

Rockchip 환경에서의 저지연 비디오 스트리밍을 위한 RKMPP 기반 H.264 인코더 옵션별 성능 분석

이기범, 허의남*
경희대학교, *경희대학교

abcdefu@khu.ac.kr, *johnhuh@khu.ac.kr

Performance Analysis of RKMPP-Based H.264 Encoder Options for Low-Latency Video Streaming in Rockchip Environments

Kibeom Lee, Eui-Nam Huh*
Kyung-Hee Univ., *Kyung-Hee Univ.

요약

본 연구는 Rockchip RK3568 환경에서 저지연 비디오 스트리밍을 구현하기 위해 RKMPP 기반 H.264 인코더 옵션의 영향을 분석한다. 실험은 Baseline, Main, High 프로필과 VBR, CBR, CQP 레이트컨트롤 모드, 그리고 CABAC과 CAVLC 부호화 방식을 대상으로 수행되었으며, 프레임별 인코딩 시간과 평균 NAL 크기를 측정하였다. 분석 결과, 프로필과 부호화 방식, RC 모드에 따라 지연과 출력 데이터 크기가 뚜렷하게 달라지는 것을 확인하였으며, Rockchip 기반 저지연 스트리밍 환경에서 인코딩 설정 선택이 전체 성능에 직접적으로 영향을 미침을 확인하였다.

I. 서론

실시간 비디오 스트리밍 시스템에서는 전체 지연 중 상당 부분이 인코딩 단계에서 발생하며, 특히 연산 자원이 제한된 엣지 디바이스에서는 인코딩 과정의 지연이 스트리밍 품질을 결정짓는 주요 요소가 된다. Rockchip RK3568은 H.264 하드웨어 인코딩 기능을 제공하여 소프트웨어 인코딩 대비 낮은 연산 부담으로 실시간 처리가 가능하지만, 실제 인코딩 지연은 인코더 내부 설정에 따라 크게 달라질 수 있다. 또한 H.264 인코더는 입력 프레임을 NAL 단위로 출력하며, 이 NAL의 크기는 네트워크 전송 효율과 지연에 직접적인 영향을 미친다. NAL 크기가 불필요하게 커지거나 일정하게 유지되지 않으면 전송 지연 변동이 커지고, 전체 스트리밍 파이프라인의 안정성에도 영향을 미친다.

본 연구에서는 RK3568 환경에서 세 가지 프로필(Baseline, Main, High), 세 가지 레이트컨트롤 모드(VBR, CBR, CQP), 두 가지 부호화 방식(CABAC, CAVLC)을 각각 독립적으로 시험하여, 각 설정 변화가 프레임별 인코딩 시간과 평균 NAL 크기에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 통해 Rockchip 기반 저지연 스트리밍 시스템에서 인코딩 옵션을 선택할 때 참고할 수 있는 실험적 근거를 제시한다.

II. 본론

본 연구에서는 RK3568 환경에서 RKMPP 기반 H.264 인코더의 주요 설정이 인코딩 지연과 출력 데이터

크기에 미치는 변화를 정량적으로 관찰하기 위해, 통제된 실험 환경을 구성하고 항목별 시험을 진행하였다. 실험은 인코더 동작에 영향을 주는 대표적 설정인 H.264 프로필(Baseline, Main, High), 레이트컨트롤 모드(VBR, CBR, CQP), 부호화 방식(CABAC, CAVLC)을 각각 독립적으로 평가하는 방식으로 구성하였다.

실험 환경은 RK3568 보드를 기반으로 하며, 입력 영상은 해상도와 프레임레이트를 고정한 동일한 소스로 유지하였다. 인코더 초기화 과정, 버퍼 크기, 입력 큐 처리 방식 등 파이프라인 요소는 모든 시험에서 동일하게 설정하여, 측정값이 인코더 옵션 변화에서 비롯된 차이만을 반영하도록 하였다. 인코딩은 FFmpeg 기반 h264_rkmpp를 사용하여 수행하였고, 각 시험은 동일 조건에서 반복 실행하여 변동성을 최소화하였다.

측정 항목은 두 가지이다. 첫째, 프레임별 인코딩 시간은 인코더에 프레임이 전달된 시점과 인코딩이 완료되어 NAL 단위가 출력된 시점의 차이를 기록하여 산출하였다. 이는 인코더 내부 처리 지연을 직접적으로 반영하는 지표로 활용된다. 둘째, 출력된 NAL 단위에 대해 평균 크기를 계산하여 설정 변화가 비트스트림의 단위 크기와 구조에 어떤 영향을 주는지 분석하였다. 모든 측정값은 시험별로 수집한 로그를 기반으로 후처리되며, 인코딩 시간의 분포 특성과 NAL 크기 변동성 또한 비교 대상에 포함한다.

다음 표는 H.264 프로필 변화에 따른 인코딩 시간과 평균 NAL 크기를 나타낸다. 본 시험에서는 레이트컨트롤 모드를 CBR로 고정하고, 부호화 방식은 각 프로필의 기본 설정을 사용하였다.

프로필	평균 시간	표준편차	평균 NAL 크기
Baseline	4.38 ms	0.47 ms	8251.73 bytes
Main	5.98 ms	0.89 ms	8244.51 bytes
High	6.02 ms	0.77 ms	8124.32 bytes

Baseline 프로필은 평균 인코딩 시간이 가장 짧고 프레임 간 지연 변동도 가장 작게 나타났는데, 이는 예측 구조가 단순하고 사용되는 부호화 도구가 제한적이어서 인코더 내부 연산 부담이 상대적으로 적기 때문으로 판단된다. 반면 평균 NAL 크기는 가장 크게 측정되어 동일한 비트레이트 조건에서 압축 효율은 낮은 특성을 보였다. Main 프로필은 Baseline 대비 평균 인코딩 시간이 증가하였으나 평균 NAL 크기가 감소하여 압축 효율이 개선되었고, 인코딩 지연과 비트 효율 사이에서 비교적 균형 잡힌 특성을 나타냈다. High 프로필은 평균 NAL 크기가 가장 작아 압축 효율 측면에서는 가장 우수한 결과를 보였으나, 평균 인코딩 시간이 가장 길고 프레임 간 지연 변동성 또한 증가하는 경향을 보였다.

다음은 레이트컨트롤 모드 변화에 따른 결과를 나타낸다. 본 시험에서는 Main 프로필과 CABAC을 고정하여 레이트컨트롤 방식의 차이만을 비교하였다.

RC 모드	평균 시간	표준편차	평균 NAL 크기
CBR	4.63 ms	0.51 ms	8216.24 bytes
VBR	5.21 ms	0.96 ms	8599.81 bytes
CQP	4.47 ms	0.95 ms	72550.69 bytes

CQP는 평균 인코딩 시간이 가장 짧게 측정되었으며, 이는 레이트 제어를 위한 내부 연산이 최소화된 결과로 해석된다. 그러나 프레임별 인코딩 시간과 NAL 크기 모두에서 변동성이 크게 나타났으며, 장면 복잡도 증가 시 순간적인 지연 증가와 NAL 크기 급증 현상이 관찰되었다. VBR 역시 평균 인코딩 시간은 CBR과 유사한 수준이었으나, 프레임 간 지연과 출력 데이터 크기의 분산이 크게 증가하였다. 반면 CBR은 평균 인코딩 시간이 소폭 증가하는 대신 프레임 간 지연과 NAL 크기가 가장 안정적으로 유지되어, 전체 스트리밍 파일라인의 예측 가능성이 가장 높게 나타났다.

다음은 부호화 방식에 따른 성능 차이를 나타낸다. Main 프로필과 CBR 모드를 고정하여 CABAC과 CAVLC를 비교하였다.

부호화 방식	평균 시간	표준편차	평균 NAL 크기
CABAC	4.38 ms	0.47 ms	8251.73 bytes
CAVLC	4.33 ms	0.42 ms	8591.84 bytes

CAVLC는 CABAC 대비 평균 인코딩 시간이 짧고 지연 변동성 또한 작게 나타났으나, 평균 NAL 크기가 증가하여 비트 효율이 낮은 특성을 보였다. CABAC은 인코딩 지연이 증가하는 비용이 발생하였으나, 평균 NAL 크기가 유의미하게 감소하여 네트워크 전송 효율 측면에서는 보다 유리한 결과를 보였다.

III. 결론

본 연구에서는 RK3568 환경에서 RKMPP 기반 H.264 하드웨어 인코더의 주요 설정이 인코딩 지연과 출력 NAL 크기에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. H.264 프로필, 레이트컨트롤 모드, 부호화 방식이라는 대표적 인코딩 옵션을 독립적으로 변화시키는 통제된

실험을 통해, 각 설정이 프레임 단위 인코딩 지연과 비트스트림 특성에 서로 다른 영향을 미침을 확인하였다.

실험 결과, RK3568 기반 H.264 하드웨어 인코딩 환경에서는 인코딩 지연 최소화, 지연 안정성, 비트 효율이라는 세 요소가 상호 독립적으로 최적화되기 어려운 트레이드오프 관계에 있음을 확인하였다. Baseline 또는 Main 프로필과 CQP 또는 CAVLC 설정은 인코더 내부 연산을 줄여 평균 인코딩 지연을 최소화하는 데 효과적이었으나, 출력 NAL 크기의 변동성이 커져 네트워크 전송 지연의 예측 가능성이에 불리한 경향을 보였다. 이는 저지연 자체가 최우선인 환경에서는 유리할 수 있으나, 네트워크 상태에 민감한 스트리밍 파일라인에서는 불안정 요인으로 작용할 수 있다.

반면 Main 프로필, CBR, CABAC 조합은 평균 인코딩 지연이 다소 증가함에도 불구하고 프레임 간 지연과 NAL 크기가 안정적으로 유지되어, 전체 스트리밍 파일라인 관점에서 가장 예측 가능한 동작 특성을 제공하였다. 이러한 결과는 실시간 스트리밍 시스템에서 단순히 인코딩 지연의 평균값만을 기준으로 설정을 선택하는 것이 아니라, 지연 변동성과 출력 비트스트림의 구조까지 함께 고려해야 함을 시사한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 2025년도 SW 중심대학사업의 지원(2023-0-00042, 50%)과 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 대학기초연구소지원사업(G-LAMP)의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2025-25442355, 50%).

참 고 문 헌

- [1] 이재희, 조태경, “임베디드 리눅스 기반의 휴대용 HTTP 라이브 스트리밍 전송기 구현에 관한 연구,” 디지털융복합연구, 제 13 권, 제 11 호, pp. 141- 148, 2015.
- [2] 남재룡, 김동균, “포터블 디바이스 실시간 스트리밍을 활용한 산업현장 원격 모니터링의 적용 효과 및 사례 분석,” 한국통신학회 학술대회논문집, 제주, 2025.
- [3] 박상현, “H.264 코덱을 위한 적응적 매크로블록 양자화 방법,” 한국정보통신학회논문지, 제 14 권, 제 5 호, pp. 1193-1200, 2010.
- [4] 김동준, “AMD Zynq MPSoC 기반 H.264 압축 영상 실시간 저지연 디코딩 시스템의 설계와 구현,” 항공우주시스템공학회 학술행사 논문집, 제주, 2024.
- [5] 김찬규, 노태영, 정광모, “드론에 탑재 가능한 실시간 AI 임베디드 모듈 기반의 저지연 WebRTC 영상 전송 구현,” 한국통신학회 학술대회논문집, 전남, 2021.