

SDN 도메인 상호 연계 시스템 설계 및 구현

김 용 환*, 김 기 현*, 김 동 균^o

Design and Implementation of the SDN Federation System for Inter-Domain Communications

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

요 약

SDN은 기존의 인터넷 중심의 네트워크를 새롭게 재편하고 다양한 분야의 서비스 및 플랫폼 통합 환경을 제공하기 위한 핵심 기술로써 부상하고 있다. 하지만 서비스 및 플랫폼 통합 환경 제공을 위하여 서로 다른 SDN 도메인 사이의 연결성을 제공하는 일은 쉽지 않은 문제이다. 이에 따라, 본 논문에서는 SDN 도메인 간 데이터 링크 계층 기반의 연결성을 제공하기 위하여 추상화된 네트워크 연계 정보를 JSON 형태로 교환하고 데이터 전송 설정을 수행하는 분산화된 형태의 SDN 도메인 상호 연계 방안을 제안하고자 한다. 또한 SDN 도메인 간의 데이터 전송 방안의 독립성 및 투명성을 보장하기 위하여, SDN 컨트롤러가 보더 스위치를 상대방 SDN 호스트들에 대한 프록시로 인식하도록 설정함으로써 해당 SDN 도메인에서 사용 중인 ARP 및 데이터 전송 방안을 그대로 사용할 수 있도록 한다. 그리고 이를 로컬 테스트베드 및 실제 한-중 SDN 광역망 인프라에 구현 및 적용함으로써 제안 시스템이 정상적으로 동작하는지 검증하고 이의 유용성을 입증하고자 한다.

Key Words : SDN, Federation, SDN-IP, Virtual Network, L2 Connectivity

ABSTRACT

Software Defined Networking (SDN) is a new network paradigm that can reorganize Internet-centric networks to provide the integrated service platform and environment. However, it is a challenge to provide network connectivity and reachability for SDN-based inter-domain networks. In order to figure out this problem, in this paper, we propose an SDN inter-domain federation system in the distributed manner to provide network connectivity between individual SDN domains. For this, the abstracted federation information is exchanged using REST-API calls between SDN domains, and then the related configurations are automatically completed by the proposed system. Furthermore, in order to guarantee the independence and transparency of data transmission on inter-domain SDNs, we setup the border switch recognized as the proxy for end hosts in the peer SDN domain. Finally, the proposed system has been implemented and verified not only on the local testbed but the physical SDN-WAN infrastructure deployed between Korea and China in terms of feasibility and performance of the proposed system.

* 본 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2018K2A9A2A06023620).

• First Author : (ORCID:0000-0003-3323-0323)Korea Institute of Science and Technology Information, yh.kim086@kisti.re.kr, 정희원
^o Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-9484-3399)Korea Institute of Science and Technology Information, mirr@kisti.re.kr, 정희원

* (ORCID:0000-0001-9195-7155)한국과학기술정보연구원(KISTI), 정희원

논문번호 : 201810-338-D-RU, Received October 18, 2018; Revised November 13, 2018; Accepted November 13, 2018

I. 서 론

최근 IoT, 빅데이터, AI, 클라우드 등 다양한 분야의 융합 서비스 및 지능화/자동화 플랫폼들이 출범함에 따라 기존 하드웨어 중심의 정적인 인터넷 환경을 통해 이러한 서비스 및 플랫폼을 원활하게 지원하는 데 있어서 한계에 도달하고 있다. 이에 소프트웨어 정의 네트워킹(SDN: Software Defined Networking)은 네트워크 제어 영역과 데이터 전달 영역을 분리하고 독립된 제어평면을 통해 네트워크를 중앙 집중 방식으로 제어함으로써 다양한 분야의 서비스 및 플랫폼을 지원하는 등 기존의 인터넷 중심의 네트워크를 새로이 재편할 수 있는 기술로 대두되고 있다^{1,2}. 하지만 인터넷은 서로 다른 네트워크 도메인 사이의 통신이 표준 라우팅 프로토콜인 BGP (Border Gateway Protocol)를 통하여 지원되는 반면, 서로 다른 SDN 컨트롤러/클러스터에 의하여 관리 및 운영되는 SDN 도메인 사이의 통신을 수행하기 위해서는 추가적인 방법이 요구되는 실정이다.

SDN 도메인 상호 연계를 위하여 초기에는 각각의 SDN 도메인마다 별도의 SDN-IP 게이트웨이를 설정하여 인터넷망에 연결하고 기존 인터넷망의 BGP를 기반으로 서로 다른 SDN 도메인을 네트워크 계층(Layer 3, L3)으로 연동하는 방안이 주를 이루었다³⁻⁴. 하지만 이는 기존 인터넷망에 적합한 BGP를 그대로 활용하기 때문에 느린 라우팅 갱신 이슈로 인한 패킷 손실 및 성능 저하 등이 발생하므로 다중 네트워크 도메인에서의 다양한 사용자 및 서비스 요구 수준을 제공하는데 한계를 지닌다⁵⁻⁶. 이에 따라, 서로 다른 SDN 도메인 사이의 라우팅 정보 갱신을 위하여 BGP를 SDN에 적합한 형태로 개선 및 적용함으로써 이의 문제를 해결하기 위한 연구가 진행되었으며^{5,6}, 이의 일환으로 서로 다른 SDN 도메인 사이의 라우팅 갱신을 위하여 이스트-웨스트(West-East) 기반의 라우팅 정보 교환 방안이 제안되기도 하였다^{7,8}. 하지만 이러한 L3 상에서의 라우팅 정보 갱신 기반 SDN 상호 연결 방안은 여전히 다중 필드 프리픽스 매칭, SDN 도메인 간 종단 라우팅, 다중 경로 전송 등의 이슈가 존재하며, 이를 해결하기 위하여 활발한 연구⁹가 진행되고 있지만 여전히 근본적인 해결책이라 보기는 어렵다. 한편, 다수의 SDN 도메인 사이의 통신을 제어하기 위하여 별도의 중앙 집중형 컨트롤러를 두고 이를 통하여 모든 SDN 내의 지역 컨트롤러와 메시지를 교환하는 통합적인 관점에서의 SDN 도메인 상호 연계 방안을 수행하고자 하는 움직임이 있다¹⁰.

이는 기본적으로 데이터 링크 계층(Layer 2, L2) 연계를 통하여 데이터 전송 성능을 보장하고 SDN 도메인 연계를 수행하는 네트워크 간 제어 메시지 교환을 수행하기 때문에 상대적으로 적은 비용으로 빠르게 서로 다른 SDN 도메인 간의 데이터 송수신이 가능하다. 하지만 이를 위하여 중앙의 컨트롤러 혹은 각각의 SDN 컨트롤러들이 서로 다른 SDN 도메인의 네트워크 토폴로지 정보를 포함한 다양한 정보를 수집하고 이에 기반한 도메인 단위의 트리 구성을 통한 연계 및 데이터 통신을 수행하기 때문에 각 SDN 도메인 사이의 메시지 오버헤드가 상당히 크고 시스템 확장성이 상당히 저해된다는 단점이 있다. 또한 네트워크 관리자 및 운영자 측면에서 SDN 도메인 상호 연계를 위하여 토폴로지를 포함한 상당히 많은 정보를 자신이 관리하지 않는 중앙 컨트롤러에 제공하기 때문에 이에 대한 보안 이슈도 발생한다.

본 논문에서는 네트워크 연계에 따른 시스템 확장성을 제공하기 위하여 별도의 중앙 컨트롤러를 두지 않고 연계를 수행할 SDN 도메인 사이의 간단한 정보 교환만으로 상호 간의 데이터 통신을 제공하는 분산된 형태의 L2 기반 SDN 도메인 상호 연계 방안을 제시하고자 한다. 이 때, 서로 다른 네트워크 관리자에 의하여 운영되는 SDN 도메인 간의 상호 연계는 개별 네트워크의 독립성 및 보안성을 바탕으로 이뤄져야 한다. 이에 따라, 본 논문에서는 SDN 도메인 상호 연계를 위한 최소한의 네트워크 정보를 사전에 정의된 데이터 모델링 형태로 추상화하고 이를 서로 다른 SDN 네트워크의 컨트롤러 간에 REST API를 통하여 교환함으로써 연계 설정을 수행하는 단순화된 형태의 SDN 도메인 상호 연계 방안을 제시한다. 그리고 이 때, SDN 네트워크 상호 연계를 위한 제어 메시지의 교환은 기존 인터넷망을 활용하는 반면, 서로 다른 SDN 네트워크에 연결된 호스트들 사이의 데이터 전송은 L2 통신을 수행함으로써 빠르고 효율적으로 데이터를 전달한다. 이를 통하여 기존 L2 기반의 SDN 상호 연계 방안이 지닌 시스템 확장성 및 보안 이슈를 상당 부분 개선하는 한편, L3 기반의 SDN 상호 연계 방안이 지닌 라우팅 정보 갱신 이슈를 근본적으로 배제하고자 한다.

한편, 서로 다른 SDN 도메인 사이의 데이터 전송은 추상화된 네트워크 연계 정보 교환만으로 원활하게 이뤄져야 하며 이를 위하여 별도의 추가적인 데이터 전송 경로 설정 및 전송 방법을 사용하지 않음으로써 개별 SDN 도메인의 독립성 및 투명성을 보장해야 한다. 이에 따라, 본 논문에서는 SDN 컨트롤러가 보

더 스위치를 상대 SDN 네트워크의 인가된 호스트들에 대한 프록시로 인식하도록 설정함으로써 해당 SDN 도메인에서 채택하여 사용 중인 독자적인 데이터 전송 방안을 그대로 사용하도록 한다. 이를 통하여 상호 연계를 수행하는 서로 다른 SDN 네트워크 간에 동일한 데이터 전송방안을 사용하거나 추가적인 동기화된 데이터 전송 방안을 적용할 필요가 없기 때문에 데이터 전송 방안의 독립성 및 투명성을 보장할 수 있다. 또한 상호 연계가 승인된 SDN 도메인, 그리고 그 안에서도 통신이 인가된 호스트들에 대해서만 제한된 데이터 통신을 허용함으로써 무분별한 데이터 전송 및 허가받지 않은 호스트들 사이의 데이터 전송을 방지하여 네트워크의 신뢰성 및 보안성을 향상시킬 수 있다.

본 논문에서는 SDN 도메인 상호 연계 시스템의 타당성을 실험 및 검증하기 위하여 간단한 로컬 테스트 베드를 구축하고 제안 시스템을 적용함으로써 SDN 도메인 상호 연계를 위한 상세 절차 및 구현 결과를 보인다. 그리고 이를 통하여 간단한 정보 교환만으로도 서로 다른 SDN 도메인 내의 호스트들이 통신됨을 보인다. 또한 이를 실제로 구축되어 운용중인 한국의 SDN 광역망인 KREONET-S^[11-13]와 중국(홍콩)의 SDN 도메인에 BGP 기반의 SDN 연계 방안과 제안 시스템을 동시에 적용하여 BGP 기반의 L3 방안에 비하여 L2 연결성을 제공하는 제안 시스템이 성능 측면에서 유용함을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안하는 SDN 도메인 상호 연계 시스템의 전반적인 구조와 기본 절차를 설명하고, 3장에서는 이를 테스트 베드 환경에 구현 및 적용한 결과를 보인다. 그리고 4장에서는 실제 구축되어 운용중인 SDN 환경에 제안 방안을 적용하여 네트워크 전송 성능을 측정한 결과를 보이고, 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 시스템 구조 및 설계

본 장에서는 SDN 도메인 상호 연계 시스템의 전반적인 구조 및 절차에 대하여 소개한다. 또한 서로 다른 SDN 도메인에 속한 호스트들 사이의 데이터 통신 및 주소 결정 프로토콜 처리 방안에 대해서도 다룬다.

2.1 시스템 구조 및 기본 절차

본 논문에서 제안하는 SDN 도메인 상호 연계 시스템은 그림 1과 같이 복수 개의 SDN 도메인으로 구성된 SDN 통합 구조를 가정하였으며 상세한 도메인 내

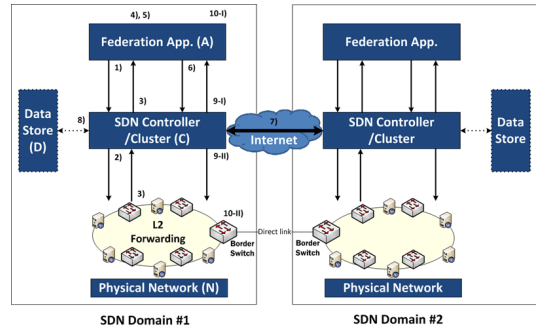


그림 1. SDN 도메인 상호 연계 시스템 구조도 및 절차
Fig. 1. SDN inter-domain federation system architecture and procedure

부 구성 요소는 다음과 같다. 1) 물리적인 네트워크 (N: 호스트, 스위치, 링크로 구성된 L2 기반의 전송 네트워크), 2) 응용 프로그램(A, SDN 도메인 상호 연계 시스템 통합 제어), 3) 컨트롤러/클러스터 (C, 네트워크 간 추상화 정보 교환, 네트워크 및 호스트 인가), 4) 데이터 스토어(D-Optional, C를 대체/보조하여 추상화 정보 저장).

그리고 이때, 네트워크 연계 시스템을 구성할 서로 다른 SDN 네트워크(데이터 평면)는 물리적인 링크(L2)를 통하여 직접적으로 연결되어 있어야 하며 SDN 컨트롤러/클러스터(제어 평면) 간에는 범용 인터넷망(L3)을 통하여 연결되어야 한다. 또한 각각의 SDN 컨트롤러는 물리 네트워크의 토폴로지 정보를 사우스바운드(Southbound) API를 통하여 자동으로 획득 가능하며, 응용 프로그램의 정보는 노스바운드(Northbound) API를 통하여 임의의 이벤트 발생 시에 획득 및 변경 가능함을 가정한다.

제안 방안은 복수 개의 SDN 도메인 상호 연계를 위하여 반드시 요구되는 최소한의 정보를 대상으로 추상화된 네트워크 연계 정보를 JSON 형태로 생성하고 이를 REST API를 활용하여 상호 간에 교환한다. 그리고 교환된 정보를 토대로 상대방 SDN 도메인내의 호스트를 보다 스위치의 포트에 액세스된 것처럼 가상으로 생성함으로써 데이터 전송 경로 설정 및 주소 결정 프로토콜(ARP, Address Resolution Protocol) 처리 등을 수행한다. 그림 1에서 제시하는 각 구성 요소간의 상세 절차는 다음과 같다.

- ① (A→C) SDN 도메인 상호 연계 응용 프로그램 (A) 실행 시, 네트워크 추상화를 위한 데이터 모델링 스키마를 SDN 컨트롤러/클러스터(C)에게 제공
- ② 데이터 모델링 지원 포맷 : JSON, XML 등

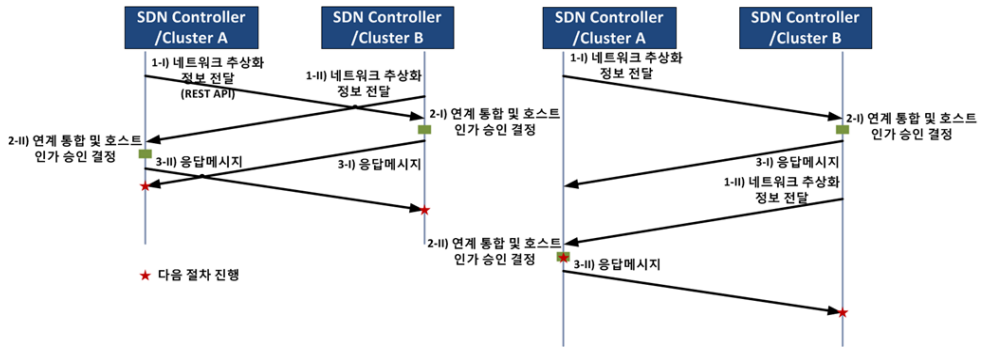


그림 2. REST API 기반 네트워크 연계 정보 교환 및 네트워크/호스트 인가 절차
 Fig. 2. SDN federation information exchange and network/host authorization procedure via REST API

- ㉠ 네트워크 연계 정보 : 컨트롤러 외부 IP, 보더(Border) 스위치 식별자, 보더 스위치 포트 식별자, 통신 인가를 요청할 호스트들의 식별자(MAC/IP 주소) 리스트
- ② (C→N) 물리 네트워크(N) 토폴로지 정보 요청
- ③ (C→N) (N→C→A) N 토폴로지 정보 전달
- ④ (A) SDN 상호 연계를 수행할 상대방 SDN 네트워크와 직접적으로 연결된 보더 스위치 및 링크 그리고 데이터 통신 인가를 요청할 호스트 리스트 선택
- ㉡ 네트워크 연계 정보 선택 방법: GUI, REST API, CLI
- ⑤ (A) 네트워크 연계 정보를 연계 통합 데이터 모델링 스키마에 따라 JSON 등 지원 포맷으로 생성
- ⑥ (A→C) ⑤에 의하여 생성한 파일을 포함하여 SDN 상호 연계 인가 수행 명령을 C에 전달
- ⑦ (Between C) 범용 인터넷 서비스를 활용하여 REST API 기반의 네트워크 연계 정보 교환 및 네트워크 인가 (호스트 인가) 절차 수행
- ㉢ 1) 네트워크 연계 정보 전달, 2) SDN 상호 연계 및 호스트 인가 승인 여부 결정, 3) 응답메시지 전달 과정으로 나누어지며 이는 각 네트워크 도메인마다 독립적/병렬적으로 수행
- ㉣ 네트워크 연계 정보 전달 방식: REST API 호출
- ㉤ 종료조건 : 1) 네트워크 연계 정보 전달에 대한 응답 메시지 수신, 2) 상대방 SDN의 네트워크 연계 정보 수신 및 이에 따른 인가 결정
- ㉥ 해당 과정의 실패(C→A) : ⑥에 대한 응답

- 메시지에 SDN 연계 실패 전달 후 종료
- ⑧ (C) 교환된 정보를 상호 연계 통합 데이터 모델링 방법에 따라 하나의 파일로 통합 및 저장
- ⑨ (Option: C↔D) SDN 컨트롤러 메모리 구조에 해당 정보/파일을 저장할 수 없거나 고가용성을 위한 백업이 요구되는 경우, 별도의 데이터 스토어(D)에 해당 정보/파일의 저장
- ⑩ (C→A) ⑥ SDN 도메인 상호 연계 인가 수행 명령에 대한 응답 메시지 전달
- ㉦ (Case I) SDN 도메인 상호 연계 인가 승인 : 상대방 SDN의 네트워크 연계 정보 전달, 호스트 리스트 정보 생략 가능 (요청한 모든 호스트의 인가 승인)
- ㉧ Case II) SDN 도메인 상호 연계 인가 부분 승인 : 상대방 SDN의 네트워크 연계 정보 + 인가 승인된 호스트 리스트 정보 전달
- ⑪ (C→N(보더스위치)) 네트워크 연계 정보를 바탕으로 상대방 SDN 호스트들을 물리적 네트워크를 직접적으로 연결하는 보더 스위치의 포트에 연결되도록 가상 생성
- ⑫ (A) SDN 상호 연계 절차 완료

2.2 주소 결정 프로토콜(ARP) 처리 및 데이터 전송 방안

SDN 환경에서는 기본적으로 L2 기반 데이터 통신을 수행하며, SDN 컨트롤러가 데이터 전송에 관한 MAC 주소 기반의 플로우 규칙을 오픈플로우 스위치에 적용한다. 하지만 실제 호스트들 사이의 데이터 통신을 위해 IP 주소가 요구되기 때문에 일반적으로 ARP를 활용하여 해당 IP 주소에 상응하는 MAC 주소를 찾고 이에 해당하는 플로우 규칙에 따라 데이터 전송을 수행한다.

그러나 ARP의 경우 동일한 서브넷에 존재하는 호스트에 한하여 IP 주소에 대응하는 MAC 주소를 찾을 수 있기 때문에 다른 네트워크에 존재하는 호스트의 경우 ARP를 통하여 원하는 결과를 얻을 수 없다. 그리고 임의의 SDN 컨트롤러가 기존의 ARP을 대신하여 프록시 ARP 기능을 제공하는 경우 또한 동일한 상황이 발생한다. 이에 따라, 본 절에서는 상대방 SDN 도메인 내의 인가된 호스트들에 대하여 SDN 컨트롤러 기반의 논리적인 가상 호스트 생성을 통한 ARP 활용 방안을 제시한다.

SDN 도메인 상호 연계 시스템은 네트워크 연계 정보를 기반으로 상대방 SDN 도메인 내의 인가된 호스트들의 <MAC 주소, IP 주소>에 해당하는 호스트들을 상응하는 보더 스위치의 포트에 액세스되도록 가상 생성한다. 이에 따라, 출발지 호스트로부터 상대방 SDN 도메인 내의 인가된 호스트로의 통신을 위한 ARP 요청 메시지를 SDN 컨트롤러(프록시 ARP 서버)가 수신하면 해당 가상 호스트의 정보를 토대로 상대방 도메인의 호스트 IP 주소에 상응하는 MAC 주소를 포함하여 ARP 응답 메시지를 생성한 후 출발지 호스트에게 전달한다. 이를 수신한 출발지 호스트는 데이터 전송 절차에 의거하여 L2 기반 통신을 수행한다. 그리고 추후 해당 SDN 상호 연계가 종료되고 동시에 SDN 도메인 상호 연계 시스템은 관련된 가상 호스트들을 모두 삭제함으로써 관련된 ARP 처리를 수행하지 않는다. 한편, 프록시 ARP를 사용하지 않는 경우 SDN 컨트롤러를 통하여 오픈플로우 스위치에 가상 호스트에 대한 목적지 IP 주소 설정(Target Protocol Address, TPA) 규칙을 제공하거나 ARP 규칙보다 우선순위가 높은 플로우 규칙을 사전에 설정함으로써 위의 문제를 해결할 수 있다.

SDN 도메인 상호 연계를 위한 정보 교환 및 제어 메시지 전달은 컨트롤러간의 인터넷 통신을 통하여 이뤄지지만 이후 서로 다른 SDN 도메인에 속한 호스트들 사이의 데이터 전송은 L2 기반 통신을 수행함으로써 데이터의 전송 속도 및 효율성을 높을 수 있다. 이를 위하여, 상대방 SDN 도메인과 L2 연결성을 제공하는 보더 스위치를 상대방 도메인 내 인가된 호스트들의 프록시로 활용함으로써 서로 다른 SDN 도메인에서 독자적인 데이터 전송 방안에 따라 데이터를 전달한다. 가령, SDN 도메인 A의 출발지 호스트에서 SDN 도메인 B의 목적지 호스트로 데이터 전송 요청 발생 시(패킷 인(Packet-In) 메시지 수신), SDN 도메인 B와 연결된 SDN 도메인 A의 보더 스위치 포트에 해당 목적지 호스트가 가상으로 존재하기 때문에

SDN 도메인 A에서는 해당 포트로 패킷을 전송하는 플로우 규칙을 생성하여 오픈플로우 스위치에 전송한다. 이 후 해당 패킷이 보더 스위치의 포트를 통하여 SDN 도메인 B에 도착하면 목적지 호스트가 해당 도메인 내에 존재하기 때문에 SDN 도메인 A와 마찬가지로 망 내의 독자적인 데이터 전송 방안을 활용하여 오픈플로우 스위치에 플로우 규칙을 생성함으로써 목적지 호스트까지 패킷을 전달한다.

III. 가상망 기반 SDN 도메인 상호 연계 시스템 구현 및 검증

본 논문에서는 제안하는 SDN 도메인 상호 연계 시스템을 검증하기 위하여 오픈소스 SDN 제어플랫폼인 Open Network Operating System (ONOS)^[14,15]을 채택하고 제안 방안을 애플리케이션을 가상 전용 네트워크(VDN, Virtual Dedicated Network) 시스템 상에 상호 연계/페더레이션 모듈 형태로 구현하였으며 데이터 영역은 Mininet^[16]을 활용하여 구성하였다. 그리고 두 대의 서버에 각각 위와 같은 독립적인 SDN 도메인 환경을 구성하고 서로 다른 SDN 도메인의 제어 평면은 범용 인터넷, 데이터 평면은 1G 포트를 활용하여 L2 연결성을 제공하도록 구성하였다. 또한 서로 다른 SDN 도메인 내의 호스트들 사이의 전송 대역폭 보장 및 데이터 송수신을 위하여 SDN 도메인 상호 연계 시스템을 VDN 시스템과 연동 활용하였다. 그리고 이를 통하여 간단한 정보 교환만으로 서로 다른 SDN 도메인 내의 호스트들 사이의 통신이 수행됨을 보인다. 여기서 VDN은 가상 전용망을 필요로 하는 임의의 사용자 그룹만을 위하여 VDN 참여 호스트들 사이의 요구 대역폭을 보장하는 물리적인 경로를 포함한 가상 네트워크와 이에 기반 한 데이터 전송 방안을 제공한다^[17,18].

SDN 도메인 상호 연계를 위하여 제안 시스템은 크게 다음의 5가지 기능을 제공해야 하며, 본 장에서의 각각의 기능 구현 결과를 2장 1절의 세부 절차에 따라 보인다.

- 네트워크 연계 정보(컨트롤러 외부 IP, 보더 스위치 식별자, 보더 스위치 포트 식별자, 통신 인가를 요청할 호스트들의 식별자 리스트)의 ONOS 메모리 및 JSON 파일 변환/생성
- 네트워크 연계 정보 기반 SDN 도메인 상호 연계 요청/승인/해제/정보 목록화
- 상대방 SDN 도메인의 가상 네트워크 연계 호스트 자동 등록 및 설정(ARP, Neighbor Discovery 등)

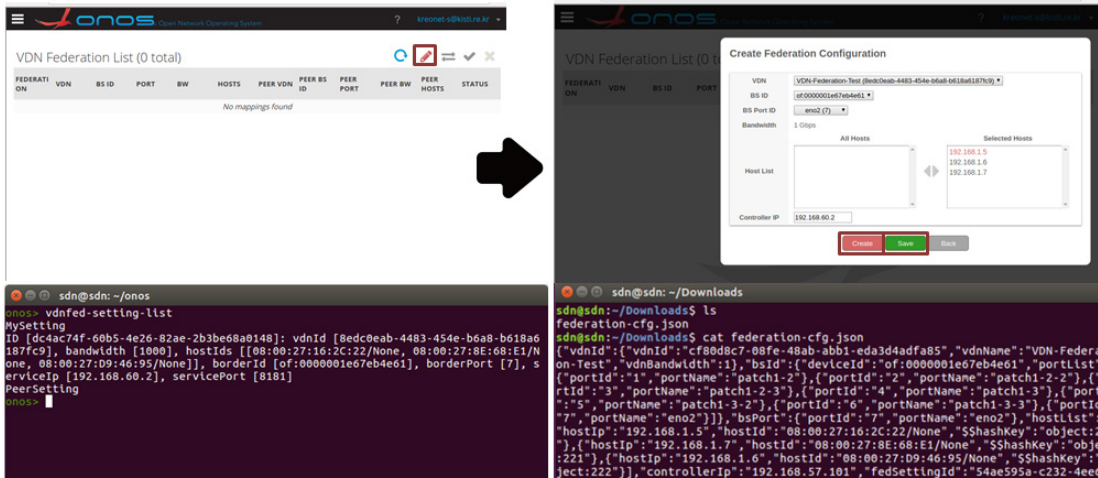


그림 3. 네트워크 연계 정보 생성 GUI
Fig. 3. GUI for SDN federation information generation

- 상호 연계된 다중 SDN 네트워크 도메인 사이의 종단(E2E) 통신을 위한 데이터 전송 프록시 설정
- SDN 도메인 상호 연계 관리를 위한 웹 인터페이스(Graphical User Interface, GUI), REST API

SDN 도메인 상호 연계를 수행하기 위해서는 먼저 각 SDN 도메인 내에 VDN이 생성되어 있어야 하며, 서로 다른 SDN 도메인 사이의 L2 기반 VDN 연결성을 제공해야 한다. 그리고 이를 기반으로 네트워크 연계 정보를 시스템 메모리에 생성한다. 한편, 상대방 SDN 도메인에 상호 연계 관련 정보를 전달하기 위한 목적으로 해당 정보를 JSON 형태로도 동시에 저장 가능하다. 그림 3은 네트워크 연계 정보 생성을 위한 GUI 및 이의 실행 결과를 보여준다. 여기서 VDN 정보는 통신 인가를 요청할 호스트들을 선정함에 있어

그 대상을 SDN 도메인에 존재하는 모든 호스트가 아닌 특정 그룹에 한정할 수 있으며 대역폭 정보는 VDN에 제공하는 대역폭 정보를 기반으로 자동 설정된다.

한편, 그림 4와 같이 JSON 형태로 로컬 디렉토리에 저장된 네트워크 연계 정보를 상대방 SDN 도메인의 상호 연계/페더레이션 모듈의 GUI에 업로드하거나 REST API를 호출하여 SDN 도메인 간 상호 연계를 요청할 수 있으며, 이의 경우 요청 받은 네트워크 관리자에게 자동으로 이메일을 전송하여 다른 SDN 관리자로부터 상호 연계 요청이 왔음을 알린다.

요청을 수신한 관리자가 상대방의 SDN 도메인 상호 연계 요청과 이에 상응하는 메모리상의 네트워크 연계 정보를 선택하면 각각의 상세 정보를 확인할 수

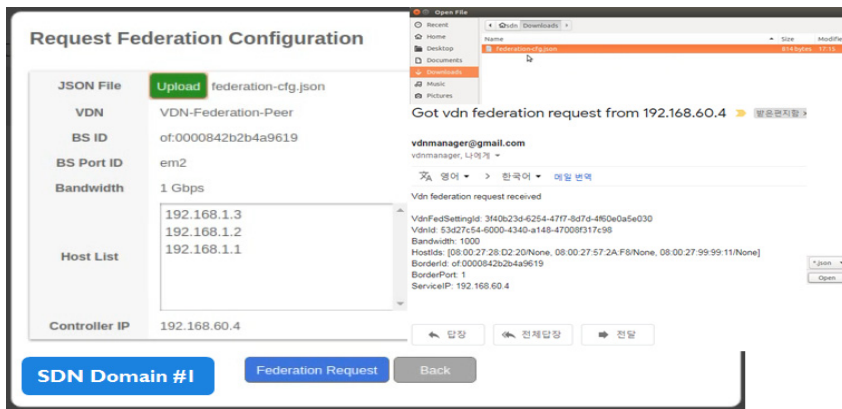


그림 4. SDN 도메인 상호 연계 요청 인터페이스 및 관리자 알림
Fig. 4. GUI for SDN inter-domain federation request and email notification to network administrator

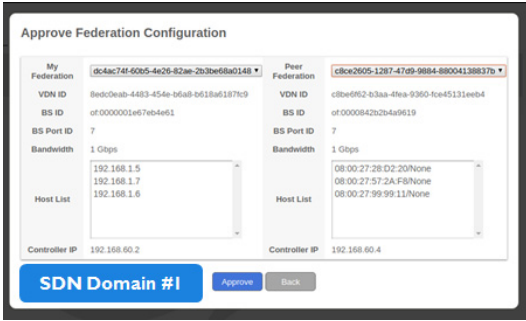


그림 5. SDN 도메인 상호 연계 승인 인터페이스
Fig. 5. GUI for SDN inter-domain federation approvalment

있다. 그리고 승인 버튼을 누르면 자신의 네트워크 연계 정보 및 상호 연계 승인 메시지에 대한 REST API가 요청한 SDN 도메인에 전달되며 이에 따라 2장 1절에서 제시된 연계 절차를 수행함으로써 서로 다른 SDN 도메인 내의 가상전용망 참여 호스트들 사이의 통신이 허용된다. 그림 5는 SDN 도메인 상호 연계 승인 관련 GUI를 보여준다.

그리고 이 때, 그림 6과 같이 각 SDN 도메인의 VDN은 보더 스위치 및 포트를 포함하지 않는다면 이를 포함하도록 자동 갱신되며, 상대방 SDN 도메인 내의 요청 호스트를 보더 스위치의 포트에 연결되는 형태로 가상 생성한다. 한편, SDN 상호 연계를 요청한 SDN 도메인 또한 마찬가지로 동일한 절차를 수행한

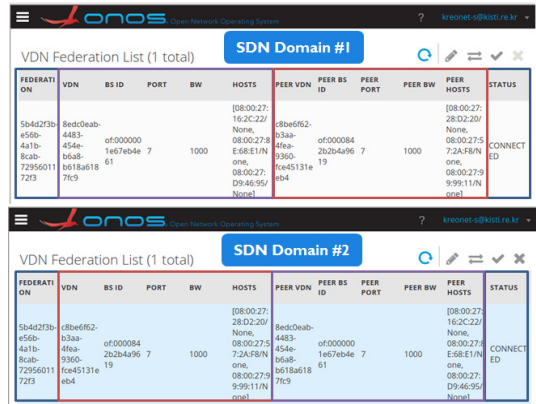


그림 7. SDN 도메인 상호 연계 정보 리스트 GUI
Fig. 7. GUI for SDN inter-domain federation list (both sides)

다. 이 때, 2장 2절의 제안 방법을 통하여 관련 ARP 및 데이터 전송을 수행하며 서로 다른 SDN 도메인 내의 호스트들 사이의 통신이 수행 가능한 상태가 된다. 그림 6은 SDN 도메인 상호 연계가 완료된 이후의 VDN 갱신 및 SDN 도메인 상호 연계 정보 확인을 위한 GUI/CLI 등을 보여주며 그림 7은 서로 다른 SDN 도메인의 상호 연계 정보에 대한 비교 결과를 보여준다.

그림 8은 SDN 도메인 상호 연계가 완료된 이후, 서로 다른 SDN 도메인 내의 허가된 호스트들 사이의 통신이 원활하게 수행되는 결과를 보임으로써 제안

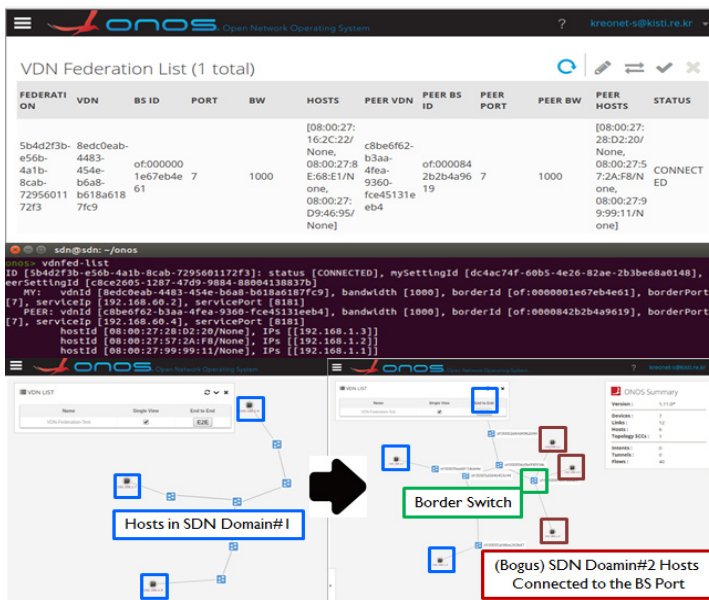


그림 6. SDN 도메인 상호 연계 정보 리스트 GUI/CLI 및 VDN 자동 갱신
Fig. 6. GUI/CLI for SDN inter-domain federation list and VDN auto-update including peer SDN hosts

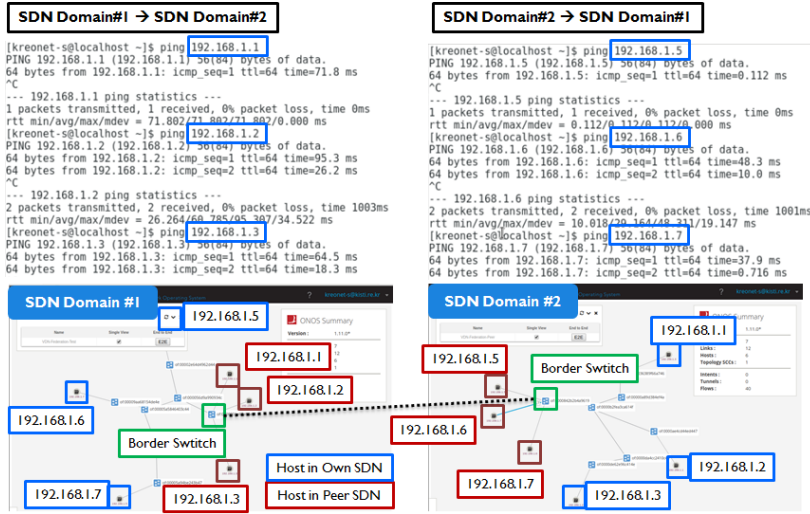


그림 8. SDN 도메인 상호 연계에 따른 다중 SDN 네트워크 도메인 사이의 종단간 통신
 Fig. 8. End-to-end communications between two SDN domains by SDN inter-domain federation

시스템이 정상적으로 동작함을 보인다.

한편, 3개 이상의 서로 다른 SDN 도메인 사이의 상호 연계를 수행한다고 할 때 제안 방안은 SDN 도메인을 상호 연계하기 위하여 추상화된 네트워크 연계 정보 교환 및 관련 설정을 독립적으로 수행하기 때문에 다수의 SDN 도메인의 상호 연계 또한 기존의 절차와 무관하게 수행 가능하다. 가령, SDN 도메인#2와 물리적으로 연결된 SDN 도메인#3이 존재하고 이에 속한 임의의 호스트 A, B와 SDN 도메인#1의 192.168.1.6 호스트, SDN 도메인#2의 192.168.1.1 호스트와 통신하고자 한다면, SDN 도메인#3 관리자가 호스트 A, B를 포함한 네트워크 연계 정보를 생성하여 SDN 도메인#2에 연계 요청을 하고, SDN 도메인#2의 관리자가 현 도메인 내의 192.168.1.1 호스트와 SDN 도메인#1의 192.168.1.6 호스트를 포함한 연계 정보를 생성하여 승인 절차를 수행하면 위와 동일한 과정에 의하여 SDN 도메인#3내의 호스트 A, B와 SDN 도메인#1과 SDN 도메인#2에 속한 호스트들 사이의 통신이 가능해진다. 즉, 서로 다른 다수의 SDN 도메인이 있다고 가정할 때 도메인 상호간에 직접적인 L2 연결 혹은 다른 SDN 도메인과의 연계를 통한 간접적인 L2 연결이 보장된다면 해당하는 SDN 도메인 사이의 각각의 독립적인 상호 연계 과정을 통하여 다수의 도메인에 속한 인가된 호스트들 사이의 통신이 가능해진다.

IV. KREONET-S 기반 시스템 실증 및 성능 분석 검증

본 장에서는 실제 구축되어 운용중인 SDN 환경에서 BGP 기반의 SDN 연계 방안과 제안된 상호 연계 방안 및 시스템을 동시에 적용하여 실증함으로써 L2 연결성을 제공하는 제안 시스템이 BGP 기반의 L3 방안에 비하여 데이터 전송 성능 측면에서 유용함을 보이고자 한다. 이를 위하여 한국의 KISTI에서 구축하여 운영 중인 SDN 광역망인 KREONET-S와 중국(홍콩)에 구축된 개별적인 SDN 도메인을 기반으로 한 중간 실증 테스트 환경을 구성하였다. KREONET-S는 7개 핵심 지역망 센터(서울, 대전, 부산, 광주, 창원, 시카고, 시애틀)를 중심으로 각각 코어 및 에지/엑세스 네트워크 디바이스가 구축되어 있으며, ONOS 분산제어플랫폼을 통해 캐리어급 SDN 광역망의 운영 및 토폴로지 정보 관리를 수행 중에 있다. 한편, 홍콩에도 ONOS 제어플랫폼 서버 시스템을 구축하고 로컬 ONOS 클러스터를 구성하였으며 데이터 평면은 하드웨어 네트워크 디바이스와 오픈 가상스위치(Open vSwitch, OVS)를 가상머신 상에 구축 및 연동하여 구성하였다. 그리고 KREONET-S와 홍콩의 SDN 도메인 모두 SDN-IP 게이트웨이를 연동하여 BGP 기반의 L3 연결을 설정함과 동시에 KREONET-S의 대전 스위치와 홍콩의 스위치 간에 1G를 보장하도록 L2 형태로 연결 구성하였다. 한편, 각각의 SDN 제어 평면은 직접 인터넷과 연결되어 이를 통하여 GUI 및

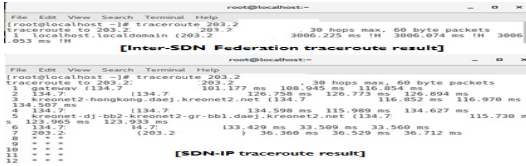


그림 9. L2/L3 기반 SDN 도메인 상호 연계 방안의 traceroute 결과 비교
 Fig. 9. Comparison of traceroute results between L2/L3 SDN inter-domain federations

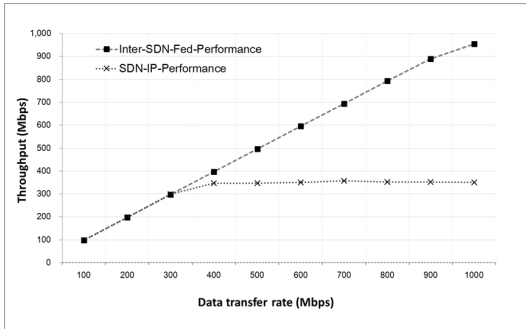


그림 10. L2/L3 기반 SDN 도메인 상호 연계 방안의 네트워크 성능 비교
 Fig. 10. Comparison of network performances between L2/L3 SDN inter-domain federations

REST API를 활용할 수 있도록 구성하였다.

그림 9는 L2 연결성을 제공하는 제안 방안과 L3 연결성을 제공하는 BGP 기반의 SDN 도메인 상호 연계 방안에서의 IP 패킷 경로 추적 경로를 보인다. 제안 방안의 경우 L2 연결을 제공하기 때문에 서로 다른 SDN 도메인 내의 호스트 사이의 통신이라도 로컬 도메인으로 인식하며, BGP 기반의 방안은 일반적인 인터넷 경로를 따라 네트워크 연결성을 보장되기 때문에 다양한 경로를 통하여 데이터 전송을 수행함을 확인할 수 있다.

그림 10은 서로 다른 SDN 도메인 내의 호스트들 사이의 데이터 전송률에 따른 실제 네트워크 전송 성능을 보인다. 네트워크 성능 측정을 위하여 iperf3를 사용하였으며 TCP와 UDP 트래픽 모두 유사한 네트워크 전송 성능 결과를 보였다. BGP 기반의 SDN 연계 방안의 경우, 초기에는 데이터 전송률에 비례하여 실제 전송 성능도 향상되었지만 350 Mbps 근방으로 더 이상 네트워크 전송 성능이 향상되지 않았다. 반면에 제안하는 SDN 도메인 상호 연결 방안을 적용한 결과 950 Mbps까지는 데이터 전송률에 비례하여 실제 네트워크 전송 성능이 올라가는 것을 확인할 수 있었다.

V. 결론

SDN 도메인 상호 연계 기술은 기존의 인터넷 중심의 네트워크를 새로이 재편하고 서비스 통합 환경을 제공하기 위한 핵심 기술로써 부상하고 있다. 본 논문에서는 SDN 도메인 간의 L2 기반 연결성을 제공하기 위하여 추상화된 네트워크 연계 정보를 JSON 형태로 교환하여 데이터 전송 설정을 수행하는 분산된 형태의 SDN 도메인 상호 연계 방안을 제안하였다. 그리고 이를 테스트베드 및 실제 SDN 광역망 인프라에 구현·적용함으로써 제안 시스템을 검증하고 유용성을 입증하였다. 제안된 기술과 구현 시스템을 통하여 개방형 SDN 생태계 및 협업 환경 조성을 통한 응용 개발의 활성화와 더불어 다수의 네트워크 도메인에서 다양한 SDN/NFV 기술 및 IoT, 클라우드, 빅데이터 등 연계 분야의 응용 기술 개발 확대에 기여할 수 있을 것으로 기대한다. 향후, KREONET-S, 중국(홍콩)의 SDN 도메인, 중국 국가연구망(CSTNET, China Science and Technology Network)의 SDN 도메인과 통합 연계 체계를 구축하고 실질적인 관점에서 보다 다양한 형태의 실험 및 검증을 수행할 예정이다.

References

- [1] N. McKeown, et al., "OpenFlow: Enabling innovation in campus networks," *ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 38, no. 2, pp. 69-74, 2008.
- [2] T. D. Nadeau and K. Gray, *SDN: Software Defined Networks*, New York, NY, USA: O'Reilly Media Inc., 2013.
- [3] P. Lin, et al., "Seamless interworking of SDN and IP," *ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 43, no. 4, ACM, 2013.
- [4] P. Lin, J. Bi, and H. Hu, "Internetworking with SDN using existing BGP," in *Proc. The Ninth Int. Conf. Future Internet Technol.*, ACM, 2014.
- [5] A. Gupta, et al., "SDX: A software defined Internet exchange," *ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 44, no. 4, pp. 551-562, 2015.
- [6] V. Kotronis, et al., "Outsourcing the routing control logic: Better internet routing based on SDN principles," in *Proc. 11th ACM*

Workshop Hot Topics Netw., pp. 55-60, 2012.

[7] P. Lin, et al., "A west-east bridge based SDN inter-domain testbed," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 2, pp. 190-197, Feb. 2015.

[8] P. Lin, et al., "WE-bridge: West-east bridge for SDN inter-domain network peering," in *Proc. IEEE Conf. Comput. Commun. Workshops (INFOCOM WKSHPs)*, pp. 111-112, Apr./May 2014.

[9] H. Zhou, et al., "SDN-LIRU: A lossless and seamless method for SDN inter-domain route updates," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 25, no. 4, pp. 2473-2483, 2017.

[10] J. Wang, et al., "A multi-domain SDN scalability architecture implementation based on the coordinate controller," *2016 Int. Conf. IEEE, Cyber-Enabled Distrib. Comput. and Knowledge Discovery*, pp. 494-499, Oct. 2016.

[11] KREONET-S web site, Retrieved Oct., 15, 2018, from <http://www.kreonet-s.net/>

[12] Y. 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, pp. 1081-1094, 2016.

[13] Y. Kim, K.-H. Kim, and D. Kim, "Design and implementation of virtually dedicated network service in SD-WAN based advanced research & educational (R&E) network," *J. KICS*, vol. 42, no. 10, pp. 2050-2064, 2017.

[14] Open Network Operating System web site, Retrieved Oct., 15, 2018, from <http://ono.sproject.org/>

[15] P. Berde, M. Gerola, J. Hart, Y. Higuchi, M. Kobayashi, T. Koide, B. Lantz, B. O'Connor, P. Radoslavov, W. Snow, et al., "Onos: towards an open, distributed sdn os," in *Proc. HotSDN '14*, pp. 1-6, Chicago, Illinois, USA, Aug. 2014.

[16] mininet web site, Retrieved Oct., 15, 2018, from <http://mininet.org/>

[17] D. Kim, et al., "Cloud-centric and logically isolated virtual network environment based on software-defined wide area network," *Sustainability*, vol. 9, no. 12, p. 2382, 2017.

[18] D. Kim, et al., "Logically isolated group network for virtual convergence environment over SD-WAN," *The J. Supercomputing*, vol. 7, no. 12, pp. 6742-6752, Dec. 2018.

김 용 환 (Yong-hwan Kim)



2010년 8월 : 한국기술교육대학교 정보미디어공학과 석사
 2015년 8월 : 한국기술교육대학교 컴퓨터공학과 박사
 2016년 2월~현재 : 한국과학기술정보연구원(KISTI) 연구원
 <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 Virtualisation, 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