

# 초 저지연 네트워크 기술개발

## Ultra Low Latency Networking Technologies Development

Institute for Information & Communication Technology Promotion(IITP)  
will lead in realizing national welfare as the world's Best R&D institute  
in ICT technologies through promotion of creative economy

유 재 형

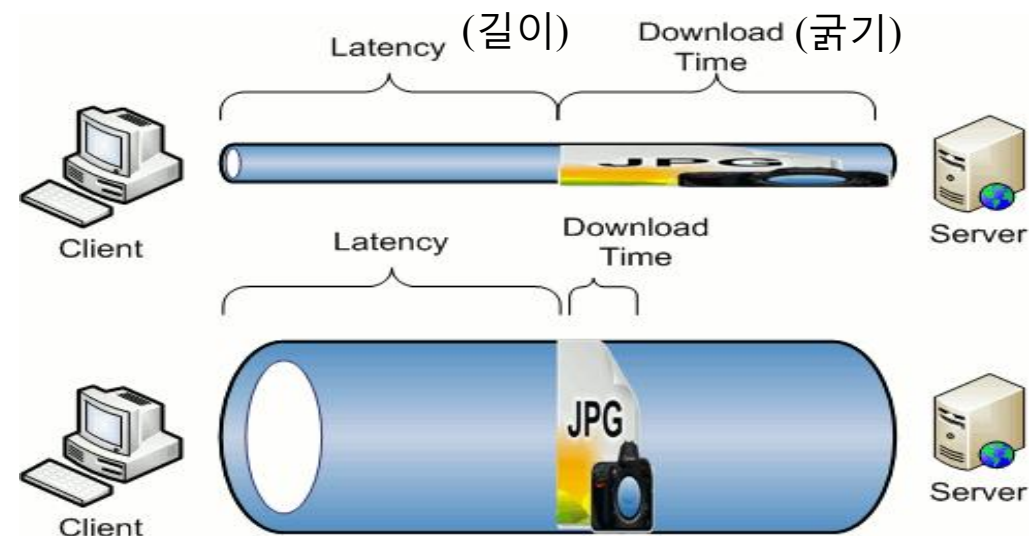
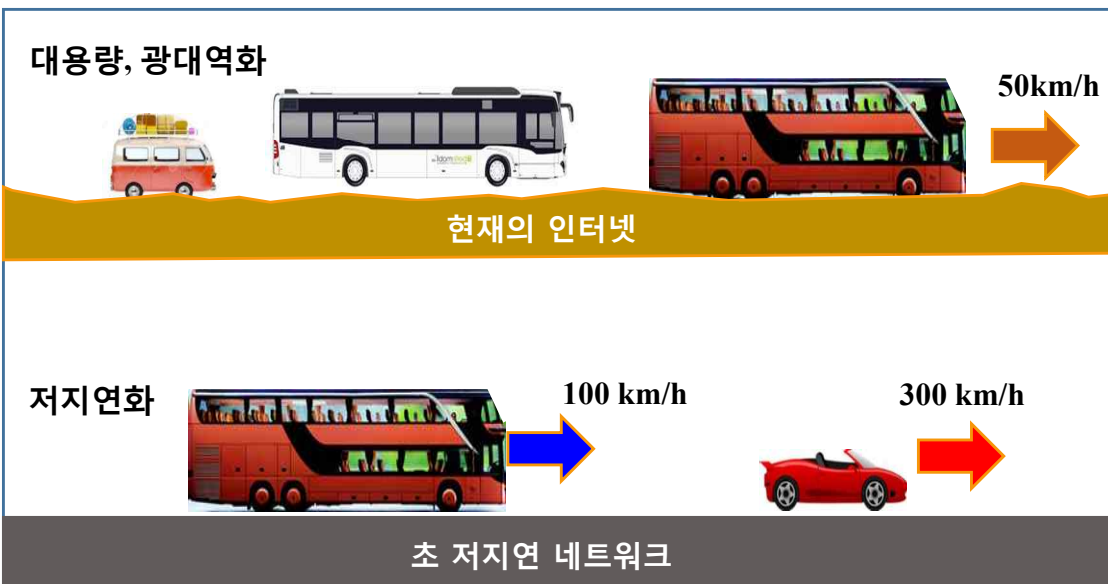
미래부 IITP, 네트워크 CP

# 1. 개요

초저지연 → 네트워크 기술의 새로운 연구방향

◆ 현재의 네트워크 = 광대역 네트워크 or 초고속 네트워크 ?

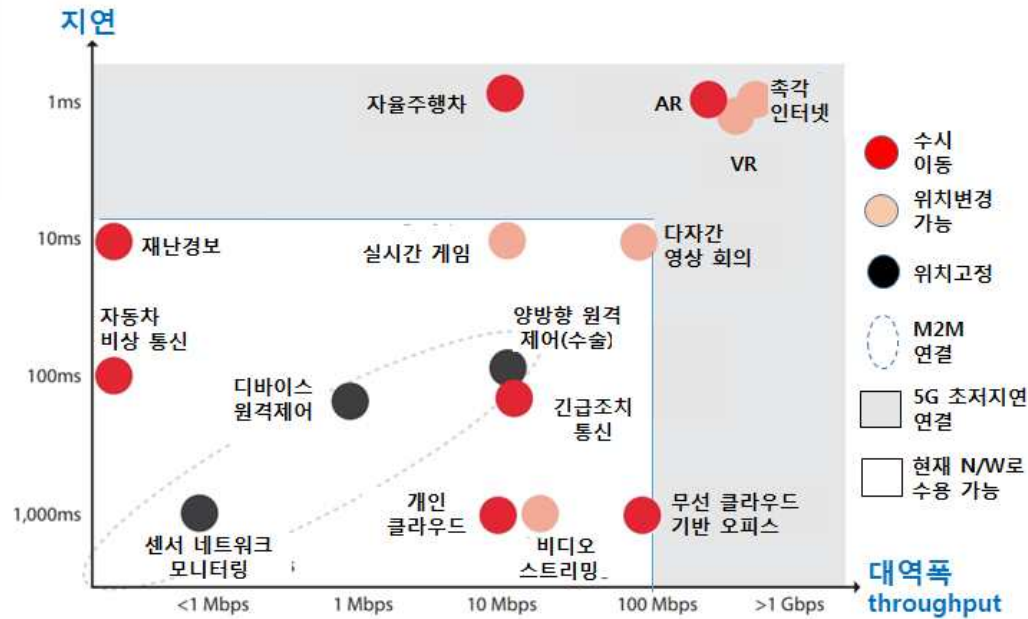
❖ 네트워크 성능(throughput)  $\approx$  대역폭(BW) / 지연(latency)



## 2. 서비스 및 시장

### ◆ 초저지연 서비스

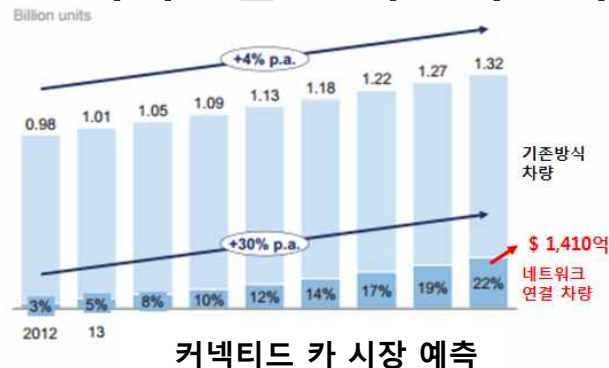
- ❖ 자율주행차
- ❖ 네트워크 기반 AR/VR
- ❖ 촉각 인터넷 등
- ➔ 초저지연 네트워크 필요



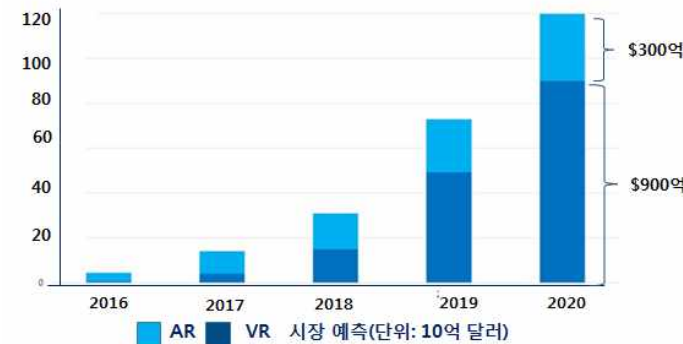
5G의 주요 서비스 별 대역폭과 지연 요구조건

### ◆ 대규모 시장 형성

- ❖ 유무선 네트워크 기반으로 다양한 대규모 저지연 서비스 시장 창출
- ❖ 기존 서비스들도 지연시간의 감소로 고품질화



커넥티드 카 시장 예측



AR VR 시장 예측(단위: 10억 달러)

### 3. 네트워크 지연의 문제

- ◆ 지난 30년간 컴퓨터 성능은 1,000배, NIC 대역폭은 3,000배 증가했으나, 서버의 지연성능 개선은 32배 수준

❖ 트워크가 컴퓨터 성능을 따라가지 못하고 병목의 원인으로 작용

	1983	2011	Improved
CPU Speed	1x10Mhz	4x3GHz	> 1,000x
Memory Size	≤2MB	8GB	≥ 4,000x
Disk Capacity	≤30MB	2TB	> 60,000x
Net Bandwidth	3Mbps	10Gbps	> 3,000x
Round-trip Time (RTT)	2.54ms	80μs	32x

(참고) "It's time for low latency", Stanford Univ.,  
USENIX Workshop, Jan. 2011

- ◆ 트래픽 급증에 대비하여 네트워크의 광대역화에 집중 투자했으나, 대역폭 증가 만큼 지연이 감소하지 않는 문제

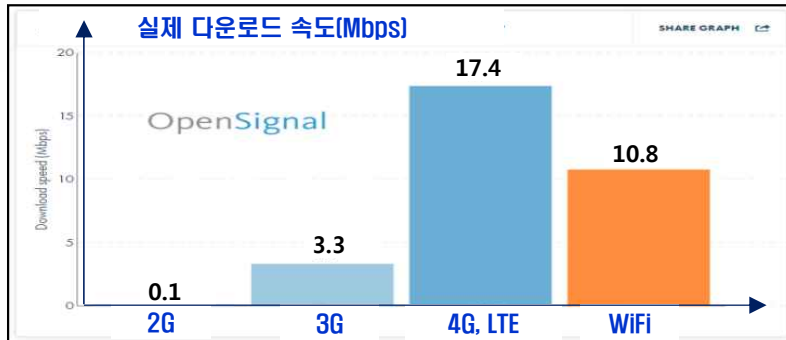
❖ 웹 페이지의 다운 속도 측정 예



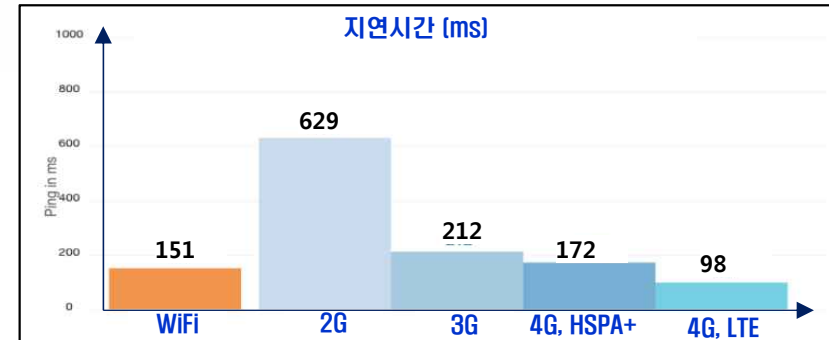


# 3. 네트워크 지연의 문제

## ◆ LTE 속도는 2G 대비 170배 증가, 지연은 약 1/6로 감소



자료: Open Signal, 2016.11

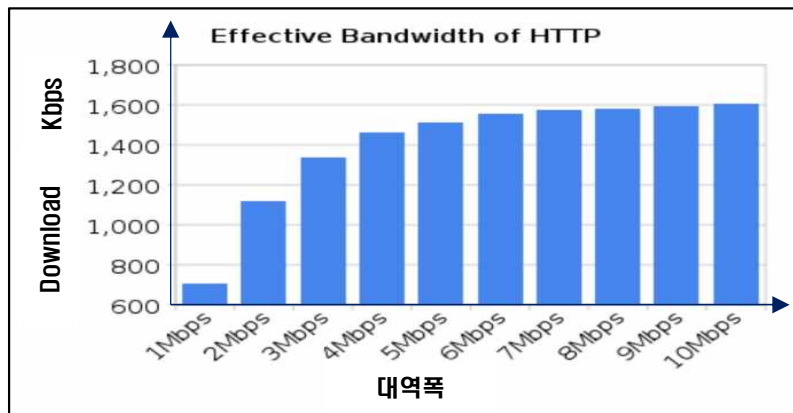


자료: Open Signal, 2013 2H

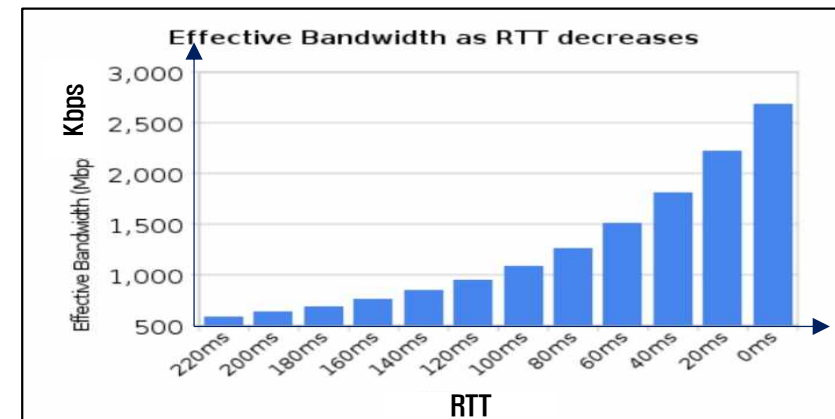
## ◆ 대역폭 보다 지연이 문제

### ❖ More bandwidth doesn't matter

#### ■ 대역폭 증가는 CAPEX 증가



대역폭이 증가해도 웹 페이지의 다운로드 속도(대역폭 효율)는 비례증가 하지 않는다.



BW=5Mbps에서 페이지 다운로드 속도: 지연을 감소시키면 대역폭 효율이 크게 증가

# 4. 네트워크 지연의 경제적 효과

## ◆ 인터넷 사업자

### ❖ Microsoft(Bing, 2009년)

- 지연 증가 → 사용자 당 수익감소(2016, 수익 10억 달러)

### ❖ Amazon (2008년)

- 지연이 100ms 증가하면 매출 1% 감소
  - 약 9억 달러 감소

지연증가	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%	1200
1000ms	-0.7%	-0.9%	-2.8%	-1.9%	-1.6%	1900
2000ms	-1.8%	-2.1%	-4.3%	-4.4%	-3.8%	3100

자료: Microsoft Bing, 2009.7

## ◆ High Freq. Trading (미국 증권사)

### ❖ 선물거래 200만회/초, 주식거래 100만회/초

- 1ms 당 400만~1억 달러 손실
- 10ms 늦으면, 수익 10% 감소

### ❖ 2012년, 영국~미국 해저케이블 구축에 \$3억 투자

- 지연 6ms 감소

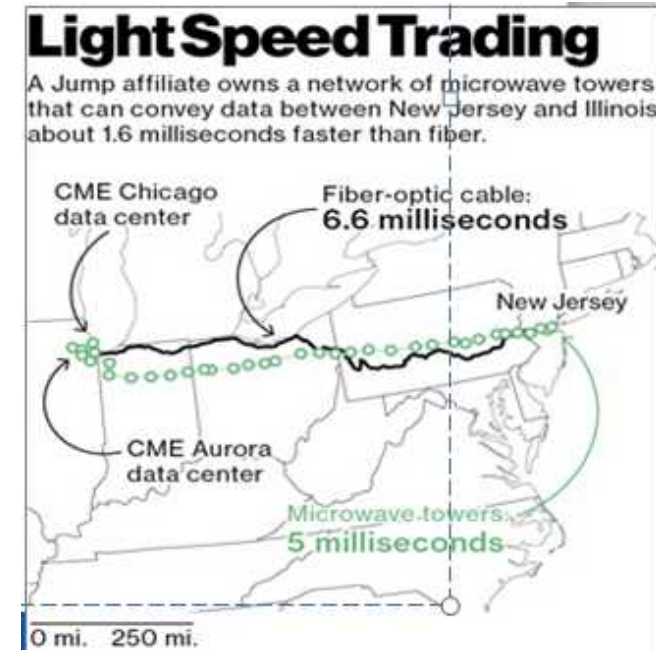
### ❖ 2010년 시카고~뉴욕 광케이블 구축에 \$2.5억 달러 투자

- 지연 1.4 ms 감축
- M/W 타워 구축, 사용료 25만 달러/년

## ◆ 대역폭 사용효율

### ❖ 150ms의 지연을 10ms로 줄일 경우

- 3배 이상 BW 효율 증가 → 투자비 절감



# 5. 네트워크 지연 요소

## 필수 App 처리 지연



## 네트워크 별 지연



## 스위치 지연 (Store & Forward)

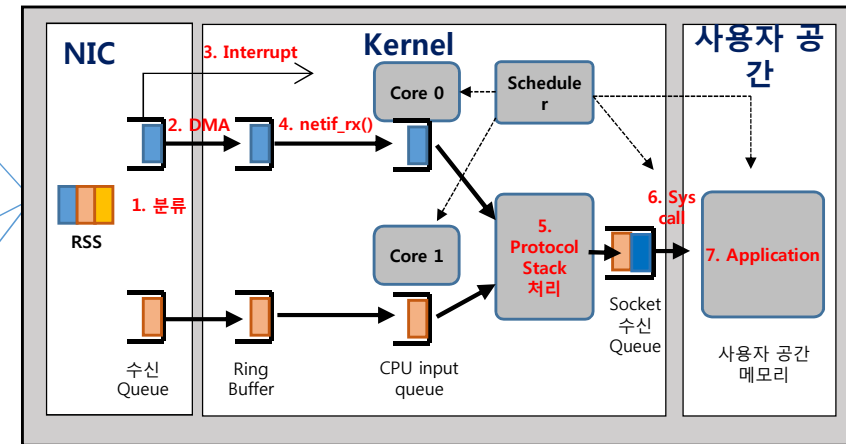
## 전파지연 + TCP 지연 (Propagation + TCP Delay)



서버, 단말

## 광전송 지연, 전파지연(20만 km/s)

## 서버의 운영체제(OS), NIC Application 지연



서버, 단말

SELF-DRIVING CAR



# 5. 네트워크 지연 요소

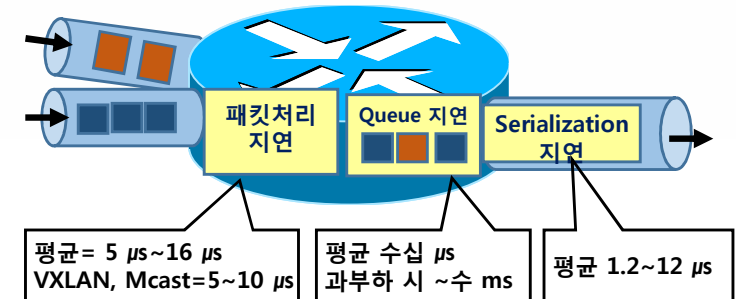
## ◆ 스위치 지연(One hop)

### ❖ 패킷처리(Switch Fabric) 지연

- 약  $5\ \mu\text{s} \sim 16\ \mu\text{s}$  (64~1,518B, 인터넷 용)
- VXLAN, multicast 사용 시 5~10  $\mu\text{s}$  증가

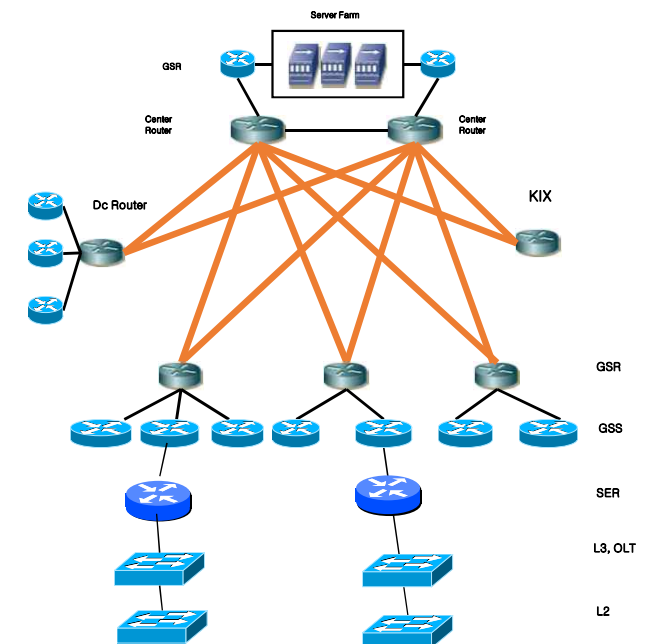
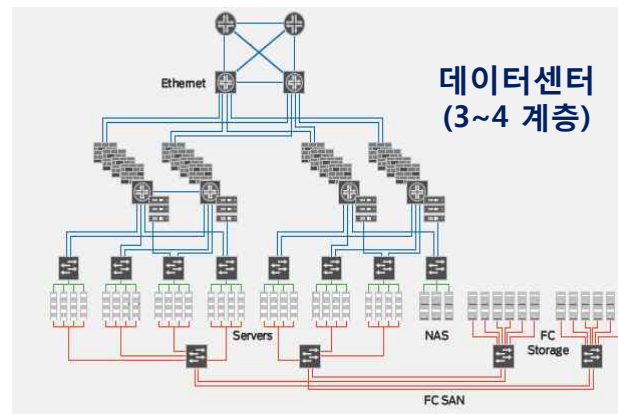
### ❖ Queueing 지연

- 낮은 부하에서는 수십  $\mu\text{s}$  수준, 과부하로 대기시간이 길어지면 수백  $\mu\text{s} \sim$  수 ms 로 증가



## ◆ E2E 연결에 10~ 20개의 스위치 라우터를 통과

- 정상상태에서  $300\ \mu\text{s} \sim 1\text{ms}$  /10개
- 과부하 시, 수 ms ~ 수십 ms 로 증가



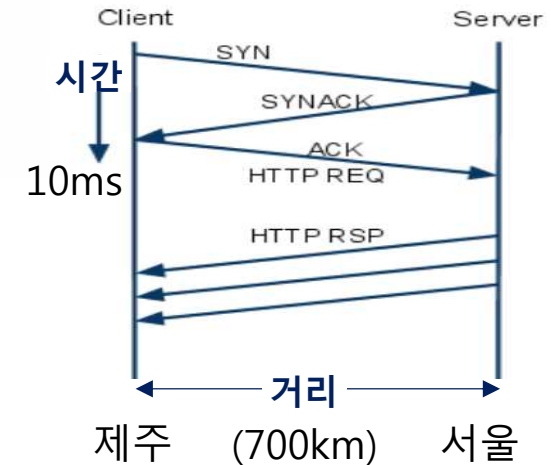


# 5. 네트워크 지연 요소

## ◆ 전파지연

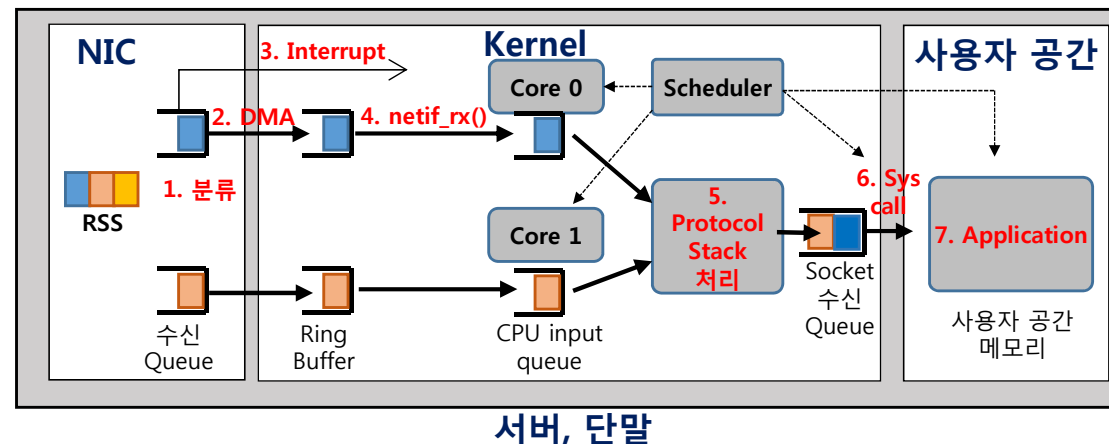
### ❖ E2E 물리적인 거리에 의해 발생

- 서울 - 제주간 거리=700km, RTT=7ms
- TCP 프로토콜에 의해 지연 가중



## ◆ NIC(Network Interface Card)

- ❖ 대부분의 NIC은 가능한 한 많은 패킷을 하나의 interrupt로 처리하기 위해 **30μs 주기로 interrupt**를 전달
- ❖ NIC과 메모리 사이의 지연은 1~2 μs



# 5. 네트워크 지연 요소

## ◆ 서버 운영체제

### ❖ 약 100 $\mu$ s의 내부 처리 지연

- VMWare NSX에서 실행되는 Windows의 경우. 데이터 송수신 지연이 55% 점유

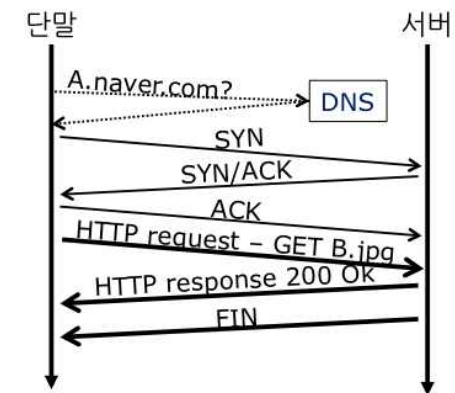
## ◆ 프로토콜 스택

### ❖ OS kernel 에서 실행

- TCP, 1bps  $\rightarrow$  1 Hz CPU clock 소요
- 10G Ethernet  $\rightarrow$  CPU 과부하 발생

### ❖ TCP 과부하(packet loss) 발생 시 지연이 크게 증가(~수십 ms )

- 패킷 손실에 의한 재전송 및 head of Line 지연 발생



## ◆ F/W, DNS, 인증서버

### ❖ F/W: ~0.2 ms/100개 rules

### ❖ 인증(DIAMETER): 약 200ms

### ❖ DNS: 약 100ms

- KT DNS(2개) lookup 속도
  - 95ms, 110ms

# 5. 네트워크 지연 요소

## ◆ 무선 네트워크 지연

### ❖ LTE

#### ■ LTE 접속 지연(ITU-R IMT-A의 요구조건)

- 제어평면(인증, 과금, 사용자 등록, 세션 연결 등): 최대지연 100ms
- 데이터 평면(전송): 최대지연 10ms
- **핸드오버 지연: 최대 50ms (intra freq.), 150ms(inter freq.)**

### ❖ WiFi

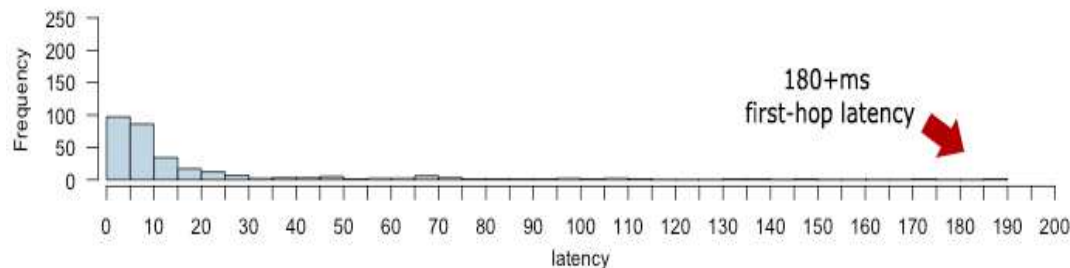
#### ■ 지연성능이 WiFi QoS(802.11e)에 추가되었으나, 초저지연 요구에 못 미침

→ **지연에 대한 규격은 사실상 없음**

#### ■ 단말의 자원경합 수준에 따라 지연이 크게 변화

#### ■ 1 hop 지연

- Hotspot : 평균 10~15 ms 전후, 최대 180ms
- 개인용: 6ms 전후



## 6. 초저지연 네트워크 기술(HPC)

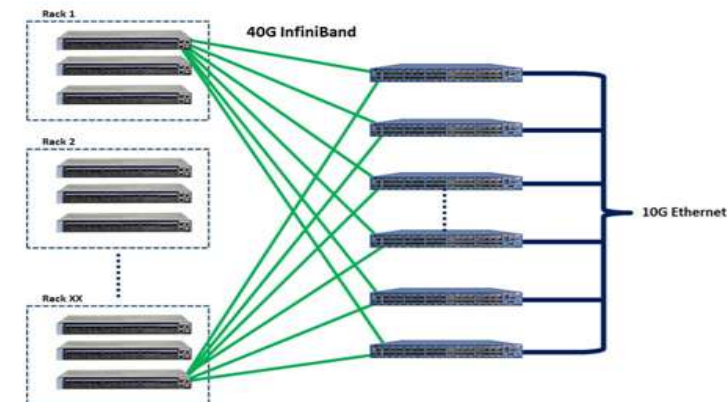
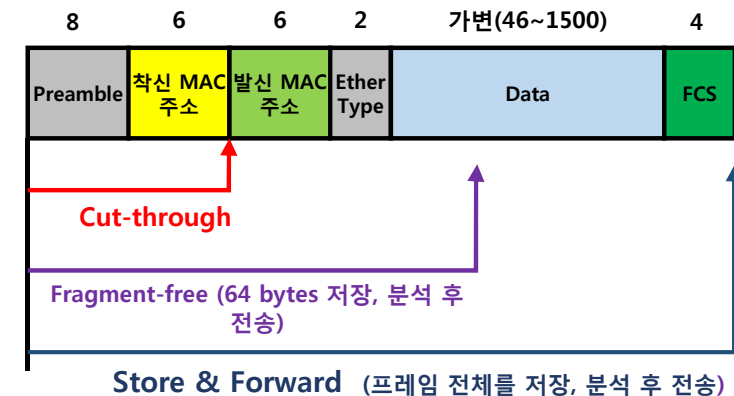
### ◆ High Performance Computing

- ❖ Tera flops 급의 성능, Process 간 지연=10  $\mu$ s 이하
- ❖ 알고리즘 기반 자동거래 플랫폼(High Freq. Trading)이 초저지연 HPC의 상업적 필요성 유발
  - 매초 100~200만 번의 매매(거래) 처리
  - 경쟁사보다 10ms 늦으면 수익 10 % 감소

### ◆ HPC 데이터센터 네트워크

#### ❖ Cut-through 스위치 사용

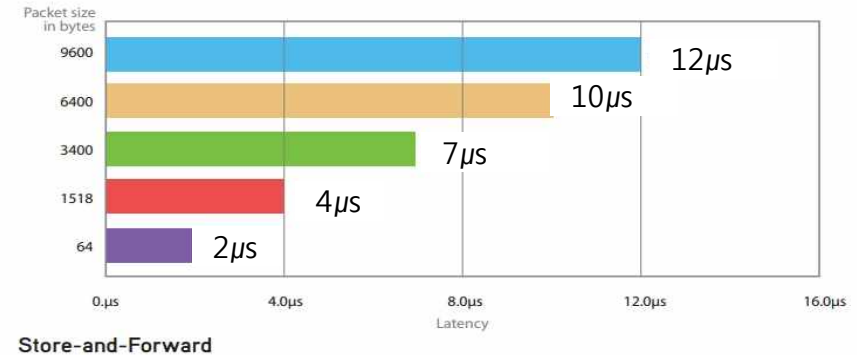
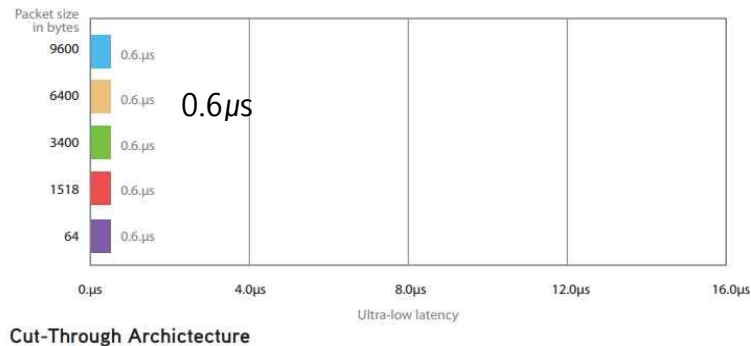
- 프레임의 **착신 MAC 주소만 분석하여 전달** 처리
- 수신 Host에서 오류검사(FCS) 실행
- **Link 에러가 없는 데이터 센터에 적합한 방식**
- 네트워크
  - 노드 간에 Point-to-point 연결이 필요함.





## 6. 초저지연 네트워크 기술(HPC)

### ■ Cut-through vs Store & Forward 스위칭(DC용)의 성능 비교



### ❖ Zero Copy 기술

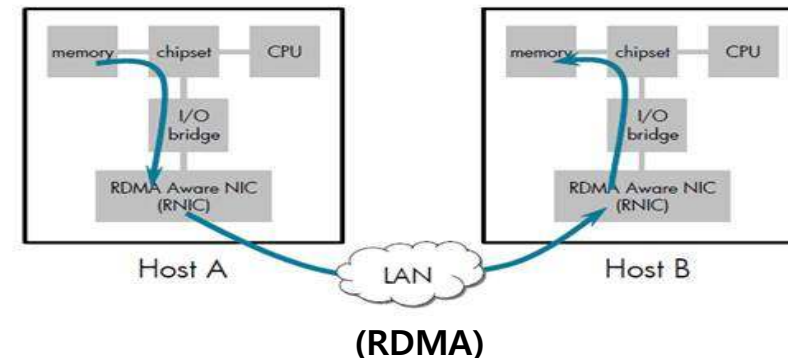
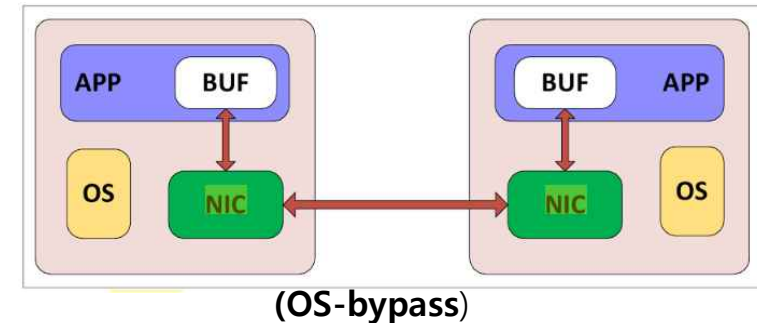
- OS-bypass, RDMA, TCP Offload Engine 등 이용
- Infiniband, RoCE, iWARP 등의 기술 사용
  - RDMA Over Converged Ethernet
  - Internet Wide Area RDMA Protocol

### ❖ NIC (Mellanox)

- OS-bypass
- Polling mode로 동작
- 지연 1  $\mu$ s 이하

### ❖ 현재의 HPC 네트워크 성능

- 5  $\mu$ s 이하 RTT 보장



## 6. 초저지연 네트워크 기술(Google)

### ◆ Google QUIC (Quick UDP Internet Connection)

❖ TCP를 UDP로 전환하여 Web 및 스트리밍 지연문제 해결

❖ 2013년 6월부터 Chrome Canary 버전에 추가

- Windows, Android, MacOS 지원

❖ 검증결과

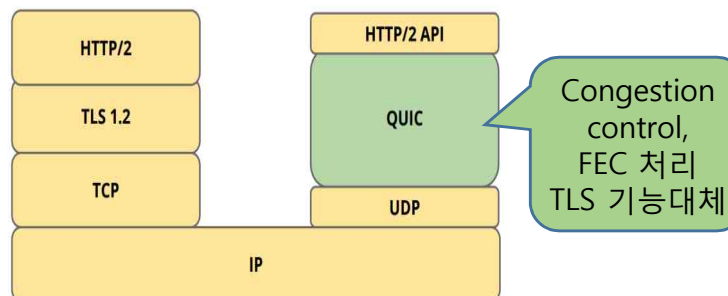
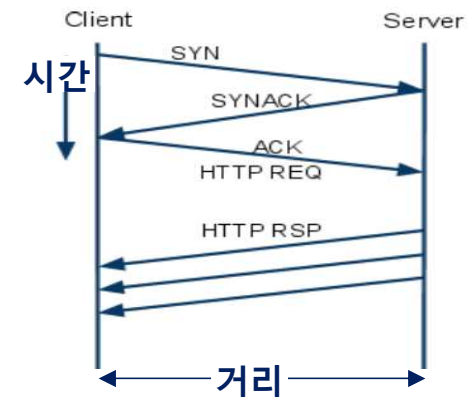
- (최적화된) Google 검색의 평균 페이지 로드 시간을 3% 향상
- Google 검색 페이지 중 가장 느린 1%를 1초 빨리 로딩
- Youtube 동영상 시청 중 재버퍼링 30% 감소

❖ IETF 표준으로 제안 준비 중

- TCP와 TLS의 차기 버전

❖ 단점(현재 수준)

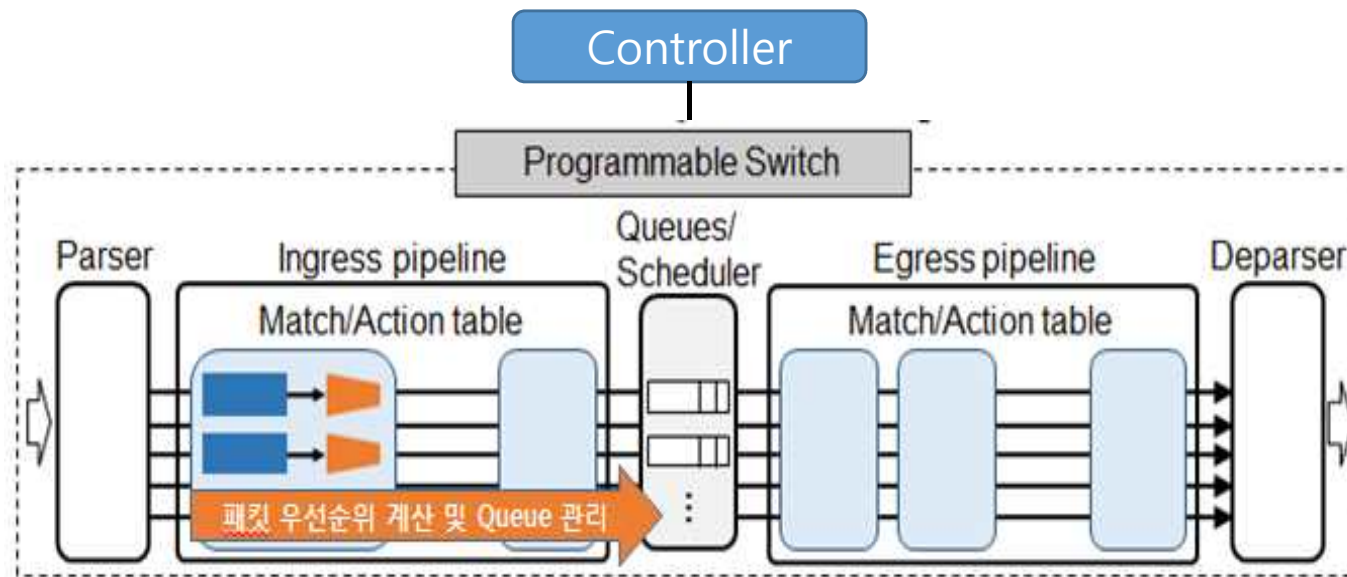
- 내재된 Congestion control 및 FEC 기법의 한계로 웹 서비스에만 사용 중



## 7. 연구 분야

### ◆ 초저지연 스위치 개발

- ❖ 현재의 (프로그래머블) 스위치는 Match/Action 테이블 관리 위주로 개발되었으며 Queue/Scheduler 관리 기능이 없음
- ❖ Adaptive Queue Management Algorithm 연구
  - Flit forwarding(Cell) 기술 적용
  - Push-In First-Out (PIFO)/Domino 활용 등
- ❖ 서비스의 지연요건에 따른 Multi-Queue 관리 기능 개발



(그림) 프로그래머블 스위치의 구조

# 7. 연구 분야

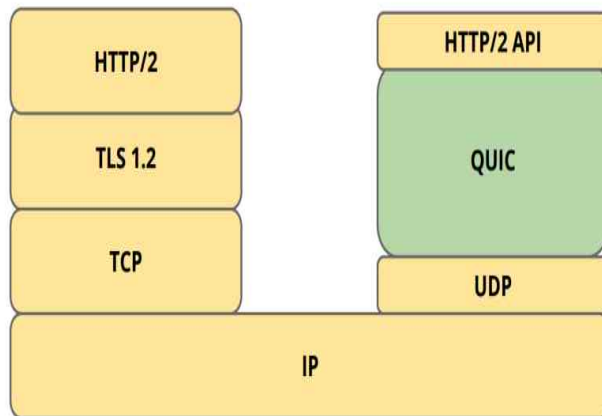
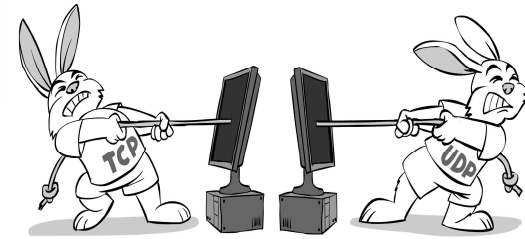
## ◆ UDP 기반 저지연 프로토콜 개발

### ❖ QUIC ++ 개발

- QUIC은 혼잡제어 및 FEC 기법의 한계로 Web 서비스 용도
- **이동성 지원하도록 개선 필요**(에러 보정 및 혼잡제어 등)

### ❖ TCP 기반의 프로토콜들을 UDP로 대체

### ❖ Linux 에 포함시켜 Open Source로 배포



TCP 기반 프로토콜	주요 기능	UDP 기반 프로토콜	주요기능
HTTP/2	웹 서비스	DHCP	IP 주소할당
FTP	파일 전송	T-FTP, UDT	파일전송
SMTP, POP3	E-mail	DNS	도메인 검색
BGP	라우팅	RIP	라우팅
IRC	채팅	RTP	오디오/비디오 전송
NFS	원격 파일공유	NTP	클럭 동기



# 7. 연구 분야

## ◆ 유선망 QoS 관리기술 개발

### ❖ 특정 애플리케이션 트래픽의 우선순위(=저지연)를 보장하는 기술 연구

- IntServ(RSVP) : **자원예약으로 안정적 서비스 제공하나 확장성 문제**
  - 보장형 서비스 제공: 지연시간 보장, queueing 지연 및 손실 없음
- DiffServ: 6 bit DSCP 사용. **확장성이 크나 플로우 단위 QoS 보장 못함**

### ❖ 두 방법의 장점을 결합한 새로운 QoS 구조 개발이 필요

- 예: 확장성이 높은 IntServ++ 기술개발

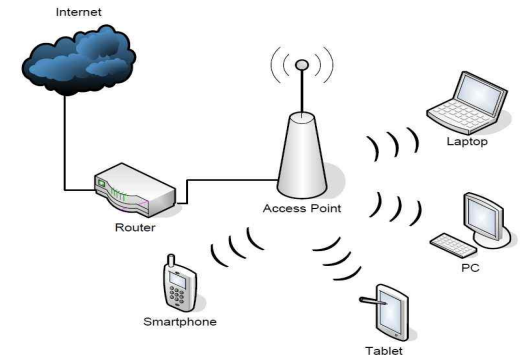
## ◆ 무선망 QoS 관리기술 개발

### ❖ WLAN: 802.11e의 QoS 정의

- 트래픽 유형 별 우선순위 정의
  - 지연: 3ms~13ms(VoIP), 13ms~26ms(Video) 수준
- 기존의 802.11에 비해 50% 이상의 지연 감축 가능하나 **E2E 초저지연 보장은 불가능한 수준**
- Cisco, Realtek, NetGear 등이 고가의 장비에 구현

### ❖ 새로운 WiFi QoS 연구/표준화가 필요

### ❖ 유선망 QoS 기술과 연동(mapping) 기술 연구



# 7. 연구 분야

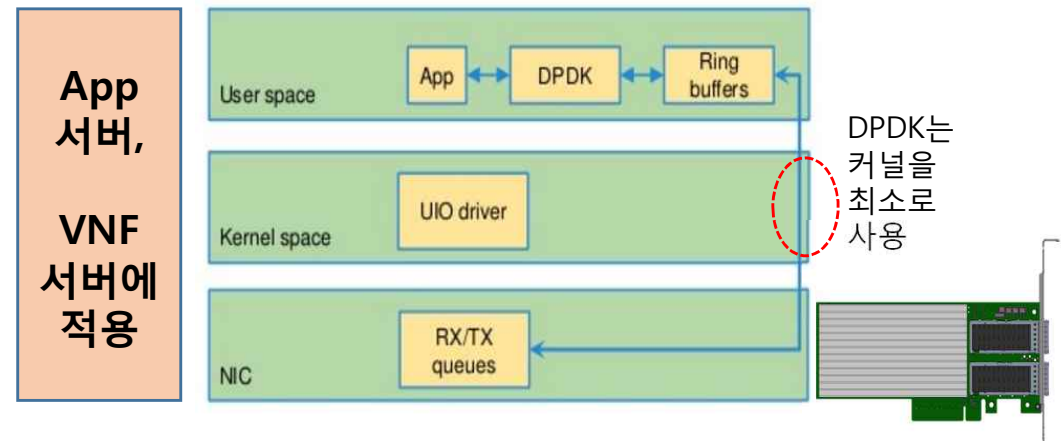
## ◆ 서버 운영체제 및 NIC 지연 최소화 기술개발

### ❖ DPDK로 User space에서 동작하는 TCP, UDP 응용기능 개발

- Kernel을 사용하는 기존의 통신방식보다 15배 이상의 처리 성능(64B 패킷)

### ❖ 주요 개발 기능

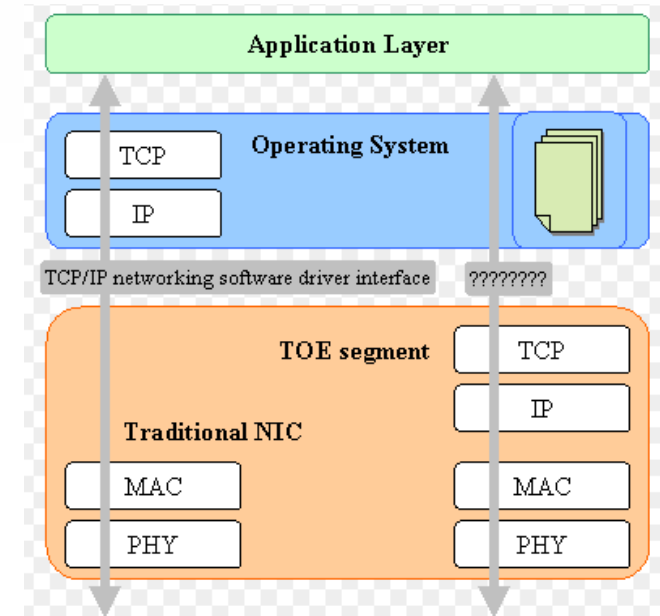
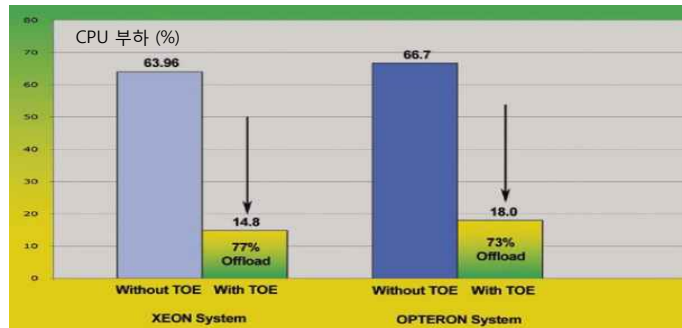
- Polling mode의 NIC
- TCP/UDP 등의 프로토콜이 제공하는 기능들(패킷 재전송, 포트번호 식별/처리, CRC, 패킷분할 및 재구성 등) 구현
  - DCTCP/ECN 등 개발 → Open Source 화
- NIC으로부터 수신한 패킷을 분류하여 처리하는 데 필요한 매핑 테이블 관리 기능
  - RSS(Receiver Side Scaling) → multi-core 서버에 적용



# 7. 연구 분야

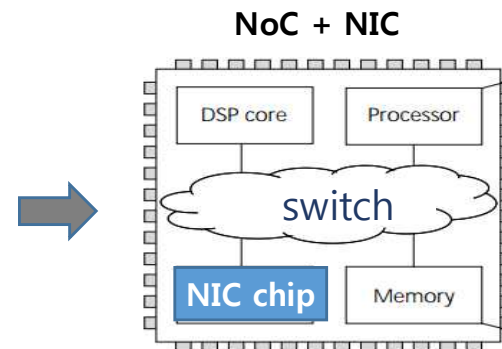
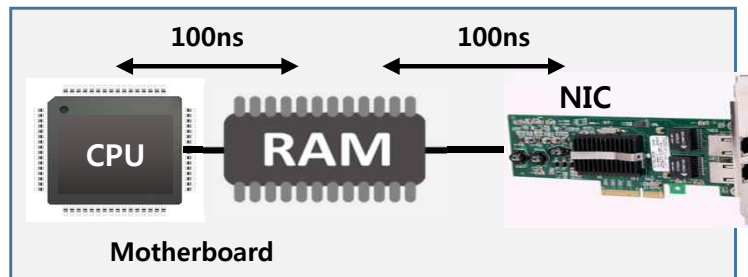
## ❖ TCP 및 UDP offload Engine 개발

- Intel, Mellanox 등에서 개발
- 기존의 제품은 Code가 공개되지 않아 보안이슈를 가지고 있음
- Open Source로 개발



## ❖ On-chip NIC 연구

- NIC은 수 차례 메모리를 참조하여 데이터송수신 처리 → 1~2  $\mu$ s 지연 발생
- NOC(Network-on-chip)에 NIC 추가
- 1  $\mu$ s 이하의 RTT 실현 가능



# 7. 연구 분야

## ◆ 초저지연 MEC(Multi-Access Edge Computing) 플랫폼 개발

### ❖ MEC는 단순한 서버와 스토리지 가상화 이상의 복잡한 기술

- WiFi와 유선망 액세스도 포함

### ❖ 연구개발 내역

- 부하에 따른 서버/스토리지 Orchestration 기능 개발

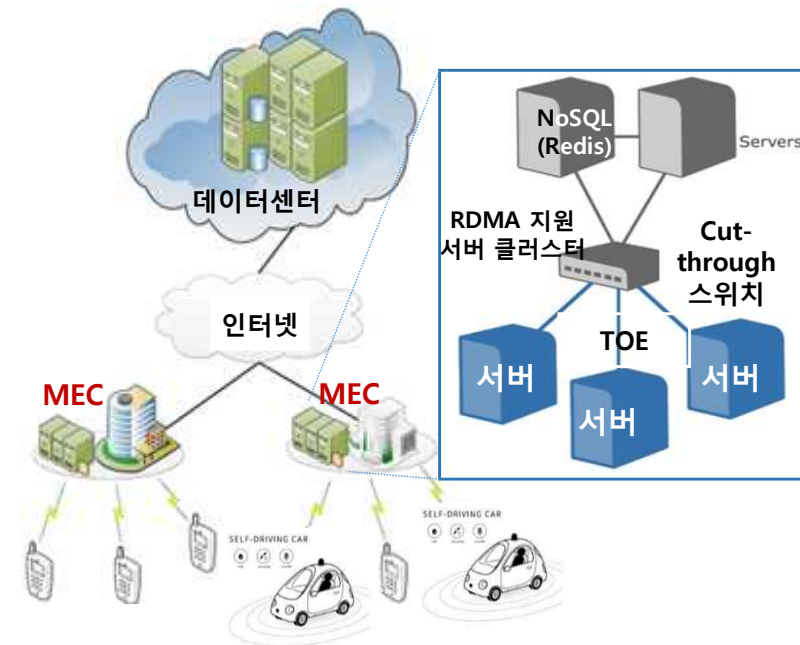
- 서버 Cluster 지원, Scale-in/out, 서비스 체이닝
- DNS, F/W, AAA, DHCP, DPI, IDS, EPC 및 다양한 App 서버 관리 기능
- 단말 위치 및 이동성 관리기능
- 초저지연 기술 적용
  - Cut-through, RoCE, iWARP, TOE, RDMA, Redis 등

- 서버용량 및 설치위치 결정방법 연구

- Application 사용량의 공간 밀도와 시간 밀도 고려
- 인접한 MEC 서버들 간의 협업 기술 연구

- 실시간 정보 동기화, Caching 방법 연구

- 자율주행차...





- ◆ 세계 최초, 최고 수준의 네트워크 → **광대역을 넘어 초고속 인터넷으로...**
  - ❖ 초저지연 관련 네트워크 기술 개발은 국내외 모두 미미한 수준
  - ❖ 최초 및 최고의 기술 개발로 인터넷 혁신의 기반
    - KOREN에 적용하여 검증/초저지연 서비스 시연
- ◆ 현실적인 초저지연 서비스 상용화 기술 확보
  - ❖ 5G 서비스 시장
  - ❖ HPC 서비스 시장
- ◆ 대역폭의 효율화
  - ❖ 대역폭 효율 3배 이상 증가(150ms → 10ms)
  - ❖ 네트워크 CAPEX 절감 효과
- ◆ Application의 효율화 및 개발 시간의 단축
  - ❖ 복잡한 Application들을 보다 빠르게 실행 가능
  - ❖ Application의 개발 시간 단축

감사합니다