

초실감/고정밀 서비스를 위한 초정밀 네트워크 기술 동향

Ultra-High-Precision Network Technology Trend for Ultra-Immersive/High-Precision Service

최영일 (Y.I. Choi, yichoi@etri.re.kr)
 김응하 (E.H. Kim, ehkim@etri.re.kr)
 강태규 (T.K. Kang, tkkang@etri.re.kr)
 김도영 (D.Y. Kim, dyk@etri.re.kr)
 김정윤 (J.Y. Kim, jykim@etri.re.kr)
 정태식 (T.S. Cheung, cts@etri.re.kr)

초저지연네트워크연구실 책임연구원
 초저지연네트워크연구실 책임연구원
 초저지연네트워크연구실 책임연구원
 초저지연네트워크연구실 책임연구원
 초저지연네트워크연구실 책임연구원
 초저지연네트워크연구실 책임연구원/실장

ABSTRACT

To realize remote surgery from hundreds of kilometers away, a new communication environment with ultra-low latency and high-precision features is required. Thus, ultra-high precision networking technology that guarantees the maximum latency and jitter of end-to-end traffic on an Internet-scale wide area network is in development as part of 6G network research. This paper describes the current status of various networking technologies in ITU-T, ETSI, IEEE, and IETF to ensure ultra-low latency and high precision in wired networks.

KEYWORDS 초정밀 네트워크, 확정 지연, 확정 지연편차, TSN, DETNET, F5G, NIN

1. 서론

증강현실/가상현실/확장현실 서비스, 홀로그램 통신 등 초실감 서비스의 품질을 보장하고, 원격 수술, 로봇/드론 원격 조종 등 산업 영역에서의 크리티컬 고정밀 서비스의 안정성을 보장하기 위해 네트워크를 통한 종단 간 정보전달의 초저지연성

뿐만 아니라 지연시간의 엄격한 통제, 즉 지연편차가 최소화되는 네트워크 고정밀성이 요구되고 있다[1]. 코로나19 바이러스 사태로 인해 비대면 원격 서비스 수요가 급격히 증가하면서 원격지 종단 간 통신 서비스의 신뢰성과 초저지연성의 보장에 대한 필요성도 더욱 커지고 있다.

현재의 5G 네트워크에서는 무선 액세스 구간

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2021.J.360404>

* 이 논문은 2021년 과학기술정보통신부의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임[No. 2021-0-00715, 종단 간 초정밀 네트워크 기술 개발].



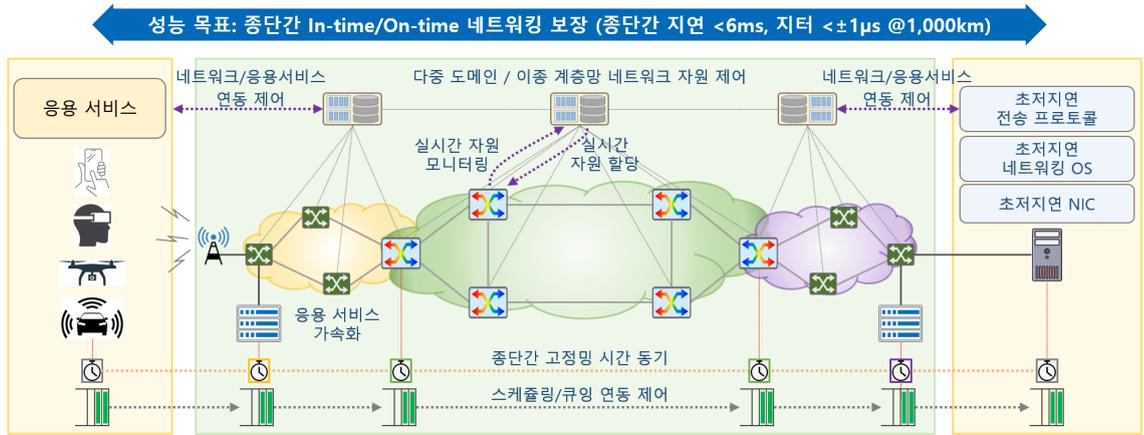


그림 1 초정밀 네트워크 개념도

서의 1ms 지연시간만을 초저지연의 목표로 하고 있어서, 유선 네트워크가 광대역으로 확장되면 중단 간 초저지연시간을 충족하지 못하게 된다. 이를 해결하기 위해 유선 네트워크 구간에서의 전송 지연시간을 최소화할 수 있도록 MEC(Multi-access Edge Computing) 기술이 도입되고 있다. MEC는 서비스 사용자와 가장 가까운 통신망 내부에 클라우드 기반의 서비스 서버들을 설치하여 지연시간을 최소화하고, 자율주행, 가상현실, 실감형 미디어 서비스 등을 지원할 수 있도록 한다.

하지만 원격 수술, 원격 증강현실, 스마트 공장 원격 제어 등 수백 킬로미터 떨어진 곳에서 초저지연이 요구되는 서비스들은 MEC 기술로 실현할 수 없으며, 정밀함이 요구되는 이러한 서비스들을 지원하기 위해서는 네트워크 중단 간에 초저지연·고정밀 특징을 갖는 새로운 통신환경이 필요하다. 이러한 초정밀 네트워크를 구축하기 위해서는 중단 간 정보전달의 지연시간을 최소화하는 인타임(in-time) 보장 네트워킹 기술 및 정보전달의 지연편차를 최소화하는 온타임(on-time) 보장 네트워킹 기술 등 시간확정형 패킷 전달 기술이 요구된다 [1].

이를 위해 그림 1과 같이 전국 규모의 광역 네트워크상에서 중단 간 트래픽의 최대 전달지연 및 지연편차를 확정적으로 보장하는 초저지연·고정밀 네트워크 기술개발이 6G 네트워크 연구개발의 일환으로 진행되고 있다. 6G 네트워크에서는 이동통신뿐만 아니라 유선 네트워크까지 포함한 기술 개발을 추진함으로써 진정한 중단 간 초저지연, 고정밀 서비스를 실현하고자 하는 것이다.

본고에서는 본격적인 6G 네트워크 기술 연구에 앞서, 유선 네트워크에서 초저지연 및 고정밀성 보장을 위해 ITU-T, ETSI, IEEE, IETF 등에서 진행되고 있는 다양한 네트워킹 기술들의 현황 및 이슈에 대해 살펴본다.

II. ITU-T SG13 Net-2030 동향

ITU-T SG13 연구반은 6G를 향한 네트워크 분야의 표준 선행연구를 위해 2018년 7월부터 2020년 7월까지 NET-2030 포커스 그룹을 운영하면서, 미래 서비스 시나리오와 요구사항을 도출하고 새로운 네트워크 구조, 프로토콜 등에 대한 백서[2]와 기술보고서[3,4]를 발간하였다. 현재의 인

터넷 인프라는 기본적으로 최선형(Best Effort) 기반의 네트워크 서비스를 제공한다. 차별화된 서비스는 트래픽의 우선순위 지정 및 자원 예약을 허용하고, 전송계층 프로토콜의 재전송 체계를 통해 안정성을 추가하였다. NET-2030 포커스 그룹은 초실감 애플리케이션을 지원하기 위해 “고정밀(High Precision)” 네트워크의 개념을 도입하고 있다. 고정밀이란 단일 패킷 플로우에서의 초저지연 보장뿐만 아니라 다중 패킷 플로우에서 정량화된 대기시간의 보장 및 동기화, 혼잡, 지원 경합 관점에서 초정밀도를 지원하는 것을 의미한다.

1. 네트워크 서비스

네트워크 2030에서 지원하는 서비스는 기본 서비스와 복합 서비스 등 두 가지로 분류할 수 있다. 기본 네트워크 서비스란 IP 패킷 라우팅 및 포워딩과 같이, 애플리케이션에 서비스를 제공하기 위해 네트워크 노드들이 지원하는 기능들을 의미한다. 네트워크 2030에서의 기본 네트워크 서비스에는, 패킷 이동 시간 또는 대기 시간과 관련하여 서비스 수준 목표가 있는 고정밀 통신 서비스, 페이로드 부분의 재전송을 억제하는 정성적 통신 서비스, 그룹 간 고정밀 서비스가 지원되는 멀티캐스트 서비스 등이 포함된다. 고정밀 통신 서비스는 다음과 같이 세부적으로 구분할 수 있다.

- 지연시간이 정량화된 한도 내에 있어야 하는 인타임(in-time) 통신 서비스(1~10ms 지연)
- 지연시간이 동일하거나 가능한 변동이 작아야 하는 온타임(on-time) 통신 서비스(<1ms 지연 편차)
- 우선순위에 따른 플로우 전달 등 플로우 간에 조정이 필요한 조율된(Coordinated Communication) 통신 서비스

네트워크 2030에서 고정밀 통신 서비스를 포함하여 다양한 기본 네트워크 서비스를 활용하는 축각 인터넷 서비스와 홀로그램 통신 서비스는 대표적인 복합 네트워크 서비스이다. 이러한 서비스를 지원하려면 멀티 플로우 환경에서 지연시간의 보장과 패킷 전달 순서의 차등화 등 네트워크 2030 기본 서비스가 필요하다.

2. 성능 목표치

축각 인터넷 서비스 성능 목표치는 다음과 같다.

- 초저지연: 종단 간 1ms에서 5ms 범위의 지연을 지원
- 초저손실: 패킷 재전송 없이 무손실에 가까운 전송을 지원
- 초광대역: 가상현실 제공에 필요한 5Gbps 정도의 대역을 지원

홀로그램 통신 서비스 목표치는 다음과 같다.

- 초저지연: 60프레임/초 조건에서 10ms 정도의 지연을 지원
- 초광대역: 사용하는 코딩기법 종류 따라서 1Gbps에서 1Tbps까지 지원
- 고수준의 동기화는 60프레임/초 조건에서 7ms 이하의 지연 변이를 지원

III. IEEE TSN 동향

IEEE 802.1에서 표준화되고 있는 시간 민감형 네트워킹(TSN) 기술은 LAN/MAN 규모의 근거리 브리지드 네트워크를 통해 초저지연과 고정밀 특성을 요구하는 응용 분야의 서비스를 제공하기 위한 인터넷 기반의 네트워킹 기술이다. TSN 네트워크는 기본적으로 그림 2와 같이 브리지(Bridge)와

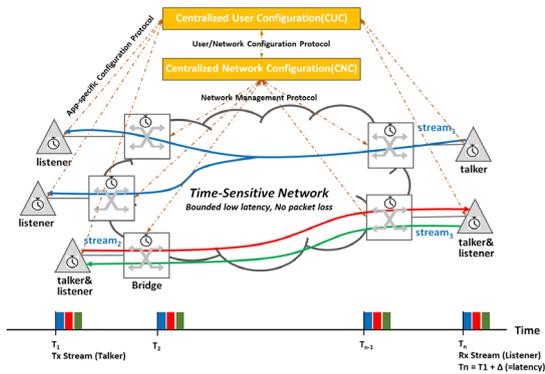


그림 2 IEEE 802.1 TSN 네트워크 구성[5]

엔드 스테이션(End Station)으로 구성된다[5]. 토크(Talker)는 스트림의 출발지(또는 생산자)인 엔드 스테이션, 리스너(Listener)는 스트림의 목적지(또는 소비자)인 엔드 스테이션, 스트림(Stream)은 토크에서 하나 이상의 리스너로 향하는 단방향 데이터 흐름을 의미한다.

1. TSN 요소 기술

TSN은 OSI 7계층 참조 모델의 데이터 링크 계층

에 해당하는 브리징, 매체접속제어(MAC) 등을 기반으로 시간 민감형, 임무 중요형 서비스를 지원하기 위한 여러 요소 기술들을 정의하고 있다.

가. 시각 동기

TSN은 네트워크 전체의 시각 동기(Time Synchronization), 즉 모든 브리징 네트워크 장치(엔드 스테이션, 브리지)들이 참조하는 공통 시각을 기반으로 한다. TSN은 IEEE 1588-2019의 정밀 시각 프로토콜(PTP)을 TSN에 활용할 수 있도록 수정한 IEEE 802.1AS-2020의 gPTP 기반 시각 동기를 사용한다. gPTP는 클럭 마스터와 클럭 슬레이브 간 PTP 메시지(Sync, Delay_Rep/_Resp 등) 교환을 통해 시각 동기를 수행하는 방식으로, 클럭 계층 구조의 루트에서 참조한 그랜드 마스터 시각에 네트워크 내 인접한 브리지 간 측정된 단일 홉 전파 지연시간을 반영하여 네트워크 구성장치 간 시각을 동기화한다[6].

IEEE 802.1AS-2020은 이전 802.1AS-2011 대비 시각 동기 성능을 향상시키고(Sub-nsec급 시각 정확도, nsec급 주파수 동기, 그랜드 마스터 전환 시

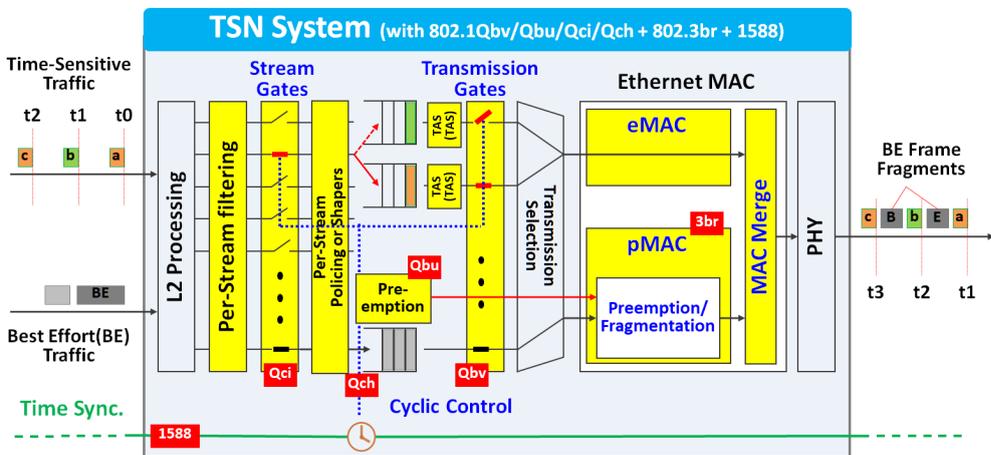


그림 3 802.1Qbv/Qch/Qbu 기반 TSN 포워딩[7,8]

간 단축 등), 링크 애그리게이션(802.1AX)과 새로운 매체 유형(IEEE 1901 전력선, WiFi 다이렉트) 지원, 링크 지연 비대칭의 자동 측정 관리 등의 내용을 추가 및 개선하였다. 또한 802.1AS 개정으로 동일 시각으로 동기화된 다중 클럭 도메인 내에서 시각 동기 문제 발생 시, 이를 신속하게 복구하기 위한 방식에 대한 표준화도 진행 중이다.

나. 유계 저지연

TSN은 기존 IEEE 802.1 브리지에 유계 저지연(Bounded Low Latency)을 위한 포워딩 및 큐잉 기술을 추가하여 브리지도 네트워크 내 지연을 확정적으로 보장한다. 유계 저지연 기술은 브리지에서 TSN 스트림을 일반 트래픽 영향 없이 시간 확정적으로 처리하기 위한 기술들로 구성된다.

유계 저지연 기술로는 그림 3에서 보는 바와 같이 인입되는 스트림의 필터링과 폴리싱을 수행하는 IEEE 802.1Qci PSFP, 동기화된 시각을 기반으로 큐 입출력단의 스트림/전송 게이트 상태(Open/Close) 제어를 통해 트래픽 큐잉 및 스케줄링을 수행하는 IEEE 802.1Qbv(TAS) 및 802.1Qch(CQF), 스트림 송신 시간섭이 될 수 있는 일반 트래픽의 프리엠션(분할, 재조립)을 수행하는 IEEE 802.1Qbu(Frame Preemption) 및 802.3br이 포함된다 [7,8]. 또한, 동기화된 시각 대신 로컬 시각을 기반으로 스트림별 예상 송신 시간을 계산하여 비동기식 트래픽 셰이핑을 수행하는 IEEE 802.1Qcr(ATS)도 있다.

TAS는 네트워크 장치와 스트림 개수가 증가할수록 각 장치의 송신 게이트 설정이 매우 복잡하고, CQF는 스트림 주기를 사용하는 큐잉으로 인해 유계 지연이 하향 평준화되고, 프리엠션은 최소 분할 프레임 사이즈(124Bytes)로 인한 간섭 지연은 여전히 존재하고, ATS는 확정 지연은 가능하지

만 요구사항에 맞는 설정이 불가능하다는 등의 문제를 가지고 있다. IEEE 802에서는 2021년부터 중단 간 지연을 궁극적으로 최소화하기 위해 모든 프레임을 메모리에 저장하여 처리하는 기존 스토어 앤 포워딩(Store and Forwarding) 대신 헤더만을 저장하여 처리하는 컷쓰루 포워딩(Cut-through Forwarding)에 대한 표준화 논의를 시작한 상태이다.

다. 고가용성/초신뢰성

TSN은 브리지도 네트워크 경로에서 장애가 발생할 경우에도 TSN 스트림을 목적지까지 손실 없이 전달하여 고가용성/초신뢰성(High availability/Ultra reliability)을 제공한다. 기존에는 네트워크 장애 발생 시 백업 경로를 선택하고, 최대 50ms 시간 동안 손실이 발생하는 보호절체 기술을 사용하고 있지만, 그림 4에서 보는 바와 같이 TSN은 별도의 경로 절체 없이 시퀀스 번호를 기반으로 하는 프레임 복제와 삭제를 사용하여 패킷을 손실 없이 전달하는 IEEE 802.1CB (FRER)을 사용한다[9].

FRER은 복제된 프레임이 전달되는 다중 경로 간 차이가 크거나 링크 속도가 빠를수록 복제된 프레임을 삭제하기 위한 알고리즘 구현이 복잡해지며, 경로 장애 및 복구 동작으로 인해 프레임의 순서가 바뀌는 오정열(mis-ordering) 문제를 가지고 있다.

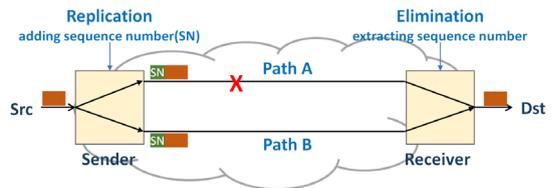


그림 4 802.1CB FRER 동작[9]

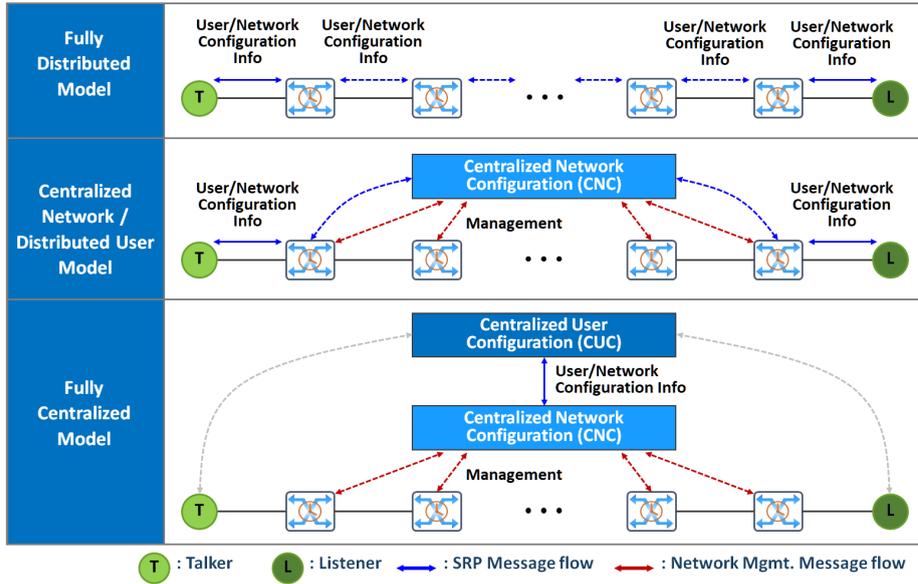


그림 5 802.1Qcc TSN 설정 모델[10]

라. 자원 관리

TSN은 전용 프로토콜과 제어관리 컨트롤러를 통해 브리지드 네트워크에서의 TSN 스트림을 위한 자원 관리(Resource Management)를 수행한다. TSN 자원 관리는 스트림 예약 프로토콜(SRP), TSN 설정 모델, 사용자/네트워크 설정 정보, YANG 데이터 모듈 등을 정의한 IEEE 802.1Qcc을 사용한다. TSN 설정 모델로는 그림 5에서 보는 바와 같이 SRP만을 사용하는 완전 분산형 모델(Fully Distributed Model), 토크/리스너와 브리지 간에는 SRP를 사용하고 CNC와 브리지 간에는 매니지먼트 프로토콜을 사용하는 하이브리드형 모델(Centralized network/Distributed user model), CUC와 토크/리스너 간에는 임의의 프로토콜을 사용하고 CNC와 브리지 간에는 매니지먼트 프로토콜을 사용하는 완전 중앙집중형 모델(Fully Centralized Model)이 정의되어 있다[10].

TSN은 주로 YANG 기반의 중앙집중형 모델을

사용하며 완전 분산형 모델은 지원하지 않는다. 중앙집중형 모델의 경우 최적 경로를 어떻게 계산할 것인지에 대해서는 표준에서 정의하지 않고 있다.

2. TSN 프로파일

TSN 프로파일은 TSN 요소 기술 중 어떤 기술을 어떻게 사용할 것인지를 명시하며, 각 응용 분야에 적합한 브리지드 네트워크를 구축하기 위한 브리지, 엔드 스테이션 및 LAN의 기능, 옵션, 구성, 기본값, 프로토콜 및 절차 등을 선택하여 기술한다.

이동통신 프린트홀을 위한 TSN 프로파일(IEEE 802.1CM & CMde)은 표준화를 완료한 상태이고, 산업 자동화(IEC/IEEE P60802), 자동차 내 이더넷 통신(IEEE P802.1DG), 항공우주 온보드 애플리케이션(IEEE P802.1DG), 서비스 프로바이더(IEEE P802.1DF)를 위한 TSN 프로파일 정의는 표준화가 진행 중이다[11].

IV. IETF DetNet 동향

IETF DetNet 기술은 명시적 경로 설정 및 자원 예약을 통해 데이터 플로우의 무손실 전달 및 종단 간 초저지연을 보장하는 지연시간 확정형 기술로 OSI 모델 3계층 기술이다. DetNet 워킹그룹은 TSN이 가진 공간적 한계를 극복하기 위하여 IP/MPLS 기반의 광역 지연시간 확정형 네트워킹 기술에 대한 표준화 작업을 진행하고 있다.

1. DetNet 구조

DetNet 구조는 그림 6과 같이 응용 평면, 제어 평면과 관리 평면이 통합된 컨트롤러 평면, 그리고 데이터 평면의 물리적 구성체인 네트워크 평면 등 3개의 평면으로 구성된다[12].

응용 평면은 DetNet 종단 시스템에서 수행되는 응용과 서비스를 모두 포함하며, NBI 인터페이스를 통해 컨트롤러 평면의 제어 및 관리 기능 개체에 DetNet 서비스를 요청한다. 컨트롤러 평면은 네트워크 형상 정보 및 네트워크 자원, 지연 정보 등을 수집하고, 경로 계산 개체, 네트워크 관리 개체 등의 제어 평면 기능을 사용하여 지연 요구사항을

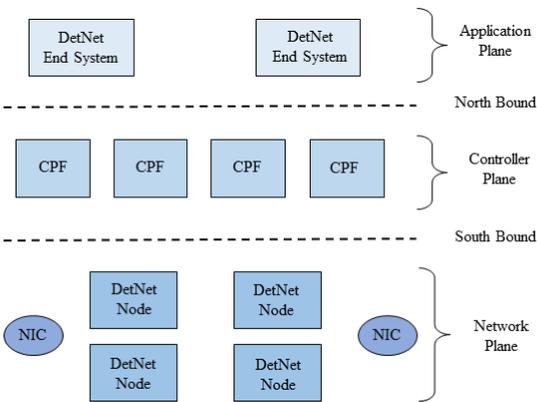


그림 6 DetNet 평면 및 인터페이스[12]

만족하는 경로를 계산하고, SBI 인터페이스를 통해서 계산된 경로상의 노드들에 데이터 플로우 설정을 요청한다. 네트워크 평면은 IP 호스트인 종단의 네트워크 인터페이스 카드와 IP 또는 MPLS 기반의 지연시간 확정형 패킷 포워딩을 지원하는 DetNet 노드들로 구성된다. 데이터 평면의 각 노드는 SBI 인터페이스를 통해서 전달된 형상 YANG 모델[13]을 사용하여, 물리적 토폴로지 및 리소스 정보를 설정하고, 이 정보를 이용하여 데이터 플로우를 설정한다.

2. DetNet 데이터 평면

가. DetNet 데이터 평면 구성

DetNet 데이터 평면은 기능적으로 그림 7과 같이 서비스 부계층과 포워딩 부계층으로 분리되어 있다.

서비스 부계층은 지연시간 확정형 플로우를 구분하고, 플로우의 시퀀스 번호를 이용하여 무손실 전달 및 재배열 등의 서비스 보호 기능을 제공한다. 포워딩 부계층은 지연시간 확정형 플로우에 대한 자원 예약 및 명시적 경로 설정 기능을 제공한다. 자원 예약은 스트림별 필터링 및 폴리싱, 시간 인식 셰이퍼, 사이클릭 큐잉 및 포워딩, 프레임 프리엠션 등의 근거리 지연시간 확정형 네트워킹 기술을 포함하여 DSCP 기반 QoS, 지연시간 확정형 플로우의 대역폭 할당 등 초저지연 보장을 위한 다

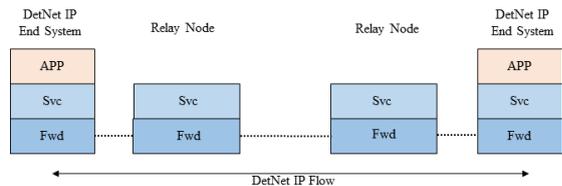


그림 7 DetNet IP 데이터 평면[15]

양한 기능을 제공한다[14].

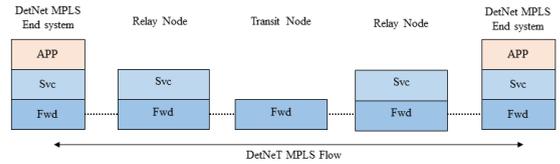
명시적 경로 설정은 네트워크 상태 변화에 따른 경로 재계산 등으로 인해 예약된 지연시간 확정형 플로우의 경로가 변경되지 않도록 유지하고, 상황에 따라 지연시간 확정형 플로우와 비확정형 플로우의 경로를 구분하여 전달할 수 있도록 한다. DetNet 플로는 서비스 부계층과 포워딩 부계층의 기능이 모두 필요한 서비스 포워딩 플로우, 서비스 부계층의 기능만 필요한 서비스 플로우, 포워딩 부계층의 기능만 필요한 포워딩 플로우로 구분된다.

DetNet 데이터 평면은 종단과 DetNet 노드들의 도메인으로 구성되며, 종단은 DetNet 인식(Aware) 종단과 DetNet 비인식 종단으로 구분되고, DetNet 도메인은 도메인 경계에 있는 엣지(Edge) 노드, 도메인 내에 있는 릴레이(Relay) 노드와 트랜짓(Transit) 노드로 구성된다. DetNet 인식 종단은 DetNet 도메인에서 필요로 하는 정보와 패킷 형식에 따라 DetNet 플로우를 제공할 수 있는 종단을 말하며, 그렇지 못한 종단을 DetNet 비인식 종단이라 한다. DetNet 비인식 종단이 생성한 플로우를 App 플로우라 한다. 엣지 노드는 DetNet 도메인으로 수신된 App 플로우를 DetNet 플로우와 매핑하는 서비스 프록시 기능을 수행하고, 릴레이 노드는 엣지 노드 또는 다른 릴레이 노드로부터 전달되는 서비스 포워딩 플로우 또는 서비스 플로우를 처리하고, 트랜짓 노드는 포워딩 플로우를 처리한다.

나. DetNet 데이터 평면 솔루션

DetNet은 플로우를 전송하기 위해서 IP 또는 MPLS를 기반으로 하는 7종의 데이터 평면 솔루션들을 제공하고 있다.

IP 기반 DetNet 데이터 평면은 그림 7과 같이 종단과 DetNet 노드가 DetNet IP를 인식하는 데이터



출처 IETF, "Deterministic networking (DetNet) data plane: MPLS," 2021. 1.

그림 8 DetNet MPLS 데이터 평면

평면을 의미한다.

DetNet IP 솔루션[15]은 IP 및 TCP/UDP 헤더 정보를 기반으로 플로우를 구분하며, DetNet을 위한 인캡슐레이션을 필요로 하지 않는다. DetNet IP 솔루션은 기존 IP 포워딩을 확장한 것으로, 통합된 종단 간 시퀀스 번호를 할당할 수 없어서 서비스 부계층을 통한 종단 간 서비스 보호 기능은 제공할 수 없으며, 포워딩 하위 계층을 통해 지연시간 확정형 플로우에 대한 명시적 경로 설정 및 지연 보장을 위한 자원 예약 기능을 제공한다.

MPLS 기반 DetNet 데이터 평면은 그림 8과 같이 종단과 DetNet 노드가 DetNet MPLS를 인식하는 데이터 평면을 의미한다.

DetNet MPLS 솔루션[16]은 DetNet MPLS 레이블을 기반으로 플로우를 인식하고 서비스 부계층 및 포워딩 부계층에서 DetNet을 위한 MPLS 기반의 인캡슐레이션을 사용한다. DetNet MPLS 솔루션은 기존 MPLS를 확장한 것으로 DetNet MPLS 서비스 부계층은 서비스 레이블(S-Label)을 통해 DetNet 플로우를 구분하고 DetNet 시퀀스 번호를 기반으로 무손실 전달을 위한 서비스 보호 기능을 수행한다. DetNet MPLS의 포워딩 부계층은 포워딩 레이블(F-label)을 통해 DetNet 플로우의 명시적 경로를 설정한다. 또한 개별 DetNet 플로우를 구별하는 서비스 레이블의 특수한 경우로, 더 많은 수의 DetNet 플로우를 지원하기 위해서 개별 플로우

들의 집합체인 애그리게이션(Aggregation) 플로우를 구별하는 애그리게이션 레이블(A-Label)도 제공된다.

DetNet IP over MPLS 솔루션[17]은 DetNet IP 도메인의 서브 네트워크로 DetNet MPLS 도메인이 존재하는 오버레이 구조의 데이터 평면을 의미한다. DetNet IP에서 제공 불가능한 서비스 보호 기능을 DetNet MPLS로 인캡슐레이션하여 DetNet MPLS 도메인을 통해 제공한다.

DetNet MPLS over IP 솔루션[18]은 DetNet MPLS 도메인 내 포워딩 부계층에서 MPLS 터널 대신 IP 터널을 사용하는 데이터 평면을 의미한다. DetNet MPLS의 포워딩 부계층에서 사용하는 MPLS 기반의 인캡슐레이션 대신 IP/UDP 헤더를 기반으로 IP 인캡슐레이션이 적용된다. IP 터널 내 위치하는 트랜짓 노드는 DetNet IP의 트랜짓 노드와 동일하게 DetNet IP 포워딩 플로우에 대한 처리기능을 수행한다.

DetNet IP over TSN 솔루션[19]은 DetNet IP 도메인 내의 하위 네트워크로 TSN이 사용되는 데이터 평면을 의미하고, DetNet MPLS over TSN 솔루션[20]은 DetNet MPLS 도메인 내의 하위 네트워크로 TSN이 사용되는 데이터 평면을 의미한다. TSN over DetNet MPLS 솔루션[21]은 종단이 DetNet MPLS 인식 종단이 아닌 TSN 종단으로 구성된 데이터 평면을 의미한다.

3. 초실감/고정밀 서비스를 위한 DetNet 이슈

DetNet 구조는 5G 네트워크와 같은 대규모 ISP를 포함하여 캠퍼스 네트워크 및 사설 WAN에 적용할 수 있다. 대규모 ISP 망에 초실감/고정밀 서비스를 제공하기 위해서는 DetNet 적용이 필수적이다. 초저지연에 대한 요구는 L2/L3 네트워크 및

소/대규모 네트워크 모두에 존재하는데, 대규모 네트워크에서 DetNet 서비스를 제공하는 것은 새로운 과제를 안고 있다. 이를 해결하기 위해 DetNet 워킹그룹에서는 LDN(Large-scale Deterministic Network)이라는 대규모 네트워크를 통한 지연시간 확정적 포워딩을 탐구하는 새로운 방법이 제안되고 있다[22]. 또한, 대규모 네트워크에서 마이크로버스트 감소 기반의 초저지연 트래픽의 포워딩 방법도 제안되고 있다[23].

TSN 네트워크를 통한 초실감/고정밀 원격제어 서비스 제공을 위해서는 TSN 네트워크가 IPv6 기반의 세그먼트 라우팅을 통해 상호 연결되는 것이 필요하며, 이를 위해 DetNet 세그먼트 라우팅 IPv6 기술(DetNet SRv6)에 대한 표준화 연구가 제안되고 있다[24]. DetNet SRv6은 다중 서브넷 네트워크 계층의 실시간 상호 연결에 중점을 두며, TSN의 기존 메커니즘을 기반으로 라우터, 서버 및 기타 네트워크 장치에 대해 지연시간 스케줄링을 수행하여 도메인 간 및 서브넷 간의 초정밀 네트워크 서비스 보장을 목표로 한다. 이를 통해 원격에 있는 공장의 자동제어와 같은 더 넓은 영역에서 TSN이 DetNet 기술과 함께 배치되는 것이 가능하다.

세그먼트 라우팅 기술에서 지연 최소화를 위한 가장 효과적인 스케줄링 방식은 플로우당 리소스 할당을 포함하는 것이다. SRTSN(Segment Routed Time Sensitive Networking)은 단일 스택 데이터 구조를 사용하는 포워딩 및 스케줄링에 대한 통합 접근 방식으로서, 각 스택 항목은 전달 부분과 스케줄링 부분으로 구성된다. DetNet 워킹그룹에서는 각 패킷이 전송되어야 하는 위치와 시기를 각 라우터에 지정하여 지연시간에 민감한 플로우에 대한 완전한 네트워크 프로그래밍 방법을 구현할 수 있는 SRTSN에 대한 연구가 제안되고 있다[25].

DetNet 플로우에 대한 서비스 보호를 위해

PRF(Packet Replication Function) 및 PEF(Packet Elimination Function) 기능은 분리된 여러 경로를 통해 동일한 패킷을 전송하고, 순서 정보를 사용하여 중복을 제거한다. POF(Packet Ordering Function) 기능은 DetNet 네트워크에서 복제 및 제거 기능이 사용될 때 올바른 패킷 순서를 복원한다. 네트워크에서의 POF 기능은 저가의 사물 인터넷용 센서, 액추에이터 등과 같이 복잡한 패킷 처리기능을 처리할 수 없는 종단이 연결되는 경우에 유용하게 사용될 수 있다. 현재 DetNet 워킹그룹에서는 데이터 플로우의 지연 여분시간이 지정된 최대 지연시간보다 작은 네트워크 시나리오에서 POF 기능을 확장하는 연구도 제안되고 있다[26].

V. ETSI ISG F5G 동향

ETSI의 ISG F5G는 2020년 2월부터 5세대 유선 네트워크(F5G)의 표준화를 진행하고 있다. F5G의 특징은 Fiber to Home 패러다임을 Fiber to Everything으로 전환하며, 증강현실 및 온라인 게임 등의 초저지연 실감 서비스를 제공할 수 있도록 하는 것을 목표로 한다[27]. 이를 위해 ISG F5G에서는 5세대 유선 네트워크의 표준 아이템 7종(네트워크 세대 정의, 유즈 케이스 및 비즈니스 시나리오, 갭 분석과 기술전망, 유선 5G의 구조와 프레임워크, 경험품질, 종단 간 관리, 산업용 PON)을 채택하였다. 비즈니스 측면에서 가장 많이 활용될 것으로 전망되는 14종의 유즈 케이스는 2021년 2월에 릴리즈1(Release 1)으로 발간되었다[28].

1. F5G 유즈 케이스

유즈 케이스(Use Case)들 중 초실감/초정밀 서비스와 관련성이 큰 시간 민감형 ‘실시간 응용을 위

한 주문형 고품질 전송’과 ‘시나리오 기반 광대역’ 서비스에 대한 2종의 유즈 케이스는 다음과 같다.

가. 실시간 응용 주문형 고품질 전송

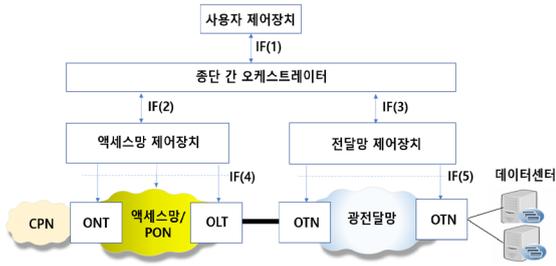
원격 정밀제어, 고실감 확장현실, 원격 의료 등과 같은 실시간 응용에서는 네트워크에서 발생하는 지연과 패킷 손실이 사용자 경험의 저하를 초래한다. F5G는 실시간 응용에서 네트워크 성능 요구사항을 미리 알고 있는 경우, 그리고 실시간 응용이 네트워크 성능 요구사항을 정확히 인식하지 못한 경우에도 실시간 고품질 전송이 주문형으로 가능하도록 고려하고 있다.

나. 시나리오 기반 광대역 서비스

높은 대역폭이 반드시 서비스 품질과 애플리케이션에 대한 좋은 사용자 경험을 의미하지는 않으며, 네트워크 부하가 적은 경우에도 사용자 경험이 만족스럽지 못한 경우가 많다. F5G에서는 게임, 교육, 홈 오피스, PON 전용선 등 4가지 광대역 서비스의 경우에 대해 인공지능을 이용하여 응용 서비스별로 서로 다른 요구사항과 사용자의 행동을 학습하여 차별화하는 시나리오 기반 방식에 대한 논의를 진행하고 있다.

2. 종단 간 초저지연 제어 기술

F5G에서는 2021년 말까지 14종의 유즈 케이스 및 추가로 논의 중인 7종의 유즈 케이스들을 지원할 수 있는 5세대 유선 네트워크의 종단 간 관리 및 제어 요구사항, 네트워크 관리 및 제어 구조, 가입자망/액세스망/애그리게이션 네트워크/코어망 제어장치 그리고 종단 간 오케스트레이터의 세부 기술적 요구사항 및 기능 블록, 각 제어장치 간 인터페이스, 보안 고려사항에 대한 표준 개발을 진행



출처 ETSI, "F5G E2E Mgmt Architecture," 2021. 3.

그림 9 중단 간 초저지연 제어 구조 예

중이다. 각 항목은 현재 개념정립 수준의 논의가 진행 중이며, 5세대 유선 네트워크의 중단 간 지연을 관리하고 제어하기 위한 예는 그림 9에 각 장치의 인터페이스를 중심으로 제시되었다.

사용자 제어장치는 IF(1)을 통해 사용자로부터 받은 대역폭과 지연 요구사항을 오케스트레이터에게 전달한다. 중단 간 오케스트레이터는 IF(2)와 IF(3)을 통해 액세스망과 전달망에 적절한 대역폭과 도메인별 지연시간 목표를 설정하고, IF(4)와 IF(5)를 통해 각 제어장치가 Customer Premises Network(CPN)와 데이터센터 간의 중단 간 경로를 관리 및 제어하여, 사용자가 요청한 대역폭과 지연 관련 품질을 보장할 수 있도록 한다.

중단 간 오케스트레이터는 여러 네트워크 도메인에서의 리소스 최적화, 네트워크 장애 식별 및 위치, 상태 변경 분석 및 장애 예측을 위한 중단 간 리소스 오케스트레이션 기능과 SLA에 따라 서비스 성능을 모니터링하고 서비스 저하 발생 시 필요한 조치를 취하는 서비스 프로비저닝 기능을 수행 하도록 논의가 진행 중이다.

VI. ETSI ISG NIN 동향

산업용 로봇 및 원격 수술의 촉각 피드백 등 실

시간 특성을 요구하는 새로운 서비스들을 지원하기 위해, 현재의 TCP/IP 기반 네트워킹을 대체할 기술이 요구됨에 따라, ETSI는 2020년 3월에 Non-IP Networking(NIN) 기술을 개발할 산업규격그룹(ISG)을 신설하였다. NIN은 초저지연을 제공하는 네트워킹 기술로서, ETSI 차세대 프로토콜(NGP) 산업규격그룹의 ETSI GR NGP 003 V1.1.1 문서[29] 및 ETSI GS NGP 013 V1.1.1 문서[30]에서 정의한 Flexilink 프로토콜을 기반으로 하여, 2021년 3월에 Flexilink 기반의 네트워크 모델을 ETSI GR NIN 003 V1.1.1 문서[31]로 발표하였다.

1. Flexilink 프로토콜

ETSI에서 NIN으로 개발되고 있는 Flexilink 프로토콜은 고정밀 네트워킹 서비스를 지원하는 Guaranteed service 및 최선형 서비스를 지원하는 Basic service를 제공한다. Guaranteed service는 시분할 다중화(TDM) 기반의 패킷 라우팅 기술로서, 중단 간 Flexilink 데이터 플로우에 대해 고정된 지연시간과 고정밀 지연편차를 제공한다. 이러한 특성으로 인해 촉각 인터넷의 촉각 피드백, 산업용 원격 로봇의 제어 등 초저지연이 요구되는 응용서비스들을 지원할 수 있다.

Flexilink 프로토콜을 지원하는 네트워크 노드 간의 각 링크는 Guaranteed service를 제공하기 위해 그림 10과 같이 64바이트 크기의 '슬롯'으로 포맷되

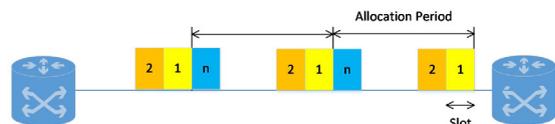


그림 10 Flexilink 프로토콜의 동기식 전송방식[30]

며, 슬롯들은 '할당 기간'으로 그룹화된다.

Guaranteed service를 이용하는 Flexilink 데이터 플로우는 '할당 기간' 내에 하나 이상의 '슬롯'을 할당 받으며, 각 '할당 기간'마다 동일한 위치의 '슬롯'을 이용하여 패킷 데이터를 전송한다. 1Gb/s의 이더넷 전송 링크를 사용한 프로토타입에서 1개의 '할당 기간'은 0.99968ms 동안 지속되며, 1,936개의 '슬롯'이 배정되는데, 이는 초당 1,000번의 '할당 기간'이 반복되는 것을 의미한다. 이 경우 '할당 기간'당 1개의 '슬롯'을 배정받은 데이터 플로우는 초당 1,000개의 패킷을 전송할 수 있다. Guaranteed service에 할당되지 않은 슬롯은 Basic service에 배정되며, 레이블로 식별되는 최선형 패킷 트래픽 전송에 사용된다.

Guaranteed service에 사용되는 Flexilink 패킷은 1바이트의 헤더와 63바이트의 데이터로 구성되며, 패킷 헤더는 홀수 패리티에 1비트, 플래그에 1비트, 페이로드 바이트 수에 6비트를 할당한다. 패킷을 포함하지 않는 슬롯은 플래그 값 1, 페이로드 바이트 수의 값 0을 갖는다. IP 프로토콜에 비해 패킷 헤더의 크기를 크게 줄이고 패킷 포워딩을 단순화하여 지연시간을 최소화하고 있다[30].

Flexilink 데이터 플로우는 네트워크 노드 간의 각 링크에서 Flexilink 패킷이 위치하는 "슬롯"으로 식별되는데, 이를 위해서는 Flexilink 데이터 플로우의 종단 간 경로를 선행적으로 설정해야 한다. 종단 간 Flexilink 데이터 플로우의 경로 설정은 제어 평면에서의 시그널링을 통해서 이루어지며, 네트워크에서 사용하는 주소체계와 네트워크의 구조에 따라 경로를 선택하는 방법이 달라진다. 종단 간 Flexilink 데이터 플로우의 경로 설정은 종단 간 지연시간의 추정치를 제공하며, 데이터 패킷이 수신되는 슬롯들의 분포에 따라 데이터 수신 시간에 대한 jitter의 크기가 정의된다. 초저지연 전송을 위해

서는 노드의 입력 및 출력 링크 간에 고정된 위상 관계가 있어야 하는데, 이를 위해서는 제어 평면에서 SyncInfo() 메시지를 통해 양측이 프레임 타이밍을 위한 공통 참조를 가지도록 협상한다.

Flexilink 프로토콜이 구현된 노드들로 구성된 네트워크는 게이트웨이를 이용하여 서로 다른 프로토콜 간의 변환을 통해 IP 네트워크의 일부를 대체하거나 확장하는 데 사용될 수 있다. IP를 사용하는 단말 장비는 게이트웨이를 통해 설정된 터널을 통해 IP 네트워크에 연결된다.

2. 특징

Flexilink 프로토콜은 증가하는 비디오 트래픽 및 초저지연 고정밀 트래픽을 지원하기 위해 데이터 평면에서 전송되는 패킷 헤더의 크기를 줄이고, 하드웨어 기반의 스위칭을 통해 패킷 라우팅을 수행할 수 있도록 하여 데이터 패킷이 초저지연으로 전달되도록 설계되었다. Flexilink 프로토콜의 Guaranteed service는 ATM 프로토콜과 유사하게 종단 간 전송할 데이터를 64바이트 크기의 패킷에 실어, 종단 간 네트워크 노드 간의 데이터 링크상에서 타임 슬롯 개념을 이용하는 동기식 전송방식을 사용하여 초정밀 네트워킹을 가능하게 한다. ISG NIN의 결과물로서 초정밀 네트워킹을 위해 시분할 다중화(TDM) 기반의 Flexilink 프로토콜이 제안되고 있지만, 제어 시그널링 절차 및 메시지 등은 구체적으로 규격화되지 못하고 개념을 제안하는 상태에 머물러 있다.

Flexilink 프로토콜은 Birmingham City University 등에서 연구용으로 사용되고 있으며, 1Gb/s 이더넷 링크를 사용하는 프로토타입 구현에서는 미디어 패킷의 지연시간이 홉당 5~10 μ s의 성능을 나타내고 있다. 향후 시범망 개발 및 원격 공장 제어 등

초정밀 네트워킹이 요구되는 사설 모바일 네트워크에 시범적으로 적용될 예정이다.

VII. 결론

초정밀 네트워크 기술 개발은 TSN, DetNet, NIN 등 지연시간 확정형 네트워킹 기술들을 광역망으로 확장하는 방향으로 진행되고 있다. 무선 액세스 구간(수십 km 이내)으로 한정된 현재의 5G 초저지연 서비스 제공 범위를 인터넷 규모의 광역 네트워크 범위(수백 km 이상)로 확장하고, 종단 간 전달 지연편차가 확정되지 않는 현재 유선 네트워킹 기술의 한계를 극복하여 고정밀 산업융합 서비스에서 요구되는 1 μ s 이하 수준의 확정 지연편차 보장을 목표로 한다.

광역 초정밀 네트워크 기술은 6G 네트워크를 구성하는 유선 패킷 전달망의 기반 기술로 활용될 예정이다. 5G 네트워크의 기술적 한계를 극복하고 원격 증강현실, 홀로그램 통신, 스마트 공장 원격 제어, 원격 의료 서비스 등 초저지연·고정밀이 요구되는 서비스들을 지원하여, 6G 네트워크의 인프라로서 가상과 현실이 밀접합된 새로운 사회경제 발전의 초석이 될 것으로 기대된다.

약어 정리

ATM	Asynchronous Transfer Mode
ATS	Asynchronous Traffic Shaping
AVB	Audio Video Bridging
CQF	Cyclic Queuing & Forwarding
CM	Clock Master
CNC	Centralized Network Configuration
CPN	Customer Premises Network
CS	Clock Slave
CUC	Centralized User Configuration

DetNet	Deterministic Networking
DSCP	Differentiated Services Code Point
eMBB	enhanced Mobile BroadBand
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
F5G	5th Generation Fixed Network
FRER	Frame Replication/Elimination for Reliability
gPTP	generalized Precision Time Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IP	Internet Protocol
ISG	Industry Specification Group
ISP	Internet Service Provider
ITU	International Telecommunication Union
ITU-T	ITU Telecommunication standardization sector
LDN	Large-scale Deterministic Network
MEC	Multi-access Edge Computing
MPLS	Multi Protocol Label Switching
NBI	North Bound Interface
NIN	Non-IP Networking
NGP	Next Generation Protocol
OTN	Optical Transport Network
PEF	Packet Elimination Function
POF	Packet Ordering Function
PON	Passive Optical Network
PTP	Precision Time Protocol
PRF	Packet Replication Function
PSFP	Per-Stream Filtering & Policing
QoS	Quality of Service
SBI	South Bound Interface

SLA	Service Level Agreement
SRP	Stream Reservation Protocol
TAS	Time-Aware Shaper
TCP	Transmission Control Protocol
TDM	Time Division Multiplexing
TSN	Time-Sensitive Networking
WAN	Wide Area Network

참고문헌

[1] ETRI, "6G Insight-비전과 기술," 2020. 11. 30.

[2] ITU-T FG-NET2030, "Network 2030-A blueprint of technology, applications and market drivers towards the year 2030 and beyond," May 2019.

[3] ITU-T FG-NET2030, "New services and capabilities for network 2030: Description, technical gap and performance target analysis," Oct. 2019.

[4] ITU-T FG-NET2030, "Representative use cases and key network requirements for network 2030," Jan. 2020.

[5] IEEE, "IEEE Std 802.1Q-2018: Bridges and bridged networks," 2018. 5.

[6] IEEE, "IEEE Std 802.1AS-2020: Timing and synchronization for time-sensitive applications," 2020. 1.

[7] IEEE, "Focus on the time-sensitive networking task group," 2017. 5.

[8] 강태규 외, "제4차 산업혁명 시대를 위한 초저지연 네트워킹 기술 동향" 전자통신동향분석, 제34권 제6호, 2019. 12.

[9] IEEE, "IEEE Std 802.1CB-2017: Frame replication and elimination for reliability," 2017. 9.

[10] IEEE, "IEEE Std 802.1Qcc-2018: Stream reservation protocol (SRP) enhancements and performance improvements," 2018. 6.

[11] 강태규, "Time-sensitive networking (TSN) 표준기술 동향분석서," 산업융합네트워크포럼, 2020. 11.

[12] IETF, RFC 8655, "Deterministic networking architecture," 2019. 10.

[13] IETF, draft, "Deterministic networking (DetNet) configuration YANG model," 2021. 2.

[14] IETF, draft, "DetNet Bounded Latency," 2021. 4.

[15] IETF, RFC 8939, "Deterministic networking (DetNet) data plane: IP," 2020. 11.

[16] IETF, RFC 8964, "Deterministic networking (DetNet) data plane: MPLS," 2021. 1.

[17] IETF, draft, "DetNet data plane: IP over MPLS," 2020. 10.

[18] IETF, draft, "DetNet data plane: MPLS over UDP/IP," 2020. 12.

[19] IETF, draft, "DetNet data plane: IP over IEEE 802.1 Time Sensitive Networking (TSN)," 2021. 2.

[20] IETF, draft, "DetNet data plane: MPLS over IEEE 802.1 Time Sensitive Networking (TSN)," 2021. 2.

[21] IETF, draft, "DetNet data plane: IEEE 802.1 Time Sensitive Networking over MPLS," 2021. 2.

[22] IETF, draft, "Large-Scale Deterministic IP Network," 2020. 3.

[23] IETF, draft, "Micro-burst Decreasing in Layer3 Network for Low-Latency Traffic," 2021. 2.

[24] IETF, draft, "DetNet data plane: IEEE 802.1 Time sensitive networking over SRv6," 2021. 4.

[25] IETF, draft, "Segment Routed Time Sensitive Networking," 2021. 2.

[26] IETF, draft, "Deterministic networking (DetNet): packet ordering function," 2021. 4.

[27] ETSI, "Fifth generation fixed network(F5G); F5G generation definition release #1," ETSI GR F5G 001 V.1.1.1, 2020. 12.

[28] ETSI, "Fifth generation fixed network(F5G); F5G Use Cases Release #1," ETSI GR F5G 002 V.1.1.1, 2021. 2.

[29] ETSI, "NGP Next Generation Protocol; Packet Routing Technologies," ETSI GR NGP 003 V1.1.1, 2017. 3.

[30] ETSI, "Next generation protocols (NGP); Flexilink: Efficient deterministic packet forwarding in user plane for NGP; Packet formats and forwarding mechanisms," ETSI GS NGP 013 V1.1.1, 2018. 9.

[31] ETSI, "Non-IP networking (NIN); Flexilink network model," ETSI GR NIN 003 V.1.1.1, 2021. 3.