

# Piecewise Linear 비용함수의 최소화를 위한 가상 네트워크 매핑 알고리즘

평찬규\*, 백승준<sup>o</sup>

## Virtual Network Mapping Algorithm for Minimizing Piecewise Linear Cost Function

Chan-kyu Pyoung\*, Seung-jun Baek<sup>o</sup>

요약

인터넷의 발전은 네트워크 기술과 응용의 확장적 배치와 더불어 성공적으로 고무되어 왔다. 하지만, 요즘에는 인터넷의 사용은 심각한 트래픽 과부하를 야기 시킨다. 따라서, 우리는 효율적인 자원 할당을 위해 네트워크 가상화의 지속적인 연구와 발전이 필요하다. 본 논문은 Piecewise Linear 비용함수를 이용한 비용 최소화 가상 네트워크 매핑 알고리즘을 제안 한다. 노드 매핑에는 선형 프로그래밍을 이용한 알고리즘과 D-VINE<sup>[1]</sup>을 이용하였고, 링크 매핑에는 선형 프로그래밍 솔루션을 기반으로 최단 경로 알고리즘을 이용하였다. 이와 같은 방법으로 네트워크 상에서 Linear와 Tree 구조로 형성된 VN request의 도착률에 따른 평균 비용을 ViNEYard<sup>[1]</sup>와 비교 분석하였다. 시뮬레이션 구현을 통해 우리의 알고리즘이 ViNEYard 을 사용할 때 보다 발생하는 평균 비용이 낮음을 확인할 수 있었다.

**Key Words** : Network Virtualization, Virtual Network Mapping, Optimization, Piecewise Linear Cost Function

ABSTRACT

Development of Internet has been successfully inspired with extensive deployment of the network technology and application. However, increases in Internet usage had caused a lot of traffic overload in these days. Thus, we need a continuous research and development on the network virtualization for effective resource allocation. In this paper, we propose a minimal cost virtual network mapping algorithm using Piecewise Linear Cost Function. We exploited an algorithm with Linear Programming and D-VINE<sup>[1]</sup> for node mapping, and Shortest Path Algorithm based on linear programming solution is used for link mapping. In this way, we compared and analyzed the average cost for arrival rate of VN request with linear and tree structure. Simulation results show that the average cost of our algorithm shows better efficiency than ViNEYard.

### I. 서론

최근에 많은 사용자들에 의해 사용량이 증가된 기존 네트워크를 물리적으로 증설하기 위해서는 장소와

비용이라는 측면에서 단점을 가지고 있다. 이러한 문제를 효율적으로 해결하기 위해 고안된 방안 중 하나가 네트워크 가상화이다. 네트워크 가상화는 보다 나은 미래를 위한 유망한 기술 중 하나이다<sup>[2]</sup>. 이 기술은

\* First Author : Korea University Department of Computer and Radio Communications Engineering, pyoung1101@korea.ac.kr, 학생회원

<sup>o</sup> Corresponding Author : Korea University Department of Computer and Engineering, sjbaek@korea.ac.kr, 정회원  
논문번호 : KICS2015-05-155, Received May 26, 2015; Revised April 7, 2016; Accepted May 26, 2016

공유된 기존 네트워크 위에 복수의 네트워크 서비스를 가능하게 한다. 즉, 다양한 가상 네트워크를 지킬 수 있는 보통의 기존 네트워크상에서 가상 라우터와 가상 링크로 구성된 가상 네트워크들의 서비스가 가능하다. 그러나 단순히 네트워크 가상화를 하는 것으로 끝나는 것이 아니라 가상화 된 네트워크를 기반으로 할 수 있는 효율적 자원 할당 문제, 이로 인한 트래픽 및 비용 감소 대한 문제가 큰 이슈가 된다. 따라서, 본 논문은 이러한 문제를 해결하기 위해 Piecewise Linear 비용함수의 최소화를 위한 가상 네트워크 매핑 알고리즘을 제안한다. 그림 1은 네트워크 가상화를 보여준다.

최근까지도 가상화 기술을 이용한 통신 시스템의 연구는 지속되고 있다<sup>6)</sup>. Chowdhury<sup>[1]</sup> 등은 VN 노드의 위치에 제한을 두고, VN embedding problem을 해결하기 위해 증가시킨 기존 네트워크를 mixed integer programming(MIP)를 사용하여 비용은 감소하면서 수익과 수탁율은 증가하는 결과를 보여주었다. Zhu<sup>[3]</sup> 등은 기본적인 VN 할당 알고리즘을 제안하였고, 이를 발전시켜 VN 토폴로지를 세분화하는 알고리즘, 그리고 적응형 최적화 전략을 제안하였다. 또한, 이 세 알고리즘에 선택적으로 VN을 재구성하는 알고리즘을 추가하여 낮은 비용을 유지하면서도 효율적인 이득을 얻은 결과를 보여주었다. Yu<sup>[4]</sup> 등은 multi-commodity flow problem을 사용하여 경로 분리와 이동에 대한 알고리즘을 소개하였고, 네트워크 자원 이용에 효과적이라는 결과를 보여주었다. Razzaq<sup>[5]</sup> 등은 기존망의 CPU 자원을 고려하여 기존 망에 생기는 병목 노드를 최소화 시키는 알고리즘을 소개하였다. Woo<sup>[7], [8]</sup>는 잔여 CPU 용량에 따른 우선순위를 고려한 방안을 제시하였다.

본 논문에서는 Piecewise Linear Cost Function(PLCF)을 이용한 비용 최소화 가상 네트워

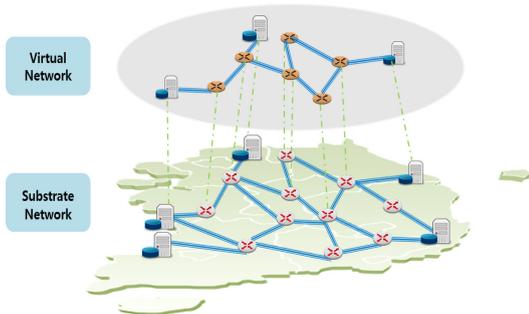


그림 1. 네트워크 가상화  
Fig. 1. Network virtualization

크 매핑 알고리즘을 제안한다. 이는 하드웨어적으로 처리할 수 있는 용량이 일정 기준 이상 되면 도착하는 가상 네트워크에 소프트웨어적으로 가중치를 주어 기존 네트워크에 흐르는 flow를 효율적으로 활용하여 비용을 최소화 할 수 있도록 하기 위함이다. 이를 위해, 우리는 비용함수를 목적으로 하는 선형 프로그래밍 수식을 풀고, D-VINE<sup>[11]</sup>을 사용하여 VN 노드를 매핑 할 위치를 찾는다. 이 노드의 위치를 기준으로 multi-commodity flow problem을 사용하여 링크에 흐르는 flow들을 계산하고, 이를 기준으로 최단 경로 알고리즘을 이용하여 VN 링크를 매핑 할 경로를 찾는다.

본 논문은 다음과 같은 구성으로 전개 된다. 2장에서는 네트워크 모델에 대해서 설명하고, 3장에서는 목적 함수와 선형 프로그래밍에 대한 수식화, 그리고 우리의 알고리즘에 대해 소개하고, 4장에서는 우리의 알고리즘을 사용하여 도착률에 따른 평균 비용을 비교 분석 하였다. 마지막 장에서는 본 논문에서 설명한 내용들과 정리한다.

## II. 시스템 모델

우리는 기존 네트워크를 무방향 그래프  $G^S = (N^S, E^S)$  로 나타낸다. 이것은 기존 노드의 집합  $N^S$ 와 기존 링크의 집합  $E^S$ 로 구성 된다. 각각의 기존 노드는 CPU 용량을 가지며  $CPU(n^S)$  로 표시하고, 각각의 기존 링크는 대역폭 용량을 가지며  $BW(e^S)$  로 표시한다. 그리고 모든 기존 경로들의 집합을  $P^S$ 로 표시한다. 가상 네트워크는 무방향 그래프  $G^V = (N^V, E^V)$ 로 나타낸다. 각각의 가상 노드는 CPU 요구량을 가지며  $CPU(n^V)$ 로 표시하고, 각각의 가상 링크는 대역폭 요구량을 가지며  $BW(e^V)$ 로 표시한다. 기존 네트워크의 자원 측정은 다음과 같이 사용가능한 잔여 용량으로 나타낸다.

$$R_N(n^S) = CPU(n^S) - \sum_{n^V \uparrow n^S} CPU(n^V)$$

$$R_L(e^S) = BW(e^S) - \sum_{e^V \uparrow e^S} BW(e^V)$$

$n^V \uparrow n^S$  는 가상 노드  $n^V$ 가 기존 노드  $n^S$  위에 매핑이 되는 것을 나타내며,  $e^V \uparrow e^S$  는 가상 링크  $e^V$ 가 기존 링크  $e^S$ 에 매핑이 되는 것을 나타낸다. 기존 네트워크의 노드와 링크 자원을 고려한 가상 네트워크 기본적인 매핑 방법은 기존의 연구들과 같다<sup>3), [4], [5]</sup>. Meta 노드로 확장한 방법은 Chowdhury<sup>[11]</sup> 에서 참조

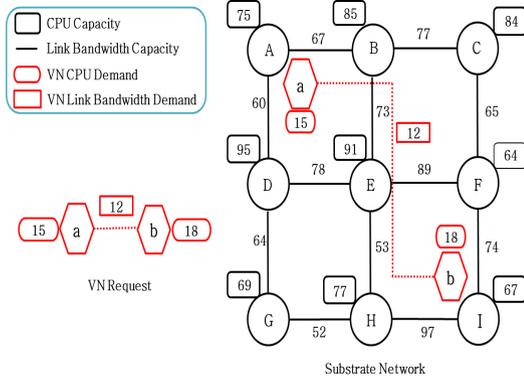


그림 2. 기존 네트워크에 VN request 매핑  
Fig. 2. Mapping on VN request onto a substrate network

하였다.

그림 2는 기존 네트워크에 VN request가 매핑 되는 예를 보여주고, 표 1은 네트워크 모델의 표기를 보여준다.

### III. 선형 프로그래밍을 이용한 매핑 알고리즘

#### 3.1 Piecewise Linear 비용함수

$$C_u(f) = \begin{cases} a_u f & 0 \leq f \leq M \\ b_u f + M(a_u - b_u) & M < f \end{cases} \quad (1)$$

그림 3은 효율적 자원 할당을 위해 사용한 Piecewise Linear 비용함수를 나타낸다. (1)에서  $f$ 는 한 노드에서 나가는 모든 flow의 합을 의미하고,  $M$ 은 flow에 가중치를 줄 수 있는 기준을 의미한다. 비용함수의 각 기울기를 나타내는  $a_u$ 와  $b_u$ 에서  $a_u$ 는  $b_u$ 보다 항상 작으며,  $M$ 까지는 기울기  $a_u$ 에 대해 비용을 계산하고  $M$  이후부터는 기울기  $b_u$ 에 대하여 비용을 계산한다. 즉, PLCF는 하드웨어적으로 처리할

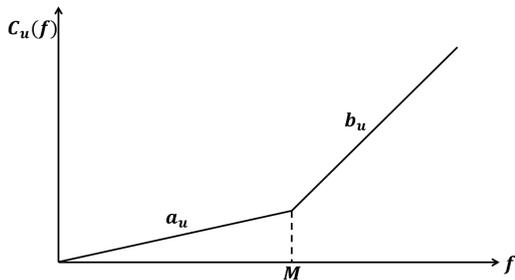


그림 3. Piecewise linear 비용함수  
Fig. 3. Piecewise linear cost function

표 1. 네트워크 모델의 표기  
Table 1. Notation of network model

기존 네트워크	
$G^S$	기존 네트워크
$N^S$	기존 네트워크 노드들의 집합
$E^S$	기존 네트워크 링크들의 집합
$e^S(u, v), e^S$	기존 노드 $u$ 와 $v$ 사이의 기존 네트워크 링크
$P^S$	모든 기존 경로들의 집합
$CPU(n^S)$	기존 노드 $n^S$ 의 CPU 용량
$BW(e^S)$	각 기존 링크 $e^S$ 의 대역폭 용량
가상 네트워크	
$G^V$	가상 네트워크
$N^V$	가상 노드들의 집합
$E^V$	가상 링크들의 집합
$CPU(n^V)$	가상 노드 $n^V$ 의 CPU 요구량
$BW(e^V)$	가상 링크 $e^V$ 의 대역폭 요구량
기존 네트워크 자원의 측정	
$R_N(n^S)$	기존 노드 $n^S$ 의 잔여 CPU 용량
$R_L(e^S)$	기존 링크 $e^S$ 의 잔여 대역폭 용량

수 있는 용량이  $M$  이상 되면 가상 네트워크를 소프트웨어적으로 가중치를 주어 기존 네트워크에 흐르는 flow를 효율적으로 활용하여 비용을 최소화 할 수 있도록 하였다.

#### 3.2 선형 프로그래밍 수식화

$$\text{minimize } \sum_{u \in N^S} C_u \left( \sum_{v \in Neighbor(u)} \sum_i f_{uv}^i \right) \quad (2)$$

목적 함수는 (2)와 같이 수식화 하였다. (2)에서  $Neighbor(u)$ 는 노드  $u$ 와 연결된 기존 노드들의 집합이고  $f_{uv}^i$ 는 가상 링크의 수  $i$ 에 대해 기존 링크  $(u, v)$ 에 흐르는 모든 flow의 합이다.

$$\sum_i (f_{uv}^i + f_{vu}^i) \leq R_L(u, v)x_{uv}, \quad \forall u, v \in N^{S'} \quad (3)$$

$$R_N(w) \geq CPU(\Phi)x_{\Phi w}, \quad \forall \Phi \in N^{S'} \setminus N^S, \quad \forall w \in N^S \quad (4)$$

용량 제약 조건과 관련된 식 (3)과 (4)는 노드와 링크의 용량 경계를 나타낸다.  $f_{uv}^i$ 와  $f_{vu}^i$ 는 이용 가능

한 대역폭을 가지는 링크  $(u,v)$ 의 양방향에 대한 flow를 나타낸다.  $\Phi$ 는 ViNEYard<sup>[1]</sup>에서 사용한 메타 노드이고,  $N^{S'}$ 는 기존 노드의 집합과 메타노드의 집합의 합집합이다.

$$\sum_{\omega \in N^{S'}} f_{u\omega}^i - \sum_{\omega \in N^{S'}} f_{\omega u}^i = 0, \forall i, \forall u \in N^{S'} \setminus \{s_i, t_i\} \quad (5)$$

$$\sum_{w \in N^{S'}} f_{s_i w}^i - \sum_{w \in N^{S'}} f_{w s_i}^i = BW(e_i^V), \forall i \quad (6)$$

$$\sum_{w \in N^{S'}} f_{s_i w}^i - \sum_{w \in N^{S'}} f_{w s_i}^i = BW(e_i^V), \forall i \quad (7)$$

Flow 제약 조건과 관련된 식 (5) ~ (7)은 flow 보존에 대한 조건을 나타낸다.

$$\sum_{w \in \eta(\phi)} x_{\phi w} = 1, \forall \phi \in N^{S'} \setminus N^S \quad (8)$$

$$\sum_{\phi \in N^{S'} \setminus N^S} x_{\phi w} \leq 1, \forall w \in N^S \quad (9)$$

$$x_{uv} = x_{vu}, \forall u, v \in N^{S'} \quad (10)$$

식 (8) ~ (10)은 확장된 기존 그래프 부분과 관련이 있다. 각 meta 노드에 대해서 한 개의 기존 노드만이 선택됨을 나타내고, 기존 노드위에 한 개 이상의 meta 노드가 놓일 수 없음을 나타낸다.

$$0 \leq f_{uv}^i, \quad \forall u, v \in N^{S'} \quad (11)$$

$$0 \leq x_{uv} \leq 1, \quad \forall u, v \in N^{S'} \quad (12)$$

식 (11)과 (12)는 도메인 제약 조건을 나타낸다. 식 (12)는 MIP로 수식화 된 변수  $x$ 를 선형 프로그래밍으로 풀기 위해 relaxation 한 식이다.

우리는 위의 수식에서 나온 fractional solution을 가지고 D-VINE<sup>[1]</sup>을 사용하여 VN 노드를 매핑할 위치를 찾고, 그 위치를 기준으로 링크 제약 조건과 관련된 multi-commodity flow problem을 풀어 최적화 링크에 대한 fractional solution을 얻는다. 그 후, 이 fractional solution을 바탕으로 최단 경로 알고리즘을 이용하여 VN 링크를 매핑할 경로를 찾는다.

### 3.3 제안된 알고리즘의 전체과정 개요도

우리의 알고리즘 과정은 간략히 총 네 단계로 구성할 수 있다 (그림 4). 노드 매핑 단계에서는 PLCF를 선형 프로그래밍으로 풀고, D-VINE을 사용하여 이용 가능한 노드의 위치를 찾는다. 그리고 링크 매핑 단계에서는 링크에 흐르는 flow들을 알기 위해 multi-commodity flow problem을 사용하여 계산하고, 링크 매핑을 하기 위해 최단 경로 알고리즘을 사용하였다.

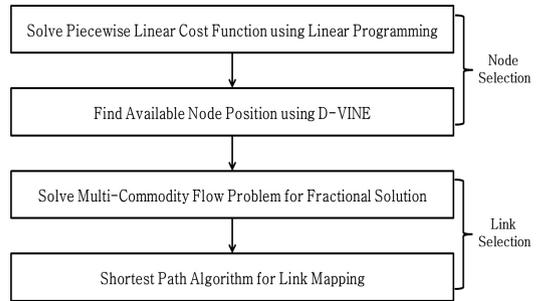


그림 4. 제안된 알고리즘의 전체 과정 개요도  
Fig. 4. A summary diagram of entire process for our proposed algorithm

## IV. 실험

우리는 각 VN request 구조에 대해 도착률에 따른 평균 비용을 기존의 알고리즘 D-VINE과 비교 분석하였다. 이는 우리의 알고리즘과 D-VINE이 모두 휴리스틱한 알고리즘이고 효율적인 자원 할당을 하기 위해 PLCF를 사용한 우리의 알고리즘이 D-VINE과 비교했을 때 비용 측면에서 어느 정도의 효과가 있는지 알아보기 위함이다. 이 장에서는 먼저 실험 환경에 대해서 설명하고, 실험 결과에 대해 설명한다.

### 4.1 실험 환경

시스템 환경은 10x10 그리드(grid) 토폴로지로 구성하였고, 가상 노드 2개로 구성된 Linear 구조와 가상 노드 4개로 구성된 Tree 구조로 형성된 VN request가 20의 시간 단위마다 평균 도착률 2, 3, 4, 5의 포아송 프로세스로 도착하고, life time은 평균 100인 지수 분포를 따른다. 각 시뮬레이션은 2000 시간 단위에 대해 실행되었다. 기존 노드와 링크의 용량은 100으로 설정하였고, 가상 노드의 용량은 20, 가상 링크의 용량은 5로 설정하였다. 기율기  $a_u, b_u$ 는 각각 1, 2으로 설정하였고, 가중치를 주는 기준  $M$ 은 기존 링크 용량의 60%인 60으로 설정하였다. 평균 비

용 계산은 제안된 알고리즘의 목적 함수 식 (2)를 사용하였다.

#### 4.2 실험 결과

그림 5와 그림 6은 Linear 구조로 형성된 VN request의 도착률에 따른 평균 비용을 보여준다. 각 도착률에 해당 하는 평균 비용은 PLCF를 사용한 우리의 알고리즘이 더 낮은 결과를 보여준다. 도착률이 3과 4일 때 꺾이는 부분이 나타나는 것은 이 실험에서 도착률이 4 일 때가 3 일 때보다는 많지만 총 request의 수를 비교 했을 때 도착하는 VN request의 수가 많은 차이가 없기 때문이다. 도착하는 VN request의 수가 일정한 간격의 차이가 있다면 결과는 일직선으로 증가하는 모양의 결과 그래프를 나타낼 것이다.

그림 6은 Tree 구조로 형성된 VN request의 도착

률에 따른 평균 비용을 보여준다. Tree 구조로 형성된 VN request 역시 각 도착률에 해당 하는 평균 비용은 PLCF를 사용한 우리의 알고리즘이 더 낮은 결과를 보여준다. 이 실험 역시 도착률이 2과 3일 때 꺾이는 부분이 나타나는 것은 이 실험에서 도착률이 3 일 때가 2 일 때보다는 많지만 총 request의 수를 비교 했을 때 도착하는 VN request의 수가 많은 차이가 없기 때문이다. 도착하는 VN request의 수가 일정한 간격의 차이가 있다면 결과는 일직선으로 증가하는 모양의 결과 그래프를 나타낼 것이다.

위 결과들을 정리해 보면 우리의 알고리즘은 Linear 구조일 때 기존의 알고리즘 보다 전체적으로 약 13% ~ 21% 정도 감소하였고, Tree 구조일 때 전체적으로 약 49% ~ 61% 정도 감소하였다. 이것은 우리의 알고리즘이 PLCF의 목적에 맞게 시간에 따라 사용량이 증가되는 flow를 효율적으로 활용하여 비용을 최소화했음을 보여준다.

### V. 결론

본 논문에서는 네트워크의 효율적 자원 활용을 이용하여 비용을 최소화하는 PLCF를 이용한 가상 네트워크 매핑 알고리즘을 제안하였다. 노드 매핑 단계에서는 PLCF를 목적으로 한 선형 프로그래밍을 풀고, D-VINE을 사용하여 이용 가능한 노드의 위치를 찾는다. 링크 매핑 단계에서는 노드 매핑 단계에서 찾은 노드들을 기준으로 링크에 흐르는 flow들을 알기 위해 multi-commodity flow problem 을 사용하여 계산하고, 링크 매핑 경로를 찾기 위해 최단 경로 알고리즘을 사용하였다. 그 결과, 우리의 알고리즘이 기존의 알고리즘 보다 자원 할당을 이용하여 비용을 최소화 하는데 더 효율적임을 알 수 있었다. 본 논문에서는 간단한 경우에 대한 시뮬레이션을 하였는데 목적 함수의 기울기 값 변화, 네트워크 용량 등 네트워크 자원 할당에 영향을 줄 수 있는 다양한 요소들을 고려한 새로운 기술들을 연구 개발하여 접목시킨다면 비용 감소에 더 나은 효과가 있을 것이라 사료된다. 앞으로 더 어떠한 네트워크상에서든지 적용할 수 있도록 알고리즘의 범용성을 늘리고 네트워크의 자원 할당을 더욱 효율적으로 처리하여, 알고리즘 간에 trade-off가 될 수 있고 실제 망에서 적용될 수 있는 실용적인 알고리즘들이 연구 되어야겠다.

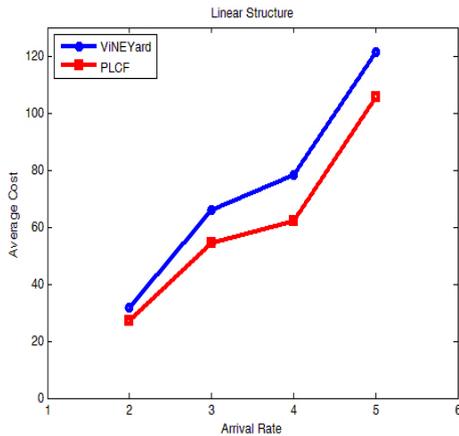


그림 5. 비용 구조에 대한 평균 비용  
Fig. 5. Average cost for linear structure

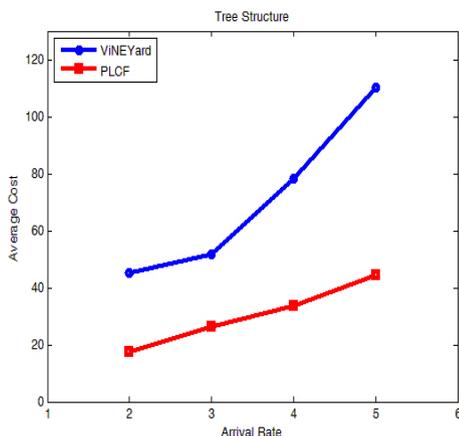


그림 6. 트리 구조에 대한 평균 비용  
Fig. 6. Average cost for tree structure

References

[1] M. Chowdhury, M. R. Rahman, and R. Boutaba, "Vineyard: Virtual network embedding algorithms with coordinated node and link mapping," *IEEE/ACM Trans. Networking (TON)*, vol. 20, no. 1, pp. 206-219, Feb. 2012.

[2] A. Haider, R. Potter, and A. Nakao, "Challenges in resource allocation in network virtualization," *20th ITC Specialist Seminar*, vol. 18, Hoi An, Vietnam, May 2009.

[3] Y. Zhu and M. Ammar, "Algorithms for assigning substrate network resources to virtual network components," in *Proc. INFOCOM*, pp. 1-12, Barcelona, Spain, Apr. 2006.

[4] M. Yu, Y. Yi, J. Rexford, and M. Chian, "Rethinking virtual network embedding: Substrate support for path splitting and migration," *ACM SIGCOMM Computer Comm. Rev.*, vol. 38, no. 2, pp. 17-29, Seattle, USA, Apr. 2008.

[5] A. Razzaq, P. Sjodin, and M. Hidell, "Minimizing bottleneck nodes of a substrate in virtual network embedding," in *Proc. Network of the Future (NOF)*, pp. 35-40, Paris, France, Nov. 2011.

[6] M. Woo, "A survey on the virtual network embedding," in *Proc. KICS Winter Conf.*, pp. 489-490, Seoul, Korea, Nov. 2013.

[7] M. Woo, "A study on node selection strategy for the virtual network embedding," *J. KICS*, vol. 39b, no. 8 pp. 491-498, Aug. 2014.

[8] M. Woo, "A comparison of mapping priorities for virtual network embedding," in *Proc. KICS Winter Conf.*, pp. 815-816, Gangwon-do, Korea, Jan. 2015.

평 찬 규 (Chan-kyu Pyoung)



2010년 2월 : 인천대학교 정보통신공학과 학사  
 2012년 2월 : 고려대학교 컴퓨터·전파통신공학과 석사  
 2012년 3월~현재 : 고려대학교 컴퓨터·전파통신공학과 박사과정

<관심분야> 네트워크 가상화, 네트워크 관리, SDN

백 승 준 (Seung-jun Baek)



1999년 2월 : 서울대학교 전기·컴퓨터 공학과 학사  
 2002년 12월 : 텍사스 오스틴 대학교 전기·컴퓨터 공학과 석사  
 2006년 12월 : 텍사스 오스틴 대학교 전기·컴퓨터 공학과 박사

2007년 1월 : Member of Technical Staff with the Communications Systems Lab, DSPS R&D Center, Texas Instruments, Dallas, TX.

2009년 3월~현재 : 고려대학교 컴퓨터학과 부교수

<관심분야> Modeling and analysis of communication networks; cellular networks, wireless ad-hoc networks, sensor networks, game theory and compressive sensing