ISSN : 1226-7244 (Print)
ISSN : 2288-243X (Online)
논문번호 23-04-34
250
j.inst.Korean.electr.electron.eng.Vol.27,No.4,617~623,December 2023
https : //doi.org/10.7471/ikeee.2023.27.4.617

LTE/5G 네트워크 백홀(Backhaul)의 서비스 품질진단 기법에 관한 연구

A Study on Service Quality Diagnosis Techniques for LTE/5G Network Backhaul

유 지 현*★

Ji-Hyun Yoo*★

Abstract

With the evolution of communication networks, there is a growing demand for stable high-speed data connections to support services relying on large-capacity data. The increasing volume of packet data aggregated from user devices underscores the significance of quality diagnostics for the backhaul network, an intermediate link transmitting data to the core network. This paper conducts empirical research on techniques to diagnose issues within the backhaul network through practical case studies, through diagnosing various factors such as circuit bandwidth, speed disparities within switches, network segment-specific buffer sizes, routing policies, among other factors that could potentially cause RTT (Round Trip Time) delays and performance degradation.

요 약

통신 망의 진화에 따라 대용량 데이터 기반의 안정적인 고속 데이터 연결이 필요한 서비스들이 증가하고 있다. 사용자의 단말로부터 취합된 패킷 데이터의 용량이 증가하면서 코어 네트워크로 전달하는 중간 링크인 백홀 네트워크의 지연에 대한 품질진단의 중요성이 대두되었다. 본 논문에서는 응용서비스 품질에 영향을 미치는 RTT(Round Trip Time) 지연과 성능저하의 원인이 될 수 있는 회선 대역폭(Bandwidth) 및 스위치 내 속도 불일치, 구간별 버퍼(Buffer) 사이즈, 라우팅 정책 등 여러 인자의 진단을 통하여 백홀 네트워크에서 문제를 해결할 수 있는 기법에 관해 실제 사례를 통해 연구를 진행하였다.

Key words : Network diagnosis, Network QoS, Network Bottleneck, Backhaul, Fronthaul, 5G, LTE

Ⅰ. 서론

정보통신기술의 발달로 데이터 축적을 기반으로 하는 빅데이터와 AI 기술이 발전하고 있고, 자율 주행 차량, 고급 게임 애플리케이션 및 라이브 스트리밍 미디어 등과 같이 안정적인 고속 데이터 연결이 필요한 서비스들이 증가하고 있다. 이러한 방대한 양의 데이터를 빠르고 안정적으로 처리하기 위한 네트워크 인프라가 요구된다. 5G 인프라는 세상의 모든 디바이스를 연결하고, 다양한 형태의 정보를 유효한 시간 내 안정적으로 소통시키는 것을 지향한다.

하지만 트래픽 증가에 따라 “다운로드 속도가 느리다”, “화면이 멈춰 있다”, “동영상 플레이가 느리다”, “Real-Time Game이 안된다” 등의 다양한 현상이 나타나고, 이를 해결하기 위해 현재의 서비스 수준이 정상인가를 판단하고 무엇이 문제인가 어디가 문제인가를 진단하여 개선해야 하는 대상을 찾는 일은 매우 복잡하다.

* Dept. of Software Convergence, Jangan University Corresponding author
※ Acknowledgment
This work was supported by Jangan University Research Grant in 2023.
Manuscript received, Dec. 18, 2023; revised, Dec. 21, 2023; accepted, Dec. 26, 2023.

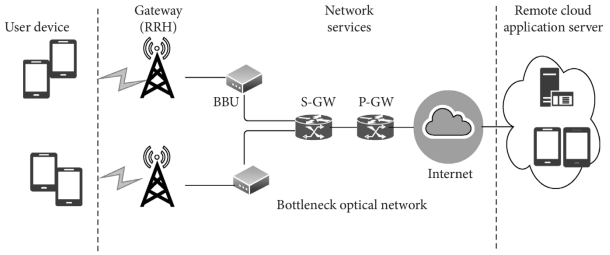


Fig. 1. Mobile communication architecture.
그림 1. 모바일 통신 구조[1]

그림 1과 같은 모바일 통신 네트워크에서의 단대단 지연 시간은 시스템 지연과 네트워크 지연에 의해 발생한다. 시스템 지연은 응용 애플리케이션 서버 단의 프로세싱 지연은 쉽게 진단할 수 있고, 무선망 기지국 단의 지연도 기지국 증설과 최적화를 통해 해소할 수 있다. 이와 달리 사용자의 단말로부터 취합된 패킷 데이터의 용량이 증가하면서 코어 네트워크로 전달하는 중간 링크의 중요성이 대두되었고, 본 논문에서는 중간 링크인 백홀(Backhaul)에서의 서비스 품질 진단기법에 관한 연구를 진행하였다.

II. 모바일 전송 네트워크

1. 백홀 네트워크의 진화

4G LTE 또는 5G의 경우 RAN(Radio Access Network)을 4G EPC(Evolved Packet Core) 및 5G 코어 네트워크에 연결하려면 백홀(Backhaul) 전송 네트워크가 필요하다. 5G는 네트워크 슬라이싱 기술을 통해 다음 세 가지의 주요한 5G 핵심 서비스를 지원하며, 각 서비스는 모바일 데이터가 프런트홀, 미드홀 그리고 백홀 네트워크에서 전송될 때 자체적인 네트워크 성능 요구 사항을 가진다.

모바일 광대역 서비스(eMBB)는 상당한 유선 용량 증가가 필요하다. 초연결 서비스(mMTC)는 수백만에서 수십억 대에 이르는 기계 장치, 대규모 사물 인터넷을 최적으로 연결하기 위해 분석 기반 자동화가 있어야 한다. 초신뢰 저지연 서비스(URLLC)는 매우 낮은 예측 가능 지연 시간 목표를 달성하기 위해 다중 액세스 에지 컴퓨팅(MEC) 및 예측 가능 패킷 광 전송 기술을 필요로 한다.

네트워크 사업자, 모바일 및 도매 사업자 모두는 네트워크 전체 수명 주기 동안 각 네트워크 슬라이스의 성능을 보장할 수 있어야 하는데 이는 유선 도메인에서 특정 트래픽 관리 기능이 프런트홀, 미드홀 및 백홀 네트워크에서 필요함을 의미한다. 이를 통해 이들 네트워크는 단순히 용량을 증가시키는 것을 넘어 효율적으로 기능하여 5G 서비스를 적합하게 지원할 수 있다. 프런트홀 및 미드홀 네트워크와 비교하여 지연 시간 요구 사항이 덜 엄격한 백홀의 경우 용량은 핵심 성능 업그레이드 요소이며 현재의 일반적인 4G LTE는 1GbE, 5G는 10GbE 및 그 이상이다.

4G LTE 환경에서 프런트홀 네트워크는 RRH(Remote Radio Head)를 원거리에 있는 중앙화/클라우드 BBU (BaseBand Units)에 연결하며 백홀 네트워크는 BBU를 다시 4G LTE EPC(Evolved Packet Core)에 연결한다. 5G 환경의 경우에는 NR(New Radio)이 CU(Central Unit) 및 DU(Distributed Unit)로 분리 및 가상화되는 BBU에 연결된다. 새로운 5G eMBB 서비스를 전달하기 위한 백홀 네트워크는 4G LTE 백홀과 비슷하다. 다만 5G NR이 제공하는 높은 성능과 높은 대역폭으로 인해 훨씬 많은 트래픽을 전송한다.

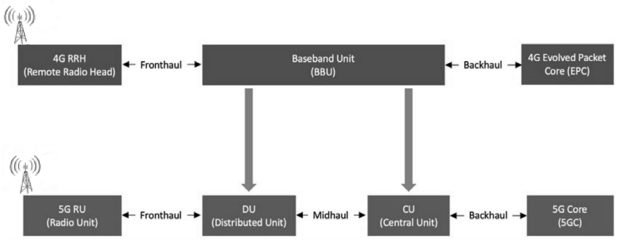


Fig. 2. Evolution from 4G LTE to 5G networks.
그림 2. 4G LTE에서 5G 네트워크로 진화

백홀은 새로운 25GbE, 50GbE 및 궁극적인 400GbE 인터페이스뿐 아니라 1GbE, 10GbE, 및 100GbE 인터페이스로도 제공된다. 전송 거리는 일반적으로 100킬로미터 미만에서 수 백킬로미터에 이르며 더 긴 전송 거리는 일반적으로 플러그형 폼 팩터에서 DWDM 옵틱, 코히어런트 및 비 코히어런트 기술을 사용한다.

보통 10ms에서 300ms인 백홀 지연 시간 요구 사항은 프런트홀 및 심지어 미드홀 네트워크보다 훨씬 엄격하지 않다. 백홀 네트워크는 일반적으로 이더넷 기반이지만, 광케이블에 대한 액세스가 불가능하거나 경제적이지 않은 경우, 다크 파이버(Dark Fiber), 마이크로웨이브 기반 무선 또는 최신 IAB(Integrated Access Backhaul) 기반이 될 수도 있다.

2. 프로토콜 스택

모바일 네트워크는 제어 평면(Control Plane)과 사용자 평면(User Plane)으로 기능을 분리하고, 이동성, 세션

관리는 제어 평면에서 처리하고, 패킷 터널링, 라우팅은 사용자 평면에서 서로 다른 노드로 분리하여 수행한다.

그림 3은 4G LTE의 프로토콜 스택으로 1계층은 물리적 계층, 2계층에는 MAC, RLC, PDCP가 포함되고, 3계층은 RRC이다.

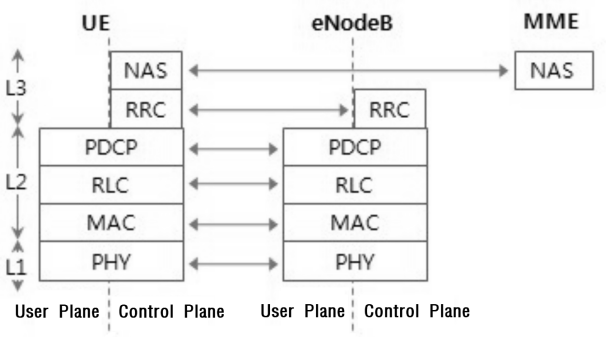


Fig. 3. LTE user plain and control plane protocol stack.
그림 3. LTE 사용자 평면과 제어 평면 프로토콜 스택

그림 4는 5G의 프로코콜 스택으로 3계층은 RRC와 NAS라는 하위 계층으로 구성되어 있다. 3계층은 데이터를 실제로 주고받기 위한 사용자 평면에 대한 프로토콜이 아니라, 제어 신호를 주고받는 제어 평면으로 구성되어 있다. RRC에서는 UE-gNB 간의 하위 계층 인터페이스에 필요한 무선 자원 관리를 담당하고, NAS에서는 UE-Core 네트워크 간의 신호처리를 담당한다. RRC는 UE와 gNB의 연결 상태를 RRC Connected, RRC IDLE, RRC Inactive로 관리하는데 LTE와는 다르게 RRC INACTIVE 상태가 추가되었다. 연결 상태에 따라 RRC 설정값을 조절함으로써, 무선 자원을 관리한다.

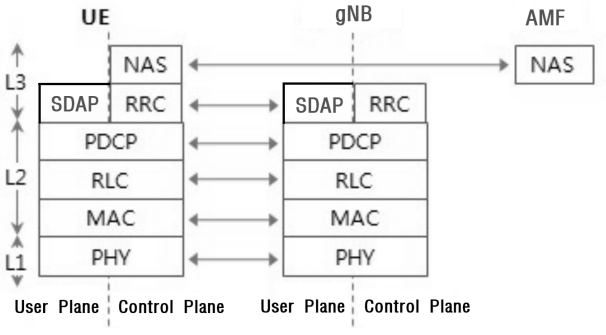


Fig. 4. 5G user plain and control plane protocol stack.
그림 4. 5G 사용자 평면과 제어 평면 프로토콜 스택

Ⅲ. 백홀의 서비스 품질진단

차세대 네트워크의 핵심 인프라는 eMBB(enhanced Mobile BroadBand), URLLC(Ultra Reliable and Low Latency Communication), mMTC(massive Machine Type Communica- tions)이다. 방대한 양의 데이터를 빠르고 안정적으로 처리하기 위해서는 고성능의 백본 네트워크와 고용량의 링크를 사용하여 대역폭을 넓히거나 RTT(Round Trip Time) 최소화하여 지연시간을 줄여야 한다. 표 1은 5G의 기술적인 주요 지표들로 지연시간은 사용자 평면에서는 eMBB 4ms, URLLC 1ms, 제어 평면에서는 eMBB, URLLC 모두 20ms 정도가 요구된다.

Table 1. 5G Key capabilities[3].
표 1. 5G 주요 지표

Key Capabilities	Target Value
Peak Data Rate	DL - min 20 Gbps UL - min 10 Gbps
User experienced Data Rate	DL - 100 Mbps UL - 50 Mbps
Latency	User Plane - min 4ms(eMBB) min 1 ms(URLLC) Control Plane - min 20 ms(both)
Connection Density	10^6 devices/km^2
Reliability	1 ~ 10^5(URLLC)
Mobility	~ 500 km/h
Bandwidth	100 MHz ~ 1 GHz
Area traffic capacity	10 Mbps/m^2

네트워크에서의 처리량(Throughput)은 다양한 형태의 요인들에 의해서 영향을 받는데 사용자 데이터나 시그널링 트래픽은 시스템보다는 단대단 회선 구간 환경에 더 영향을 받는다. 무선품질은 MDT(Minimization of Drive Test)를 이용한 측정 및 분석이 가능하고, 코어 네크워크는 장비 제조사들의 검증 툴, 프로토콜 분석기, 로그나 레포트 기능을 이용하여 분석이 가능하다. 단말기도 제조사의 단말기 상태 진단 툴을 이용한 문제점 분석이 가능하나, 백홀을 포함하여 회선 구간(E2E) 전체를 직접 측정하고 진단하기는 쉽지 않다.

데이터 처리가 기하급수로 증가하면서 백홀 네트워크에서 데이터 처리량(Troughput)은 여러 가지 요소에 의해 크게 영향을 받는다. 첫 번째로 대역폭(Bandwidth)은 요구되는 대역폭보다 작은 용량도 문제이나, 대역폭의 편차가 있을 때 그 크기는 데이터 처리량에 따라 적절하게 구성이 되어야 한다. 두 번째, 버퍼 크기는 512K byte에서 1.0MB로 연결된 NE 수에 따라 다르게 설정되고, 보통 작은 버퍼 크기가 데이터 처리량을 저하하지만,

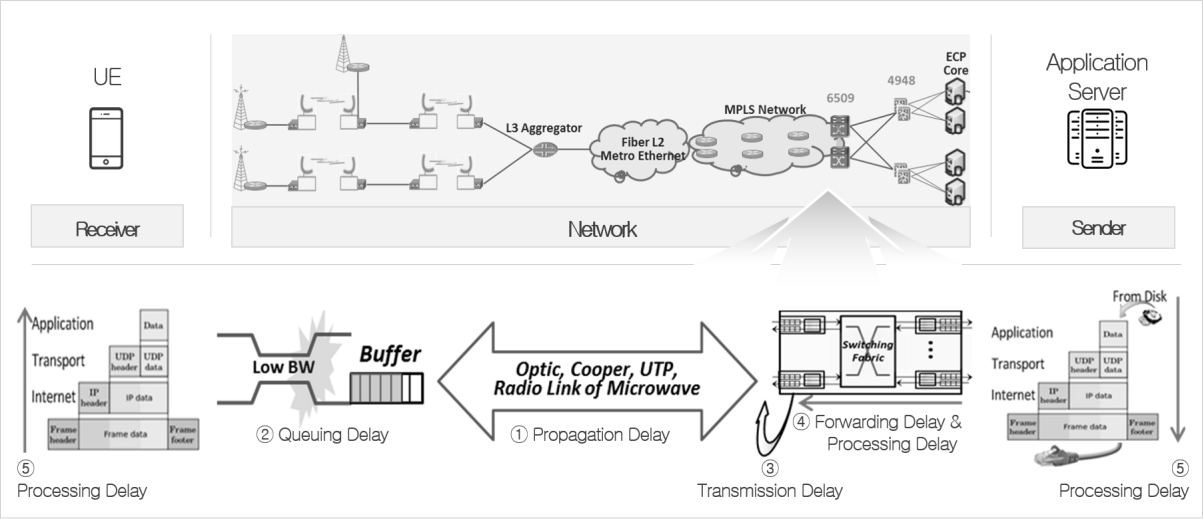


Fig. 6. End to end delay time.
그림 6. 단대단 지연 시간

너무 큰 버퍼 크기가 문제를 야기하기도 한다. 세 번째, 왕복 시간(Round Trip Time, RTT)의 백홀 네트워크에서의 목표는 10ms로 병목현상이 발생하면 큰 영향을 받는다. 네 번째, 버퍼 공유 정책(Buffer sharing policy)은 특정 큐(Queue)에만 적용이 되어야 하고, 각 큐는 eNB별로 구분된다. 마지막으로 파라미터 오류(Wrong parameter) 부분에 있어서, 서비스 정책에 대한 진단을 통해 잘못된 구조와 설정에 대한 조정이 필요하다.

(1) RTT(Round Trip Time) 진단

다음 그림 5의 그래프는 HTTP PLT(Page Load Time)에 대해 대역폭과 RTT의 영향을 나타낸 것이다. PLT는 대역폭이 지극히 작은 경우에는 느려지지만, 특정 대역폭 이상이 되면 영향을 받지 않는 반면에, RTT에는 직접적으로 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다.

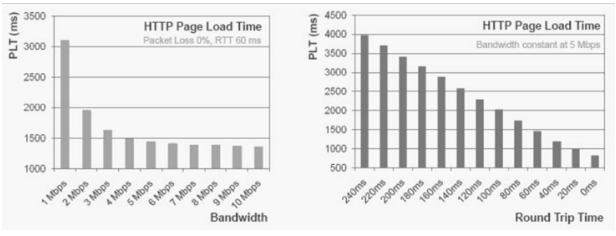


Fig. 5. Changes of Page Load Time by bandwidth and round trip time changes[4].
그림 5. 대역폭, RTT 변화에 따른 페이지 로드 시간(PLT)의 변화

RTT를 고려한 시스템 설계 및 진단 없이 대역폭만을 고려할 경우, 페이지 로딩 타임의 감소를 더 이상 얻을 수 없다는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 5G 백홀 네트워크에서는 이러한 다양한 이슈들을 해결하기 위하여 물리계층, MAC 계층, 네트워크 계층, 전송 계층 등을 비롯한 다양한 관점에서 저지연 네트워크 구성과 서비스에 대한 진단이 필요하다.

단대단 지연은 송신자와 수신자 측의 시스템 지연과 네트워크 지연이 합쳐져서 발행한다. 측정된 RTT는 그림 6에서 보는 바와 같이 프로세싱 지연(Processing Delay), 포워딩 지연(Forwarding Delay), 전송 지연(Transmission Delay), 전파 지연(Propagation Delay), 큐잉 지연(Queuing Delay)을 합쳐서 계산된다. 전파 지연은 광케이블 편도 기준으로 100km를 전송하는 데 약 1ms가 소요된다. 큐잉(버퍼링) 지연은 병목 지점의 트래픽 혼잡으로 인해 발생한다.

(2) 대역폭(Bandwidth) 불일치 진단

처리율 제한(Rate Limit)을 통해 네트워크의 용량을 초과하는 고속을 제한함으로써 네트워크의 안정성을 유지할 수 있으나, 이로 인해 속도 불일치가 발생하고 고속 전송과 처리를 오히려 막을 수 있다.

예를 들어, 그림 7에서와 같이 서버 측의 1Gbps 또는 10Gbps 인터페이스에서는 UE의 처리량이 10Mbps 미만으로 제한되어 있고, 100Mbps의 FTP NIC는 10Gbps 인터페이스보다 더 좋은 처리량(Troughput)을 보이나 FTP 서버 측의 100Mbps 인터페이스에서 UE의 처리량은 35Mbps에서 42Mbps 이다. 이는 클라이언트와 서버 간 속도 불일치로 인해 생기는 혼란이 있을 수 있음을

나타낸다. 패킷 폭주(Packet Burst)로 인해 패킷들이 TCP 윈도우 크기 내의 링크 속도로 전송될 경우에 충분한 버퍼 크기가 없으면 패킷이 버려질 수 있고 특히 10Gbps 인터페이스에서는 버퍼 부족으로 인해 패킷 손실이 더 자주 발생하게 된다.

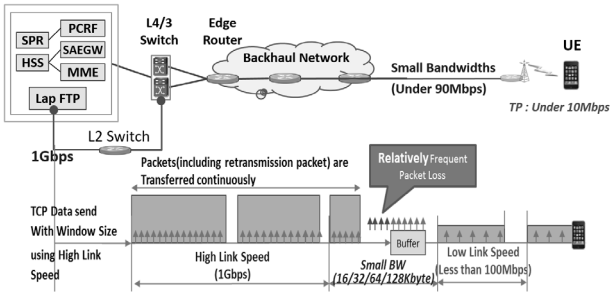
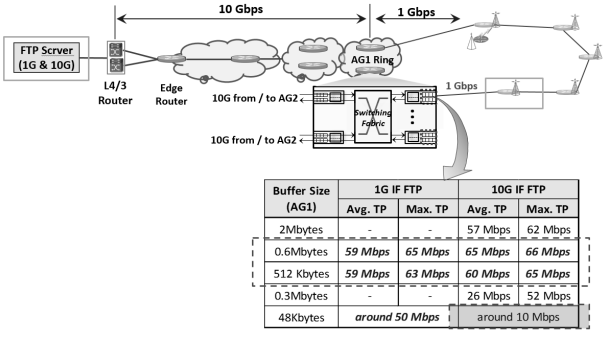


Fig. 7. Bandwidth Mismatch Diagnosis.
그림 7. 대역폭 불일치 진단

이러한 상황에서는 네트워크 속도의 불일치, 속도에 따른 클라이언트 및 서버 간의 처리량 차이, 패킷 폭주로 인한 버퍼 부족 등이 중요한 문제이다. 이를 해결하기 위해서는 네트워크 인프라와 설정을 조정하여 적절한 속도 및 처리량을 달성할 수 있도록 해야 한다.

(3) 버퍼(Buffer) 진단

처리량(Troughput)은 작은 버퍼 크기에 의해서 영향을 받는데 수신측 노드와 네트워크의 특정 위치에서의 버퍼 사이즈가 작을 경우 패킷 드롭에 의한 빈번한 재전송이 발생하여 성능이 저하된다.



Buffer Size (AG1)	1G IF FTP		10G IF FTP	
	Avg. TP	Max. TP	Avg. TP	Max. TP
2Mbytes	-	-	57 Mbps	62 Mbps
0.6Mbytes	*59 Mbps*	*65 Mbps*	*65 Mbps*	*66 Mbps*
512 Kbytes	*59 Mbps*	*63 Mbps*	*60 Mbps*	*65 Mbps*
0.3Mbytes	-	-	26 Mbps	52 Mbps
48Kbytes	*around 50 Mbps*		around 10 Mbps	

Fig. 8. Bottleneck diagnosis between eNB and AG through buffer size adjustment.
그림 8. 버퍼 사이즈 조정을 통한 eNB-AG 간 병목 지점 진단

그림 8은 병목 현상이 마지막 Aggregation Router (집약 라우터)의 외부로 나가는 지점에서 발생한 사례로 이 지점에서는 데이터 흐름이 다른 곳보다 더 느리거나 제한되어 있어 전체 네트워크 성능에 영향을 미친 경우이다. Aggregation Router(집약 라우터)는 백홀(Backhaul) 네트워크에서 중요한 역할을 하는 장비로 이 라우터는 여러 개의 하위 네트워크에서 발생하는 트래픽을 집약하고 결합하여 상위 네트워크로 전달하는 역할을 한다. eNB (기지국)과 AG 사이의 버퍼 크기를 조정함으로써 그림 8에 표현된 표에서 처리량이 개선되는 것을 확인할 수 있다. 그림 9는 FTP 애플리케이션 서버에서 UE까지의 데이터 전송에 대해 버퍼 크기를 변화시키면서 처리량 (Throughput)을 측정한 그래프이다.

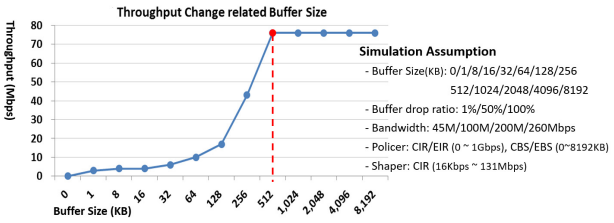


Fig. 9. Throughput variations based on buffer size changes.
그림 9. 버퍼 사이즈 변화에 따른 처리량

반면에 네트워크 장비 내에 불필요하게 큰 버퍼의 설계 시에 버퍼 블로트(Bufferbloat)가 발생할 수 있다. 다중 세션, 다중 사용자 환경에서 이러한 부작용이 쉽게 나타나고, 대규모 FTP 세션이 실행 중인 경우, 서비스 추가 세션의 지연 시간이 길어져 성능이 저하된다.

(4) 백홀 네트워크 진단 절차

애플리케이션 서버의 문제나 무선 네트워크의 문제는 전형적인 방식으로 해결이 가능하나, 백홀 네트워크의 경우에는 연결된 전달 네트워크에 따라 SBS(Synchroniza-

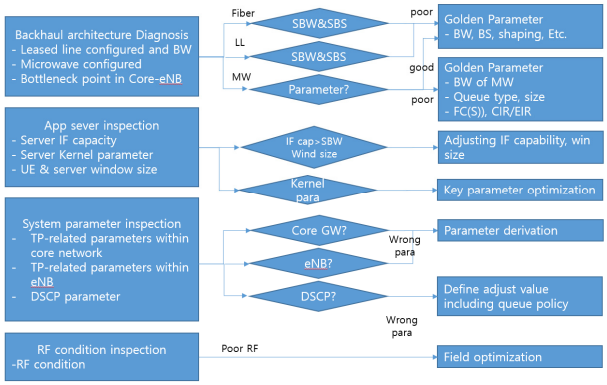


Fig. 10. Backhaul Network Diagnostic Procedure.
그림 10. 백홀 네트워크 진단 절차

tion Burst Signal)와 SBW(Synchronization Burst Window)를 체크하여 해당되는 구간의 해결책을 그림 10으로 정리하였다.

Ⅳ. 결론

백홀(Backhaul)의 요구사항 중 가장 중요한 요소는 저 지연과 고용량을 어떻게 효율적으로 만족시키느냐가 가장 중요한 요소로 판단된다. 백홀 네트워크의 문제점을 해결하기 위해 병목 지점을 우회하거나 완화하고 서비스의 요구 사항 들을 충족할 수 있도록 망의 효율성과 품질을 확보하는 것이 통신 사업자의 주요한 과제일 것이다. 다음 표2는 백홀의 품질을 판단하기 위한 테스트 항목으로 패킷 유실(Packet Loss), Throughput, RTT, 지터(Jitter) 등의 값은 측정 결과를 바로 확인할 수 있고, Rate Limit, 버퍼 크기(Buffer Size), 모바일 장치와 네트워크 간의 데이터 전송을 관리하는 GTP(GPRS Tunneling Protocol) OOS(Out of Sequence), GTP 손실 등은 구간별 점검 결과의 상관관계를 분석하여 판단한다.

Table 2. Performance diagnosis items for the backhaul network.

표 2. 백홀 네트워크의 성능 진단 항목

	Diagnosis items
Factors affecting network performance	Connectivity
	No Route
	Packet Loss (Source- Target: min/max)
	Packet Loss(Hop by Hop: min/max)
	GTP Packet Loss
	GTP Packet OOS
	TCP Packet OOR
	One-Way Latency(min/avg/max/mdev)
	Two-Way Latency(min/avg/max/mdev)
	Throughput-UE (UL/DL)
	Throughput-NE (Tx/Rx)
	Jitter(min/avg/max/mdev)
	Rate Limit
	Buffer Size
	MOS
	MTU Size
	IPTopology
	IP Address Duplication
	Long Count Hop

이를 통해 백홀 네트워크에 대한 경제적인 용량 증설과 네트워크 구성 및 운영의 단순화, 자원 할당의 유연성과 관리 효율의 향상으로 트래픽 증가에 효율적으로 대응할 필요가 있다.

본 논문에서는 RTT를 진단하여 서비스 지연과 성능저하의 원인이 될 수 있는 대역폭 불일치, 구간별 버퍼 진단을 통해 백홀 네트워크에서 문제를 진단할 수 있는 기법에 관해 실제 사례를 통해 연구를 진행하였다. 이후에 네트워크 성능 측정을 위한 프로토콜 중 하나인 TWAMP (Two Way Active Measurement Protocol)를 통한 네트워크의 성능을 측정과 방법과 통합되면, 더욱 효율적인 백홀 네트워크의 서비스 품질진단이 가능할 것이다.

References

[1] S. Math, L. Zhang, S.H. Kim and I.T. Ryoo, “An Intelligent Real-Time Traffic Control Based on Mobile Edge Computing for Individual Private Environment,” *Security & Communica-tion Networks*, vol.2020, pp.1-11, 2020. DOI:10.1155/2020/8881640

[2] M. Jaber, M. Ali Imran, R. Tafazolli, A. Tukmanov, “5G Backhaul Challenges and Emerging Research Directions: A Survey,” *IEEE Access*, vol.4, pp.1743-1766, 2016. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2556011

[3] *IMT Vision - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond*, M.2083

[4] Walter Haeffner, “Networks at the Speed of Light pave the way for the tactile internet” *Symposium Das Taktile Internet*, 2013.

[5] Raza H., “A brief survey of radio access network backhaul evolution: Part II.,” *IEEE Communications Magazine,* vol.51, no.5, pp.170-177, 2013. DOI: 10.1109/MCOM.2013.6515062

[6] D. Bojic et al., “Advanced wireless and optical technologies for small-cell mobile backhaul with dynamic software-defined management,” *IEEE Communications Magazine*, vol.51, no.9, pp.86-93, 2013. DOI: 10.1109/MCOM.2013.6588655

[7] U. Siddique, H. Tabassum, E. Hossain and D. I. Kim, “Wireless backhauling of 5G small cells: challenges and solution approaches,” *IEEE Wireless*

Communications, vol.22, no.5, pp.22-31, 2015.
DOI: 10.1109/MWC.2015.7306534.
[8] A. Gupta and R. K. Jha, "A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies," *IEEE Access*, vol.3, pp.1206-1232, 2015.
DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2461602.
[9] Orainy AAA., "Wireless backhauling for 5G small cell networks," *International Journal of Electronic and Communication Engineering*, vol.10, no.2, 2016. DOI: 10.5281/zenodo.1111719
[10] H. Dahrouj, A. Douik, F. Rayal, T. Y. Al-Naffouri and M. -S. Alouini, "Cost-effective hybrid RF/FSO backhaul solution for next generation wireless systems," *IEEE Wireless Communications*, vol.22, no.5, pp.98-104, 2015.
DOI: 10.1109/MWC.2015.7306543.

BIOGRAPHY

Ji-Hyun Yoo (Member)

1995 : BS degree in Computer Science and Engineering, Hanyang University.
2000 : MS degree in Computer Science and Engineering, Hanyang University.
2012 : PhD degree in IT Service Management, Soongsil University.
2014~ : Professor in the Department of Software Convergence, Jangan University