시간 제어 네트워크 기술 표준화 동향

류정동 _ 광전송 프로젝트그룹(PG201)의장, ETRI 네트워크연구본부 전문위원
정태식 _ ETRI 네트워크연구본부 PL

1. 머리말

시간 제어 네트워크(Time Controlled Network) 기술은 일반 트래픽이 혼재된 패킷 네트워크에서 실시간 시민감형 통신 및 원격 산업 공정 제어 계측 등을 위하여 패킷 전달 지연 시간을 확정할 수 있는 통신 인프라 구축 기술이다. 이 기술은 기존의 초저지연 정보 전달 목표를 넘어 패킷 전달 지연 시간의 확정적 보장을 목표로 한다.

시간 제어 네트워크 기술은 프로페셔널 오디오와 비디오, 전기 유틸리티, 빌딩 자동화 시스템, 시간 슬롯 채널 호핑(TSCH, Time Slotted Channel Hopping)과 같은 확정형 무선 통신망의 유선 연결 및 통합, 이동통신 지원 유선 전달망, 공장 자동화를 위한 기계 간 통신, 산업 공정 감시 및 제어, 사설 블록체인, 네트워크 슬라이싱 등의 분야에서 사용될 것으로 기대된다. 국제 표준화는 IEEE 802.1 Time-Sensitive Networking(TSN) Task Group (TG)과 IETF Deterministic Networking(DetNet) Working Group(WG)에서 각각 이더넷 계층과 IP/MPLS 계층을 대상으로 진행되고 있다.

2. 시간 제어 네트워크 기술 표준화 동향

2.1 IEEE 802.1 TSN 표준화 동향

IEEE 802.1 TSN TG에서 표준화 진행 중인 TSN 기술은 기존의 프로페셔널 오디오/비디오 전달 기술인 Audio Video Bridging(AVB) 기술을 확장하여, 다양한 목적에 특화된 산업용 네트워크를 이더넷 기반의 범용 인터페이스로 통일하고 기존 산업용 네트워크의 요구사항을 만족할 수 있는 확정된 저지연과 무손실 특성을 갖춘 이더넷 계층의 시간 제어 네트워크 기술이다.

IEEE 802.1 TSN TG에서 다루는 이더넷 계층의 시간 제어 네트워크 관련 표준 문서는 [그림 1]과 같이 저지연과 확정지연을 위한 시간 확정형 패킷 포워딩, 무손실 보호절체, 네트워크 노드 간 고정밀 시간 동기, 시간 정보 기반 네트워크 제어 및 관리 등 주요 기술별로 분류할 수 있다.

2.1.1 시간 확정형 이더넷 패킷 포워딩 기술 표준

기존 이더넷 패킷 포워딩은 이더넷 헤더에 포함된 3비트의 우선순위 정보를 이용하여 상위 우선순위

[그림 1] IEEE 802.1 TSN TG 이더넷 계층의 시간 제어 네트워크 기술 표준

패킷이 없는 경우에만 하위 우선순위 패킷을 전송하는 엄격 우선순위(Strict Priority) 기반으로 동작하며, 대역폭 보장이 필요한 AVB 트래픽을 위하여 크레딧 기반 쉐이퍼(Credit-Based Shaper)가 2009년 제정된 IEEE 802.1Qav 문서에 정의되었다.

IEEE 802.1Qbv에 정의된 시간 인지 쉐이퍼(Time-Aware Shaper)는 트래픽이 엄격 우선순위 또는 크레딧 기반 쉐이퍼에 의해 처리된 이후에 적용된다. 시간 인지 쉐이퍼는 일정하게 반복되는 시간 사이클을 정하고 하나의 사이클을 여러 개의 시간 조각(time slice)으로 나누어 각 시간 조각 동안 특정 트래픽 등급의 전송 게이트를 열거나 닫아 트래픽 등급에 따라 전송 시간을 할당한다. 이 기술은 각 네트워크 노드에서 게이트를 이용한 전송 타이밍 제어를 통해 보다 완벽한 지연 보장이 가능한 장점이 있으나 노드 간 게이트 제어 타이밍 일치를 위하여 정밀한 시간 동기가 필요하다.

이더넷 기술은 인터페이스가 전송매체로 패킷 전송을 시작하면 해당 패킷의 전송을 완료할 때까지 우선순위에 상관없이 다른 패킷의 전송을 시작할 수 없다. 이로 인해 발생하는 지연 문제를 해결하기 위하여 IEEE 802.1Qbv는 높은 트래픽 등급의 패킷이 전송되어야 하는 시간 조각 앞에 가드 밴드(Guard Band)를 설정하여 가드 밴드 내에 전송을 완료할 수 없는 패킷은 전송을 시작하지 못하도록 한다. 이는 낮은 트래픽 등급의 패킷 크기가 클수록 전송을 시

작하지 못할 확률이 커지는 또 다른 문제를 야기한다. 이를 개선하기 위하여 IEEE 802.1Qbu와 IEEE 802.3br에서는 프레임 선취(preemption) 기능을 정의하고 있다. 프레임 선취는 낮은 트래픽 등급의 패킷을 조각내어 송신하고 수신된 조각들을 조합하여 원래의 이더넷 프레임(패킷)을 복원하는 기능으로 높은 트래픽 등급 패킷의 전송을 지연시키지 않으면서 낮은 트래픽 등급의 패킷의 전송 효율도 높일 수 있다.

IEEE 802.1Qch에 정의된 순환 큐잉과 포워딩(Cyclic Queuing and Forwarding)은 입력되는 패킷을 시간 주기에 따라 두 개의 큐에 번갈아 입력하고 각 큐의 전송 게이트를 열거나 닫는 동작을 주기에 맞춰 번갈아 하여 노드당 지연 값을 주기와 일치시켜 노드 내에서 항상 동일한 지연을 보장하는 기술이다. 이 방식 역시 IEEE 802.1Qbv 기술을 사용하므로 노드 간 정밀한 시간 동기가 요구된다.

한편, 노드 간 시간 동기가 필요없는 시간 확정형 패킷 포워딩 방식으로서 비동기식 트래픽 쉐이핑(Asynchronous Traffic Shaping)에 대한 표준화 작업(P802.1Qcr)도 진행 중이다. 이 방식은 로컬 타임스탬프 기반의 토큰 버킷 알고리즘을 사용하여 스트림별 쉐이핑을 수행함으로써 대역폭 보장과 지연 시간 확정을 가능하게 한다.

2.1.2 무손실 보호절체 기술 표준

전기 유틸리티 제어 등 실시간 원격제어의 정밀도 향상을 위해서는 단말 간 매우 낮은 패킷 전달 지연 시간뿐만 아니라 네트워크 장애시 패킷 손실 최소화가 요구된다. 기존의 네크워크 보호절체 기술이 제공하는 장애시 50ms 이하의 절체 성능을 획기적으로 개선하기 위해 프레임 복제 전송 및 수신단에서의 중복 패킷 삭제를 통한 무손실 보호절체 방식이 2017년 IEEE 802.1CB 표준으로 제정되었다. IEEE 802.1CB에 정의된 FRER(Frame Replication and Elimination for Reliability)은 기존 산업용 네트워크 표준인 IEC 62439-3에서 정의된 HSR(High-availability Seamless Redundancy)과 동일하다. 한편, IEEE 802.1CB 표준은 무손실 보호절체 외에 IEEE 802.1Q 브리지에서의 스트림 구분 기능을 정의하고 있는데, 이를 개선하기 위한 표준화 작업(P802.1CBdb)이 진행 중이다.

2.1.3 타이밍 동기 기술 표준

프로페셔널 오디오·비디오 등과 같이 다수의 단말들로부터 수신한 스트림들을 정확한 타이밍에 처리해야 하는 시민감 응용들에 있어서 단말간 고정밀 시간 동기는 매우 중요하다. 대표적인 네트워크 기반 시간 동기 표준인 IEEE 1588-2018에서 정의된 PTP 버전 2를 AVB 망 적용을 위해 프로파일화 한 IEEE 802.1AS 표준이 2011년에 제정되었고, 이를 TSN을 위해 개선하는 표준화 작업(P802.1AS-Rev)이 진행 중이다. P802.1AS-Rev은 기존 표준보다 안정된 시간 동기 동작과 동기 성능 개선을 위하여 기존 프로파일에서 제외되었던 그랜드마스터(grandmaster) 이중화 기능, 복수의 시간 동기 도메인 지원, 보다 빠른 동기 메시지 교환을 위한 원스텝(one-step) 시간 동기 등이 추가된다. 2008년에 제정된 IEEE 1588 표준에 대한 개정 작업(P1588)도 진행 중인데, 기존 표준의 전반적인 보완 외에 10^{-9}초 이하의 초고정밀 시간 동기 방식이 추가된 것이 특징이다.

2.1.4 제어 및 관리 기술 표준

TSN 경로 제어와 대역폭과 스트림 예약, 타이밍 동기와 스케줄링을 위한 제어 파라미터 등을 제공하기 위해 ISIS(Intermediate System to Intermediate System) 프로토콜을 확장하는 IEEE 802.1Qca 표준

이 2015년 제정되었고, 기존보다 많은 수의 스트림을 지원하고 설정 가능한 스트림 예약, 3계층(L3) 스트리밍 지원 등을 제공하기 위해 스트림 예약 프로토콜(SRP, Stream Reservation Protocol)을 개선하는 IEEE 802.1Qcc 표준이 2018년 제정되었다. 현재는 단대단 링크에서 어느 한쪽의 등록 데이터베이스를 다른 쪽으로 복제하고 데이터베이스 내용 일부가 변경될 경우 이를 복제하기 위한 링크 로컬 등록 프로토콜(LRP, Link-local Registration Protocol) 표준화 작업(P802.1CS)과 LRP를 이용하여 정밀한 지연 계산을 지원하고 FRER 기능을 요구하는 스트림의 예약을 지원하는 자원 할당 프로토콜(RAP, Resoure Allocation Protocol) 표준화 작업(P802.Qdd)이 진행 중이다. 한편, 관리 평면 측면에서는 스케줄된 트래픽, 프레임 선취, 스트림별 필터링 및 폴리싱, FRER 등의 메커니즘을 위한 YANG 데이터 모델 정의 작업이 진행되고 있다.

2.1.5 기타 관련 표준

이동통신망을 위한 프론트홀 구간에 TSN을 적용하기 위한 프로파일 표준인 IEEE 802.1CM을 2018년 제정하였다. 현재는 공장 자동화 분야의 산업 네트워크에 TSN을 적용하기 위한 프로파일 표준화 작업 (P60802)을 IEC와 공동으로 추진하고 있으며, 완료 시에는 IEC와 IEEE 공동 표준인 IEC/IEEE 60802로 제정될 예정이다.

2.2 IETF DetNet 표준화 동향

IETF DetNet WG에서 진행 중인 확정형 네트워킹(DetNet, Deterministic Networking) 기술은 이더넷 TSN 기술의 적용 범위를 확장하여 IP 및 MPLS 기반 네트워크와 통합하는 기술이다. 현재 표준화 진행 중인 DetNet 기술이 적용되는 네트워크의 규모는 전체 인터넷이 아니고 단일 관리 도메인 네트워크를 목표로 하고 있다.

IETF DetNet WG에서 다루는 IP/MPLS 계층의 시간 제어 네트워크 관련 표준 문서는 〈표 1〉과 같이 유스케이스 및 문제 서술 분야, 구조 및 데이터 평면 분야, QoS(Quality of Service) 와 OAM(Operations, Administration and Maintenance) 분야, 제어 및 관리 평면 분야, 보안 및 기타 분야로 분류할 수 있다. DetNet 문서 중 RFC로 표준화 완료된 문서는 없으며, 모든 문서는 현재 표준화가 진행 중이다. 현재 'Deterministic Networking Use Cases' 문서와 'Deterministic Networking Problem Statement' 문서와 'Deterministic Networking Architecture' 문서는 IESG 승인 절차를 밟고 있으며, 그 외 모든 문서는 초안 개발 단계이다.

2.2.1 유스케이스 및 문제 서술 표준

'DetNet Use Cases' 문서에는 대역폭 보장과 확정 지연이 필요한 다양한 산업 분야로부터 도출된 DetNet 기술의 활용 예를 기술하고 각 분야에서 현재 사용되는 솔루션과 DetNet 기술로 인한 잠재적인 개선점을 기술하고 있다. 아울러 모든 활용 분야에서 공통적으로 가지는 속성을 도출하여 열거하고 있다.

'DetNet Problem Statement' 문서는 다양한 산업 분야에서 제기된 DetNet 기술의 필요성과 함께, 토폴로지, 플로우 특성화, 중앙 집중식 경로 계산과 설정, 분산식 경로 설정, 복제된 프레임 포맷 등의 측면에서 DetNet 기술이 풀어야 할 문제점을 서술하고 있다.

2.2.2 구조 및 데이터 평면 표준

'DetNet Architecture' 문서는 DetNet의 전반적인 구조를 기술한다. IP 또는 MPLS 기반의 3계층에서 시간-확정형 네트워킹을 제공하는 DetNet의 데

<표 1> IETF DetNet WG IP/MPLS 계층의 시간 제어 네트워크 기술 표준

Area of Definition	Draft	Title of Draft
Use Case & Problem Statement	draft-ietf-detnet-use-cases	Deterministic Networking Use Cases
	draft-ietf-detnet-problem-statement	Deterministic Networking Problem Statement
Architecture & Data Plane	draft-ietf-detnet-architecture	Deterministic Networking Architecture
	draft-ietf-detnet-dp-sol-mpls	DetNet MPLS Data Plane Encapsulation
	draft-ietf-detnet-dp-sol-ip	DetNet IP Data Plane Encapsulation
QoS & OAM	draft-finn-detnet-bounded-latency	DetNet Bounded Latency
	draft-chen-detnet-sr-based-bounded-latency	Segment Routing (SR) Based Bounded Latency
	draft-xiong-detnet-qos-policy	DetNet QoS Policy
	draft-mirsky-detnet-oam	Operations, Administration and Maintenance (OAM) for Deterministic Networks (DetNet)
	draft-chen-detnet-loss-delay	DetNet Packet Loss and Delay Performance Measurement
Control & Management Plane	draft-ietf-detnet-flow-information-model	DetNet Flow Information Model
	draft-ietf-detnet-yang	Deterministic Networking (DetNet) Configuration YANG Model
	draft-geng-detnet-info-distribution	IGP-TE Extensions for DetNet Information Distribution
	draft-xiong-detnet-qos-yang	DetNet QoS Yang
Security & Etc.	draft-ietf-detnet-security	Deterministic Networking (DetNet) Security Considerations
	draft-jiang-detnet-ring	Deterministic Networking Application in Ring Topologies
	draft-qiang-detnet-large-scale-detnet	Large-Scale Deterministic Network

이터 평면은 버퍼, 대역폭 등 네트워크 자원 할당 및 경로 지정을 담당하는 포워딩 부계층과 DetNet 플로우에 대한 무손실 보호절체를 담당하는 서비스 부계층으로 정의된다. 데이터 평면의 구체적인 기술은 IP와 MPLS 각각에 대해 별도의 문서로 작업 중이다. DetNet에서의 무손실 보호절체 방식은 TSN의 FRER과 기본적인 동작은 동일하나 TSN보다 넓은 범위의 광역망 적용을 고려하여 중복 패킷 삭제를 위해 사용되는 시퀀스 번호 필드가 FRER의 16비트보다 큰 28비트로 확장되었다. 또한, DetNet 무손실 보호절체 방식은 FRER과 달리 패킷 복제 기능(PRF, Packet Replication Function)과 중복 패킷 삭제 기능(PEF, Packet Elimination Function) 외에 패킷 순서 유지 기능(POF, Packet Ordering Function)도 추가로 정의함으로써 패킷 손실 외에 패킷 순서 오류까지 방지한다.

2.2.3 QoS 및 OAM 표준

DetNet의 QoS는 TSN과 동일하게 한정된 지연과 혼잡(congestion)에 의한 손실 방지를 목적으로 하며, 이를 위해 사용되는 QoS 메커니즘도 TSN을 따르고 있다. 'DetNet Bounded Latency' 문서에서는 TSN의 QoS 메커니즘을 DetNet 관점에서 설명하고 있으며, 단대단 지연 계산 모델을 제시하고 최대 지연 산출을 위한 계산 방법도 제시되고 있으나, 제시된 계산 방법이 유효한 경우가 제한적이어서 실제 경로 설정 및 망 자원 관리 측면에서 절대적인 기준으로는 미흡하나 참고하여 망 운영에 활용할 수 있다.

DetNet 네트워크의 연결성 감시, 장애 알림, 패킷 복제·제거·순서 유지 기능의 동작 지점 인식 및 시험, 성능 감시 및 측정 등을 위해서 필요한 OAM 기능에 대한 요구사항과 OAM 정보 전달을 위한 패킷 포맷이 제시된 상황이다.

DetNet 플로우 경로의 패킷 손실률과 단대단 지연 및 지연 편차 측정 방법도 제시되어 있으나, 현재 요구사항에 기술된 모든 OAM 기능에 대한 솔루션이 제시된 상황이 아니어서 향후 이 분야에서 새로운 표준 초안들의 제안이 예상된다.

2.2.4 제어 및 관리 평면 표준

DetNet 제어 평면 문서로는 OSPF-TE(Open Shortest Path First - Traffic Engineering)와 ISIS-TE를 확장하여 패킷 프로세싱 지연과 패킷 복제 및 제거, 순서 유지 기능 유무 등의 DetNet 노드 속성과 최대 예약 가능 대역폭과 패킷 복제 및 제거, 순서 유지 기능 유무, QoS 관련 파라미터 등의 DetNet 링크 속성을 링크 상태 PDU(Protocol Data Unit)에 담는 방안을 제안한 초안이 있다.

DetNet 관리 평면에서는 SDN(Software Defined Networking) 컨트롤러를 이용한 중앙 집중식 망 관리에 초점이 맞춰 있으며, 플로우 및 서비스 정보 모델을 제시한 문서와 플로우 설정을 위한 YANG 모델 문서, QoS YANG 모델 문서가 제안되어 있다.

2.2.5 보안 및 기타 표준

DetNet에 대한 다양한 보안 위협에 대한 모델링과 분석, 위협으로 인한 파급효과와 위협 완화 방안 등을 담은 표준 초안이 제안되어 있으며, DetNet 기술을 링 네트워크에 적용하는 방안을 담은 표준 초안과 DetNet 서비스가 대규모 네트워크에 적용하기 위한 방안을 담은 표준 초안이 제안되어 있다.

3. 맺음말

시간 제어 네트워크 기술은 확정적인 패킷 전달 지연 시간을 보장하고 혼잡으로 인한 패킷 손실은 없애고 망 장애 시 무손실 보호절체를 보장함으로써, 향후 자율주행차, 원격드론, 원격의료, 스마트 공정 계측 제어, 스마트그리드, 가상현실, 증강현실, 인공지능 등의 분야에서 다양하게 활용될 수 있을 것으로 예상된다. 특히, 시간 제어 네트워크 기술을 이용하여, 기존 산업 네트워크에서 주로 단대단으로 사용 목적에 특화된 하드웨어를 서로 연결하여 정보를 전달하기 위한 OT(Operational Technology) 인프라와 이더넷 또는 IP를 사용하는 기존 IT(Information Technology) 인프라를 통합함으로써 비용을 절감하고 라우팅 측면에서 유연성을 높일 수 있다.

시간 제어 네트워크 기술의 국제 표준화에 대한 관심이 전 세계적으로 높으나 국내 전문가의 참여는 미미한 상황이어서, 향후 4차 산업혁명을 위한 통신망 기술로 각광받는 시간 제어 네트워크 기술의 국제 표준화 활동에 우리나라도 적극적으로 참여하여 선도할 수 있는 기술 분야가 되도록 노력할 필요가 있다.

※ 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기술진흥센터의 정보통신·방송 연구개발 사업의 일환으로 수행하였음[2017-0-00067, 안전한 무인이동체를 위한 ICT 기반기술 개발].

[참고문헌]

[1] IEEE 802.1Q-2018, 'IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Bridges and Bridged Networks'
[2] IETF draft-ietf-detnet-use-cases-20, 'Deterministic Networking Use Cases'
[3] IETF draft-ietf-detnet-problem-statement-09, 'Deterministic Networking Problem Statement'
[4] IETF draft-ietf-detnet-architecture-10, 'Deterministic Networking Architecture'