

공유 백업 대역폭을 갖는 다중 경로 지원 가상 네트워크 자원 할당 방안

김학서¹, 이상호^{2*}

¹한국전자통신연구원 RnD사업화실, ²충북대학교 소프트웨어학과

Multi-Path Virtual Network Resource Allocation with Shared Backup Bandwidth

Hak Suh Kim¹, Sang-Ho Lee^{2*}

¹Technology Commercialization Division, ETRI

²Dept. of Software, Chungbuk National University

요약 인터넷의 성장은 다양한 분야에서 정보통신 기술의 활발한 새로운 서비스를 창출하고 있지만, 인터넷의 구조적인 문제로 인하여 다양한 네트워크 구조와 서비스의 발전을 저해하고 있다. 네트워크 가상화는 현재 인터넷의 구조적 문제를 극복할 수 있는 대안으로 연구되고 있으며, 많은 연구 분야 중에서도 가상 네트워크 자원 할당 방안이 중요 연구 분야중의 하나이다. 본 논문에서는 가상 네트워크의 신뢰성을 향상시켜 네트워크상에서의 단일 링크 장애를 복구할 수 있는 방안을 제안한다. 다수의 가상 네트워크가 하나의 공유 백업 대역폭을 이용하여 다중 경로를 지원함으로써 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 가상 네트워크들이 백업자원을 공유함으로써 한정된 물리 자원의 효율성을 향상시키고, 사전에 할당된 백업 자원을 이용하여 빠른 장애 복구가 가능하다는 장점이 있다. 실험을 통하여 제안된 알고리즘의 다중 경로 생성 소요 시간이 기존 연구보다 약 50% 정도 성능 향상되었음을 확인하였다.

키워드 : 가상 네트워크, 자원할당, 대역폭 할당, 다중 경로, 공유 백업 대역폭

Abstract With the advance of ICT, the Internet has been creating new services in various fields. However, due to the architectural problem of the Internet, it may inhibit the development of network architectures and various services. Network virtualization is being investigated as an alternative to overcome the architectural problem of the Internet and a virtual network resource allocation algorithm is a very important issue. In this paper, we propose a multiple path resource allocation algorithm with shared backup bandwidth in order to overcome single link failure. It will be improved survivability of the virtual networks. Through our experiments, we confirmed that the multi-path creation time of the proposed algorithm has about 50% performance improvement than previous works.

Key Words : Virtual Network, Resource Allocation, Bandwidth Allocation, Multi-Path, Shared Backup Bandwidth

1. 서론

인터넷의 성장으로 많은 분야에서 정보통신 기술을 활용하고 있다. 현재 인터넷은 다양한 기술의 활용으로

많은 서비스를 제공하고 있으나, 오랜 기간 사용하고 있는 인터넷 그 자체가 가지는 경직성(ossification)으로 인한 새로운 네트워크 구조와 다양한 서비스 진화의 걸림돌이 되고 있다. 특히, 미래 인터넷을 위한 핵심 요소 중

하나인 새로운 서비스를 수용할 수 다양성을 제공하기에 구조적인 문제점을 가지고 있다. 이와 같은 현 인터넷의 구조적 문제를 해결하고자 하는 방안 중에 하나가 네트워크 가상화이다[1,2].

네트워크 가상화라는 개념은 인터넷과 같은 공중망을 가상화하여 서비스를 제공하는 방안을 연구하는 것으로, 미래 인터넷 기술을 위한 네트워크 분야의 핵심 기술로 대두되었다[3,4]. 네트워크를 가상화하면, 가상 네트워크(Virtual Network)마다 다양한 프로토콜을 사용하여 다양한 통신 서비스를 제공할 수 있다. 이렇게 함으로 현재 네트워크 구조를 변경하거나 개선하지 않고도 새로운 서비스를 제공할 수 있는 장점이 있다[5,6].

가상 네트워크는 많은 장점을 가지고 있으나, 하나의 물리 자원을 가상화하여 여러 가상 노드 및 가상 링크에서 사용함으로써 신뢰성 높은 서비스를 제공할 수 있는 방안이 필요하다[7,8].

본 논문에서는 가상 네트워크 생성을 위한 자원 할당 분야의 기존 연구를 분석하고, 이를 기반으로 가상 네트워크의 신뢰성을 향상시켜 생존성을 높이는 방안을 제안한다. 가장 빈번히 발생하는 단일 링크 장애 발생에 대처하기 위하여 다중 경로와 공유 백업 대역폭을 갖는 가상 네트워크 자원 할당 방안을 제안하고 실험을 통하여 효율성을 증명하고자 한다.

이를 위하여 본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 관련 연구를 분석하고, 3장에서 본 논문에서 제안하는 알고리즘을 기술한다. 4장에서 실험을 통하여 제안 알고리즘과 네트워크 시스템의 효율성을 증명하고, 마지막으로 결론 및 향후 연구를 기술한다.

2. 관련연구

네트워크 가상화 환경에서는 전통적인 인터넷 서비스 프로바이더(ISP: Internet Service Provider) 관점을 물리 네트워크를 관리하는 인프라스트럭처 프로바이더(InPs: Infrastructure Providers)와 가상 네트워크를 관리하는 서비스 프로바이더(SPs: Service Providers)로 구분한다. 전통적인 네트워크 관리 관점을 두 컴포넌트로 구분하고, 서비스 프로바이더가 다수의 이중 논리적 네트워크를 서로 독립적으로 생성하고 관리하는 것이 가상 네트워크이다[1,9].

가상 네트워크 생성 요구를 수신하면 물리 네트워크의 자원을 선택하고 이를 가상 노드와 가상 링크에 할당한다. 이후 가상 네트워크의 사용이 끝나면 할당받은 자원들을 반납한다. 원활한 네트워크 가상화의 이용을 위하여 가상 네트워크에 할당된 자원은 다른 네트워크로부터 보호되어 독립적으로 사용할 수 있어야 한다[10~12]. Fig. 1에 가상 네트워크 생성 및 소멸의 과정을 도식화하였다.

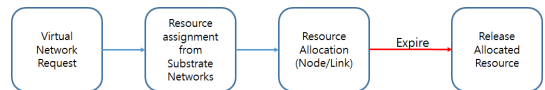


Fig. 1. Lifetime of Virtual Network

네트워크 가상화에 대한 연구 방향을 분석하면, 여러 네트워크 프로바이더간의 통신을 위한 표준 인터페이스 연구, 네트워크 연결성 확보를 위한 시그널링 연구, 물리 자원의 정보 수집, 가상 노드와 가상 링크를 위한 물리적 자원 할당, 호 제어(Admission Control) 및 자원 스케줄링을 효율적으로 사용할 수 있는 방안에 대한 연구가 주로 이루어졌다[1,13].

한정된 자원을 효율적으로 사용하기 위해서는 자원 발견(Resource Discovery)을 통하여 사용 가능한 물리 자원에 대한 정보를 수집해야 한다. 이런 과정에서 수집한 정보를 기반으로 자원을 할당한다[11,14].

지금까지 연구된 자원 할당 관련 연구를 분석하면, 자원 할당을 위한 알고리즘 실행 구조 측면에서는 중앙집중형(Centralized Approach) 구조와 분산형(Distributed Approach) 구조로 구분할 수 있다[14]. 또한, 자원 할당을 위한 알고리즘 실행 방식에 따른 분류는 정적 할당 방식(Static Resource Allocation)과 동적 할당 방식(Dynamic Resource Allocation)으로 구분할 수 있다[15].

가상 네트워크의 특별한 서비스 기능을 강화하기 위한 자원 할당 알고리즘으로 에너지 효율을 고려한 자원 할당 방식 등이 연구되었다[16,17].

또한 가상 네트워크의 신뢰성을 높이기 위한 연구들이 많이 진행되고 있다. 이와 같이 물리적인 장애 발생시 이를 극복하고 서비스의 연속성을 유지하기 위한 자원 할당 방안을 생존성 향상을 위한 자원 할당 알고리즘(Survivability 혹은 Survivable Virtual Network Embedding)이라 한다[7,8].

생존성 향상을 위한 자원 할당 방식은 물리 네트워크

와 가상 네트워크의 장애에 대처하기 위한 방안으로, 노드와 링크에 대한 백업을 고려한다. IP 백본망에서 장애의 20%는 관리를 위한 운용 유지 때문에 발생하고, 링크 장애의 70% 이상이 단일 링크 장애이며, 노드 장애는 장비 관리 때문에 많이 발생한다[18]. 생존성 향상을 위한 방안으로는 보호(Protection)와 복구(Restoration)라는 두 가지 방안이 존재하며, 보호 방안은 사전에 백업 자원을 미리 할당하는 방안이고, 복구 방안은 장애 발생시 그 시점에 백업 자원을 할당하는 방안이다.

이 두 방식은 서로 장단점을 가지고 있어 가상 네트워크의 생존성 및 자원 중복으로 인한 효율성 등을 확인하여 필요에 따라 적합한 방식을 선택해야 한다. 지금까지 링크 장애를 복구하기 위한 방안들이 많이 연구되었다. 링크 장애를 복구하기 위한 방안으로 사전에 백업 경로를 선택하여 자원을 할당하고 있다가 장애 발생시 할당된 백업 경로로 트래픽을 전송하는 방안이 제안되었다[8]. 그러나, 백업 경로에 대한 사전 자원 할당은 자원 사용의 효율성을 떨어뜨리므로, [5] 연구에서는 최소한의 자원 중복을 위하여 다중 경로를 이용하여 링크 장애를 복구하는 SiMPLE(Survivability in Multi-Path Link Embedding) 알고리즘을 제안하였다. 일반적인 장애의 특징은 예측불가능하고 장애 복구 시간을 정확히 알 수 없으므로, 많은 자원을 중복으로 할당하는 것은 비효율적이다. 그리고, 어느 정도의 자원을 중복 할당하는 것이 적당한지 파악하기 힘들고, 주 자원과 백업 자원은 완전히 분리된 물리 자원이어야 하는데 이를 완전히 분리하기 위해서는 라우팅 테이블 크기 증가 및 패킷 재순서화 같은 오버헤드가 발생한다. 각 가상 네트워크별로 백업 자원을 할당하면 효율적이지 않으므로, 할당된 백업 자원을 여러 가상 네트워크들이 공유하는 방안이 제안되었다[19]. 이 방안은 링크 장애로부터 빠른 복구를 위하여 가상 네트워크 생성 요구시 정상 동작을 위한 주 링크와 빠른 복원을 위한 복구 링크를 할당한다. 주 링크는 각 네트워크에서 자원을 사용하고, 복구 링크는 백업 목적을 위하여 자원을 공유한다.

지금까지 연구된 신뢰성 향상을 위한 가상 네트워크 자원 할당 방안들은 몇 가지 문제점이 존재한다. 각 가상 네트워크별로 1:1 방식의 백업은 자원의 효율성 측면에서 비효율적인 방식이다. 또한 자원이 부족한 경우에 부족한 만큼 새로운 가상 링크를 추가 생성하는 방식도 새로운 링크를 만드는 과정이 필요하므로 빠른 대처 측면에

서 단점이 될 수 있다.

3. 다중경로 가상 네트워크

이 논문의 물리 네트워크는 다음과 같이 무방향 그래프(Undirected Graph)로 정의 가능하다. 물리 네트워크는 $G_s = (V_s, E_s)$ 과 같이 표현된다. V 는 네트워크의 노드를 나타내고, E 는 네트워크의 링크를 표현한다. 가상 네트워크는 $G_v = (V_v, E_v)$ 와 같이 정의할 수 있다.

가상 네트워크 생성을 위한 매핑 함수는 다음 식(1)과 같이 정의할 수 있다.

$$V_v \subseteq V_s, E_v \subseteq E_s, R_v \subseteq R_s \text{ 인 경우} \\ f(M): G_v(r) \mapsto G_s(r) \quad (1)$$

매핑함수는 물리 네트워크의 자원을 이용하여 새로운 가상 네트워크에 할당하여 서비스를 제공할 수 있는 네트워크를 새로이 만드는 것이다. 가상 네트워크 매핑 함수는 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

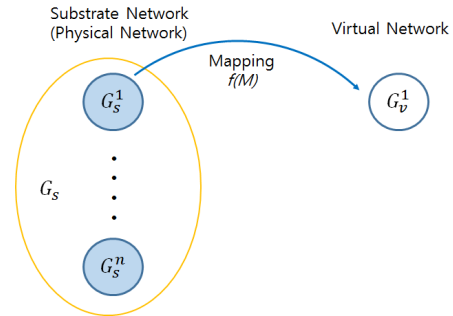


Fig. 2. Mapping Function for Virtual Network

가상 네트워크의 서비스 신뢰성 측면에서 생존성 향상을 위한 방안은 필수적으로 요구된다. 관련연구에서 분석한 바와 같이 생존성을 향상시키기 위한 방안으로는 사전에 백업 자원을 할당하는 방안과 장애 발생시 백업 자원을 할당하는 방안이 있다. 이 두 방안은 서로 장단점을 가지고 있어 가상 네트워크의 생존성 정도와 자원 중복을 허용하는 정도에 따라 적절한 방안을 선택해야 한다. 링크 장애를 복구하기 위해 미리 백업 경로에게 자원을 할당하면 자원 효율성 측면에서는 단점이지만, 신속

한 복구가 가능하다는 장점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 가장 빈번히 발생하는 장애인 단일 링크 장애에 대처하기 위하여 사전에 자원을 할당하는 방안을 고려한다.

본 논문에서는 단일 링크 장애에 대처하기 위하여 가상 네트워크 생성시 백업 자원을 사전에 할당하는 다중 경로 자원 할당 알고리즘을 제안한다. 사전에 백업 자원을 모든 가상 링크에 대하여 1:1로 할당하면 효율성이 떨어진다. 따라서 이들 백업 자원을 최소로 할당하며, 단일 링크 장애에 대한 백업이 가능하도록 가상 네트워크들이 백업 대역폭을 공유하는 방안을 제안한다. Fig. 3에 공유 백업 대역폭을 가지는 다중 경로 지원 자원 할당 방안을 나타낸다.

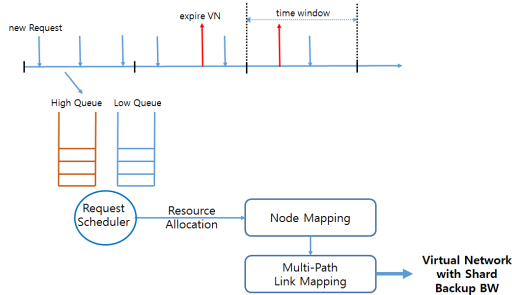


Fig. 3. Multi-Path Virtual Network Process

노드 자원 할당 알고리즘은 기존 연구에서 많이 사용하고 있는 탐욕 알고리즘(Greedy Algorithm)을 활용한다. 일반적으로 이 알고리즘의 계산 속도가 빠르기 때문에 실용적으로 사용할 수 있는 장점이 있다. 따라서, 본 논문의 노드 자원 할당 알고리즘으로 탐욕 알고리즘을 활용한다.

다중 경로 지원 자원 할당 알고리즘은 가상 네트워크 생성 요청 시 네트워크 프로파일 정보로부터 우선순위 및 다중 경로 지원 정보를 파악한다. 이 정보를 기반으로 가상 네트워크를 위하여 다중 경로를 만들어야 하는지 결정한다. 다중 경로를 구축하는 것은 많은 비용이 필요함으로 네트워크의 서비스 유형이 매우 높은 생존성을 요구하는 경우에만 다중 경로를 갖는 가상 네트워크를 생성한다. 다중 경로를 구축하는 것이 결정되며, 가상 네트워크의 링크 자원 할당시 다중 경로를 생성한다.

이 논문에서 제안하는 신뢰성 향상을 위한 다중 경로 지원 자원 할당 알고리즘은 경로 생성시에 사전에 정의된 수대로 경로를 생성한다. 만일 경로수가 3인 경우, Fig. 4

와 같이 경로 생성시에 무조건 3개의 경로를 만든다. 본 논문에서는 3개의 다중 경로를 생성한다. 그리고 생성된 경로에 동일하게 분할된 양만큼의 대역폭을 할당하고, 트래픽도 동일하게 분할하여 전송하는 구조이다. 다중 경로를 지원하는 가상 네트워크는 패킷 오더링 문제가 발생할 수 있다. 본 제안 구조에서는 출발지에서 트래픽을 전송할 때 플로우별로 같은 경로를 선택하여 패킷을 전송함으로써 패킷 오더링 문제를 해결한다.

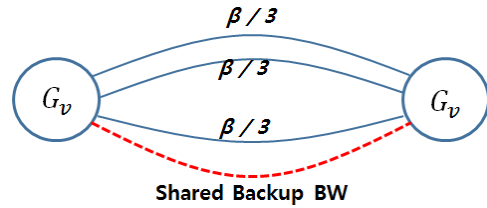


Fig. 4. Multi-Path Virtual Network with Shared backup bandwidth

신뢰성 향상을 위한 다중 경로 지원 가상 네트워크의 중요 개념은 공유 백업 대역폭 구조이다. 전체 가용한 대역폭 중에서 일정 부분을 모든 가상 네트워크가 공동으로 사용하는 백업 대역폭으로 설정하여 사용한다. 사용되는 공유 백업 대역폭은 가변적으로 설정할 수 있다. 서비스 중인 다중 경로 중 하나의 링크에서 장애가 발생하면 설정된 공유 백업 대역폭을 이용하여 장애를 복구한다.

Table 1. Resource Allocation Pseudo Code

<i>Input: Virtual Network Creation Requests</i>	
<i>Output: Virtual Link with Multi-Path(n = 3)</i>	
1:	Receive virtual network creation request message
2:	Check network profile and requested bandwidth(bw)
3:	if (priority == high) && (multi-path == ON)
4:	make <i>n</i> path with shared basic bw
5:	perform basic resource allocation algorithm (1/n)
6:	else
7:	perform basic resource allocation algorithm
8:	endif

Table 1에 신뢰성 향상을 위한 다중 경로 지원 자원 할당 알고리즘의 간략한 의사코드를 나타내었다. 높은 생존성을 요구하는 서비스 유형의 가상 네트워크 생성 요청인 경우 신뢰성을 향상시키기 위하여 사전에 결정된 경로 수만큼의 링크를 생성한다. 그리고 여러 가상 네트워크에서 단일 링크 장애가 발생하는 것을 가정하여 공

통 백업을 위한 대역폭을 미리 할당한다. 이 공유 백업 대역폭을 이용하여 최소한의 백업 자원을 사전에 할당하여 자원 효율성을 극대화하면서 빠른 복구를 달성할 수 있다.

4. 실험 및 평가

제안한 다중경로 지원 자원 할당 알고리즘의 효율성을 평가하기 위하여 [20] 논문과 유사한 환경으로 제안 알고리즘을 실험한다. 또한 NS2 시뮬레이터를 이용하여 트래픽 전송 시험을 통한 공유 백업 대역폭의 사용량 변화를 실험한다.

제안 알고리즘의 성능은 다중경로를 생성할 때의 소요 시간을 측정하여 평가하였다. GT-ITM틀을 이용하여 노드 100개와 링크 570개의 물리 네트워크를 생성하고, 이를 이용하여 가상 네트워크를 생성하였다. Fig. 5에 제안 알고리즘의 다중경로 생성 시간과 [20]논문의 Yu's Algorithm의 다중경로 생성 소요시간을 비교 분석하였다.

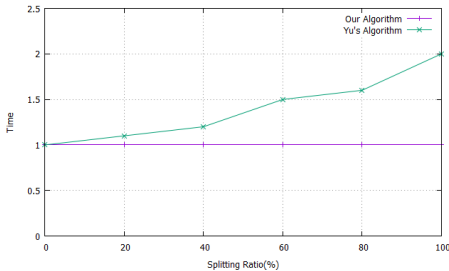


Fig. 5. Multi-Path Creation Time

제안 알고리즘은 우선순위가 높고 다중경로가 지원되는 경우에는 항상 정해진 숫자의 다중경로를 생성한다. 따라서 동일한 생성시간이 소요된다. 그러나 비교 알고리즘은 대역폭이 부족한 경우 경로를 추가로 생성하고 일부 트래픽을 이동함으로써 인하여 경로 분리 비율이 높아지면 더 많은 시간이 소요된다. 본 실험을 통하여 평균 약 50% 정도의 시간이 더 소요됨을 확인하였다.

Fig. 6에 트래픽 전송 시험을 통한 공유 백업 대역폭의 사용률 변화를 나타내었다. NS2시뮬레이터에서 랜덤하게 가상 네트워크 10개를 생성하고, 1000명의 사용자가 랜덤하게 트래픽을 전송하는 것을 가정하여 실험하였다. 트래픽 전송 실험을 위하여 공유 백업 대역폭은 전체 가

용 대역폭의 10%, 20%, 30%로 설정하여 실험하였다. 또한 전송하는 트래픽은 가상 네트워크에 할당된 대역폭의 50%, 60%, 70%를 평균 사용 대역으로 설정하여 패킷을 전송하였다.

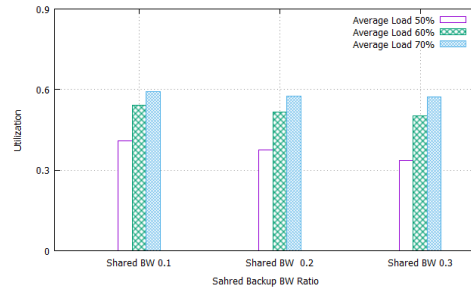


Fig. 6. Utilization of Shared Backup Bandwidth

공유 백업 대역폭은 가상 네트워크에 전송되는 트래픽의 양이 많아질수록 많이 사용되는데, 이는 망의 폭주 발생 확률이 높아지기 때문이다. 또한, 공유 백업 대역폭의 변화(10%, 20%, 30%)에 따른 대역폭 이용률은 비슷한 것으로 확인되었다.

5. 결론

인터넷의 구조적 문제점으로 인한 제약을 극복하는 대안으로 네트워크 가상화에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 네트워크 가상화 방안에서는 자원 할당과 신뢰성이 중요한 이슈이다. 본 논문에서는 가장 빈번히 발생하는 단일 링크 장애를 효과적으로 복구하기 위하여, 다중 경로 지원 자원 할당 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 사전에 정의된 수만큼의 다중경로를 생성하고, 여러 가상 네트워크간의 백업 자원을 공유하는 것을 특징으로 한다. 제안 알고리즘의 실험을 통하여 기존 연구와의 성능을 비교하였다. 다중 경로 생성 소요시간 측면에서 기존 연구보다 평균 50%정도 좋은 효율성을 가지는 것을 확인하였다. 또한 공유 백업 대역폭의 변화는 트래픽 전송량이 증가함에 따라 폭주가 많이 발생하여 사용량이 늘어남을 확인하였다. 그러나 공유 백업 대역폭의 설정 변화에 따라 비슷한 이용률을 가지는 것을 확인하였다. 향후 최적의 공유 백업 대역폭을 설정하는 방안에 대한 추가 연구가 필요하다.

REFERENCES

- [1] N. M. Mosharaf, N. Chowdhury and R. Boutaba, "A survey of network virtualization," *Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, Vol. 54, No. 5, pp. 862-876, Apr. 2010.
- [2] Y. S. Jeong and S. H. Lee, "A User Privacy Protection Scheme based on Password through User Information Virtuality in Cloud Computing," *Journal of IT Convergence Society for SMB*, Vol. 1, No. 1, pp. 29-37, Nov. 2011.
- [3] Y. Zhu and M. Ammar, "Algorithms for Assigning Substrate Network Resources to Virtual Network Components," *Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM 2006)*, pp. 23-29, 2006.
- [4] S. J. Seok and H. U. Jeong, "A Study on OpenFlow based Virtual Network Platform for KREONET," *Journal of Digital Convergence*, Vol. 12, No. 8, pp. 309-319, Aug. 2014.
- [5] M. M. Alam Khan, N. Shahriar, R. Ahmed and R. Boutaba, "Multi-Path Link Embedding for Survivability in Virtual Networks," *Journal of IEEE Transactions on Network and Service Management*, Vol. 13, No. 2, pp. 253-266, June. 2016.
- [6] A. Blenk, A. Basta, M. Reisslein and W. Kellerer, "Survey on Network Virtualization Hypervisors for Software Defined Networking," *Journal of IEEE Communications. Surveys and Tutorials*, Vol. 18, No. 1, pp. 655-685, Mar. 2016.
- [7] S. Herker, A. Khan and X. An, "Survey on Survivable Virtual Network Embedding Problem and Solutions," *Proceedings of the Ninth International Conference on Networking and Service(ICNS 2013)*, pp. 99-104, 2013.
- [8] M. Raihan Rahman and R. Boutaba, "SVNE: Survivable Virtual Network Embedding Algorithms for Network Virtualization," *Journal of IEEE Transaction on Network and Service Management*, Vol. 10, No. 2, pp. 105-118, Feb. 2013.
- [9] I. Houidi, W. Louati, D. Zeglache, and S. Baucke, "Virtual Resource Description and Clustering for Virtual Network Discovery," *Proceedings of the IEEE International Conference on Communication Workshops (ICC Workshops 2009)*, pp. 14-18, 2009.
- [10] Z. Cai, F. Liu, N. Xiao, Q. Liu and Z. Wang, "Virtual Network Embedding For Evolving Networks," *Proceedings of the 2010 IEEE Global Telecommunications Conference(GLOBECOM 2010)*, pp. 1-5, 2010.
- [11] H. J. Mun, "Polling Method based on Weight Table for Efficient Monitoring," *Journal of IT Convergence Society for SMB*, Vol. 4, No. 4, pp. 5-10, Dec. 2015.
- [12] Y. S. Jeong, "Design of Security Model in Dynamic Cloud Environment," *Journal of IT Convergence Society for SMB*, Vol. 2, No. 2, pp. 35-41, Nov. 2012.
- [13] S. Ahmadpour, O. A. Abouabdalla, A. Bin Salem and M. Baklizi, "A Survey of Bandwidth Allocation in the Virtual Network," *Journal of International Journal of Computer and Communication Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 222-224, Mar. 2013.
- [14] A. Belbekkouche, Md. Mahmud Hasan and A. Karmouch, "Resource Discovery and Allocation in Network Virtualization," *Journal of IEEE Comm Surveys & Tutorials*, Vol. 14, No. 4, pp. 1114- 1128, Dec. 2012.
- [15] A. K. Sharma and Nitin, "A Literature Survey on Energy Efficient Virtual Network Embedding in Cloud Computing," *Journal of International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 11, No. 6, pp. 3828-3841, 2016.
- [16] J. F. Botero, X. Hesselbach, M. Duelli, D. Schlosser, A. Fischer and H. de Meer, "Energy Efficient Virtual Network Embedding," *Journal of IEEE Communications Letters*, Vol. 16, No. 5, pp. 756-759, May. 2012.
- [17] H. Cao, L. Yang, Z. Liu and M. Wu, "Exact solutions of VNE: A survey," *Journal of China Comm.*, Vol. 13, No. 6, pp. 48-62, Jul. 2016.
- [18] A. Markopoulou, G. Iannaccone, Supratik Bhattacharyya, C. Chuah and C. Diot, "Characterization of Failures in an IP Backbone," *Proceedings of the Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2004)*, pp. 2307-2317, 2004.
- [19] T. Guo, N. Wang, K. Moessner, and R. Tafazolli, "Shared Backup Network Provision for Virtual Network Embedding," *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1-5, 2011.
- [20] M. Yu, Y. Yi, J. Rexford and M. Chiang, "Rethinking Virtual Network Embedding: Substrate Support for Path Splitting and Migration," *Proceedings of the ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol. 38, No. 2, pp. 17-29, 2008.

저 자 소 개

김 학 서(Hak Suh Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 충북대학교 전자계산학과 이학석사
- 2000년 7월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야> : 네트워크 가상화, 네트워크 구조, 프로토콜

이 상 호(Sang-Ho Lee)

[중신회원]



- 1981년 2월 : 숭실대학교 대학원 전자계산학과 이학석사
- 1989년 2월 : 숭실대학교 대학원 전자계산학과 이학박사
- 1981년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 소프트웨어학과 교수

<관심분야> : 네트워크 프로토콜, 네트워크 보안