

초저지연 네트워크 기술 동향

정남철
정보통신기술진흥센터 연구위원

I. 개요

지난 수십년 간 모든 네트워크 기반의 서비스 사용자는 사람이었고, 사람의 감각은 수십 ms의 지연에 대해서는 그 차이를 느끼지 못하는 특성을 가지고 있지만, M2M(Machine to Machine) 및 IoT 서비스의 등장과 함께 수 ms의 지연이 초고속 서비스 실현에 걸림돌이 되는 상황에 직면하고 있다. 이에 따라, 디지털 기술을 통해 사람과 사람, 사람과 사물, 사물과 사물, 온라인과 오프라인이 일대일 또는 일대 다수, 다수 대 다수로 긴밀하게 연결되는 초연결(hyper-connected) 사회의 등장과 함께 네트워크의 초저지연화는 필수적인 기술로 부각되고 있다. 4차 산업혁명을 이끄는 대표적 데이터 기반 신기능 서비스는 5G 기반의 무선 인프라 뿐 아니라, 초고속·광대역·고신뢰 유선 인프라 및 유무선 연결성이 보장되는 초연결 인프라 원천기술 개발과 구축이 전제되어야 실현 가능하다. 미래창조과학부는 지난 2016년 12월 지능정보사회 중장기 종합대책을 통해 인간 중심의 지능정보사회를 구현하기 위한 기술·산업·사회 분야별 정책 방향을 설정하고, 이를 위해 데이터·서비스 중심의 초연결 네트워크 환경 구축을 전략과제로 추진하고 있으며, 본 고에서는 국내외 초저지연 연구개발 및 시장, 특허 동향에 대해 살펴보고자 한다.

II. 연구개발 및 시장 동향

1. 5G 네트워크 현황

ITU-R에서 발표한 IMT-2020(5G) 이동통신의 핵심 성능 지표를 보면 1~10Gbps 전송속도, 종단간 왕복지연시간 1ms, 네트워크 에너지 사용량 90% 감소, 장비 배터리 수명 최대 10년 등의 고신뢰 저지연 성능 보장을 요구하고 있다. 4G와 차별화되는 5G의 가장 큰 특징은 초저지연

* 본 내용은 정남철 연구위원(☎ 042-860-8163, ncjeong@iitp.kr)에게 문의하시기 바랍니다.

** 본 내용은 필자의 주관적인 의견이며 IITP의 공식적인 입장이 아님을 밝힙니다.

서비스의 제공이며, 이를 실현하기 위해 다양한 기술이 개발되고 있으나, 현재의 초저지연 기술 개발은 5G 무선 구간(단말~기지국)에 한정되고 있고, 5G 코어 네트워크의 지연을 최소화하기 위한 방법으로 코어 장비를 기지국 인근에 설치하는 모바일 엣지 컴퓨팅(Mobile Edge Computing) 및 스위치/라우터를 bypass 하는 Transport-SDN 기술 등으로 국한되어 있는 상황이다. 즉, 5G의 초저지연 기술개발 전략은 단일 이동통신 사업자의 단일 셀 내의 5G 네트워크에 한정되어 있으며, 기존의 인터넷을 경유하는 유무선 네트워크 환경에서의 초저지연 서비스 제공은 고려되어 있지 않아 저비용으로 범용 서비스를 제공하는 데에 한계를 보이고 있다.

2. 유선 네트워크 현황

인터넷은 아직도 1980년대 초반에 고안된 통신 프로토콜들(TCP, UDP/IP/Ethernet)을 근간으로 하여 동작하고 있으며, 이 프로토콜들은 지난 30여년간 기술적으로 크게 진화하지도 않았다. 초기의 인터넷은 단순한 형태의 자율 시스템(Autonomous system) 구조로 시작되고, 현재의 광케이블에 비해 상대적으로 품질이 낮은 동선 기반으로 동작하였기 때문에 Store and Forward 방식을 사용하여 패킷 손실이 발생한 경우 재전송을 하고 패킷 단위로 오류를 정정하는 기능이 중요한 역할을 하였다.

인터넷이 상용으로 제공된 90년대 후반부터 사용의 편리성과 서비스 품질 보장을 위해 방화벽, DNS, 인증 기능 등이 추가되고, 이러한 기능들이 각각 인터넷에서 수 ms~수십 ms의 지연과 정체를 발생시키는 요인으로 작용하고 있다. 인터넷 트래픽이 급증함에 따라 네트워크를 광대역화 하는 많은 기술들이 개발되었지만, 인터넷의 사용자가 대부분 사람들이었기 때문에 단대단(End-to-end)에서 1~2초 정도의 지연은 큰 문제로 부각되지 않아 지연과 정체를 해결하기 위한 기술 개발은 미흡하였다. 하지만 최근에는 다양한 실시간, 초저지연 서비스들이 등장하면서 네트워크의 저지연화가 점차 큰 연구 이슈로 부상하고 있다.

3. 연구개발 현황

국내의 경우, 5G 이동통신 액세스 분야는 용량 증대, 저지연 전송, 다수 단말기 수용 등의 목표를 달성하기 위해 5G 이동통신 추진전략에 따라 5G 이동통신 액세스 원천기술 연구를 확대중이고, 모바일 코어망 분야는 서비스 인지기반 유연한 망구조를 수용하고 응용 서버와 망장치간 통합되는 융합 게이트웨이로 진화하고 있다. 고신뢰 네트워크 분야는 네트워크의 신뢰성

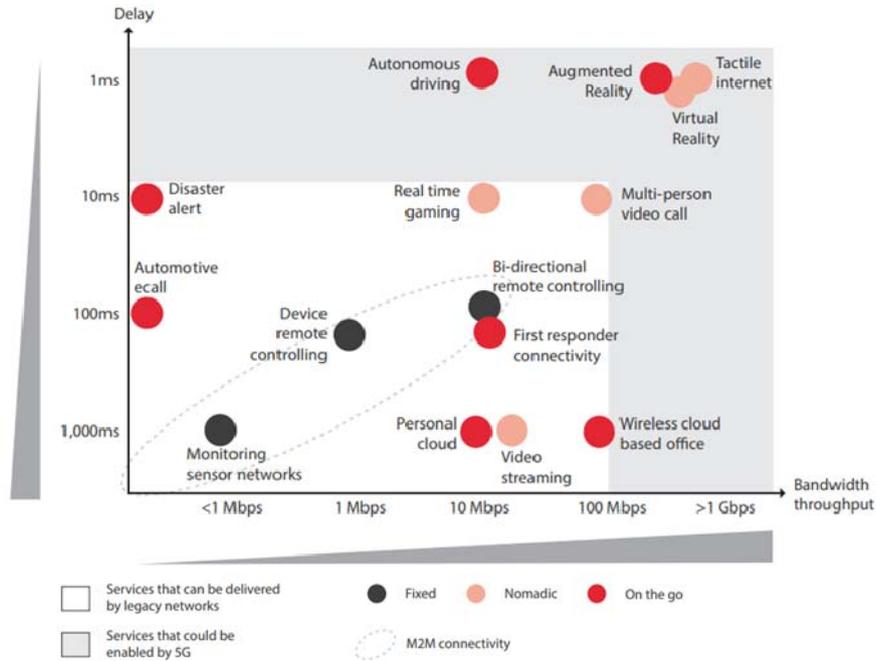
을 보장하기 위해 다양한 네트워크 장비에 대해 실시간 모니터링, 장애처리, 보안기능을 제공하는 기술이 개발되고 있다. NFV(Network Function Virtualization) 구조 및 인프라 분야는 클라우드 및 SDN(Software Defined Network) 기술과 융합하여 IoT 를 포함한 다양한 응용 서비스 플랫폼으로 활용될 전망이다. 오픈 스택과 같은 오픈 소프트웨어 커뮤니티를 중심으로 NFV 구조 및 인프라 기술이 확산될 것으로 전망된다. 저지연 무선통신 분야는 고부가 가치를 가지는 신규 서비스 수용을 위한 수 ms 전송지연을 가지는 네트워크 기술 개발이 시작단계이다.

해외의 경우, 5G 이동통신 액세스 분야는 개인당 Gbps 속도, 수 ms 저지연 전송(무선 구간), 다수 디바이스 수용을 위한 핵심원천기술을 개발 중이며, 모바일 네트워크 분야는 패킷 트래픽 용량 및 서비스 다양성 증가를 수용하고 다양한 무선 액세스 망을 유연하게 통합 중이다. 저지연 무선통신 분야는 사물 통신에서 저지연 전송을 제공하는 국제적 과제가 진행되고 5G 핵심 성능 목표 항목으로 제시되고 있으며, 고신뢰 네트워크 분야는 재난, 해킹 등의 비예측적 상황에 대비하여 통신 품질을 보장하는 솔루션 등을 개발하고 있다. NFV 구조 및 인프라 분야의 경우, NFV 기술 표준은 유럽 표준화기구인 ETSI가 담당하고 있으며 Phase-2가 추진될 예정이고, AT&T 와 같은 글로벌 통신 사업자들과 다양한 SW 업체들이 연합하여 ETSI NFV 구조 기반의 인프라 구축 및 PoC 를 통해서 오픈 커뮤니티를 확산해 나갈 것으로 전망된다.

국내기관은 ETRI가 5G 저지연 서비스 발굴과 저지연 랜덤액세스 기술 개발 등을 위한 연구를 진행하였고, UNIST 가 국가연구개발사업 등을 통해 차세대 실감형 서비스를 실현하기 위한 종단 간 10ms 전송지연시간을 목표로 하는 초저지연 유무선 네트워크 원천기술 개발을 추진하며, 서비스 모델 및 성능 분석을 기반으로, 저지연 패킷 포워딩 및 자원관리 기술, 고신뢰 초저지연 전송 기술, 즉각적 비동기 무선 액세스 기술 등이 개발될 것으로 예상된다. 해외에서는 EU 의 대표적 5G 과제인 METIS(Mobile and wireless communications Enablers for Twenty-Twenty(2020) information Society) 프로젝트는 5G 시스템 지연특성과 고신뢰 통신을 위한 지연성능 요구사항을 정의하고 6개 연구주체에 대한 선행연구를 진행하였다. CISCO 에서는 Cut-through switching, 프레임 수신을 완료하기 전에 포워딩을 시작, 데이터센터 내부에서 10 μ sec 지연시간 지원 등을 목표로 개발하는 등 국내외에서 다양한 연구활동이 진행되고 있다.

4. 시장 동향

GSMA Intelligence 는 5G 의 유즈케이스로서 [그림 1]과 같이 각각의 서비스별로 요구되는 대



<자료> Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile, GSMA intelligence 2014. 12.

[그림 1] 5G 서비스의 대역폭 및 지연 요구조건

역폭과 지연의 요구조건을 제시하고 있다. 현재의 네트워크 기술로 지연 요건을 만족시키기 어려운 초저지연 서비스들로는 자율주행차, AR/VR, 촉각 인터넷, 다자간 영상회의, 실시간 게임, 재난 경보 및 원격 제어(수술) 등이 있다. 원격 수술은 100ms 정도의 지연에서도 실행 가능한 것으로 보고되고 있으나 장시간이 걸리는 수술의 경우에는 어지러움증 해소 및 집중력 유지를 위해 지연을 더 낮추는 것이 필요하다는 의견이 많다. 그리고 5G 서비스로 정의되지 않았으나 초저지연으로 실시간 데이터 분석 및 전송이 매우 중요한 서비스로 자본시장(증권, 금융)의 HFT(High Frequency Trading) 서비스가 있다. 이 분야의 네트워크는 저지연과 고신뢰성을 요하므로 이동통신망을 사용하지 않고 유선 및 고정 무선(마이크로웨이브) 통신망을 사용하고 있다. 초저지연 네트워크 서비스들은 과거에는 일반 사용자 용도로는 구현이 불가능하여 HPC(High Performance Computing) 분야의 네트워킹 용도로 제한적으로 사용되어 왔지만 최근에는 초저지연 네트워크가 구현된다는 전제하에 미래 시장 규모가 매우 크게 전망되고 있다. HPC 시장은 2017년 316억 달러에서 2020년 368.7억 달러에 이를 것으로 전망되고, 이 중 네트워크 시장 규모는 2017년 26.2억 달러에서 2020년 31.19억 달러로 높은 상승률을 보일 것으로 전망되고

있다. 이외에도 이상기후, 홍수, 지진과 같은 자연재해의 빈도 증가와 도시로의 인구집중과 세계 인구 증가로 인한 예상치 못한 사고 등 잠재적 재난에 대비하기 위한 재난 및 공공안전 네트워크 분야, 먼 거리(수~수십 km)에서의 실시간 원격제어 및 감시능력이 핵심기술인 드론(Drone)/무인기(Unmanned Aerial Vehicle: UAV) 분야, 원격에서의 로봇 제어를 통한 수술과 의사 및 환자 간 원격 진단 및 진료를 통해 위급상황에서 즉각적인 의료 서비스를 제공하는 의료 서비스 분야, SDN/NFV, 클라우드 게임, MEC(Mobile Edge Computing), VR/AR, 홀로그램, 커넥티드 카와 V2X(Vehicle to Everything) 분야 등 초저지연 네트워크 잠재 시장은 다양하다.

5. 경제적 효과

지난 2009년 Microsoft Bing 개발팀은 네트워크 지연이 사용자 당 수익을 크게 줄였음을 발표한 바 있다. 500ms 지연 증가는 1.2%의 수익감소, 1000ms 증가는 2.8% 감소, 2000ms의 증가는 4.3% 감소로 이어진다는 것이며, 2007년 TABB group의 보고서 역시 미국과 유럽의 증권사들은 1ms의 지연이 400만~1억 달러의 손실을 야기할 수 있으며, 이러한 네트워크 지연의 문제를 해결하기 위한 시장 규모는 2007년 8.7억 달러에서 2010년 13억 달러로 증가할 것으로 전망한 바 있다.

2012년에는 영국과 미국의 증권사들은 영국과 미국 간의 네트워크 지연(Round Trip Time: RTT)을 6ms 감축한 59ms로 만들기 위해 새로운 해저케이블 구축에 3억 달러를 투자했으며, 2012년에 런던과 동경 간의 네트워크 지연(RTT)을 230ms(15,000km)에서 170ms(10,000km)로 60ms 감축하기 위해 북극해를 통과하는 3개의 해저케이블을 설치하는 데 15억 달러를 투자하였다. 기존에는 유럽-중동-인도양-일본을 거치는 일반 통신용 해저 케이블을 사용하였다. Perseus Telecom은 HFT 용도로 런던과 프랑크푸르트 간의 RTT를 8.35ms에서 4.3ms로 줄이기 위해 광케이블 대

[표 1] 네트워크 지연에 따른 경제적 손실

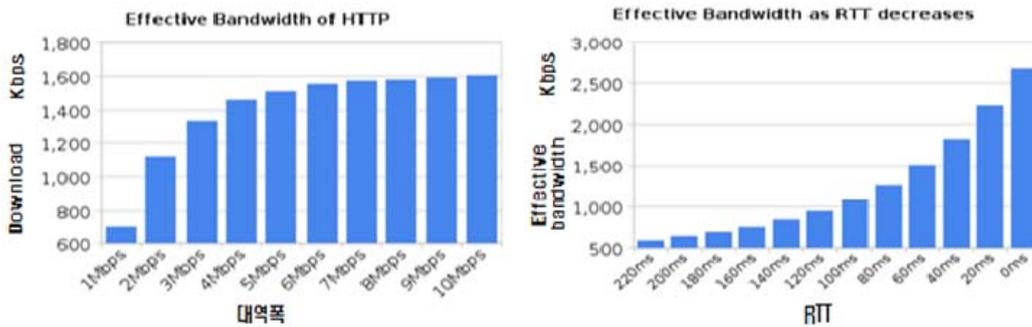
구분	Distinct Queries/User	Query Refinement	Revenue/User	Any Clicks	Satisfaction	Time to Click (Increase in ms)
50ms	-	-	-	-	-	-
200ms	-	-	-	-0.3%	-0.4%	500
500ms	-	-0.6%	-1.2%	-1.0%	-0.9%	1,200
1,000ms	-0.7%	-0.9%	-2.8%	-1.9%	-1.6%	1,900
2,000ms	-1.8%	-2.1%	-4.3%	-4.4%	-3.8%	3,100

<자료> Bing and Google Agree: Slow Pages Lose Users, Brady Forrest 2009. 6.

신에 자유공간(Free Space) 마이크로웨이브 네트워크를 구축하여 운영하고 있다.

지난 30 여년간 컴퓨터 성능은 1,000 배 증가하였고 인터페이스 성능(대역폭)은 3,000 배 증가했으나, 서버의 지연(RTT) 성능 개선은 32 배 정도로 소폭 개선되어 네트워크가 컴퓨터의 성능을 따라가지 못하는 병목의 원인으로 작용하고 있다. 1990년대 말부터 통신사업자들은 트래픽의 증가에 대비하기 위해 네트워크의 광대역화에 많은 투자를 하였으나 네트워크의 지연을 일으키는 여러 가지 요소들로 인해 대역폭의 증가가 지연의 감소에 비례하지 않는 문제에 봉착하고 있다. 즉, 대역폭을 2 배로 늘릴 때 지연이 1/2 로 감소하지 않고 5~10% 정도만 감소하는 문제가 있는 것이다

[그림 2]와 같이 대역폭을 증가시켜도 웹 페이지의 다운로드 속도는 비례 증가하지 않지만, 네트워크 지연(RTT)을 감소시키면 대역폭 효율이 지속적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.



* 대역폭이 증가해도 웹 페이지의 다운로드 속도(대역폭 효율)는 비례 증가하지 않는다.

* 지연을 감소시키면 대역폭 효율이 크게 증가

<자료> More bandwidth doesn't matter, Mike Belshe, 2015. 8.

[그림 2] 대역폭과 성능(throughput) 및 지연의 관계

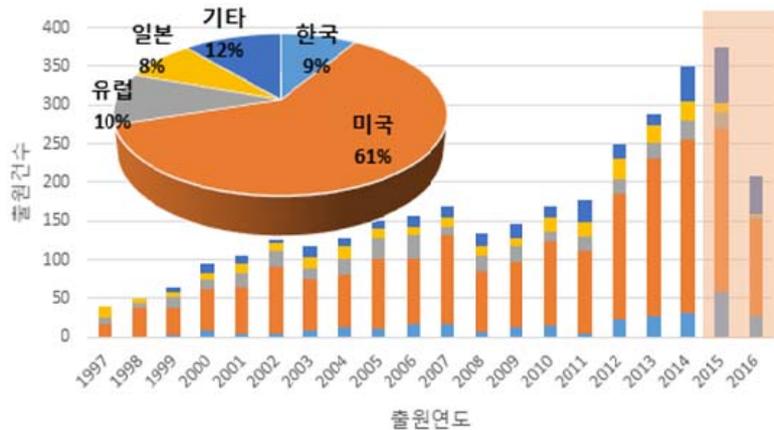
III . 특허 동향

1. 연도별/국가별 동향

저지연 네트워크 기술 분야의 연도별 특허 동향을 살펴보면, 최근에 빠르게 증가하는 양상을 보이고 있다. 1990년대 이후로 점차적으로 증진하던 기술의 발전이 2008년 금융위기의 영향으로 잠시 주춤하였으나, 2010년 이후 4G 이동통신의 개발과 스마트폰 시장이 성숙기에 다름에 따라 다양한 저지연 요구가 발생한 것을 반영하여, 이후 5년간 관련 특허가 급격히 증

가한 것으로 분석된다. 한국[KIPO]의 연도별 특허 동향을 살펴보면, 2003년을 기점으로 출원 건수가 급격히 증가하였으며, 이후 약간의 감소 후, 2012년부터 출원 건수가 빠르게 증가하는 양상을 보이고 있다. 한국의 경우 2011년부터 LTE 서비스가 본격화되었고, 이에 따라 실시간 데이터를 활용하는 관련 산업의 활성화가 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. 미국[USPTO]의 연도별 특허 동향을 살펴보면, 2000년 이후로 꾸준히 증가하다가 2008년 금융위기로 인해 특허출원 수가 감소하였으며, 이후 2012년부터 최근까지 빠르게 증가하는 양상을 보이고 있다.

전반적으로 미국의 출원건수의 양상이 해당 분야의 전체 출원 동향과 비슷한 것으로 미루어 보아, 미국이 해당 분야를 선도하고 있는 것으로 분석된다. 2007년 등장한 애플의 아이폰, 구글의 안드로이드 등 이를 활용할 수 있는 분야가 증가하였으며, LTE로 인한 모바일 대역폭의 증가, 이와 관련된 모바일 산업의 동반발전이 지속되고 있기 때문으로 분석된다. 일본[JPO]과 유럽[EPO]의 연도별 특허출원 동향을 살펴보면, 미국에 비해서는 큰 증감세를 보이고 있지 않으나, 꾸준한 출원이 이루어지고 있으며 2012년부터 소폭 증가한 것으로 나타나고 있다. 유럽[EPO]의 연도별 특허출원 동향을 살펴보면, 타 국가에 비해 적은 출원건수를 보이고 있으나, 전반적으로 꾸준한 출원이 이루어지고 있다. 2001년도에 출원건수가 상승하였고, 이후로도 꾸준히 출원이 이루어지고 있다. 일본은 2011년 이후로 특허출원건수가 소폭 증가하였다.



<자료> “초저지연 네트워크 기술개발”, 정보통신기술진흥센터(ИTP), 2017. 4.

[그림 3] 국가별/연도별 출원건수

2. 기업별 동향

저지연 네트워크 분야의 주요 출원인을 추출한 결과, 삼성이 가장 많은 특허를 출원한 것으로 나타났으며, 그 뒤를 이어 중국의 HUAWEI 와 핀란드의 NOKIA(ALCATEL), 그리고 일본 FUJITSU 와 미국의 IBM, QUALCOMM, CISCO 등이 다수의 특허를 출원하고 있는 것으로 나타났다.

[표 2] 초저지연 네트워크 기술분류(안)

대분류	중분류	소분류
초저지연 네트워크 기술(A)	초저지연 신뢰서비스를 위한 기술(AA)	Zero-copy(AAA)
		광 신호 전송(AAB)
		Cut-through 스위칭(AAC)
		큐 관리 기술(AAD)
	저지연 미디어 서비스 기술(AB)	Mobile Edge/Fog Computing, Content caching(ABA)
		End-to-End 전송(ABB)
		저지연 네트워크 아키텍처, 뺨(ABC)
	미래형 응용서비스 기술(AC)	5G 저지연 네트워크(ACA)
		초저지연 Wi-Fi 접속(ACB)
		TSN(Time Sensitive Networking) 및 기타 응용 서비스(ACC)

<자료> “초저지연 네트워크 기술개발” 정보통신기술진흥센터(IITP)/울산과학기술원(UNIST), 2017. 4.

주요 출원 분야는 미래응용서비스(AC)이며, 특히 최근에 삼성, HUAWEI, CISCO 가 많은 특허 출원을 하고 있다. 세부 관심 분야는 조금씩 다른데, 삼성은 5G 저지연 네트워크(ACA)에 집중적으로 출원하고 있으며, HUAWEI 는 5G 저지연 네트워크(ACA)와 초저지연 Wi-Fi 접속(ACB)에 출원하고 있다. CISCO 는 초저지연 Wi-Fi 접속(ACB)과 TSN 및 기타 서비스(ACC)에 초점을 맞추고 있다.

[표 3] 경쟁자 Landscape

출원인	출원인 국적	기술별 주요 IP (건수)				주력 기술 분야
		AA	AB	AC	총계	
SAMSUNG	한국	21	18	221	260	ACA
HUAWEI	중국	14	0	51	65	ACA
IBM	미국	35	0	0	35	AAA
QUALCOMM	미국	0	31	0	31	ABC
CISCO	미국	0	23	48	71	ACB
NOKIA	스웨덴	45	17	0	62	AAA
FUJITSU	일본	34	0	0	34	AAB
NTT	일본	26	0	0	26	AAB

<자료> “초저지연 네트워크 기술개발”, 정보통신기술진흥센터(IITP)/울산과학기술원(UNIST), 2017. 4.

전반적으로 주요 출원자들은 각 관심 분야 및 주요 사업 분야에 따라 서로 다른 전략을 가지고 있는 것으로 파악된다. Zero-copy 기술(AAA)은 IBM 이 많은 원천 특허를 보유하고 있으며, 광 신호 전송(AAB)은 NOKIA 와 FUJITSU, NTT 에서 많은 특허를 보유하고 있다. 전체적인 저지연 네트워크 아키텍처(ABC)는 QUALCOMM 과 CISCO 에서 많은 관심을 보이고 있다.

IV . 맺음말

네트워크 지연을 일으키는 주요 요소로는 송수신 거리에 의한 전파지연(Propagation delay), 스위치(라우터) 지연, TCP 프로토콜 지연, NIC(Network Interface Card) 처리지연, 서버 운영체제 지연, 네트워크의 필수 응용기능인 방화벽, DNS 및 인증서버에서 발생하는 지연, WiFi 지연, 광 통신 지연 등이 있다. 이러한 지연들은 네트워크 상에 산재된 다양한 네트워크 노드와 장치에서 발생하고 있으며 이들 지연의 총합이 단대단(End-to-end) 네트워크 지연을 초래하고 있다. 현재의 네트워크는 인간이 쉽게 인지 못하는 지연 성능(100ms 전후)을 가지고 있으며, 실시간성이 낮은 대량의 데이터(파일, 웹 페이지 등)를 빠르게 전송하는데 적합하지만 기계와 기계 간에서 고속 통신(E2E 지연 10ms 이하)을 제공하기에는 매우 느린 네트워크이다. 하지만 통신사업자들은 네트워크의 광대역화에 투자하면서 광대역을 초고속으로 홍보하여 마치 현재의 네트워크가 초고속 네트워크인 것으로 오해하게 만들었다. 이는 네트워크 사용 효율(대역폭 효율) 측면에서 들여다 보면 자명하다. 즉, 현재의 네트워크는 대역폭과 지연이 반비례하지 않는 문제를 보이고 있다. 즉, 대역폭을 크게 증대시켜도 지연은 소폭으로 감소하여 전체 성능(Throughput, 웹 페이지 다운로드 속도 등)이 매우 낮은 문제를 보이고 있다. 현재 네트워크는 단대단 지연이 100ms 전후에 이르고, 이를 10ms 수준으로 줄일 경우 네트워크 성능은 3배 이상 증가됨을 의미하며, 성능의 증가는 네트워크 사용 효율의 증가이므로 3배 이상의 투자비(CAPEX)를 절감하는 것으로 해석이 가능하다. 초저지연 네트워크 기술 분야를 주목하는 이유이기도 하다. 그리고 초저지연 서비스들이 하나의 이동통신사업자 내에서만 제공되는 것은 5G 서비스의 범용화를 이루는 데에 큰 장애가 될 것이다. 대부분 유선 네트워크를 경유하여 2개 이상의 이동통신사업자 단말들 간에서 제공되거나 무선 단말과 유선 단말 간의 연결을 통해 제공할 수 있도록 하는 것이 바람직하다. 고비용으로도 제공 가능한 서비스(예; 원격 수술 등)는 Transport SDN 을 이용하여 End-to-end 로 광 네트워크 구성을 통해 제공할 수 도 있지만 모든 가입자를 대상으로 하

는 저비용 범용 서비스 제공을 위해서는 유무선 네트워크 전반에 걸친 초저지연 네트워크 기술의 개발이 전제되어야 실현 가능하며, 초저지연 네트워크 기술은 자율주행, 홀로그램, 디지털 헬스케어, O2O 서비스 등 다양한 미래 ICT 서비스의 경제적인 제공이 가능한 기반기술이 될 것이다.

[참고문헌]

- [1] “K-ICT 네트워크 발전전략”, 미래창조과학부, 2015. 5.
- [2] “ICT 기술예측조사 2030 & 10대 미래유망기술” 정보통신기술진흥센터, 2015. 12.
- [3] “ICT R&D 2020 투자로드맵(안)”, 정보통신기술진흥센터, 2016. 2.
- [4] “정보통신·방송 연구개발사업 특허기술동향조사 보고서”, 한국지식재산전략원(KISTA)/정보통신기술진흥센터(IITP), 2016. 7.
- [5] “ICT 중장기 기술로드맵 2022(네트워크분야)”, 정보통신기술진흥센터 2016. 8.
- [6] “초저지연 네트워크 기술개발” 정보통신기술진흥센터(IITP), 2017. 4.
- [7] 주창희, “5G 실감형 서비스를 실현하기 위한 초저지연 네트워크 기술 연구”, UNIST, 2016. 10.
- [8] 김효일 등 “초저지연 네트워크를 위한 기술 동향”, KRnet 2015 UNIST, 2015. 6.
- [9] “초저지연 실감형 서비스를 위한 네트워크 기술 동향”, The Magazine of the IEEE, 2016. 4.
- [10] “저지연 이동통신기술로 여는 촉각 인터넷 시대”, ETRI Webzine, 2016.
- [11] “초저지연 네트워크 기술개발” 정보통신기술진흥센터(IITP)/울산과학기술원(UNIST), 2017. 4.
- [12] “Bing and Google Agree: Slow Pages Lose Users”, Brady Forrest 2009. 6.
- [13] Jeromee Johnson, “Trading at Light Speed: Analyzing Low Latency Market Data”, 2007. 3.
- [14] Mike Belshe “More bandwidth doesn't matter”, 2015. 8.
- [15] “IMT Vision towards 2020 and Beyond”, IMT-2020 (5G) Promotion Group, 2014.