

수중 가상환경 제작 현황 및 수정안

관련 연구 리뷰 및 추후 계획 발표

Deep Shark Lab 학부생 **이예정**

2026.10.16

* Contents

1. 수중 시뮬레이션 구현 방법 및 문제점
2. 수중에서의 빛 감쇠 모델링 방법론
3. 수중 부유물 모델의 투명도, 빛의 산란 효과 조절 방법론
4. 추후 계획

수중 시뮬레이션 구현 상황 및 문제점

* 참고 논문

제목 및 연구진

Marine Snow Simulation and Elimination in Video

Jeremy Paul Coffelt

Subsea R&D

ROSEN Technology and Research Center GmbH

Bremen, Germany

jcoffelt@rosen-group.com

Nicolas Nowald

MARUM

University of Bremen

Bremen, Germany

nnowald@marum.de

Peter Kampmann

Subsea R&D

ROSEN Technology and Research Center GmbH

Bremen, Germany

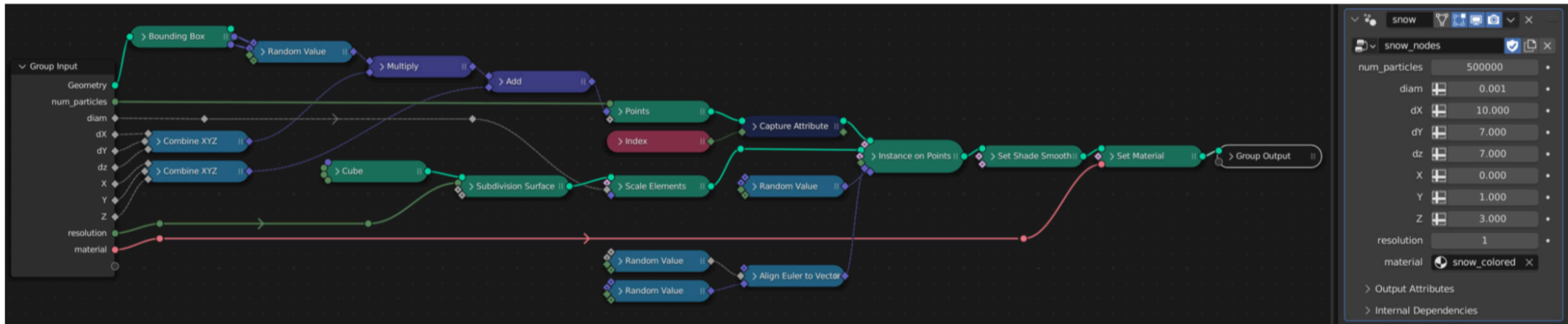
pkampmann@rosen-group.com

저널 정보

- 2023 IEEE Underwater Technology

* 참고 논문

논문에서 제안한 수중 부유물 표현 방법

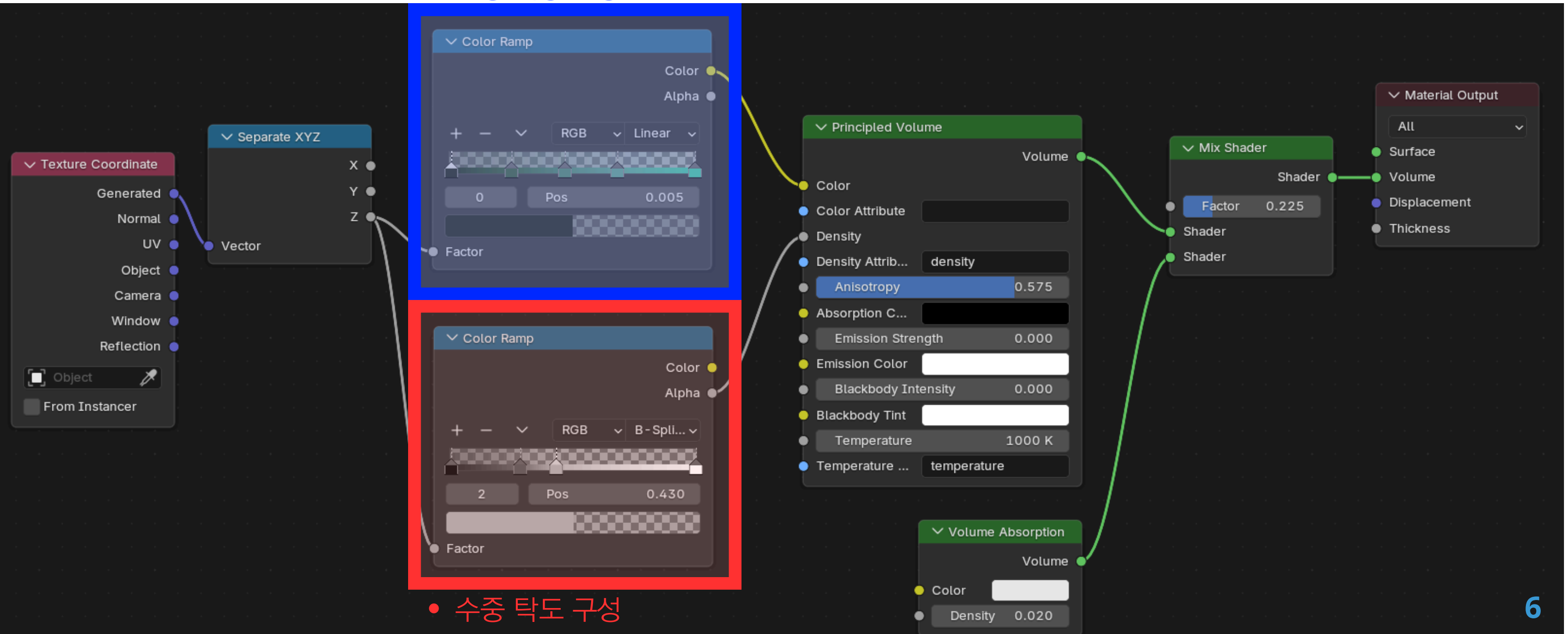


1. 다양한 부유물의 기본 형상을 준비.
2. 기본 형상의 크기, 회전, 색상을 무작위로 설정
3. Alpha 값을 조절하여 확산성 구조와 반투명 외관 모사
4. 후방산란광을 통한 발광효과 구현
5. 물리 속성 중, 객체를 특정한 힘의 방향으로 움직이는 Force Field로 움직임 구현

* 실제 구현 방법

수중 구조 생성

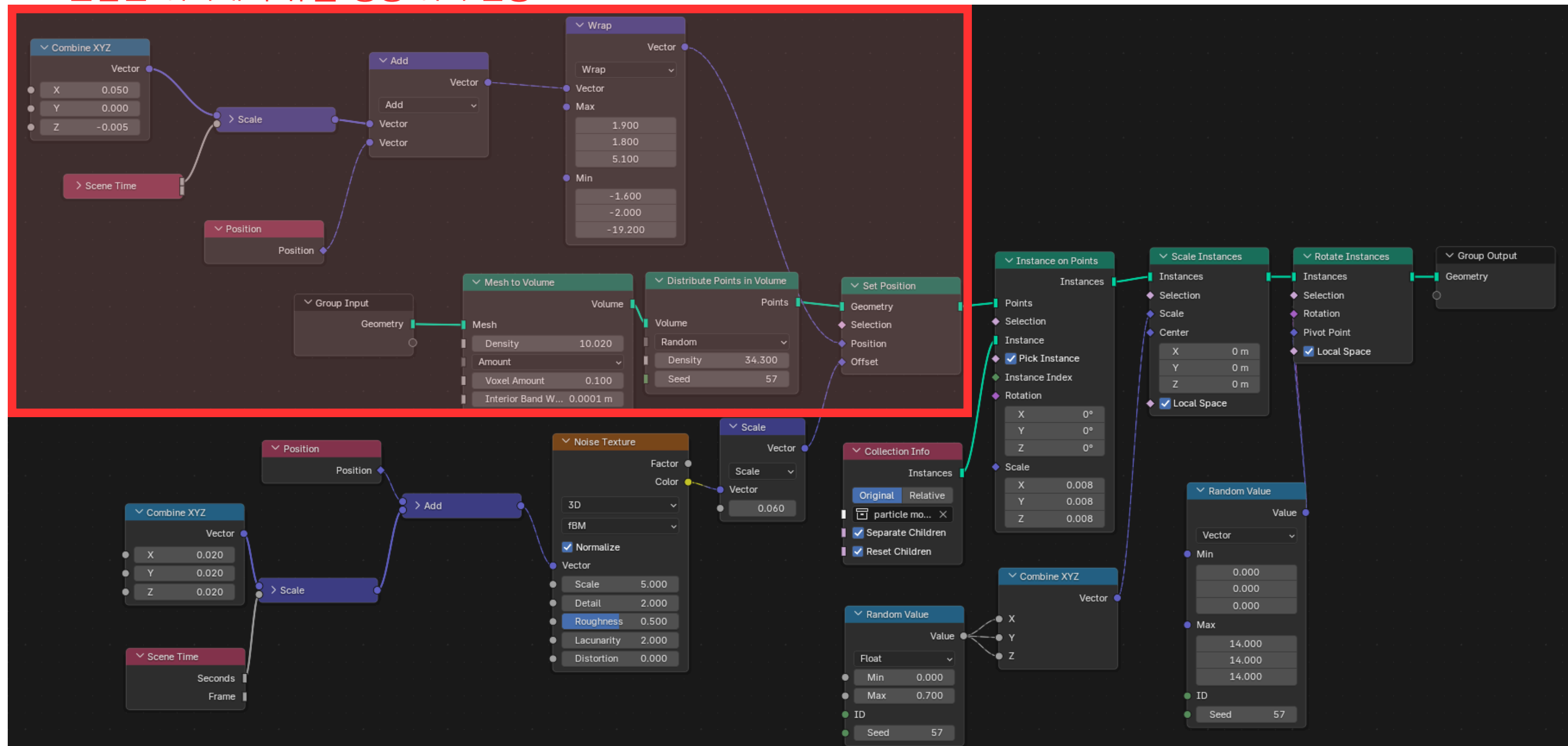
- 수중 색상 구성



* 실제 구현 방법

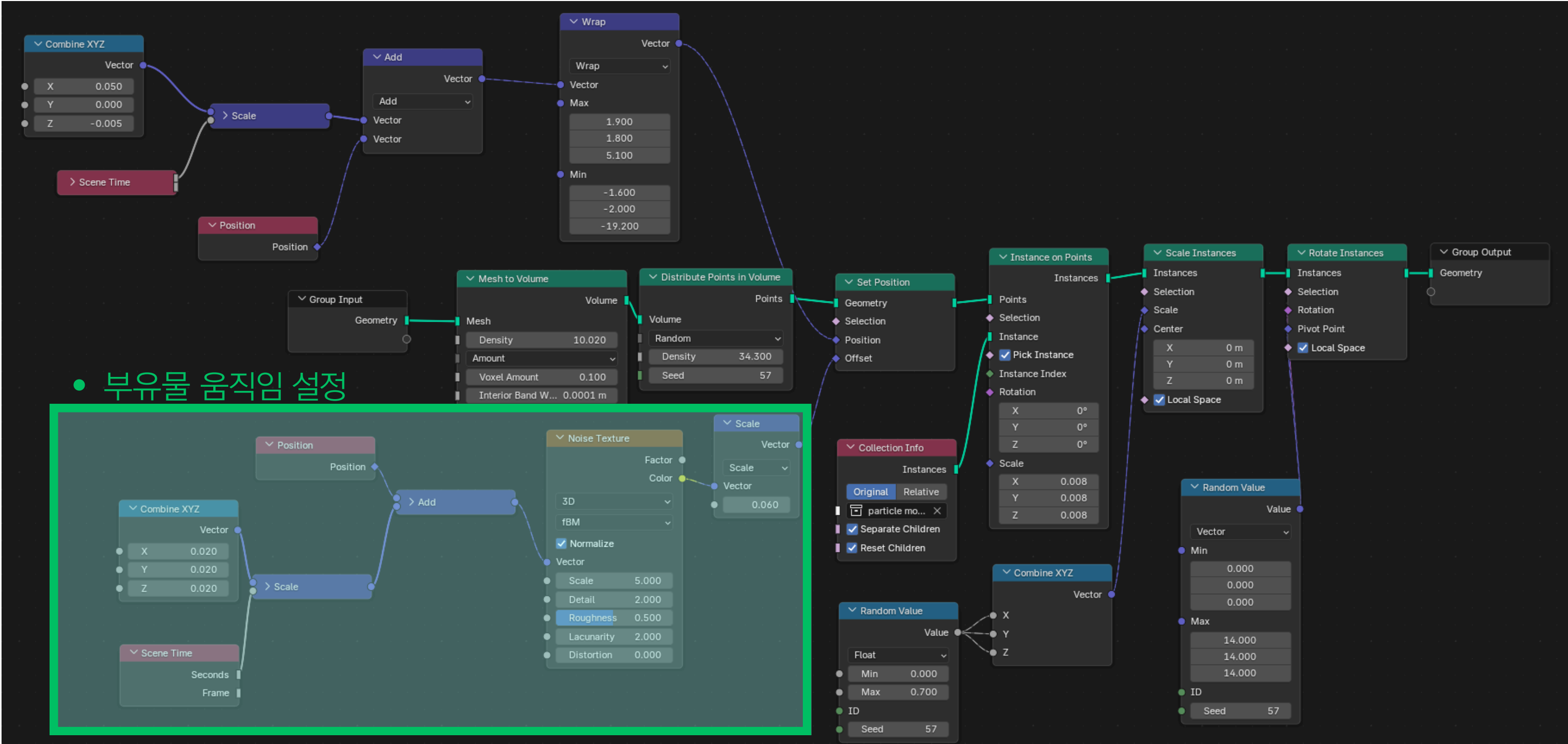
수중 부유물 생성

- 랜덤한 위치에 부유물 생성 위치 선정



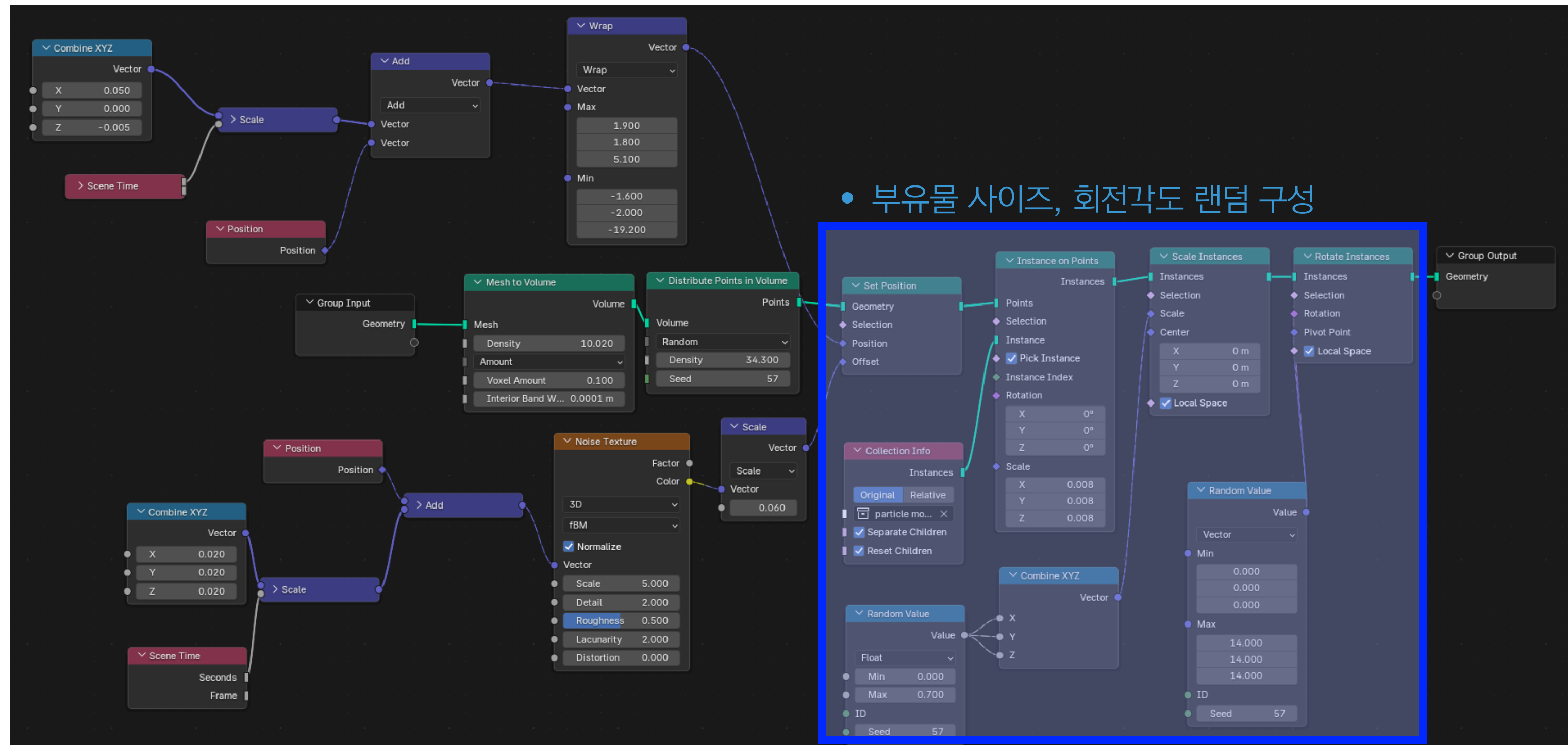
* 실제 구현 방법

수중 부유물 생성



* 실제 구현 방법

수중 부유물 생성



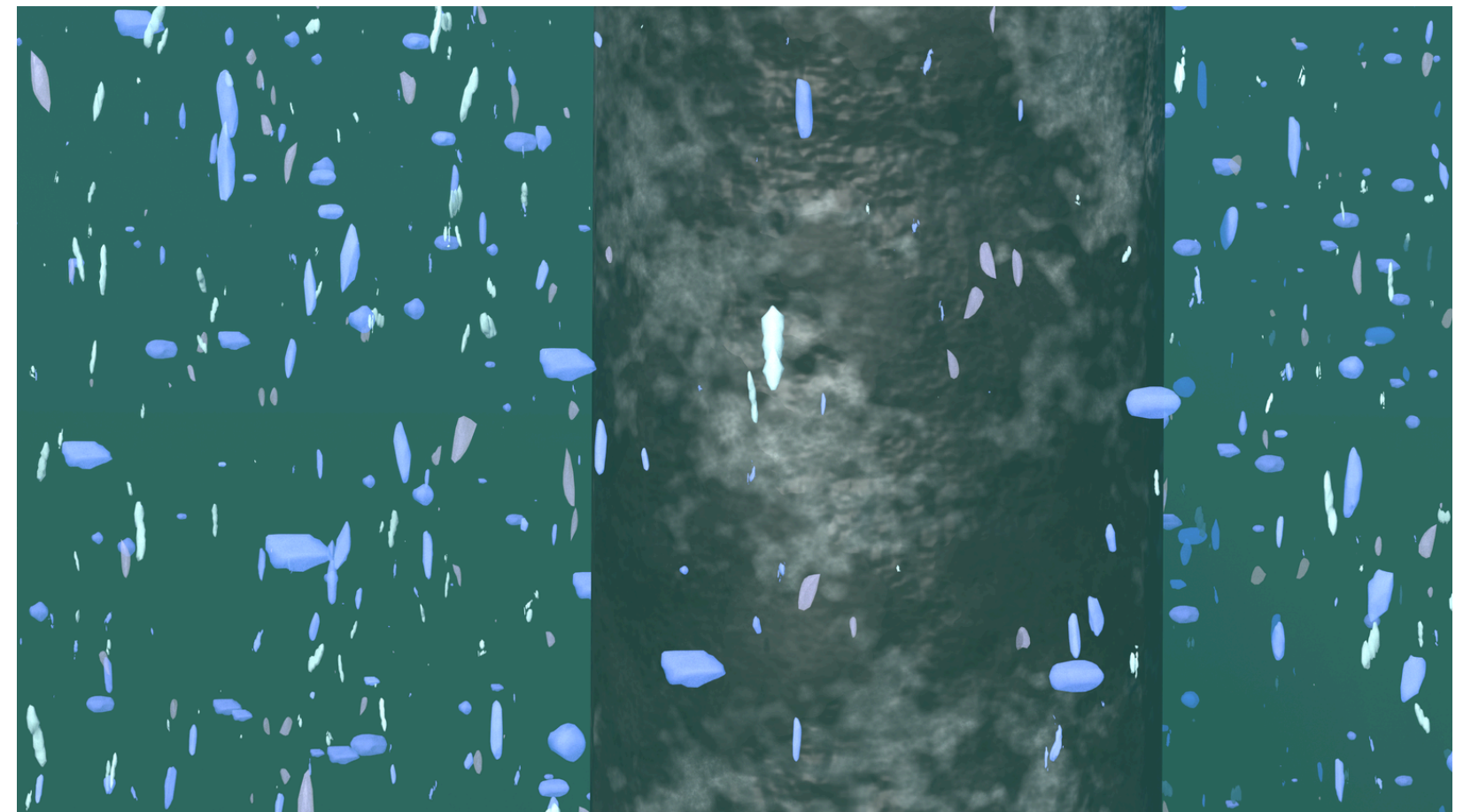
* 구현 결과

실제 수중 이미지와의 비교

- 기준 이미지



- 구현 이미지



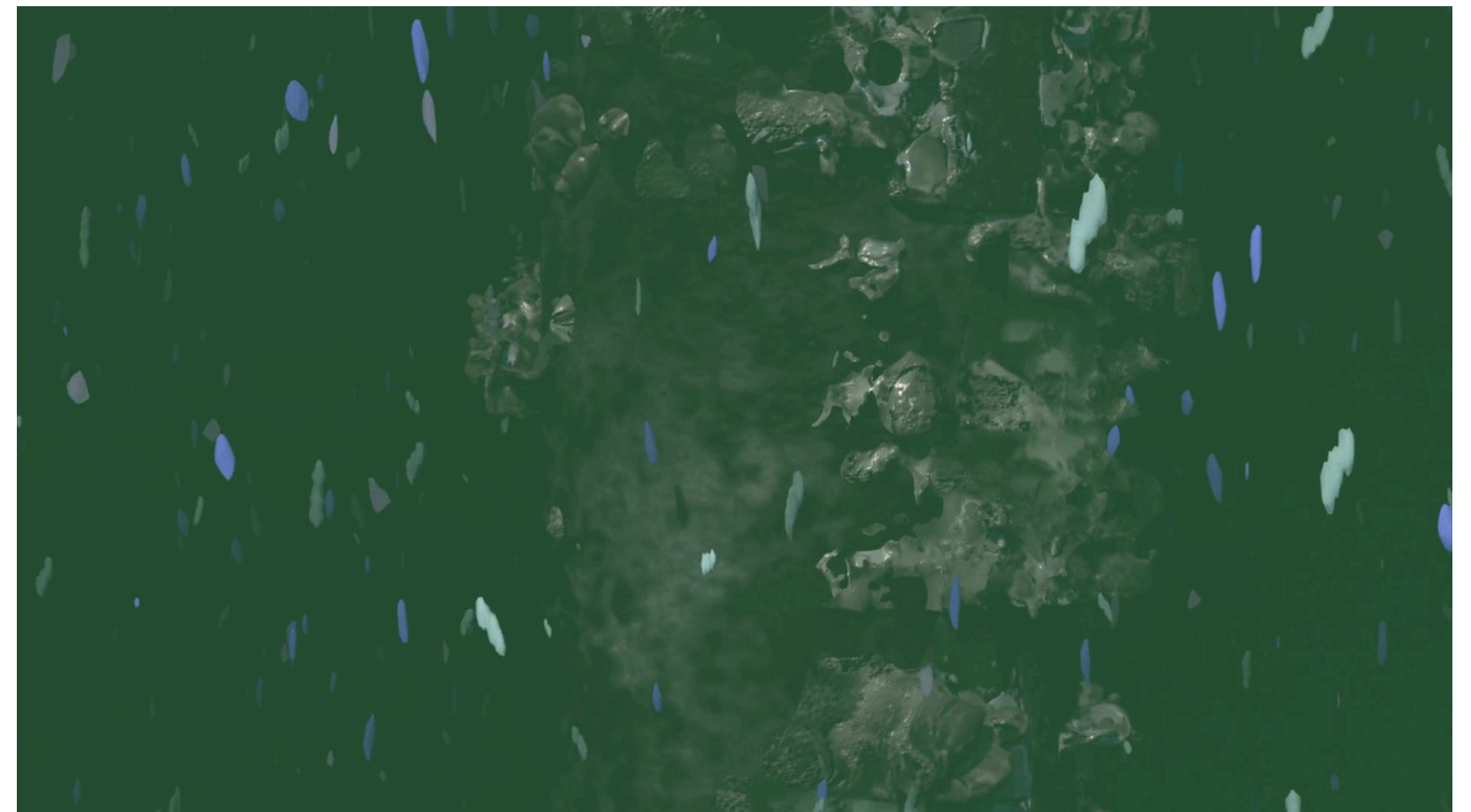
* 구현 결과

실제 수중 이미지와의 비교

- 기준 이미지



- 구현 이미지



* 발생한 문제점

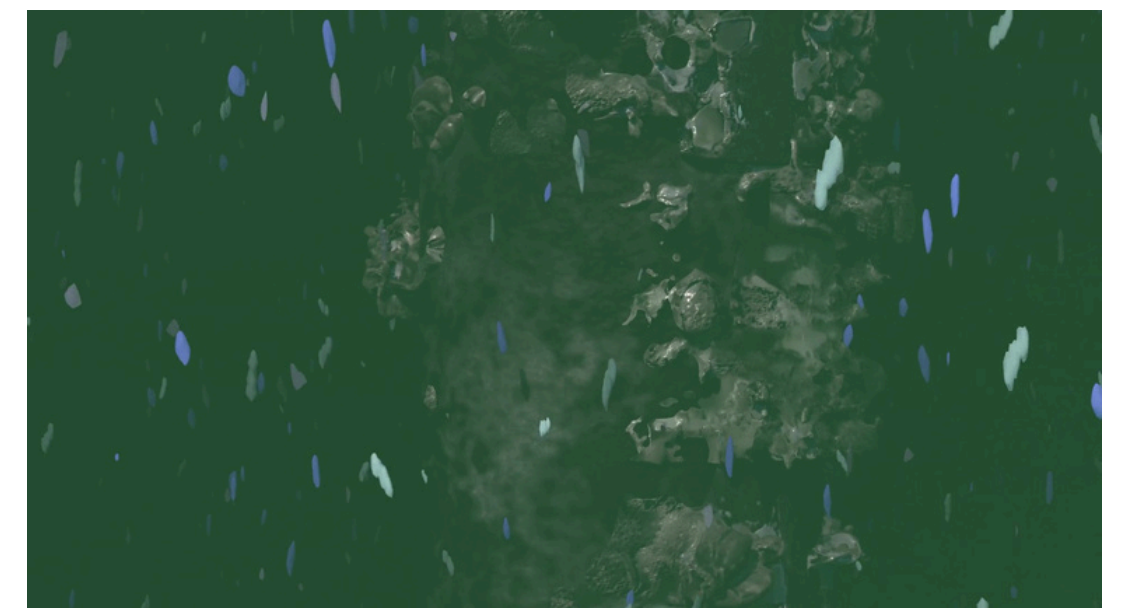
1. 수중 환경에서의 빛 투과가 반영되지 않음.

- 수중 환경에서는 단순히 탁도(Density)만으로는 빛 투과 환경을 구성할 수 없음
- Density를 높이면 설정한 물의 색상이 많이 반영되는 대신, 빛 투과율이 급격하게 하락함
- 수중 환경에 배치한 물체와 물 배경색이 구분되지 않는 문제 발생
- 부유물은 도드라지게 표현되지만, 기둥이나 돌 등의 객체가 동화되어 보임



2. 수중 부유물의 투명도와 산란을 반영할 수 없음

- 단면 이미지를 기반해 만든 3D 메쉬 모델은 불투명한 mesh로 제작됨
- 빛이 닿는 방향에 따른 반사가 심하게 나타나, 부유물 모델만 두드러져 보임.
- 부유물의 불투명도나 빛의 산란에 의해 밝게 보이는 부분을 반영할 수 없음



수중에서의 빛 감쇠 모델링 방법론

* 참고 논문

제목 및 연구진

Real-Time Underwater Spectral Rendering

Nestor Monzon ¹ , Diego Gutierrez ¹ , Derya Akkaynak ^{2,3}  and Adolfo Muñoz ¹ 

¹Universidad de Zaragoza - I3A ²University of Haifa ³IUI Eilat

저널 정보

- Computer Graphics Forum(Eurographics 2024)

프로젝트 링크

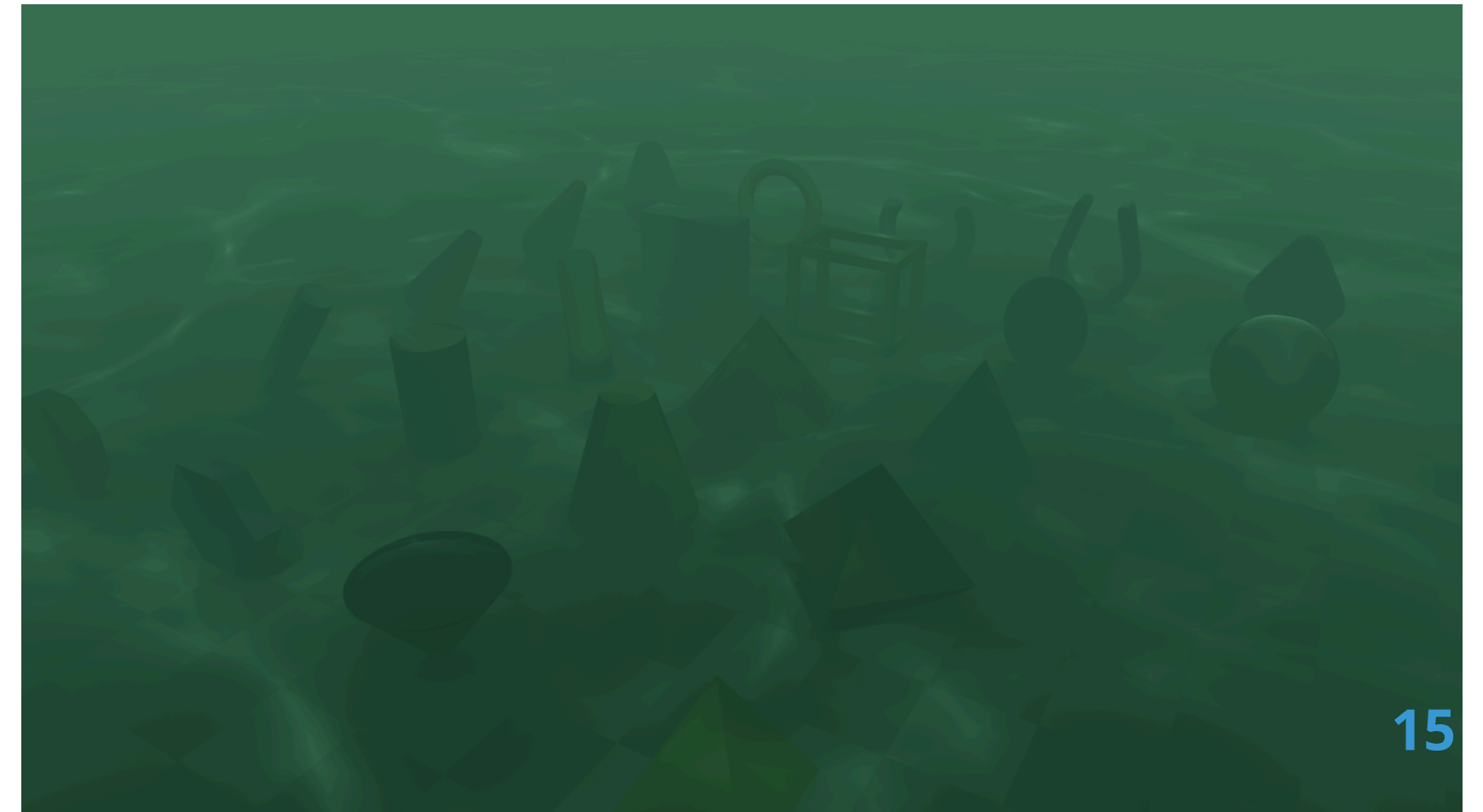
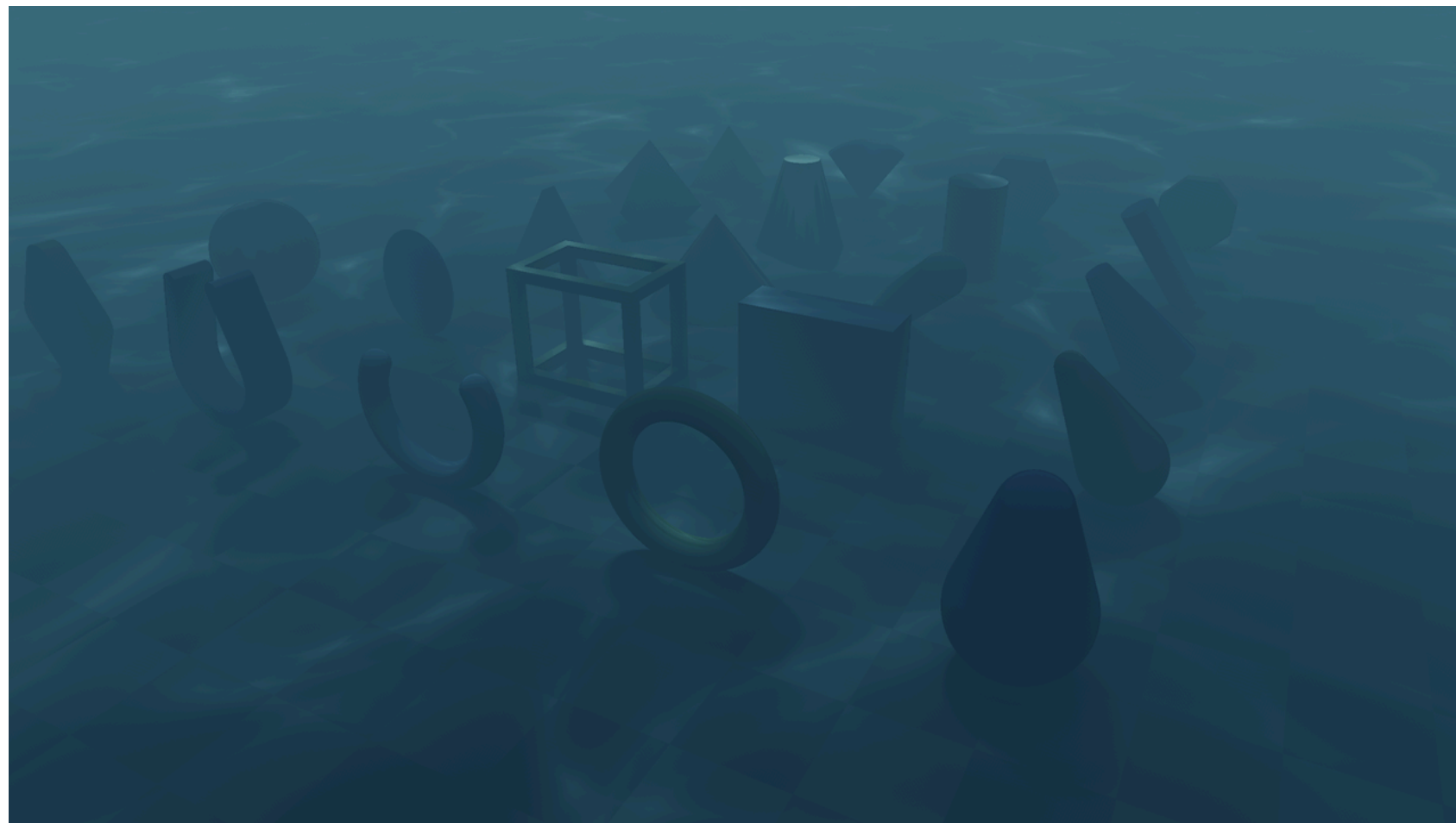
- <https://graphics.unizar.es/projects/EG24Underwater/>
- <https://www.shadertoy.com/view/4cVGD3>

* 연구 요약

실제 수중 환경에서의 시각적 광학 특성 재현

- 실제 물의 광학적 특성을 정의.
 - 흡수 특성
 - 산란 특성
 - 소광(消光) 특성
 - 수심에 따른 하향광 감쇠 특성
- 이런 특성들을 반영한 Shader 연산 제어

Shader-렌더링 시 다양한 시각적 특성을 계산하는 규칙.
3D 장면에서 빛의 각도, 광원의 색상 등을 활용해 최종적으로 빛과 색이 어떻게 보일지 계산한다.



* 수중에서의 파장 감쇠 수식

수식을 통한 근사값 예측

- 광학 특성을 최대한 반영하면서 영상 렌더링에 최적화된 수식을 도출해냄

$$L_{\lambda} = L_{0,\lambda} e^{-K_d(\lambda)y} e^{-c(\lambda)d}$$

L_{λ} : 최종적으로 관찰되는 파장별 광량

$L_{0,\lambda}$: 초기 광량

$K_d(\lambda)$: 파장별 하향 감쇠 계수

y : 수면에서 객체까지의 수심

$c(\lambda)$: 파장별 소광 계수

d : 객체와 카메라 사이의 거리

```
float l_wl =  
    (upsample(col, wl) * 0.9 * dif  
     + .9 * spe * ks)  
    * exp(-b_c_kd.z * pos_depth)  
    * exp(-b_c_kd.y * t);
```

* 수중에서의 빛 감쇠 수식

탁도 변화 배율을 적용 수식

- 탁도는 최종적으로 특정 배율만큼 곱하는 방식으로 적용함

$$(b', c', K'_d) = \tau (b, c, K_d)$$

b : 산란 계수

c : 소광 계수

K_d : 확산 하향 감쇠 계수

τ : 탁도 조절 배율

b' : 탁도 배율이 적용된 산란 계수

c' : 탁도 배율이 적용된 소광 계수

K'_d : 탁도 배율이 적용된 하향 감쇠 계수

```
vec3 props =  
    turbidity * get_optical_props_anim(wl, water_type);  
  
float b = props.x,  
      c = props.y,  
      kd = props.z;  
  
const float turbidity = .9;
```

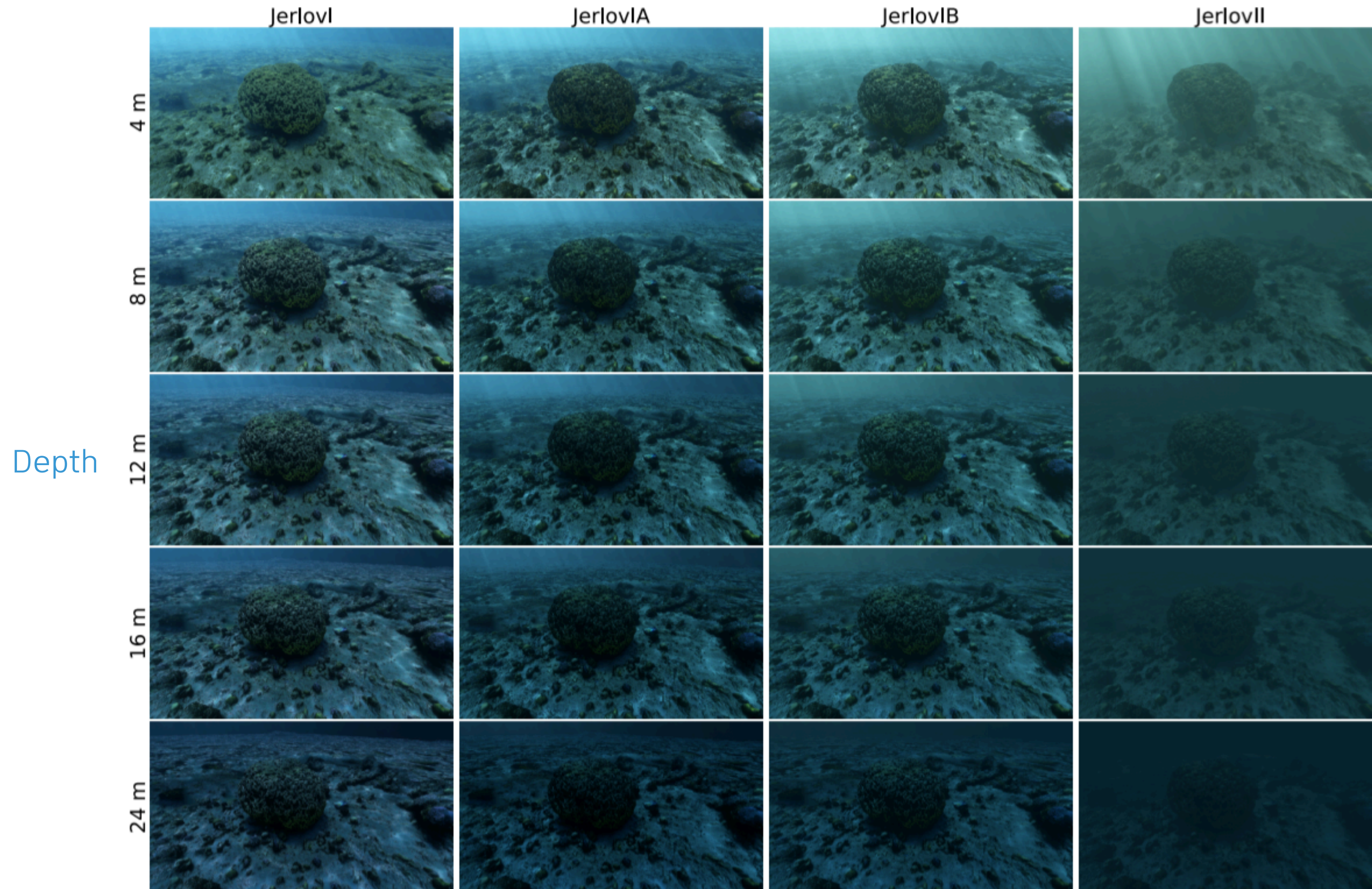
＊ 수질에 따른 색상 변화 적용

사전 정의된 수질 데이터

Water Type	Category	Sample Index	Wavelength (nm)	b - Scattering (1/m)	c - Extinction (1/m)	Kd - Downwelling Atten. (1/m)
IB	Oceanic	1	400.00	0.144	0.189	0.051
IB	Oceanic	2	415.79	0.141	0.184	0.045
IB	Oceanic	3	431.58	0.138	0.180	0.040
IB	Oceanic	4	447.37	0.135	0.176	0.037
IB	Oceanic	5	463.16	0.133	0.171	0.034
1C	Coastal	1	400.00	0.474	0.660	0.510
1C	Coastal	2	415.79	0.468	0.646	0.415
1C	Coastal	3	431.58	0.462	0.630	0.331
1C	Coastal	4	447.37	0.456	0.608	0.262
1C	Coastal	5	463.16	0.451	0.585	0.208

- **Water Type:** 해당 연구진이 사전 정의한 수질 타입
- **Category:** 수질 타입이 해안에 가까운지, 대양에 가까운지 표기
- **Wavelength:** 빛 파장. 낮을 수록 푸른색에 가까우며, 높을 수록 붉은 색에 가까움
- **b-Scattering:** 산란 계수. 높을수록 빛이 뿌옇게 보임
- **c-Extinction:** 소광 계수. 높을수록 빛의 투과율이 급격히 감소하며 가시거리가 짧아짐
- **Kd-Downwelling Attention:** 하향 감쇠 계수. 높을수록 위에서 내리쬐는 빛의 양이 적어짐

water types – Density



* 기존 프로젝트에의 적용 가능성

기존 3D 수중 환경을 크게 변경하지 않고도 수중 광학 특성을 추가할 수 있다.

- 기존 3D 장면의 렌더링 단계에서 수질별 광학 계수와 수심·거리 기반 감쇠, 산란 효과를 계산하는 방식을 사용함
- 따라서 기존 Blender 기반 수중 환경의 구조를 유지하며 추가적으로 Shader 계산을 통해 빛 감쇠와 색상 변화 효과를 줄 수 있음

복잡한 광학 계수를 직관적인 상위 파라미터로 단순화하고 자동화할 수 있다.

- Jerlov water type별로 파장에 따른 산란 계수, 소광 계수, 하향 감쇠 계수를 데이터화 해두었음
- 수질 유형이나 탁도와 같은 소수의 상위 파라미터만 지정하고 내부적으로 필요한 계수를 자동 선택·보간하도록 구성할 수 있음.
 - 기존 water type과 완벽히 일치하는 것이 없어도 원하는 수질 환경을 생성할 수 있음.

경험적·주관적인 파라미터 조정에 대한 의존도를 줄일 수 있다.

- 기존 방식에서는 Volume의 색상이나 밀도 등을 실제 영상과 비교하면서 반복적으로 조정했음.
- 해당 방법은 데이터를 기반으로 렌더링 특성을 결정하기에 일관된 파라미터를 적용할 수 있으며, 동일한 조건의 수중 환경을 재현하는 데에도 유리함

수중 부유물 모델의 투명도,
빛의 산란 효과 조절 방법론

* 참고 논문

제목 및 연구진

Rendering discrete participating media using geometrical optics approximation

Jie Guo¹, Bingyang Hu¹, Yanjun Chen¹, Yuanqi Li¹, Yanwen Guo¹ (✉), and Ling-Qi Yan²

© The Author(s) 2021.

저널 정보

- Computational Visual Media 2022

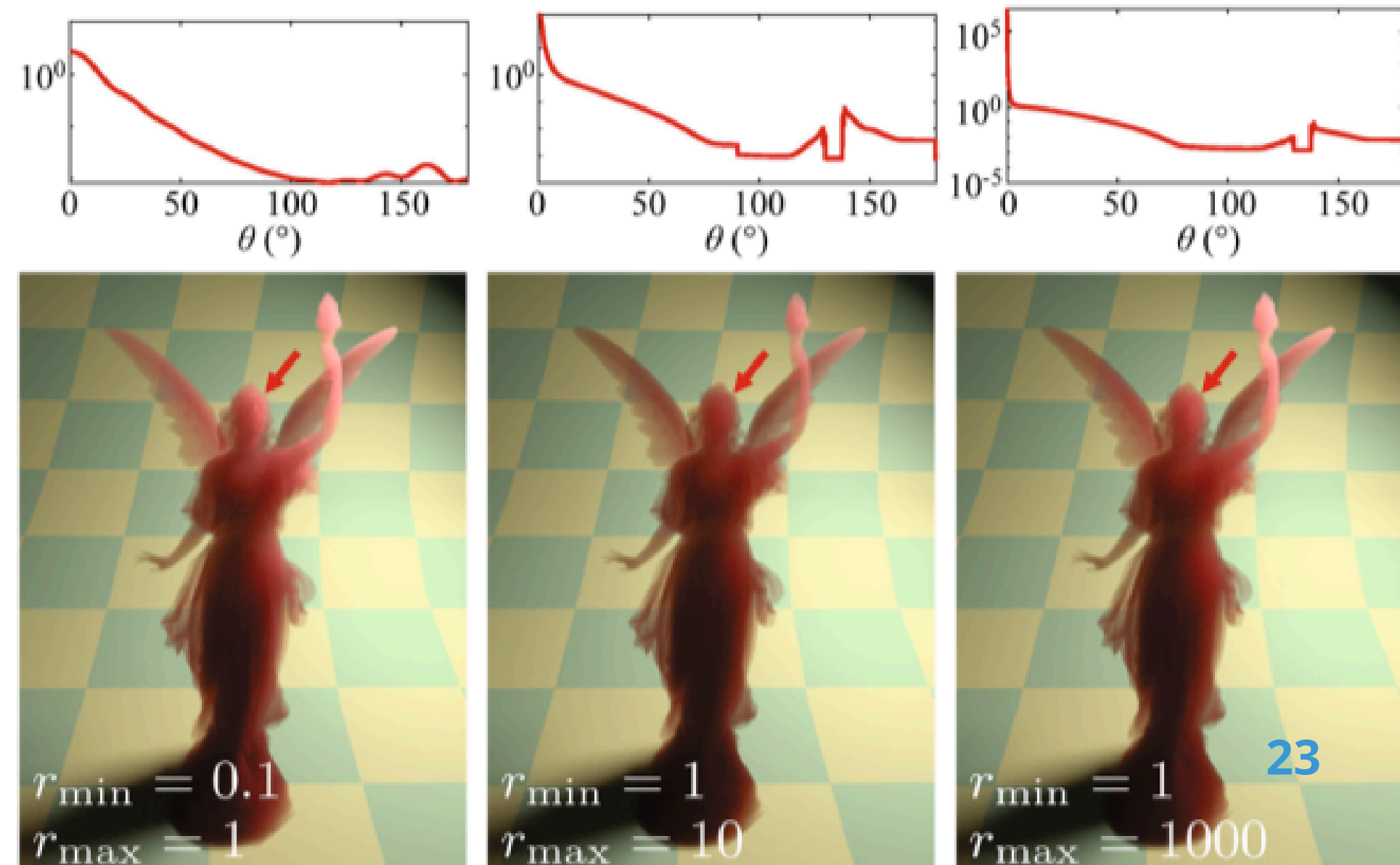
* 연구 요약

개별 입자로 구성된 매질에서 발생하는 빛의 산란과 입자감 렌더링

- 기하광학 근사(GOA)를 사용
- 입자 크기 분포(PSD)를 통해 공간 안에 매질을 분산
- 개별 입자의 위치와 크기를 이용해 빛의 전달을 계산하는 Monte Carlo 기반 렌더링 기법 활용

모델 하나를 ‘공간’으로 계산한 후 산란 효과 부여 가능

- 우측 그림과 같이 하나의 모델을 산란 공간으로 계산할 수 있음
- 넓은 공간이 아닌 좁은 공간에서 계산할 경우 물체 내부에서 빛이 산란하는 것 같은 효과를 줄 수 있음
- 이를 material 하나로 매핑하여 여러개의 모델에 동일한 계산을 적용할 수도 있음



* 볼륨 렌더링 방정식

최종 볼륨 렌더링 방정식

- 산란 위상 함수, 산란 계수, 빛의 투과성, 비등방성 계수 등을 전부 합한 최종 산란 매질 렌더링 방정식

$$L(\mathbf{x}, \omega) = T(\mathbf{x}, z)L(\mathbf{z}, \omega) + \int_0^z T(\mathbf{x}, y) \int_{S^2} \sigma_s(\mathbf{y}) f(\mathbf{y}, \omega', \omega) L_i(\mathbf{y}, \omega') d\omega' dy$$

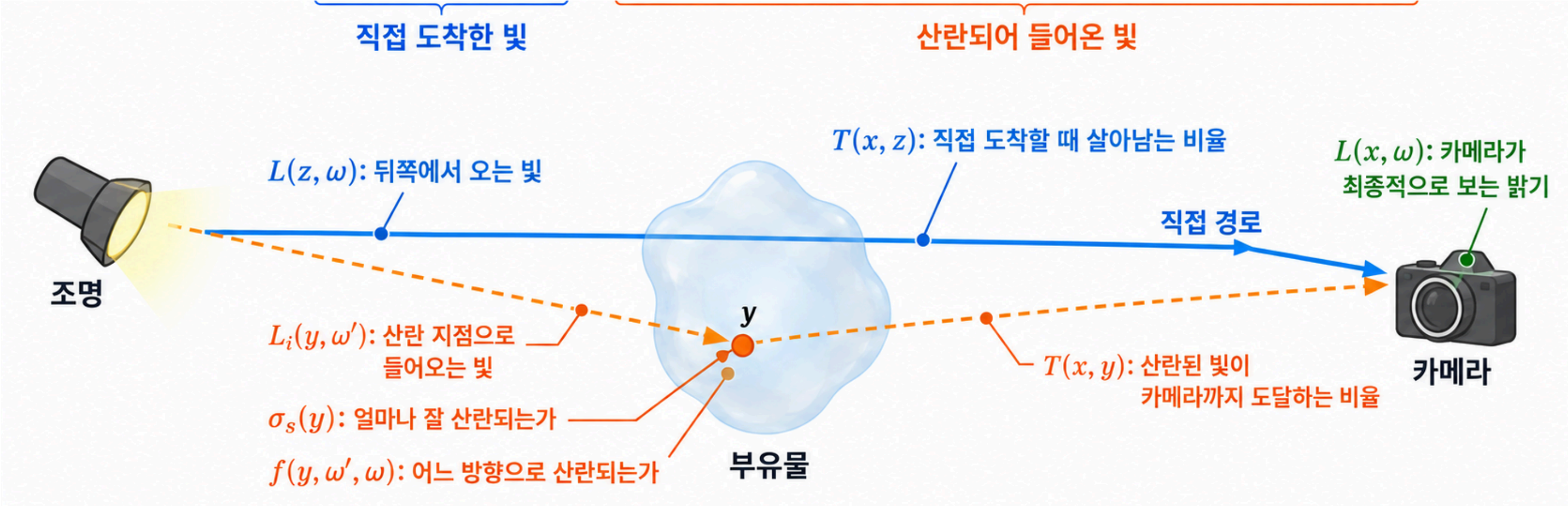
... 이렇게 생겼지만? 사실 이것을 완전하게 적용할 필요는 없다.

* 볼륨 렌더링 방정식

최종 볼륨 렌더링 방정식에서의 중요한 부분

- 해당 방정식은 빛의 출발 위치와 빛의 방향성과, 공간 안에서 산란되는 빛의 양이 최종적으로 카메라에 들어오는 빛의 휘도를 조절한다는 의미를 가진다.

$$L(\mathbf{x}, \omega) = \underbrace{T(\mathbf{x}, z)L(\mathbf{z}, \omega)}_{\text{직접 도착한 빛}} + \underbrace{\int_0^z T(\mathbf{x}, y) \int_{S^2} \sigma_s(\mathbf{y}) f(\mathbf{y}, \omega', \omega) L_i(\mathbf{y}, \omega') d\omega' dy}_{\text{산란되어 들어온 빛}}$$



✱ 기존 프로젝트에의 적용 가능성

기존 3D 모델링 파이프라인 유지 가능

- 기존에 작업한 2D 이미지를 기반으로 3D 모델을 생성하는 과정을 그대로 활용할 수 있음
- 모델링 작업을 유지하면서 부유물의 시각적 사실성 개선

반투명성과 광 산란 효과 구현

- 메시 표면에 Principled BSDF, 내부에 Volume Scatter를 적용하여 빛의 투과 및 산란 표현
- 불투명한 입자 대신 실제 부유물과 유사한 반투명 외관 구현

광학적 특성의 정량적 제어

- 입자 크기 분포와 산란 계수, 위상 함수 등 광학적 매개변수를 이용하여 재질 설정
- 경험적인 파라미터 조절에 대한 의존도 감소

추후 계획

* 문제 해결 방향

수중 환경에서의 빛 투과가 반영되지 않는 문제

- **수중 광학 특성의 현실성 부족:** 실제 수질의 파장별 광학 계수를 적용해 수심과 거리 변화에 따른 감쇠를 재현
- **복잡한 파라미터 조정 문제:** 광학 계수를 직접 조정하지 않도록, 수질·색상·탁도 등의 직관적인 상위 파라미터로 단순화
- **수작업 설정에 따른 재현성 부족:** Jerlov 수질 데이터를 기준으로 사용. 선택한 수질 및 탁도에 따라 필요한 세이더와 광학 파라미터가 자동 설정되도록 구성.
- **실제 환경과의 유사도 검증:** 기존 Volume 기반 결과와 광학 모델 적용 결과를 비교

난이도: ★★☆☆

수중 부유물의 투명도와 산란 효과가 적용되지 않는 문제

- **광학 특성에 의한 투명도 조절:** Blender 자체 material shader기능을 활용해 구현.
 - Principled BSDF_물체 표면의 광학적 특성을 표현. 반사, 굴절, 투과, 거칠기 등 조절 가능
 - 표면의 질감과 투명도를 조절
- Volume Scatter_물체 내부의 빛 산란을 표현. 빛의 산란 강도와 방향 제어
- 내부 산란에 의한 반투명한 외관 표현

난이도: ★★★★★

Q&A

감사합니다.

참고 문헌

1. J. P. Coffelt, N. Nowald and P. Kampmann, "Marine Snow Simulation and Elimination in Video," 2023 IEEE Underwater Technology (UT), Tokyo, Japan, 2023, pp. 1-10, doi: 10.1109/UT49729.2023.10103393.
2. Monzon, N., Gutierrez, D., Akkaynak, D. and Muñoz, A. (2024), Real-Time Underwater Spectral Rendering. Computer Graphics Forum, 43: e15009. <https://doi.org/10.1111/cgf.15009>
3. Guo, J., Hu, B., Chen, Y. et al. Rendering discrete participating media using geometrical optics approximation. Comp. Visual Media 8, 425-444 (2022). <https://doi.org/10.1007/s41095-021-0253-5>