

볼류메트릭 영상 스트리밍 환경에서 단말 처리 성능이 ABR 알고리즘의 동작에 미치는 영향 분석

유 상 우*, 홍 원 기^o

Analysis of the Impact of Client Computing Capability on ABR Algorithm Behaviors in Volumetric Video Streaming

Sangwoo Ryu*, James Won-Ki Hong^o

요 약

최근 몰입형 미디어 기술의 발전으로 인해 대용량의 볼류메트릭 데이터를 원활하게 제공할 수 있는 효율적인 전송 기술이 중요해지고 있다. 기존 비디오 스트리밍 시스템은 네트워크 변동성에 대응하기 위해 대역폭 또는 버퍼 기반의 적응형 비트레이트 알고리즘을 사용했다. 그러나 볼류메트릭 영상은 디코딩 및 렌더링 과정에서 많은 연산을 요구하며, 네트워크 대역폭이 충분한 상황에서도 단말의 컴퓨팅 성능 한계로 스트리밍 품질이 저하될 수 있다. 본 연구에서는 이러한 단말의 처리 성능이 볼류메트릭 영상 스트리밍 환경에서 ABR 알고리즘의 동작 특성 및 스트리밍 품질에 미치는 영향을 실험적으로 분석한다. 이를 위해 DASH 기반의 볼류메트릭 영상 스트리밍 시스템을 구축하고, 서로 다른 성능을 가진 단말 환경과 정적, 동적인 네트워크 시나리오에서 주요 ABR 알고리즘들의 성능을 평가 및 분석하였다. 이를 통해 볼류메트릭 영상 스트리밍에서 네트워크 지표 뿐만 아니라 단말의 성능, 볼류메트릭 영상 스트리밍의 특성들을 종합적으로 고려하는 적응형 스트리밍의 필요성을 제시하였다.

Key Words : Volumetric Video Streaming, Adaptive Bitrate Streaming, Quality of Experience

ABSTRACT

With the recent advancements in immersive media technology, efficient transmission technology that can smoothly provide large amounts of volumetric data is becoming increasingly important. Conventional video streaming systems have employed bandwidth- or buffer-based adaptive bitrate algorithms to cope with network fluctuations. However, in volumetric video streaming, which involves compute-intensive tasks such as decoding and rendering, streaming quality may degrade due to limited computing capability, even with sufficient network bandwidth. This study analyzes the impact of client computing capability on the Adaptation behavior of ABR algorithms and streaming quality in a volumetric video streaming system. We implemented a DASH-based volumetric video streaming system to evaluate ABR algorithms across diverse device and network conditions. We highlight the necessity for adaptive streaming strategies that consider client performance and volumetric video characteristics along with network metrics.

※ 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원(IITP-2025-RS-2024-00437866, 50%)과 삼성전자의 지원(50%)을 받아 수행된 연구임

• First Author : Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Graduate School of Artificial Intelligence, rswoo@postech.ac.kr

^o Corresponding Author : POSTECH, Department of Computer Science and Engineering, jwkhong@postech.ac.kr

논문번호 : KNOM2025-02-003, Received November 3, 2025; Revised November 25, 2025; Accepted December 06, 2025

I. 서 론

지속적인 통신 네트워크 기술의 고도화와 함께, 사용자에게 시청 이상의 경험을 제공하는 차세대 실감형 미디어 서비스가 빠르게 확산되고 있다. 특히 볼류메트릭 영상(Volumetric Video)은 포인트 클라우드(Point Cloud), 메쉬(Mesh)와 같은 3차원 데이터로 구성된 영상으로, 현실 세계의 물체, 움직임 등을 가상 세계로 가져와 자유로운 시점으로 몰입형 경험을 제공하는 핵심 기술이다. 하지만 이러한 고품질의 볼류메트릭 영상을 제공하기 위해서는 대규모 데이터 전송 능력 뿐만 아니라 수신된 데이터를 처리하고 렌더링하기 위한 컴퓨팅 자원이 필수적으로 요구된다.

미가공(Raw) 상태의 볼류메트릭 영상은 수 Gbps에서 수십 Gbps 고대역폭을 요구한다 [1]. 데이터 전송 효율을 높이기 위해 Draco [2]와 같은 고효율 압축 알고리즘이나 사용자 시야 영역만을 전송하는 뷰포트 적응(Viewport-adaptive) 기법 등이 적용되고 있지만 [3], 여전히 높은 대역폭을 필요로 한다. 그러나 실제 통신 환경에서 이러한 높은 요구량을 지속적으로 보장하기는 어려우며, 일시적인 대역폭 부족만으로도 재생 끊김(Stalling)과 같은 사용자 경험(Quality of Experience) 저하가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 현재의 비디오 스트리밍 서비스는 네트워크 상태에 따라 최적의 품질을 동적으로 선택하는 ABR(Adaptive Bitrate) 알고리즘을 사용하며, 볼류메트릭 영상 스트리밍에서도 필수적인 요소이다.

그러나 기존의 ABR 알고리즘들은 주로 2D 비디오를 위해 설계되어, 비트레이트 결정 시 주로 네트워크 대역폭과 버퍼 상태를 고려하고, 단말의 부하는 효과적으로 반영하지 못한다. 볼류메트릭 데이터는 디코딩 및 3D 렌더링 과정에서 많은 연산을 요구하고, 단말의 처리 성능 부족은 시스템의 병목으로 이어진다. 이는 고품질의 데이터를 받을 수 있는 안정적인 네트워크 상황에서도 낮은 프레임 속도(FPS, Frame per second)로 인한 사용자 경험 저하를 초래한다.

볼류메트릭 영상 서비스는 고성능 데스크톱부터 모바일 기기, HMD(Head Mounted Display)까지 다양한 단말 환경을 목표로 하며, 고사양 환경에서는 드러나지 않던 ABR 알고리즘의 비효율성이 자원이 제한된 단말에서는 성능 저하로 이어질 수 있

다. 따라서 범용적인 볼류메트릭 스트리밍 서비스를 위해서는 서로 다른 단말 환경에서 기존 ABR 알고리즘이 실제로 어떻게 반응하고 동작하는지에 대한 성능 평가가 필요하다.

따라서 본 연구는 볼류메트릭 영상 스트리밍 환경에서 단말의 컴퓨팅 성능이 ABR 알고리즘의 동작 및 스트리밍 품질에 미치는 영향을 실험적으로 분석한다. 특히 새로운 ABR 알고리즘을 제안하기 앞서 컴퓨팅 자원 제약이 기존 ABR 알고리즘에 주는 부정적인 영향을 정량적으로 분석하는데 초점을 맞춘다. 이를 위해 서로 다른 성능을 가진 두 가지 단말 환경에서 대표적인 ABR 알고리즘인 대역폭 기반(Throughput-based), 버퍼 기반(Buffer-based), 그리고 하이브리드(Hybrid) 알고리즘의 성능을 비교 평가한다. 이를 통해 향후 볼류메트릭 영상 스트리밍 시스템이 네트워크 상태 뿐만 아니라 단말의 자원 상태까지 인지할(Device-aware) 필요성을 제시한다. 본 연구의 기여는 다음과 같다.

- 1) 안정적 및 동적 네트워크 환경에서 볼류메트릭 영상 적응형 스트리밍을 수행하는 테스트베드를 구축하고 서로 다른 성능의 단말에서 ABR 알고리즘의 성능을 분석
- 2) 비트레이트, FPS, 총 재생 시간 등 성능 지표를 통해 병목 환경에서 기존 ABR 알고리즘들의 비효율성을 확인하고, 향후 단말 인지형 스트리밍 시스템의 필요성 강조

II. 관련 연구

본 장에서는 볼류메트릭 영상 스트리밍 연구 현황과 적응형 비트레이트 알고리즘을 설명한다.

1) 볼류메트릭 영상 스트리밍

볼류메트릭 영상은 3차원 공간 정보 및 색상 정보를 포함하고 있어, 기존 2D 영상 대비 막대한 데이터 전송량을 요구하며, 이를 효율적으로 전송하기 위한 연구들이 진행되었다.

초기 연구인 ViVo [3]는 사용자 시점 및 가려짐 여부, 거리 기반 처리를 통해 대역폭을 절감했으며, GROOT [1]는 사용자 시점 처리에 더해 효율적인 PD 트리 기반 압축 방식 제안으로 대역폭을 절감하였다. Vues [4]는 고효율 코덱을 이용하여, YuZu [5]는 3D 초해상화를 이용해 대역폭을 절감하는 시스템을 제안하였다. 또한 PCC-DASH [17],

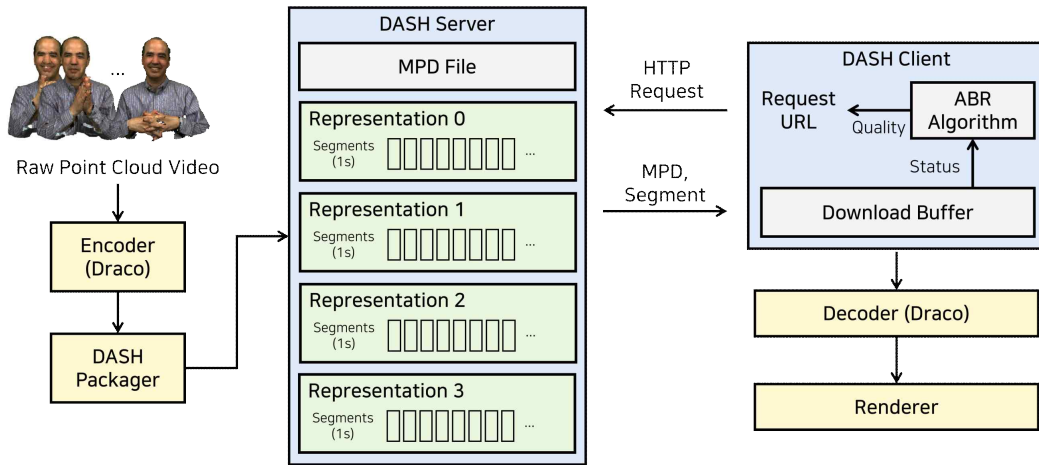


그림 1. DASH 기반 볼류메트릭 영상 스트리밍 시스템 구조
Fig. 1. DASH-based Volumetric Video Streaming System Architecture

DASH-PC [18], VV-DASH [19]와 같이 적응형 스트리밍 기술을 볼류메트릭 영상에 적용하려는 시도들도 있었다. 이 연구들은 DASH 표준을 확장하여 다중 화질을 표현하는 방식에 집중하였다. 이러한 시스템들은 Draco [2], V-PCC [6]와 같이 압축을 위한 인코딩/디코딩 알고리즘을 활용하기 때문에, 클라이언트에서 디코딩 및 렌더링을 위한 연산이 필수적으로 수반된다. 따라서 볼류메트릭 영상 시스템에서 고품질 스트리밍을 보장하기 위해서는 대역폭 절감을 넘어, 단말의 연산 능력까지 고려한 적응형 스트리밍 전략이 요구된다.

2) 적응형 비트레이트(ABR) 알고리즘

변화하는 네트워크 환경에서 끊김 없는 재생을 제공하기 위해, HTTP 적응형 스트리밍 기술인 MPEG-DASH(Dynamic Adaptive Streaming over HTTP) [7]가 널리 사용된다. MPEG-DASH에서는 영상을 수 초 길이의 세그먼트로 분할하고 다양한 화질로 인코딩되며, 클라이언트가 ABR 알고리즘을 이용해 최적의 화질을 선택하여 다운로드 및 재생한다. 기존 ABR 알고리즘은 크게 대역폭 기반(Throughput-based)과 버퍼 기반(Buffer-based) 알고리즘으로 분류된다.

대역폭 기반 알고리즘은 이전 세그먼트의 다운로드 속도를 이용해 대역폭을 추정하여 가능한 대역폭 내에서 화질을 선택한다. 이런 대역폭 기반 알고리즘은 네트워크 자원을 최대로 활용할 수 있지만, 네트워크 변동에 민감해 불안정성을 보일 수 있다. 버퍼 기반 알고리즘은 재생 버퍼량을 기준으로 화질을 선택하며, 대표적으로 BOLA [8] 알고리즘은

최적화 기법을 이용해 재생 안정성을 확보하였다. 또한 대역폭과 버퍼 상태를 동시에 고려해 사용자 경험(QoE)을 최적화하는 시도들도 있었다. MPC [9]는 대역폭 및 버퍼 상태를 함께 이용하고, QoE 식을 정의해 QoE를 최대화하는 화질을 선택한다. 최근에는 Pensieve [10]와 같이 강화학습을 이용한 방법도 제시되었다.

이러한 기존 알고리즘들은 주로 2D 영상 스트리밍을 위해 설계되었으며, 대부분 네트워크 대역폭 및 버퍼 점유율을 이용해 품질을 결정한다. 볼류메트릭 영상과 같이 디코딩 및 렌더링 등으로 인해 단말의 부하가 추가적으로 존재할 수 있는 환경에서는 단말의 상태를 충분히 반영하지 못해 사용자 경험을 저해할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 단말의 컴퓨팅 성능이 기존 대역폭 및 버퍼 중심 ABR 알고리즘의 동작과 볼류메트릭 영상 스트리밍 품질에 어떤 영향을 미치는지에 대한 정량적인 분석을 제시한다.

III. 시스템 설계

이 장에서는 ABR 알고리즘의 성능 평가를 위해 설계한 볼류메트릭 영상 스트리밍 시스템과 ABR 알고리즘을 서술한다.

1) 볼류메트릭 영상 스트리밍 시스템

그림 1은 볼류메트릭 영상 스트리밍 시스템의 전체 구조를 보여준다. 이 시스템은 HTTP 서버 및 클라이언트로 구성된 DASH 기반의 적응형 스트리밍 구조를 따른다.

서버 측에서는 적응형 스트리밍을 지원하기 위해

원본 포인트 클라우드 영상에서 각 프레임마다 포인트의 개수를 10%, 40%, 70%, 100%로 샘플링하여 총 4가지의 화질의 영상을 생성하였다. 각 화질의 포인트 클라우드 영상은 Draco 인코더를 이용해 압축되며, 압축된 데이터는 1초 단위의 고정된 길이를 갖는 세그먼트로 패키징된다. 이 과정에서 영상의 비트레이트, 세그먼트 URL 등의 스트리밍에 필요한 메타데이터를 포함하는 MPD(Media Presentation Description) 파일이 함께 작성된다.

클라이언트는 ABR 알고리즘을 이용해 네트워크 상태에 따른 최적의 화질을 선택한다. 이를 위해 서버로부터 MPD 파일을 수신 및 파싱하고, 선택된 화질에 해당하는 세그먼트의 URL로 HTTP 요청을 전송한다. 수신된 세그먼트는 프레임 단위로 분할해 다운로드 버퍼에 저장되며, 비동기적으로 동작하는 디코더 및 렌더러를 거쳐 화면에 시각화한다.

2) 적응형 비트레이트 알고리즘

본 연구에서는 단말의 컴퓨팅 병목이 적응형 스트리밍에 미치는 영향을 분석하기 위해 세 가지 유형의 ABR 알고리즘을 사용하였다.

첫 번째는 대역폭 기반(Throughput-based, TB) 알고리즘이다. 대역폭 기반 알고리즘에서는 이전 세그먼트들의 다운로드 속도를 기반으로 대역폭을 추정하고 비트레이트를 결정한다. 본 연구에서는 추정된 대역폭($T_{measured}$)의 95% 내에서 가장 좋은 화질의 세그먼트를 선택하도록 하였다.

$$B_{TB} = \max \{b \in B_{avail} \mid b \leq 0.95 \times T_{measured}\}$$

두 번째는 버퍼 기반(Buffer-based, BB) 알고리즘이다. 버퍼 기반 알고리즘에서는 클라이언트의 현재 다운로드 버퍼 점유율(L_{buf})을 기준으로 비트레이트를 결정하며, 본 연구에서는 다운로드 버퍼 점유율의 기준을 20%, 50%, 70%로 설정하고 구간에 따라 화질을 선택하였다.

$$B_{BB} = \begin{cases} \text{Quality 0, when } L_{buf} < 0.2 \\ \text{Quality 1, when } 0.2 \leq L_{buf} < 0.5 \\ \text{Quality 2, when } 0.5 \leq L_{buf} < 0.7 \\ \text{Quality 3, when } 0.7 \leq L_{buf} \end{cases}$$

세 번째는 대역폭 기반 알고리즘과 버퍼 기반 알고리즘을 모두 사용하는 하이브리드(Hybrid, HB) 알고리즘이다. 두 알고리즘의 결과값 중 더 낮은 값을 선택하도록 하여, 각 알고리즘에서의 위험 신호를 모두 받아들이는 안전한 선택을 하도록 하였다.

$$B_{HB} = \min(B_{TB}, B_{BB})$$

IV. 시스템 구현

이 장에서는 볼류메트릭 영상 스트리밍 시스템의 서버, 클라이언트에 대한 구체적인 구현 방식을 설명한다.

1) 서버

볼류메트릭 영상의 적응형 스트리밍을 위한 DASH 서버는 Go 언어 [11]로 구현하였다. 볼류메트릭 영상으로는 MVUB(Microsoft Voxalized Upper Bodies) 데이터셋 [12]의 Phil-9 영상을 사용했으며, 프레임 당 평균 33.4만 개의 포인트로 구성되어 있다. 총 245 프레임(30 FPS에서 약 8초) 길이의 영상을 반복해 총 1800 프레임 길이의 영상으로 수정하였다. 원본 볼류메트릭 영상을 여러 화질로 샘플링하기 위해서 Open3D [13] 라이브러리를 사용했으며, 각 화질에 대한 프레임 당 용량 및 대역폭 정보는 표 1과 같다. 볼류메트릭 영상의 각 프레임을 Draco 코덱을 이용해 압축하기 위해서 DracoPy [14] 라이브러리를 사용하였다. 압축 후 각 화질에 대한 프레임 당 용량 및 대역폭 정보는 표 2와 같다. 적응형 스트리밍을 위한 세그먼트의 길이는 1초(30 프레임)으로 설정하였다.

표 1. 여러 품질로 제작된 포인트 클라우드 정보 (압축 전)
Table 1. Point cloud information with different quality (Before Compression)

Quality Level	Avg. # of Points	Avg. Size (MB)	Mbps @30Hz
0	33,360	0.68	170.36
1	133,443	2.71	681.32
2	233,525	4.74	1192.28
3	333,608	7.09	1783.29

표 2. 여러 품질로 제작된 포인트 클라우드 정보 (압축 후)
Table 2. Point cloud information with different quality (After Compression)

Quality Level	Avg. # of Points	Avg. Size (MB)	Mbps @30Hz
0	33,360	0.20	50.30
1	133,443	0.72	179.98
2	233,525	1.20	301.19
3	333,608	1.66	418.49

2) 클라이언트

블류메트릭 영상의 적응형 스트리밍을 위한 DASH 클라이언트는 Python으로 구현하였다. 세그먼트 다운로드, 디코딩, 렌더링으로 구성되는 클라이언트의 파이프라인을 효율적으로 수행하기 위해 asyncio(Python 내장), aiohttp [15]와 같은 비동기 라이브러리와 멀티프로세싱을 사용하였다. 다운로드 버퍼의 크기는 15초(450 프레임)로 설정하였다. 프레임 디코딩을 위해서는 DracoPy [14] 라이브러리를, 렌더링을 위해서는 Open3D [13] 라이브러리를 사용하였다.

V. 실험 환경

이 장에서는 블루메트릭 영상 스트리밍 시스템에서 단말의 성능이 ABR 알고리즘에 미치는 영향을 분석하기 위한 실험 환경을 설명한다.

1) 테스트베드 구성

단말의 컴퓨팅 성능에 따른 ABR 알고리즘의 차이를 분석하기 위해 서로 다른 하드웨어 사양을 가진 두 개의 물리적 단말에 시스템을 설치하였다.

- 단말 A (고성능): AMD Ryzen 9 7900 CPU, RTX 5080 GPU, 64GB RAM
- 단말 B (저성능): Intel Xeon(R) Silver 4125R CPU, Quadro RTX 5000 GPU, 64GB RAM

표 3은 두 단말에서 고정된 화질을 사용하는 경우 파이프라인 전체의 처리 성능(FPS)을 보여준다.

표 3. 각 품질별 단말의 처리 성능 (FPS)

Table 3. Processing performance of each device by quality level (FPS)

Quality Level	Device A (High-end)	Device B (Low-end)
0	29.36	29.06
1	29.64	26.88
2	27.30	19.47
3	26.99	15.00

실험 환경의 일관성을 위해 본 연구에서는 Docker [16] 기반의 가상화 환경을 이용하였다. 각 단말은 서버, 클라이언트, 네트워크 에뮬레이터를 모두 독립된 Docker 컨테이너를 이용해 구동하였다. 블루메트릭 영상의 렌더링은 헤드리스(Headless) 모

드로 이루어졌으며, 리눅스의 TC (Traffic Control) 유틸리티를 이용해 Docker 네트워크 내에서 클라이언트의 수신 대역폭을 제어하였다.

2) 네트워크 시나리오

단말의 컴퓨팅 성능에 따른 ABR 알고리즘의 차이를 분석하기 위해 두 가지 네트워크 시나리오를 정의하였다.

- 시나리오 1 (정적 네트워크): 대역폭을 1Gbps로 고정하여 모든 품질의 블루메트릭 영상을 제공할 수 있게 하였다.
- 시나리오 2 (동적 네트워크): 블루메트릭 영상의 화질 별 대역폭을 고려해, (600Mbps, 400Mbps, 200Mbps, 100Mbps)의 대역폭을 (5초, 5초, 5초, 10초) 주기로 반복하는 시나리오를 구성하였다.

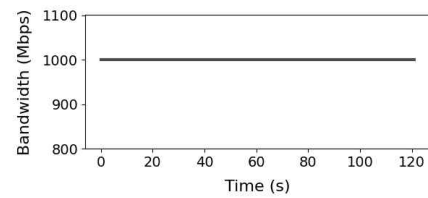


그림 2. 시나리오 1 (정적 네트워크)
Fig. 2. Scenario 1 (Stable Network)

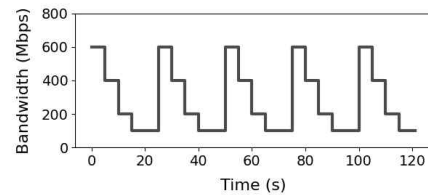


그림 3. 시나리오 2 (동적 네트워크)
Fig. 3. Scenario 2 (Dynamic Network)

3) 실험 과정 및 평가 지표

단말의 성능, 네트워크 시나리오, ABR 알고리즘을 조합하여 총 12가지 경우에 대해 실험을 수행하였다. 각 실험에서는 목표 재생 시간이 60초인(총 1800 프레임) 블루메트릭 영상을 끝까지 재생하며 평가 지표를 수집하였다. 본 연구에서는 평균 비트레이트(Average Bitrate), 평균 프레임 속도(Average FPS), 총 재생 시간(Total Playback Time)의 총 세 가지 성능 지표를 수집하였다. 평균 비트레이트는 ABR 알고리즘이 선택한 세그먼트의 평균 화질 수준을 나타낸다. 평균 프레임 속도는 실제 렌더링된 초당 프레임 수로, 30 FPS의 원본 영상과 비교했을 때 병목 여부를 보여준다. 총 재생 시간은 1800 프

표 4. 정적 네트워크 환경에서 단말 성능에 따른 스트리밍 품질

Table 4. Streaming quality by device capability under stable network conditions

ABR	Device	Bitrate (Mbps)	FPS	Total Playback Time (s)
Throughput-based	High-end	414.54	27.13	66.38
	Low-end	414.54	16.40	109.82
Buffer-based	High-end	368.24	27.74	64.92
	Low-end	366.28	17.38	103.62
Hybrid	High-end	368.24	27.88	64.60
	Low-end	366.28	17.64	102.11

표 5. 동적 네트워크 환경에서 단말 성능에 따른 스트리밍 품질

Table 5. Streaming quality by device capability under dynamic network conditions

ABR	Device	Bitrate (Mbps)	FPS	Total Playback Time (s)
Throughput-based	High-end	210.48	28.30	63.64
	Low-end	191.00	23.73	75.91
Buffer-based	High-end	253.08	28.37	63.48
	Low-end	299.01	20.35	88.49
Hybrid	High-end	181.33	28.90	62.32
	Low-end	167.39	24.63	73.13

레이م 길이의 영상을 모두 재생하는데 소요된 시간으로, 목표 재생 시간인 60초와 비교했을 때의 지연을 보여준다.

VI. 실험 결과 및 분석

1) 단말 성능이 스트리밍 품질에 미치는 영향

단말의 컴퓨팅 성능 차이가 스트리밍 품질에 미치는 영향을 분석하기 위해 네트워크 대역폭이 충분한 상황(시나리오 1)에서 고성능 단말과 저성능 단말의 성능을 분석하였다. 표 4는 각 ABR 알고리즘에서 고성능, 저성능 단말의 볼류메트릭 영상 스트리밍 성능을 보여준다.

고성능 단말(High-end)의 경우, 세 가지 ABR 알고리즘 모두 최고 화질을 선택하였으며, 약 27 FPS의 부드러운 재생 성능을 보였고, 총 재생 시간 역시 약 64~66초로 측정되어 목표 재생 시간인 60초에 근접한 성능을 보여주어 안정적으로 스트리밍이 진행되었음을 확인하였다.

반면에 저성능 단말(Low-end)의 경우 성능 저하가 관찰되었다. 충분한 네트워크 환경에 따라 세 가지 ABR 알고리즘 모두 최고 화질을 선택하였으나, 단말의 디코딩, 렌더링 과정에서 처리의 한계로 평균 FPS는 16~17을 보였으며, 렌더링 지연으로 인해 총 재생 시간이 100초 이상으로 측정되었다. 그

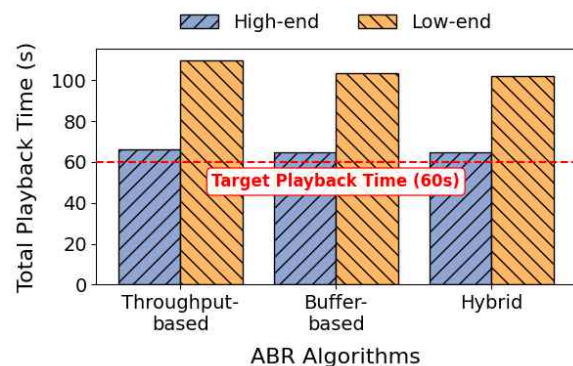


그림 4. 정적인 네트워크 상황에서 단말 성능에 따른 총 재생 시간

Fig. 4. Total playback time by device capability under stable network conditions

림 4는 이러한 총 재생 시간의 격차를 보여준다.

이는 네트워크 상태 혹은 버퍼 상태를 이용하는 기존 ABR 알고리즘이 볼류메트릭 영상과 같이 연산 부하가 있는 환경에서는 올바르게 동작하지 못하고 사용자 경험을 최적화하지 못한다는 것을 보여준다.

2) 동적 네트워크 상황에서 ABR 알고리즘 분석

동적 네트워크 환경에서 단말의 컴퓨팅 성능이 ABR 알고리즘의 동작에 미치는 영향을 분석하기 위해, 대역폭이 수시로 변동하는 상황(시나리오 2)

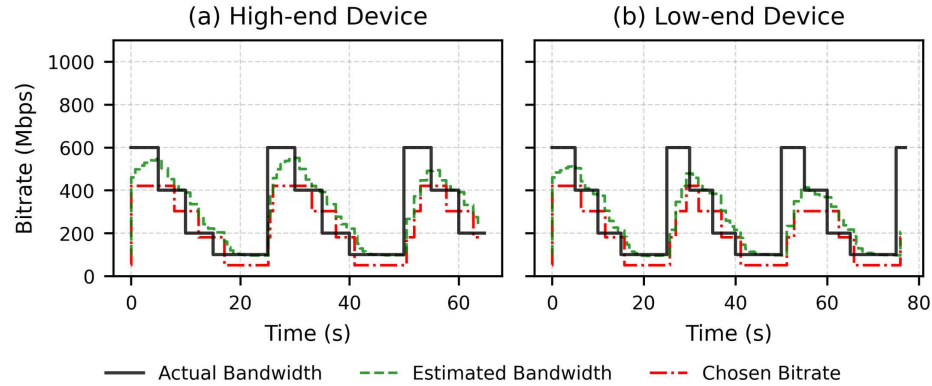


그림 5. 동적인 네트워크 상황에서 대역폭 기반 알고리즘의 단말 성능별 비트레이트 선택
Fig. 5. Bitrate selection of Throughput-based algorithm by device capability under dynamic network conditions

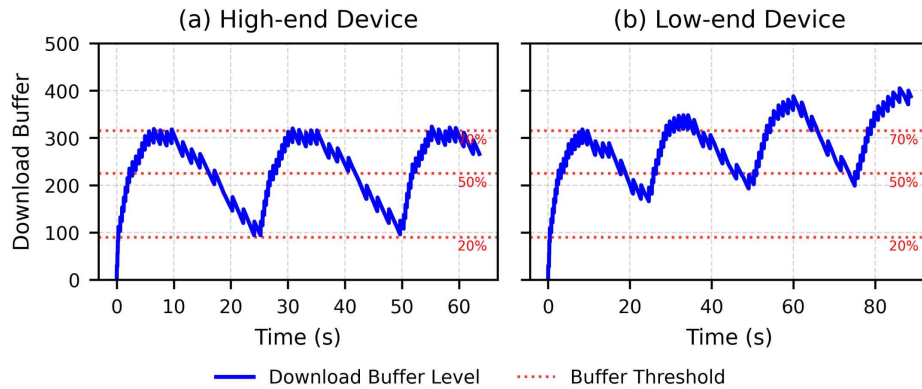


그림 6. 동적인 네트워크 상황에서 버퍼 기반 알고리즘의 단말 성능별 버퍼 점유율
Fig. 6. Download buffer occupancy of Buffer-based algorithm by device capability under dynamic network conditions

에서 고성능 단말과 저성능 단말의 성능을 분석하였다. 표 5는 동적 네트워크 환경에서 각 ABR 알고리즘에 따른 고성능, 저성능 단말의 볼류메트릭 영상 스트리밍 성능을 보여준다. 정적 네트워크 환경과 달리, 동적 네트워크 환경에서는 대역폭 변동으로 인한 비트레이트 조정이 있었다. 전반적으로 낮은 화질의 선택이 저성능 단말의 처리 부담을 줄여서 평균 FPS와 총 재생 시간은 개선되었지만, 세부적인 적응 방식은 ABR 알고리즘마다 다른 특성을 보였다.

먼저 대역폭 기반 알고리즘은 그림 5와 같이 고성능 단말과 저성능 단말 모두 대역폭에 따라 비트레이트를 조절하는 모습을 보였다. 고성능 단말은 평균 28.30 FPS의 재생 성능과 총 재생 시간 약 63초로 안정적인 ABR 동작을 보여주었다. 저성능 단말에서 역시 대역폭에 따라 적절하게 비트레이트

를 조절하였지만, 평균 비트레이트는 약 20Mbps 낮게 측정되었다. 이는 저성능 단말에서 디코딩, 렌더링에서의 처리 부하로 인해 시스템 자원이 포화되어 네트워크 I/O 처리가 지연되었고, 다운로드 속도가 느리게 측정되어 가용 대역폭 또한 낮게 추정되는 구간이 발생했기 때문이다.

버퍼 기반 알고리즘에서는 저성능 단말이 299.01Mbps의 비트레이트로 고성능 단말의 253.08Mbps보다 높은 비트레이트를 보였다. 그림 6은 동적 네트워크 상황에서 버퍼 기반 알고리즘의 버퍼 점유율 추이를 보여주며, 이러한 대조적인 비트레이트 선택에 대한 원인을 보여준다. 고성능 단말(그림6-(a))은 디코딩 및 렌더링으로 인한 부하가 거의 없기 때문에 네트워크 상황의 악화로 다운로드 속도가 느려지는 구간에서는 확보된 프레임을 원활하게 소비하며 유동적인 등락을 보였다. 반면에

저성능 단말(그림6-(b))는 디코딩 및 렌더링으로 인한 부하로, 버퍼에 확보된 고품질 프레임을 원활하게 소비하지 못하였으며, 버퍼 점유율이 점차 상승하는 경향을 보였다. 이러한 버퍼 점유율의 증가는 단말의 컴퓨팅 성능이 부족한 상황에서 버퍼 기반 알고리즘이 고화질 세그먼트의 요청을 지속하게 하는 원인이 되었다.

하이브리드 알고리즘에서는 대역폭과 버퍼 지표를 둘 다 이용하여 안전한 선택을 하기 때문에, 고성능과 저성능 단말 모두 가장 낮은 평균 비트레이트를 보였다. 이에 따라 대역폭 기반 알고리즘과 버퍼 기반 알고리즘보다 높은 FPS와 짧은 총 재생 시간이 측정되었으며, 이는 재생 안정성을 위해서는 단말의 컴퓨팅 성능에 따른 비트레이트 조절이 필요함을 보여준다.

VII. 논 의

본 연구의 실험 결과는 볼류메트릭 영상 스트리밍과 같이 디코딩, 렌더링으로 인해 단말 병목이 발생할 수 있는 상황에서 대역폭, 버퍼 등의 지표를 이용하는 기존 ABR 알고리즘들이 실제 재생 성능을 반영하지 못하고 선택을 내린다는 것을 보여준다. 특히 버퍼 기반 ABR 알고리즘은 디코딩 및 렌더링 부하로 인해 생긴 버퍼 점유율의 상승을 안정 상태로 판단하여 고화질의 세그먼트를 지속적으로 요청하였으며, 대역폭 기반 알고리즘 역시 시스템 부하로 인해 영향을 받는 모습을 보여주었다. 이는 볼류메트릭 영상 스트리밍 같이 많은 연산이 필요한 미디어 서비스에서는 네트워크 지표만으로는 사용자 경험 보장이 어려우며, 향후 스트리밍 시스템에서는 단말의 자원 상태를 모니터링해 비트레이트 결정 과정에 반영하거나 더욱 지능적인 결정을 내리는 알고리즘을 사용할 필요가 있다는 점을 보여준다.

본 연구는 실제 볼류메트릭 영상 스트리밍 시스템 구현을 통해 적응형 스트리밍에서 단말 성능의 영향을 보여주었지만, 다음과 같은 한계점을 가지며, 향후 연구를 통해 보완될 필요가 있다. 첫 번째는 ABR 알고리즘의 범위를 제한했다는 점이다. 본 연구에서는 단말 성능의 영향을 확인하기 위해 기초적인 ABR 알고리즘 세 종류만을 대상으로 분석하였다. 향후 연구에서는 BOLA, MPC, Pensieve 등 최적화, 기계 학습 기반으로 고도화

된 알고리즘들이 어떤 동작 특성을 보이는지 분석할 필요가 있다. 두 번째는 두 종류의 단말 환경만을 다루었다는 점이다. 실제 서비스 환경에서는 무선 네트워크(5G, WiFi 등)의 변동성, 모바일 기기, HMD 기기 등 더욱 다양한 기기와 함께 복잡한 변수들이 존재하기 때문에 더욱 다양한 환경과 기기에서의 분석이 요구된다. 향후 연구에서는 무선 네트워크 환경과 다양한 기기를 포함하는 시나리오에서 시스템의 성능을 분석할 것이다. 또한 자원 사용량 및 모듈별 지연 시간 등 더욱 세분화된 지표를 이용해 정밀한 분석을 수행할 예정이다. 마지막으로 본 연구에서는 기존 ABR 알고리즘들의 동작 특성들을 분석하는 데 집중하였고, 이를 해결하기 위한 알고리즘은 제안하지 않았다는 점이다. 향후 연구에서는 기존 ABR 알고리즘들의 판단 지표뿐만 아니라 단말의 성능, 볼류메트릭 영상 스트리밍의 특성들을 종합적으로 고려하여 사용자 경험을 개선할 수 있는 적응형 스트리밍 알고리즘을 설계할 예정이다.

VIII. 결 론

본 연구는 볼류메트릭 영상 스트리밍 환경에서 단말의 컴퓨팅 성능이 적응형 스트리밍 알고리즘 동작 및 스트리밍 품질에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 DASH 기반 볼류메트릭 영상 적응형 스트리밍 시스템을 구현하고, 서로 다른 성능의 단말에 시스템을 설치하여 비교 실험을 진행하였다. 그 결과 기존 ABR 알고리즘들이 볼류메트릭 영상의 디코딩 및 렌더링으로 생기는 단말의 부하를 효과적으로 반영하지 못하는 것을 확인하였고, 사용자 경험 개선을 위해서는 단말의 성능을 비롯해 볼류메트릭 영상의 특성을 반영한 알고리즘의 필요하다는 점을 시사하였다. 본 연구는 새로운 ABR 알고리즘 제안에 앞서, 컴퓨팅 자원의 제약이 기존 ABR 알고리즘에 미치는 부정적인 영향을 정량적으로 확인하였다. 향후 연구로는 더욱 고도화된 ABR 알고리즘 및 다양한 단말 및 네트워크 환경에서 더욱 세분화된 지표를 활용한 분석과 이러한 분석 결과가 반영된 적응형 스트리밍 알고리즘 설계를 계획하였다.

References

- [1] Lee, Kyungjin, et al. "GROOT: a real-time streaming system of high-fidelity volumetric videos." . In Proceedings of the 26th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (pp. 1–14).2020.
- [2] Draco 3D Data Compression, Retrieved Nov., 21, 2025, <https://google.github.io/draco>.
- [3] Han, Bo, et al. "ViVo: Visibility-aware mobile volumetric video streaming." . In Proceedings of the 26th annual international conference on mobile computing and networking (pp. 1–13).2020.
- [4] Liu, Yu, et al. "Vues: Practical mobile volumetric video streaming through multiview transcoding." Proceedings of the 28th Annual International Conference on Mobile Computing And Networking. 2022
- [5] Zhang, Anlan, et al. "YuZu:Neural-Enhanced volumetric video streaming." 19th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 22). 2022.
- [6] MPEG V-PCC, Retrieved Nov., 21, 2025, <https://www.iso.org/standard/83535.html>.
- [7] Stockhammer, Thomas. "Dynamic adaptive streaming over HTTP-- standards and design principles." Proceedings of the second annual ACM conference on Multimedia systems. 2011.
- [8] Spiteri, Kevin, Rahul Urgaonkar, and Ramesh K. Sitaraman. "BOLA: Near-optimal bitrate adaptation for online videos." IEEE/ACM transactions on networking 28.4 (2020): 1698-1711.
- [9] Yin, Xiaoqi, et al. "A control-theoretic approach for dynamic adaptive video streaming over HTTP." Proceedings of the 2015 ACM conference on special interest group on data communication. 2015.
- [10] Mao, Hongzi, Ravi Netravali, and Mohammad Alizadeh. "Neural adaptive video streaming with pensieve." Proceedings of the conference of the ACM special interest group on data communication. 2017.
- [11] The Go Programming Language, Retrieved Nov., 21, 2025, <https://go.dev/>
- [12] Loop, Charles, et al. Microsoft Voxelized Upper Bodies - A Voxelized Point Cloud Dataset, Retrieved Nov., 21, 2025, <https://plenodb.jpeg.org/pc/microsoft/>. 2016.
- [13] Zhou, Qian-Yi, et al. "Open3D: A modern library for 3D data processing." arXiv preprint arXiv:1801.09847 (2018).
- [14] DracoPy, Retrieved Nov., 21, 2025, <https://github.com/seung-lab/DracoPy>.
- [15] Async http client/server framework, Retrieved Nov., 21, 2025, <https://github.com/aio-lib/aiohttp>.
- [16] Merkel, Dirk. "Docker: lightweight linux containers for consistent development and deployment." Linux j 239.2 (2014): 2.
- [17] Van Der Hooft, Jeroen, et al. "Towards 6dof http adaptive streaming through point cloud compression." Proceedings of the 27th ACM International Conference on Multimedia. 2019.
- [18] Hosseini, Mohammad, and Christian Timmerer. "Dynamic adaptive point cloud streaming." Proceedings of the 23rd Packet Video Workshop. 2018.
- [19] Heidarirad, Hadi, and Mea Wang. "VV-DASH: A Framework for Volumetric Video DASH Streaming." Proceedings of the 16th ACM Multimedia Systems Conference. 2025.

유 상 우 (Sangwoo Ryu)



2020 포항공과대학교, 컴퓨터
공학과 학사

2020 ~ 포항공과대학교, 인공
지능대학원 석/박사 통합과
정

<관심분야> 2D/3D 비디오 스
트리밍, 영상회의, 인공지능

홍 원 기 (James Won-Ki Hong)



2020~현재 포스텍 크립토블록
체인연구센터 공동센터장

2019-2023 포스텍 교육혁신센
터장

2012~2014 KT 종합기술원 원
장

2008~2012 포스텍 정보전자융
합공학부장

2008~2010 포스텍 컴퓨터공학과 주임교수

2007~2010 포스텍 정보통신연구소 연구소장

2007~2011 포스텍 정보통신대학원장

1995~현재 포스텍 컴퓨터공학과 교수

1992~1995 Univ. of Western Ontario, 연구교수

<관심분야> AI 기반 네트워크관리, SDN/NFV, 무
크기반 교육, 블록체인 및 암호화폐, Vmeeting
화상회의시스템