

SD-WAN 기반 첨단연구망에서의 가상전용망 서비스 설계 및 구현

김 용 환*, 김 기 현*, 김 동 균^o

Design and Implementation of Virtually Dedicated Network Service in SD-WAN Based Advanced Research & Educational (R&E) Network

Yong-hwan Kim*, Ki-Hyeon Kim*, Dongkyun Kim^o

요 약

최근 선도 국가연구망에서는 네트워크 소프트웨어화를 통한 혁신적이고 지능적인 네트워크 환경 조성에 대한 지속적인 요구를 받고 있다. 이에 따라, KISTI는 Software Defined Networking (SDN) 기술을 기반으로 국가 R&D 연구망인 KREONET의 소프트웨어화 계획을 표명하고 세부 내용을 추진 중에 있다. 현재 KREONET-S는 국내 최초로 한국(대전, 서울, 부산)-미국(시카고) 간 100 Gbps 기반의 국제적인 소프트웨어 정의 광역망을 구축하여 운영 중에 있으며 이를 통하여 KREONET 사용자에게 최초의 SD-WAN 프로덕션 서비스를 제공하고자 한다. KREONET-S 기반의 Virtual Dedicate Network (VDN) 서비스는 첨단연구&응용 및 협업의 적시성 환경을 구축하기 위하여 가상전용망을 동적으로 구축하는 종단간(end-to-end) SDN 네트워크 서비스를 제공한다. 본 논문에서는 이러한 KREONET-S 인프라 설계 및 구축 현황과 더불어 VDN 서비스의 주요 목적, 구조, 기능 등에 대하여 소개한다. 또한 VDN 서비스를 KREONET-S 인프라에 적용 및 실증한 성능 분석 결과를 보임으로써 KREONET-S 및 VDN 서비스가 국가연구망에 요구하는 새로운 환경 변화에 대응하는 좋은 방안을 보인다.

Key Words : SD-WAN, network Softwarization, Virtual Dedicate Network, Network Virtualization

ABSTRACT

Recently, an innovative and intelligent network environments in the principal national R&E networks are constantly demanded in accordance with softwarization of networks. The KREONET-S initiative was established to drive softwarization of KREONET infrastructure which is a principal national R&E network running by KISTI in Korea, using Software Defined Networking (SDN) architecture and technologies. Today, KREONET-S infrastructure has softwarized four regional and international network centers over 100 Gbps optical fiber, which reside in three locations (Daejeon, Seoul, and Busan) in South Korea, and one location (Chicago) in the US. KREONET-S is targeted to providing the first production SD-WAN services for KREONET users. Based on KREONET-S, Virtual Dedicate Network (VDN) service which is capable of constructing a virtual dedicate & bandwidth-guaranteed network is designed to provide end-to-end SDN production network services for advanced research and applications, especially those requiring specified time-to-research and time-to-collaboration. We implemented VDN service on KREONET-S and then performed performance analysis for proving that KREONET-S and VDN service can be a good solutions to cope with new network paradigms for various advanced R&E applications and users.

* 본 연구는 2017년도 한국과학기술정보연구원(KISTI) 주요사업 과제로 수행한 것입니다.

◆ First Author : Korea Institute of Science and Technology Information, yh.kim086@kisti.re.kr, 정회원

◦ Corresponding Author : Korea Institute of Science and Technology Information, mirr@kisti.re.kr, 정회원

* Korea Institute of Science and Technology Information, kkh1258@kisti.re.kr, 정회원

논문번호 : KICS2017-08-214, Received August 9, 2017; Revised September 4, 2017; Accepted September 4, 2017

1. 서 론

최근 국제적 선도 국가연구망의 네트워크 소프트웨어화를 통한 슈퍼컴퓨터, 클라우드, 빅데이터 등의 연계 강화와 연구 협업 적시성 제공의 가속화에 따라 소프트웨어 기반 망 인프라와 서비스 개발 요구가 증가하는 추세이다¹⁻⁴⁾. 이와 같은 선도연구망 및 첨단정보 기술의 관련 동향에 따라 단순한 망 대역폭 기반의 인프라를 지양하고 연구 협업 효율성을 향상시킬 수 있는 소프트웨어 기반의 네트워크 인프라 및 기술 개발을 지향해야 할 필요성이 대두되고 있다^{4,5)}. 그리고 이에 따라, 소프트웨어 정의 광역망(Software-Defined Wide Area Networking, SD-WAN)은 WAN 최적화, 자동화, 가상화 등을 통해 서비스 제공자와 캐리어에게는 비용 절감을, 이용자에게는 망 가시화 등의 이용 편의성과 함께 높은 성능과 보안 품질을 제공할 수 있는 소프트웨어 기반의 네트워킹 기술로 주목받고 있으며, 이에 관한 많은 연구들이 진행 중에 있다^{5,9)}.

KREONET은 한국과학기술정보연구원(KISTI)이 관리·운영하는 고성능 네트워크 인프라 기반의 국가 R&D 연구망으로서 산·학·연 등 약 200여 기관을 대상으로 첨단 응용 네트워크 서비스를 지원하고 있다. KISTI는 2015년 KREONET의 개방형 제어플랫폼 기반 SD-WAN 인프라 구축과 애플리케이션 개발 계획을 표명하였으며, 이에 따라 첨단과학기술연구망의 차기 서비스 모델 개발을 위한 새로운 네트워킹 인프라 설계 및 활용 환경 구축 계획을 수립하고 첨단연구망의 네트워크 인프라 구축, 신규 응용 및 서비스 개발, 인프라와 서비스 활용 등 주요 추진 방향과 세부 추진 내용을 작성·시행 중에 있다. 더불어, 국내 첨단연구망을 이용하는 범용·첨단 연구자의 클라우드 기반 협업 환경 제공 요구와 연구 적시성을 위한 동적이며 자동화된 가상 전용 네트워크의 필요성이 지속적으로 제기됨에 따라 이를 위한 최적화된 SDN/NFV 기반의 데이터 전송 부문 네트워크(Data Plane Network)와 관리 부문(Management Plane) 네트워크의 구축 및 제어 부문(Control Plane) 인프라의 적용을 추진하고 있다. 이를 통하여, KISTI는 첨단연구망 이용자의 높은 서비스 기대 수준과 새로운 연구망 인프라 및 서비스의 제공 요구에 대응할 수 있는 첨단과학기술 응용 연구자 중심의 보다 차별화된 지원 환경의 구축·개발과 첨단연구망의 차기 서비스 모델 개발을 위한 새로운 네트워킹 인프라 설계 및 활용 환경을 조성하고자 한다.

해당 부문에 대한 주요 연구 및 추진 내용은 다음

과 같다. 먼저 신규 소프트웨어 기반의 첨단연구망(KREONET-S)^{10,11)} 네트워크 인프라 구조 설계를 추진하고, 한-미 4개 지역(대전, 서울, 부산, 시카고)에 핵심 인프라를 구축하였다. 이를 위해 우선 소프트웨어 융합형의 첨단연구망 인프라 구조 및 SDN 네트워크 연계를 위한 구조 설계를 추진하였고 해당 구조를 기반으로 국내의 대전, 서울, 부산 지역망센터와 국외의 미국 시카고 연구망센터 중심의 인프라를 연계 구축하였다. 또한, KREONET-S의 핵심적인 부문 중 하나로 제어부문 인프라인 SDN 컨트롤러 혹은 네트워크 운영체제로 오픈소스 제어플랫폼인 Open Network Operating System (ONOS)^{12,13)}를 채택하여 4개의 지역에 분산 환경으로 구축하고 ONOS를 1.7.1 버전 이상으로 고도화하여 KREONET-S 제어플랫폼의 안정성과 성능을 높이고, 서비스를 강화하였다.

KREONET-S 기반 가상전용망(Virtual Dedicate Network, VDN) 서비스의 이용 대상은 첨단연구망의 과학기술 및 응용연구자, 첨단기술 실험자, 네트워크 운영자 등이며, 이들에게 지속적인 사용자 서비스를 제공하기 위하여 매우 높은 수준의 안정성(Stability)이 요구된다. 이에 따라, VDN 서비스에서 가장 중점적으로 고려한 사항은 서비스·시스템 안정성을 보장하기 위하여 ONOS 분산제어플랫폼의 고가용성을 기반으로 분산 제어 환경에 최적화된 가상전용망 기술을 개발하는 것이었다. 또한, 사용자들이 쉽고 빠르게 새로운 서비스를 이용할 수 있도록 매우 친밀하고 쉬운 사용자 인터페이스(UI) 및 사용자 경험(UX)을 제공하는데 중점을 두고 VDN 기술 개발을 수행하였다. 즉, 사용자의 VDN 생성과 관리를 위한 관련 정보를 단순화하여 쉽고 직관적으로 탐색·입력할 수 있고, 갱신과 삭제 역시 매우 간편하게 수행할 수 있도록 UI의 설계 및 개발을 수행하였으며, 사용자기반 가시화 인터페이스의 경우 이용자 편의성을 위하여 글로벌 토폴로지와 가상망 토폴로지, 종단간 토폴로지의 세 가지 환경을 모두 고려하여 기술 개발을 추진하였다. 한편, 연구 협업 적시성을 제공하기 위하여 사용자가 관리하는 VDN의 생성과 갱신, 삭제가 수 초 이내에 이루어질 수 있도록 기술을 고안하고 개발하였으며, 고 수준의 보안성을 제공하기 위하여 소스코드 보안 취약점 방지 설계, Timeout 기반 세션 자동차단, 이용자 역할에 따른 사용자별 접근제어 등을 고려한 VDN 기술 개발을 추진하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 해외 선진 연구망에서의 SD-WAN 및 가상망 구축에 대한 연구 현황을 제시한다. 그리고 3장에서 SD-WAN 기반

의 KREONET-S 네트워크 인프라 설계 및 구축 현황을 제시하고, 4장에서 KREONET-S 기반 VDN 서비스의 목적 및 기본 기능, 효과적인 VDN 생성 방안, 그리고 사용자 인터페이스에 대하여 설명한다. 5장에서는 KREONET-S 네트워크 인프라에서 VDN 서비스의 성능을 측정된 결과를 보이고, 마지막으로 6장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

최근 국제적 선진 연구망에서는 SDN/NFV와 같은 소프트웨어 중심 네트워킹 기술의 도입을 통하여 개방형 협업 연구 환경을 구축함으로써 연구자들에게 유연하고 동적인 연구 환경을 제공하기 위하여 활발한 움직임을 보이고 있다.

미국은 과학재단(NSF)과 국가연구망인 Internet2^[14]를 중심으로 SDN 기반의 미래인터넷 기술과 차세대 응용 개발을 위한 프로젝트를 활발히 수행하고 있다(예: Open Science Exchange, DANCES 프로젝트¹⁾). 미국은 특히 주요 과학기술자를 중심으로 네트워크 가상화 기술 연구와 더불어 ScienceDMZ 기반의 대형연구장비들 간 초고대역 네트워크 연동을 통한 획기적인 선도연구환경(예 : PRP 프로젝트²⁾) 구축을 진행 중이다. 현재 Internet2는 그들의 R&D 네트워크에서 개방형 네트워크 운영체제(ONOS)를 배포·전개하고 있으며 네트워크 서비스 제공자에게 SDN을 보급·전파하는 역할을 수행하고 있다. 또한, Internet2는 미국 전역의 연구·교육망을 가상 SDN 네트워크로 구축한 최초의 국가연구망으로써 ONOS는 ONOS/SDN-IP 솔루션의 유효성 검증을 위해 인디애나 대학의 Internet2 NOC와 함께 관련 SDN 연구를 수행하고 있으며, 대학 캠퍼스에 SDN 기반의 10/40/100G급 연구 협업 환경 및 오픈 교환노드 환경을 제공 중에 있다.

미국의 ESNet^[15]에서는 과학 연구망을 위해서 Science DMZ 프로젝트를 진행 중에 있다. 이 프로젝트의 기본 목적은 과학 연구망의 경우 대량의 데이터를 짧은 시간에 보내거나 대량의 데이터를 지속적으로 보내야 하는 경우가 많기 때문에, 일반 네트워크와 분리된 별도의 독립적인 과학 연구망을 생성하고, 이 망을 통해서 과학 연구에 필요한 데이터의 송수신을 관리하는 것이다. 이를 위하여, ESNet에서는 SDN 운

영체제인 OpenDaylight과 빅데이터 분석 프레임워크인 Splunk를 결합하여 각 OpenFlow를 지원하는 Switch/Router를 제어 및 감시함으로써 실제 연구망에서 발생하는 트래픽에 대한 모니터링을 수행하는 동시에 필요에 따라 동적으로 네트워크 정책(QoS 등)을 쉽게 생성하는 연구를 진행 중에 있다.

AmLight^[16]은 International Research Connection (IRNC) 프로그램 중의 하나로 미국의 Florida International 대학이 주도하고 있으며, 미국 동남부와 남미를 연결하는 미래 인터넷 연구망으로 볼 수 있으며, 2018년부터 2031까지 유럽 각국에도 연구망을 점차 확장할 계획을 가지고 있다. 현재 ONOS를 이용하여 SDN 망을 구성하고 있으며, SDN-IP 응용 프로그램을 이용하여 각 국의 망을 연결하고 다양한 미래 인터넷(특히 SDN 관련) 연구를 위하여 연구망을 활용하고 있다.

유럽의 경우, Future Internet in Framework Programme 7(FP7)을 통해 SDN/NFV 등 미래인터넷 관련 기술 및 비즈니스 모델 개발과 더불어, 유럽의 41개 국가연구망이 참여한 유럽연구망 콘소시엄인 GEANT^[17]을 중심으로 협업 및 첨단응용연구를 유연하게 제공하기 위해 SDN 및 오픈 사이언스 클라우드 네트워킹 환경을 가속화하고 있다. 2014년 GEANT은 호라이즌 2020이라는 새로운 자금 지원 프로젝트를 통해 연구혁신을 강화하기 위한 네트워킹 혁신 플랫폼 전략을 발표하고 이의 일환으로 첨단 네트워킹 경로 계산기능이 탑재된 SDN 기반의 Bandwidth on Demand (BoD) 환경 제공 및 SDN IP/Software Defined Internet Exchange에 관한 연구를 추진 중에 있다^[18].

한편, 선진 국가연구망의 SDN/NFV 구축 현황으로써 한국의 KREONET를 포함하여 미국의 Internet2, 유럽의 GEANT/GARR^[19], 오세아니아의 AARNet, 남미의 AmLight 등이 전 세계 5개 대륙을 중심으로 연구망을 상호 연동하는 프로젝트가 추진 중으로 이른바 글로벌 SDN 구축(Global SDN Deployment)이 활발히 전개 중이다.

또한, AmLight에서는 RNP, ANSP, RedCLARA, Internet2, ESnet과 Layer2 네트워크를 연결하고 SDN 기술 적용 여부에 따른 가상망 구축 시간에 대하여 대규모 실험을 수행한 바 있다. 그 결과, 표 1에서 볼 수 있듯이 SDN 기술을 적용하지 않은 경우 가상망 구축에 5일 가량 소요되었으나 SDN 기술을 적용한 후에 5분 이내로 가상망을 구축할 수 있었음을 발표하였다^[20].

1) Developing Applications with Networking Capabilities via End-to-End SDN, <https://www.dances-sdn.org/>

2) Pacific Research Platform, <http://prp.ucsd.edu/>

표 1. SDN 기반 가상망 구축에 따른 조정 및 협력 비용[20]
Table 1. Coordination costs to the provisioning process with SDN deployment[20]

Domains involved in the path	Average time to provision a new circuit		Average number of e-mail exchanged	
	before SDN	after SDN	before SDN	after SDN
RNP ³⁾ , ANSP ⁴⁾ , RedCLARA ⁵⁾ , AmLight, Internet2, ESnet	5 days	< 5 minutes	10	0
Other domains using OSCARS ⁶⁾ or NSI ⁷⁾ support	12 days	< 5 minutes	65	0

III. SD-WAN 기반 KREONET-S 설계 및 구축 현황

KISTI는 기존 하드웨어 중심의 네트워크 서비스로부터 소프트웨어 융합형의 새로운 서비스로 전환하여 보다 높은 이용자 편이성, 가용성, 효율성을 제공하고 자 서울, 대전, 부산, 시카고 중심의 캐리어급 SD-WAN 네트워크 인프라 KREONET-S를 구축·운영 중에 있다. 본 장에서는 KREONET-S의 데이터 전송 부문, 제어 부문, 관리 부문의 인프라 구조 설계 내용 및 구축 현황에 대하여 다룬다.

KREONET-S의 데이터 전송 부문 네트워크는 SDN 및 오픈플로우 표준 프로토콜을 기반으로 한 하드웨어 네트워크 디바이스와 소프트웨어 네트워크 디바이스로 구성되어 있다. 이 때, KREONET-S의 하드웨어 네트워크 디바이스는 SDN 표준기술인 오픈플로우 1.0과 1.3을 지원하며, REST API를 포함한 개방형 API 및 범용 OS 기반 구조(에지 네트워크 디바이스의 경우)를 갖추고 있다. 한편, 하드웨어 네트워크 디바이스는 각각 코어 네트워크 디바이스와 에지 네트워크 디바이스로 이루어져 있다. 코어 네트워크 디바이스는 최소 2.0 Tbps급 이상의 패킷전달능을 가지고 있는 고성능의 SDN 장비로, 동시에 다중의 에지 네트워크 디바이스와 연결하여 분산된 지역간 SDN 통신을 담당하는 백본(backbone) 네트워크로써 역할을 담당한다. 에지 네트워크 디바이스는 이러한 코어 네트워크 디바이스와 연결되는 동시에, 이용자 기관의 네트워크 장비와 연결되며 다양한 응용 및 서비스와 직접 연결되는 특성을 가지고 있다. 현재 KREONET-S는 국내 지역망센터(대전, 서울, 부산)와 국제 연구망센터(시카고) 각각 코어와 에지 디바이스

1대를 구축 및 연결하도록 설계 및 구축되었다. 그리고 대전의 코어 네트워크 디바이스가 허브가 되어 각 센터에 구축된 코어 네트워크 디바이스는 대전의 코어 네트워크 디바이스와 상호 연결되어 있다. 그림 1은 이러한 KREONET-S의 네트워크 구조 설계 내용을 보여준다.

한편, 대전 코어 디바이스와 각 지역(서울, 부산, 시카고)의 코어 디바이스들은 각각 한 개의 10Gbps 링크와 열 개의 1Gbps 링크로 상호 연결되어 있으며, 따라서 전체 할당 대역폭은 20Gbps에 달한다. 각 코어 디바이스에는 Open Virtual Switch (OVS) 기반의 소프트웨어 네트워크 디바이스와 Iperf 등의 성능시험 시스템이 연결된다. OVS는 하드웨어 네트워크 디바이스와 달리 생성과 삭제가 자유로우며, 원하는 형태의 네트워크 토폴로지를 쉽게 생성할 수 있지만 네트워크의 성능에 제약을 갖는 단점도 있다. 본 논문의 4장에서는 KREONET-S의 하드웨어 디바이스와 OVS를 기반으로 동적인 네트워크 토폴로지를 생성하여 VDN 서비스 성능 시험을 수행하고 이의 결과를 보인다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 각 지역의 코어 디바이스와 에지 디바이스는 다중의 1Gbps 및 10Gbps 링크를 사용하여 연결되어 있고, 해당 에지 디바이스는 주로 첨단 응용 사용자(기관)와 시험 구축 기관을 위해 중단간 서비스를 제공하기 위한 일종의 "last-mile connectivity" 인프라로써 기능한다. 그림 2는

3) RNP - Rede Nacional de Ensino e Pesquisa, <http://www.rnp.br/>
 4) ANSP - Academic Network of Sao Paulo, <http://www.ansp.br/>
 5) RedClara, <http://www.redclara.net>
 6) OSCARS - On-demand Secure Circuits and Advance Reservation System, <http://www.es.net/services/oscars/>
 7) NSI - Network Service Interface protocol

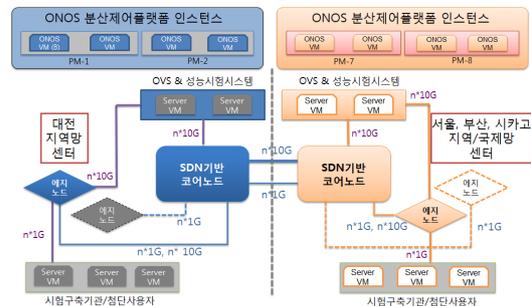


그림 1. KREONET-S 네트워크 인프라 구조 설계
Fig. 1. Design for architecture of KREONET-S network infrastructure

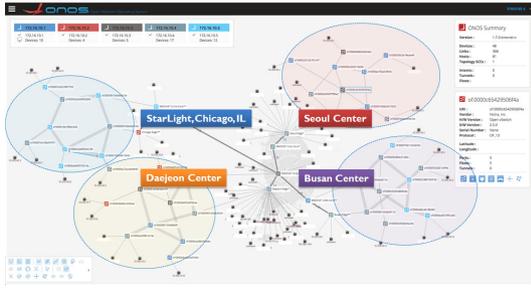


그림 2. ONOS 기반 KREONET-S 글로벌 네트워크 토폴로지
Fig. 2. View of whole KREONET-S network topology by ONOS GUI

KREONET-S의 글로벌 토폴로지를 ONOS WEB GUI를 통하여 보여주며, 이 중에서 원으로 표시한 부분은 소프트웨어 SDN 디바이스를, 그 외 부분은 하드웨어 SDN 디바이스를 나타낸다.

그림 3은 앞서 설명한 KREONET-S의 설계 내용을 기반으로 실제 구축된 장비들의 모습을 보여준다. 기본적으로 KREONET-S의 각 센터의 랙(rack)은 SDN 코어 네트워크 디바이스 1대, SDN 에지 네트워크 디바이스 1대, 관리 부문 매니지먼트 스위치 1대 등의 네트워크 노드로 구성되어 있고, 여기에 3대 이상의 20코어급 고성능 서버가 탑재된다. 이 중에서 2대의 서버는 ONOS 분산제어플랫폼을 설치 및 운용하기 위하여 하나의 서버 당 2개의 VM으로 나뉘어진다. 그리고 각 VM에는 ONOS 인스턴스가 운용 가능

하다. 다만 ONOS는 SDN 제어 역할을 하는 인스턴스 외에도 분산 환경을 위해서 빌드머신을 필요로 하므로, 일부 지역(서울, 대전, 부산 등)의 경우 각각 1개의 빌드머신과 3개의 ONOS 인스턴스로 구성된다. 그리고 나머지 한 대의 서버는 주로 OVS 기반의 소프트웨어 디바이스를 통한 추가의 SDN 토폴로지를 구성, 여러 가지의 응용 및 성능 시험에 주로 활용한다.

국제망의 경우, 한-미간 SD-WAN 구축을 통해 국제 가상연구망의 연동 기반을 확대하였다. 특히 이는 사실상 2계층 기반에서의 우리나라 최초의 시도이자 사례이다^[11]. 국내 최초로 구축된 한-미간 소프트웨어 정의 광역망인 KREONET-S는 대전의 KISTI 본원과 미국의 최첨단 선도연구망 게이트웨이인 시카고 StarLight 간에 구축되었다. 해당 인프라는 국제 광역망에 걸맞게 약 10,500km에 달하는 광케이블을 통해 연결되었고 왕복지연(RTT)은 약 155-165ms에 달하며, 한-미간 논리가상망의 자동화 및 유연한 프로비저닝과 더불어 SDN 기반 가상 네트워크의 페더레이션에 활용될 예정이다.

그림 1의 상단에는 ONOS 분산제어플랫폼 인스턴스가 존재한다. 각 ONOS 인스턴스는 하나의 셀(cell) 혹은 클러스터(cluster)에 포함된 형태로 동작하여 여러 개의 인스턴스가 마치 하나의 논리적 인스턴스인 것처럼 기능한다. 즉, 해당 클러스터 내의 인스턴스 중 일부가 장애로 인해 셧다운 되더라도, 다른 인스턴스가 기능을 이어받아 정상적으로 동작할 수 있는 장

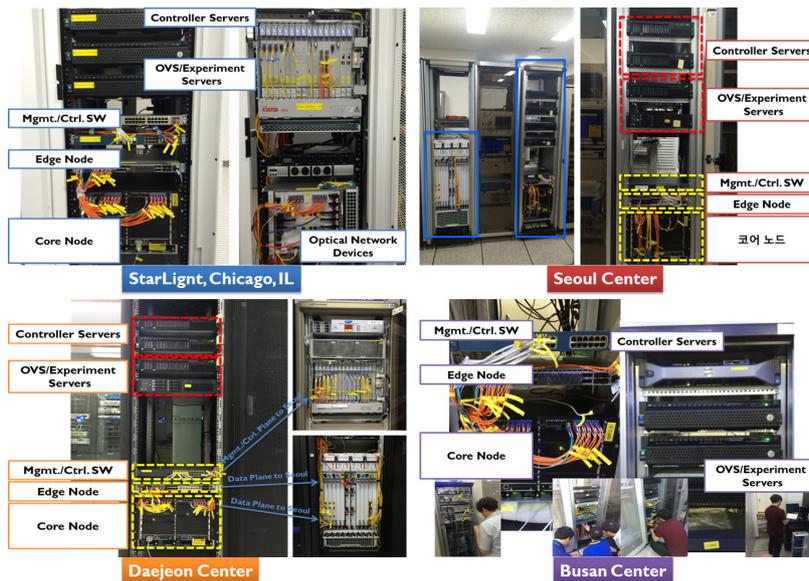


그림 3. KREONET-S 네트워크 장비 구축 현황
Fig. 3. Deployment of network devices on KREONET-S

점을 갖는다. 이는 분산 환경의 관리에 따른 부담에도 불구하고 제어플랫폼의 고가용성, 확장성, 고성능을 확보할 수 있는 매우 좋은 방안이다. 따라서, KREONET-S는 ONOS 기반의 분산플랫폼을 적용/구축 및 운용하고 있다. KREONET-S를 위한 ONOS 제어플랫폼은 현재 ONOS Humming Bird (1.7.1) 버전을 기반으로 5-node 클러스터로 적용 및 운용되고 있다. 즉, 대전 및 서울, 부산의 제어 인스턴스를 주축으로 해당 클러스터가 구성되었으며, ONOS VM 구성은 빌드머신 1대, 제어 인스턴스 7대로 이루어져 있다.

ONOS 분산 제어플랫폼은 SDN 코어 및 에지 디바이스, OVS 기반의 소프트웨어 디바이스를 모두 통합/관리하고 있으며, 이들 디바이스의 수는 약 50개, 단방향(unidirectional) 링크는 약 370개, 단말 호스트는 40-100개에 달한다. 이러한 KREONET-S의 글로벌 토폴로지와 클러스터를 구성하는 ONOS 인스턴스의 가시화는 기본적으로 ONOS WEB GUI를 통해 이루어지며, 3장에서 제시하는 VDN 서비스의 사용자기반 가시화 인터페이스를 통해서 보다 다양한 기능을 수행할 수 있다.

한편, ONOS 분산제어플랫폼과 SDN 코어, 에지, 소프트웨어 네트워크 디바이스를 연결하기 위해서는 별도의 네트워크 채널인 관리부문 네트워킹이 필요하다. 관리 부문 네트워킹은 주로 레거시 네트워킹 기술은 가상 LAN (Virtual LAN, VLAN)을 활용하여 다소 복잡하게 설정되었다. 대전-서울, 대전-부산, 대전-시카고 구간에 매니지먼트 스위치와 광전송 장비 기반의 별도의 네트워킹 채널을 통해 ONOS 분산제어 플랫폼 인스턴스들과 SDN 네트워킹 노드들을 연결할 수 있으며, 이와 더불어 트래픽 모니터링, 장비 모니터링 및 기타 포괄적인 네트워크 관리의 목적으로 별도의 관리 채널이 각 지역망/국제망 센터마다 할당되어 있다. 따라서 KREONET-S는 SDN을 통한 관리 및 운영과 더불어, 기존의 레거시 네트워크 설정 및 시스템을 활용하여 최대한 안정적으로 구축 및 운용되고 있다.

IV. 가상전용망(Virtual Dedicate Network, VDN) 서비스 설계 및 구현

4.1 VDN 서비스 개요 및 목적

KREONET-S는 SD-WAN 기술을 기반으로 사용자가 요구하는 전용 네트워크를 짧은 시간 내 자동으로 구축하여 대용량 데이터 전송과 관리를 요구하는

첨단협업연구를 수행할 수 있는 VDN 서비스를 제공한다. 본 장에서는 이러한 VDN 서비스의 주요 목적, 기본 구조 및 기능에 대하여 소개한다.

먼저 VDN 서비스의 개발 동기 및 주요 목적은 다음과 같다.

- 사용자 그룹 중심의 동적 가상전용망 프로비저닝을 제공함에 있어 가지치기 기반의 네트워크 추상화 및 근접 중심도(Closeness Centrality) 기반의 VDN 트리 생성 방안 적용을 통한 시스템의 적시성과 효율성 향상 (기존의 수동적인 네트워크 구축 프로세스는 최소 수 주일부터 수 개월 이상 소요 → 동적이며 자동화된 VDN 구축을 통하여 수백 ms ~ 최대 30초 이내 완료)
- VDN들의 독립적인 운영 및 관리, 그리고 이에 따른 배타적 VDN 간 통신 제한을 통한 데이터 전송 보안 강화
- 네트워크 및 SDN 컨트롤러 장애의 즉각적인 인지 및 대응을 통하여 사용자에게 끊임없는 가상 전용망 프로비저닝 서비스 제공
- ONOS 컨트롤러를 기반으로 SDN 네트워크 토폴로지의 가상화 및 가시화를 위한 프로그래머블/UX 중심의 웹 인터페이스와 SDN 네트워크 운영 및 관리의 편의성 향상을 도모하기 위한 관리자 웹 인터페이스 제공

VDN 서비스는 크게 가상전용네트워킹 기술과 사용자 중심 가시화 기술을 기반으로 운영된다. 보다 상세하게는 가상전용네트워킹 기술로써 ① (VDN 경로 계산 엔진) 스페닝 트리 기반 사용자 요구 대역폭(1, 10, 40, 100)에 따른 VDN 생성/갱신/삭제 기능 ② (VDN Reactive Forwarding) VDN별 독립적인 운영 및 관리, 그리고 이에 따른 VDN 식별자 기반 상호 배타적인 데이터 전송 기능 ③ 네트워크 장애 발생 시, 즉각적인 인지 및 VDN 갱신을 통한 장애 회복 기능 ④ (VDN Recovery) 데이터스토어 기반 SDN 컨트롤러 장애에 따른 데이터 복구 기능 ⑤ VDN 생성/갱신/삭제/정보 조회를 위한 Command Line Interface (CLI) 기능 ⑥ VDN REST API(생성/갱신/삭제) 기능 등을 제공한다. 그리고 사용자 중심 가시화 기술로써 ① VDN 생성/갱신/삭제/정보 조회 웹 인터페이스 제공 ② VDN 전체 토폴로지 및 종단간 (End-to-end) 토폴로지 가시화 및 네트워크 속성 정보 제공 ③ SDN 네트워크 관리 및 운영을 위한 관리자 웹 인터페이스 제공 (유저 관리, 네트워크 정보 확인 및 변경 기능 등) ④ 링크 트래픽 현황 그래프 연계(CACTI)^[21] 지

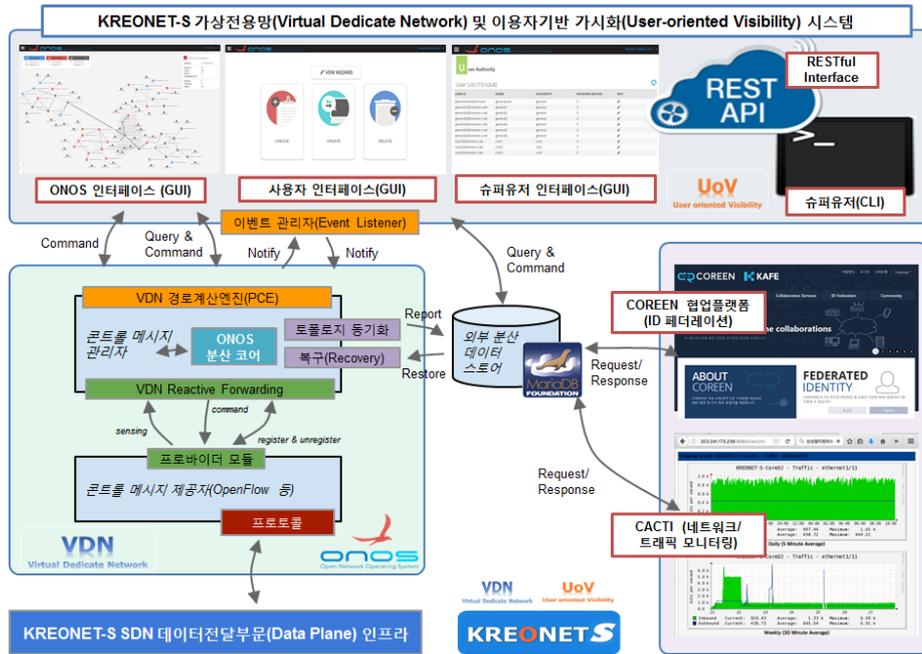


그림 4. VDN 서비스 구조 및 주요 기능 구성도
Fig. 4. Architecture and core functionalities of VDN service

원 ⑤ CORREN^[22] 연계를 통한 ID 페더레이션 기능 등을 제공한다. 그림 4는 VDN 주요 기능에 대한 전반적인 구조도를 나타내며, 이를 ONOS 분산 제어 플랫폼과 부합하도록 네트워크 가상화 및 데이터 전송 모듈(내부)은 JAVA, Web UI 모듈(외부)의 경우 AngularJS 기반으로 구현하였다. 이 중, 본 장에서는 VDN 서비스의 근간이 되는 VDN의 생성 방안과 사용자 인터페이스를 중심으로 상세히 기술한다.

4.2 VDN 생성 방안

VDN 서비스는 가상전용망을 필요로 하는 임의의 사용자 그룹만을 위하여 VDN 참여 호스트들의 식별자, 요구 대역폭을 입력받아 전체 물리 네트워크 토폴로지를 대상으로 VDN 참여 호스트들 사이의 요구 대역폭을 보장하는 물리적인 경로를 포함한 가상 전용 네트워크(VDN)를 제공한다. 이는 VDN 참여 호스트의 에지 디바이스를 중심으로 대역폭을 보장하는 VDN 트리를 생성하고, 이를 기반으로 물리적 네트워크 자원을 해당 가상 네트워크(VDN 트리)에 동적으로 할당함으로써 이뤄진다. 여기서 네트워크를 구성하는 디바이스들은 상호간에 다중 링크로 연결될 수 있으며, 각 링크는 서로 다른 대역폭을 지닐 수 있음을 가정한다.

VDN을 구축하기 위한 트리 생성 알고리즘의 복잡

도는 일반적으로 기반이 되는 네트워크의 규모에 의하여 좌우된다. 따라서 요구되는 네트워크 규모를 얼마나 효율적으로 추상화 및 축소 할 수 있는지에 따라 VDN의 구축 속도가 달라진다. 이에 따라, 본 절에서는 VDN의 구축 속도를 효과적으로 향상시키기 위하여 전체 물리 네트워크가 아닌 VDN의 요구사항을 충족하는 서브 네트워크를 구성하는 가지치기 기법 및 다중 링크 단일화 전략 기반의 네트워크 추상화 방안을 제안한다. 그리고 추상화된 네트워크에서 참여 호스트들과의 근접 중심도가 가장 높은 센터 노드를 선정하고 이에 기반한 VDN 트리 생성 방안 또한 제시한다. 한편, 생성된 VDN에서의 데이터 전송 정책에 대해서도 간략하게 기술한다.

4.2.1 네트워크 추상화

물리적인 네트워크는 호스트 및 디바이스로 이뤄진 V 와 링크들로 구성된 E 에 대한 그래프 $G(V, E)$ 로 표현될 수 있다. 효율적으로 네트워크 추상화를 수행하기 위해서는 먼저 가지치기 과정을 통하여 VDN을 생성함에 있어 불필요한 호스트, 디바이스, 링크들을 제외하고 서브 그래프 $G'(V', E')$ 를 구성해야 한다. 우선 호스트들 간의 데이터 전송 경로 상에 호스트가 포함되지 않으므로 모든 호스트와 호스트-엑세스 디바이스 사이의 링크를 $G(V, E)$ 에서 제외한다. 다만 VDN

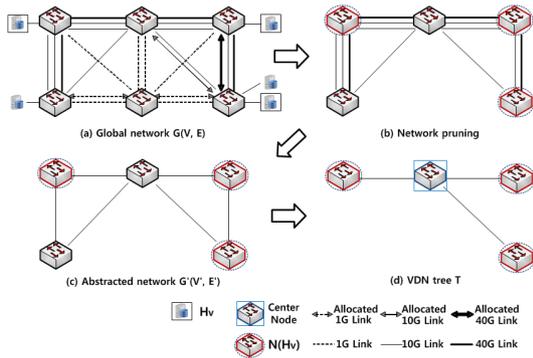


그림 5. VDN 트리 생성 절차
Fig. 5. Process of generating VDN tree

참여 호스트들의 에지 디바이스를 마크하였다가 이들을 연결하는 트리를 생성함으로써 결과적으로 VDN의 참여 호스트 간의 데이터 전송을 보장하도록 한다. 호스트를 제외한 서브 그래프 $G'(V, E)$ 는 다음과 같이 구성된다.

$$V' = \{\text{하나 이상의 가용 링크를 지닌 디바이스}\}$$

$$E' = \{\text{가용 링크}\}$$

여기서 가용 링크라 함은 일반적으로 1)VDN 요구 대역폭을 지니면서 2)다른 VDN에 의하여 대역폭이 점유되지 않은 링크를 의미 한다 (표 2의 수행 순위 (1)). 그리고 이 때, 하나 이상의 가용 링크를 가지지 못한 디바이스 또한 불필요하므로 서브 그래프에서 제외한다. 그림 5 (b)는 표 2의 수행 순위 (1)에 따른 네트워크 가지치기 예를 보여준다.

일반적으로 사용자에게 제공되는 VDN은 표 2의 수행 순위 (1)에 의한 서브 그래프 $G'(V, E)$ 를 기반으로 한 전용 경로 기반 트리를 의미한다. 이러한 VDN에게 제공되는 링크 및 포트는 해당 VDN만이

활용 가능하다. 하지만 전체 시스템에 운영되는 VDN의 수가 상당히 증가하여 요구하는 VDN에 대한 물리 네트워크 자원이 부족할 경우 전용 경로 기반 트리 생성이 불가능 할 수도 있다. 이의 경우 표 2의 수행 순위 (2)에 따라 서브 그래프 $G'(V, E)$ 를 다시 구성하고 이를 기반으로 한 공유 경로 기반 트리를 생성함으로써 사용자가 요구하는 VDN을 구축한다. 하지만 공유 경로 기반 트리는 하나의 링크 및 포트를 여러 VDN이 공유 가능한 VDN이기 때문에 다른 VDN이 활용 중인 공유 링크를 활용하여 데이터 전송을 수행할 수 있다. 이에 따라, 사용자가 요구하는 대역폭을 정밀하게 지원하기 위하여 트래픽 성형(Traffic Shaping) 및 트래픽 엔지니어링 작업^[23-25]이 요구되며 이는 전체 네트워크 시스템에 추가적인 부하 및 비용을 초래한다.

대부분의 물리 네트워크 자원이 고갈될 경우, 사용자가 요구하는 대역폭에 대한 VDN 제공이 불가능해질 수 있다. 이의 경우, 표 2의 수행 순위 (3)에 따라 요구 대역폭은 모두 보장할 수는 없지만 일정 대역폭 하에서 데이터 전송이 가능한 이용가능 경로 기반 트리 기반 VDN을 생성하여 사용자에게 한시적으로 제공한다. 그리고 이 후, 다른 VDN의 네트워크 자원이 반납되거나 인프라의 증설 등으로 추가적인 네트워크 자원이 생기면 본래 사용자가 요구한 VDN을 다시 생성하여 제공한다. 하지만 만약 표 2의 수행 순위 (3)에 따라 구성한 $G'(V, E)$ 에서도 VDN을 생성할 수 없는 경우 최종적으로 VDN 생성은 실패하고, 사용자에게 관련 메시지를 반환한다.

한편, 각 수행 단계에서 생성된 $G'(V, E)$ 를 기반으로 사용자가 요구하는 VDN 생성 가능 여부는 다음의 조건에 따라 판단 가능하다:

조건 1) VDN 참여 호스트들의 에지 디바이스들의

표 2. 네트워크 추상화 조건에 따른 VDN 생성 과정 및 결과
Table 2. VDN generation process and results by the conditions of network abstraction

수행 순위	VDN 트리 종류	네트워크 추상화 (가용 링크 조건)	VDN 생성 성공		VDN 생성 실패	
			동작	출력	동작	출력
(1)	전용 경로 기반 트리	<ul style="list-style-type: none"> 요구 대역폭 이하 링크 및 공유 링크 제거 전용 링크 활용 	VDN 생성 및 가용 자원 할당	VDN 토폴로지, 생성 소요 시간,	(2) 수행	
(2)	공유 경로 기반 트리	<ul style="list-style-type: none"> 요구 대역폭 이하 링크 제거 전용/공유 링크 활용 	VDN 생성 및 가용 자원 할당	VDN 토폴로지, 생성 소요 시간,	(3) 수행	
(3)	이용가능 경로 기반 트리	<ul style="list-style-type: none"> 잔여 대역폭이 없는 링크 제거 전용/공유 링크 활용 	VDN 생성 및 가용 자원 할당 혹은 VDN 생성 취소	VDN 토폴로지, 요청 대역폭 대비 실제 할당된 대역폭, 생성 소요 시간	정지	생성 실패 메시지 반환

집합(S_v)이 V' 에 포함되지 않는 경우 ($S_v \not\subset V'$) 조건 2) $G(V, E)$ 상에서 S_v 내의 임의의 쌍에 대하여 데이터 전송 경로가 존재하지 않는 경우

위의 조건 중 하나라도 만족할 경우, VDN 참여 호스트들 사이의 요구 대역폭을 보장하는 물리적인 경로가 생성 될 수 없기 때문에 해당 단계에서의 VDN 트리 생성 과정은 그 즉시 종료하고 다음 단계를 수행한다.

실제 물리적인 네트워크에서 디바이스 사이의 링크는 다양한 대역폭을 지닌 다중 링크로 구성되어 있다. 하지만 결국 VDN상의 임의의 디바이스 사이에는 요구 대역폭을 만족하는 단 하나의 링크만을 할당하여 사용한다. 따라서, 디바이스 사이에 다중 링크로 구성된 물리 네트워크 토폴로지를 단일 링크로 추상화하여 네트워크 형태를 단순화함으로써 트리 생성 속도를 향상시킬 수 있다. 이 때, 다중 링크 단일화는 가지 치기 과정을 통하여 생성된 $G(V, E)$ 에서 임의의 디바이스 사이의 다중 링크 중 최소의 대역폭을 지닌 단 하나의 링크만을 남기고 나머지 링크를 $G(V, E)$ 에서 제외함으로써 이뤄진다. 그림 5(c)는 이러한 다중 링크 단일화 과정을 통하여 생성된 추상화된 네트워크 $G(V, E)$ 를 보여준다.

4.2.2 근접 중심도 기반의 VDN 트리 구성 방안

본 절에서는 추상화된 네트워크 $G(V, E)$ 를 기반으로 S_v 내의 모든 쌍을 연결하는 스패닝 트리 구성 방안에 대하여 소개한다. 먼저 추상화된 네트워크 $G(V, E)$ 의 V 에 속한 노드 중에 S_v 상의 디바이스들과 근접 중심도가 가장 높은 중심 노드를 선정한다. 근접 중심도가 가장 높은 노드란 각 VDN 에지 디바이스와의 홉 수의 합이 가장 작은 노드를 의미하며, 이에 대한 수식은 다음과 같다.

$$\text{Min}(\sum_{v \in V', \forall n \in N(H_v)} \sum_{n \in N(H_v)} \text{the length of path}(v, n)) \quad (1)$$

위와 같이 VDN 트리 구성을 위한 중심 노드가 선정되면 $G(V, E)$ 에서 중심 노드와 S_v 내의 각각의 노드 사이의 최단 경로를 찾는다. 그리고 각 최단 경로를 합병함으로써 S_v 내의 모든 쌍을 연결하는 스패닝 트리를 구성한다. 그리고 해당 스패닝 트리를 VDN 참여 호스트들 사이의 요구 대역폭을 보장하는 VDN 트리으로써 활용하며, 이에 물리적 네트워크 자원을 동적으로 할당함으로써 VDN 생성 절차를 완료한다. 그

림 5의 (d)는 이러한 근접 중심도 기반의 VDN 트리 구성 예를 보여준다.

4.2.3 VDN 기반 데이터 전송

SD-WAN 기반의 물리적으로 구축된 KREONET-S 네트워크상에 VDN 서비스를 구동하면 ONOS 분산 제어 플랫폼은 초기에 전체 네트워크를 하나의 커다란 VDN으로 인식하며 이를 디폴트 VDN이라 명명한다. 이 후, 임의의 호스트가 KREONET-S에 접속하고 아무런 VDN에 참여되지 않은 경우에 해당 호스트는 디폴트 VDN에 포함된다. 즉, VDN에 참여되지 않은 호스트들 사이의 통신은 디폴트 VDN을 통하여 이뤄진다.

그리고 이후, VDN이 구축되면 위의 시스템 및 방법에 의하여 독립된 네트워크(Isolated Network)가 형성되고 해당 네트워크에 속한 호스트와 디폴트 VDN에 속한 호스트 사이의 통신은 제한된다. 여기서 독립된 네트워크란 서로 다른 네트워크 간의 연결이 없어 독자적으로 운영되며 이에 따라 상호 간의 통신 또한 제한되는 네트워크를 의미한다. 즉, VDN 서비스 환경에서는 동일한 VDN내의 호스트들 사이의 통신만이 허용된다. 이 때, 임의의 VDN 내의 호스트들 사이의 통신을 위한 플로우 규칙 생성을 위하여 전체 네트워크가 아닌 해당하는 VDN에서 데이터 전송 경로를 탐색하기 때문에 플로우 규칙 생성 시간을 현저히 줄일 수 있다. 이러한 VDN 간의 배타적인 데이터 통신 기법을 활용하여 VDN 사이의 서로 다른 VDN 내의 호스트들 사이의 통신을 제한하여 데이터 전송 보안을 강화함과 동시에 전송 효율을 향상시킬 수 있다.

4.3 사용자 인터페이스

KREONET-S의 사용자는 관리자/서브 관리자/일반 사용자 등의 3가지 사용자 권한을 가질 수 있으며 이에 따라 허용된 네트워크 정보 및 기능이 제한된다. 관리자의 경우 전체 네트워크 토폴로지를 볼 수 있으며 KREONET-S 상의 모든 VDN을 관리 및 제어(생성, 갱신, 삭제)할 수 있다. 서브 관리자의 경우 자신의 포함한 특정 VDN들의 네트워크 토폴로지만을 볼 수 있으며 자신이 생성한 VDN에 한하여 관리 및 제어 가능하다. 일반 사용자의 경우, VDN 관리 및 제어 권한이 없으며 관리자 및 루트 사용자가 생성한 VDN에 포함된 경우 해당 VDN 네트워크 토폴로지만을 볼 수 있다. 그리고 이 때, 사용자는 자신에게 제공되는 네트워크 토폴로지에 한하여 네트워크 자원 활

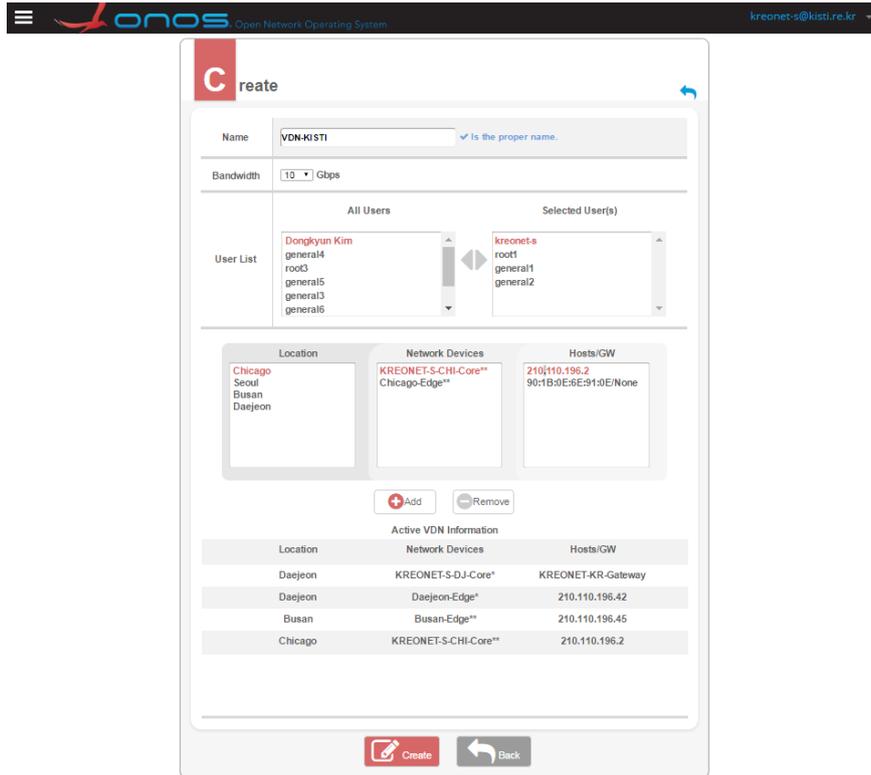


그림 6. VDN 생성 GUI
Fig. 6. Graphical user interface (GUI) for VDN generation

용이 가능하다.

VDN 관리 및 제어는 GUI를 통하여 쉽고 빠르게 수행되며 그림 6은 이러한 VDN 생성에 관한 GUI를 보여준다. VDN 생성을 위하여 해당 VDN의 명칭을 입력하고 VDN 요구 대역폭, VDN 참여 호스트들 그리고 생성된 VDN을 활용할 사용자 정보를 GUI를 통하여 선택하면, VDN 트리 생성 방안에 따라 ONOS 제어 플랫폼이 가지고 있는 네트워크 토폴로지 정보를 기반으로 VDN 참여 호스트 간의 요구 대역폭을 보장하는 VDN을 생성하고 선택한 사용자들이 해당 VDN을 활용할 수 있는 권한을 부여한다. 한편, 이와 마찬가지로 VDN 갱신 및 삭제 GUI 또한 유사한 형

태로 제공한다.

한편, VDN 생성이 완료된 이후에는 사용자의 편의에 따라 그림 7과 같이 다양한 형태의 네트워크 토폴로지를 VDN WEB UI를 통하여 확인할 수 있다. 이 때, 표 3과 같이 전체 네트워크 토폴로지(그림 7(a))는 관리자만이 확인할 수 있으며, 관리자를 포함한 각 사용자에게는 자신이 생성하였거나 참여하고 있는 VDN에 한하여 복수 개의 VDN 정보를 한 번에 나타내는 다중 VDN 토폴로지(그림 7(b)), 특정 VDN에 관한 단일 VDN 토폴로지(그림 7(c)) 및 VDN 참여 호스트들에 관한 종단간(E2E) 토폴로지(그림 7(d)) 등을 제공한다. VDN 서비스는 이러한 다양한 VDN

표 3. 사용자 그룹 별 네트워크 토폴로지 접근 권한
Table 3. Authorization of network topology views per user group

사용자 권한	전체 토폴로지	다중 VDN 토폴로지	단일 VDN 토폴로지	종단간 뷰	비고
관리자	O	O	O	O	전체 VDN 관리, 전체 관리메뉴 사용 가능
서브 관리자	X	O	O	O	자신이 속한 VDN 관리, 일부 관리메뉴 사용 가능
일반 사용자	X	O	O	O	자신이 속한 VDN만 확인 가능

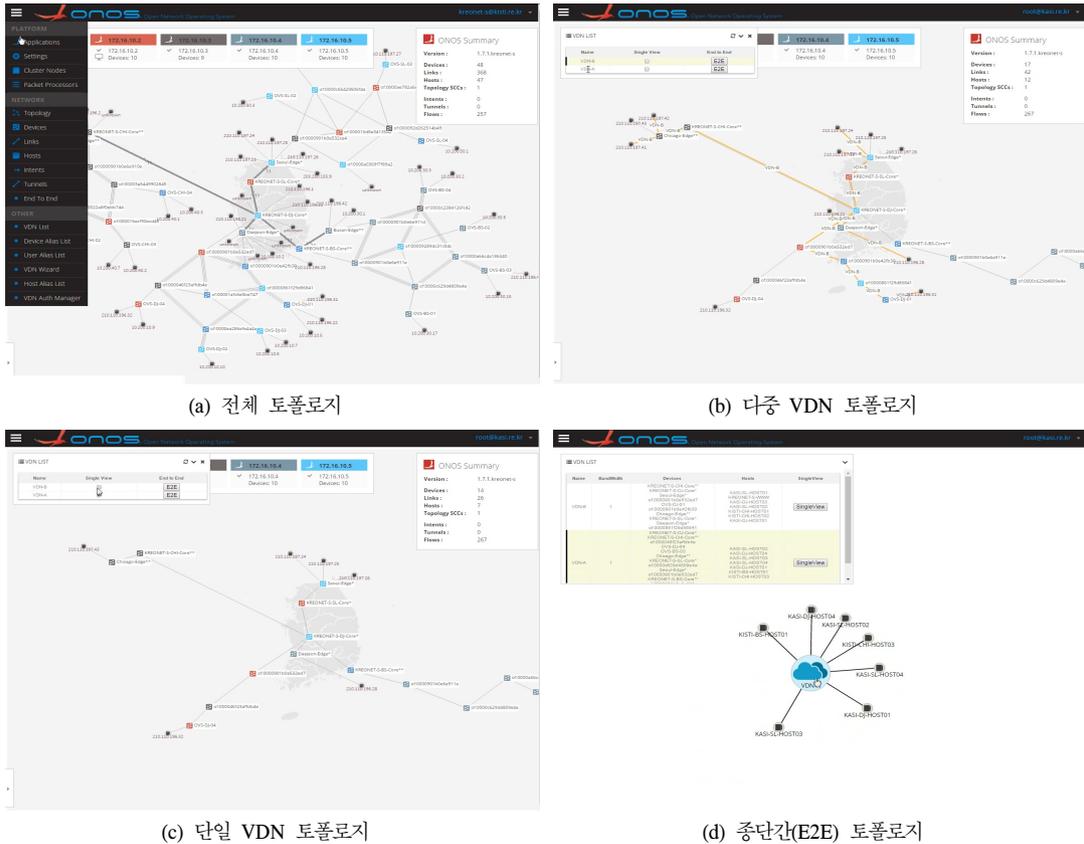


그림 7. VDN 서비스에서 제공하는 다양한 형태의 네트워크 토폴로지 모습
 Fig. 7. Various topologies and information on VDN service

토폴로지 화면 및 관련 정보들을 각 사용자별로 차별화된 형태로 제공함으로써 보다 다양한 사용자 요구 사항을 충족시키고자 한다.

V. 성능 분석

본 장에서는 소프트웨어 기반의 첨단연구망인 KREONET-S 인프라에 VDN 서비스를 운영 및 실증하여 기능 타당성 및 성능을 분석한 결과를 보인다. 이를 통하여 구축한 KREONET-S 환경 및 VDN 서비스가 국가별 SDN 도메인 컨트롤러의 소프트웨어 기반 상호 운용을 통한 국제 프로그래머블 네트워크 인프라 구축, 동적인 가상/전용 네트워크 서비스의 제공을 통한 다양한 첨단연구 및 협업의 적시성 환경 조성, 캐리어급 SDN 제공이란 목적에 부합함을 보이고자 한다.

핵심 성능 지표는 크게 ①네트워크 규모(디바이스 수, 단말 호스트 수)에 따른 VDN 생성 시간(ms), ②

VDN에 참여하는 VDN 단말 호스트의 밀집도에 따른 VDN 생성 시간(ms), ③종단간 데이터 전송 성능(10G VDN: Gbps, 1G VDN: Mbps)이다. ①네트워크 규모에 따른 실험을 수행하기 위하여 먼저 KREONET-S의 4개 지역에 각각 배치된 코어 및 에지 하드웨어 디바이스를 기본으로 하고, 각 지역별 10개의 소프트웨어 디바이스를 추가하였다. 이에 대하여 다음과 같이 5가지 경우로 나누어 VDN 성능 실험을 수행하였으며, 각 경우의 상세한 네트워크 규모는 표 4의 내용과 같다.

- Case I: 대전, 서울, 부산, 시카고의 하드웨어 네트워크 인프라
- Case II: 하드웨어 네트워크 인프라 + 가상 소프트웨어 스위칭 인프라(대전)
- Case III: 하드웨어 네트워크 인프라 + 가상 소프트웨어 스위칭 인프라(대전, 서울)
- Case IV: 하드웨어 네트워크 인프라 + 가상 소프트웨어 스위칭 인프라(대전, 서울, 부산)

표 4. 실험 case 별 KREONET-S 네트워크 규모
Table 4. The network scale based on KREONET-S for each experiment case

	Case I	Case II	Case III	Case IV	Case V
네트워크 디바이스 수	8	18	28	38	48
VDN 단말 호스트 수	38	40	42	44	45
링크 수	154	218	244	308	368

· Case V: 하드웨어 네트워크 인프라 + 가상 소프트웨어 스위칭 인프라(대전, 서울, 부산, 시카고)

한편, ②의 지표를 분석하기 위하여 실험 환경을 다음과 같이 정적 시험 환경(Static)과 동적 시험 환경(Dynamic)으로 구분하여 실험을 수행하였다. 정적 시험 환경은 고정적인 VDN 단말 호스트 밀집도를 가지는 반면, 동적 시험 환경은 네트워크 규모(Case I~Case V)가 커짐에 따라 호스트 밀집도가 낮아지는 경향을 보인다.

· 정적 시험 환경(Static) : VDN 참여 호스트가 물리 네트워크 디바이스에만 연결되는 환경 (네트워크 규모와 상관없이 항상 동일한 VDN 호스트를 대

으로 VDN 생성)

· 동적 시험 환경(Dynamic): VDN 참여 호스트가 물리 네트워크와 함께 각 지역별 OVS에도 균등하게 연결되는 환경(각 지역별 OVS들을 추가할 때마다 물리 네트워크 디바이스에 연결된 VDN 호스트 중 일부를 신규 OVS에 연결한 뒤 VDN 생성)

그림 8은 네트워크 규모가 증가함에 따른 VDN 생성 시간을 나타내며, VDN 단말 호스트의 밀집도에 따라 정도의 차이가 있었지만 전반적으로 네트워크 규모에 비례하여 VDN 생성 시간이 점차 증가함을 알 수 있었다. 하지만 그림 8(a)에서 볼 수 있듯이 VDN 단말 호스트의 밀집도가 동일한 정적 시험 환경의 경

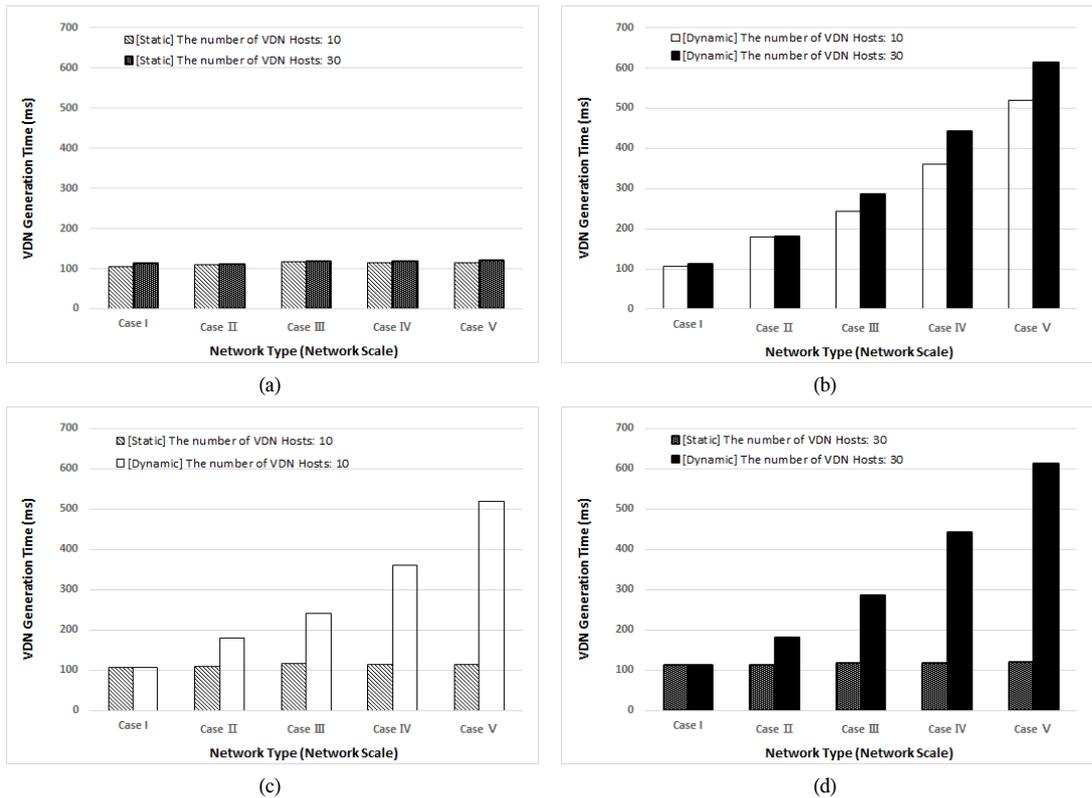


그림 8. 네트워크 규모 및 VDN 호스트 밀집도에 따른 VDN 생성 시간
Fig. 8. The impact of network scale and density of VDN hosts on VDN creation time (ms)

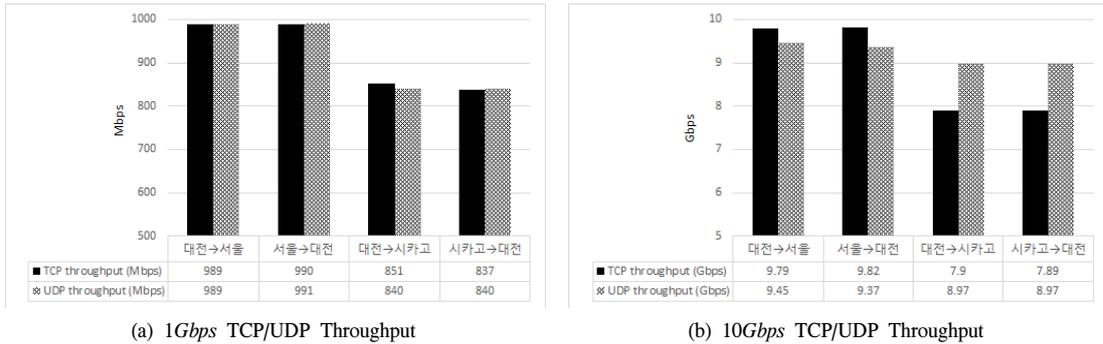


그림 9. 대전-서울, 대전-시카고 구간에서의 종단간 데이터 전송 성능
 Fig. 9. E2E throughput performance of VDNs in Daejeon-Seoul and Daejeon-Chicago (10G VDN: Gbps, 1G VDN: Mbps)

우 VDN 참여 호스트의 수나 네트워크 규모에 변하여도 VDN 생성 시간이 차이는 10ms 이내로 많은 영향은 받지 않음을 알 수 있다. 반면, 그림 8(b)와 같이 VDN 단말 호스트의 밀집도 차이가 큰 동적 시험 환경의 경우 네트워크 규모에 따른 VDN 생성 시간이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 그러나 동적 환경에서도 VDN 참여 호스트의 수의 증가에 따른 VDN 생성 시간의 변화는 그리 크지 않음을 확인할 수 있었다. 이는 VDN 참여 호스트의 수가 증가하더라도 실제로 VDN에 포함되는 VDN 에지 디바이스의 수나 이에 따라 생성되는 VDN 토폴로지의 변화가 거의 없기 때문이다. 마지막으로 정적 시험 환경과 동적 시험 환경을 비교한 그림 8(c)-(d)을 보면, 정적 시험 환경에 비하여 동적 시험 환경에서의 VDN 생성 시간이 확연히 증가함을 확인할 수 있다. 이는 정적 시험 환경에서 모든 VDN 호스트들이 8개의 하드웨어 디바이스에 연결되어 있는데, VDN 생성 방식에 따르면 추가적으로 생성된 OVS에 의하여 네트워크 규모가 증가하더라도 OVS는 VDN 호스트와 직접적인 연관은 없기 때문에 VDN 생성에 있어 불필요한 부분에 해당하는 반면에, 동적 시험 환경에서는 VDN 참여 호스트가 증가한 OVS에 연결되기 때문에 OVS를 고려한 VDN 생성이 이뤄지기 때문이다. 향후에는 네트워크 규모가 큰 환경에서도 VDN을 빠르게 구축하기 위하여 네트워크 확장성을 고려한 VDN 생성 방식에 대한 연구를 추가적으로 진행할 예정이다.

그림 9는 국내외(대전-서울, 대전-시카고) 구간에서의 종단간 데이터 전송 성능을 보여준다. 성능 측정을 위하여 대전, 서울, 시카고 지역망/국제망 센터내의 에지 디바이스에 성능측정서버를 연결하고, 이를 대상으로 1G VDN과 10G VDN을 각각 생성하였다. 그리고 iperf를 이용하여 서로 다른 지역에 위치한 성능측정

서버 사이의 TCP 및 UDP 트래픽에 대한 종단간 데이터 전송 성능을 측정하였다.

대전-서울 구간은 약 170km의 광케이블을 통해 연결되었으며 왕복지연(RTT)은 약 2-3ms 소요되었다. 그리고 종단간 데이터 전송 성능은 1G VDN의 경우 TCP, UDP 트래픽 모두 대역폭 대비 약 99% 정도, 10G VDN의 경우 대역폭 대비 TCP는 약 98%, UDP는 약 94% 정도의 성능이 측정되었다. 즉, 대전-서울 구간의 경우 VDN의 네트워크 성능은 TCP, UDP 트래픽 모두 사용자가 요구하는 대역폭 수준에 준하는 성능을 제공함을 알 수 있었다. 한편, 약 10,500km에 달하는 광케이블을 통해 연결된 대전-시카고 구간에서의 TCP 및 UDP 트래픽에 대한 종단간 데이터 전송 성능은 전체 대역폭 대비 약 84-90% 정도의 데이터 전송 성능을 보였으며, RTT는 약 155-165ms 소요되었다. 10G VDN의 TCP 데이터 전송의 경우, 9Gbps 이상의 데이터 전송 시에 성능측정서버의 CPU 사용률이 97% 이상 증가하여 정상적으로 패킷을 처리하지 못하였으며 실제 사용한 9G 대역폭 대비 약 88% 정도의 데이터 전송 성능을 보였다. KREONET-S 망에서 TCP 데이터 전송 성능은 UDP의 경우와 유사하거나 약간 높기 때문에 실제 네트워크 성능은 UDP 경우와 유사할 것이라 예상된다. 따라서, 대전-시카고 구간의 거리를 고려할 때 VDN은 대역폭 대비 적정 수준의 네트워크 성능을 제공함을 확인할 수 있었다.

VI. 결론

본 논문에서는 첨단연구망 이용자의 높은 서비스 기대 수준과 새로운 연구망 인프라 및 서비스의 제공 요구에 대응할 수 있는 첨단과학기술 응용 연구자 중

심의 보다 차별화된 지원 환경의 구축·개발과 첨단연구망의 차기 서비스 모델 개발을 위한 KREONET-S 인프라 설계 및 구축 현황에 대하여 알아보았다. 그리고 SD-WAN 기술을 기반으로 사용자가 요구하는 전용 네트워크를 짧은 시간 내 자동으로 구축하여 대용량 데이터 전송과 관리를 요구하는 첨단협업연구를 수행할 수 있는 VDN 서비스의 주요 목적, 구조, 기능 등에 대하여 상세히 알아보았다. 또한 VDN 서비스를 KREONET-S에 적용 및 실증함으로써 KREONET-S 환경 및 VDN 서비스가 다양한 첨단연구 및 협업의 적시성 환경 제공을 위한 캐리어급 SDN을 제공할 수 있는 좋은 솔루션임을 제시하였다.

앞으로도 KISTI는 KREONET-S 인프라를 다수의 지역망/국제연구망 센터로 그 영역을 확장할 계획이며, 이를 통하여 유수의 첨단 기술 개발기관 및 선도 국가연구망 그룹과 국제협력연구를 수행하는 환편 효율적인 사용자 중심 국제 네트워킹 운영 환경 제공을 제공하고자 한다. 그리고 KREONET-S 기반으로 SDN-IP, SDN망간 연동, Virtual Science DMZ (vSciZ), NFV 서비스 체이닝, 네트워크 슬라이싱 기술 등을 연구·적용하여 보다 다양한 첨단 응용 서비스들을 제공할 계획이다. 향후 KREONET-S는 다양한 국내의 첨단 응용 연구 및 과학 분야의 첨단협업연구 환경을 제공함으로써 국가연구망으로서 중요한 소프트웨어 기반 인프라 역할을 수행할 것으로 기대한다.

References

[1] Cisco Visual Networking Index, *Forecast and Methodology*, Cisco White Paper(2014-2019), 2015.

[2] M. K. Weldon, "The future X network: A bell labs perspective," *Taylor & Francis Group, LLC*, 2016.

[3] A. Manzalini, et al., "Software-defined networks for future networks and services," *White Paper based on the IEEE Workshop SDN4FNS*, Trento, Italy, Nov. 2013.

[4] S. Sezer, et al., "Are we ready for sdn? implementation challenges for software-defined networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 7, pp. 36-43, 2013.

[5] Y.-H. Kim and D. Kim, "Design and implementation of user-oriented virtual dedicate network system based on software-defined wide area network," *J. KICS*, vol. 41, no. 9, Sept. 2016.

[6] D. Kim, et al., "User-oriented software-defined wide area network adopting virtual dedicate networks," *Advanced Sci. Lett.*, vol. 22, no. 9, pp. 2262-2267, 2016.

[7] C.-Y. Hong, et al., "Achieving high utilization with software-driven wan," in *ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 43, pp. 15-26, ACM, 2013.

[8] D. Drutskoy, E. Keller, and J. Rexford, "Scalable network virtualization in software-defined networks," *IEEE Internet Comput.*, vol. 17, no. 2, pp. 20-27, 2016.

[9] Y.-H. Kim, B. Cho, and D. Kim, "A fast algorithm for generating virtual dedicate network based on software-defined wide area network," in *Int. Conf. Computer Sci. and its Applicat.*, pp. 799-805, Dec. 2016.

[10] KREONET-S web site, Retrieved Aug., 7, 2017, from <http://www.kreonet-s.net/>

[11] Retrieved Aug., 7, 2017, from <http://www.startap.net/starlight/PUBLICATIONS/KREONET-S.html>

[12] Open Network Operating System web site, Retrieved Aug., 7, 2017, from <http://onosproject.org/>

[13] P. Berde, et al., "Onos: towards an open, distributed sdn os," in *Proc. 3rd Workshop on Hot Topics in Software Dened Networking*, ACM, 2014.

[14] Internet2 web site, Retrieved Sept., 4, 2017, <http://www.internet2.edu/>

[15] ESNet web site, Retrieved Sept., 4, 2017, <https://www.es.net/>

[16] AmLight web site, Retrieved Sept., 4, 2017, <https://www.amlight.net/>

[17] GEANT web site, Retrieved Sept., 4, 2017, <http://www.geant.org/>

[18] A. Mendiola, et al., "Towards an SDN-based bandwidth on demand service for the European research community," in *IEEE NetSys*, pp. 1-6, 2017.

[19] GARR web site, Retrieved Sept., 4, 2017, <https://www.garr.it/it/>

- [20] J. Ibarra, et al., "AmLight backbone transition to SDN: Celebrating the second anniversary," *GLIF Lambda Grid Workshop 2016*, Miami, Sept. 2016.
- [21] CACTI web site, Retrieved Sept., 1, 2017, from <https://www.cacti.net/>
- [22] CORREN web site, Retrieved Sept., 1, 2017, from <https://coreen.kreonet.net/>
- [23] L. Georgiadis, R. Guerin, V. Peris, and K. N. Sivarajan, "Efficient network qos provisioning based on per node traffic shaping," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 4, no. 4, pp. 482-501, 1996.
- [24] X. Sun and G. G. Xie, "An integrated systematic approach to designing enterprise access control," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 24, no. 6, pp. 3508-3522, 2016.
- [25] I. F. Akyildiz, et al., "A new traffic engineering manager for difiserv/mps networks: design and implementation on an ip qos testbed," *Computer Commun.*, vol. 26, no. 4, pp. 388-403, 2003.

김 용 환 (Yong-hwan Kim)



2010년 8월 : 한국기술교육대학교 정보미디어공학과 석사
 2015년 8월 : 한국기술교육대학교 컴퓨터공학과 박사
 2016년 2월~현재 : 한국과학기술정보연구원(KISTI) 선임연구원

<관심분야> SDN/NFV, Network Virtualization, Mobility Management, Social Networks

김 기 현 (Ki-Hyeon Kim)



2016년 2월 : 강원대학교 컴퓨터과학과 석사
 2017년 2월~현재 : 강원대학교 컴퓨터과학과 박사과정
 2016년 2월~현재 : 한국과학기술정보연구원(KISTI) 연구원

<관심분야> SDN/NFV, Network Virtualization, Network Management

김 동 균 (Dongkyun Kim)



1999년 2월 : 충남대학교 컴퓨터과학과 석사
 2005년 2월 : 충남대학교 컴퓨터과학과 박사
 2006년 4월~2007년 3월 : 미국 테네시대학(UT)/오크리지국립연구소(ORNL) Research

Associate III/방문연구원

2000년 6월~현재 : 한국과학기술정보연구원(KISTI) 책임연구원

<관심분야> SDN/NFV, SD-WAN, Research Networking, Network Virtualization