



# HAiVA: Hybrid AI-assisted Visual Analysis Framework to Study the Effects of Cloud Properties on Climate Patterns



기후 분석에 시각적인 도움을 주기 위해 AI 기술을 접목해보자!

## 1. Introduction

- 구름은 지구 기후를 조절하는 중요한 역할을 함
  - 이를 이용하여 기후 개입 기술인 해양 구름 밝기(MCB) 등을 연구하고자 함
- 현재 지구 시스템 모델(ESM)의 한계로 인해 구름 변화에 대한 기후 반응에 대한 불확실성이 큼
  - 하이브리드 AI 지원 시각 분석 프레임워크를 개발하여 구름-기후 반응을 연구하고, 다양한 MCB 개입 시나리오를 탐색하고, 이들의 잠재적인 영향을 평가

⇒ 일련의 AI 에뮬레이터 모델과 대화형 시각 분석 시스템(VA)을 개발

- 해당 논문에서 제시된 모델은 통계 물리학의 원리를 활용하여 구름 속성이 기후 패턴에 미치는 영향을 분석
  - 또한, MCB 개입 시나리오를 시뮬레이션하고 기후 민감 지역에서의 잠재적인 영향을 추적

⇒ 복잡한 구름-기후 관계를 연구

⇒ MCB 기반 기후 개입의 효과를 평가하는데 도움이 되는 효율적인 분석 워크플로우 제시

## 2. Related Work

- **시각 분석의 목표)** 데이터 시각화 기술의 표현력과 통계 및 기계 학습 방법의 모델링 능력을 결합하여 효율적인 분석 워크플로우를 생성
- Endert 등: 기계 학습과 데이터 시각화의 상호 작용이 어떻게 시각화 연구 커뮤니티에서 발전해 왔는지를 조사
- 다양한 기계 학습 및 딥러닝 모델이 시각화 분야에서 활용되어 왔음
  - 제시된 프레임워크는 이러한 시스템들을 활용하여 구름-기후 관계를 분석

### 3. Climate Science Background

- 해양 구름 밝히기(MCB)는 기후 개입 기술 중 하나
  - 지구의 기온을 낮추기 위해 제안된 태양 복사 관리(SRM) 전략 중 하나
  - 해당 기술은 해양 구름에 해수 소금 에어로졸을 분사하여 구름의 반사율을 높이고 주변 지역을 냉각시킴으로써 태양 복사를 반사시킴
- MCB와 같은 기술은 의도된/의도되지 않은 지구 시스템의 영향을 연구하는 데 필요
  - 특히 과학 커뮤니티는 여러 지리적 위치에 대한 다양한 기후 기율기 점에서의 MCB 개입의 영향을 이해하고 있음
  - 기후 기율기 점은 기후 시스템에서의 임계점으로, 이를 넘어서면 인류 사회에 심각한 영향을 미칠 수 있는 큰 변화가 발생할 수 있음
  - 이러한 분석을 위해 Fluctuation-Dissipation Theorem(FDT)의 원리를 기반으로 데이터 전처리와 AI 모델링을 통해 MCB 개입 시나리오를 시뮬레이션하여 기후 영향을 추정

### 4. REQUIREMENT ANALYSIS

1. VA 시스템에서 MCB 개입 시나리오를 직접 수행하고 흥미로운 시나리오의 설정을 기록/저장하여 하류 실험 및 시뮬레이션을 실행할 수 있는 능력
2. 새롭게 변조된 입력 강제 필드로 하이브리드 모델을 실행할 때 발생하는 분포 이탈 사례를 모니터링할 수 있는 능력
3. 선택된 지리적 위치에 대한 기후 기율기 점의 위험에 대한 개입의 잠재적 영향을 평가할 수 있는 능력
4. 개별 시간 지연 AI 모델을 별도로 실행하고(개입 시나리오 외부에서) 다양한 변수 간 관계를 포함한 구름에서 기후 응답 속성을 분석할 수 있는 능력

## 5. Hybrid AI Model

- 해당 프로젝트에서는 해양 구름 밝히기(MCB)가 기후 시스템에 미치는 영향을 깊이 이해하기 위해 하이브리드 모델링 접근 방식을 채택하였음
- 데이터: CESM2 Large Ensemble(CESM2-LE) 데이터를 활용하여 구름과 기후 응답 사이의 복잡한 상호작용을 모델링
- 전처리: 계절성과 추세를 제거하여 내부 변동성을 정확하게 포착하고, 이를 기반으로 구름-기후 응답 함수를 신뢰성 있게 학습하였음
- 모델
  - MLP(Multilayer Perceptron) 네트워크를 중심으로 한 기계 학습 모델 사용  
→ 고차원의 복잡한 데이터 간의 관계를 파악하고 기후 시스템의 응답을 예측
  - 이 과정에서 지구의 회전 대칭성을 고려하여 구면 그리드 샘플링을 수행하고, 물리적 제약 조건을 추가하여 모델의 안정성과 신뢰성을 강화

⇒ 최종적으로 MCB 개입 시나리오의 다양한 강제 효과를 시뮬레이션하여 다양한 기후 영향을 추정하고, 이를 통해 지구의 환경 변화에 대한 포괄적이고 심층적인 이해를 제공하고자 함

## ★ 6 . Visual Analysis System

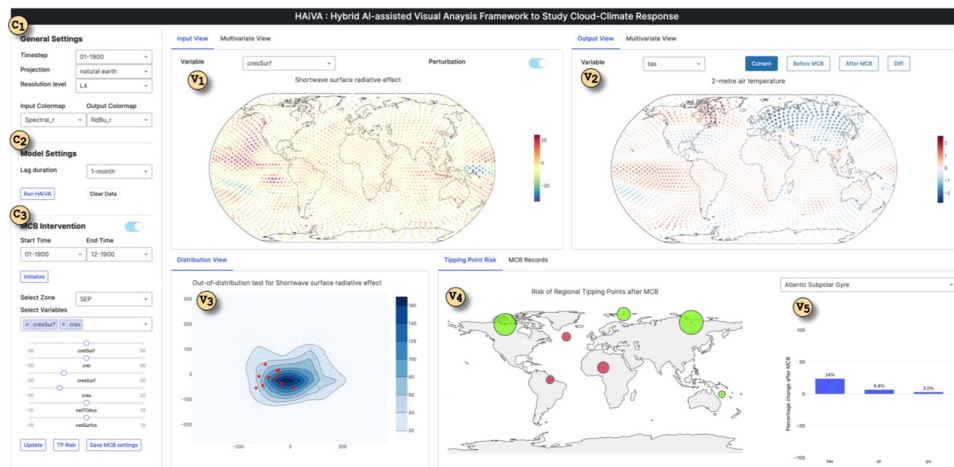


Figure 2: Complete layout of our proposed hybrid AI-assisted visual analysis system. (C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>) User input control panel to set analysis parameters, including MCB intervention experiments. (V<sub>1</sub>) Input cloud radiation anomaly visualization panel. (V<sub>2</sub>) Output climate anomaly visualization panel. (V<sub>3</sub>) Distribution-shift visualization. (V<sub>4</sub>, V<sub>5</sub>) Tipping point risk assessment panel.

- 프론트엔드 VA 시스템은 다음과 같은 다양한 상호작용과 시각화 기능을 포함하여 기후 과학자들의 분석 요구 사항을 충족시키기 위해 설계되었음

### 1. 상호작용 패널

- 시스템 왼쪽에 상호작용 패널을 배치하여 세부 분석을 수행하는 데 필요한 주요 사용자 상호작용 설정 및 매개 변수를 모아놓았음
- 해당 패널에서는 일반 분석 설정, 백엔드 하이브리드 모델 설정 및 MCB 개입 실험 설정을 선택할 수 있음

## 2. 구름 방사 및 기후 필드 시각화

- 6가지 입력 구름 방사 필드와 3가지 출력 기후 필드
- 각각 "입력 보기" 및 "출력 보기" 패널에서 시각화

## 3. 분포 변화 시각화

- MCB 개입 실험을 수행하기 위해 새로운 변형된 입력 필드를 하이브리드 AI 모델에 제공
- 새로운 예측을 추적하기 위해 우리는 분포 변화 시각화를 제공  
→ PCA(주성분 분석)를 사용하여 공간 필드를 낮은 차원으로 투영하고, PCA 공간에서 커널 밀도 추정을 사용하여 밀도 플롯을 생성하여 고차원 분포 형태를 캡처

## 4. 티핑 포인트 위험 보기

- 지구 시스템 내에서 복잡한 기후 상호 연결성을 고려할 때, 모든 기후 개입 시나리오에 대해 전 세계의 민감한 지리적 위치에 대한 잠재적 영향을 평가

## 5. MCB 개입 기록

- 해당 프레임워크의 목표는 구름-기후 응답을 연구하고 다양한 MCB 개입 시나리오를 가설화하는 것임  
→ 사용자가 흥미로운 MCB 개입 설정을 점진적으로 저장하고 나중에 Excel/CSV 파일로 내보낼 수 있는 테이블 형식으로 제공

⇒ 위의 모든 기능을 통해 VA 시스템은 기후 과학자들이 복잡한 구름-기후 상호작용을 연구하고 다양한 MCB 개입 시나리오의 영향을 가설화하는 데 효과적으로 지원

# 7. Discussion

- 우리의 전방형 VA 시스템은 클라이메이트 과학자들이 설정한 분석 요구 사항을 충족하기 위해 다양한 상호 작용 및 시각화 기능을 포함한 멀티 패널 레이아웃 디자인을 채택했음
  - 사용자는 상호 작용 패널을 통해 분석 설정 및 매개 변수를 조정하고, 구름 방사 및 기후 필드를 시각화하여 클라우드-기후 상호 작용을 연구할 수 있음

- 또한 MCB 개입 실험의 결과를 시각적으로 분석하고, 기후 티핑 포인트 위험을 평가하며, MCB 개입 설정을 기록하여 후속 실험 및 시뮬레이션 실행에 활용할 수 있음
- 이러한 시스템은 전문가들로부터 긍정적인 피드백을 받았으며, 기후 변화 이니셔티브에 대한 공공 및 정부 참여를 촉진할 수 있다는 인식이 있음
- 구현
  - Plotly의 Dash 플랫폼을 사용하여 수행되었음
  - Flask 엔진과 React.js 및 Plotly.js를 활용하여 개발되었음

## 8. Conclusion & Future Work

- 이 논문에서는 복잡한 구름-기후 반응 함수를 연구하고 다양한 MCB 개입 시나리오 및 잠재적 기후 변화 영향을 신속하게 탐색하기 위한 하이브리드 AI 지원 시각 분석 프레임워크를 제안하였음
- 미래에는 배경 모델을 업데이트하여 고위도 지역에 대한 더 나은 예측을 얻고자 함
- 또한 하이브리드 모델 결과에 예측적 불확실성 평가를 통합하고자 함