제4차 산업혁명 시대를 위한 초저지연 네트워킹 기술 동향

Research Trend in Ultra-Low Latency Networking for Fourth Industrial Revolution

강태규 (T.K. Kang, tkkang@etri.re.kr) 초저지연네트워크연구실 책임연구원
강유화 (Y.H. Kang, yhkang@etri.re.kr) 초저지연네트워크연구실 책임연구원
유연철 (Y.C. Ryoo, dbduscjf@etri.re.kr) 초저지연네트워크연구실 연구원
정태식 (T.S. Cheung, cts@etri.re.kr) 초저지연네트워크연구실 책임연구원/실장

ABSTRACT

Ultra-low latency networking is a technology that reduces the end-to-end latency related to transport time-sensitive or mission-critical traffic in a network. As the proliferation of the fourth industrial revolution and 5G mobile communications continues, ultra-low latency networking is emerging as an essential technology for supporting various network applications (such as industrial control, tele-surgery, and unmanned vehicles). In this report, we introduce the ultra-low-latency networking technologies that are in progress, categorized by application area, and examine their up-to-date standard status.

KEYWORDS 초저지연 네트워킹, 시간확정형 네트워킹, Time-Sensitive Networking(TSN), Deterministic Networking(DetNet), MTN(Metro Transport Network)

Ⅰ. 서론

전통적인 네트워크는 사용자에게 연결형 서비스 제공하며, 서비스 대역폭을 확대하고 서비스 품질을 보장하는 방향으로 발전해 왔다. 이러한 네트워크는 특정 노드에 트래픽이 집중되어 트래픽 처리가 느려질 경우 수십 ms 이상의 트래픽 지연이 발생할 수도 있다.

그동안 네트워크 기반 서비스는 사용자인 사람에게 초점이 맞추어져 있었으며, 수십 ms 지연이 서비스에 큰 문제가 되지 않았다. 그러나 M2M 및 IoT 등 사물을 대상으로 하는 서비스의 등장으로 수 ms 지연이 서비스 실현에 걸림돌이되는 상황에 직면하고 있다. 예를 들어, 제4차 산업혁명으로 촉

* DOI: https://doi.org/10.22648/ETRI.2019.J.340610
* 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 정보통신 · 연구개발 사업의 일환으로 수행하였음[2017-0-00067, 안전한 무인이동체를 위한 ICT 기반 기술 개발].

본 저작물은 공공누리 제4유형
출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.
©2019 한국전자통신연구원

발된 사이버 물리 시스템(CPS: Cyber-Physical System) 기반 산업자동화는 실시간 모니터링, 고정밀 원격제어 등 다양한 버티컬 산업 도메인 요구사항을 만족하기 위하여 네트워크 종단(End system) 간 고도의 통신 서비스 가용성(Nine-9's)과 매우 낮은 지연시간(1ms 이하)을 요구하고 있다[1]. 또한, 고신뢰·초저지연 통신(URLLC), 초고속 광대역 통신(eMBB)과 대규모 사물 간 통신(mMTC) 서비스 제공을 특징으로 하는 5G 이동통신은 서비스의 광대역화를 넘어 극단의 통신 성능을 요구하는 미래 신서비스 실현을 위한 혁신을 불러올 것으로 예상하고 있다.

따라서 제4차 산업혁명과 5G 이동통신을 통해 다가올 초연결 지능정보사회에서 사람과 사물, 온라인과 오프라인 등이 상호 유기적으로 연결되어 정보를 교환하고 처리하기 위한 초저지연 네트워킹 기술이 필수적인 네트워크 인프라 기반 기술로 부각되고 있다.

본 고에서는 무선 액세스 구간으로 한정된 5G 이동통신의 고신뢰·초저지연 통신을 보다 더 넓은 영역으로 확장하기 위한 초저지연 네트워킹 기술을 소개하고, 이와 관련된 기술 동향을 살펴보고자 한다.

Ⅱ. 초저지연 네트워킹 기술 동향

일반적으로 지연은 발신자가 트래픽 전송을 시작한 순간부터 수신자가 완전히 트래픽을 수신할 때까지의 전체 종단 간 패킷 지연을 의미한다. '초저지연'이라는 용어는 주로 수 msec 또는 1msec 미만의 매우 짧은 지연시간을 가리키고, 지연편차(또는 지터)는 지연시간의 변화를 가리킨다.

초저지연 애플리케이션은 종종 확정적인(deterministic) 지연을 요구할 수도 있다. 즉, 산업자동화와 같이 트래픽 플로우의 지연편차가 규정된 범위를 초과하지 않아야 한다. 초저지연 애플리케이션이 확률적인 지연을 요구할 수도 있다. 즉, 멀티미디어 스트리밍과 같이 낮은 빈도로 발생하는 지연 위반은 품질에 영향을 주지 않는다. 지연과 지연편차는 초저지연 네트워킹의 주요 서비스 품질 지표로서, 초저지연 애플리케이션마다 다양한 품질 요구사항을 갖는다[2].

1. 근거리 시간확정형 네트워킹 기술

근거리 시간확정형 네트워킹 기술은 비교적 가까운 거리에 위치한 소수의 장치들로 구축되는 근거리망에 초저지연 네트워킹을 제공하며, IEEE TSN(Time-Sensitive Networking)[3]이 대표적인 기술이다.

TSN은 OSI 7계층 참조 모델의 데이터 링크 계층(2계층, L2)에 해당하는 이더넷 브릿징, MAC, PHY 기술을 기반으로 근거리망(자동차, 빌딩, 공장, 5G 프론트홀 등)에 저지연 및 저지연편차, 무손실 등 확정적인 서비스를 제공하기 위한 기능[3]을 명시하고 있다. TSN의 전신인 AVB는 오디오/비디오 응용을 고려하여 비교적 높은 대역폭을 가지는 소수의 플로우(A/V 등, 이하 절에서는 TSN에서 정의한 스트림(stream)이란 용어 사용)가 적용 대상인데 반해, TSN은 다수의 저 대역폭 플로우(제어 계측 등)까지도 고려하고 있다.

가. 시간 동기화

TSN은 네트워크 전체의 정확한 시간 동기화, 즉 모든 네트워크 장치들이 공유하는 공통 시간 참조를 기반으로 한다. 예를 들어, 데이터 스케줄링 시 동기화된 시간을 기반으로 TSN 스트림의 포워딩

및 큐잉을 처리한다.

시간 동기화 기능은 sub-μs 수준의 시간 동기를 제공하는 IEEE 1588-2008(1588v2)의 gPTP (generic Precision Time Protocol)의 프로파일을 사용하는 IEEE 802.1AS-Rev를 통해 수행한다. gPTP는 CM(Clock Master)와 CS(Clock Slave) 간 관련 시간 이벤트 메시지(sync, delay)를 전달하여 네트워크 장치 간 클럭을 동기화한다. 네트워크는 브릿지(bridge) 내 체류 시간(ingress-to-egress 프로세싱, 큐잉 및 전송)과 링크 지연을 반영하기 위하여 피어 지연 메커니즘을 사용한다. 즉, 클럭 계층 구조의 루트에서 GM(Grand Master) 시계를 참조하여 네트워크 내 인접한 브릿지 간 단일 홉 전파 지연을 계산하여 시간을 동기화한다. IEEE 1588은 유럽입자물리연구소(CERN)의 화이트 래빗(white rabbit) 기술을 활용하여 시간 동기를 sub-ns 수준으로 향상시키기 위한 표준 개정(IEEE P1588v3)을 진행하고 있다.

나. 시간확정형 포워딩 및 큐잉

TSN은 기존 IEEE 802.1 브릿지에 시간확정형 포워딩 및 큐잉 기능을 추가하여 네트워크 노드(브릿지)에서의 지연을 확정적으로 보장한다. 이를 통해 각 노드는 동기화된 시간을 기준으로 자신에게 해당하는 순환주기(Cycle)에 TSN 스트림을 처리함으로써 종단 간 전달 지연을 시간확정적으로 제공할 수 있다(그림 1).

시민감 포워딩 및 큐잉 기능은 일반 트래픽의 유무에 관계없이 TSN 스트림을 시간확정적으로 처리하기 위하여 스트림별 필터링 및 폴리싱(IEEE 802.1Qci), 시간인식 쉐이퍼(IEEE 802.1Qbv), 사이클릭 큐잉 및 포워딩(IEEE 802.1Qch), 프레임 프리엠션(IEEE 802.1Qbu, IEEE 802.3br) 방식을 사용한다[4].

스트림별 필터링 및 폴리싱(PSFP: Per-Stream Filtering and Policing)은 인입되는 트래픽에 대한 스트림 ID, 우선순위, 패킷 사이즈 등을 기반으로 스

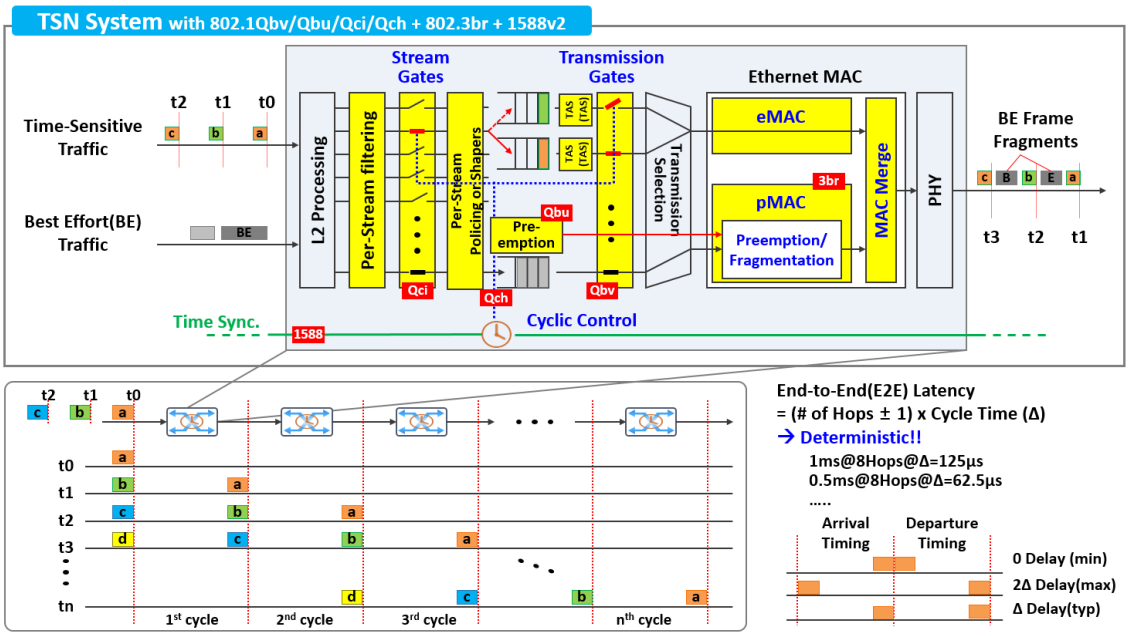


그림 1 TSN 포워딩 및 큐잉 동작

트림 필터를 설정한다. 인입되는 모든 스트림은 스트림 ID에 따라 스트림 필터에 할당되며, 스트림 필터는 와일드카드(*)를 이용하여 동일 우선순위를 가지는 복수의 스트림을 수용할 수도 있다. 그림 1의 스트림 게이트(Stream gate)는 동기화된 시간을 기준으로 게이트 순환주기(Ts), 게이트 상태(C=Close, O=Open) 및 전달 큐 정보 등에 대한 설정에 따라 일정 주기로 큐별 스트림 게이트를 열거나 닫아 스트림을 큐(queue)에 저장하도록 한다.

시간인식 쉐이퍼(TAS: Time-Aware Shaper)는 PSFP를 통해 큐에 저장된 스트림을 동기화된 시간을 기준으로 동작하는 전송 게이트(transmission gate)를 통해 스케줄링한다. 그림 1의 전송 게이트는 순환주기(Tt), 게이트 상태에 따라 일정 주기로 큐별 전송 게이트를 열거나 닫아 스트림을 MAC으로 전달한다. 이때 일반 트래픽 큐에 할당된 게이트는 항상 열어놓아 순환주기 내 TSN 스트림 전송 시간이 남거나 TSN 스트림이 없으면 일반 트래픽이 전송될 수 있도록 한다.

사이클릭 큐잉 및 포워딩(CQF: Cyclic Queuing and Forwarding)은 동일 클래스의 스트림에 2개의 큐를 할당하고 순환주기에 맞추어 번갈아 가며 저장 및 전송할 수 있도록, PSFP의 스트림 게이트와 TAS의 전송 게이트 설정(순환주기, 게이트 상태)을 설정하여 노드에서의 전달 지연시간을 확정적으로 보장하도록 한다. 예를 들어 그림 1에서 첫 번째 큐에 대한 스트림 게이트는 열고 전송 게이트를 닫아 스트림을 큐에 저장함과 동시에, 두 번째 큐에 대한 스트림 게이트는 닫고 전송 게이트를 열어 큐에 있는 다른 스트림을 전송한다.

프레임 프리엠션(Frame Preemption)은 순환주기에서 높은 우선순위의 익스프레스 프레임(Express Frame, TSN 스트림) 송신 시 이전 주기의 낮은 우선순위의 프리엠프터블 프레임(Preemptable Frame, 일반 트래픽)이 송신 중이면 송신을 중단하고 익스프레스 프레임 송신을 완료한 후 프리엠프터블 프레임 송신을 재개할 수 있도록 한다. 즉 프리엠프터블 프레임은 익스프레스 프레임 우선 전송을 위해 분할 및 재조립될 수 있고, 그림 1의 MAC(eMAC, pMAC, MAC Merge) 계층에서 이 과정을 수행한다.

이외에도 동기화된 시간 대신 로컬 시간을 기반으로 스트림별 지정된 적절한 시간(eligible time)에 따라 포워딩 및 큐잉을 수행하는 비동기식 트래픽 쉐이핑(ATS: Asynchronous Traffic Shaping, IEEE P802.1 Qcr) 표준화도 진행하고 있다.

다. 무손실 프레임 전달

TSN은 네트워크 경로상에서 단일 또는 다중 장애 발생 시에도 손실 없이 TSN 스트림을 목적지까지 전달하는 기능을 제공한다. 이 기능은 IEEE 802.1CB FRER(Frame Replication and Elimination for Reliability)을 통해 수행된다.

FRER의 기본 동작을 설명하면 다음과 같다. 프레임의 발신지에서는 특정 스트림에 대해 시퀀스 번호가 포함된 태그(R-Tag)를 추가하고 프레임을 복제하여(replicate) 다수의 네트워크 경로로 송신한다. 중계지에서는 수신한 복제 스트림 중 시퀀스 번호를 기반으로 하나만 선택하고 나머지는 제거하거나(eliminate) 재복제하여 다수의 네트워크 경로로 송신한다. 목적지에서는 수신한 복제 스트림

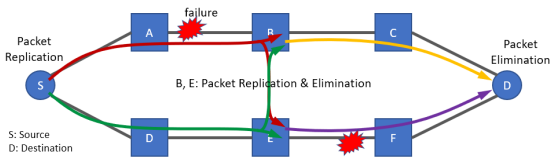


그림 2 802.1CB FRER 동작

중 하나만을 선택하고 나머지는 제거한다. 그림 2에서 보는 바와 같이 FRER은 A-B, E-F 두 구간에 장애가 발생할 경우에도 TSN 스트림을 손실 없이 목적지까지 전달할 수 있다. 일반적인 1+1 보호 절체 방식과 유사하지만 1+1 보호 절체가 네트워크 경로를 선택하는 데 반해 FRER은 패킷을 선택한다. FRER은 다른 네트워크(산업용 외)의 플로우 수용을 위하여 새로운 스트림 식별 기능을 추가하는 표준(IEEE P802.1CBdb)을 진행하고 있다.

라. TSN 자원예약 및 제어관리

TSN을 위한 자원예약 및 제어관리는 프로토콜 및 제어관리 콘트롤러를 통해 가능하며, 분산형, 부분집중형, 중앙집중형의 세 가지 모델을 사용할 수 있다. 분산형 모델은 토커(Talker, 발신지)가 전송하려는 스트림의 스트림 ID, 목적지 주소, VLAN 태그, 트래픽 사양(TSpec: 프레임 주기, 최대 프레임 사이즈, 전송 알고리즘 외) 등으로 구성된 사용자/네트워크 설정 정보를 스트림 예약 프로토콜(SRP: Stream Reservation Protocol, IEEE 802.1Qcc)을 사용하여 중계기(브릿지)를 거쳐 리스너(Listener, 목적지)까지 전달하는 방식을 통해 예약을 요청하고, 리스너는 스트림 ID를 리턴하여 등록하는 방식이다. 부분집중형 모델은 토커, 리스너는 기존 SRP를 사용하여 자원을 예약 및 등록하고, 중계기는 중앙집중 네트워크 콘트롤러(CNC: Centralized Network Configuration)를 통해 자원을 예약한다. 중앙집중형 모델은 중앙집중 사용자 콘트롤러(CUC: Centralized User Configuration)와 CNC를 통해 자원예약 및 제어관리를 수행한다(그림 3). 중앙집중 콘트롤러(CNC/CUC) 기반의 부분집중형 및 중앙집중형 모델은 제어관리 YANG 모델(IEEE 802.1Qcp, P802.1Qcw, P802.1CBcv)을 사용한다.

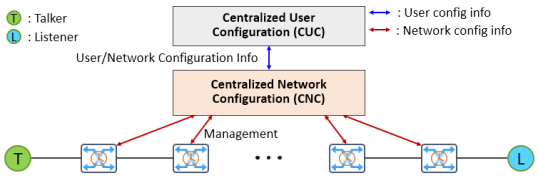


그림 3 802.1Qcc 중앙집중형 제어관리 모델

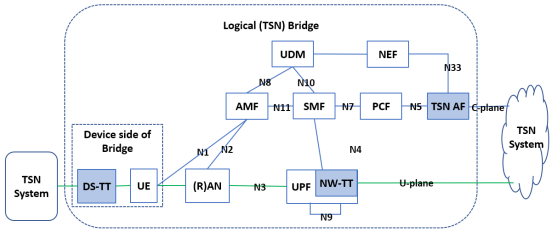
마. TSN 프로파일

TSN은 적용영역별 애플리케이션에 따라 표준 툴셋의 기능, 옵션, 파라미터, 기본값, 프로토콜 및 절차 등을 선별적으로 정의하는 프로파일을 제공한다.

현재 이동통신(5G)망의 프론트홀에 브릿지 기반의 TSN을 적용하기 위한 프로파일 정의를 완료하고(IEEE 802.1CM), eCPRI 인터페이스(v1.2, 2.0) 및 ITU-T G.8262.1, G8273.2 주파수 및 시간 동기화 관련 내용을 추가하는 개정(IEEE P802.1CMde)을 진행 중이다. 또한, 산업용 표준을 개발하는 ISO/IEC와 공동으로 적용 시 가장 파급력이 클 것으로 예상하는 산업자동화에 TSN을 적용하기 위한 프로파일(IEEE P60802), 자동차 내부 네트워크에 TSN을 적용하기 위한 프로파일(IEEE P802.1DG), 이동통신 프론트홀 영역 이외 서비스 프로바이더에 TSN을 제공하기 위한 프로파일(IEEE P802.1DF) 정의 표준화를 진행하고 있다.

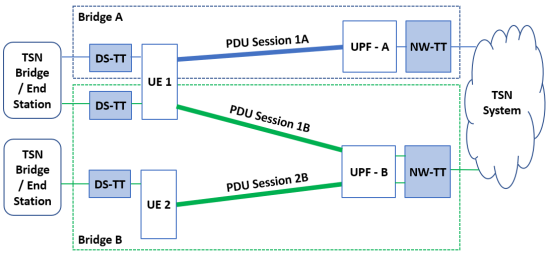
2. 모바일 시간확정형 네트워킹 기술

3GPP Release 16(2020.6.)에서는 시간민감형(확정적) 데이터 통신을 제공하기 위하여, IEEE TSN을 지원하는 5G 시스템 확장기능을 표준화하고 있다. 이는 IEEE 802.1Qcc[5]에서 정의한 시간민감형 통신 서비스를 지원하기 위하여 5G 시스템을 TSN



출처 © 2019. 3GPP™ TSs and TRs are the property of ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDSI, TTA and TTC who jointly own the copyright in them. They are subject to further modifications and are therefore provided to you "as is" for information purposes only. Further use is strictly prohibited.

그림 4 TSN 브릿지로 동작하는 5G 시스템 구조[6]



출처 © 2019. 3GPP™ TSs and TRs are the property of ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDSI, TTA and TTC who jointly own the copyright in them. They are subject to further modifications and are therefore provided to you "as is" for information purposes only. Further use is strictly prohibited.

그림 5 UPF 기반 가상 브릿지[6]

네트워크와 통합해야 하기 때문이다.

그림 4는 시간민감형 통신(TSC: Time Sensitive Communication)을 지원하기 위한 확장된 5G 시스템 구조를 보여준다.

그림 4에서 보는 바와 같이, 5G 시스템이 하나의 TSN 브릿지처럼 동작하여 외부 TSN 네트워크와 통합될 수 있다. 이때 TSN 시스템과 5G 시스템 간 상호동작을 위하여, 5G 시스템은 DS-TT(Device-side TSN translator)와 NW-TT(Network-side TSN translator)와 같은 TSN 변환기 기능을 추가적으로 가진다.

가. IEEE TSN 통합

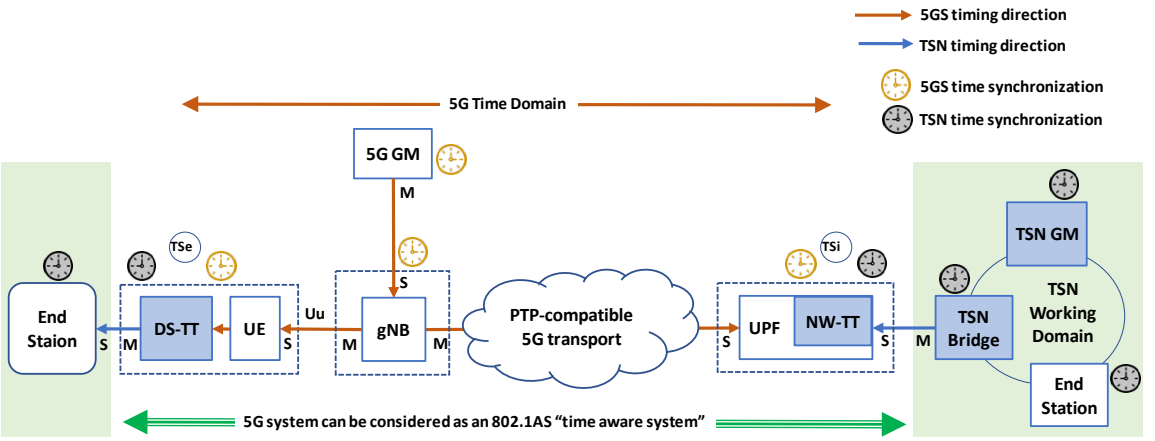
앞서 본 바와 같이, 5G 시스템은 하나 이상의 TSN 브릿지로 동작할 수 있다. 그림 5에서 보면 UPF(User Plane Function)당 하나의 논리 TSN 브릿지로 동작할 수 있으며, 각 논리 TSN 브릿지는 브릿지 ID(UPF ID)를 가진다. 5G 시스템 브릿지는 NW-TT(UPF) 쪽의 포트, DS-TT(UE) 쪽 포트와 UE-UPF 간의 유저 플레인(User Plane) 터널로 구성된다.

5G 가상 브릿지에서 TSN 트래픽 스케줄링을 지원하기 위하여 5G 시스템은 다음의 기능을 필요로 한다.

- TSN 네트워크로 5G 시스템 브릿지 정보(브릿지 ID, 브릿지 지연(delay)[5], 포트당 전달 지연(propagation delay)[5], 5G 시스템 브릿지 토폴로지[7], 트래픽 클래스[8])를 보고
- TSN 네트워크로부터 얻은 5G 시스템 구성 정보(브릿지 ID, 스케줄드(scheduled) 트래픽 구성 정보(egress 포트, 트래픽 클래스/우선순위, ingress 포트), 트래픽 포워딩 정보(목적지 MAC 주소, 트래픽 클래스, VLAN ID, ingress/egress 포트 IDs)[9]를 5G 시스템의 해당 PDU(Packet Data Unit) 세션 내 QoS 플로우 정보로 매핑

5G 시스템과 TSN 네트워크 간에 브릿지 정보와 구성 정보를 서로 전달하는 역할은 TSN AF(Application Function)가 담당한다. 또한, CNC와 TSN AF는 포트 관리 정보를 포함한 브릿지 관리 정보를 서로 주고받으며, 5G 시스템은 TSN AF와 DS-TT/NW-TT 간의 포트 관리 정보를 주고받는다.

TSN 트래픽을 전송하기 위해서는 PDU 세션 내 해당 QoS 프로파일이 필요하므로, TSN 트래픽 클래스와 5G 시스템 QoS 프로파일 간의 매핑 테이블이 구성되어야 한다. TSN AF는 OAM을 통해 미리 설정된 QoS 매핑 테이블을 가지고 있



출처 © 2019. 3GPP™ TSs and TRs are the property of ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDSI, TTA and TTC who jointly own the copyright in them. They are subject to further modifications and are therefore provided to you "as is" for information purposes only. Further use is strictly prohibited.

그림 6 TSN 시간 동기화를 지원하는 IEEE 802.1AS 기반 5G 시스템 모델[6]

으며, PCF(Policy Control Function)는 TSN AF로부터 받은 TSN QoS 정보를 5G 시스템 QoS 프로파일로 매핑하는 5QI 매핑 테이블을 가진다. 따라서 PCF는 TSN AF 요구에 의해 트래픽 클래스에 해당하는 새로운 5G QoS 플로우를 생성할 수 있다. TSN QoS 파라미터들은 적어도 다음의 값을 포함한다.

- 포트당 트래픽 클래스들/우선순위
- 브릿지 지연(independentDelayMax, independentDelayMin, dependentDelayMax, dependentDelayMin)
- 포트당 전달지연(txPropagationDelay)

나. 시간민감형 통신 지원

5G 시스템이 IEEE TSN 네트워크의 브릿지로 동작하여 시간민감형 통신을 지원하려면, 먼저 TSN 시간 동기화 기능을 제공해야 한다. 이를 위해 5G 시스템은 IEEE 802.1AS와 호환되는 TSN 브릿지로 동작하며, 5G 시스템에서 외부 인터페이스를 가지는 TTs(TSN Translators)는 IEEE 802.1AS 기능을 지원한다. 또한 UE, gNB, UPF, NW-TT, DS-TT는 5G GM 클럭으로 동기화된다.

그림 6에서 보면 2개의 동기화 시스템(5G 시스템, TSN 도메인(domain))을 볼 수 있으며, 각각에 사용되는 기술은 다음과 같다.

- 5G 시스템 동기화: 5G RAN(Radio Access Network) 동기화[10]
- TSN 도메인 동기화: IEEE 802.1AS 기반 TSN 네트워크 동기화

두 동기화는 각각 독립적으로 동작하고, gNB만이 5G GM 클럭으로 동기화시킨다. TSN 동기화를

표 1 TSCAI[6]

Assistance information	설명
Flow direction	TSC 플로우(uplink/downlink) 방향
Periodicity	두 버스트(burst) 데이터 간의 시간 주기
Burst arrival time	RAN(downlink) 또는 UE(uplink)에서 버스트 데이터 도착 시간

출처 © 2019. 3GPP™ TSs and TRs are the property of ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDSI, TTA and TTC who jointly own the copyright in them. They are subject to further modifications and are therefore provided to you "as is" for information purposes only. Further use is strictly prohibited.

사용하기 위하여 5G 시스템은 TSN 도메인의 동기화 패킷에 5G 시스템의 DS-TT, NW-TT 간의 체류 시간(residence time)을 계산하여 추가한다. 5G 내부 시스템 클럭을 모든 유저 플레인 노드가 사용할 수 있도록, UPF/NW-TT는 PTP 호환되는 트랜스포트(transport) 네트워크를 통해 UE/DS-TT는 시그널링을 통해 gNB로부터 5G 시스템 내부 클럭을 얻는다. 5G 시스템이 다수의 TSN 클럭 도메인과 연결되어 있는 경우에도 각 도메인에서 전달되는 gPTP 메시지 내 'domainNumber' 값으로 해당 클럭 도메인을 구별할 수 있으므로, 5G 시스템은 하나 이상의 TSN 클럭 도메인을 지원할 수 있다.

5G 시스템에서는 확정적 QoS를 제공하기 위하여, 표 1에서 보는 바와 같은 TSC 트래픽 패턴을 보여주는 TSCAI(TSC Assistance Information)를 정의하고, RAN과 UE에서 각각 다운링크(downlink), 업링크(uplink) 방향으로 사용할 수 있도록 한다. SMF(Session Management Function)는 TSN AF로부터 받은 정보를 기반으로 TSCAI 파라미터값을 설정하여 5G RAN으로 전달한다.

DS-TT, NW-TT에서는 IEEE 802.1Qbv에 정의한 트래픽 스케줄링을 위하여 홀드 & 포워드(hold and forward) 버퍼링 방식을 지원한다. 현재 3GPP 규격에서의 구체적인 홀드 & 포워드 버퍼링 방식은 구현에 따르도록 하고 있다.

5G 시스템과 IEEE TSN의 통합으로 시간민감형 통신 서비스를 지원하고자 3GPP Release 16에서 표준화 작업을 시작하였으며, Release 17에서는 URLLC 서비스를 위해 TSN을 지원하는 5G 시스템의 확장기능을 표준화할 것으로 예상한다. 현재 산업분야에서는 TSN 환경에서 5G 무선 인터페이스로의 확장이 시도되고 있으며, 3GPP 표준규격은 무선 구간뿐만 아니라 단말의 제어가 가능한 5G 시스템을 통한 시간민감형 통신 서비스를 제공하고자 한다.

3. 광역 시간확정형 네트워킹 기술

광역 시간확정형 네트워킹 기술은 명시적 경로 설정, 자원 예약, 서비스 보호를 통해 시간확정형 플로우의 무손실 전달 및 종단 간 최대 지연시간을 보장함과 동시에 비 시간확정형 플로우를 함께 수용하기 위한 네트워크 계층(3계층, L3) 기술이다.

IETF의 DetNet(Deterministic Networking)은 대표적인 광역 시간확정형 네트워킹 기술로서 LAN 기반의 근거리 시간확정형 네트워킹 기술(TSN)이 갖는 공간적 한계를 극복하기 위하여 IP/MPLS 기반의 광역 시간확정형 네트워킹 기술에 대한 표준화를 진행하고 있다[4]. DetNet[11]에서 명시하는 광역의 범위는 캠퍼스 네트워크 또는 사설 WAN과 같은 단일 관리 제어(administrative control) 또는 폐쇄된 관리 제어 그룹 내의 네트워크를 말하며, 인터넷과 같은 대규모 도메인 그룹을 포함하는 것이 아님을 참고하기 바란다.

가. 시간 동기화

DetNet은 종단 간 ms 이하의 시간 동기를 필요로 한다. 일부 시간확정형 포워딩 및 큐잉 기술은 네트워크 전체 노드의 시간 동기화를 기반으로 동작하게 되며, DetNet은 시장의 요구에 따라 다양한 시간 동기화 기술과 프로파일을 수용할 수 있어야 한다[11].

나. 데이터 평면

DetNet의 데이터 평면은 서비스 하위 계층(service sub-layer)과 포워딩 하위 계층(forwarding sub-layer)으로 구성되어 있다. 각 계층은 DetNet 플로우를

위해 제공하는 기능에 따라 구분되어 있으며, 서비스 하위 계층은 시간확정형 플로우를 구분하고, 플로우의 시퀀스 번호를 이용하여 무손실 전달 및 재배열 등의 서비스 보호 기능을 제공한다. DetNet 서비스 보호 기능은 TSN과 동일하게 하나 이상의 경로를 통해 패킷을 복제하여 전달하고, 수신된 패킷의 시퀀스 번호를 통해 중복된 패킷을 삭제하는 방식을 사용한다. 포워딩 하위 계층은 광역 시간확정형 네트워킹 기술의 기본이 되는 시간확정형 플로우에 대한 자원 예약 및 명시적 경로 설정 기능을 제공한다. 자원 예약은 스트림별 필터링 및 폴리싱, 시간인식 쉐이퍼, 사이클릭 큐잉 및 포워딩, 프레임 프리엠션 등의 근거리 시간확정형 네트워킹 기술을 포함하여 DSCP 기반 QoS, 시간확정형 플로우의 대역폭 할당 등 지연 보장[12]을 위한 다양한 모든 기능을 제공한다. 명시적 경로 설정은 네트워크 상태 변화에 따른 경로 재계산 등으로 인해 예약된 시간확정형 플로우의 경로가 변경되지 않도록 유지하고, 상황에 따라 시간확정형 플로우와 비 시간확정형 플로우의 경로를 구분하여 전달할 수 있도록 한다.

DetNet 플로우는 필요로 하는 데이터 평면 계층에 따라 플로우의 종류를 구분할 수 있다. 서비스 하위 계층과 포워딩 하위 계층의 기능이 모두 필요한 서비스 포워딩 플로우, 서비스 하위 계층의 기능만 필요한 서비스 플로우, 포워딩 하위 계층의 기능만 필요한 포워딩 플로우로 구분된다.

DetNet 네트워크는 종단과 DetNet 도메인으로 구성되며, 종단은 DetNet 인식(aware) 종단과 DetNet 비 인식 종단으로 구분되고, DetNet 도메인은 도메인 경계에 위치한 경계(edge) 노드, 도메인 내에 위치한 릴레이(relay) 노드와 전송(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 비 인식 종단이라 한다. DetNet 비 인식 종단이 생성한 플로우를 App 플로우라 하며, App 플로우는 L2 패킷과 IP 패킷이 있다. L2 패킷은 Source MAC Address, Destination MAC Address, PCP, VlanId, EtherType 등의 L2 및 VLAN 헤더 정보를 기반으로 플로우를 구분한다. IP 패킷은 Source IP Address, Destination IP Address, IPv6 Flow Label, DSCP, Protocol, Source Port, Destination Port 등의 IP 및 TCP/UDP 헤더 정보를 기반으로 플로우를 구분한다. 경계 노드는 DetNet 도메인으로 수신된 App 플로우를 DetNet 플로우와 매핑하는 서비스 프록시(proxy) 기능을 수행하고, 릴레이 노드는 경계 노드 또는 다른 릴레이 노드로부터 전달되는 서비스 포워딩 플로우 또는 서비스 플로우를 처리하고, 전송 노드는 포워딩 플로우를 처리한다.

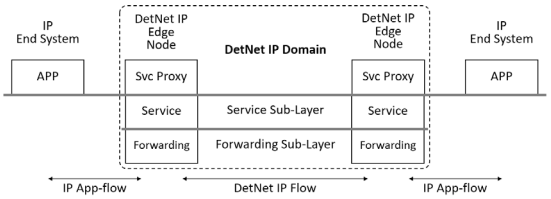


그림 7 DetNet IP 도메인을 갖는 DetNet 비 인식 IP 종단 시스템

DetNet은 IP/MPLS를 기반으로 하는 다양한 데이터 평면 솔루션들을 제공하고 있다. DetNet IP 솔루션[13]은 그림 7과 같이 DetNet 비 인식 또는

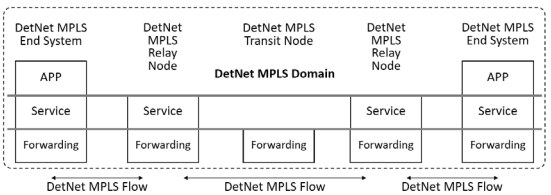


그림 8 DetNet MPLS 네트워크

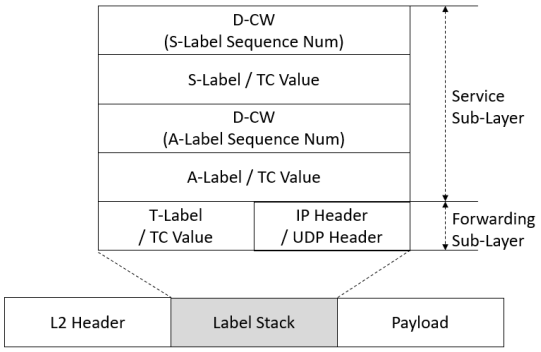


그림 9 DetNet MPLS 및 MPLS over IP 인캡슐레이션

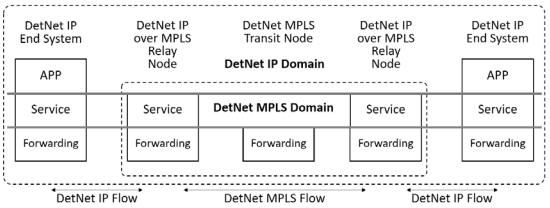


그림 10 DetNet IP over MPLS 네트워크

인식 종단과 DetNet IP 도메인으로 구성된 데이터 평면을 의미한다.

DetNet IP는 IP 및 TCP/UDP 헤더 정보를 기반으로 플로우를 구분하며, DetNet을 위한 인캡슐레이션(encapsulation)을 필요로 하지 않는다. DetNet IP는 기존 IP 포워딩을 확장한 것으로 시퀀스 번호를 할당할 수 없으므로 서비스 하위 계층을 통한 서비스 보호 기능은 제공할 수 없으며, 포워딩 하위 계층을 통해 시간확정형 플로우에 대한 명시적 경로 설정 및 지연 보장을 위한 자원 예약 기능을 제공한다.

DetNet MPLS 솔루션[14]은 그림 8과 같이 DetNet 인식 종단 또는 비 인식 종단, DetNet MPLS 도메인으로 구성된 데이터 평면을 의미한다. DetNet MPLS는 레이블을 기반으로 플로우를 인식하고 서비스 하위 계층 및 포워딩 하위 계층에서 그림 9와 같이 DetNet을 위한 MPLS 기반의 인캡슐레이션을 사용한다.

DetNet MPLS 솔루션은 기존 PW와 MPLS를 확장한 것으로 DetNet MPLS 서비스 하위 계층은 서비스(S) 레이블을 통해 시간확정형 플로우를 구분하고 DetNet 시퀀스 번호를 기반으로 무손실 전달을 위한 서비스 보호 기능을 수행한다. DetNet MPLS는 무손실 전달을 위해 D-CW(DetNet control word) 부분에 시퀀스 번호를 저장하며, 시퀀스 번호는 상황에 따라 App 플로우로부터 수신된 시퀀스 번호를 사용하거나, DetNet 도메인에서 생성할 수 있다. DetNet MPLS의 시퀀스 번호는 TSN과 달리 광역 네트워크의 긴 우회경로를 커버하기 위하여 최대 28비트의 시퀀스 번호를 지원한다. 서비스 하위 계층은 서비스 보호 기능 이외에 통합(aggregation) 레이블을 통해 동일 속성의 시간확정형 플로우를 통합하거나 특정 D-CW 값을 사용하여 OAM 기능을 수행할 수 있다. DetNet MPLS의 포워딩 하위 계층은 포워딩(F) 레이블을 통해 시간확정형 플로우의 명시적 경로를 설정한다. 동일 목적지를 위한 시간확정형 플로우와 비 시간확정형 플로우를 동일 MPLS 터널로 서비스할 경우 동일 포워딩 레이블의 우선순위를 기반으로 지연 보장을 위한 자원 예약 기능을 제공해야 하며, 필요에 따라 동일 목적지를 위한 시간확정형 플로우와 비 시간확정형 플로우를 두 개의 서로 다른 MPLS 터널을 사용해 서비스할 수도 있다.

DetNet IP over MPLS 솔루션[15]은 그림 10과 같이 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. 오버레이가 수행되는 노드에서 수신되는 DetNet IP 플로우는 Det-

Net 비 인식 IP 종단으로부터 수신되는 App 플로우와 동일하므로 DetNet MPLS와 동일한 동작을 수행하며 추가적인 인캡슐레이션 등의 기능은 필요로 하지 않다.

DetNet MPLS over IP 솔루션[16]은 그림 8의 DetNet MPLS 도메인 내 포워딩 하위 계층에서 MPLS 터널 대신 IP 터널을 사용하는 데이터 평면을 의미한다. DetNet MPLS의 포워딩 하위 계층에서 사용하는 MPLS 기반의 인캡슐레이션 대신 그림 9와 같이 IP/UDP 헤더를 기반으로 IP 인캡슐레이션이 적용된다. IP 터널 내 위치하는 전송 노드는 DetNet IP의 전송 노드와 동일하게 DetNet IP 포워딩 플로우에 대한 처리기능을 수행한다. IP 터널이 끝나는 릴레이 또는 경계 노드에서는 IP/UDP 헤더를 사용하여 플로우를 구분하고 해당 IP/UDP 헤더를 디캡슐레이션(decapsulation)하는 기능을 수행한다. IP 터널을 빠져나온 시간확정형 플로우는 DetNet MPLS와 동일하게 서비스 레이블을 기반으로 서비스 보호 기능을 제공하며, 다시 MPLS 터널을 사용하여 플로우를 전달하게 된다.

DetNet IP over TSN 솔루션[17]은 그림 7과 같이 DetNet IP 도메인 내의 하위 네트워크로 TSN이 사용되는 데이터 평면을 의미한다. DetNet MPLS over TSN 솔루션[18]은 그림 8과 같이 DetNet MPLS 도메인 내의 하위 네트워크로 TSN이 사용되는 데이터 평면을 의미한다. TSN over DetNet MPLS 솔루션[19]은 그림 8의 종단이 DetNet MPLS 인식 종단이 아닌 TSN 종단으로 구성된 데이터 평면을 의미한다. 하위 네트워크를 TSN으로 갖는 데이터 평면은 TSN 도메인의 시간확정형 스트림과 DetNet 도메인의 시간확정형 플로우를 상호 인식할 수 있어야 하며 서비스 보호를 위한 시퀀스 번호를 유지할 수 있어야 한다.

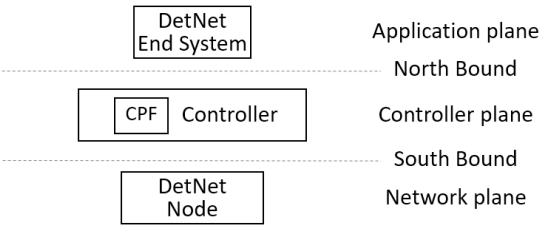


그림 11 DetNet 정보 모델 사용

다. 제어/관리 평면

DetNet 제어/관리 평면은 그림 11과 같이 종단과 DetNet 제어/관리 컨트롤러 간 NBI(North Bound Interface)를 사용하는 애플리케이션 평면과 컨트롤러 내의 컨트롤러 평면, 컨트롤러와 노드 간 SBI(South Bound Interface)를 사용하는 네트워크 평면으로 구분된다.

애플리케이션 평면은 애플리케이션과 서비스를 포함하며, 플로우 정보 모델[20]을 기반으로 플로우 관리 개체(FME: Flow Management Entity)를 사용하여 종단과 운영자 간 서비스 요청을 수행한다.

컨트롤러 평면은 네트워크 토폴로지 정보 및 네트워크 자원, 지연 정보 등을 수집하고, 경로 계산 개체(PCE: Path Computation Entity), 네트워크 관리 개체(NME: Network Management Entity), 분산 컨트롤 평면(Distributed Control Plane) 등의 컨트롤러 평면 기능(CPF: Controller Plane Function)을 사용하여 서비스 보호 및 지연 요구사항을 만족하는 경로를 계산하고 계산된 경로상의 노드로 필요로 하는 플로우 설정을 요청한다.

네트워크 평면은 계층에 관계없이 모든 장비와 프로토콜을 나타내며, 일반적으로 IP 호스트인 종단의 네트워크 인터페이스 카드(NIC: Network Interface Card)와 IP 라우터 및 MPLS 스위치인 DetNet 노드로 구성된다. 설정 YANG 모델[21]을 기

반으로 SBI를 사용하여 컨트롤러 평면 개체와 네트워크 평면의 장치 간 물리적 토폴로지 및 리소스 정보를 전달하고 플로우를 설정한다.

4. 초저지연 메트로 전달망 기술

ITU-T SG15 G.mtn(Interfaces for a metro transport network)은 5G 무선 액세스망 트래픽을 수용하는 메트로급 전달망에 적용 가능한 FlexE(Flex Ethernet) 기반 초저지연 전달 계층망 기술이다[22].

가. OIF FlexE 기술

OIF FlexE 기술은 기존 이더넷과 달리 이더넷 PHY와 무관한 이더넷 MAC 속도를 지원할 수 있는 링크 단위 기술로서, 다수의 PHY를 결합(bonding)하여 높은 속도의 MAC을 구현하거나 서브레이트(sub-rate) 또는 채널화를 통해 PHY보다 낮은 속도의 MAC을 구현할 수 있다.

FlexE 1.0(2016.3.)에서는 100G 이더넷 PHY 지원하고, FlexE 2.0(2018.6.)은 200G 및 400G 이더넷 PHY 지원을 추가하였다. 최근 5G 적용을 위해 50G 이더넷 PHY 지원을 추가하는 FlexE 2.1 표준화를 진행하고 있다.

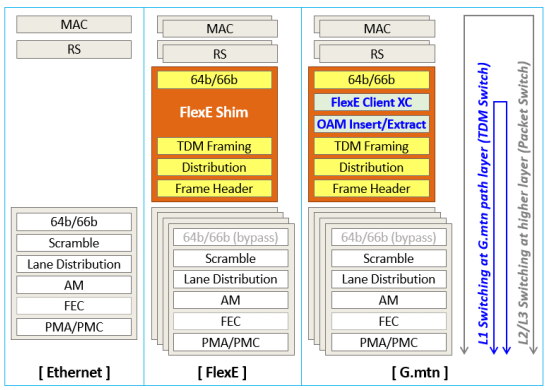


그림 12 이더넷, FlexE 및 G.mtn 구조 비교[22]

FlexE의 클라이언트인 이더넷 MAC은 10Gb/s, 40Gb/s 또는 임의의 m × 25Gb/s 속도가 가능하며, 5Gb/s 또는 25Gb/s 단위로 캘린더 설정에 따라 클라이언트 데이트를 다수의 이더넷 PHY에 분배하여 송수신한다.

나. ITU-T SG15 G.mtn 기술

G.mtn은 IEEE 802.3 이더넷 프레임의 인코딩 규칙을 따르는 64B/66B 블록 형태로 클라이언트 신호를 전달한다. G.mtn은 FlexE 계층에서의 연결성과 경로 유지/관리를 위한 OAM 및 보호절체 기능을 제공하는 경로 계층과 FlexE 기반의 섹션 계층으로 정의된다.

G.mtn 경로 계층의 클라이언트 신호는 5Gb/s 단위로 이더넷 PHY에 매핑되어 전송되며 기존 FlexE와 달리 n × 5Gb/s 단위의 임의 클라이언트 속도를 지원한다. G.mtn은 경로 계층, 즉 FlexE 계층에서의 회선 스위칭을 통해 기존 패킷 스위칭보다 적은 지연시간 및 지연 편차 성능을 제공함으로써 기존 패킷 전달망의 장점을 유지하면서도 5G의 초고신뢰 저지연 통신 서비스 요구사항을 만족하고, 서로 다른 클라이언트 간 트래픽 전송 간섭을 차단하여 전달망 계층에서 5G의 슬라이싱 요구사항을 만족할 수 있도록 한다.

5G를 위한 전달망 기술로서 FlexE 기술을 확장하

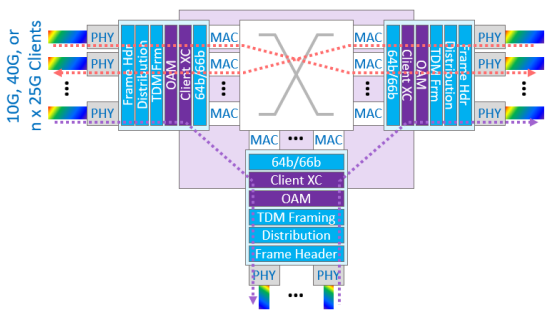


그림 13 G.mtn 경로 계층 스위칭 개념

고자 하는 시도는 2017년 차이나 모바일, ZTE, 파이버홈 등 중국의 통신 사업자와 전송 산업체 제안으로 시작, 이후 SPN(Slicing Packet Network)이라는 이름으로 화웨이, 에릭슨 등 글로벌 전송 산업체 외에 브로드콤, 마이크로세미 등 칩 벤더들의 참여를 통해 보다 구체화되었다. 중국이라는 거대 시장을 두고 다수의지지 세력을 확보한 중국 주도의 SPN 기술은 이더넷 PHY와 MAC 간의 속도 연관성을 제거하여 PHY 기술의 발전과 무관하게 수요에 맞는 다양한 저속 또는 고속의 MAC 속도를 제공하는 것을 주요 목적으로 하는 FlexE 기술의 취지에 맞지 않는다는 미국 노키아의 반대 입장으로 인해 계속 저지되었으나, 2018년 G.mtn이라는 신규 표준화 추진 항목으로 채택되었다.

G.mtn 기술은 기존 이더넷 표준과 FlexE 표준을 그대로 유지하는 것을 전제로 신규 표준화 항목으로 채택되었다. 따라서 기존의 64B/66B 코드 블록 전송 체계를 유지하면서 일부 가용한 자원을 이용하여 경로 및 섹션 계층의 OAM이나 보호절체 등 계층망으로서 필요한 기능들을 제공할 방안을 도출하는 것이 기술적인 이슈가 될 것으로 예상된다. 또한, 이미 5G를 위한 전달망 기술로서 요구사항들을 만족할 수 있는 ITU-T OTN이나 IEEE TSN 또는 IETF DetNet과 비교하여 어떠한 기술적 우월성을 가질 수 있는지에 대한 의문도 지속적으로 제기될 것으로 예상된다.

Ⅲ. 결론

본 고에서는 제4차 산업혁명 시대를 지원하기 위하여 네트워크 적용영역별(또는 계층별)로 논의가 진행 중인 초저지연 네트워킹 기술들에 대해 살펴보았다. IEEE 802 TSN, 3GPP TSN over 5G, IETF DetNet, ITU-T G.mtn 등 초저지연 네트워킹 기술은 기존 패킷 기술과는 다른 다소 복잡한 메커니즘을 필요로 한다. TSN을 제외하고는 대부분 세부 기술 표준화가 진행 중인 단계로 아직도 논의할 이슈들이 많이 남은 상황이다. 하지만 초저지연 네트워킹 기술이 제4차 산업혁명 시대를 견인하는 산업융합 네트워크 구축과 이를 통한 혁신적인 서비스 제공에 필수적인 기반 기술이 될 것이라는 것에는 의심할 여지가 없을 것으로 예상된다.

용어해설

시간확정형 네트워킹 사용자의 시간민감형(멀티미디어) 또는 임무중요형(제어 계측) 트래픽을 발신지에서 목적지까지 일정하게 짧은 시간에 전달할 수 있는 네트워크 기술을 총칭

약어 정리

ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
AF	Application Function
ATS	Asynchronous Traffic Shaping
AVB	Audio/Video Bridging
CNC	Centralized Network Configuration
CQF	Cyclic Queuing and Forwarding
CUC	Centralized User Configuration
D-CW	DetNet Control Word
DetNet	Deterministic Networking
DSCP	Differentiated Service Code Point
DS-TT	Device-Side TSN Translator
eCPRI	enhanced Common Public Radio Interface
eMAC	express MAC
eMBB	enhanced Mobile Broadband
FlexE	Flex Ethernet
FRER	Frame Replication & Elimination for Reliability

GM	Grand Master
HFT	High Frequency Trading
IoT	Internet of Things
M2M	Machine-to-Machine
MAC	Media Access Control
mMTC	massive Machine Type Communications
MPLS	Multi Protocol Label Switching
NBI	North Bound Interface
NW-TT	Network-side TSN Translator
OAM	Operations, Administration and Maintenance
OIF	Optical Internetworking Forum
OPC	Open Platform Communications
OTN	Optical Transport Network
PCF	Policy Control Function
PDU	Packet Data Unit
pMAC	preemptable MAC
PSFP	Per-Stream Filtering and Policing
PTP	Precision Time Protocol
PW	Pseudo-Wire
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
SBI	South Bound Interface
SMF	Session Management Function
SPN	Slicing Packet Network
SRP	Stream Reservation Protocol
TAS	Time-Aware Shaper
TSC	Time Sensitive Communication
TSN	Time-Sensitive Networking
UE	User Equipment
UPF	User Plane Function
URLLC	Ultra-Reliable Low Latency Communications
VLAN	Virtual Local Area Network

참고문헌

[1] 3GPP TS 22.261 V16.7.0, "Service requirements for 5G system (Rel-16)," 2019.

[2] Ahmed Nasrallah et al., "Ultra-Low Latency (ULL) Networks: The IEEE TSN and IETF DetNet Standards and Related 5G ULL Research," arXiv:1803.07673, 2019.

[3] Janos Farkas et al., "Time-Sensitive Networks Standards," IEEE Comm. Magazine, June 2018, pp. 20-68.

[4] 유연철 외, "초저지연 인프라 기술," 전자통신동향분석 제 32권 1호, 2017, pp. 13-24.

[5] IEEE Std 802.1Qcc-2018, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Bridges and Bridged Networks Amendment 31: Stream Reservation Protocol (SRP) Enhancements and Performance Improvements," 2018.

[6] 3GPP TS 23.501, "System Architecture for the 5G System; Stage 2," 2019.

[7] IEEE Std 802.1AB-2016, "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks-Station and Media Access Control Connectivity Discovery," 2016.

[8] IEEE Std 802.1Q-2014, "Standard for Local and metropolitan area networks-Bridges and Bridged Networks," 2014.

[9] IEEE Std 802.1Qbv-2015, "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks-Bridges and Bridged Networks-Amendment 25: Enhancements for Scheduled Traffic," 2015.

[10] 3GPP TS 38.331, "NR; Radio Resource Control (RRC); Protocol specification," 2019.

[11] IETF, draft-ietf-detnet-architecture-13, "Deterministic Networking Architecture," 2019.5.

[12] IETF, draft-ietf-detnet-bounded-latency-00, "DetNet Bounded Latency," 2019.7.

[13] IETF, draft-ietf-detnet-ip-01, "DetNet Data Plane: IP," 2019.7.

[14] IETF, draft-ietf-detnet-mpls-01, "DetNet Data Plane: MPLS," 2019.7.

[15] IETF, draft-ietf-detnet-ip-over-mpls-01, "DetNet Data Plane: IP over MPLS," 2019.7.

[16] IETF, draft-ietf-detnet-mpls-over-udp-ip-01, "DetNet Data Plane: MPLS over UDP/IP," 2019.7.

[17] IETF, draft-ietf-detnet-ip-over-tsn-00, "DetNet Data Plane: IP over IEEE 802.1 Time Sensitive Networking (TSN)," 2019.5.

[18] IETF, draft-ietf-detnet-mpls-over-tsn-00, "DetNet Data Plane: MPLS over IEEE 802.1 Time Sensitive Networking (TSN)," 2019.5.

[19] IETF, draft-ietf-detnet-tsn-vpn-over-mpls-00, "DetNet Data

Plane: IEEE 802.1 Time Sensitive Networking over MPLS," 2019.5.

[20] IETF, draft-ietf-detnet-flow-information-model-05, "DetNet Flow Information Model," 2019.09.

[21] IETF, draft-ietf-detnet-yang-03, "Deterministic Networking (DetNet) Configuration YANG Model," 2019.7.

[22] 정태식 외, "5G 이동통신 트래픽 지원 FlexE 기반 전달망 기술 표준화 시작," TTA ICT Standard Weekly, 제907호, 2019.