

OPNET Modeler을 이용한 다중 도메인 지원 전술 SDN 시뮬레이터 설계 및 구현

이 승 운*, 정 윤 환*, 노 병 희°

Design and Implementation of Simulation System for Multi-Domain Tactical SDN Using OPNET Modeler

Seungwoon Lee*, Yunhwan Jeong*, Byeong-hee Roh°

요 약

SDN은 네트워크 장치의 제어 영역과 데이터 전달 영역을 분리한 차세대 네트워킹 아키텍처로 중앙 집중형 관리를 제공하여 유연하고 경제적인 망관리가 가능하다. 이러한 이점으로 국방 분야에서는 SDN을 적용하기 위한 노력을 지속해 왔다. 전술 SDN의 효과와 적용성을 평가하고 개선하기 위해 SDN의 대표적인 M&S 도구인 Mininet이 주로 사용됐으나 전술 네트워크 M&S에 주로 사용된 OPNET Modeler에서도 SDN 모델을 출시하였으며 좀 더 견고한 SDN 모의실험을 수행할 수 있다. 그러나 OPNET의 SDN 모델의 한계로 인해 다중 도메인을 반영한 SDN 모의실험이 불가능하다. 도메인 간 상호 연계는 여러 체계가 혼재된 미래전술망에서는 반드시 고려되어야 할 요소이므로 다중 도메인을 지원하는 SDN M&S 환경을 구축하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 여러 대의 OPNET과 부가 장치들을 이용하여 다중 도메인을 지원하는 전술 SDN 시뮬레이터를 설계하고 구현한다. 그리고 구현 결과가 설계 의도 대로 동작하는지를 검증한다.

키워드 : 전술 네트워크, 소프트웨어 정의 네트워킹, 다중 도메인, 모델링 및 시뮬레이션, OPNET

Key Words : Military Tactical Network, Software Defined Networking, Multi-Domain, Modeling and Simulation, OPNET

ABSTRACT

Start Software-Defined Networking (SDN) is a future networking architecture that decouples the control plane and the data plane of network devices to provide flexible and economical network management with centralized control. In particular, SDN has the potential in a military tactical network that requires fast and dynamic network management. To evaluate and improve the effectiveness of tactical SDN, Mininet, the most popular SDN tool, was mainly used for simulation, but OPNET Modeler, widely used for tactical network M&S, has released the SDN model and can simulate the more robust environment. However, due to the limitations of the OPNET SDN model, multi-domain simulation is not possible. Because military tactical network consists of heterogeneous systems and requires seamless communication between them, it is necessary to support SDN M&S at the multi-domain environment. In this paper, we design, implement, verify a tactical SDN simulator for multi-domains using multiple OPNETs and additional devices.

* ‘본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.(UD190033ED).

♦ First Author : Ajou University Department of Computer Engineering, swleeyg@ajou.ac.kr, 학생(박사), 학생회원

° Corresponding Author : Ajou University Department of Computer Engineering, bhroh@ajou.ac.kr, 정교수, 중신회원

* Ajou University Department of Computer Engineering, njhgle@gmail.com, 학생(석사), 학생회원

논문번호 : 201911-313-0-SE, Received November 20, 2019; Revised January 13, 2020; Accepted January 14, 2020

I. 서 론

소프트웨어 정의 네트워킹(Software-Defined Networking, 이하 SDN)이란 네트워크 장치의 제어 영역과 데이터 전달 영역을 분리한 차세대 네트워킹 아키텍처이다. 과거에는 제어 기능이 데이터를 전달하는 하드웨어에 종속되어 기능을 새롭게 추가하거나 수정하는 등 동적인 대응이 어려웠다. 그러나 SDN에서는 제어 기능을 분리해 중앙 집중형 관리를 제공하여 유연하고 경제적인 망관리가 가능하다^[1]. 이러한 장점으로 인해 SDN은 미래 인터넷의 핵심적인 기술 요소로 평가되었으며 국내외에서 정부와 민간의 투자가 매우 증가하였다.

국방 분야에서도 SDN 개념을 적용하고자 하는 노력은 계속됐다. 이미 미군은 2000년대 중반부터 미래 전술망 구조인 GIG(Global Information Grid)를 개발하면서 QoS 보장을 위해 관리, 제어, 데이터 기능을 논리적으로 구분하였다^[2]. 북대서양 조약기구(North Atlantic Treaty Organization, NATO)에서도 연합군 간의 원활한 소통 및 협업을 위해 출범한 FMN(Federated Mission Networking)의 일부로서 SDN 기술을 적용하고자 했다^[3]. 또한, 네트워크 분야의 세계적 기업인 CISCO에서는 국방망을 위한 SDN의 적용성 보고서를 출판하였다^[4].

한편, 전술 SDN의 효과와 적용성을 평가하고 개선하기 위해 다양한 연구가 진행됐다. 연구들은 테스트베드를 구축하거나 모델링 및 시뮬레이션(Modeling and Simulation, 이하 M&S)을 수행하는데 특히 M&S는 실 테스트베드 구축 없이 저비용으로 모의실험을 진행할 수 있다는 장점이 있다. SDN의 대표적인 M&S 도구로 Mininet^[5]이 주로 사용되었다. Mininet은 가상화 기술 기반의 에뮬레이터로 빠르고 간단한 실험에 적합하지만 복잡한 트래픽 모델을 반영하기 어렵고 네트워크 부하에 따른 변화를 제대로 반영하기 어렵다^[6]. 이에 전술 네트워크 M&S에 주로 사용된 OPNET Modeler(현 Riverbed Modeler, 이하 OPNET)^[7]에서 제공하는 SDN 모델을 이용하여 좀 더 견고한 SDN 시뮬레이션이 가능함을 보였다^[8,9].

그러나 OPNET은 SDN 모델의 한계로 인해 2개 이상의 네트워크를 포함하는 다중 도메인 환경을 반영하지 못하는 단점이 있다. 도메인 간 상호 연계는 상용 망에서도 중요한 도전연구이지만 전술망에서는 반드시 고려되어야 할 요소이다. 미래 전장 환경에서는 이질적인 체계와 장치가 하나의 망에서 연결되는 형태로, 지휘통제 임무를 실시간으로 계획하고 관리하

는 능력이 필요하며 이를 가능하게 하는 것이 바로 SDN 기술이다. 따라서 다중 도메인을 지원하는 SDN M&S 환경을 구축하는 것이 필요하다고 할 수 있다.

본 논문에서는 OPNET을 이용한 다중 도메인을 지원하는 전술 SDN 시뮬레이터의 설계와 구현 결과를 소개하자 한다. 먼저 OPNET의 범용성을 해치지 않기 위해 모델의 수정을 최소화한다. 대신 2대의 OPNET이 동작하는 환경을 구축하고 이 두 환경을 연결한 통합 구조를 제안한다. 또한, 시뮬레이터가 구현 의도대로 동작하는지를 확인하기 위한 검증(Verification)을 수행한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안하는 시뮬레이터의 기본이 되는 OPNET Modeler의 SDN 지원 모델을 소개하고, 3장에서는 이를 기반으로 다중 도메인 지원 전술 SDN 시뮬레이터의 설계 구조를 설명한다. 4장에서는 시뮬레이터를 구축하여 검증을 수행하고, 5장에서는 결론을 맺는다.

II. 배 경

본 장에서는 제안하는 시뮬레이터를 구성하는 OPNET의 SDN 모델을 소개하고, Mininet과의 비교를 통해 OPNET 기반 SDN 시뮬레이터 설계의 타당성을 확인한다. 추가로 OPNET SDN 모델의 한계를 확인하여 설계단계에서 일부를 개선할 수 있도록 한다.

2.1 OPNET SDN 모델

OPNET은 네트워크 성능분석을 위한 이산 시뮬레이터로 네트워크 계층의 상세 동작이 구현되어 있으며, 시뮬레이터로서 그 신뢰성을 인정받아 우리나라뿐만 아니라 미국 등에서 국방 분야의 모델링 및 시뮬레이션을 위하여 활용하고 있다.

2016년 OPNET은 버전 18.6부터 소프트웨어 정의 네트워킹을 지원하기 위한 OpenFlow^[11] 기반 SDN 모델을 제공한다. 이 모델은 OpenFlow 1.3을 지원하며 외부 실 장비와 함께 모델링 및 시뮬레이션을 지원하는 System-In-The-Loop (SITL) 모듈을 통해 시뮬레이터 외부의 SDN 컨트롤러와 연결한다. 따라서 실제 오픈소스 및 상용 컨트롤러를 의존성 없이 M&S에 사용할 수 있다. 현재는 OpenDayLight^[11]와 함께 구동할 때 가장 안정적으로 시뮬레이션할 수 있다.

2.2 OPNET의 SDN 모델과 Mininet 비교

SDN M&S 분야에서는 OpenFlow 프로토콜을 바

탕으로 오픈소스 도구인 Mininet^[5]이 주로 사용되었다. Mininet은 OS-레벨의 가상화 기능을 이용해 빠르고 가볍다. 또한, OpenFlow 프로토콜을 버전에 상관없이 완벽하게 지원하며 다양한 OpenFlow 스위치 장비와 연동된다. 또한, 현재 공개된 여러 오픈소스와도 뛰어난 호환성을 보여준다. 이러한 장점으로 Mininet은 대부분의 SDN 연구에 사용되었다. 그러나 Mininet을 전송환경에 반영하기에는 OPNET과 비교하면 다음과 같은 한계가 존재한다.

2.2.1 노드 모델의 다양성 부족

Mininet은 버전 2.2.2 기준으로 SDN 스위치, 호스트와 일반 스위치와 일반 라우터 모델(Legacy Router Model)을 제공한다. 일반 라우터 모델은 SDN 스위치가 존재하지 않는 일반 네트워크 토폴로지에서 동작하지 않으며, 라우팅 프로토콜 등 세부적인 속성들은 변경은 불가능하다. 이는 SDN 망과 비 SDN 망이 혼재된 전송환경을 반영하기에는 부족할 수 있다.

반면 OPNET은 기본적으로 다양한 실 장비를 모사하여 벤더 별로 제공하고 있다. 또한, 노드 모델은 물리 계층부터 응용 계층 모델을 포함하기 때문에 애플리케이션된 Mininet 환경과 유사한 SDN 네트워크를 구성할 수 있으며 세부적인 성능지표를 수집할 수 있어 성능분석에 유리하다.

2.2.2 트래픽 모델 설정

Mininet은 가상 스위치와 호스트를 하나의 장비에 생성하는 에뮬레이터로 네트워크 시뮬레이터의 트래픽 생성 도구를 포함하지 않는다. 대신 리눅스 가상 터미널이 제공되므로 Ping, Iperf, D-ITG 등의 트래픽 생성 도구로 트래픽을 발생시킬 수 있다. 그러나 성능분석을 위해선 패킷을 직접 수집해 분석하거나 트래픽 생성 도구에서 제공하는 통계 도구를 사용해야 한다.

반면 OPNET은 네트워크 시뮬레이터로 견고한 트래픽 모델을 제공한다. 기존 트래픽 발생 도구처럼 발생 분포에 따른 HTTP, VoIP, FTP, Video 등의 어플리케이션의 특성이 반영된 트래픽을 시뮬레이션 내 네트워크에 유통할 수 있고, 실제 캡처된 트래픽을 입력하여 사용할 수 있다. 또한, 백그라운드 트래픽 기능을 통해 단대단 성능지표를 수집할 필요가 없는 트래픽을 유통시켜 모의실험의 소요시간을 줄일 수 있다.

2.2.3 지연 및 지터 등의 성능지표 반영

IP 기반의 미래 전송네트워크에서는 중요 임무들이 패킷을 통해 교환되므로 지연시간, 패킷 손실 등의 성

능지표는 중요한 요소이다. 이러한 상황에서 Mininet 기반의 시뮬레이션은 제한적이다. Mininet의 링크 모델이 가상의 논리적인 링크로 노드를 연결하기 때문에 대역폭, 지연, 손실 확률을 설정하고 싶으면 해당 변수를 사용자가 직접 설정해야만 한다. 이러한 이유로 선행연구^[8-9]에 따르면 Mininet은 중계 스위치의 대수를 증가시키거나 초당 패킷 발생량을 늘려도 단대단 지연시간이 거의 차이가 없다. 반면 물리적인 특성이 적용된 링크모델을 포함하는 OPNET은 지연시간은 대수가 늘어나거나 선형적으로 비례하게 증가하는 것을 확인하였다. 따라서 현실적인 네트워크 환경을 모사할 때 Mininet을 사용하기엔 부족한 면이 있다.

2.3 OPNET의 SDN 모델의 한계

OPNET의 공식 설명서에서 SDN 모델의 미지원 기능을 기술하였으며 그 내용은 다음과 같다.

2.3.1 논리적 포트 (Logical Port)

논리적 포트란 SDN 스위치의 포트와 컨트롤러의 포트가 논리적인 링크로 연결되어 있음을 의미한다. 즉 SDN 컨트롤러는 제어 대상인 SDN 스위치와 논리적인 링크로 1홉(Hop)으로 연결되어 있다. Mininet은 논리적 포트를 지원한다.

반면 OPNET의 SDN 모델은 물리적 포트를 지원한다. 논리적 포트와 반대로 물리적 포트 환경에서는 컨트롤러가 네트워크 내에 존재하는 물리적 장치이고 SDN 스위치와 물리적인 링크를 통해 제어 메시지를 주고받는다. 즉, OpenFlow 프로토콜로 인해 발생하는 패킷도 네트워크에 유통되는 하나의 패킷으로 간주하며 데이터 패킷과 같은 링크를 공유하게 된다.

논리적 포트와 물리적 포트는 각각 장단점이 존재한다. 논리적 포트는 SDN의 데이터 평면 연구에 초점을 둘 수 있다. 반면 물리적 포트는 컨트롤러의 배치 문제 (Controller Placement Problem)과 같이 제어 평면을 대상으로 하는 연구에 사용할 수 있다^[9-10].

2.3.2 하이브리드 스위칭 (Hybrid Switching)

하이브리드 스위칭^[11]이란 SDN 스위치가 컨트롤러와의 연결에서 장애가 발생 시에 네트워크 연결성을 유지할 수 있도록 라우팅 프로토콜과 같은 추가 제어 기능을 탑재한 기술이다. OPNET뿐만 아니라 Mininet에서도 마찬가지로 제공하지 않는다.

2.3.3 다중 컨트롤러 (Multiple Controller)

OPNET에서 언급한 다중 컨트롤러는 하나의 모의 실험에서 2대 이상의 컨트롤러 연결이 가능한지를 의

미하며 오직 1대만의 컨트롤러와 연결할 수 있다. 그러므로 OPNET으로 다중 도메인 토폴로지를 구성하더라도 결국 하나의 컨트롤러의 제어만 가능하므로 다중 도메인을 반영했다고 볼 수 없다. 즉 여러 도메인 사이의 연계는 상용 망은 물론 전술망에서 반드시 요구되는 도전적인 연구이지만 OPNET에서는 이를 반영할 수 없다.

Mininet도 마찬가지로 구동하는 동안 단일 컨트롤러만을 연결할 수 있다. 단 여러 Mininet을 구동시켜 다중 도메인 환경을 구성한 연구가 존재한다¹²⁾.

III. 다중 도메인 지원 전술 SDN 시뮬레이터 구조 및 설계

전술하였듯 도메인 간 상호 연계 기술은 다양한 실질적인 체계와 장치가 융합된 미래 전술망에서 필수 고려 요소지만 OPNET은 SDN 모델의 한계로 다중 도메인 환경을 대상으로 모의실험을 수행할 수 없다. 본 장에서는 OPNET에서도 다중 도메인을 지원하는 전술 SDN 시뮬레이터를 소개한다.

3.1 아키텍처 및 구성요소

전반적인 아키텍처와 구성 요소는 그림 1과 같다.

2대의 OPNET 시뮬레이션 구동이 가능한 호스트 PC를 구축하고 각 PC에 OPNET 모의실험 환경을 하나의 도메인으로 구성한다. 각 호스트는 SDN 컨트롤러를 하나씩 포함하며 외부의 별개 장치에 구성한다. 각 OPNET 시나리오는 외부 실제계와 연동하는 SITL 모듈로 컨트롤러와 연결한다. 총 2개의 컨트롤러가 2개의 도메인 토폴로지를 담당하며 다중 도메인 컨트롤러가 하위의 도메인 컨트롤러를 관장한다. 두 OPNET의 사이에는 게이트웨이 역할을 하는 장치를 연결한다. 마지막으로 두 도메인 사이의 데이터 교환을 위해 호스트 노드를 각 OPNET에 SITL로 연결하여 패킷을 송수신한다.

상세한 구성 요소의 설명은 다음과 같다.

- 1) OPNET Domain 1.2 : OPNET으로 구성된 단일 도메인의 SDN 네트워크 및 이를 포함하는 장치
- 2) 도메인-1,2 컨트롤러 : OPNET 내 SDN 스위치를 제어하는 컨트롤러 장치 및 소프트웨어
- 3) 다중 도메인 컨트롤러 : 하위의 각 도메인 컨트롤러를 관리하는 상위 컨트롤러 장치 및 소프트웨어
- 4) 게이트웨이 : 네트워크 간의 데이터 교환을 지원하는 외부 장치 및 소프트웨어
- 5) 호스트 노드 1,2 : SITL로 오프넷과 연결되어 데이터를 송수신하는 장치 및 소프트웨어

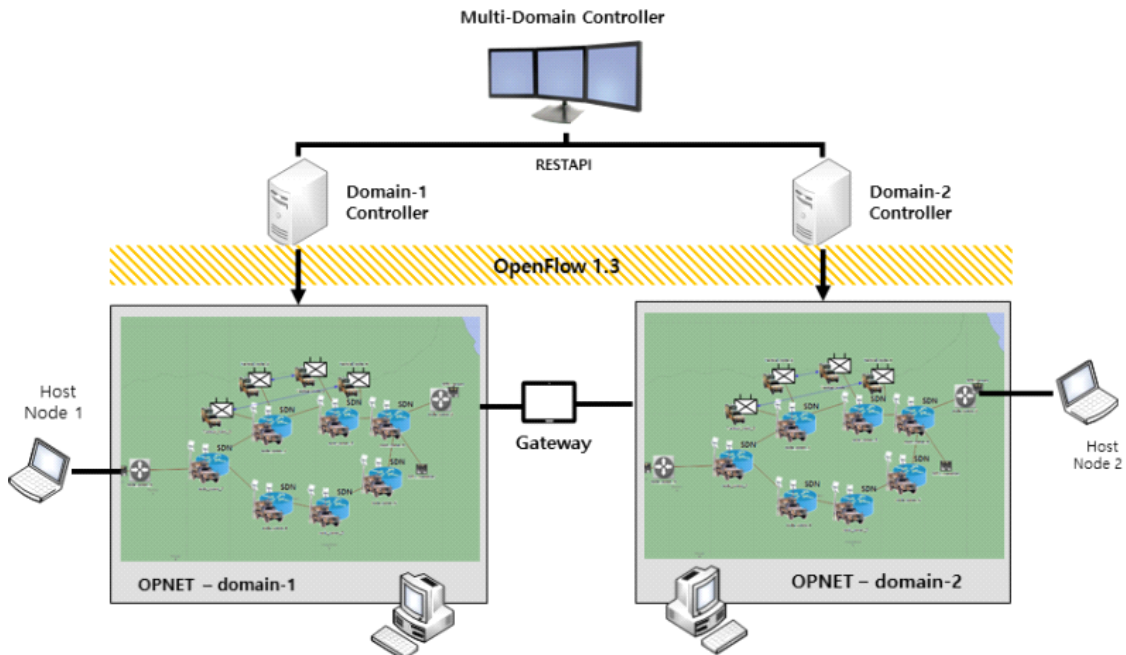


그림. 1. 다중 도메인 지원 전술 SDN 시뮬레이터 아키텍처
Fig. 1. Simulator Architecture for Multi-Domain Tactical SDN

SDN 요소간의 인터페이스로 OPNET과 도메인 컨트롤러 간에는 OpenFlow 1.3을 따르고 있으며 도메인 컨트롤러와 상위의 다중 도메인 컨트롤러는 REST API를 통해 메시지를 주고받는다.





3.2 OPNET 시뮬레이션 구성

OPNET 내부의 토폴로지는 다양하게 구성될 수 있다. 미래전술 네트워크의 망구조를 바탕으로 구성한다면 토폴로지 모델은 기간망은 격자형, 여단망은 메시형으로 구성한다^{13,14}. 이외에도 목적에 따라 다양한 토폴로지를 적용할 수 있다. 그림 2에서는 OPNET으로 구축한 격자형 토폴로지(2X4)의 예시를 나타낸 것이며 그림에 표시된 아이콘은 표 1와 같이 모델에 대응한다. 토폴로지 구성과 별개로 실체계 연동을 위해 총 3개의 SITL 노드가 필요하다. 컨트롤러와 연동하는 노드, 호스트와 연결하는 노드, 게이트웨이와 연결하는 노드이다.

OPNET에서 사용하는 노드모델의 설명은 다음과 같다.

- 1) of_switch_eth4_adv / of_switch_eth16_adv : Openflow 프로토콜 기반 SDN 지원 중계 노드모델, eth4, eth16은 이더넷 포트 개수 의미
- 2) eth_slip4_gtwy : 일반 이더넷 라우터 모델, SDN이 적용되지 않은 장치, 또는 SDN망과 STIL 노드 연동시 사용
- 3) SITL_virtual_gateway_to_real_world :외부 물리 장비와 데이터 교환을 수행하기 위한 노드, 실 패킷 ↔ 시뮬레이션 패킷 변환
- 4) eth_wkstn : 데이터를 발생시키는 가입부대망 소속 노드

표 1. OPNET 사용 모델
Table 1. OPNET Model in use

Icon	Model Name	Description
	of_switch_eth4_adv of_switch_eth16_adv	SDN-enabled relay node (OpenFlow Switch)
	eth_slip4_gtwy	Router Node (SITL Support)
	SITL_virtual_gateway_to_real_world	SITL node
	eth_wkstn	Battalion Node (Data Sender/Receiver)

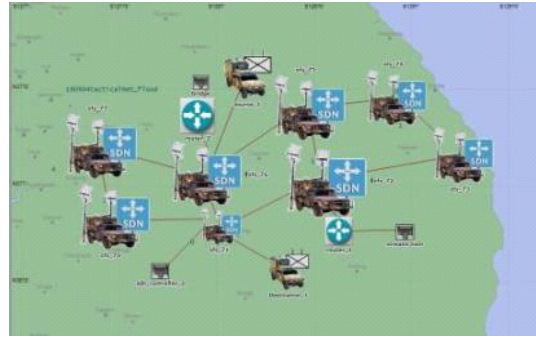


그림 2. OPNET 내 도메인 토폴로지 구조 예시
Fig. 2. Example of Domain Topology in each OPNET

3.3 망 연동 게이트웨이

OPNET의 두 도메인을 직접 SITL로 연결한 경우, 서로 다른 서브넷이므로 패킷이 정상적으로 전달되지 않는다. 또한, 각 도메인을 다른 체계를 사용하는 망으로 모사한 경우, 두 체계 간의 프로토콜이 상이하므로 메시지 포맷 등으로 인해 호환이 불가능하다. 따라서 두 망의 연동을 위해 망 경계에 연동을 위한 게이트웨이를 구축할 필요가 있다.

IP 기반의 환경에서 게이트웨이는 P4, OpenWRT와 같은 가상화 스위치로도 가능하며 간편하게 리눅스 내장 도구 iptables의 NAT 기능으로도 이용할 수 있다. 특정 IP주소나 포트번호로 오는 데이터를 게이트웨이에서 목적지의 IP주소와 포트로 변환하고 반대쪽 인터페이스로 전달하는 브릿지로 구현한다.

IV. 구현 및 검증

본 장에서는 III 장에서 설계한 다중 도메인 지원 전술 SDN 시뮬레이터의 구현 결과를 살펴보고 설계의 의도대로 동작하는지를 확인한다. 먼저 검증을 위한 시나리오를 설명하고 실제 구현 환경을 소개한다. 그리고 3가지 검증 요소를 통해 검증 결과를 확인한다.

4.1 검증 시나리오

검증 시나리오에서는 미래 전술망에서 서로 다른 도메인에 가입된 노드가 두 전술망을 거쳐 데이터를 교환하는 과정을 보인다. OPNET 도메인 1은 전방의 대대급 망으로, OPNET 도메인-2는 후방의 상위 제대급 망으로 모델링한다. 호스트 노드 1은 전방에 있는 노드로 촬영한 영상 정보를 후방 상위의 지휘소 노드인 호스트 노드 2에 송신한다.

시나리오 절차는 다음과 같다. 1) 먼저 각 도메인 컨트롤러는 OpenFlow 프로토콜을 통해 각 도메인 내

SDN 스위치들에 최적 경로를 설정한다. 2) 호스트 노드 1은 연결된 OPNET의 도메인 1로 데이터를 전송한다. 3) OPNET의 도메인 1에서는 데이터가 설치된 경로에 따라 게이트웨이까지 전달된다. 4) 게이트웨이는 데이터를 도메인-2 OPNET에게 전달한다. 5) OPNET의 도메인 2에서는 연결된 호스트 노드 2에게 설치된 경로에 따라 데이터를 전달한다.

추가로, 다중 도메인 컨트롤러의 기능을 확인하기 위한 시나리오로써 6) 다중 도메인 컨트롤러(도메인 2 컨트롤러에 포함)가 도메인 1 컨트롤러에 경로를 변경하도록 Rest API를 통해 명령을 내린다. 7) 이에 따라 도메인 1 컨트롤러는 도메인 1의 SDN 스위치에게 OpenFlow를 통해 새로운 경로로 업데이트 메시지를 보낸다.

4.2 구현 환경

다중 도메인 지원 전술 SDN 시뮬레이터를 설계에 따라 그림 3과 같이 구현하였으며 사용한 운영체제와 소프트웨어는 표 2와 같다. 먼저 OPNET은 현시점 가장 최신 버전인 18.8.1을 Windows 기반 PC와 Server에서 구동하였다. SDN 컨트롤러는 Windows 10 환경에서 OpenDayLight Carbon 버전을 사용하였다. 추가로, 도메인 2의 컨트롤러에는 도메인 1의 컨트롤러까지 관제할 수 있는 어플리케이션을 설치하여 다중 도메인 컨트롤러의 기능을 수행하게 했다. 호스트 노드는 경량형 컴퓨터 라즈베리 파이 3에 소형 스크린을 연결하고 VLC Media Player를 사용해 시나리오와 같이 영상 스트리밍을 수행한다. 자세하게는 RTP/UDP 기반의 MPEG 트랜스포트 스트림 프로토콜을 사용한다. 게이트웨이는 별도의 라즈베리 파이 상에서

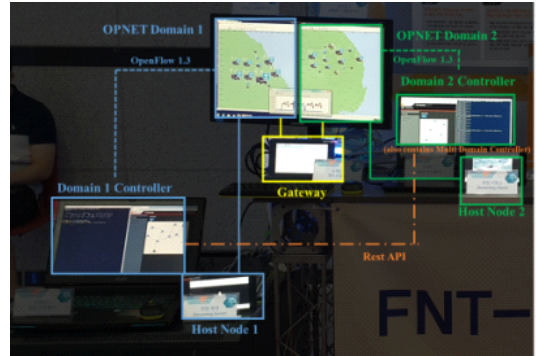


그림 3. 다중도메인 지원 전술 SDN 시뮬레이터 테스트베드
Fig. 3. Testbed of Simulator for Multi-Domain Tactical SDN

Iptables의 NAT 기능을 사용하여 양쪽 OPNET을 연결한다. 모든 하드웨어 요소 간에는 이더넷(Ethernet)으로 연결하였다.

4.3 제어 평면/데이터 평면 간 연결 확인

제어 평면과 데이터 평면 간의 정상 연동을 컨트롤러 모니터링 도구를 통해 확인한다. OPNET 시뮬레이션이 정상적으로 수행된 후 컨트롤러와 정상적으로 연결이 되었는지를 확인하기 위해 OpenDayLight의 플러그인 모듈인 Topology 기능을 사용한다. 그림 4와 같이 OpenDayLight의 GUI에서 'Reload' 버튼을 클릭했을 때 해당 도메인의 토폴로지가 출력된다. 단 OpenFlow에서는 위치 정보를 송신하지 않으므로 노드의 위치가 반영되지는 않지만, 형태와 연결 관계를 확인할 수 있다.

표 2. 사용 운영체제 및 소프트웨어
Table 2. Operating Systems and Softwares in use

Element	Specification
OPNET 1	Windows 10 Pro Riverbed Modeler 18.8.1
OPNET 2	Windows Server 2012 Riverbed Modeler 18.8.1
Domain-1 Controller	Windows 10 Pro OpenDaylight 0.6.4-Carbon
Domain-2 Controller	Windows 10 Home OpenDaylight 0.6.4-Carbon
Host Nodes	Raspberry Pi 3 / Raspbian VLC Player v3.0.7 for Data Send
Gateway	Raspberry Pi 3 / Raspbian Iptables

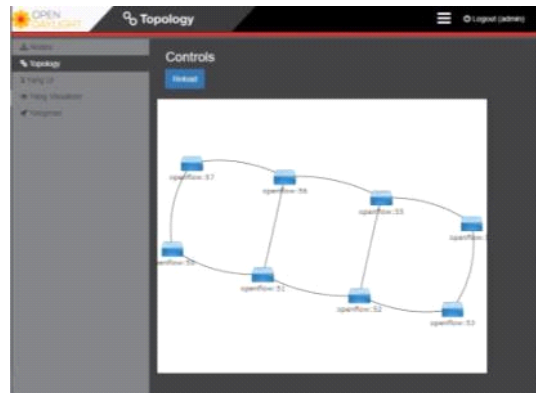


그림 4. 도메인 컨트롤러 (OpenDayLight) 상에서의 토폴로지 확인
Fig. 4. Topology check on Domain Controllers (OpenDayLight)

4.4 종단간 데이터 전달 확인

각 OPNET의 시뮬레이션이 제대로 동작하고 도메인 컨트롤러에 의해 경로설정이 적절하게 되었으며 게이트웨이 또한 인터페이스로 유입되는 트래픽을 반대쪽의 인터페이스에 정상적으로 전달된다면 호스트 노드 1과 호스트 노드 2간의 데이터 교환이 가능하다. 기술하였듯 호스트 노드 1이 스트리밍 서버가 되고 호스트 노드 2는 스트리밍 클라이언트가 된다. 즉, 호스트 노드 1이 영상 데이터를 송신하면 호스트 노드 2에서 데이터를 수신하게 된다. 그림 5는 호스트 노드에서의 초당 패킷 송신 개수와 수신 개수를 보여준다. 호스트 노드 1의 초당 패킷 송신량은 실선으로, 호스트 노드 2의 초당 패킷 수신량은 X표로 나타내었으며 두 노드의 송신 패킷 개수와 수신 패킷 개수가 유사한 경향을 보임을 확인할 수 있다.

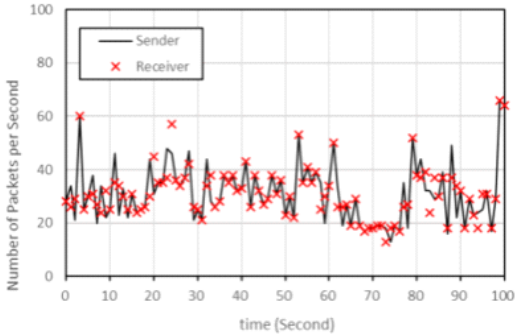


그림 5. 호스트노드 간의 초당 패킷 송수신량
Fig. 5. Number of Packets per second from Host Node 1 to Host Node 2

4.5 다중 도메인 컨트롤러에 의한 경로 변경

단일 도메인의 SDN 시뮬레이션이 진행 중일 때 컨트롤러에서 특정 애플리케이션을 실행하여 도메인 내의 스트리밍 경로를 변경할 수 있다. 현재 테스트베드 환경에서는 도메인 2 컨트롤러가 다중 도메인 컨트롤러의 기능을 포함하고 있다. 따라서 도메인 2의 컨트롤러에서 도메인 1의 제어가 가능하다. 그림 6과 같이 도메인 1의 기존 경로(빨간색)에서 우회 경로(파란색)으로 변경 후 다시 기존 경로로 변경하는 어플리케이션을 구현하였고 다중 도메인 컨트롤러에서 이를 실행하였다. 그림 7은 경로 변화에 따른 기존 경로와 대체 경로 상에 위치한 SDN 스위치의 트래픽 포워딩량을 나타낸 그래프이다. 약 4분경부터 경로가 변경되는데 이때 기존 경로의 위치한 SDN 스위치는 포워딩을 수행하지 않고 대체 경로에 위치한 SDN 스위치가 트래픽을 포워딩하게 된다. 따라서 다중 도메인 컨트롤러에 의한

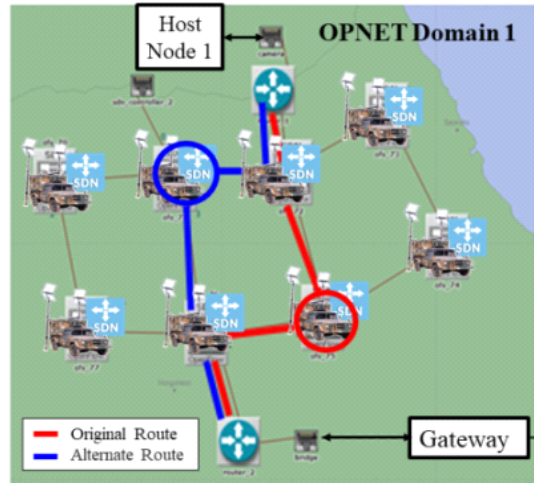


그림 6. 경로 변경 시나리오
Fig. 6. Route Update Scenario

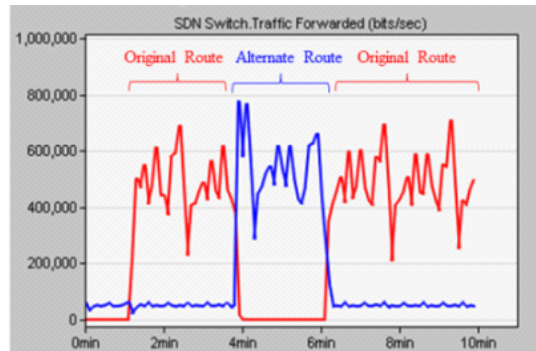


그림 7. 도메인 1 내 스위치 간 트래픽 포워딩량 비교
Fig. 7. Comparison of traffic forwarded between SDN switches in Domain 1

하위 도메인의 경로 변경이 가능함을 확인할 수 있다.

V. 결론

기존 OPNET 기반의 전송 SDN 시뮬레이션은 OPNET의 SDN 모델의 한계로 인해 다중 도메인 환경을 반영하기 어려웠다. 본 논문에서는 여러 개의 OPNET과 부가 장치들을 이용하여 다중 도메인을 지원하는 전송 SDN 시뮬레이터를 제안하고 구현하였다. 또한, 설계의 의도대로 구현되었는지를 검증하고자 각 도메인의 단말 사이에 동영상 스트리밍을 수행하여 정상 동작함을 보였다.

미래의 전송망은 다양한 체계와 장치가 혼재된 다중도메인으로 구성되므로 도메인 간의 상호 연계는 매우 중요하게 연구되어야 할 요소이다. 향후에는 제

안한 OPNET 기반의 다중 도메인 지원 전술 SDN 시뮬레이터를 통해 전술환경이 반영된 다양한 형태의 실험을 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] C. Gedo, Y. Xue, J. Evans, C. Dee, and C. Christou, "GIG QoS inter-domain interoperability challenges," *MILCOM 2007*, pp. 1-6, Orlando, FL, USA, Oct. 2007.

[3] D. Kidston, "Investigations in software-defined networking (SDN)," Communications Research Centre Report, Communications Research Centre Canada. Feb. 2016.

[4] M. Mitchiner and R. Prasad, "Software-Defined Networking and Network Programmability: Use Cases for Defense and Intelligence Communities," CISCO White Paper, 2014.

[5] Mininet web site, Retrieved Nov. 9, 2019, from <http://mininet.org/>

[6] M. Azizi, B. Redouane Benaini, and B. Mouad, "Delay measurement in OpenFlow-enabled MPLS-TP network," *Modern Applied Sci.*, vol. 9, no. 3, 2015.

[7] S. Lee and B. Roh, "Performance comparisons between Mininet and OPNET simulators for SDN modeling and simulation," *The J. Korean Inst. Next Generation Comput.*, vol. 14, no. 2, pp. 82-93, Apr. 2018.

[8] S. Lee, J. Ali, and B. Roh, "Performance comparison of software defined networking simulators for tactical network : Mininet vs. OPNET," *2019 ICNC*, pp. 197-202, Honolulu, HI, USA, Feb. 2019.

[9] T. Hu, Z. Guo, P. Yi, T. Baker, and J. Lan, "Multi-controller based software-defined networking: A survey," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 15980-15996, 2018.

[10] G. Wang, Y. Zhao, J. Huang, and Y. Wu, "An effective approach to controller placement in software defined wide area networks," in *IEEE*

Trans. Netw. and Serv. Management, vol. 15, no. 1, pp. 344-355, Mar. 2018.

[11] D. Cansever, "SDN for Tactical Networks," *Panel presentation at IEEE MILCOM 2015*, 2015.

[12] Y. Kim, K. Kim, and D. Kim, "Design and implementation of the SDN federation system for inter-domain communications," *J. KICS*, vol. 43, no. 12, pp. 2175-2184, Dec. 2018.

[13] S. Kook, M. Chang, M. Lee, J. Jun, T. Kim, J. Choi, and B. Roh, "A study on OSPF for wireless tactical communication networks," *J. KIISE*, vol. 37, no. 2, pp. 109-121, 2010.

[14] Y. Kim, S. Shin, and Y. Kim, "A priority based multipath routing mechanism in the tactical backbone network," *J. KIISE*, vol. 42, no. 8, pp. 1057-1064, 2015.

이 승 운 (Seungwoon Lee)



2015년 2월 : 아주대학교 정보
컴퓨터공학과 졸업
2017년 2월 : 아주대학교 소프
트웨어특성화학과 석사
2017년 3월~현재 : 아주대학교
컴퓨터공학과 박사과정

<관심분야> 미래인터넷, 네트워크 보안, 국방전술통신 네트워크

[ORCID:0000-0002-7939-1889]

정 윤 환 (Yunhwan Jeong)



2018년 8월 : 아주대학교 소프
트웨어학과 졸업
2018년 9월~현재 : 아주대학교
컴퓨터공학과 석사과정
<관심분야> 미래인터넷, 인공
지능, 국방전술통신 네트워
크

[ORCID:0000-0002-8725-8674]

노 병 희 (Byeong-hee Roh)



1998년 2월 : 한국과학기술원
전기및전자공학과

1989년 3월~1994년 2월 : 한국
통신 연구원

1998년 2월~2000년 3월 : 삼성
전자 연구원

2014년 3월~2015년 2월 : 국방
과학연구소 객원 연구원

2000년 3월~현재 : 아주대학교 소프트웨어학과 교수
<관심분야> 유/무선 멀티미디어 통신 응용, 트래픽
제어, IoT 플랫폼, 미래인터넷, 네트워크보안, 국
방전술통신 네트워크, 증강현실, 혼합현실(Mixed
Reality), 재난통신

[ORCID:0000-0003-2509-4210]