

실시간 비디오 스트리밍 서비스를 위한 선별적 비디오 암호화 방법의 전송지연 저감 연구

윤요한¹ · 고경민^{2*}

The research of transmission delay reduction for selectively encrypted video transmission scheme on real-time video streaming

Yohann Yoon¹ · Kyungmin Go^{2*}

¹Director, R&D Center, Classting Inc., Seoul, 06194 Korea

^{2*}Assistant Professor, Computer Engineering Department, PaiChai University, Daejeon, 35345 Korea

요 약

실시간 비디오 스트리밍은 콘텐츠 전달 및 원격회의 등에 사용되는 기술로, 전송지연에 민감한 기술 중 하나이다. 최근 코로나바이러스 감염증(COVID-19)으로 인해 개인방송/원격회의와 같은 개인이 제작 및 이용하는 콘텐츠들이 증가하면서, 실시간 비디오 스트리밍 시 전송지연 저감과 더불어 스트리밍 되는 콘텐츠에 대한 보호의 필요성이 강조되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 실시간 비디오 스트리밍에 선별적 비디오 암호화 방법을 적용할 경우 발생하는 전송지연을 저감하기 위한 패킷 응집 관련 알고리즘을 제안하였다. 제안 방법은 선별적 비디오 암호화 프레임워크에서 패킷 단위로 재배치된 비디오 데이터 전송 시 한 번에 전송되는 크기의 조절이 가능하도록 개선하였으며, 실제 테스트베드를 통한 실험결과는 제안 방법 적용 시 기존대비 전송지연을 약 11% 저감할 수 있음을 보여주었다.

ABSTRACT

Real-time video streaming scheme for multimedia content delivery and remote conference services is one of technologies that are significantly sensitive to data transmission delay. Recently, because of COVID-19, real-time video streaming contents for the services are significantly increased such as personal broadcasting and remote school class. In order to support the services, there is a growing emphasis on low transmission delay and secure content delivery, respectively. Therefore, our research proposed a packet aggregation algorithm to reduce the transmission delay of selectively encrypted video transmission for real-time video streaming services. Through the application of the proposed algorithm, the selectively encrypted video framework can control the amount of MPEG-2 TS packets for low latency transmission with a consideration of packet priorities. Evaluation results on testbed show that the application of the proposed algorithm to the video framework can reduce approximately 11% of the transmission delay for high and low resolution video.

키워드 : 전송지연 저감, 선별적 비디오 암호화 전송, 패킷 응집, 실시간 비디오

Keywords : Transmission delay reduction, Selectively encrypted video transmission, Packet aggregation, Real-time video

Received 21 February 2021, Revised 25 February 2021, Accepted 9 March 2021

* Corresponding Author Kyungmin Go (E-mail: minylago@gmail.com, Tel: +82-42-520-5089)

Assistant Professor, Department of Computer Engineering, PaiChai University, Daejeon, 35345 South Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2021.25.4.581>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

최근 실시간 비디오 스트리밍 콘텐츠는 관련 서비스 기업들이 제작하는 상용 콘텐츠에서 개인이 제작하는 콘텐츠로 확대되고 있다[1]. 일례로, 게임중계, 여행, 요리와 같이 주로 기존의 관련 서비스 기업들이 제작하던 콘텐츠 부문에서 개인 제작 콘텐츠의 비중이 높아지고 있다. 특히, 유튜브, 트위치, 아프리카TV 등의 실시간 스트리밍 서비스들이 개인 콘텐츠의 전달 매개체의 역할뿐만 아니라 수익 창출 플랫폼의 역할을 수행[1]하고 있기 때문에 앞으로 개인 콘텐츠의 제작 비중은 지속적으로 높아질 전망이다.

또한, 코로나-19(COVID-19)로 인해 기존의 오프라인 중심의 교육/개인 비즈니스 부문에서 실시간 원격강의 및 화상회의의 사용 비중이 높아지고 있으며, 이를 위해 실시간 비디오 스트리밍 시스템의 도입이 증가하고 있다[2]. 일례로, 교실 대면수업 중심의 초, 중, 고등학교 등 공공교육에도 Zoom, WebEx 등 실시간 비디오 스트리밍 시스템 기반의 원격수업이 도입 및 사용되고 있으며[3], 사물인터넷(Internet of Thing)(IoT) 분야 등에서 향후 실시간 비디오 스트리밍이 더 확대 및 적용될 전망이다. 이와 유사하게, 개인 비즈니스 부문에서도 해외/국내 바이어간 미팅 및 공공제안서 평가에 비대면/온라인 화상회의가 활발히 사용되고 있다[4]. 이와 같은 사례들을 고려해볼 때, 향후 개인 및 공공 영역에서 실시간 비디오 스트리밍 시스템의 활용이 지속적으로 증가할 것으로 전망된다.

상기 실시간 비디오 스트리밍 기반 콘텐츠와 같은 멀티미디어의 전달에 중요한 특성 중 하나는 전송지연 저감[5]을 통한 실재감의 제고이다. 특히, 실시간 양방향 소통이 가능해야 한다는 특성은 주문형 비디오 서비스와는 차별화된 실시간 비디오 스트리밍 시스템을 구축해야 하는 중요한 이유 중 하나이다. 이를 위해 전송지연 저감을 위한 다양한 실시간 비디오 스트리밍 기술들이 연구되고 있다[6-7].

이와 더불어, 개인 제작 콘텐츠를 통한 수익 창출과 공공부문에서 실시간 비디오 스트리밍 시스템의 사용이 증가하면서 전송되는 콘텐츠에 대한 보호의 필요성이 강조되고 있다[8]. 일례로, 개인이 제작한 콘텐츠가 전송 도중 유출될 경우 해당 콘텐츠를 통해 창출될 수 있는 수익이 저하될 수 있다. 특히, 공공부문에서 실

간 비디오 시스템을 사용할 경우 타인이 개입하거나 영상을 유출하여 발생하는 개인정보 침해 등 피해 사례들이 보고되고 있다[9]. 따라서, 실시간 비디오 스트리밍 시스템 구축 시 전송지연 저감과 더불어, 스트리밍 콘텐츠 및 관련 정보의 보호 방법은 현재 주요 연구분야 중 하나이다.

실시간 비디오 스트리밍 콘텐츠의 보호를 위해 다양한 비디오 암호화 방법들이 제안되고 있다[10-11]. 전체 비디오 암호화 방법은 비디오 전체를 암호화하는 방법이며, 비디오 데이터 전체를 보호할 수 있지만 비디오 영상 해상도에 비례하여 시스템 부하가 발생한다는 한계가 있다[10]. 이러한 전체 비디오 암호화 방법의 한계를 극복하기 위해, 중요도에 따라 전송되는 비디오 데이터의 일부분을 암호화하는 선별적 비디오 암호화 방법이 제안되었다[11]. 선별적 비디오 암호화 방법은 암호화로 인해 발생하는 컴퓨팅 파워와 같은 시스템 부하를 저감할 수 있는 장점이 있기 때문에, 애플사의 HTTP Live Streaming (HLS)[12] 등의 비디오 솔루션에서 적용되고 있다. 특히, 최근 드론 및 센서 장비와 같은 IoT 기기들의 사용이 활성화 되면서, 이를 위한 선별적 비디오 암호화 방법들이 제안되고 있다[13-14]. 그러나 IoT 기기의 선별적 비디오 암호화 방법들의 경우 아직 관련 연구들이 부족하며, 특히 실시간성을 보장하기 위해서는 전송지연 저감 관련 방법에 대한 연구가 필요하다[13].

따라서, 본 논문에서는 실시간 비디오 스트리밍을 사용하는 IoT 기기에 선별적 암호화 방법을 적용할 시 발생하는 전송지연을 저감할 수 있는 방법에 대한 연구를 진행하였다. 기존에 제안된 프레임워크[13]를 기반으로 패킷 응집(packet aggregation)과 관련된 알고리즘을 개선하여, MPEG-2 TS 패킷 단위로 재배치된 비디오 데이터를 전송할 시 한 번에 전송되는 크기의 조절이 가능하도록 하였으며, IoT 기기 라즈베리파이를 통해 실제 테스트베드를 구성하여 실험을 진행하였다. 저화질/고화질 영상을 이용한 실험 결과에 따르면, 개선한 프레임워크는 기존 방법 대비 전송지연을 11% 저감할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 선별적 비디오 암호화 방법에 대해 상세히 설명한다. 다음 3장에서는 제안한 방법에 대해 소개하며, 4장에서는 전송지연 저감 측면에서 2가지 방법을 비교 분석한 결과를 보여준다. 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론을 제시한다.

II. 선별적 비디오 암호화 방법

전체 비디오 암호화 방법은 가장 높은 수준의 보안성을 제공[10]한다. 하지만, 전체 비디오 암호화 방법을 실시간 비디오 스트리밍에 적용할 경우 전송 영상의 해상도에 따라 전송지연이 비례하여 증가한다는 한계가 존재한다. 이와 같은 한계를 극복하고자 비디오에 대한 분석을 통해 중요 데이터만 선별적으로 암호화하는 선별적 암호화 전송 방법[10-11]이 제안되었다.

제안된 방법 중에서 압축방식에 무관하게 적용 가능한 암호화 방법의 경우, 비디오 압축 이전에 비디오 센서가 촬영한 원본 데이터 중 일부를 암호화하는 방법과 압축 이후에 나온 비디오 데이터를 암호화하는 방법으로 구분할 수 있다. 먼저 압축 이전 원본 데이터를 선별적으로 암호화하는 방법은 가장 높은 수준의 보안성을 제공할 수 있는 방법이다. 하지만, 원본 데이터를 암호화할 경우 원본 데이터의 크기에 비례하여 암호화해야 하는 비디오 데이터의 크기가 증가한다는 단점이 존재한다. 일례로, 640x360 크기의 해상도를 갖는 비디오 데이터에 비해 1280x720 크기의 해상도를 갖는 비디오의 경우 데이터 암호화에 더 많은 컴퓨팅 파워가 필요하다. 따라서, 원본 데이터를 암호화하는 방법은 가장 높은 수준의 보안성을 제공할 수 있지만 암호화로 인해 발생하는 시스템 부하가 크다는 한계가 있다.

반면 압축 이후에 나온 비디오 데이터를 암호화하는 방법의 경우 원본 데이터를 암호화하는 방법에 비해 상대적으로 적은 양을 암호화한다는 장점이 있다. 일례로, 압축되어 나온 비디오 데이터 중 I-frame에 해당하는 비디오 프레임만 선별적으로 압축하는 방법이 있다. 그리고, 그림 1과 같이 IoT 기기를 위해 압축되어 나온 비디오 데이터를 패킷 단위로 암호화하여 전송하는 방법[13]의 경우, 기존 방법에 비해 보다 작은 단위인 패킷 단위로 선별적으로 암호화하여 전송할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 각 I-frame, P-frame, B-frame 프레임 내부 데이터 중 일부를 패킷단위로 암호화하여 전송할 수 있기 때문에 전송 비디오 데이터에 보다 높은 수준의 보안성을 제공할 수 있다는 장점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 IoT 기기를 위해 비디오 데이터를 패킷 단위로 암호화하여 전송하는 방법[13]을 기반으로 전송 딜레이를 저감하는 방법을 제안하였다.

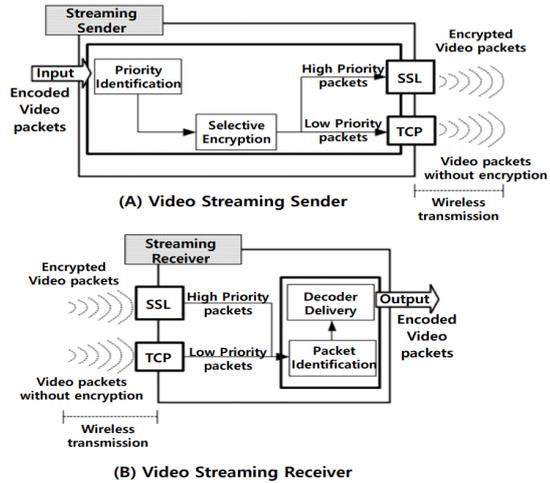


Fig. 1 Selectively encrypted video transmission scheme on a per packet basis

III. 선별적 비디오 암호화 방법의 전송지연 저감 설계

선별적 암호화 방법을 적용할 시 발생하는 전송지연을 저감하기 위해, 기존의 선별적 비디오 암호화 프레임워크[13]를 개선한 알고리즘은 그림 2에서 확인할 수 있다.

먼저, 비디오 송신기에 위치한 우선순위 확인 부분에서는 실시간 비디오 스트리밍을 MPEG-2 TS 패킷 단위로 받은 이후, 패킷 내에 포함된 헤더 정보를 기반으로 패킷 내의 payload에 포함된 데이터의 타입을 확인한다. 이 때, 확인된 데이터 타입을 표 1에 기술된 분류에 따라 구분한 후, 타입별로 미리 정의된 선별적 암호화를 적용하기 위해 패킷 재배치 동작을 수행한다. 현재 수신한 패킷이 I-frame 헤더를 제외한 높은 우선순위 패킷일 경우, 선별적 암호화 전송을 위한 버퍼인 finishReallocation에 저장한 후 선별적 암호화 & 전송 부분(selective encryption & transmission part)에서 저장된 패킷을 보낼 수 있도록 전송 Flag를 true로 설정한다. 현재 수신한 패킷이 중간&낮은 우선순위(medium&low priority) 패킷일 경우 패킷 재배치가 끝난 이후에 전송되어야 하기 때문에 임시 버퍼인 tempStorage에 저장한다. 마지막으로 I-frame 헤더가 포함된 패킷이 수신될 경우, 1개의 GOP(group-of-picture)에 대한 패킷 재배치가 완료되었

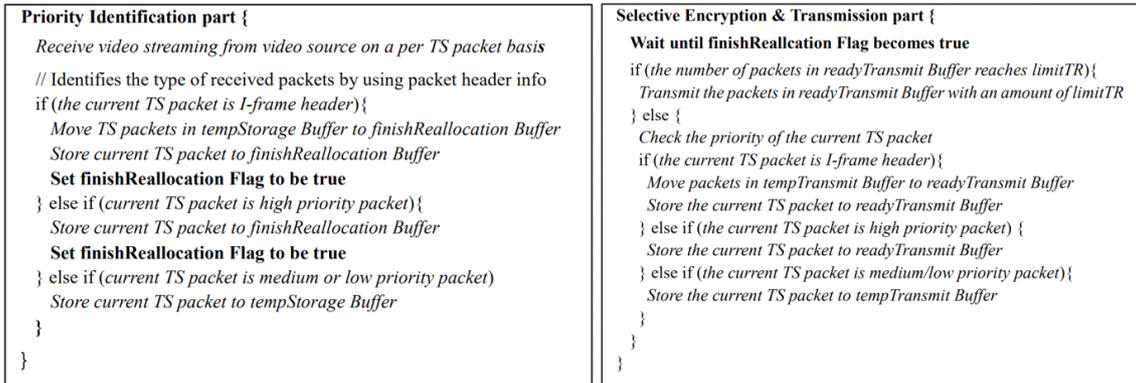


Fig. 2 The transmission delay reduction algorithm to improve selectively encrypted video transmission framework. The proposed algorithm makes the level of MPEG-2 TS packet aggregation to be controllable.

Table. 1 Classification of high priority(HP) packets and medium&low priority(MLP) packets

Priority	Classification
High Priority packets (HP pkts)	Metadata for streaming (e.g. PAT of MPEG-2 TS, PMT of MPEG-2 TS, SEI of H.264/AVC, MPD of HEVC/H.265)
	Metadata for encoded video data (e.g. SPS, PPS, video frame header)
Medium & Low Priority packets (MLP pkts)	Encoded video data of complete scene information (e.g. I frame data)
	Encoded video data that are referred from other video frame (e.g. P-frame data)
	Encoded video data that are not referred from other video frame (e.g. B-frame data)

으므로 tempStorage에 저장된 MLP 패킷을 finishReallocation 버퍼로 이동한 후, 전송 Flag를 true 로 설정한다.

다음으로 선별적 암호화 & 전송 부분에서는 패킷 재배치가 완료된 이후 순차적으로 finishReallocation 버퍼에 저장된 패킷들의 전송 Flag를 확인한 후, 패킷 응집과 관련된 설정 값인 limitTR 값을 확인하여, 지정된 limitTR 값에 해당하는 저장된 패킷을 응집하여 비디오 수신기로 전달한다. 이 때, 기존의 프레임워크에서 정의된 구분에 따라 응집된 패킷을 암호화된 전송방식인 SSL/TLS로 전송할 것인지 혹은 비암호화된 전송방식인 TCP로 전송할 것인지 결정하여 선별적으로 암호화하여 전송한다.

제안한 알고리즘을 적용한 선별적 비디오 암호화 전송 비디오 전송 시, 발생하는 전송지연은 아래 수식 (1) 과 같이 표현할 수 있다.

$$TD = \sum_{i=1}^{EP} (PED_i + PTD_i) + \sum_{j=1}^{NP} (PTD_j) \quad (1)$$

TD는 총 지연(total delay)으로 전체 비디오 스트리밍 시 발생하는 전송지연을 의미한다. EP는 암호화된 패킷(encrypted packet)으로 전체 비디오 스트리밍 중 SSL/TLS를 통해 전송되는 패킷을 의미하며, NP는 비암호화된 패킷(non-encrypted packet)으로 TCP를 통해 전송되는 패킷을 의미한다. PED는 패킷별 암호화에 소요되는 지연인 패킷 암호화 지연(packet encryption delay)을 의미하며, PTD는 패킷 전송 지연(packet transmission delay)을 의미한다. SSL/TLS 전송의 경우 TCP를 기반으로 암호화하는 전송방법이기 때문에 EP 패킷은 패킷별 PED와 PTD 값을 합산하여 전송지연 값을 구할 수 있으며, TCP 기반인 NP 패킷은 패킷별 PTD 값을 합산하여 전송지연 값을 구할 수 있다. 수식 (1)을 기반으로 전체 비디오 암호화를 적용한 경우 발생하는 전송지연은 아래 수식 (2)과 같이 기술할 수 있다.

$$TD_i = \sum_{i=1}^{TP} (PED_i + PTD_i) \quad (2)$$

수식 (2)에서 TP는 전체 암호화를 적용한 경우 발생하는 전송지연 값을 의미하고, TP는 총 패킷(total packet)으로 수식 (1)의 EP와 NP를 더한 값을 의미한다.

IV. 실험환경 구성 및 결과분석

4.1. 실험환경 구성



Fig. 3 Performance evaluation testbed with Raspberry PI and Intel NUC

Table. 2 Benchmark video data for evaluation

Video name	Touchdown_Pass [14]	
Resolution	640x360	1280x720
Bit Rate	750 kbps	2,560 kbps
Frame Rate	30.000 fps	

이더넷 기반 전송환경에서 전체 비디오 암호화를 적용한 경우, 기존의 프레임워크를 적용한 경우, 제안한 알고리즘을 적용한 경우로 나누어 실험을 수행했다. 실제 테스트베드에서 평가하기 위해, 비디오 송신기는 그림 3과 같이 라즈베리파이를 기반으로 구축되었고, 비디오 수신기는 수신 데이터 로깅 및 분석을 위해 Intel NUC(Next Unit of Computing) PC에 구현되었다. 표 2는 전송지연을 비교 분석하기 위해 사용한 벤치마크 비디오[14]의 특성을 보여준다. Touchdown_Pass 벤치마크 비디오는 해상도 별로 다른 비트 전송률(bit rate)을 갖도록 인코딩 되었으며, 프레임 전송률은 초당 30프레임을 갖도록 설정하였다.

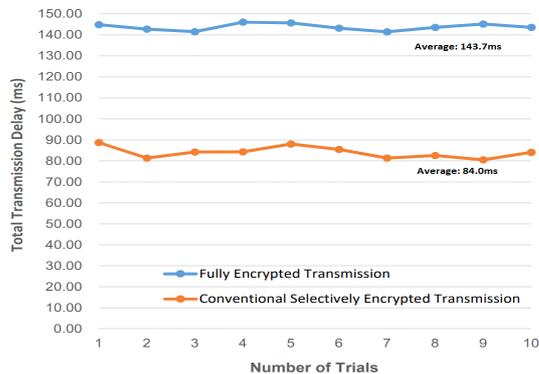


Fig. 4 Transmission delay comparison between the two schemes with Touchdown_Pass(640x360)

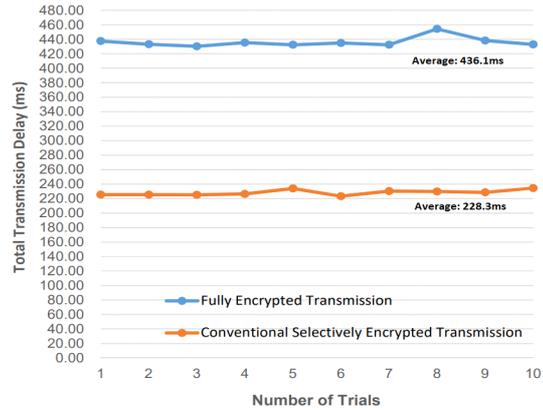


Fig. 5 Transmission delay comparison between the two schemes with Touchdown_Pass(1280x720)

4.2. 실험결과 분석

그림 4와 그림 5는 640x360 해상도와 1280x720 해상도의 벤치마크 비디오를 전송했을 시 전체 비디오 암호화와 기존의 프레임워크[13]를 적용하여 발생한 전송지연 결과를 각각 보여준다. 그림 4의 640x360 해상도의 비디오 데이터를 전송한 결과에 따르면, 전체 암호화를 적용한 경우(평균: 143.7ms)에 비해 선별적 암호화를 적용한 경우(평균: 84.0ms) 전송지연 값이 약 42% 더 낮게 나타난다. 이는 선별적 암호화를 적용하면 SSL/TLS를 통해 전송해야 하는 패킷의 수가 저감되는 것에서 기인하며, 결과적으로 선별적 암호화 적용 시 낮은 전송지연 값이 도출되었다. 이와 같은 결과는 그림 5의 1280x720 해상도의 비디오 데이터를 전송한 결과에서도 동일하게 확인할 수 있다.

다음으로 그림 6과 그림 7은 기존의 프레임워크를 적용한 경우와 본 논문에서 제안한 알고리즘을 적용한 경우의 결과를 각각 보여준다. 그림 6에서 볼 수 있듯이, 기존의 프레임워크를 적용한 경우(평균: 84.0ms)에 비해, 제안한 알고리즘을 적용한 경우(평균: 74.9ms) 패킷 응집도를 높일 수 있기 때문에 약 11% 낮은 수준의 전송지연 값을 보여준다. 이는 그림 7의 보다 높은 해상도의 비디오 데이터를 전송한 결과에서도 동일하게 나타나며, 제안한 알고리즘을 적용한 경우 전송지연 값이 평균 204.3ms 인데 반해, 기존의 프레임워크를 적용한 경우 전송지연 값이 평균 228.3ms 이었다.

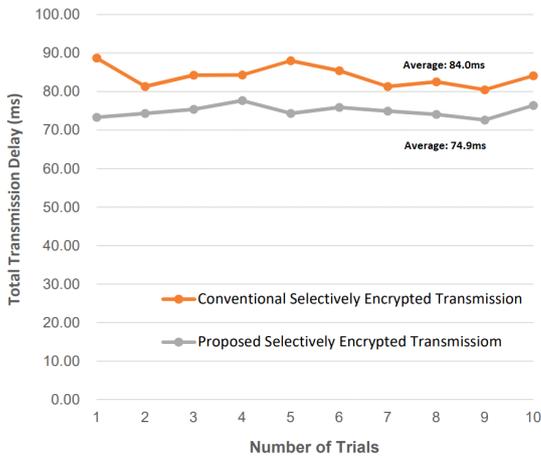


Fig. 6 Transmission delay comparison between the two schemes with Touchdown_Pass(640x360)

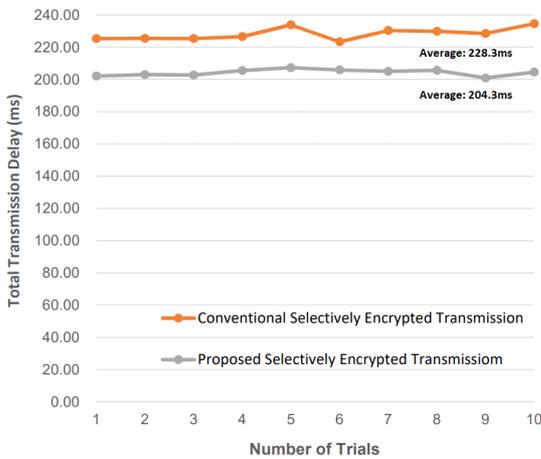


Fig. 7 Transmission delay comparison between the two schemes with Touchdown_Pass(1280x720)

이와 같은 실험결과들은 제안한 알고리즘을 적용하여 실시간 비디오 스트리밍을 하는 경우가 기존의 프레임워크를 이용하는 경우 및 전체 암호화를 적용하는 경우에 비해 비디오 데이터의 해상도와 무관하게 낮은 전송지연을 제공한다는 것을 나타낸다. 실시간 비디오 스트리밍이 사용되는 서비스들에 대한 전송지연 요구사항이 주문형 비디오 서비스에 비해 높은 수준임을 감안할 때, 본 연구에서 제안한 방법의 적용을 통한 전송지연의 개선은 현재 서비스 중인 실시간 비디오 스트리밍 서비스들의 품질을 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

V. 결론

본 연구에서는 실시간 비디오 스트리밍 시 콘텐츠 보호를 위해 선별적 비디오 암호화 방법을 적용할 경우 발생할 수 있는 전송지연을 저감하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 제안 알고리즘을 통해 기존 선별적 비디오 암호화 프레임워크에서 패킷 단위로 재배치된 비디오 데이터 전송 시 한 번에 전송되는 크기의 조절이 가능하도록 개선하였으며, 테스트베드를 통한 실험 결과는 제안 알고리즘 적용 시 기존의 프레임워크에 비해 전송지연을 약 11% 낮출 수 있음을 보여주었다. 이러한 결과는 데이터 구조에 따른 분석 이후 패킷단위의 선별적 암호화 수행 시, 패킷 응집에 따른 전송지연을 고려하는 것이 중요하다는 점을 시사하고 있다.

후속 연구에서는 본 연구를 확장하여 실시간 비디오 전송이 중요한 자율주행 차량에서의 전송지연 저감 및 선별적 암호화와 더불어 무선/모바일 기기에서의 스트리밍[15][16] 관련 연구를 수행하고자 한다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the PaiChai University research grant in 2020.

References

- [1] J. K. Lee, J. E. Lee, M. Y. Lee, and H. L. Kim, "The study on the policy improvement of personal broadcasting for the user protection," *Korea Communications Commission, Communications Policy Research*, KCC-2018-23, Nov. 2018.
- [2] D. G. Youn, "Thoughts on non-face-to-face remote classes due to the spread of Corona 19," *Korea Internet & Security Agency Report*, vol. 3, 2020.
- [3] H. S. Yoo, J. H. Song, J. H. Lee, and S. W. Jeong, "A study on improvements in software and legal infrastructure for K-12 online education," *Software Policy & Research Institute*, no. 096, 2020.
- [4] J. H. Jung, Y. W. Shin, and S. H. Gwon, "Status and Tasks of information and communication technology to revitalize the non-face-to-face economy," *National Assembly Research*

- Service, no. 178, 2020.
- [5] J. W. Hong, J. J. Yoo, and J. K. Hong, "Low-Delay, Low-Power, and Real-Time Audio Remote Transmission System over Wi-Fi," *Journal of information and communication convergence engineering*, vol. 18, no. 2, pp. 115-122, Jun. 2020.
- [6] J. Kua, G. Armitage, and P. Branch, "A survey of rate adaptation techniques for dynamic adaptive streaming over HTTP," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 3, pp. 1842-1866, 2017.
- [7] M. Abdallah, C. Griwodz, K. T. Chen, G. Simon, P. C. Wang, and C. H. Hsu, "Delay-sensitive video computing in the cloud: a survey," *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications*, vol. 14, no. 54, pp. 1-29, Jun. 2018.
- [8] Korea Policy Briefing. Video conference, do it with confidence, Service and product security enhancement support [Internet]. Available: <http://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=148871556>.
- [9] Yonhapnews Article. Hacking pornography in South African parliament 'Zoom' video conference [Internet]. Available: <https://www.yna.co.kr/view/AKR20200508003700099>.
- [10] F. Liu and H. Koenig, "A survey of video encryption algorithms," *Computers & Security*, vol. 29, no. 1, pp. 3-15, Feb. 2010.
- [11] A. Massoudi, F. Lefebvre, C. De Vleeschouwer, B. Macq, and J. J. Quisquater, "Overview on selective encryption of image and video: challenges and perspectives," *EURASIP Journal on Information Security*, vol. 2008, no. 179290, pp. 1-18, Dec. 2008.
- [12] Apple, MPEG-2 Stream Encryption Format for HTTP Live Streaming [Internet]. Available: https://developer.apple.com/documentation/http_live_streaming.
- [13] K. M. Go, I. G. Lee, S. W. Kang, and M. C. Kim, "Secure video transmission framework for battery-powered video devices," *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, Early access, 2020.
- [14] Xiph.Org Foundation [Internet]. Available: <http://media.xiph.org/video/derf/>.
- [15] S. G. Quan, H. Ha, and R. Ran, "Unequal Loss Protection Using Layer-Based Recovery Rate (ULP-LRR) for Robust Scalable Video Streaming over Wireless Networks," *Journal of Information and Communication Convergence Engineering*, vol. 14, no. 4, pp. 240-245, Dec. 2016.
- [16] Y. S. Kim, M. W. Jeong, J. M. Shin, J. Y. Ryu, and T. W. Ban, "Adaptive Video Streaming System Using Receiver Caching," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 23, no. 7, pp. 837-844, Jul. 2019.



윤요한(Yohann Yoon)

한동대학교 전산전자공학부 학사
 한국과학기술원 전산학부 석사
 한국과학기술원 전산학부 박사
 ㈜클래스팅 사내이사 (현재)
 ※관심분야: 멀티미디어 스트리밍, 데이터 파이프라인, 데이터 레이크, 웹 서비스



고경민(Kyungmin Go)

한동대학교 전산전자공학부 학사
 한국과학기술원 정보및통신공학과 석사
 한국과학기술원 전산학부 박사
 LG넥스원 지휘통제연구센터 선임연구원
 LG전자 CTO부문 차량용커넥티비티연구실 책임연구원
 배재대학교 컴퓨터공학과 조교수 (현재)
 ※관심분야: 멀티미디어 스트리밍, 자율주행자동차, 커넥티드카, 강화학습