균형은 네트워크 성능 저하를 유발하게 되므로 균일한 트래픽 부하 분포를 위해 네트워크 내의 두 지점간에 복수개의 경로가 존재하는 경우 이들 경로 상에 적절하게 트래픽을 분산시키는 것은 트래픽 엔지니어링의 주요한 목표 가운데 하나이다[6-9].

본 논문에서는 트래픽 엔지니어링의 용이성을 제공하는 MPLS 네트워크를 대상으로 하여, 네트워크 토폴로지에 다중 경로가 존재하는 경우, 이들 다중의 경로 상에 효율적으로 트래픽을 분산시킬 수 있는 새로운 방안을 제안하고 이를 LBM(Load Balancing in MPLS networks)이라 명명하였다. LBM은 특정 QoS 요건이 없는 최선 트래픽 플로우들의 트래픽을 대상으로 하며, 근원지와 목적지 쌍 사이에 홉 수가 다른 하나 이상의 경로들이 존재하는 경우 반 정적으로 이들 경로에 대해 LSP(Label Switched Path)를 설정해 두고, 플로우 단위로 트래픽을 분산시킨다. 새로운 트래픽 플로우가 발생하면 LBM은 그 플로우의 근원지와 목적지 사이에 존재하는 LSP들의 트래픽 부하와 길이를 함께 고려하여 플로우를 전달할 경로를 선택한다. LBM은 더 짧은 경로의 활용률이 높아짐에 따라 더 길지만 활용률이 더 낮은 경로들을 트래픽 전달에 이용하며, 링크의 활용률이 높아짐에 따라 링크 사용의 효율성을 높이기 위하여 활용률이 높은 링크일수록 더 짧은 경로에 의해서만 사용될 수 있도록 제약을 둔다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 1장의 서론에 이어서 2장에서는 최선 트래픽 플로우에 대하여 MPLS 네트워크에서 다중의 경로 상에 부하를 분산시키는 방안을 제안한 기존의 다른 연구들에 대하여 살펴보고, 3장에서는 LBM에 대하여 자세히 설명한다. 4장에서는 LBM의 성능 평가를 위해 수행한 시뮬레이션 및 그 결과에 대하여 살펴보고, 마지막으로 5장에서는 결론과 향후 연구에 대하여 기술한다.

2. 관련 연구

MPLS 네트워크에서의 트래픽 엔지니어링을 위하여 다중 경로 상에 부하를 분산시키는 방안에 대한 연구가 이루어져 왔는데, 본 논문에서 제안한 LBM처럼 트래픽 플로우가 특정 QoS 요구를 부과하지 않는 경우, 즉 최선 트래픽 플로우인 경우에 대한 트래픽 분산 방안으로서 제안된 것으로는 MPLS OMP (Optimized MultiPath)와 MATE(MPLS Adaptive Traffic Engineering) 등이 있다[6, 9].

MPLS OMP는 각 목적지에 대하여 대체 경로들의 집합을 유지하면서 이 집합에 속하는 경로들 가운데 가장 부하가 높은 링크를 포함하고 있는 경로의 부하를 다른 경로들로 이동시킴으로써 대체 경로 집합에 속하는 모든 경로들의 부하가 동일해지는 것을 목표로 부하를 분산시킨다[9]. MPLS

OMP에서의 대체 경로 집합은 최단 경로만을 포함하도록 초기화된 후 대체 경로 집합에 속하는 경로들의 혼잡 정도가 높아짐에 따라 점진적으로 더 긴 경로들을 대체 경로 집합에 포함시키며 대체 경로 집합 업데이트는 대체 경로 집합의 혼잡 정도가 기준치 이상으로 높아지거나, 링크 복구나 부하 감소로 혼잡 정도가 낮아질때 이루어진다. 또한, MPLS OMP에서는 대체 경로 집합에 속하는 경로들에 트래픽을 분산할때 경로들의 부하만을 고려하고 가장 부하가 높은 경로의 트래픽을 다른 경로들로 분산시킴으로써 대체 경로 집합에 속하는 모든 경로의 부하가 균일하게 되는 것을 목표로 한다. 그러나, 이것은 초기에 대체 경로 집합에 속한 경로가 나중에 추가된 대체 경로들보다 최적의 경로임에도 불구하고, 모든 경로에 부하가 동일하게 분배되므로 사용자 측면에서 볼때, 성능에 저하가 있을 수 있다. 이 논문에서 제안한 LBM에서는 경로의 길이와 부하를 함께 반영한 확률 분포에 따라 대체 경로 집합에 속하는 경로들에 무작위로 트래픽을 분산시킨다. 따라서 LBM에서는 경로들에 부하가 같은 경우라면 경로 길이가 더 짧은 경로에 상대적으로 트래픽 플로우가 할당될 가능성이 더 높고, 좀 더 효율적인 자원 활용이 가능하다.

또, 대체 경로 집합에 속하는 경로를 결정하는데 있어서 MPLS OMP에서는 현재 대체 경로 집합의 혼잡 정도가 임계치 이상이면 현재 대체 경로 집합의 경로와 혼잡 정도가 임계치 이상인 경로를 제외한 경로들 중 최단 경로를 대체 경로 집합에 추가하는데, 이때 추가되는 대체 경로의 혼잡 정도가 임계치에 근사하는 경우에는 대체 경로 집합을 확장하는 것은 새로운 혼잡한 경로를 만들 가능성을 높게 되어 비효율적이다. 이를 위해, LBM에서는 대체 경로 집합에 속하는 경로를 결정하는데 있어서 활용률이 일정치 이상인 링크들은 대체 경로에 사용되지 못하도록 하고, 경로 길이가 길어짐에 따라 대체 경로로 채택될 수 있는 부하 임계치를 더 낮게 둬으로써, 대체 경로 집합 확장이 네트워크의 전반적인 혼잡 정도에 따라 제한될 수 있도록 하였다. 즉, LBM은 임의의 경로에 대하여 최단 경로에 비한 그 경로의 추가 홉 수에 따라 대체 경로 자격을 가질 수 있는 절대적인 혼잡 정도를 지정하기 때문에, 비록 상대적으로 현재의 대체 경로 집합보다 혼잡도가 낮아도 이와 같은 임계치보다 더 부하가 높은 경로는 대체 경로로 사용되지 못한다. 이것은 과거 텔리커뮤니케이션 네트워크를 위하여 제안되었던 트렁크 예약의 개념을 확장하여 경로의 추가 홉 수 별로 링크 사용에 제약을 둔 것이다. 이것은 최단 경로에 비한 추가 홉 수가 많은 경로일수록 자원 사용에 낭비가 많은 것이므로, 낭비되어도 타 트래픽 플로우에 영향을 덜주는 좀더 한가한 링크만을 이용할 수 있도록 함으로써, 실제적으로 부하 분산이 효과를 거둘 수 있는 상황 즉, 좀 더 길지만 충분한 자원을 가진 경로가 있는 경우에만 이들 경로를 통한 우회가

이루어지도록 하고, 네트워크의 전체적인 혼잡 정도가 높아짐에 따라 대체 경로 사용 정도를 억제할 수 있도록 하기 위함이다.

MATE에서는 하나의 진입 진출 라우터 쌍 사이에 여러개의 LSP가 설정되어 있는 경우, 각 LSP의 혼잡 정도를 파악하고 이를 바탕으로 이들 LSP 상에 혼잡 정도가 동일해지는 것을 목적으로 부하를 분산하는 방법을 제안하였다[6]. MATE의 트래픽 엔지니어링 기능은 모니터링 단계와 부하 균등화 단계로 구성되며, 모니터링 단계에서 지속적으로 상당한 네트워크 상태 변화가 감지되면, 부하 균등화 단계로 전이해서 LSP들 전체의 혼잡 정도를 최소화하는 것을 목적으로 부하를 분산시킨다. 일단 부하 분포 균등화가 이루어지면 다시 모니터링 단계로 넘어가 이와 같은 과정이 반복된다. 트래픽 엔지니어링 기능을 지원하기 위하여 MATE는 프로빙(probing) 패킷을 이용해 경로의 혼잡 정도를 지속적으로 측정하고 분석한다. MATE에서는 진입 진출 라우터 쌍 사이에 설정되어 있는 LSP들의 수를 고정적으로 유지하고 그 LSP들에 모두 부하를 분산하므로, 네트워크의 혼잡 정도가 낮을 때에는 지나친 부하 분산으로 인해 성능의 저하를 가져올 수 있고, 고정된 LSP들의 혼잡 정도가 높을 때에도 대체 경로를 추가할 수 없다는 단점이 있다. LBM에서는 대체 경로 집합에 속하는 경로들중 확률에 따라서 부하를 분산할 경로를 선택하고, 네트워크 상황에 따라 대체 경로 집합을 확장함으로써 이러한 문제를 해결한다.

그 밖에 MPLS 네트워크에서 다중 경로상에 부하를 분산하는 방안으로 제안된 [10]에서는 링크상태 메시지에 따라서 라우터들이 독립적으로 경로상에 부하를 할당하는 경우, 그 경로의 부하가 일시적으로 진동하는 상태가 발생하는데, 이를 줄이기 위해 현재의 네트워크의 상태를 미리 예측하여 임계치 이상으로 부하가 할당되지 않도록 하는 부하제어 방안을 제안하였다[10]. 이는 링크의 이전 상태를 통해 현재의 링크 상태를 미리 예측함으로써, 링크의 부하 수준이 임계치를 넘지 않도록 부하를 할당하고, 임계치 이하의 경로에 대해서 가용 대역폭에 비례하는 양의 부하를 할당할 수 있도록 하는 방안이다. 이 방안은 다중 경로에 부하를 분산하는 방안이나, 그 목적이 일시적인 진동을 완화하기 위해 방법으로써, 본 논문에서 제안하는 네트워크 자원의 효율적인 활용을 목적으로 하는 LBM과 그 목적이 다르다.

3. Load Balancing over Multipath in MPLS Networks (LBM)

LBM을 위해 각 근원지는 먼저 반 정적으로 토폴로지 정보에만 근거하여 모든 목적지에 대해 다중의 MPLS LSP들을 설정한다. LBM은 MPLS-OMP와 유사하게 OSPF의 LSA(Link State Advertisement) 플러딩을 이용해 경로들의

부하를 파악하며, 새로운 플로우 요청이 발생할때마다 그 플로우를 전달하기 위한 LSP를 결정하기 위하여 해당 목적지로 설정되어 있는 여러 개의 LSP들 가운데서 후보가 될 LSP들의 집합을 선정하고 이들 가운데 하나의 LSP를 경로 길이와 부하를 함께 반영한 확률 분포에 따라 무작위로 선출한다. 3.1절에서 먼저 LBM의 토폴로지에 근거한(topology-driven) LSP 설정에 대하여 설명하고, 3.2절에서는 새로운 플로우 발생시 그 플로우를 전달할 후보 LSP들을 결정하는 방안을 설명하며, 마지막으로 3.3절에서 이들 후보 LSP들 가운데 하나의 LSP를 선정하는 방법에 대하여 설명하기로 한다.

3.1 토폴로지에 근거한 다중의 LSP 설정

LBM을 적용하기 위해서는 근원지와 목적지 사이에 다중의 경로가 존재하여야 하는데, LBM에서는 토폴로지에 근거하여(topology-driven) 반 정적(semi-static)으로 근원지와 목적지 사이에 존재하는 다중의 경로들에 대하여 LSP들을 미리 설정해 둔다. 즉, LSP 재설정에는 토폴로지 변화가 있는 경우에만 수행한다. 단, LBM은 우회로 인해(즉, 최단 경로보다 더 긴 경로를 사용함으로 인해) 추가적으로 사용하는 네트워크 자원 양을 제한하기 위하여, 임의의 근원지와 목적지 쌍 사이에 LSP를 설정할 수 있는 경로의 최대 길이를(해당 근원지와 목적지 간의 최단 경로 길이 + δ)홉으로 제한하였다. LBM은 δ 를 네트워크의 규모에 대한 함수로 결정하기 위하여 다음과 같은 식으로 δ 를 구한다.

$$\delta = D \times r, \quad 0 \leq r \leq 1 \quad (1)$$

이 식에서 D 는 네트워크의 지름(최단 경로 길이의 최대값)을 뜻한다. 즉, 일반적인 경우 네트워크의 지름이 네트워크 토폴로지의 규모를 암시할 수 있는 파라미터라고 가정하는 것이다. 네트워크 규모에 따라 δ 를 결정한 것은 네트워크의 규모에 따라 추가 홉 수를 사용하는데 따른 자원 낭비의 상대적인 영향이 다르기 때문이다.

LBM은 Bellman-Ford 알고리즘을 이용하여 경로를 계산하되, 경로 길이가 (최단 경로 길이 + δ)홉 이내인 모든 경로를 찾아 미리 LSP를 설정한다고 가정한다. 물론 네트워크의 규모가 커서 경로 길이 제약을 만족시키는 경로의 수가 지나치게 많을 경우에는 미리 설정하는 LSP 수에 대한 추가적인 제약을 두어야 할 것이다. 그러나, 본 연구에서는 우선 경로 길이 제약을 만족시키는 모든 경로들에 대해 LSP를 설정해 둔다고 가정한다.

3.2 후보 LSP 집합 선정

새로운 사용자 플로우가 발생하면, LBM은 먼저 해당 근원지 목적지간에 설정되어 있는 LSP들 집합의 부분 집합인 후보 LSP들의 집합을 결정한다. 근원지 i 와 목적지 j 사

이에 설정된 모든 LSP들의 집합을 L_{ij} 라 하고 새로운 플로우를 위해 선정된 후보 LSP들의 집합을 A_{ij} 라하면, $A_{ij} \subseteq L_{ij}$ 이다. $h(l)$ 은 경로 혹은 LSP l 의 길이(홉 수)라 정의하고, $u(l)$ 은 경로 혹은 LSP l 의 활용률을 표시하는 함수라고 정의하며, 경로 혹은 LSP의 집합 L 의 활용률은 $U(L)$ 로 표시하고 다음과 같이 정의한다.

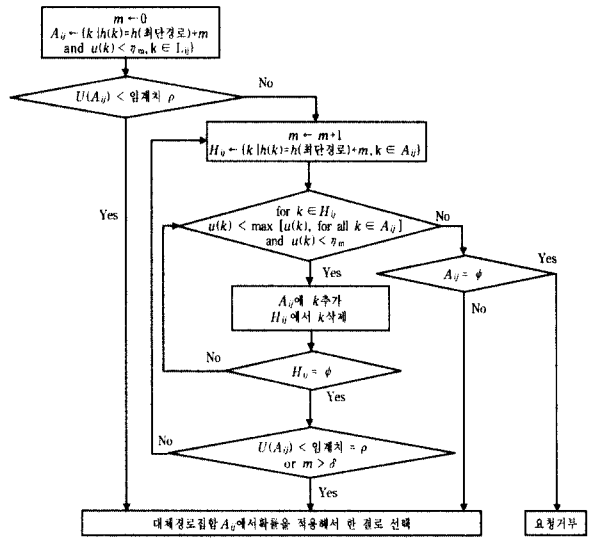
$$U(L) = \min [u(l), \text{for all } l \in L]$$

(그림 1)은 근원지 i 로부터 목적지 j 로 가는 플로우를 위해 L_{ij} 로부터 A_{ij} 를 선정하는 과정을 도식화한 것이다. $A_{ij} = \{ \text{근원지 } i \text{로부터 목적지 } j \text{로 가는 최단 경로들 중 활용률이 } \eta_0 \text{보다 낮은 경로들} \}$ 로 초기화되고, $U(A_{ij}) \geq \rho$ 라면 길이가 $(h(\text{최단 경로}) + 1)$ 인 경로들 가운데서 활용률이 $\max [u(k), \text{for all } k \in A_{ij}]$ 보다 낮고, 임계치 η_1 보다도 낮은 경로들을 A_{ij} 에 추가한다. 이와 같은 경로 추가 작업은 $U(A_{ij}) < \rho$ 가 되거나 L_{ij} 에 더 이상 고려할 LSP가 없을 때까지 계속해 나가는데, L_{ij} 에 속하는 LSP들을 경로 길이 순서에 따라 차례대로 후보 경로 자격 조건을 만족시키지를 심사하여 A_{ij} 에 추가한다. $h(l) = (h(\text{최단 경로}) + m)$ 인 $l \in L_{ij}$ 은 A_{ij} 에 추가되기 위해서는 다음과 같은 두 가지의 자격 조건을 만족시켜야 한다.

- $u(l) < \max [u(k), \text{for all } k \in A_{ij}]$
- $u(l) < \eta_m$, 여기에서 η_m 는 경로 길이에 따라 적용되는 활용률에 대한 임계치로서 $m > n$ 인 경우 $\eta_m \leq \eta_n$ 인 관계가 성립함.

첫 번째 조건에 의해 후보 LSP 집합은 최단 경로 가운데 가장 활용률이 높은 경로보다는 낮은 활용률을 가지는 경로들로 구성된다. 또한, 두 번째 조건에 의해서 활용률이 η_m 와 같거나 큰 링크는 경로 길이가 $(h(\text{최단 경로}) + m)$ 미만인 경로에 의해서만 사용되도록 한다. $m > n$ 인 경우 $\eta_m \leq \eta_n$ 인 관계가 성립하므로, 활용률이 높은 링크일수록 더 최단 경로 길이에 가까운 경로에 의해서만 사용되도록 하는 것이다. 두 번째 조건은 트렁크 예약 방식을 단단계로 적용한 것이라 할수 있는데, 트렁크 예약은 어떤 링크의 활용률이 특정 임계치를 넘으면 그 링크를 좀더 효율적으로 사용하기 위하여 그 링크가 최단 경로에 의해서만 사용되도록 하는 방법이다. 종합적으로 보면, LBM은 후보 LSP 집합의 활용률이 임계치 ρ 보다 낮아질때까지 후보 LSP 집합을 확장하되, 후보 LSP 집합에 선출되는 LSP들은 최단 경로 길이를 초과하는 홉 수가 더 늘어남에 따라 더 엄격한 활용률 제약을 적용 받아 선출될 뿐 아니라, 최단 경로들 가운데 활용률이 가장 높은 최단 경로보다 활용률이 낮아야 한

다. 이와 같은 후보 LSP 집합 선출 방식에 의해, LBM은 부하 분포 불균형으로 인해 짧은 경로들의 활용률이 높은 경우에는 좀더 길면서 상대적으로 활용률이 더 낮은 경로들로 부하를 분산시키지만, 만약 부하 분포의 불균형으로 인해 활용률이 높은 것이 아니라면 후보 LSP 집합이 확대되지 못하도록 함으로써 오히려 다중 경로 사용을 피할 수 있도록 한다.



(그림 1) 대체 경로 집합 선정 과정

3.3 후보 LSP 집합에서의 경로 선출

LBM은 2.2절에서 설명한 것과 같이 네트워크의 부하 분포에 따라 후보 LSP 집합을 결정한 후, 후보 LSP 집합에 속하는 LSP들 가운데 하나를 선출하여 새로운 플로우의 트래픽을 전달한다. 이를 위하여 LBM은 후보 LSP 집합에 속한 경로들의 경로 길이와 활용률을 함께 반영한 선택 확률 함수를 적용해 랜덤하게 하나의 LSP를 선정한다. 구체적으로 LBM은 경로 길이와 활용률에 반비례하도록 선택 확률 P_i 를 계산한다.

<표 1> LSP 선정 확률 계산을 위한 파라미터들

N_a	대체 경로 집합 내의 경로들 수
$h(l)$	경로 l 의 홉 수
E	최단 경로의 활용률
$u(l)$	경로 l 의 활용률
$d(l)$	$E - u(i)$ (최단 경로와의 활용률 차이)
C_0	$\frac{1}{\sum_{i=1}^{N_a} \frac{1}{h(l_i)}}$
C_1	$\sum_{i=1}^{N_a} d(l_i)$
P_i	$(2) (a_0 \frac{C_0}{h(l)} + a_1 \frac{d(l)}{C_1}), a_0 + a_1 = 1$

<표 1>은 후보 LSP 집합에서 하나의 LSP를 선택하기 위하여 후보 LSP 집합의 각 LSP에 적용하는 선택 확률을 계산하는데 사용하는 파라미터들이다. C_0 은 홑 수에 반비례하도록 LSP 선택 확률을 계산할때, 후보 LSP 집합 내의 모든 경로들에 대한 이들 확률의 합이 1이 되도록 하기 위한 상수이다. 즉, $\sum_{i=1}^{N_s} \frac{C_0}{h(i)} = 1$ 이 성립한다. C_1 은 최단경로와의 활용률 차이(즉 최단 경로보다 얼마만큼 활용률이 더 낮은가)에 비례하도록 LSP 선택 확률을 계산할 때, 후보 LSP 집합 내의 모든 경로들에 대한 이들 확률의 합이 1이 되도록 하기 위한 상수이다. 즉, $\sum_{i=1}^{N_s} \frac{d(i)}{C_1} = 1$ 이 성립한다.

이와 같은 상수 C_0 과 C_1 을 적용하여 새로운 플로우를 위한 LSP로 경로 i 가 선택될 확률인 P^i 는 식 (2)와 같이 계산한다. 즉, 경로 i 가 선택될 확률 P^i 는 경로의 홑 수에 반비례하고, 최단경로와의 활용률 차이에 비례하도록 계산되며, 상수 a_1 과 a_2 를 이용해서 홑 수에 의한 확률 값과 활용률에 의한 확률 값을 더했을때 확률의 전체 합이 1이 될 수 있도록 하였다. a_1, a_2 두 상수 크기의 비율에 의하여 활용률과 홑 수의 반영율을 결정할 수 있다.

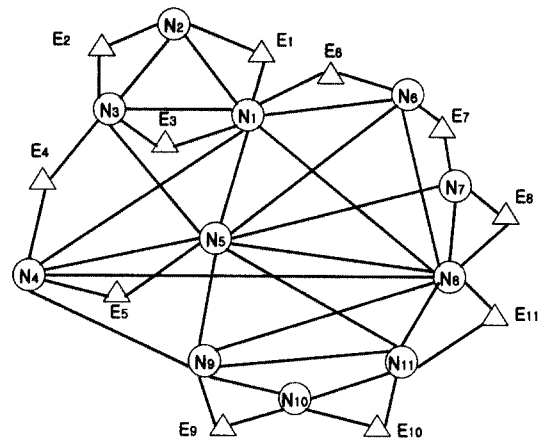
4. 시뮬레이션 모델과 결과 분석

본 장에서는 제안하는 LBM 알고리즘의 성능을 평가하기 위한 시뮬레이션과 그 결과에 대하여 설명한다. 시뮬레이션은 패킷 수준(session-level)에서 사건 운항에 기반한(event-driven) 방법을 이용하여 C 언어로 작성되었고, UNIX 환경에서 수행되었다.

3.1절에서 시뮬레이션을 위한 네트워크와 트래픽 모델을 설명하고, 3.2절에서는 시뮬레이션에서 LBM과 성능을 비교할 대표적인 기준의 경로 선택 방식들을 설명하였으며, 3.3절에서는 시뮬레이션 결과를 보이고 설명한다.

4.1 시뮬레이션 모델

본 시뮬레이션은 (그림 2)와 같은 일반적인 ISP 형태의 MPLS 네트워크 토폴로지를 대상으로 수행하였다. $N_1 \sim N_{11}$ 번은 코어 LSR(Label Switching Routers)이고, $E_1 \sim E_{11}$ 번은 에지 LSR이다. 사용자 플로우가 에지 LSR에 도착하면, 그 에지 LSR은 사용자 플로우에 대한 진입 에지 LSR이 된다. 진입 에지 LSR은 사용자 플로우에 대한 LSP를 결정하여 진출 LSR로 사용자 플로우를 전송한다. 각 LSR의 출력 큐로는 크기가 100 패킷인 유한 큐를 사용하였다. 각 링크의 대역폭은 45Mbps/sec이고, 양방향 링크이다. 각 노드 사이의 링크 지연 시간은 0.1msec으로 설정하였다.



(그림 2) 시뮬레이션에서 사용한 MPLS 네트워크 모델

하나의 사용자 플로우 발생을 의미하는 세션 요청은 각 진입 라우터에서 독립적으로 이루어지며, 세션 발생 간격은 지수 분포 랜덤 변수(exponentially distributed random variable)라 가정하였고, 평균 세션 발생 간격을 4초로 설정하였다. 세션 길이는 플로우 유지 시간으로서 이 역시 지수 분포 랜덤 변수라 가정하였고, 평균 세션 길이는 100초로 설정하였다. 본 시뮬레이션에는 세션 발생 요청 분포가 균일한 경우와 편중된 경우 두 가지의 경우를 각각 실험하였는데, 균일한 경우에서는 각 세션에 대한 진입 LSR을 균일 분포 확률(uniformly distributed probability)에 의해 $N_1 \sim N_{11}$ 의 에지 LSR 가운데 선택하였고, 진출 LSR 역시 진입 LSR을 제외한 나머지 에지 LSR 중에서 균일 분포 확률에 의해 결정하였다. 편중된 경우에는 N_1 과 N_2 그리고 N_{10} 과 N_{11} 사이에 전체 세션 발생 요청의 30%가 해당되도록 하고, 나머지 70%는 역시 균일 분포에 의해 진입 진출 LSR을 선택하도록 하였다.

세션 내에서의 패킷 발생 프로세스는 포와송 분포(poison distributed probability)를 따른다고 가정하였고, 트래픽 부하에 변화를 주기 위해서는 두 패킷간의 평균 발생 간격을 변화시켰다. 패킷의 사이즈는 1000바이트라고 가정하였고, 각 경우에 대해 8000초의 시뮬레이션 시간에 대한 결과를 수집하였다.

시뮬레이션에서는 (h (최단 경로) + m), $0 \leq m \leq \delta$, 인 길이의 경로가 후보 LSP 집합에 선택될 수 있는 활용률 제한 값(η_m)을 <표 2>와 같이 설정하였다. 본 시뮬레이션에서는

<표 2> 경로 길이가 (h (최단 경로) + m)인 경로가 후보 LSP 집합에 선택되기 위한 활용률 제한 값(η_m) 설정

경로 길이	활용률 제한(η_m) 값
h (최단 경로) + 0	90%
h (최단 경로) + 1	85%
h (최단 경로) + 2	80%
h (최단 경로) + 3	75%
h (최단 경로) + 4	70%

3.1절에서의 식 (1)의 $r = 1.0$ 으로 설정하였고, 시뮬레이션에서 사용한 (그림 2)의 네트워크는 지름 $D = 4$ 이므로, 결과적으로 최단 경로 길이를 초과하는 홑 수의 최대 값 $\delta = 4$ 이다.

4.2 제안한 알고리즘과 비교할 기존의 경로 선택 방식

LBM의 성능을 알아보기 위하여, 정적인 최단 경로 방식을 비롯한 다섯 가지의 기본적인 경로 선택 방식의 성능과 LBM의 성능을 시뮬레이션을 이용해 비교하였다. 이 절에서는 이들 다섯 가지의 기본적인 경로 선택 방법을 간단히 설명한다. 이들 다섯 가지의 경로 선택 방법들도 LBM과 동일하게 OSPF의 LSA 플러딩과 같은 방법으로 링크의 활용률 정보를 얻는다고 가정하였다.

- 최단 경로 라우팅 알고리즘(SP : Shortest Path only routing algorithm) : 최소 홑 수의 경로만을 사용하며, 만약 최소 홑 수 경로의 활용률이 η_0 를 넘으면 더이상 새로운 플로우를 수용하지 않는다.
- 대체 경로 라우팅 알고리즘(ALT : ALternate path routing algorithm) : 각 근원지 목적지 쌍 사이에 한개 이상의 최단 경로와 대체 경로(최단 경로보다 더 긴 경로)가 있다. 최단 경로를 우선적으로 사용하지만, 최단 경로의 활용률이 η_0 를 넘으면 대체 경로 가운데 다음으로 짧은 경로를 사용하고 만약 그 경로도 활용률이 η_0 를 넘게 된다면 대체 경로에서 차례대로 다음으로 짧은 경로를 사용해 나간다. 최단 경로와 모든 대체 경로의 활용률이 η_0 를 넘게 되면 더 이상 새로운 플로우를 수용하지 않는다.
- 트렁크 예약 스킴(TR : Trunk Reservation Scheme) : 대체 경로 라우팅과 마찬가지로의 순서로 최단 경로와 대체 경로를 사용하지만 활용률이 η_1 이상인 링크는 최단 경로에 의해서만 사용되도록 한다. 최단 경로의 활용률이 η_0 를 넘고, 대체 경로들의 활용률도 모두 η_1 이상이 되면 더이상 새로운 플로우를 수용하지 않는다.
- 무작위 라우팅(RAN : Random Routing) : 근원지와 목적지 쌍 사이에 여러개의 경로가 있을때, 무작위로 경로를 선정한다. 모든 경로의 활용률이 η_0 이상이 되면 더 이상 새로운 플로우를 수용하지 않는다.
- 최소 로드 스킴(LL : Lightest Load Scheme) : 근원지와 목적지 쌍 사이의 모든 경로 중에서 활용률이 가장 낮은 경로를 선정한다. 모든 경로의 활용률이 η_0 를 초과하면 더 이상 새로운 사용자 플로우를 수용하지 않는다.

4.3 시뮬레이션 수행과 결과 분석

(그림 3)~(그림 7)은 제안한 LBM과 기존의 다섯 가지 경로 선택 방법의 성능을 연결 수락률, 패킷 손실률, 지연, 활

용률, 전송 효율 등의 측면에서 비교한 것이다. 각 결과는 트래픽 부하가 변화함에 따라 이들 측정치가 어떻게 변화하는지를 보여주고 있으며, 각 그림의 (a)와 (b)는 각각 트래픽 요구 발생 분포가 균일한 경우와 특정 근원지와 목적지 쌍에 편중된 경우의 결과를 보여주고 있다.

연결 수락율을 보여주는 (그림 3)에서 단일 최단 경로만을 사용하는 SP의 경우 다중의 경로를 사용하는 방법들에 비하여 네트워크에서 수용할 수 있는 사용자 플로우 수가 훨씬 적음을 알수 있다. 즉, 동일한 양의 네트워크 자원을 가지고 서비스할 수 있는 사용자 수가 적다는 것이다. 다중의 경로를 사용하는 동적인 경로 선택 방안 가운데서는 경로의 부하와 길이를 고려하지 않고 무작위로 경로를 선택하는 RAN 방식의 연결 수락율이 현저히 낮다.

(그림 3) 트래픽 부하 변화에 따른 연결 수락률 변화

TR과 ALT는 유사한 연결 수락율을 보이지만 TR의 연결 수락율이 약간 낮고 특히 실험 2에서 부하가 높은 경우 TR의 연결 수락율이 일관되게 ALT의 연결 수락률보다 낮은 것을 볼수 있는데, 이것은 TR의 경우 링크의 활용률이 일정 수준 이상이 되면 이들 링크가 최단 경로가 아닌 경로에 의해 사용되지 못하도록 하기 때문에 ALT에 비해 다중 경로 사용에 대한 제약이 크기 때문이다. 그러나, (그림 4)와 (그림

5)를 보면 수용된 플로우에 대해서는 TR의 성능이 약간 더 나음(손실율과 지연이 더 적음)을 볼수 있다. 특히 부하가 높은 경우 이들 두 스킴의 차이가 좀 더 뚜렷함을 볼수 있다.

보인다. 즉, TR은 수락된 플로우에 대한 성능이 좋지만 연결 수락율이 낮고, ALT는 수락율은 높으나 수락된 플로우에 대한 성능이 좋지 못함을 알 수 있다. LL은 부하가 가장 낮은 경로를 선택하기 때문에 타 스킴에 비하여 패킷 손실과 지연이 모두 적지만 LBM은 LL보다 조금씩 더 나은 성능을 보였다. LBM은 (그림 3)(b)에서 보듯이 트래픽 분포가 균일하지 않은 경우 LL보다 더 효율적으로 트래픽 부하를 다중 경로 상에 분산시킴으로써 네트워크에 수락되는 플로우의 수를 증가시킬 수 있을뿐 아니라, (그림 4)와 (그림 5)에서 볼 수 있듯이 수락된 플로우들의 성능도 LL에 비하여 향상시킨다.

(그림 4) 트래픽 부하 변화에 따른 패킷 손실 확률 변화

트래픽 발생 분포가 균일한 실험 1에서는 LBM과 LL이 유사하게 높은 연결 수락율을 보이지만, 트래픽 발생 분포가 편중된 실험 2에서는 부하가 높아짐에 따라 LBM의 연결 수락율이 LL의 연결 수락율보다 뚜렷하게 높아짐을 볼 수 있다. 이것은 LBM의 경우 네트워크 혼잡이 국부적 경우에만 경로 길이가 더 긴 대체 경로를 사용하기때문에 비효율적인 링크 사용을 피하여 부하가 높은 경우 좀더 많은 플로우를 수용할 수 있기 때문이다.

(그림 4)와 (그림 5)는 수락된 트래픽 플로우에 대한 네트워크 성능을 보기 위하여 트래픽 부하 변화에 따른 패킷 손실률과 지연의 변화를 측정된 결과이다. 동적으로 다중의 경로 중 하나를 선택하는 스킴들(SP가 아닌 스킴들) 가운데서는 경로 길이와 부하에 대한 고려 없이 다중 경로를 사용하는 RAN의 성능이 가장 낮다. SP는 부하가 낮은 경우 최단 경로의 혼잡이 적어 패킷 손실과 지연이 적지만 부하가 높아짐에 따라 단일 최단 경로의 혼잡으로 패킷 손실 및 지연이 급격히 늘어난다. TR의 경우 연결 수락율은 ALT보다 낮았지만 패킷 손실율과 지연은 ALT보다 더 나은 성능을

(그림 5) 트래픽 부하 변화에 따른 평균 지연 변화

(그림 6)은 트래픽 부하의 변화에 따른 네트워크의 평균 활용률 변화를 보여주는 그래프이다. 이 값은 네트워크 상의 각 링크의 평균 활용률의 평균으로 구하였다. SP는 비교한 경로 선택 방법들 가운데 평균 활용률이 가장 낮고, 부하가 일정량 이상으로 증가한 후에는 부하 증가에 따른 네트워크 활용률 증가가 뚜렷하게 둔화되는데, 이것은 대체 경로를 사용하지 않고 최단 경로만을 사용하기 때문에 증가하는 트래픽 부하를 수용하는 능력에 제한이 크기때문이다. 이와같은 현상은 트래픽 부하가 편중된 경우인 실험 2에서 더 뚜렷함을 볼수 있다.

한 정도의 효율성을 보인다.

(그림 6) 트래픽 부하 변화에 따른 평균 활용률 변화

RAN은 무작위로 경로를 선택하므로 불필요하게 긴 경로를 사용하는 경우가 있어서 다른 라우팅 방법에 비해 평균 활용률이 매우 큰편이다. 트래픽 부하가 높은 경우에는 RAN이 SP나 ALT, TR 등에 비해 활용률이 약간 낮는데, 이것은 (그림 3)~(그림 6)에서 볼 수 있듯이 연결 수락율이 낮고 셀 손실율이 크기 때문에 상대적으로 타 스킴보다 네트워크에 유통되는 절대 트래픽 양 자체가 적은 것이 이유이다. 또한, RAN은 평균 활용률이 트래픽 부하 변화에 밀접한 상관관계를 보이지 않음을 볼수 있다.

TR과 ALT는 비슷한 평균 활용률을 보이고, LL의 경우는 TR과 ALT보다 약간 높은 평균 활용률을 보인다. 이것은 TR과 ALT의 경우는 짧은 경로를 먼저 사용해 나가는데 반해, LL은 네트워크 경로 길이는 고려하지 않고 활용률만을 고려하여 경로를 선택하기 때문에 네트워크 자원을 낭비하게 되는 경우가 있기 때문이다. LBM은 네트워크의 트래픽 부하가 높을때 TR이나 ALT보다 약간 낮은 정도의 활용률을 보인다.

(그림 7)은 네트워크 자원 활용의 효율성을 보기 위하여 네트워크 전체의 단위 시간당 작업량을 (그림 5)의 평균 활용률로 나눈 값을 보인 것이다. RAN의 효율성이 가장 낮고, 다음으로 ALT의 효율성이 낮다. 제안하는 LBM의 효율성이 가장 높고, 그 다음이 LL이며, 그 다음으로 TR과 SP가 유사

(그림 7) 트래픽 부하 변화에 따른 작업량/평균 링크 활용률

종합적으로 볼때, RAN은 다중 경로를 사용함으로써 부하가 높은 경우 SP에 비하여 연결 수락율을 높이지만, 경로 선택에서 경로의 길이나 부하를 고려하지 않기 때문에 수락된 트래픽에 대한 성능과 효율성이 모두 SP보다 떨어진다. 경로의 길이가 짧은 순으로 선택하는 ALT는 제안하는 LBM과 LL 다음으로 높은 연결 수락율을 보이지만, 경로 선택에서 경로 길이만을 고려하고 부하를 고려하지 않아 수락된 트래픽에 대한 성능이나 효율성은 RAN을 제외한 타 다중 경로 부하 분산 스킴들보다 낮았다. 부하가 높은 링크는 최단 경로에 의해서만 사용하도록 제약을 두는 TR은 ALT보다 연결 수락율은 낮지만, 수락된 트래픽에 대한 성능과 효율성이 ALT보다 더 높았다. 경로의 부하만을 고려하는 LL은 RAN, ALT, TR에 비하여 연결 수락율이 높고 수락된 트래픽에 대한 성능 및 효율성이 높다. 그러나, 제안한 LBM에 비해서는 모든 경우 모든 성능 측정치에 대하여 더 낮은 성능을 보였으며, 특히 국부적으로 트래픽 분포가 편중된 경우, 이들 두 스킴의 차이가 더 뚜렷함을 볼수 있었다. 이것은 LBM이 다단계로 트렁크를 예약하도록 하고 경로 선택에 있어서 경로 길이와 부하를 모두 고려함으로써 최단 경로가 아닌 경로로 트래픽을 분산시키는 것이 실제적으

로 효과를 가져올 수 있는 상황, 즉 트래픽 분포의 편중으로 인해 좀 더 긴 경로를 사용하면 효율적인 상황을 효과적으로 분별할 수 있기 때문이다.

한편, 제안한 LBM 방식에서 대체 경로 확장 여부를 결정하는데 사용하는 ρ 값 설정이 LBM의 성능에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 ρ 를 50%, 60%, 70%로 바꿔가면서 시뮬레이션을 수행하였다. 이 실험에서는 국부적으로 트래픽이 편중된 트래픽 모델을 사용하였다. (그림 8)은 이 실험의 결과를 보여주고 있는데 이를 통해 ρ 값이 연결 수락율, 패킷 손실과 지연, 효율성 등의 성능 측정치에 대해 모두 대체적으로 일관된 영향을 미치는 것을 볼 수 있었고, 대체 경로 집합 확장을 결정하는 기준인 ρ 의 적정치를 결정하는 것이 필요함을 알 수 있다. 이 실험에서 사용된 네트워크 모델과 트래픽 부하에서는 세 가지의 ρ 값 가운데 60%가

(그림 8) ρ 값 변화에 따른 LBM 성능 변화

가장 적합함을 볼 수 있었다. 이것은 ρ 값이 지나치게 낮으면 대체 경로 집합을 필요 이상으로 확장하여 자원 낭비를 가져올 수 있고, 반대로 ρ 값이 지나치게 높으면 충분한 대체 경로를 선정하지 못하게 되기 때문이다.

5. 결 론

MPLS 네트워크에서는 진입/진출 라우터 사이에 여러 개의 명시적인 다중 경로를 설정 할수 있다. 본 논문에서는 이러한 특성을 이용해서 이들 다중 경로 상에 로드 밸런스를 목적으로 플로우 단위로 트래픽을 분산시키는 방안인 LBM을 제안하였다. LBM은 플로우 단위로 경로를 결정하는데, 가능한한 더 짧은 경로를 사용함으로써 네트워크 자원 낭비를 막되 더 짧은 경로들의 활용률이 높아짐에 따라 더 길지만 활용률이 더 낮은 경로들도 대체 경로 후보로 포함시킨다. 그리고 해당 플로우를 전송할 경로는 이들 대체 경로 후보들 가운데서 길이와 활용률을 동시에 반영하여 무작위로 결정된다. 또한, LBM에서는 링크의 활용률이 높아짐에 따라 링크 사용의 효율성을 증가시키기 위하여 더 짧은 경로에 의해서만 링크가 사용될 수 있도록 제약을 두었다.

LBM의 성능을 알아보기 위해 정적인 최단 경로 라우팅 및 몇 가지의 기본적인 동적인 다중 경로 라우팅 방법의 성능과 비교하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. LBM은 연결 수락율을 비롯하여 수락된 트래픽에 대한 네트워크 성능, 효율성 등의 측면에서 비교된 모든 방식들보다 나은 성능을 보였으며, 특히 국부적인 부하 집중이 있을때 상대적으로 더 효율적으로 대처함을 알수 있었다.

네트워크를 구성하는 요소들의 용량이 동질적인 네트워크에서는 활용률이 가용 용량 측정에 매우 적합한 기준치이지만, 구성 요소의 용량이 이질적인 네트워크에서는 활용률은 링크 선택의 선호도를 결정하기에 적합한 기준치가 되지 못한다. 이에 향후 연구에서는 이질적인 구성 요소로 이루어진 네트워크에 적합한 기준치를 사용하는 방안을 제안하고자 한다.

참 고 문 헌

[1] D. O. Awduchem A. Chui, A. Elwalidn, I. Widjaja, and X. Xiao, "A Framework for Internet Traffic Engineering," Internet Draft <draft-ietf-tewg-framework-04.txt>, Apr., 2000.

[2] D. O. Awduche, J. Malcom, J. Agogbua, M. ODell, J. McManus, "Requirements for Traffic Engineering over MPLS," RFC 2702, 1999.

[3] Callon, R., Doolan, P., Feldman, N., Fredette, A., Swallow, G., Viswanathan, A., "A Framework for Multiprotocol Label Switching," Internet Draft <draft-ietf-mpls-framework-05.txt>, Sep., 1999.

[4] Eric C. Rosen, Arun Viswanathan, Ross Callon, "Multi-protocol Label Switching Architecture," RFC 3031, Jan., 2001.

[5] Z. Wang, J. Crowcroft, "Quality-of-Service Routing for Supporting Multimedia Applications," IEEE JSAC(Journal on Selected Areas in Communications), Sep., 1996.

[6] Anwar Elwalid, Cheng Jin, Steven Low, Indra Widjaja, "MATE : MPLS Adaptive Traffic Engineering," Proc. of INFOCOM, Apr., 2001.

[7] Srihari Nelakuditi and Zhi-Li Zhang, "On Selection of Paths for Multipath Routing," Proc. of IWQoS, June, 2001.

[8] Keping Long, Zhongshan Zhang, Shiduan Cheng, "Load Balancing Algorithms in MPLS Traffic Engineering," Proc. of HPSR(IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing), May, 2001.

[9] Curtis Villamizar, "MPLS Optimized Multipath(MPLS-OMP)," Internet Draft <draft-villamizar-mpls-omp-01.txt>, Feb., 1999.

[10] 박일규, 김종성, 이영석, 최양희, "다중경로 패킷 전달환경에서의 안정적인 부하제어 기법(Stable Load Control in Multipath Packet Forwarding)", 정보과학회 논문지 : 정보통신, Vol.29, No.2, April, 2002.

김 세 린

e-mail : 77cheer@hanmail.net

1996년 이화여자대학교 수학과 졸업(학사)

2000년 이화여자대학교 과학기술대학원
컴퓨터학과(석사)

2000년~현재 삼성전자(주) CTO전략실
소프트웨어센터 근무

관심분야 : MPLS, QoS routing, HomePNA, smart appliance,
UPnP, 차세대 WPAN, wireless internet

송 정 화

e-mail : jhsong@ewha.ac.kr

2002년 이화여자대학교 컴퓨터학과 졸업
(학사)

2002년~현재 이화여자대학교 과학기술
대학원 컴퓨터학과(석사)

관심분야 : mobile SCTP, 무선 이동 네트
워크, MPLS, 트래픽 엔지니어링

이 미 정

e-mail : lmj@ewha.ac.kr

1983년~1987년 이화여자대학교 전자계산학
학사

1987년~1989년 University of North Car-
olina at Chapel Hill 컴퓨터학
석사

1990년~1994년 North Carolina State University 컴퓨터공학
박사

1994년~현재 이화여자대학교 공과대학 컴퓨터학과 부교수

관심분야 : 고속 통신 프로토콜 설계 및 성능 분석, 멀티미디어
전송을 위한 트래픽 제어, 인터넷에서의 QoS 지원,
무선 이동 네트워크, Ad-hoc 네트워크