논문 2026-1-3 http://dx.doi.org/10.29056/jsf.2026.03.03

멀티트랙 기반 3D 콘텐츠 스트리밍 환경에서의 효율적 재생을 위한 트랙셋 단위 DRM 제어 메커니즘

조인희*, 조용준*, 신동명*, 신용태**†

A Trackset-Level DRM Control Mechanism for Efficient Playback in Multi-Track 3D Streaming Environments

In-Hee Jo*, Yong-Joon Jo*, Dong-Myung Shin*, Yong-Tae Shin**†

요 약

MPEG-I V3C 및 Scene Description 기반 3D 미디어는 구현 및 서비스 방식에 따라 단일 트랙으로도 구성될 수 있으나, 고정밀 씬에서는 객체·구성 요소 단위의 분할로 인해 복수 트랙/스트림 구성이 일반적이다. 이러한 멀티트랙 구성에서 기존 DRM 제어 방식은 모든 미디어 트랙의 복호화 권한이 확인된 이후에 재생을 시작하므로, 트랙 수가 증가할수록 DRM 키 상태 조회 및 라이선스 획득 과정에서 초기 재생 지연이 급격히 증가하는 문제가 발생한다. 본 연구에서는 멀티트랙 구조를 트랙셋 단위로 논리적으로 그룹화하여 3D 씬을 필수 및 선택적 트랙으로 분류하고, 필수 트랙셋의 키 상태가 확인되는 즉시 렌더링을 개시하는 씬 단위 DRM 제어 메커니즘을 제안한다. 성능 평가 결과, 제안 기법은 기존 방식 대비 초기 재생 대기 시간을 약 80% 이상 단축함으로써 몰입형 콘텐츠 서비스의 사용자 경험(QoE)을 크게 개선함을 확인하였다.

Abstract

Recent 3D immersive media standards such as MPEG-I V3C and the MAF environment represent a single scene as a composition of numerous objects and tracks. In conventional DRM control mechanisms, playback begins only after decryption authorization has been verified for all media tracks. In 3D environments with a large number of objects, this approach causes significant initial playback delay.

In this study, we propose a scene-level DRM control mechanism that leverages the track-set structure of MAF. The 3D scene is classified into mandatory and optional tracksets, and rendering begins immediately once the key status of the mandatory track set is verified. Performance evaluation results demonstrate that the proposed method reduces initial playback waiting time by up to 80% compared to conventional approaches, thereby significantly improving the Quality of Experience (QoE) for immersive content services.

한글키워드 : DRM, 트랙셋, MPEG-I V3C, 볼류메트릭 비디오, 멀티트랙 스트리밍

keywords : DRM, Trackset, MPEG-I V3C, Volumetric Video, Multi-track Streaming

* 엘에스웨어(주)
** 숭실대학교
† 교신저자: 신용태(email: shin@ssu.ac.kr)
접수일자: 2026.03.06. 심사완료: 2026.03.16.
게재확정: 2026.03.20.

1. 서 론

최근 메타버스, 디지털 트윈 및 실감형 미디어

www.kci.go.kr

의 확산으로 고정밀 3D 콘텐츠를 실시간으로 스트리밍하는 기술이 비약적으로 발전하고 있다.

특히 ISO/IEC 23090-10 V3C(Visual Volumetric Video-based Coding)와 ISO/IEC 23090-14 Scene Description 표준은 이러한 대용량 몰입형 미디어를 다양한 장치에서 효율적으로 소비하기 위한 핵심 표준으로 자리 잡고 있다[1][2].

그러나 3D 콘텐츠의 상업적 확산을 위해서는 저작권 보호 기술인 DRM(Digital Rights Management)의 적용이 필수적임에도 불구하고, 기존의 DRM 기술 체계는 3D 미디어의 구조적 특성을 충분히 반영하지 못하고 있다[10]. 기존의 DRM 주류 인터페이스인 W3C의 EME(Encrypted Media Extensions)와 ISOBMFF 기반 콘텐츠 암호화를 정의하는 CENC(Common Encryption, ISO/IEC 23001-7)는 주로 시간 기반(timed) 오디오·비디오 프레젠테이션을 전제로 한 선형적 미디어 재생 모델에 최적화되어 설계되어 있다[4].

3D 씬(Scene)은 선형적인 비디오와 달리, 수많은 독립적인 객체(Object)와 이를 구성하는 멀티 트랙들로 이루어진 비선형적 자산(Non-linear Assets)의 집합이다[7]. 이러한 환경에서 기존의 방식대로 모든 트랙의 권한을 확인한 후 재생을 시작할 경우, 객체 수가 증가함에 따라 DRM 키 상태 조회 및 라이선스 획득 과정에서 기하급수적인 지연 시간이 발생한다. 이는 실시간성이 강조되는 몰입형 콘텐츠 서비스에서 심각한 사용자 경험(QoE) 저하와 초기 재생 지연(Initial Playback Delay)의 원인이 된다.

본 연구에서는 ISO/IEC 23090 계열의 멀티트랙 구조를 인지하는 씬 단위 DRM 제어 메커니즘을 제안한다. 제안 기법은 3D 씬을 구성하는 트랙들을 트랙셋(Trackset)이라는 논리적 단위로 그룹화하고, 렌더링에 필수적인 트랙(Mandatory Track)을 우선적으로 식별하여 최소한의 지연으로 서비스를 개시할 수 있도록 한다. 이를 통해 보안 무결성을 유지하면서도 3D 미디어 전송의 실시간성을 극대화하고자 한다.

2. 관련 연구

2.1 3D 오브젝트 표준 기반 멀티스트림 구조

ISO/IEC 23090-10 V3C는 볼류메트릭(3D) 미디어를 효율적으로 부호화·전송하기 위해, 하나의 3D 콘텐츠를 복수의 2D 표현과 메타데이터로 변환한 뒤 이를 atlas 데이터와 병렬의 비디오 하위 비트스트림(예: geometry, attribute, occupancy 등)으로 구성하는 방식을 채택한다[1].

이러한 구조는 최근 point cloud 및 volumetric video 압축 기술에서도 공통적으로 활용되는 멀티스트림 기반 표현 방식과 밀접한 관련이 있다[8].

즉, 3D 콘텐츠는 단일 스트림이 아니라 복수 컴포넌트 스트림의 조합으로 표현되며, 이 멀티 컴포넌트 구조는 3D 스트리밍이 본질적으로 멀티 트랙/멀티 스트림 운용을 요구함을 시사한다.

V3C 비트스트림은 ISOBMFF 기반 컨테이너에서 multi-track encapsulation mode로 저장 및 전송될 수 있으며, atlas는 atlas track으로, geometry, attribute, occupancy 등의 컴포넌트 스트림은 각각 독립적인 미디어 트랙으로 캡슐화된다[3].

이러한 멀티트랙 구조는 MPEG-DASH 기반 적응형 스트리밍 환경에서 세그먼트 단위로 전송될 수 있으며, 네트워크 상황에 따라 유연한 콘텐츠 전달을 지원한다[5]. 또한 MIV와 같은 몰입형 미디어 표준에서도 유사한 멀티스트림 구조가 활용되어 다양한 시점 및 미디어 구성 요소의 효율적인 전송을 가능하게 한다[6].

ISO/IEC 23090-14(Scene Description)은 몰입형 미디어 환경에서 3D 씬을 기술하고 이를 처리하기 위한 참조 아키텍처를 정의한다. 그림 1은 이러한 표준 아키텍처를 도식화한 것으로, 미디어 데이터가

www.kci.go.kr

네트워크 또는 로컬 저장소로부터 획득되어 최종 사용자에게 전달되는 전체 파이프라인을 보여준다.

해당 아키텍처에서 Media Access Function(MAF)은 클라우드나 로컬 저장소로부터 전달된 멀티스트림 데이터에 접근하고, 각 트랙별로 독립적인 디코딩 및 복호화 처리를 수행하는 핵심 파이프라인 역할을 담당한다. 특히 MAF 내부의 Buffer Management와 Synchronization 과정은 V3C 콘텐츠의 다중 컴포넌트(Atlas, Geometry, Attribute 등)가 시간적·공간적 정렬을 유지하며 처리되도록 보장한다[2].

MAF를 통해 처리된 미디어 데이터는 Presentation Engine으로 전달되며, 여기서 Scene Description Document에 기술된 정보에 기반하여 최종적인 씬 렌더링이 수행된다. 따라서 본 논문에서 제안하는 3D 콘텐츠 복호화 및 DRM 처리 기법은 그림 1의 MAF 내 미디어 처리 파이프라인(Pipeline) 상에서 개별 트랙별로 수행되는 환경을 전제로 한다. 이는 제안 방식이 표준 참조 모델의 미디어 접근 계층과 유기적으로 결합하여 실제 스트리밍 환경에서 동작 가능함을 시사한다.

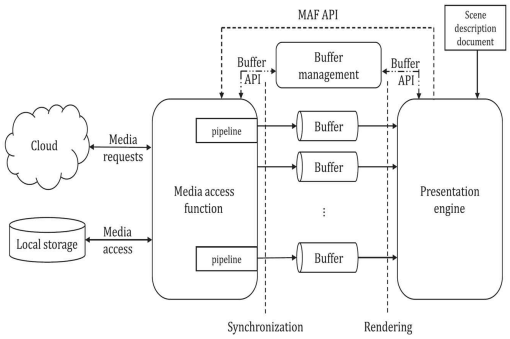

그림 1. MAF 기반 멀티트랙 처리 및 동기화 렌더링 파이프라인을 강조한 씬 기술 참조 아키텍처[2]

Fig. 1. Reference architecture for scene description (ISO/IEC 23090-14), highlighting the MAF-based multi-track processing and synchronized rendering pipeline

2.2 볼류메트릭 객체 구성에 따른 트랙 관리 부하 분석

ISO/IEC 23090-10(V3C) 기반 3D 스트리밍은 하나의 객체가 Geometry, Attribute, Occupancy 등 복수의 컴포넌트 비트스트림으로 분리되어 부호화된다. 이는 단일 3D 객체를 온전히 표현하기 위해 상호 의존적인 다중 트랙의 동시 운용이 필수적임을 시사한다.

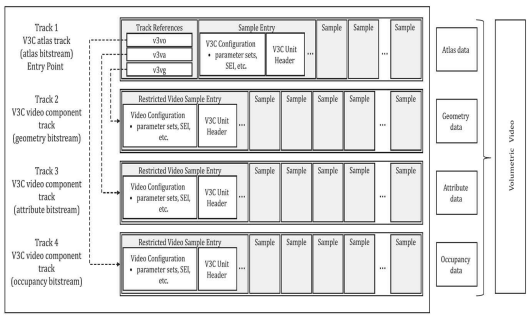

그림 2. 아틀라스 및 비디오 하위 비트스트림의 독립적 트랙 구성을 보여주는 V3C 컨테이너 파일의 멀티트랙 캡슐화 시각화[1]

Fig. 2. Visualization of multi-track encapsulation in a V3C container file, showing independent tracks for atlas and video sub-bitstreams

그림 2는 V3C 데이터가 geometry, attribute, occupancy 등의 컴포넌트 스트림으로 분리되고, 각 컴포넌트가 ISOBMFF 컨테이너 내 독립적인 트랙으로 캡슐화되는 구조를 보여준다.

특히, 다음과 같은 기술적 요인들이 결합될 때 전체 씬(Scene) 구성을 위한 트랙 수는 기하급수적으로 증가한다.

- 객체 수의 증가: 씬 내 존재하는 독립적인 3D 객체의 수에 비례하여 기본 컴포넌트 트랙이 증폭된다.
- 공간 분할 및 계층화: 효율적인 전송을 위한 아틀라스 타일(Atlas Tile) 기반 분할 구조와 고해상도 구현을 위한 확장 계층(Enhancement Layer) 도입은 관리 대상 트랙을 세분화시킨다[9].

www.kci.go.kr

예를 들어, N개의 객체가 각각 형상과 속성 트랙으로 구성될 경우 최소 2N개의 트랙이 생성되며, 여기에 타일 분할이 적용되면 관리 단위는 더욱 방대해진다. 이러한 구조적 특성은 네트워크 및 복호화 파이프라인의 병렬성뿐만 아니라, 각 트랙별 독립적인 키 관리에 따른 DRM 제어 평면(Control Plane)의 복잡도를 심화시키는 원인이 된다[1].

2.3 CENC 기반 DRM의 트랙 단위 제어 한계

CENC(Common Encryption, ISO/IEC 23001-7)는 ISOBMFF 기반 콘텐츠에 대한 공통 암호화 포맷을 정의하며, 트랙 또는 샘플 단위 암호화를 지원한다. 각 트랙은 KID(Key ID)를 통해 복호화 키를 식별하며, 라이선스 서버로부터 해당 키를 획득한 이후 샘플 단위 복호화가 수행된다[4].

이 구조는 소수의 트랙을 가지는 전통적 오디오·비디오 스트리밍 환경에서는 효율적으로 동작한다. 그러나 V3C 기반 3D 스트리밍과 같이 복수의 상호 의존적 트랙이 하나의 객체를 구성하는 환경에서는 다음과 같은 구조적 한계가 나타날 수 있다.

첫째, CENC는 트랙 단위 복호화 상태만을 정의할 뿐, 복수 트랙이 하나의 객체를 구성하는 경우 객체 단위 준비 상태를 명시적으로 정의하지 않는다.

둘째, 다중 KID 환경에서 일부 트랙의 키 확보가 지연될 경우, 전체 객체의 표현이 가능한지 여부를 판단하는 기준이 구현 의존적으로 결정된다. 보수적인 정책을 적용할 경우 모든 관련 트랙의 키 확보가 완료될 때까지 재생이 지연될 수 있다.

셋째, 객체 수 및 트랙 수 증가에 따라 키 확인 및 라이선스 요청 횟수가 증가하며, 이는 초기 재생 지연(Initial Playback Delay)으로 이어질 가능성이 있다.

따라서, 멀티 컴포넌트 기반 3D 스트리밍 환경에서는 단순한 트랙 단위 DRM 제어를 넘어, 복수 트랙 간 기능적 의존성을 고려하여 객체 단위 복호화 준비 조건을 정의하는 상위 제어 메커니즘이 요구된다.

이와 같은 요구를 충족하기 위해, 다음 장에서는 V3C 멀티 트랙 구조를 전제로 객체 단위 복호화 준비 조건을 정의하는 트랙셋 기반 DRM 제어 메커니즘을 제안한다.

3. 제안하는 씬 단위 DRM 제어 메커니즘

MPEG-I V3C(ISO/IEC 23090-10)는 3D 볼류메트릭 콘텐츠를 geometry, attribute, occupancy 등 복수의 컴포넌트 비트스트림으로 분리하여 부호화하며, 각 컴포넌트는 ISOBMFF 내에서 독립적인 video track으로 구성된다. 이러한 멀티 컴포넌트 구조에서는 하나의 3D 객체가 복수의 상호 의존적인 트랙으로 표현된다.

CENC(Common Encryption) 기반 DRM이 적용되는 경우, 각 트랙은 서로 다른 KID를 가지며 독립적으로 복호화된다. 그러나 기존 DRM 제어 방식은 트랙 단위의 복호화 상태만을 관리하며, 객체 단위의 복호화 준비 조건 및 렌더링 개시 기준을 명시적으로 정의하지 않는다. 그 결과, 다중 KID 환경에서 일부 트랙의 키 확보가 지연될 경우 전체 객체의 렌더링이 지연되는 문제가 발생한다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해, 트랙 간 기능적 의존성을 기반으로 객체 단위 복호화 준비 조건을 정의하는 트랙셋 기반 DRM 제어 메커니즘을 제안한다.

3.1 트랙셋(Trackset)의 정의

본 연구에서 제안하는 씬 단위 DRM 제어 메커니즘의 핵심은, 멀티트랙 간의 기능적 의존성을 고려하여 복수의 트랙을 하나의 논리적 제어 단위로

www.kci.go.kr

그룹화하는 것이다. 이를 위해 3D 씬을 구성하는 멀티트랙들을 논리적 의존성에 따라 그룹화하는 보안 오케스트레이션(Security Orchestration) 계층을 제안한다. 해당 계층은 복수의 트랙을 하나의 보안 실행 단위로 추상화하며, 이를 트랙셋이라 정의한다[9].

트랙셋은 하나의 3D 객체를 정상적으로 복원하기 위해 상호 의존적인 미디어 트랙들을 원자적(Atomic) 단위로 바인딩한 최소 복호화 실행 단위이다. 형식적으로, 하나의 트랙셋 TS_i는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$TS_i = \{t_1, t_2, ..., t_n\} \quad (1)$$

각 트랙 t_i는 다음의 정보를 포함한다.

- Track ID: ISOBMFF 내의 고유 식별자
- Track Role: 컴포넌트의 역할(Geometry, Atlas, Attribute, Occupancy 등)
- KID: 트랙 복호화에 필요한 키 식별자
- DRM System ID: 적용된 DRM 식별자

트랙셋은 전송 세그먼트나 V3C atlas 구조를 변경하는 개념이 아니며, 복수의 V3C 컴포넌트 트랙 간 복호화 의존성을 반영하기 위한 상위 제어 계층이다.

3.2 객체 표현의 계층적 트랙셋 모델

효율적인 렌더링 제어를 위해 트랙셋은 기능적 복원 최소 단위를 기준으로 Mandatory(필수)와 Optional(선택) 트랙셋으로 분류된다. 본 논문에서는 객체의 기본 형상 복원에 필요한 핵심 정보인 geometric 및 atlas 관련 트랙을 Mandatory 트랙셋으로, 시각적 품질 향상을 위한 부가 정보를 담고 있는 attribute 및 occupancy를 Optional 트랙셋으로 설정하였다.

각 트랙셋 TS_i의 상태는 포함된 모든 트랙의 키가 가용한 상태일 때 KEY_USABLE 상태로 전이되며, 이는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$status(TS_i) = \text{KEY_USABLE} \quad (2)$$
$$where\ \forall KID_j \in TS_i,\ status(KID_j) = usable$$

트랙셋 상태 정의(식 (2))를 기반으로, 렌더링 개시 조건은 식 (3)과 같이 정의된다.

$$status(TS_{all_mand}) = KEY_USABLE \quad (3)$$
$$where\ TS_i.type = Mandatory, \forall TS_i$$

즉, 식 (3)에 따라 객체의 최소 표현을 위해 정의된 모든 Mandatory 트랙셋이 준비 상태에 도달하면 즉시 Keyset Commit 신호를 발생시키고 렌더링 파이프라인을 가동한다. 고해상도 텍스처나 부가 속성 정보를 포함하는 Optional 트랙셋은 렌더링 개시 이후 비동기적으로 복호화되어 씬에 반영된다. 이러한 계층적 모델을 통해 다중 KID 환경에서 불필요한 전체 트랙 대기 시간을 제거하고, 객체의 최소 완전성을 보장함과 동시에 점진적 품질 향상(Progressive Enhancement)을 지원한다.

3.3 트랙셋 기반 DRM 오케스트레이션 알고리즘

앞 절에서 정의한 트랙셋 모델을 실제 스트리밍 환경에 적용하기 위해서는, 다중 트랙의 복호화 상태를 실시간으로 추적하고 렌더링 개시 조건을 판단하는 제어 로직이 필요하다. 특히 V3C 기반 3D 스트리밍 환경에서는 하나의 객체가 복수의 컴포넌트 트랙으로 분리되어 전달되며, 각 트랙은 서로 다른 KID를 통해 독립적으로 복호화 권한을 관리한다. 이러한 다중 KID 환경에서는 일부 트랙의 키 확보가 지연될 경우 전체 객체의 표현 준비 여부를 판단하기 어렵다는 문제가 발생한다.

Algorithm 1은 제안하는 트랙셋 기반 DRM 오케스트레이션의 전체 절차를 나타낸다(그림 3 참조). 본 알고리즘은 트랙셋 단위의 복호화 상태를 기반으로 렌더링 개시 시점을 결정하며, 다중 KID 환경에서의 지연 문제를 완화하기 위한 제어 흐름을 포함한다.

www.kci.go.kr

Algorithm 1 : Trackset-Based Decryption and Rendering Orchestration

$TS_M \leftarrow \Phi$
$TS_O \leftarrow \Phi$
$committed \leftarrow false$
▷ **Step 1: Track Classification**
for each $t_i \in T$ **do**
  if $t_i.importance = Mandatory$ **then**
    $TS_M \leftarrow TS_M \cup \{t_i\}$
  else $TS_O \leftarrow TS_O \cup \{t_i\}$
  end if
end for
▷ **Step 2: Security Orchestration Loop**
while $streaming == true$ **do**
  $r_count \leftarrow 0$
  for each $t_i \in TS_M$ **do**
    if $status(KID_{t_i}) == usable$ **then**
      $status(t_i) \leftarrow Ready$,
      $ready_count \leftarrow ready_count + 1$
    end if
  end for
▷ **Step 3: Rendering Initiation Condition**
if $ready_count \equiv |TS_M|$ **and** $committed \equiv false$ **then**
  Issue *Keyset Commit* Signal
  Start *Rendering Pipeline* with TS_M
  $committed \leftarrow true$
end if
▷ **Step 4: Asynchronous Optional Enhancement**
for each $t_i \in TS_O$ **do**
  if $status(KID_{t_j}) = usable$ **then**
    if $status(t_j) \neq Ready$ **then**
      $status(t_j) \leftarrow Ready$
      Update *Rendering Pipeline* with t_j
    end if
  end if
end for
end while

그림 3. Algorithm 1(트랙셋 기반 DRM 복호화 및 렌더링 오케스트레이션)의 구조
Fig. 3. Structure of Algorithm 1 (Trackset-Based Decryption and Rendering Orchestration)

본 알고리즘의 입력은 암호화된 트랙 집합 T와 각 트랙의 KID 상태이며, 출력은 렌더링 시작 신호와 트랙 상태 갱신 결과이다.

초기 단계(Step 1)에서는 전체 트랙 집합 T를 기능적 중요도에 따라 Mandatory 트랙셋(TS_M)과 Optional 트랙셋(TS_O)으로 분류한다.

이후 스트리밍이 진행되는 동안, 시스템은 각 트랙의 KID 상태를 지속적으로 모니터링한다. 특정 트랙의 키 상태가 usable에 도달하면 해당 트랙은 Ready 상태로 전이되며, Mandatory 트랙셋 내에서 Ready 상태에 도달한 트랙의 수를 기반으로 렌더링 개시 여부를 판단한다(Step 2).

Mandatory 트랙셋에 포함된 모든 트랙이 Ready 상태에 도달한 경우, Keyset Commit 신호가 발생하며 렌더링 파이프라인이 즉시 시작된다. 이는 전체 트랙이 아닌 필수 트랙만을 기준으로 렌더링을 개시함으로써 초기 지연을 최소화하기 위함이다(Step 3).

렌더링 이후에도 Optional 트랙은 비동기적으로 처리되며, KID가 usable 상태에 도달하면 Ready로 전이되어 렌더링에 점진적으로 반영된다. 이를 통해 초기 표현 지연을 최소화하면서 점진적인 품질 향상을 달성한다(Step 4).

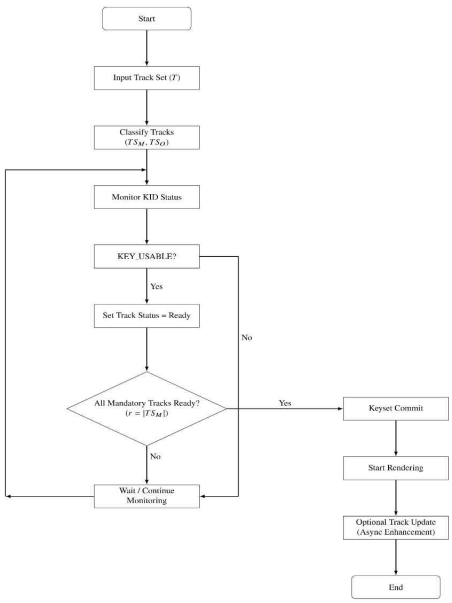

그림 4. KEY_USABLE 상태 처리와 keyset commit 신호의 트리거 조건을 보여주는 워크플로우
Fig. 4. Workflow illustrating the KEY_USABLE state handing and the triggering condition of the keyset commit signal

www.kci.go.kr

그림 4는 KEY_USABLE 상태 전이와 Keyset Commit 신호 발생 조건을 중심으로, 제안하는 DRM 오케스트레이션의 전체 흐름을 시각적으로 나타낸다. 각 트랙의 KID 상태가 모니터링되며, Mandatory 트랙셋이 모두 Ready 상태에 도달하는 시점에서 렌더링이 개시되고, 이후 Optional 트랙이 비동기적으로 반영되는 과정을 확인할 수 있다.

이와 같은 오케스트레이션 방식은 다중 KID 환경에서 특정 트랙의 키 획득 지연으로 인해 전체 렌더링이 지연되는 문제를 방지하며, 최소 표현 기반의 빠른 렌더링과 점진적 품질 향상을 동시에 달성할 수 있도록 한다.

3.4 기존 트랙 단위 DRM과의 차별성

기존 CENC 기반 DRM은 트랙/샘플 단위 암호화 구조를 제공하지만, 객체 단위 복호화 준비 조건은 정의하지 않는다. 제안 방식은 V3C 멀티 컴포넌트 트랙 구조를 전제로, 객체 단위 복호화 준비 조건과 렌더링 개시 기준을 명시적으로 정의한다는 점에서 차별성을 가진다.

표 1. 트랙과 트랙셋 기반 DRM 제어 비교
Table 1. Comparison of Track-based and Trackset-based DRM control

구분	기존 방식	제안 방식
관리 단위	개별 트랙 (Track/Sample)	객체 단위 논리 그룹(trackset)
복호화 조건	모든 관련 트랙의 키 확보 필요	Mandatory 트랙셋 충족 시
렌더링 개시 기준	전체 트랙 준비 완료 후 시작	최소 표현 가능 시 즉시 시작
KID 처리 방식	트랙별 독립 처리 (비연계)	트랙셋 단위로 상태 통합 관리
의존성 표현	명시적 정의 없음 (구현 의존)	메타데이터 기반 명시적 정의
지연 특성	트랙 수 증가에 따라 지연 누적	최소 트랙 기준으로 지연 제한
확장성	트랙 수 증가 시 성능 저하	객체 단위 확장에 유리
사용자 경험(QoE)	초기 재생 지연 발생 가능	빠른 초기 렌더링 + 점진적 품질 향상
적용 방식	DRM 내부 제어 중심	DRM 상위 오케스트레이션 레벨

본 메커니즘은 ISO/IEC 23090-10(V3C) 및 CENC 구조를 변경하지 않으면서, 기존 DRM 인터페이스 상위에서 동작하는 오케스트레이션 로직으로 구현 가능하다. 이는 표준화된 미디어 포맷을 유지하면서도 복잡한 실감 미디어 환경에서 복호화 파이프라인의 효율성을 극대화할 수 있는 실질적인 방안을 제공한다.

4. 실험 및 성능 평가

본 장에서는 제안하는 트랙셋 기반 DRM 제어 방식이 기존 트랙 단위 DRM 방식 대비 초기 렌더링 지연 시간을 얼마나 감소시키는지 평가한다. 이를 위해 멀티트랙 구조를 바탕으로 지연 기반 시뮬레이션 환경을 구성하고, 다중 트랙 복호화 상황에서 렌더링 개시 시간을 비교 분석하였다.

4.1 실험 환경

본 실험은 MPEG-I V3C 기반 볼류메트릭 비디오 콘텐츠를 대상으로 수행하였다. V3C 데이터는 하나의 3D 객체를 표현하기 위해 atlas track과 복수의 video component track(geometry, attribute, occupancy 등)으로 구성되며, atlas track을 중심으로 상호 참조 구조를 형성한다.

또한 본 연구에서는 각 트랙을 Common Encryption(CENC) 방식으로 서로 다른 KID를 사용하여 암호화하였다.

실험의 확장성을 검증하기 위해 객체 수를 1, 5, 20, 50개로 증가시켰으며, 이에 따라 전체 트랙 수는 각각 4, 20, 80, 200개로 확장되도록 설계하였다. 각 트랙의 데이터 크기는 Atlas 1MB, Geometry 2MB, Attribute 3MB, Occupancy 1.5MB로 설정하여 실제 V3C 콘텐츠의 상대적 비중을 반영하였으며, 최대 실험 조건에서는 약 375MB 규모의 데이터를 처리하도록 구성하였다.

www.kci.go.kr

멀티트랙 DRM 환경을 모사하기 위해 각 트랙은 독립적인 KID를 기반으로 개별 라이선스를 획득하도록 설정하였다. 트랙별 복호화 지연은 데이터 크기 및 처리 복잡도를 고려하여 설정하였다.

또한, 실제 네트워크 환경에서 발생할 수 있는 지연 변동성을 반영하기 위해, 각 트랙의 최종 지연은 상기 기본 지연을 기준으로 일정 범위의 지터(jitter)와 확률적 지연 변동을 추가적으로 적용하는 방식으로 모델링하여 다양한 네트워크 환경에서 발생할 수 있는 지연 특성을 보다 현실적으로 반영하였다.

추가적으로, 제안 방식의 구조적 특성을 분석하기 위해 Mandatory 트랙셋의 구성 비율을 25%, 50%, 75%, 100%로 변화시키는 정책 기반 실험을 수행하였으며, 이를 통해 트랙셋 구성에 따른 초기 재생 지연(TTFR)의 변화를 평가하였다. 주요 실험 설정은 표 2에 정리하였다.

표 2. V3C 기반 트랙셋 DRM 성능 평가를 위한 실험 환경
Table 2. Experimental environment for the evaluation of the proposed Trackset-based DRM approach

구성요소	설정
Content Format	MPEG-I V3C
Encryption Scheme	Common Encryption(CENC)
Object Structure	Atlas, Geometry, Attribute, Occupancy
Object Count	1, 5, 20, 50
Total Tracks	4, 20, 80, 200
Track Size	Atlas 1MB, Geometry 2MB, Attribute 3MB, Occupancy 1.5MB
Total Data Size	up to ~ 375MB
DRM Protection	KID-based key management
Baseline Latency	Atlas 100ms, Geometry 120ms, Attribute 250ms, Occupancy 300ms
Delay Variation Model	jitter(±10%) + Randomized probabilistic delay

표 2는 실험에 사용된 콘텐츠 구성, 트랙 수, 데이터 크기 및 네트워크 지연 조건 등을 요약한 것이며, 본 연구에서는 멀티트랙 스트리밍 환경과 라이선스 획득 지연을 모사하기 위해 Python 기반의 시뮬레이션 프레임워크를 구현하였다.

표 3. 제안하는 트랙셋 기반 DRM 성능 평가를 위한 하드웨어 구성 및 시뮬레이션 환경
Table 3. Hardware configuration and simulation environment for evaluating the proposed trackset-based DRM mechanism

구성요소	설명
CPU	Intel i7
Memory	32GB
OS	Windows
Simulation	멀티트랙 스트리밍 및 라이선스 지연 모델링을 포함한 Python 기반 시뮬레이션

표 3은 실험 수행에 사용된 시스템 구성 및 시뮬레이션 환경을 나타낸다.

4.2 비교 방식 및 평가 지표

본 연구에서는 기존 트랙 단위 DRM 제어 방식과 제안하는 트랙셋 기반 DRM 제어 방식을 비교하였다.

(1) 기존 방식(Baseline) : Track-based DRM

기존 방식은 ISOBMFF 내 모든 개별 트랙의 라이선스 확보 및 키 가용성(KEY_USABLE)을 독립적으로 관리한다. 플레이어는 객체를 구성하는 모든 트랙(T)의 키가 확보될 때까지 렌더링 파이프라인을 대기시키며, 렌더링 개시 시점 T_{conv}는 식 (4)와 같이 결정된다.

$$TTFR_{conv} = \max_{t_i \in T} \left[\triangle License(KID_{t_i}) \right] \quad (4)$$

이 방식은 특정 트랙의 키 획득이 지연될 경우, 다른 트랙들이 준비되었음에도 불구하고 전체 재생이 중단되는 문제를 야기한다.

(2) 제안 방식 : 트랙셋 기반 DRM

제안 방식은 트랙 간의 기능적 의존성을 고려하여 이를 Mandatory 트랙셋(TS_M)과 Optional

www.kci.go.kr

트랙셋(TS_O)으로 계층화한다. 본 실험을 위한 트랙셋 구성은 V3C 표준의 특성을 반영하여 다음과 같이 정의한다.

- Mandatory 트랙셋(TS_M): 객체의 기하학적 형태와 기본적인 시각 정보를 복원하기 위한 필수 컴포넌트 집합
- Optional 트랙셋(TS_O): 시각적 세부 사항 및 고화질 텍스처를 제공하는 부가 컴포넌트 집합

$$TTFR_{prop} = \max_{t_i \in TS_M} \left[\triangle License(KID_{t_i}) \right] \quad (5)$$

제안 방식에서 렌더링 시작 시간은 식 (5)와 같이 정의되며, 오직 TS_M의 조건이 충족되는 시점에 즉시 개시되며, TS_O는 렌더링 도중 비동기적으로 업데이트된다. 제안 메커니즘의 효율성을 정량적으로 평가하고 기존 방식 대비 성능 우위를 증명하기 위해 다음과 같은 지표를 산출한다.

- 초기 재생 지연 시간(Initial Playback Delay, TTFR) : 기존방식은 $TTFR_{conv}$, 제안 방식은 $TTFR_{prop}$ 으로 정의한다. 사용자로부터 재생 요청(Play Request)이 발생한 시점부터, 필수 트랙셋(TS_M)의 복호화가 완료되어 첫 번째 유효한 3D 객체가 화면에 출력되기까지 소요 시간(ms)을 의미한다. 이는 3D 스트리밍 서비스의 초기 사용자 경험(QoE)을 결정하는 핵심 지표이다.
- 객체 완성도 도달 시간(Full Quality Convergence Time, T_{full}): 초기 렌더링 개시 이후, 비동기적으로 처리되는 모든 선택적 트랙셋(TS_O)이 반영되어 씬(Scene) 내 객체가 최상위 품질(Full Quality)로 구현되기까지의 총 시간을 측정한다.
- 성능 개선율(Improvement Rate): 기존 트랙 단위 DRM 방식의 지연 시간($TTFR_{conv}$) 대비 제안하는 트랙셋 기반 방식의 지연 시간($TTFR_{prop}$) 단축 효과를 식 (6)과 같이 백분율로 산출한다.

$$Improvement\ Rate(\%) = \frac{TTFR_{conv} - TTFR_{prop}}{TTFR_{conv}} \times 100 \quad (6)$$

본 비교 실험에서는 제안 방식과 기존 방식 모두 동일한 네트워크 조건, 트랙 구성 및 콘텐츠 구조를 기반으로 수행하여 공정성을 확보하였다.

4.3 성능 평가 결과

본 절에서는 4.1절의 실험 환경을 기반으로 제안하는 트랙셋 기반 DRM 방식의 성능을 평가하였다. 성능 지표로는 초기 재생 지연 시간(Time To First Rendering, TTFR), 전체 품질 도달 시간(Full Quality Convergence Time, T_{full}), 그리고 성능 개선율을 사용하였다.

표 4는 객체 수 증가에 따른 TTFR 성능 비교 결과를 나타내며, 실험 결과 제안 방식은 객체 수 증가 조건 전반에서 기존 방식 대비 약 74~80% 수준의 일관된 TTFR 감소 효과를 보였다.

특히 객체 수 증가에 따라 전체 트랙 수가 선형적으로 증가하는 환경에서 기존 방식은 모든 트랙의 KID가 usable 상태가 될 때까지 대기해야 하므로 TTFR이 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 반면, 제안 방식은 Mandatory 트랙셋의 상태만을 기준으로 렌더링을 개시하므로, 트랙 수 증가에도 불구하고 TTFR 증가가 상대적으로 제한되는 특성을 보였다.

표 4. 기존 방식과 제안 방식의 TTFR, 전체 품질 도달 시간 및 성능 개선율 비교
Table 4. Performance comparison of TTFR, full quality convergence time, and improvement rate for conventional and proposed methods

Number of Objects	Total Number of Tracks	$TTFR_{conv}$ (ms)	$TTFR_{prop}$ (ms)	Improvement (%)	T_{full} (ms)
1	4	618.7	124.2	79.6	618.7
5	20	857.3	163.8	79.5	857.3
20	80	1108.6	250.0	75.7	1108.6
50	200	1331.9	343.4	74.1	1331.9

www.kci.go.kr

그림 5는 객체 수 증가에 따른 초기 재생 지연 시간(TTFR)을 비교한 결과를 나타낸다.

객체 수가 증가함에 따라 전체 트랙 수가 증가하면서 기존 방식은 TTFR이 급격히 증가하는 반면, 제안 방식은 필수 트랙셋 기반으로 렌더링을 개시함으로써 증가 폭이 제한되는 경향을 보인다.

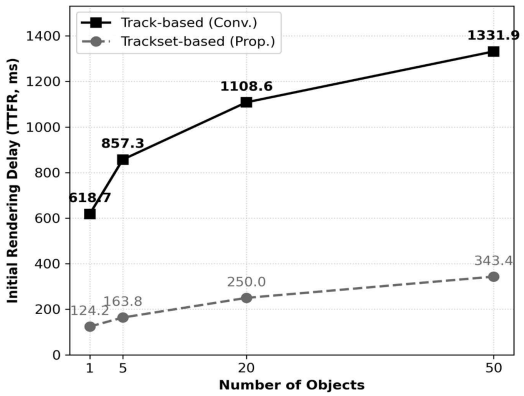

그림 5. 객체 수 증가에 따른 기존 방식과 제안 방식의 초기 렌더링 시작 시간(TTFR) 비교

Fig. 5. Comparison of initial rendering delay (TTFR) with increasing numbers of objects for conventional and proposed methods

그림 6은 그림 5의 결과를 기반으로 객체 수 증가에 따른 TTFR 개선율을 시각적으로 나타낸 것이다.

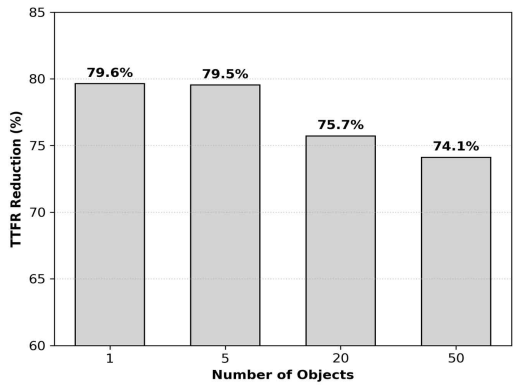

그림 6. 객체 수 증가에 따른 TTFR 감소율(Improvement Rate) 비교

Fig. 6. Comparison of TTFR reduction (%) with increasing numbers of objects

개선율은 약 74~80% 범위에서 비교적 안정적으로 유지되며, 이는 객체 수 증가에도 불구하고 제안 방식이 기존 방식 대비 유의미한 성능 우위를 유지함을 의미한다.

또한 그림 7은 Mandatory 트랙 비율 변화에 따른 TTFR 변화를 비교한 결과를 보여준다. 제안 방식은 Mandatory 트랙 비율이 증가함에 따라 TTFR이 점진적으로 증가하는 경향을 보이며, 이는 렌더링 개시에 필요한 필수 트랙 수가 증가하기 때문이다. 반면 기존 방식은 모든 트랙의 키 확보 이후 렌더링을 개시하는 구조로 인해 Mandatory 비율 변화에 따른 영향이 거의 나타나지 않는다. 특히 Mandatory 비율이 100%인 경우, 두 방식의 TTFR이 동일하게 나타나며, 이는 제안 방식이 기존 방식과 동일한 구조로 수렴함을 의미한다.

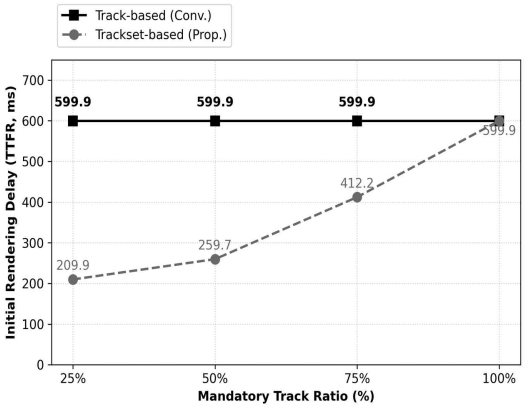

그림 7. Mandatory 트랙 비율에 따른 기존 방식과 제안 방식의 TTFR 비교

Fig. 7. Comparison of TTFR between the conventional and proposed methods according to the mandatory track ratio

표 4와 그림 5~7의 결과를 종합하면, 제안하는 트랙셋 기반 DRM 방식은 객체 수 증가 및 Mandatory 트랙셋 구성 변화에도 불구하고 기존 방식 대비 일관된 TTFR 감소 특성을 보인다. 특히 필수 트랙셋 기반 렌더링 구조를 통해 TTFR

www.kci.go.kr

을 효과적으로 제한할 수 있으며, 트랙셋 구성에 따라 성능을 유연하게 조절할 수 있음을 확인하였다. 또한 본 연구는 초기 사용자 경험에 직접적인 영향을 미치는 TTFR을 중심으로 성능을 분석하였으며, 제안 방식의 전체 품질 도달 시간(T_{full})에 대한 분석은 향후 연구로 남겨둔다.

5. 결 론

본 논문에서는 V3C 기반 3D 콘텐츠의 멀티트랙 구조에서 발생하는 DRM 처리 병목 현상을 해결하기 위해 트랙셋 단위의 제어 메커니즘을 제안하였다. 실험 결과, 제안 기법은 필수 트랙셋 위주의 즉각적인 렌더링 개시를 통해 기존 방식 대비 TTFR을 약 74~80% 수준으로 단축함을 확인하였다. 특히 객체 수가 증가하는 고정밀 3D 씬 환경에서도 지연 시간 증가폭을 일정 수준 이하로 억제함으로써 몰입형 콘텐츠 서비스의 사용자 경험(QoE)을 효과적으로 개선할 수 있음을 입증하였다. 또한 Mandatory 트랙셋 구성 비율에 따라 초기 지연과 성능 간의 trade-off를 유연하게 제어할 수 있음을 확인하였다. 이는 트랙 수 증가에 따른 DRM 처리 지연을 구조적으로 완화할 수 있음을 의미한다.

다만, 본 연구에서 제안한 필수 트랙셋 중심의 제어 방식은 선택적 트랙셋의 지연이 길어질 경우, 초기 렌더링 시점에서 해당 데이터가 제외됨에 따라 일시적인 품질 저하가 발생할 수 있다는 한계가 존재한다. 따라서 향후 연구에서는 이러한 품질 저하와 지연 시간 간의 trade-off를 동적으로 관리하기 위한 적응형 DRM 제어 기술을 연구할 예정이다. 구체적으로 시스템 환경 및 처리 지연 상태를 실시간으로 모니터링하고, 이에 기반하여 필수/선택 트랙셋의 구성과 렌더링 임계값을 최적으로 결정하는 네트워크 상황 인지형 DRM 최적화 알고리즘에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

본 연구는 문화체육관광부 및 한국콘텐츠진흥원의 2026년도 신기술 융합 저작권 기술개발 사업으로 수행되었음(과제명: Web3.0 탈중앙화 환경에서 창작자간의 저작권 이용허락 거래 자동화 기술 개발, 과제번호: RS-2024-00441360, 기여율 100%)

참 고 문 헌

[1] ISO/IEC 23090-10, Information technology – Coded representation of immersive media – Part 10: Carriage of visual Volumetric Video-based Coding data, ISO/IEC, 2022. https://www.iso.org/standard/78991.html

[2] ISO/IEC 23090-14, Information technology – Coded representation of immersive media – Part 14: Scene Description, ISO/IEC, 2025. https://www.iso.org/standard/90191.html

[3] ISO/IEC 14496-12, Information technology – ISO base media file format, ISO/IEC, 2022. https://www.iso.org/standard/83102.html

[4] ISO/IEC 23001-7, Information technology – Common encryption in ISO base media file format files, ISO/IEC, 2023. https://www.iso.org/standard/84637.html

[5] H. Heidarirad, “VV-DASH: A Framework for Volumetric Video DASH Streaming”, in Proceedings of the 16th ACM Multimedia Systems Conference (MMSys '25), Mar. 2025. DOI: doi.org/10.1145/3712676.3718339

[6] M. Santamaria et al., “Coding of volumetric content with MIV using VVC subpictures”, in Proc. IEEE MMSP, 2021, pp. 1–6.

[7] J. Lee, H. Kim, “Attribute-Based Encrypted Volumetric Video Streaming”, in Proc. IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), 2023, pp. 1–6. arXiv:2601.08987, 2026.

[8] S. Schwarz, M. Preda, V. Baroncini, et al., “Emerging MPEG standards for point cloud

www.kci.go.kr

compression", IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, vol. 9, no. 1, pp. 133 - 148, Mar. 2019. DOI: 10.1109/JETCAS.2018.2885981
[9] I. H. Jo, "Apparatus and Method for MAF-Based 3D Scene-Level DRM Control", Korean Patent Application 10-2025-0197719, Dec. 2025. http://www.kipris.or.kr
[10] I. Yang, et al., "glTF Container Format Structure for Packaging and Individual DRM Application in Multiple Gaussian Splats Objects", Journal of Broadcast Engineering, vol. 31, no. 1, pp. 26 - 37, Jan. 2026. DOI : 10.5909/JBE.2026.31.1.

저 자 소 개

조인희(In-Hee Jo)

2013.3 : 숭실대학교 컴퓨터학과 석사
2025.8 : 숭실대학교 컴퓨터학과 박사수료
2012.10-2025.10 디지캡(주) 책임연구원
2025.11-현재 엘에스웨어(주) 수석연구원
<주관심분야> 저작권기술, 인공지능, 온톨로지

조용준(Yong-Joon Jo)

2011.3 : 큐슈대학교 전기정보공학과 학사
2016.3 : 큐슈대학교 정보학부 석사
2016.3 : 큐슈대학교 정보학부 박사수료
2013.4-2016.3 : 일본 학술진흥원 특별연구원
2016.04-현재 : 엘에스웨어㈜ 소프트웨어연구소 연구개발본부 기술이사
<주관심분야> 게임이론, 저작권, 병렬·분산 컴퓨팅, 오픈소스, 분산 제약 최적화 문제

신동명(Dong-Myung Shin)

2003.8 : 대전대학교 컴퓨터공학과 박사
2001-2006 : 한국정보보호진흥원(KISA) 응용기술팀 선임연구원
2006-2014 : 한국저작권위원회 저작권기술팀 팀장
2014-2016 : 한국스마트그리드사업단 보안인증팀 팀장
2016-현재 엘에스웨어(주) 연구소장/전무이사
<주관심분야> 오픈소스 라이선스, 저작권 기술, 시스템/네트워크 보안, SW 취약점 분석·감정, 블록체인

신용태(Yong-Tae Shin)

1985년 한양대학교 산업공학학과(공학사)
1990. University of Iowa Computer Science (공학석사)
1994. University of Iowa Computer Science (공학박사)
1995-현재 숭실대학교 컴퓨터학과 교수
<주관심분야> 컴퓨터 네트워크, 그룹통신, 분산 컴퓨팅, 인터넷 프로토콜, 초고속 통신망, 전자상거래 기술

www.kci.go.kr