

3차원 가우시안 스플래팅의 파괴 시뮬레이션을 위한 통합 파이프라인 연구

김 경 중¹ · 유 태 경^{2*}¹중앙대학교 첨단영상대학원 영상학과 석사과정²중앙대학교 예술공학대학 교수

Integrated Pipeline for Fracture Simulation of 3D Gaussian Splatting

Kyung-Joong Kim¹ · Tae-Kyung Yoo^{2*}¹Master's Course, Department of Entertainment Technology, Graduate School of Advanced Imaging Science, Multimedia and Film, Chung-Ang University, Seoul 06911, Korea²Professor, College of Art & Technology, Chung-Ang University, Ansong 17546, Korea

[요 약]

본 연구에서는 3D Gaussian Splatting(3DGS) 장면이 표면 중심 표현에 머물러 파괴 시 내부 단면이 비어 보이는 문제를 완화하기 위해, 내부 보강과 조각 기반 강체 파괴 시뮬레이션을 결합한 통합 파이프라인을 제안한다. 제안 방법은 signed distance field(SDF)를 기반으로 객체 내부에 보강용 가우시안 포인트를 생성하고, 슬라이스 기반 좌표와 주변 원본 가우시안 정보를 활용하여 절단면 노출 시 사용될 시각적 내부 표현을 구성한다. 이후 가우시안 분포로부터 복원한 프록시 메시에 조각 기반 강체 파괴 시뮬레이션을 적용하고, 계산된 조각별 변형을 기준 프레임 바인딩을 통해 가우시안 프리미티브에 전달한다. 또한 절단면 기반 가지치기를 적용하여 절단면 표현에 필요한 내부 가우시안만 유지함으로써 계산 비용을 제어한다. 실험 결과, 제안 방법은 파괴 후 내부 공백을 완화하고 파괴 시퀀스의 공간적·시간적 일관성을 향상시키며, 절단면 품질과 계산 효율 사이의 균형을 제공함을 확인하였다.

[Abstract]

This paper presents an integrated pipeline that combines interior augmentation with piecewise rigid fracture simulation to address the hollow cross-section problem in 3D Gaussian splatting, where surface-centered representations often reveal empty interiors after fracture. The proposed method generates auxiliary interior Gaussian points using a signed distance field and reconstructs plausible internal appearances for exposed cut surfaces using slice-based coordinates and neighboring Gaussians. A proxy mesh reconstructed from the Gaussian distribution is used for fracture simulation, and the resulting piecewise transformations are transferred back to the Gaussian primitives through rest-frame binding. In addition, cut-aware pruning retains only the interior Gaussians required for cut-surface representation, thereby reducing computational cost. Experimental results demonstrate improved fracture continuity while achieving a practical balance between cut-surface quality and computational efficiency.

색인어 : 포인트 클라우드, 가우시안 스플래팅, 강체 시뮬레이션, 물리 기반 시뮬레이션, 파이프라인**Keyword** : Point Clouds, 3D Gaussian Splatting, Rigid-Body Dynamics, Physics-Based Simulation, Pipeline<http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2026.27.5.1371>

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.

Received 25 March 2026; Revised 07 April 2026

Accepted 23 April 2026

***Corresponding Author; Tae-Kyung Yoo**

Tel: +82-31-670-3187

E-mail: yootaekyung@cau.ac.kr

I. 서론

3차원 가우시안 스플래팅(3D Gaussian Splatting, 3DGS)은 다수 시점 영상으로부터 장면을 3차원 가우시안 프리미티브의 집합으로 복원하고, 이를 이용해 고품질의 새로운 시점 영상을 빠르게 생성하는 장면 표현 기법이다[1]. 이러한 가우시안 기반 표현은 기존 NeRF 계열이 제공하던 높은 시각 품질을 유지하면서도 실시간에 가까운 렌더링 속도를 달성할 수 있다는 점에서 큰 주목을 받아 왔다[2]-[4]. 그러나 기존 3DGS 연구의 대부분은 장면의 외형 복원과 시점 합성에 초점을 두고 있어, 실제 콘텐츠 제작 과정에서 요구되는 절단, 파괴, 내부 노출과 같은 물리적 변형 표현에는 한계를 가진다. 특히 3DGS 장면은 표면 중심의 가우시안 분포로 구성되는 경우가 많아 내부 구조가 비어 있으며, 이로 인해 물체가 파괴되거나 절단될 때 내부가 자연스럽게 드러나지 않는 문제가 발생한다.

최근에는 가우시안 기반 장면 표현에 물리 시뮬레이션을 결합하려는 연구도 제안되고 있다. 예를 들어 PhysGaussian과 같은 연구는 가우시안 프리미티브 자체에 물리 상태를 결합하여 시뮬레이션과 렌더링을 통합하는 방향을 제시하였고, 동적 가우시안 계열 연구들은 시간에 따른 장면 변형을 표현할 수 있는 구조를 확장하였다[4]-[6]. 이러한 연구들은 가우시안 기반 장면 표현이 정적 재구성을 넘어 동적 변형과 물리적 변화까지 포함할 수 있음을 보여준다는 점에서 의미가 있다. 그러나 이들 연구의 주된 관심은 표현 자체의 동역학 확장에 있으며, 파괴 후 새롭게 노출되는 내부 영역의 시각적 표현이나 조각 단위 제어를 실제 제작 워크플로우와 연결하는 문제는 직접적으로 다루지 않는다.

한편 재질점법(Material Point Method, MPM)은 연속체 물질의 대변형, 충돌, 파손을 다루는 데 널리 사용되어 왔으며, 눈, 모래, 젤리와 같은 연속체 재질 시뮬레이션에서 특히 효과적인 결과를 보여주었다[7]-[9]. 또한 절단, 변위 불연속, 강제 결합 등을 포함하는 다양한 확장 연구가 제안되면서 표현 범위 역시 넓어지고 있다. 그러나 이러한 접근은 주로 연속체 내부 손상과 균열의 물리적 전개를 중심으로 발전해 왔으며, 조각 단위의 명확한 파편 구조와 절단면 형상을 반복적으로 제어해야 하는 제작 환경의 요구와는 차이가 있다. 따라서 본 연구는 가우시안 표현 자체를 직접 연속체 물리로 확장하기보다, 조각 기반 강제 파괴 결과를 가우시안 프리미티브에 다시 전달하는 연동 구조에 초점을 둔다.

이에 본 연구에서는 비어 있는 내부 구조를 가지는 3DGS 장면에 대해 내부 보강(infilling), 프록시 메시(proxy mesh) 기반 조각 시뮬레이션, 조각별 할당, 기준 프레임 바인딩(rest-frame binding), 그리고 절단면 기반 가지치기(cut-aware pruning)를 포함하는 통합 파이프라인을 제안한다. 본 연구의 핵심은 새로운 연속체 물리 모델 자체를 제안하는 데 있는 것이 아니라, 파괴 가능한 내부 구조를 형성

한 뒤 조각 단위로 계산된 강제 변환을 가우시안 표현 계층에 안정적으로 전달함으로써, 3DGS의 시각적 장점을 유지하면서도 실제 제작 환경에서 사용되는 조각 기반 파괴 작업 흐름과 연결 가능한 구조를 제공하는 데 있다. 이를 위해 본 연구에서는 조각 분할과 강제 운동 계산에 적합한 프록시 메시지를 시뮬레이션용 중간 표현으로 사용하며, 이를 통해 조각 기반 강제 파괴 시뮬레이션을 안정적으로 수행할 수 있다. 이러한 접근은 가우시안 표현을 직접 연속체 물리로 시뮬레이션하는 대신, 시뮬레이션과 렌더링 표현을 분리한 하이브리드 구조에 기반하며, 이로 인해 가우시안 분포와 프록시 메시 간의 기하학적 차이에 따라 조각 경계 부근에서 일부 불일치가 발생할 수 있다.

II. 선행 연구 분석

2-1 NeRF와 3D Gaussian Splatting

표 1. NeRF 및 Gaussian Splatting 기반 장면 표현 선행 연구 정리
Table 1. Summary of prior studies on NeRF- and Gaussian Splatting-based scene representations

Researchers	Representation Type	Method
Mildenhall et al.	Neural Radiance Field (NeRF)	Continuous radiance field learning for novel view synthesis from multi-view images
Kerbl et al.	3D Gaussian Splatting	Real-time radiance field rendering using Gaussian primitives
Wu et al.	4D Gaussian Splatting	Time-varying Gaussian primitives for dynamic scene rendering
Yang et al.	Geometry-aware Deformable Gaussian Splatting	Geometry-aware deformable Gaussian representation for dynamic view synthesis

NeRF는 다수 시점 영상과 카메라 포즈로부터 장면의 연속적인 밀도 및 복사율 필드를 학습하여 새로운 시점 영상을 합성하는 대표적인 장면 표현 기법이다[2]. 높은 시각 품질을 제공한다는 장점이 있으나, 학습과 렌더링에 큰 연산 비용이 요구되므로 실시간 응용이나 대화형 편집 환경에 직접 적용하는 데에는 한계가 있었다. 이러한 제약을 완화하기 위해 다양한 가속화 연구가 제안되었으며, 그 흐름 속에서 Kerbl 등은 3D Gaussian Splatting(3DGS)을 제안하여 고품질 장면 재구성과 실시간 렌더링을 동시에 달성하였다[1],[3]. 3DGS는 장면을 다수의 3차원 Gaussian 프리미티브로 표현하고 이를 화면 공간으로 직접 점 분포 투영 방식으로 렌더링함으로써, 기존 NeRF 계열보다 훨씬 빠른 처리 속도를 제공한다. 또한 명시적 가우시안 표현을 사용하므로 장면 구조를 보다 직접적으로 다룰 수 있다는 장점이 있다.

이후 4D Gaussian Splatting 및 geometry-aware deformable Gaussian 계열 연구들은 이러한 표현을 동적 장면으로 확장하여, 시간에 따른 움직임과 변형까지 다룰 수 있는 구조를 제안하였다[4],[5]. 이러한 연구 흐름은 가우시안 기반 장면 표현이 정적 장면의 재구성에 머물지 않고, 동적 장면 표현과 변형 가능한 장면 표현으로 발전하고 있음을 보여준다. 그러나 이들 연구의 주된 관심은 장면의 시간적 변화나 기하 변형을 표현하는 데 있으며, 파괴 이후 노출되는 내부 구조의 형성이나 조각 단위의 파편 제어와 같은 문제는 직접적으로 다루지 않는다. 즉, 기존 장면 표현 연구는 가우시안 기반 표현의 속도와 시각 품질을 크게 향상시켰지만, 파괴 장면을 위한 내부 구조와 조각 기반 편집 가능성까지 포괄하는 단계에는 아직 도달하지 못하였다.

2-2 3DGS 기반 물리 시뮬레이션 연구

표 2. Gaussian 기반 표현에 물리 시뮬레이션을 통합한 선행연구 정리
Table 2. Summary of prior studies integrating physics simulation with Gaussian-based representations

Researchers	Physics Model	Method
Xie et al.	MPM	Physics-integrated 3D Gaussians with motion and stress states for generative dynamics
Borycki et al.	Physics-based simulation coupling	Direct integration of Gaussian Splatting with physics-based simulation
Huang et al.	CD-MPM	Continuum damage simulation for mixed-material dynamic scenes

3DGS가 정적 장면 표현에서 높은 성능을 보이기 시작하면서, 이를 물리 시뮬레이션과 결합하려는 연구도 등장하고 있다. 대표적으로 PhysGaussian은 3D 가우시안 프리미티브에 물리적으로 의미 있는 운동 및 응력 상태를 결합하고, 맞춤형 MPM(Material Point Method)을 적용하여 시뮬레이션과 렌더링을 통합한 파이프라인을 제안하였다[6]. 이 접근은 가우시안 표현 자체를 물리적으로 변형 가능한 상태로 확장했다는 점에서 의의가 있다. 또한, 가우시안 프리미티브를 통합된 입자(Unified particles)로 정의하여 복합적인 운동 합성 및 렌더링을 수행하는 Gaussian Splashing 연구도 제안되었다[10]. 이후 GASP는 가우시안 기반 장면 표현을 물리 기반 시뮬레이션과 직접 연결하는 방향을 제시하였고, 최근 GaussianFluent는 가우시안 표현의 내부 볼륨 부족과 취성 파괴 표현의 한계를 지적하면서, 생성 모델 기반 내부 densification과 CD-MPM을 결합한 mixed-material 동적 장면 시뮬레이션을 제안하였다[11],[12].

이러한 선행연구는 크게 두 가지 공통 방향을 가진다. 첫째, 가우시안 기반 장면 표현에 물리성을 부여하기 위해 내부 구조를 보강하거나 물리 상태를 추가하려는 시도이다. 둘째,

연속체 물리 모델을 활용하여 가우시안 장면을 직접 변형 가능한 표현으로 확장하려는 시도이다. 이들은 모두 가우시안 표현의 활용 범위를 넓힌다는 점에서 중요하다. 그러나 대부분의 연구는 연속체 물리 통합, 내부 볼륨 생성, 혹은 재질 기반 동적 시뮬레이션에 초점을 두고 있으며, 실제 콘텐츠 제작 환경에서 널리 사용되는 조각 기반 강체 파괴 워크플로우와의 직접적인 연결은 상대적으로 제한적이다. 또한 3DGS 결과는 여전히 대규모 가우시안 프리미티브 집합의 형태로 존재하므로, 이를 후속 편집, 시뮬레이션, 렌더링 과정과 일관되게 연결하는 별도의 파이프라인이 필요하다.

2-3 본 연구의 위치

이에 본 연구에서는 속이 빈 3DGS 장면에 내부 구조를 보강하는 내부 보강 단계, 가우시안 분포로부터 복원한 프록시 메시에 조각 기반 강체 파괴 시뮬레이션을 적용하는 단계, 그리고 조각별 할당, 기준 프레임 바인딩, 시뮬레이션 동작 전달, 절단면 기반 가지치기를 통해 파괴 결과를 가우시안 프리미티브에 일관되게 반영하는 단계를 포함하는 통합 파이프라인을 제안한다. 본 연구의 핵심은 단순히 내부를 채우는 데 있는 것이 아니라, 파괴 가능한 내부 구조를 형성한 뒤 조각 단위로 계산된 강체 변환을 가우시안 표현에 안정적으로 전달함으로써 3DGS의 시각적 장점을 유지하면서도 실제 제작 환경에서 사용되는 조각 기반 파괴 워크플로우와 연결 가능한 구조를 제공하는 데 있다.

III. 제안 파이프라인 구조

본 연구에서 제안하는 파이프라인은 속이 빈 3DGS 장면에 파괴 가능한 내부 구조를 부여하고, 조각 기반 강체 시뮬레이션 결과를 가우시안 프리미티브에 일관되게 전달하는 것을 목표로 한다. 전체 과정은 그림 1과 같이 크게 두 단계로 구성되며, 첫 번째는 내부 구조를 보강하는 전처리 단계이고, 두 번째는 조각 단위 변환을 적용하여 장면의 동적 변형을 구성하는 단계이다. 요약하면, 본 파이프라인은 내부 구조를 보강한 뒤, 프록시 메시를 이용해 조각 기반 시뮬레이션을 수행하고, 그 결과를 다시 가우시안 표현에 전달하는 구조로 구성된다.

먼저 전처리 단계에서는 원본 3DGS 장면에 대해 내부 보강을 수행하여 파괴 이후 노출될 수 있는 내부 구조를 형성한다. 이후 생성된 내부 포인트에 슬라이스 기반 좌표와 주변 원본 가우시안 정보를 이용해 시각적 속성을 부여함으로써, 절단면 및 내부 노출 영역에서도 보다 자연스러운 시각적 표현이 가능하도록 한다. 이 과정은 표면 중심 분포를 갖는 기존 3DGS 표현의 한계를 보완하고, 후속 시뮬레이션 단계에서 활용될 내부 표현 기반을 마련한다.

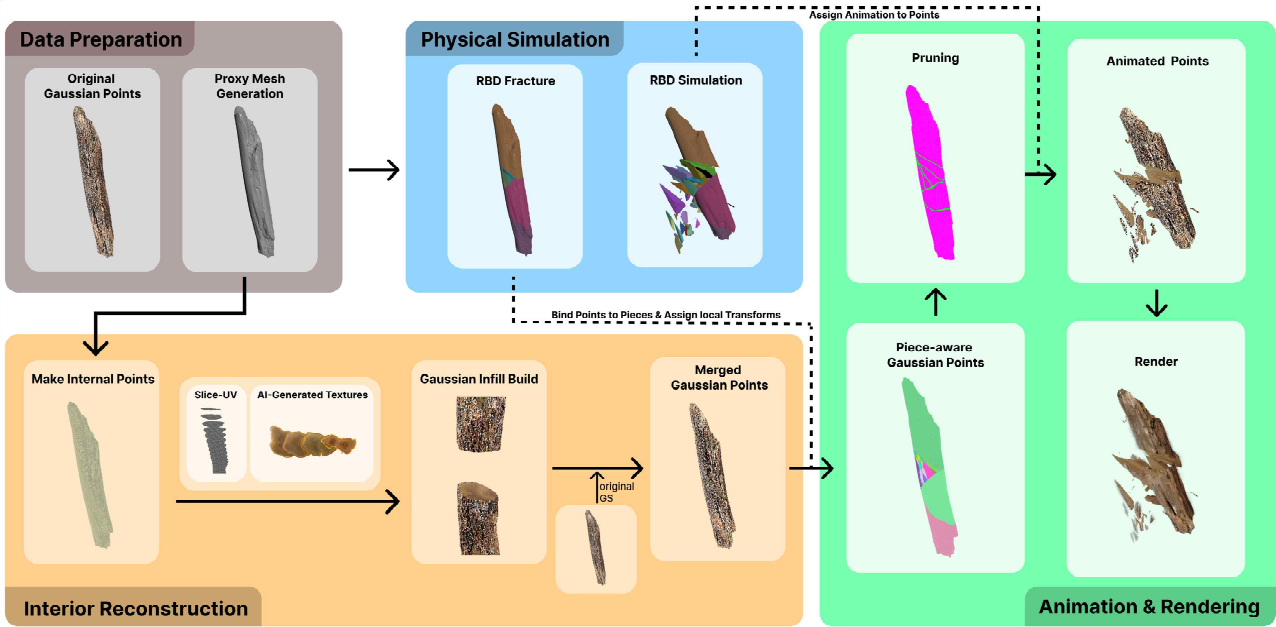


그림 1. 제안된 Gaussian RBD 시뮬레이션 파이프라인 개요
 Fig. 1. Overview of the proposed Gaussian RBD simulation pipeline

이후 변형 단계에서는 가우시안 분포로부터 시뮬레이션용 프록시 메쉬를 복원하고, 여기에 조각 기반 강체 파괴 시뮬레이션을 적용하여 각 조각의 시간별 위치와 회전 변환을 계산한다. 그런 다음 각 가우시안을 해당 조각에 할당하고 조각 기준 프레임에 마인딩한 뒤, 시뮬레이션 프레임에서 계산된 조각 변환을 가우시안 프리미티브에 반영한다. 또한 절단면 부근의 내부 표현만 유지하도록 절단면 기반 가시성 제어와 가지치기를 적용함으로써 계산 비용과 시각적 중첩을 함께 줄인다.

3-1 내부 구조 보강

1) 내부 점 채우기

기존 3DGS 장면은 표면 중심의 가우시안 분포를 가지므로 내부가 비어 있는 경우가 많다. 이러한 구조는 일반적인 시점 합성에서는 큰 문제가 되지 않지만, 파괴나 절단과 같이 내부가 드러나는 상황에서는 시각적 공백으로 이어질 수 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 signed distance field(SDF)를 기준으로 객체 내부에 해당하는 위치에 보강용 가우시안 포인트를 생성한다. 이 과정은 내부가 비어있는 3DGS 장면에 내부 구조를 보강함으로써, 파괴 이후 노출되는 단면과 내부 영역을 보다 자연스럽게 표현하기 위한 기반이 된다.

객체 내부에 해당하는 포인트 집합 P_{in} 은 다음과 같이 정의한다.

$$P_{in} = \{p \in \Omega \mid \phi(p) < -\epsilon_{surf}\} \quad (1)$$

여기서 Ω 는 샘플링 도메인, $\phi(p)$ 는 위치 p 에서의 signed distance field, ϵ_{surf} 는 표면 부근의 점을 제외하기 위한 임계값이다. 식 (1)은 객체 내부에 해당하는 포인트만을 선택하여 infill 대상 집합을 정의하는 단계에 해당한다.

생성된 내부 가우시안 g_j 는 위치, 크기, 회전 쿼터니언, 투명도, 색상으로 구성되며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$g_j = (p_j, s_j, q_j, \alpha_j, c_j) \quad (2)$$

여기서 p_j 는 중심 위치, s_j 는 가우시안의 축별 크기, q_j 는 회전 쿼터니언, α_j 는 투명도, c_j 는 색상을 의미한다. 이 과정은 속이 빈 3DGS 장면에 최소한의 내부 구조를 부여하여, 파괴 시 내부 단면이 완전히 비어 보이는 현상을 완화하는 역할을 한다.

2) 슬라이스 기반 내부 시각적 속성 생성

내부에 생성된 가우시안 포인트가 외피와 완전히 분리된 시각 속성을 가지면 시각적으로 이질적인 결과를 만들 수 있다. 따라서 본 연구에서는 내부 포인트에 대해 슬라이스 기반 좌표를 생성하고, 주변 원본 가우시안의 정보를 활용하여 색상과 속성을 보강한다. 이를 위해 bounding box 기준의 정규화 좌표, 축 방향 좌표, 슬라이스 인덱스, 그리고 슬라이스 평면의 UV 좌표를 계산하여 내부 시각 속성 생성에 활용한다.

먼저 각 포인트를 bounding box 기준의 정규화 좌표계로 변환한다. 바운딩 박스의 최소값과 최대값을 각각 b_{min} , b_{max} 라 하면, 정규화 좌표 u 는 다음과 같이 정의된다.

$$u = \frac{p - b_{\min}}{b_{\max} - b_{\min}} \quad (3)$$

이후 선택한 축 방향에 따라 슬라이스 좌표를 정의한다. 슬라이스 축을 $a \in x, y, z$ 라 할 때, 축 방향 좌표 $w(p)$ 는 다음과 같다.

$$w(p) = \begin{cases} u_x, & a = x \\ u_y, & a = y \\ u_z, & a = z \end{cases} \quad (4)$$

슬라이스 두께를 Δw 라 하면, 포인트 p 의 슬라이스 인덱스는 다음과 같이 계산된다.

$$l(p) = \left\lfloor \frac{w(p)}{\Delta w} \right\rfloor \quad (5)$$

여기서 $l(p)$ 는 슬라이스 ID를 의미한다. 본 연구에서는 크기 벡터 s 와의 기호 충돌을 피하기 위해 슬라이스 인덱스를 $s(p)$ 대신 $l(p)$ 로 표기한다.

또한 슬라이스 평면에서의 2차원 좌표는 다음과 같은 UV 좌표로 정의한다.

$$UV(p) = \begin{cases} (u_y, u_z), & a = x \\ (u_x, u_z), & a = y \\ (u_x, u_y), & a = z \end{cases} \quad (6)$$

이는 선택한 축에 수직인 평면에서 2차원 좌표를 정의하는 과정에 해당한다.

다음으로 각 내부 보강 포인트 p 에 대해 주변 원본 가우시안 집합 $N_K(p)$ 를 찾고, 거리 역수 가중을 이용해 색상, 투명도, 크기를 보간한다. 각 이웃 포인트 p_k 에 대한 가중치는 다음과 같다.

$$w_k = \frac{1}{\max(\|p - p_k\|, \epsilon)^r} \quad (7)$$

여기서 r 은 거리 가중 지수, ϵ 은 수치 안정화를 위한 작은 값이다. 이후 정규화된 가중치 \overline{w}_k 는 다음과 같이 정의한다.

$$\overline{w}_k = \frac{w_k}{\sum_{j \in A} w_j}, \quad (A = N_K(p)) \quad (8)$$

이 정규화 가중치를 이용하여 원본 이웃으로부터 얻는 색상, 투명도, 크기는 각각 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} c_{orig} &= \sum_{k \in A} \overline{w}_k c_k \\ \alpha_{orig} &= \sum_{k \in A} \overline{w}_k \alpha_k \\ s_{orig} &= \sum_{k \in A} \overline{w}_k s_k \end{aligned} \quad (9)$$

이후 원본 가우시안 기반 값과 내부 보강의 기본 값을 혼합하여 내부 포인트의 최종 시각 속성을 생성한다. 이 과정은 내부 단면이 외부 표면과 지나치게 분리되어 보이지 않도록 하며, 내부 표현의 시각적 연속성을 높이는 역할을 한다. 다만 본 단계는 실제 물체 내부의 의미론적 구조나 재질 단면을 복원하는 것이 아니라, 절단면 노출 시 발생하는 시각적 공백을 완화하기 위한 내부 표현 생성에 목적이 있다.

3-2 파괴용 프록시 생성 및 조각 기반 시뮬레이션

내부 보강이 완료된 가우시안 장면은 직접 강체 파괴 시뮬레이션에 사용하기 어렵기 때문에, 먼저 메쉬 형태의 프록시 객체로 변환할 필요가 있다. 가우시안 표현은 명시적인 위상 정보와 연결 구조를 직접 가지지 않기 때문에, 조각 분할과 강체 운동 계산을 필요로 하는 파괴 시뮬레이션을 직접 적용하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 렌더링을 위한 가우시안 표현과 시뮬레이션을 위한 프록시 표현을 분리한 하이브리드 구조를 채택한다. 본 연구에서는 가우시안 분포로부터 SDF를 생성하고, 등가면 추출을 통해 메쉬를 복원한다. 여기서 복원된 메쉬는 최종 렌더링 대상이 아니라, 조각 기반 강체 파괴 시뮬레이션을 수행하기 위한 계산용 프록시로 사용된다. 즉, 프록시 메쉬는 내부/외부 구분, 조각 분할, 절단면 추출, 조각별 강체 변환 계산을 가능하게 하는 중간 표현으로 기능한다.

이후 이 프록시 메쉬에 대해 조각 분할과 강체 시뮬레이션을 수행하여, 시간에 따른 각 조각의 위치와 회전 변환을 계산한다. 이를 통해 조각 단위의 강체 움직임을 안정적으로 획득할 수 있으며, 이후 가우시안 프리미티브에 해당 변환을 전달할 수 있는 기반이 마련된다. 다시 말해, 본 단계의 목적은 가우시안을 직접 파괴하는 것이 아니라, 조각 기반 시뮬레이션에 적합한 프록시를 통해 piece 수준의 운동 정보를 계산하고, 이를 원래의 가우시안 표현 계층으로 재전달하는 데 있다.

3-3 조각 변환의 가우시안 전달

1) 조각별 가우시안 할당

강체 파괴 시뮬레이션이 수행되면, 각 가우시안 포인트가 어느 조각에 속하는지를 결정해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 조각 k 에 대한 signed distance function $\phi_k(x)$ 를 정의하고, 각 가우시안 포인트 p_i 를 가장 작은 signed distance 값을 주는 조각에 할당한다.

$$A(i) = \arg \min_{k \in 1 \dots K} \phi_k(p_i) \quad (10)$$

식 (10)은 각 가우시안을 해당 위치에서 가장 잘 포함하거나 가장 가깝게 설명하는 조각에 대응시키는 절차를 의미한다. 다만 조각 경계 부근에서는 둘 이상의 조각에 대해 유사한 signed distance 값이 계산될 수 있어 할당 모호성이 발생할 수 있으며, 본 연구에서는 이후 기준 프레임 바인딩을 통해 시간적 일관성을 유지하고자 한다. 여기서 $A(i)$ 는 가우시안 인덱스 i 에 대한 조각 할당 함수이다.

2) 조각 기준 프레임 바인딩

각 가우시안 포인트가 조각에 할당된 후에는, 해당 조각의 기준 프레임에 로컬 좌표를 저장하는 바인딩 과정이 필요하다. 조각 k 의 기준 동작이 회전 R_k^{rest} 와 위치 t_k^{rest} 로 정의된다고 할 때, 가우시안 i 의 기준 위치 p_i^{rest} 를 조각 k 의 기준 프레임으로 변환한 로컬 좌표 r_i 는 다음과 같다.

$$r_i = (R_k^{rest})^{-1} (p_i^{rest} - t_k^{rest}) \quad (11)$$

이 로컬 좌표는 조각 기준 좌표계에서 각 가우시안의 상대적 위치를 의미한다. 각 가우시안에 대해 조각 기준의 로컬 위치를 저장해두면, 이후 시물레이션 시점에서 해당 조각의 현재 변환을 이용하여 월드 좌표를 복원할 수 있다. 또한 회전 전달을 위해 가우시안의 회전 역시 조각 기준 프레임 기준으로 저장한다. 즉, 가우시안의 월드 기준 회전값을 직접 사용하는 것이 아니라, 조각의 기준 회전값에 대한 상대 회전으로 변환하여 저장한다. 이를 통해 이후 쿼터니언 기반 회전 전달식을 일관된 형태로 구성할 수 있다.

3) 시물레이션 결과 전달

시간 t 에서 조각 k 의 현재 시물레이션 동작을 위치 $t_k^{sim}(t)$ 와 회전 $R_k^{sim}(t)$ 로 두면, 식 (11)에서 저장한 기준 프레임의 로컬 좌표 r_i 는 다음과 같이 현재 월드 좌표로 다시 매핑된다.

$$p_i(t) = t_k^{sim}(t) + R_k^{sim}(t)r_i \quad (12)$$

즉, 식 (12)는 기준 프레임에서 저장한 가우시안의 상대 위치를 현재 시물레이션 프레임의 조각 변환에 적용하여 월드 좌표계로 다시 매핑하는 과정을 나타낸다.

회전 전달의 경우, 가우시안 i 의 로컬 기준 회전을 $q_{i,local}^{rest}$ 라 하면, 시간 t 에서 가우시안의 회전은 현재 조각의 회전값을 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$q_i(t) = q_k^{sim}(t) \otimes q_{i,local}^{rest} \quad (13)$$

여기서 $q_{i,local}^{rest}$ 는 가우시안의 월드 기준 회전값 $q_{i,world}^{rest}$ 와 조각

의 rest orientation q_k^{rest} 로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$q_{i,local}^{rest} = (q_k^{rest})^{-1} \otimes q_{i,world}^{rest} \quad (14)$$

식 (13), (14)은 조각의 기준 프레임을 기준으로 저장된 가우시안 회전을 현재 시물레이션 시점의 조각 회전에 다시 적용하는 절차를 의미한다. 이를 통해 각 가우시안은 자신이 속한 조각의 운동을 따라가면서도, 기준 상태에서의 상대적 회전 관계를 유지할 수 있다.

3-4 절단면 기반 가시성 제어

본 단계에서는 절단면 주변 표현을 안정화하기 위해 두 단계의 제어를 사용한다. 먼저 절단면 경계 부근의 내부 가우시안에 대해 알파값과 크기를 감쇠하고, 이후 절단면에서 충분히 멀리 떨어진 내부 가우시안은 가지치기를 통해 제거한다.

1) 절단면 주변 내부 표현 보정

조각 변환을 가우시안에 전달한 이후에도, 파괴 직후 절단면 부근에서는 내부 가우시안이 과도하게 중첩되거나 깊은 내부까지 지나치게 노출되어 보일 수 있다. 이를 완화하기 위해 본 연구에서는 절단면 주변 표현을 안정화하는 절단면 기반 가시성 제어를 적용한다. 이 단계의 목적은 절단면에서 실제로 기여하는 내부 표현만 유지하고, 깊은 내부에 위치한 불필요한 가우시안은 억제하거나 제거함으로써 시각적 충돌과 계산 비용을 동시에 줄이는 데 있다.

먼저 절단면 경계 부근의 내부 가우시안에 대해서는 회전과 크기를 선택적으로 감쇠하여, 파괴 직후 단면이 과도하게 혼탁하게 보이지 않도록 한다. 이러한 보정은 절단면 경계로부터의 거리 또는 내부 깊이에 따라 알파와 크기를 점진적으로 감소시키는 방식으로 수행되며, 절단면의 가독성을 높이고 외피와 내부 표현 사이의 시각적 충돌을 줄이는 역할을 한다.

추가로, 절단면 주변의 내부 포인트만 유지하고 더 깊은 내부 포인트는 제거하는 가지치기를 적용한다. 절단면 메쉬 S_{cut} 와 포인트 p_i 사이의 최단 거리는 다음과 같이 정의된다.

$$d_{cut}(p_i) = \min_{x \in S_{cut}} \|p_i - x\| \quad (15)$$

여기서 S_{cut} 는 파괴 후 노출된 절단면만으로 이루어진 표면 집합이다. 유지되는 내부 포인트 집합 P_{keep} 은 다음 조건으로 정의한다.

$$p_i \in P_{keep} \Leftrightarrow d_{cut}(p_i) \leq \tau_{cut} \quad (16)$$

여기서 τ_{cut} 는 절단면 근방 유지 범위를 결정하는 임계값이다. 이 임계값은 객체의 정규화 좌표계에서 정의된 거리 기준으로 설정하였다. 식 (16)은 절단면에 실제로 기여하는 내부 가우시안만 유지하도록 하여, 품질 저하를 최소화하면서도 계산 비용을 줄이는 역할을 한다. 거리 임계값을 초과하는 내부

포인트는 제거되며, 이를 통해 깊은 내부의 불필요한 가우시안을 효과적으로 줄일 수 있다.

표 3. 제안 파이프라인의 주요 하이퍼파라미터 및 설정 기준

Table 3. Key hyperparameters and configuration settings of the proposed pipeline

Param.	Sym.	Stage	Value	Unit	Description
Surface excl. thres	τ_{surf}	Aug.	0.038	[W/N]	Excludes near-surface points
Slice thick	t_{slice}	Slice	0.05	[W/N]	Slice interval
# Neighbors	K	Attr.	1	cnt	No. of reference Gaussians
Dist. exponent	p	Attr.	0.015	-	Inverse-distance weighting strength
Stabil. const.	ϵ	Attr.	1e-6	-	Avoids zero-distance instability
Retention thres	τ_{cut}	Prune	0.0015	[W/N]	Cut-surface retention range

표 3은 제안 파이프라인의 주요 하이퍼파라미터와 그 설정 기준을 정리한 것이다. 표에서 Param.은 파라미터 이름, Sym.은 수식에서 사용되는 기호, Stage는 해당 파라미터가 적용되는 처리 단계(Aug.: 내부 보강, Slice: 슬라이스 좌표 생성, Attr.: 내부 속성 생성, Prune: 절단면 기반 가지치기), Value는 실험에 사용된 설정값, Unit은 좌표계 또는 단위를 의미하며, Description은 각 파라미터의 역할을 설명한다. 각 파라미터는 내부 보강(Augmentation), 슬라이스 좌표 생성(Slice), 내부 속성 생성(Attribute), 절단면 기반 가지치기(Pruning) 단계에 대응되며, 파이프라인의 각 구성 요소가 동작하는 방식에 직접적인 영향을 미친다.

내부 보강 단계에서는 표면 제외 임계값 τ_{surf} 를 통해 표면 근방 포인트를 제거하고, 실제 내부 영역에 해당하는 샘플만 유지하도록 하였다. 슬라이스 좌표 생성 단계에서는 슬라이스 두께 t_{slice} 를 기준으로 내부 공간을 분할하여, 내부 시각 속성 생성에 사용되는 좌표계를 정의한다. 내부 속성 생성 단계에서는 이웃 수 K , 거리 가중치 지수 p , 수치 안정화 상수 ϵ 을 통해 주변 원본 가우시안으로부터 색상, 투명도, 크기를 안정적으로 보간하도록 설계하였다.

절단면 기반 가지치기 단계에서는 유지 임계값 τ_{cut} 를 사용하여 절단면 근방에 기여하는 내부 가우시안만 선택적으로 유지하고, 깊은 내부 포인트를 제거함으로써 계산 비용을 줄인다. 특히 τ_{cut} 는 절단면 품질과 연산 비용 사이의 균형을 결정하는 핵심 파라미터로 작용한다.

이와 같이 표 3에 제시된 파라미터들은 각 단계의 동작을 재현하는 데 필요한 최소한의 설정값을 제공하며, 제안 파이프라인의 재현성과 결과 해석의 명확성을 보장한다.

IV. 실험 및 결과

본 장에서는 제안한 파이프라인을 통해 생성된 파괴 시뮬레이션 결과의 시각적 품질과 계산 효율을 평가한다. 또한 통합 파이프라인의 전체 효과뿐 아니라, 내부 보강, 조각 기반 변환 전달, 절단면 기반 가지치기 등 각 구성 요소가 결과에 미치는 영향을 개별적으로 분석한다. 실험은 Ryzen 9 7950X CPU와 NVIDIA RTX 4090 GPU를 탑재한 일반 PC 환경에서 수행하였으며, Houdini 기반 프로토타입 시스템 상에서 전체 파이프라인을 구현하였다. 3DGS 장면은 공개된 소스코드를 활용하여 재구성하였다.

4-1 내부 보강(infilling)의 기여 분석

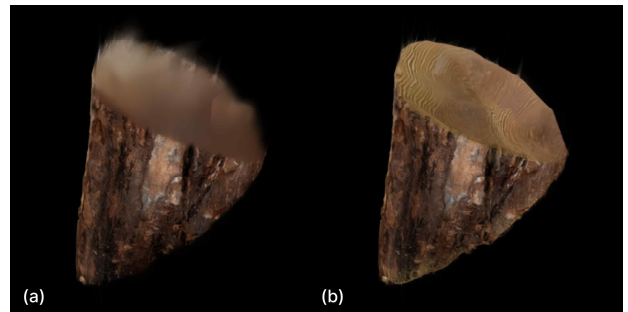


그림 2. 내부 보강 유무에 따른 절단면 비교

Fig. 2. Comparison of cut surfaces with and without interior infilling

본 실험에서는 파괴 후 노출되는 절단면 내부 표현에 대해 내부 보강 단계가 미치는 영향을 분석하기 위해, 원본 3DGS만 사용하는 경우와 객체에 내부 보강 가우시안을 생성한 경우를 비교하였다.

실험 결과, 원본 3DGS만 사용한 경우에는 파괴 후 드러난 단면 내부에 빈 공간이 직접적으로 노출되었다. 반면 내부 보강을 적용한 경우에는 내부 노출 영역이 유의미하게 채워졌고, 단면 경계에서도 외피와 내부 표현이 완전히 분리되어 보이지 않았다. 이는 내부 보강이 단순히 점 수를 늘리는 과정이 아니라, 속이 빈 3DGS의 구조적 한계를 완화하고 파괴 후 노출되는 내부 표현의 시각적 타당성을 높이는 핵심 단계임을 보여준다.

4-2 조각 기반 변환 전달의 기여 분석

본 절에서는 파괴 후 조각 단위 운동의 안정적 전달에 대해 조각 기반 변환 전달 단계가 미치는 영향을 분석하기 위해, point deform 기반 변환 방식과 제안한 조각 기반 변환 전달 방식을 비교하였다. 그림 3의 (a)는 파괴 시뮬레이션으로부터 얻은 조각의 기준 운동을, (b)는 point deform만 적용한 결과를, (c)는 본 연구의 조각 기반 변환 전달을 적용한 결과를 나타낸다. 비교는 동일한 내부 infilling 결과와 동일한 파괴 시퀀스를 기준으로 수행하였다.

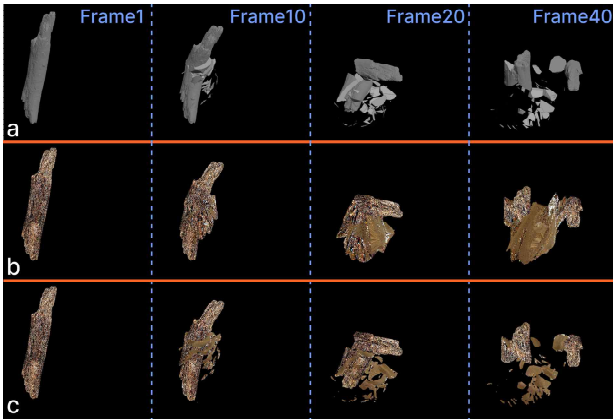


그림 3. 조각 기반 변환 전달 방식 비교
Fig. 3. Comparison of piece-wise transform transfer strategies

point deform는 연속적인 변형장 전달에는 적합하지만, 여러 조각이 서로 다른 강체 운동을 가지는 파괴 상황에는 한계가 있다[13]. 조각 간 운동이 분리된 이후에도 이를 하나의 연속 변형으로 해석하기 때문에, 경계 부근에서 가우시안이 인접 조각으로 미끄러지거나 일부 점이 떠 보이는 현상이 발생할 수 있다. 반면 본 연구의 조각 기반 변환 전달은 각 가우시안을 특정 조각에 할당하고, 조각 기준 프레임으로 바인딩한 뒤, 시물레이션 프레임마다 해당 조각의 위치와 회전을 다시 적용한다.

실험 결과, point deform만 사용한 경우에는 프레임이 진행될수록 조각 경계 부근의 미끄러짐과 부유 아티팩트가 나타났지만, 조각 기반 변환 전달을 적용한 경우에는 각 가우시안이 자신이 속한 조각의 운동을 보다 안정적으로 따라갔다. 이는 조각 기반 변환 전달이 파괴 후 시퀀스의 공간적·시간적 일관성을 확보하는 데 필요함을 보여준다.

4-3 절단면 기반 가지치기의 비용-품질 분석

표 4. 가지치기 threshold별 내부 가우시안 수 및 렌더링 시간 비교
Table 4. Comparison of infill Gaussian count and rendering time for different pruning thresholds

Method	Pruning Threshold	Kept Infill Gaussians (M)	Memory Usage (GB)	Rendering time per Frame (s)
P0	1	18.6	81.06	251
P1	0.1	16.7	73.45	213
P2	0.01	2.9	16.03	11
P3	0.004	1.4	0.27	9

표 5. 절단면 품질에 대한 정량적 평가
Table 5. Quantitative evaluation of cut-surface quality

Method	SSIM	PSNR	Cut Detail Strength
P0	GT	GT	GT
P1	0.7675	28.83	0.057
P2	0.7642	28.80	0.055
P3	0.7659	28.89	0.053

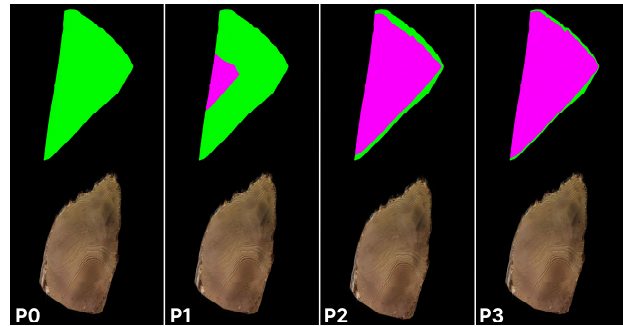


그림 4. 가지치기 threshold 변화에 따른 내부 가우시안 유지 영역 및 렌더 결과 비교
Fig. 4. Comparison of retained infill regions under different pruning thresholds and render results

본 실험에서는 절단면 기반 가지치기가 절단면 표현에 필요한 내부 가우시안만 유지하면서 계산 비용을 얼마나 줄일 수 있는지를 검증하였다. 내부 보강은 단면 표현을 보강하는데 효과적이지만, 생성된 내부 가우시안을 모두 유지할 경우 시각적으로 기여가 낮은 깊은 내부 포인트까지 남아 계산량이 크게 증가할 수 있다. 이에 본 실험에서는 가지치기 임계값을 달리 적용하고, 각 설정에서 유지되는 내부 가우시안 수, 메모리 사용량, 프레임당 렌더링 시간을 비교하였다. 여기서 가지치기 임계값은 파괴 후 노출된 절단면으로부터의 거리 임계값으로 정의되며, 절단면 주변의 내부 표현만 선택적으로 유지하도록 설정하였다. 또한 그림 4를 통해 임계값 변화에 따라 실제로 유지되는 내부 영역과 렌더 결과의 차이를 함께 관찰하였다.

표 4에서 볼 수 있듯이, 가지치기를 적용하지 않은 P0는 약 1,860만 개의 내부 가우시안이 유지되어 메모리 사용량이 81.06 GB, 프레임당 렌더링 시간이 251초로 가장 큰 비용을 보였다. P1 역시 약 1,670만 개의 내부 가우시안이 유지되어 메모리 사용량이 73.45 GB, 프레임당 렌더링 시간이 213초로 여전히 높은 비용을 요구하였다. 반면 P2와 P3에서는 유지 가우시안 수가 각각 290만 개와 140만 개로 감소하였고, 메모리 사용량과 프레임당 렌더링 시간도 각각 16.03 GB, 11초와 0.27 GB, 9초로 크게 줄어들었다. 이는 가지치기 임계값을 낮춤에 따라 절단면 표현과 직접 관련이 없는 깊은 내부 영역이 효과적으로 제거되며, 계산 비용이 급격히 감소함을 보여준다.

그림 4에서 확인할 수 있듯이 임계값이 낮아질수록 절단면과 직접 관련이 없는 내부 영역은 점차 제거되고, 절단면 주변에 필요한 구조만 선택적으로 유지되었다. 특히 P2와 P3의 비교 결과는, 절단면 근방의 필수 내부 구조만 유지하는 것만으로도 계산 비용을 크게 절감할 수 있음을 보여준다.

추가로, 가지치기 임계값 변화에 따른 절단면 품질 차이를 정량적으로 확인하기 위해 표 5와 같이 절단면 품질에 대한 정량적 평가를 수행하였다. 본 평가에서는 가지치기를 적용하지 않은 P0를 기준 영상(GT)으로 두고, 각 설정(P1, P2, P3)

에 대해 SSIM, PSNR, 그리고 절단면 디테일 강도를 측정하였다. 여기서 절단면 디테일 강도는 절단면 확대 이미지에 대한 라플라시안 기반 고주파 응답의 평균 절대값으로 계산하였다.

표 5에서 볼 수 있듯이, P1, P2, P3의 SSIM은 각각 0.7675, 0.7642, 0.7659로 큰 차이를 보이지 않았으며, PSNR 역시 각각 28.83 dB, 28.80 dB, 28.89 dB로 유사한 수준을 유지하였다. 이는 가지치기 강도가 증가하더라도 P0 대비 절단면의 전체 구조 유사성은 크게 훼손되지 않음을 의미한다. 반면 절단면 디테일 강도는 P1, P2, P3에서 각각 0.057, 0.055, 0.053으로 나타나, 가지치기가 강해질수록 고주파 절단면 디테일은 점진적으로 감소하는 경향을 보였다.

종합하면, 절단면 기반 가지치기는 계산 비용을 줄이는 데 매우 효과적이며, 임계값을 낮추더라도 절단면의 전체 구조 유사성은 대체로 유지된다. 특히 P3는 비용 절감 효과가 가장 크면서도 SSIM과 PSNR이 P1, P2와 유사한 수준을 유지하여, 비용-품질 균형 측면에서 가장 실용적인 설정으로 판단된다. 다만 절단면 디테일 강도는 P1에서 가장 높고 P3에서 가장 낮게 나타났으므로, 절단면의 미세 질감을 최대한 보존하는 것이 더 중요한 경우에는 P2와 같은 중간 설정도 유효한 선택이 될 수 있다.

4-4 메쉬 기반 시뮬레이션과의 비교

본 절의 비교 목적은 파괴 운동 자체의 물리 정확성을 평가하는 데 있는 것이 아니라, 동일한 입력 장면에서 파괴 후 새롭게 노출되는 절단면 내부가 어떻게 표현되는지, 그리고 그 과정에서 표면-내부 연속성과 렌더링 비용이 어떻게 달라지는지를 비교하는 데 있다. 그러나 본 연구와 동일한 입력 조건에서 절단면 내부 표현까지 포함하여 직접 비교 가능한 오픈소스 기반 방법은 제한적이었다. 일부 관련 연구는 가우시안 기반 물리 시뮬레이션 또는 동적 장면 표현을 다루고 있으나, 본 연구와 동일한 방식으로 파괴 후 새롭게 노출되는 내부 절단면을 재현 가능한 형태로 비교하기에는 입력 조건, 물리 모델, 출력 표현이 서로 달라 직접적인 1:1 비교가 어려웠다. 이에 따라 본 실험에서는 동일한 장면 표현 계열에서 출발하여 메쉬 기반 파괴 렌더링과 가우시안 기반 파괴 렌더링의 차이를 비교할 수 있는 재현 가능한 기준선으로, 2DGS로 학습된 장면에서 추출한 메쉬를 이용한 메쉬 기반 파이프라인을 비교군으로 설정하였다. 따라서 본 비교는 절단면 내부 표현, 표면-내부 연속성, 렌더링 비용 측면에서의 제한적 비교이며, 가우시안 기반 물리 시뮬레이션 전반에 대한 포괄적 우열 비교를 의미하지는 않는다.

그림 5는 2DGS로 학습된 장면에서 추출한 메쉬 기반 비교군과 제안 방법의 파괴 렌더링 결과를 비교한 것이다[14]. 그림 5의 (a)는 2DGS 메쉬를 이용한 기존 메쉬 기반 파괴 렌더링 결과를, (b)는 제안 방법의 가우시안 기반 파괴 렌더링 결과를 보여준다. (a)에서는 파괴 후 생성된 조각의 형상과 분

리는 비교적 명확하게 표현되지만, 새롭게 노출된 절단면은 전반적으로 균일하고 평탄하게 나타나 내부 표현이 제한되는 경향을 보인다. 특히 우측 확대 결과에서 절단면은 단순한 절단 단면처럼 보이며, 외부 표면과 내부 영역 사이의 시각적 연속성도 상대적으로 낮다. 반면 (b)에서는 외부 표면의 시각적 인상을 유지하면서, 내부 보강 가우시안을 통해 절단면에 보다 풍부한 내부 질감과 시각적 밀도가 부여된 것을 확인할 수 있다. 확대된 영역에서도 절단면이 단순한 평면으로 남지 않고, 파괴 후 노출된 내부 영역이 보다 자연스럽게 채워져 보인다. 이러한 결과는 제안 방법이 단순히 표면을 변형하는 수준을 넘어, 파괴로 인해 새롭게 드러나는 내부 영역까지 장면 표현의 일부로 통합할 수 있음을 보여준다.



그림 5. 2DGS로부터 생성된 메쉬 기반 기준 방법과 제안 방법의 가우시안 기반 파괴 렌더링 결과 비교

Fig. 5. Comparison between the mesh-based baseline extracted from the 2DGS-trained scene and the proposed Gaussian-based fracture rendering

표 6. 2DGS 메쉬 비교군과 제안 방법의 효율성 비교

Table 6. Efficiency comparison between the 2DGS mesh baseline and the proposed method

Method	Primitive Count (M)	Avg. Render Time (s)	Peak Memory (GB)
2DGS Mesh	3.6	100	7
Ours	12	120	50

표 6은 두 방법의 효율성과 렌더링 비용을 비교한 결과이다. 2DGS 메쉬 비교군은 프리미티브 수가 3.6M, 평균 렌더링 시간이 100초, 최대 메모리 사용량이 7GB로 비교적 낮은 비용에서 결과를 생성할 수 있었다. 반면 제안 방법은 내부 보강된 가우시안을 포함하기 때문에 프리미티브 수가 12M으로 증가하였고, 평균 렌더링 시간과 최대 메모리 사용량도 각각 120초와 50GB로 더 크게 나타났다. 그러나 프리미티브 수가 3배 이상 증가했음에도 평균 렌더링 시간 증가는 상대적으로 제한적이었다. 이는 가우시안 기반 렌더링에서 프리미티브 수 증가가 렌더링 시간 증가로 단순 비례하지 않으며, 절단면 내부 표현을 강화하더라도 실용적인 범위의 렌더링 비

용을 유지할 수 있음을 시사한다. 이러한 경향은 Gaussian Splatting 계열이 명시적 가우시안 표현과 visibility-aware splatting 기반 렌더링을 통해 높은 효율을 보인다는 선행연구[1],[14]와도 대체로 일치한다.

표 7. 2DGS 메쉬 비교군과 제안 방법의 절단면 표현 비교
Table 7. Comparison of fracture-surface representation between the 2DGS mesh baseline and the proposed method

Method	Interior Material Authoring	Surface-to-Interior Continuity	Cut-surface Detail Strength
2DGS Mesh	Required	Low	0.0028
Ours	Not required	High	0.0083

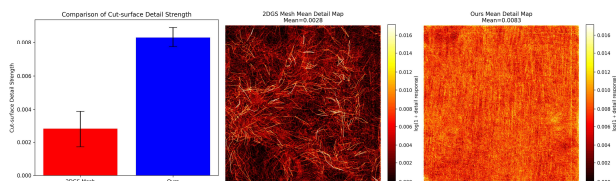


그림 6. 2DGS 메쉬 비교군과 제안 방법의 절단면 디테일 강도 및 평균 디테일 맵 비교
Fig. 6. Comparison of cut-surface detail strength and mean detail maps between the 2DGS mesh baseline and the proposed method

표 7과 그림 6은 절단면 표현의 차이를 보다 구체적으로 분석한 결과이다. 표 5에서는 두 방법의 절단면 표현을 내부 재질 설정 필요 여부, 표면-내부 연속성, 그리고 절단면 디테일 강도 관점에서 비교하였다. 2DGS 메쉬 비교군은 절단면의 시각적 완성을 위해 별도의 내부 재질 설정이 필요하였으며, 표면과 내부 표현 사이의 연속성도 낮은 것으로 평가되었다. 반면 제안 방법은 추가적인 내부 재질 설정 없이도 절단면을 표현할 수 있었고, 외부 표면과 내부 영역이 보다 자연스럽게 이어지는 높은 시각적 연속성을 보였다.

절단면 디테일 강도 분석에는 각 방법별로 동일한 조건에서 렌더링한 절단면 확대 이미지 5장을 사용하였다. 모든 이미지는 동일한 해상도와 동일한 crop 영역을 유지하도록 정렬하였으며, 절단면에 해당하는 확대 영역만을 대상으로 분석하였다. 각 이미지 I_i 는 grayscale로 변환한 뒤 라플라시안 연산자를 적용하여 고주파 시각 응답을 계산하였고, 그 절댓값을 이용해 절단면 디테일 강도를 정의하였다. 각 샘플 이미지의 디테일 강도 d_i 는 다음과 같이 계산된다.

$$d_i = \frac{1}{|\Omega|} \sum_{p \in \Omega} |\nabla^2 I_i(p)| \quad (17)$$

여기서 Ω 는 절단면 확대 영역의 픽셀 집합, $I_i(p)$ 는 샘플 i 에서 픽셀 p 의 grayscale intensity, ∇^2 는 라플라시안 연산자를 의미한다. 즉, d_i 는 해당 절단면 이미지 전체에서 평균적인 고주파 시각 응답의 크기를 나타낸다. 각 방법의 최종 절단면

디테일 강도는 5개 샘플의 평균과 표준편차로 계산하였다.

$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i, \quad \sigma_d = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2} \quad (18)$$

또한 그림 6의 평균 디테일 맵은 각 샘플 이미지에서 계산된 절대 라플라시안 응답을 픽셀 단위로 평균하여 시각화한 것이다.

$$D(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\nabla^2 I_i(x, y)| \quad (19)$$

이때 $D(x, y)$ 는 절단면의 각 위치에서 평균적으로 얼마나 강한 디테일 응답이 나타나는지를 보여준다. 이를 통해 단일 숫자 비교를 넘어, 절단면 전반에 걸쳐 디테일이 어떻게 분포하는지 공간적으로 확인할 수 있다.

그림 6의 좌측 막대그래프는 각 방법에 대해 5개의 절단면 확대 이미지에서 계산한 평균 절단면 디테일 강도와 표준편차를 나타낸 것이며, 제안 방법이 2DGS 메쉬 비교군보다 더 높은 값을 보임을 확인할 수 있다. 본 실험에서 2DGS 메쉬 비교군의 평균 절단면 디테일 강도는 0.0028, 제안 방법은 0.0083으로 나타났다. 이는 제안 방법이 절단면 전체에 걸쳐 더 많은 고주파 시각 정보와 미세한 질감 변화를 포함하고 있음을 의미한다. 그림 6의 우측 평균 디테일 맵에서도 이러한 차이를 확인할 수 있다. 2DGS 메쉬 비교군은 일부 날카로운 기하 경계에서 국소적으로 강한 응답이 나타나는 반면, 제안 방법은 절단면 전반에 걸쳐 보다 넓고 고르게 분포된 디테일 응답을 보인다. 이는 메쉬 기반 결과가 샤프한 단면 경계에는 반응하더라도 내부 질감이 제한적인 반면, 제안 방법은 내부 전체를 보다 풍부한 시각 구조로 채우고 있음을 시사한다.

종합하면, 메쉬 기반 비교군은 상대적으로 낮은 비용으로 명확한 조각 형상을 제공한다는 장점을 가지지만, 절단면 내부 표현을 위해 별도의 재질 설정이 필요하며, 내부와 외부 표현 사이의 시각적 연속성도 제한적이다. 반면 제안 방법은 더 높은 프리미티브 수와 메모리 사용량을 요구하지만, 절단면 내부를 장면 표현의 일부로 통합함으로써 보다 풍부한 질감, 높은 표면-내부 연속성, 그리고 별도 설정 없이도 자연스러운 파괴 결과를 제공한다. 이러한 결과는 제안 방법이 단순한 표면 기반 파괴 표현을 넘어, 파괴 후 드러나는 내부 영역까지 포함하는 보다 확장된 장면 표현 방식으로 기능할 수 있음을 보여준다.

V. 결 론

본 연구에서는 내부가 비어 있는 구조를 가지는 3차원 가우시안 스플래팅 장면의 한계를 보완하기 위해, 내부 보강과 조각 기반 강제 파괴 시뮬레이션을 결합한 통합 파이프라인을 제안하였다. 제안 방법은 기존 3DGS가 표면 중심 표현에

머물러 파괴 시 내부가 비어 보이는 문제를 완화하고, 절단면 표현과 조각 단위 제어를 가능하게 하는 데 목적이 있다. 이를 위해 부호 거리장 기반 내부 보강을 통해 장면 내부에 가우시안 포인트를 생성하고, 프록시 메시를 이용한 조각 기반 강체 시뮬레이션과 기준 프레임 바인딩을 통해 조각 단위 변환을 가우시안 표현에 전달함으로써 파괴 시퀀스의 공간적·시간적 일관성을 유지하였다.

실험 결과, 내부 보강은 파괴 후 단면에서 발생하는 구조적 공백 문제를 효과적으로 완화하였으며, 조각 기반 변환 전달 방식은 point deform 기반 접근에서 나타나는 경계 미끄러짐과 부유 아티팩트를 줄이고 보다 안정적인 파편 운동을 생성하였다. 또한 절단면 기반 가지치기를 통해 절단면에 기여하지 않는 깊은 내부 가우시안을 제거함으로써, 메모리 사용량과 렌더링 시간을 크게 감소시키면서도 시각적 품질을 유지할 수 있음을 확인하였다. 더불어 2DGS로부터 추출한 메시 기반 비교 파이프라인과의 실험에서는, 제안 방법이 절단면 내부 표현과 표면-내부 연속성 측면에서 보다 풍부한 시각적 결과를 제공함을 확인하였다.

본 연구의 핵심 기여는 가우시안 표현 자체를 직접 물리적으로 확장하는 기존 접근과 달리, 내부 구조 보강과 조각 기반 변환 전달을 결합하여 3DGS 장면을 실제 제작 워크플로우와 연결 가능한 형태로 재구성했다는 점에 있다. 특히 본 연구는 렌더링을 위한 가우시안 표현과 시뮬레이션을 위한 프록시 표현을 분리한 하이브리드 구조를 통해, 3DGS의 시각적 장점을 유지하면서도 조각 기반 파괴 애니메이션과의 연동 가능성을 제시하였다. 이를 통해 3DGS는 단순한 장면 재구성 기법을 넘어, 파괴 및 물리 기반 애니메이션을 위한 제작 파이프라인의 한 구성 요소로 확장될 수 있음을 보였다.

다만 본 방법은 내부 보강 과정에서 생성되는 가우시안 수가 증가함에 따라 메모리 및 계산 비용이 크게 증가하는 한계를 가지며, 절단면 유지 임계값 설정에 따라 품질과 성능 사이의 절충이 존재한다. 또한 본 연구의 내부 보강은 실제 물체 내부의 의미론적 구조나 재질 단면을 복원하는 것이 아니라, 파괴 후 내부 공백이 직접 노출되는 문제를 완화하기 위한 시각적 내부 표현 생성에 초점을 둔다. 따라서 목재의 결 방향, 층상 재질의 단면 구조, 복합 재질의 이질적 내부 분포와 같은 의미론적·재질적 내부 구조는 현재 파이프라인의 범위에 포함되지 않는다. 아울러 현재 파이프라인은 조각 기반 강체 시뮬레이션에 초점을 두고 있어 연속체 재질이나 복합 재질의 파괴를 직접적으로 구현하는 데에는 제한이 있으며, 원래의 가우시안 분포와 프록시 메시 사이의 기하학적 차이로 인해 경계 부근에서는 조각 할당 모호성이나 시각적 불일치가 발생할 가능성도 존재한다.

향후 연구에서는 내부 구조를 보다 효율적으로 생성하기 위한 적응적 샘플링 또는 학습 기반 내부 보강 기법을 도입하고, 재질 특성에 따른 파괴 패턴을 반영할 수 있는 물리 모델과의 결합을 확장할 필요가 있다. 또한 경계 부근의 조각 할당 안정성을 높이기 위한 연성 할당(soft assignment) 또는

신뢰도 기반 전달 기법을 도입하고, 가우시안 표현을 기반으로 한 유체 및 연속체 시뮬레이션과의 통합을 통해 보다 다양한 물리 현상을 포함하는 통합 콘텐츠 제작 파이프라인으로 발전시킬 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 문화체육관광부 및 한국콘텐츠진흥원의 2024년도 문화체육관광 연구개발사업으로 수행되었음(과제명: 생성형 AI 및 클라우드 기반 콘텐츠 제작 R&D 인재 양성, 과제번호: RS-2024-00352578, 기여율: 100%)

참고문헌

- [1] B. Kerbl, G. Kopanas, T. Leimkühler, and G. Drettakis, "3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 42, No. 4, 139, pp. 1-14, July 2023. <https://doi.org/10.1145/3592433>
- [2] B. Mildenhall, P. P. Srinivasan, M. Tancik, J. T. Barron, R. Ramamoorthi, and R. Ng, "NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis," *ECCV 2020*, pp. 405-421, 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.08934>
- [3] T. Müller, A. Evans, C. Schied, and A. Keller, "Instant Neural Graphics Primitives with a Multiresolution Hash Encoding," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 41, No. 4, 102, 2022. <https://doi.org/10.1145/3528223.3530127>
- [4] G. Wu, T. Yi, J. Fang, L. Xie, X. Zhang, W. Wei, W. Liu, Q. Tian, and X. Wang, "4D Gaussian Splatting for Real-Time Dynamic Scene Rendering," *CVPR 2024*, pp. 20310-20320, 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.08528>
- [5] Z. Yang, X. Gao, W. Zhou, S. Jiao, Y. Zhang, and X. Jin, "Deformable 3D Gaussians for High-Fidelity Monocular Dynamic Scene Reconstruction," *CVPR 2024*, 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.13101>
- [6] T. Xie, Z. Zong, Y. Qiu, X. Li, Y. Feng, Y. Yang, and C. Jiang, "PhysGaussian: Physics-Integrated 3D Gaussians for Generative Dynamics," *CVPR 2024*, pp. 4389-4398, 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.12198>
- [7] C. Jiang, C. Schroeder, A. Selle, J. Teran, and A. Stomakhin, "The Material Point Method for Simulating Continuum Materials," *SIGGRAPH 2016 Course Notes*, Anaheim: CA, 24, pp. 1-52, 2016. <https://doi.org/10.1145/2897826.2927348>
- [8] L. Fan, F. M. Chitalu, and T. Komura, "Simulating Brittle Fracture with Material Points," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 41, No. 5, 177, pp. 1-20, 2022. <https://doi.org/10.1145/3522573>
- [9] J. Wolper, Y. Fang, M. Li, J. Lu, M. Gao, and C. Jiang,

“CD-MPM: Continuum Damage Material Point Methods for Dynamic Fracture Animation,” *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 38, No. 4, 119, pp. 1-15, 2019. <https://doi.org/10.1145/3306346.3322949>

- [10] Y. Feng, X. Feng, Y. Shang, Y. Jiang, C. Yu, Z. Zong, ... and Y. Yang, “Gaussian Splashing: Unified Particles for Versatile Motion Synthesis and Rendering,” in *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 518-529, 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.15318>
- [11] P. Borycki, W. Smolak-Dyżewska, J. Waczyńska, M. Mazur, S. Tadeja, and P. Spurek, “GASP: Gaussian Splatting for Physics-Based Simulations,” *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 265, 104699, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2026.104699>
- [12] B. Huang, Y. Chen, R. Lu, G. Zeng, H. Zha, Y. Pei, and S. Huang, “GaussianFluent: Gaussian Simulation for Dynamic Scenes with Mixed Materials,” *arXiv:2601.09265*, 2026. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2601.09265>
- [13] M. Wang, Y. Zhang, W. Xu, R. Ma, C. Zou, and D. Morris, “DecoupledGaussian: Object-Scene Decoupling for Physics-Based Interaction,” in *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 11361-11372, 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.05484>
- [14] B. Huang, Z. Yu, A. Chen, A. Geiger, and S. Gao, “2D Gaussian Splatting for Geometrically Accurate Radiance Fields,” *SIGGRAPH 2024 Conference Papers*, Denver: CO, 32, pp. 1-11, 2024. <https://doi.org/10.1145/3641519.3657428>



김경중 (Kyung-Joong Kim)

2024년 : 중앙대학교 예술공학부
(공학사)

2024년~현 재: 중앙대학교 첨단영상대학원 영상학과
석사과정

※ 관심분야 : 시각효과 파이프라인(VFX Pipeline), 컴퓨터 그래픽스(Computer Graphics), 물리 기반 시뮬레이션(Physics-Based Simulation), 게임 엔진(Game Engine), 3D 재구성(3D Reconstruction)



유태경 (Tae-Kyung Yoo)

2002년 : 중앙대학교 기계설계학과 학사

2002년 : 중앙대학교 첨단영상대학원
컴퓨터 특수효과 영상 석사

2012년 : 중앙대학교 첨단영상대학원
예술공학 박사

2012년~2018년 : 텍스터 스튜디오 디지털휴먼 & VR 연구소장

2019년~현 재: 중앙대학교 예술공학대학 부교수

※ 관심분야 : 가상존재(Virtual Beings), 확장현실(eXtended Reality), 시각효과(VFX), 실감 미디어(Immersive Media)