한국컴퓨터그래픽스학회
Korea Computer Graphics Society Vol. 24, No. 2, P.21~28

# 운고계 관측자료의 대화형 3차원 시각화

이준혁° 하완수 김용혁 이강훈*

광운대학교 컴퓨터과학과

{flu, haws91, yhdfly, kang}@kw.ac.kr

# Interactive 3D Visualization of Ceilometer Data

Junhyeok Lee° Wan Soo Ha Yong-Hyuk Kim Kang Hoon Lee*

Department of Computer Science, Kwangwoon University

## 요 약

본 논문은 운고계로부터 수집된 운고 자료와 후방산란 자료를 3차원 가상 공간에서 시각화 하는 대화형 기법을 제안한다. 운고계 관측자료는 시간과 공간 정보가 모두 연계된 다차원 대용량 정보이기 때문에 정적인 2차원 시각화 방법으로는 그 안에 내재된 전체 정보를 충분히 드러내기 어렵다. 본 논문의 시각화 방법은 실시간 3차원 렌더링 기술을 바탕으로 사용자가 원하는 대로 시점과 시야를 조절하면서 3차원 형상으로 표현된 운고계 관측자료의 전체적인 변화 양상과 국소적인 특징을 다각도로 관찰할 수 있도록 한다. 운고 및 운량 자료는 실제 지형 자료와 결합하여 다수의 구름이 지형 위에서 형성되고 소멸되는 사실적인 구름 애니메이션 형식으로 시각화 한다. 후방산란 자료는 시간과 고도에 따른 변화를 통합적으로 표현할 수 있는 3차원 지형 형태로 시각화 한다. 또한 검증하고자 하는 날짜, 지형의 상세도, 혹은 대기경계층 높이와 같은 보조자료 등을 선택할 수 있도록 함으로써 자료를 여러 관점에서 해석할 수 있도록 돕는다. 본 논문에서 제안하는 대화형 시각화 방법이 기상 자료의 분석과 검증에 활용될 수 있음을 보이기 위하여 전국 93개 관측 지점의 라이다식 운고계로부터 수집된 실제 자료를 바탕으로 다양한 실험을 수행하였다.

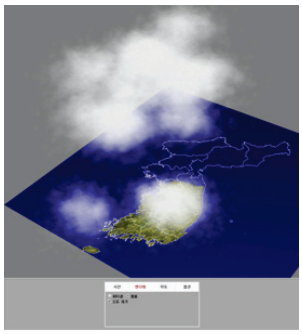
## Abstract

We present interactive methods for visualizing the cloud height data and the backscatter data collected from ceilometers in the three-dimensional virtual space. Because ceilometer data is high-dimensional, large-size data associated with both spatial and temporal information, it is highly improbable to exhibit the whole aspects of ceilometer data simply with static, two-dimensional images. Based on the three-dimensional rendering technology, our visualization methods allow the user to observe both the global variations and the local features of the three-dimensional representations of ceilometer data from various angles by interactively manipulating the timing and the view as desired. The cloud height data, coupled with the terrain data, is visualized as a realistic cloud animation in which many clouds are formed and dissipated over the terrain. The backscatter data is visualized as a three-dimensional terrain which effectively represents how the amount of backscatter changes according to the time and the altitude. Our system facilitates the multivariate analysis of ceilometer data by enabling the user to select the date to be examined, the level-of-detail of the terrain, and the additional data such as the planetary boundary layer height. We demonstrate the usefulness of our methods through various experiments with real ceilometer data collected from 93 sites scattered over the country.

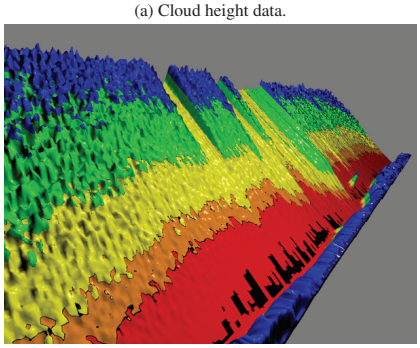
**키워드:** 데이터 시각화, 운고계 관측자료, 3차원 시각화
**Keywords:** data visualization, ceilometer data, 3D visualization

*corresponding author: Kang Hoon Lee/Kwangwoon University(kang@kw.ac.kr)

Received : 2018.05.04./ Review completed : 1st 2018.05.18. / Accepted : 2018.05.28.
DOI : 10.15701/kcgs.2018.24.2.21
ISSN : 1975-7883(Print)/2383-529X(Online)



(a) Cloud height data.



(b) Backscatter data.

Figure 1: Results of our visualization methods for ceilometer data.

## 1. 서론

운고계(ceilometer)는 구름의 높이를 측정하는 장비로서, 근래에는 레이저를 수직 방향으로 방출한 후 대기 중의 안개, 구름, 강수, 미세 입자 등에 의하여 반사된 후방산란(backscatter)된 에너지를 감지하는 라이다(LIDAR; light detection and ranging) 방식의 운고계가 널리 사용되고 있다. 국내에서는 국립기상과학원이 주체가 되어 2010년 6월부터 라이다식 운고계(4 종류: JEN, Elia CL31, CL51)를 도입하여 운영하고 있다. 현재 전국에 걸쳐 93개 이상의 라이다식 운고계가 설치되어 있고, 각 지점마다 지속적으로 운고 및 운량 자료가 취합되고 있다. 보성 지점 등의 일부 운고계는 고도에 따른 고해상도의 후방산란량 프로파일을 제공하여 보다 정밀한 대기 상태의 분석을 허용하기도 한다.

운고계 관측자료는 시간과 공간 정보가 모두 연계된 다차원 자료이기 때문에, 평면 그래프와 같이 특정 차원으로 투영된 정보만을 시각화 할 경우 내재된 양상을 다각도로 드러내지 못한다. 또한 높은 시공간 해상도를 제공하는 고성능 운고계는 매우 큰 규모의 원시 자료를 생성하기 때문에, 미리 정의된 단일 축척 혹은 단일 시점의 시각화로는 전체적인 양상과 국소적인 특징을 통합적으로 제시할 수 없다. 추가적으로, 운고계 관측자료는 우리가 일상적으로 마주하는 구체적인 기상 현상을 다루고 있기 때문에, 색상, 크기, 높이 등의 추상화된 시각적 표현 방식만으로는 직관적인 의미를 전달하기 어렵다.

본 논문은 운고계 관측자료에 내재된 양상과 의미를 보다 효과적으로 전달하기 위하여 개발된 운고 자료 및 후방산란 자료의 시각화 방법을 소개한다. 먼저 운고 자료의 시각화를 위하여서는, 지형 위의 각 관측 지점마다 기록된 저층, 중층, 고층부의 운고와 운량을 구름의 공간적 분포와 움직임으로 표현하는 애니메이션 시각화 방법을 제안한다 (그림 1 (a)). 사용자는 마우스를 이용한 직접 조작 방식으로 관측 시점(time) 및 카메라의 시야(view)를 자유롭게 조절할 수 있고, 결과적으로 구름의 분포를 다양한 각도에서 관찰하거나 그 변화를 시간 순서에 따라 확인할 수 있다. 운고, 운량과 같은 추상적 자료가 구름의 형성, 소멸, 이동과 같은 구체적 현상으로 묘사되기 때문에 사용자는 쉽고 빠르게 자료의 의미를 파악할 수 있다. 다음으로 후방산란 자료의 시각화에 있어서는, 시간과 고도로 매개화된 2차원 평면에서 추출된 후방산란량의 높이 맵(height map)을 지형(terrain) 형태로 표현하는 3차원 시각화 방법을 제안한다 (그림 1 (b)). 사용자는 대화형 시야 제어 인터페이스를 통해 다양한 축척과 각도로 높이 맵을 관찰할 수 있고, 나아가서 높이 맵의 상세도(level-of-detail)를 높이거나 낮춤으로써 전체적인 양상과 국소적인 특징을 통합적으로 파악할 수 있다. 또한 특정 시점 혹은 고도에 해당하는 단면 그래프를 확인할 수 있기 때문에, 관심 있는 영역에서 나타나는 후방산란량의 변화 양상을 보다 정밀하게 관찰할 수 있다.

본 논문에서 제안하는 이들 대화형 시각화 방법은 모두 범용 PC 환경에서 작동 가능한 웹 응응프로그램 혹은 데스크탑 응용프로그램의 형태로 구현되었다. 실제 대용량 운고계 관측자료를 적재하여 진행한 실험에서는 제안된 모든 상호작용 및 렌더링 과정이 실시간에 효과적으로 수행됨을 확인하였다. 본 논문에서 소개하는 방법은 기상 예측 모형을 개발하고 분석하는 전문적인 목적에 활용될 수 있을 뿐 아니라, 단순히 과거의 기상 정보를 검색하거나 열람하기 위한 일반적인 용도에 이르기까지 널리 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

## 2. 관련 연구

컴퓨터 그래픽스 기술은 고차원 자료의 효율적인 시각화를 가능케 하면서 오래 전부터 기상 관측자료의 시각화에 성공적으로 활용되어 왔다 [1]. 최근의 그래픽스 가속 하드웨어는 대용량 기상 자료의 실시간 렌더링을 허용할 정도로 발전하였고, 덕분에 실시간 상호작용을 통하여 원본 자료의 의미를 다각도로 분석할 수 있는 탐사적(exploratory) 인터페이스가 하나의 효과적인 시각화 방법으로 부상하고 있다 [2]. 다른 한 편으로는, 기상 관측자료가 대개 지리 정보에 밀접하게 연관되어 있기 때문에 이 두 가지 정보를 통합적으로 제시하는 시각화 기법에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다 [3, 4]. 본 논문의 높이 맵 시각화 방법은 사용자가 대화형 인터페이스를 통하여 축척과 시점, 차원, 해상도 등을 조절함으로써 스스로 의미 있는 분석을 발견해나가도록 하는 탐

사적 시각화를 지원한다. 또한 운고 자료의 애니메이션 시각화 방법에서는 3차원 지형 정보와 운고계 관측자료를 통합적으로 시각화 함으로써 사용자가 보다 풍성한 의미를 발견할 수 있도록 한다.

운고계를 통하여 관측된 자료는 대기경계층(PBL; planetary boundary layer) 고도 혹은 운저(cloud base) 고도를 추정하거나 강수 확률을 예측하는 등의 다양한 연구에 활용되고 있다. Eresmaa 등은 운고계 후방산란 자료를 바탕으로 대기 경계층 고도를 추정하는 방식의 가능성과 잠재력을 검증한 바 있다 [5]. 조요한 등은 기존의 초단기 기상분석 및 예측 시스템에 운고계 자료를 추가하여 강수예측성능을 향상시킬 수 있음을 보였다 [6]. 여희동 등은 운고계 관측자료에 경도법(gradient method)과 웨이블릿(wavelet) 방법을 적용하여 대기경계층 고도와 운저 고도를 비교적 정확하게 추정할 수 있음을 확인하였다 [7]. 하지훈 등은 운고계 후방산란 자료에 오토인코더(autoencoder)와 인공신경망 등의 기계학습 기법을 적용하여 기존 방법에 비하여 대기경계층 고도를 보다 정확하게 추정할 수 있음을 보였다 [8]. 이처럼 운고계 관측자료에 기초한 연구는 국내외적으로 점차 활성화 되는 추세이며, 본 논문에서 제안하는 시각화 방법은 이들 연구에 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 예상된다.

본 논문의 구름 애니메이션 시각화 방법은 컴퓨터 그래픽스 분야에서 오랫동안 연구되어 온 실시간 구름 렌더링 기술을 활용하고 있다 [9]. 그래픽스 하드웨어의 병렬 처리 기능을 활용하면 비교적 작은 규모의 구름에 대하여서는 물리 법칙에 기초하여 실시간에 사실적인 움직임을 합성하는 것이 가능하다 [10]. 하지만 최신의 그래픽스 하드웨어 성능을 가정한다고 하여도, 범용 PC 환경에서 한반도 전체 영역과 같은 대규모 지역에 분포된 구름에 대하여 실시간 물리 시뮬레이션을 적용하는 것은 여전히 어려운 문제이다 [11]. 본 논문에서는 체적 모형에 기초하여 운고계 관측자료로부터 사실적인 구름의 형성과 이동 과정을 재구성하는 데이터 기반 애니메이션 합성 알고리즘을 제안한다. 또한 그 결과를 효율적으로 시각화 하기 위하여 구름, 폭발, 화염 등의 실시간 합성에 널리 쓰이는 빌보드(billboards) 기반 렌더링 기법을 적용한다 [12].

| 시간 | 운고 | | | 전운량 |
|---|---|---|---|---|
| | 저층 | 중층 | 고층 | |
| ( 전 략 ) | | | | |
| 2015.01.25 14:43 | 1850 | 7620 | 7620 | 5 |
| 2015.01.25 14:44 | 1554 | 1764 | 7620 | 4 |
| 2015.01.25 14:45 | 7620 | 7620 | 7620 | 4 |
| ( 후 략 ) | | | | |

Table 1: Organization of the cloud height data for our experiments. The height and amount of cloud have been measured and recorded for each minute. 7620 in the cloud height field means that no cloud has been found.

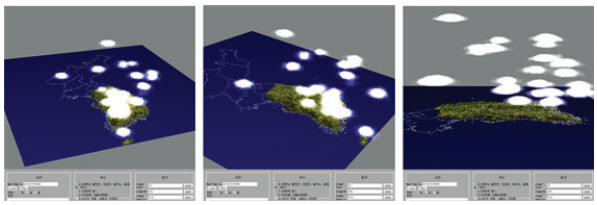


Figure 2: Results of the particle-based visualization from three different views.

## 3. 운고 및 운량 시각화

본 논문에서 제안하는 운고 및 운량 시각화 방법은 표 1에 제시된 형식의 자료를 가정한다. 동일 지점에서 일정 시간 간격마다 관측된 구름의 높이와 양이 순차적으로 기록되어 있고, 한 시점에 구름이 여러 층에 걸쳐 쌓여 있을 경우에는 최대 3개 층(저층, 중층, 고층)까지의 정보가 함께 기록된다.

운고 및 운량 자료를 시각화하는 한 가지 실험적인 방법으로 먼저 위에서 아래로 내려다본 시점에서 각 관측 지점마다 구름의 양에 비례하는 크기의 반투명 입자(particle)를 배치하여 보았다. 이러한 2차원 시각화에서는 구름의 높이에 해당하는 운고 정보를 표현할 수 없는 한계가 있었으나, 구름의 양에 해당하는 운량 정보가 반투명 입자의 크기와 밀도를 통하여 효과적으로 전달될 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 2차원 시각화 실험 결과를 바탕으로, 3차원 공간에서 원본 자료를 가능한 있는 그대로 표현하는 입자(particle) 기반 가시화 방식을 실험하였다 (그림 2). 입자기반 가시화는 기본적으로 2차원 가시화 방식과 유사한데, 각 관측 지점마다 저층운, 중층운, 고층운의 높이에 따라 반투명 입자들을 공간상에 나누어 분포시킨다는 점에서 차이가 있다. 보다 구체적으로, 관측 지점의 위치를 $(x, z)$, 구름의 높이를 $y$라고 하면, 위치 $\mathbf{c} = (x, y, z)$를 중심으로 다음의 가우시안(Gaussian) 분포에 따라 운량에 비례하는 개수만큼의 반투명 입자들을 무작위로 배치한다.

$$g(\mathbf{p}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{||\mathbf{p}-\mathbf{c}||}{\sigma})^2} \quad (1)$$

운고계 관측 자료는 희박하게 분포된 관측 지점들로부터 측정된 3단계 운고 정보만을 포함하고 있으므로, 이를 입자 기반의 가시화를 통하여 원본 그대로 표현할 경우 그 결과가 실제 거시적인 구름의 분포를 적절히 반영한다고 보기 어렵다. 예를 들어, 인접한 두 관측 지점에서 측정된 저층 운고가 서로 유사하다면 실제로는 두 지점을 포함하는 하나의 넓은 구름대가 형성되었을 수도 있다. 하지만 입자 기반 가시화 방식으로는 각각의 관측지점에서 서로 분리되어 형성된 두 개의 좁은 구름 분포를 표시하게 된다. 입자 기반 가시화 방식은 이처럼 공간적으로 혼합된 구름 군집을 표현할 수 없다는 한계점이 있다. 또한, 관측자료를 시간

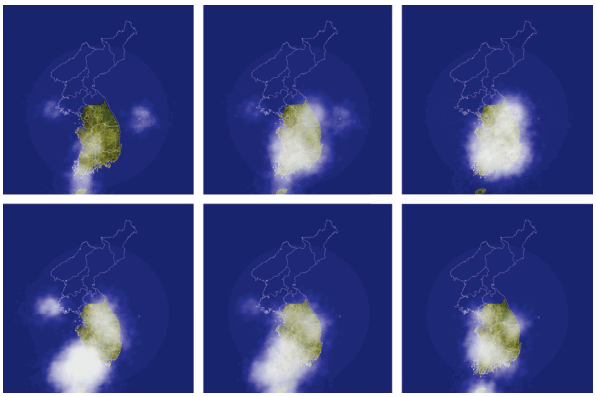
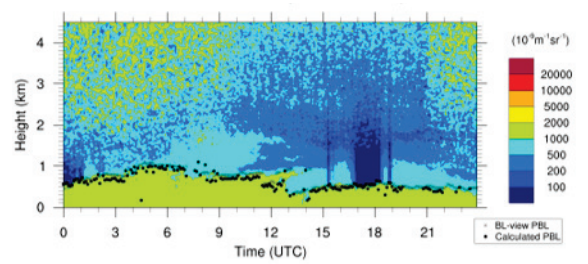
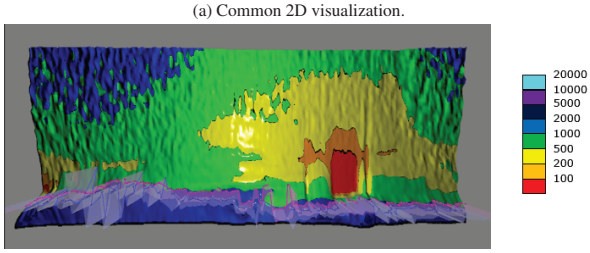


Figure 3: Temporally variying cloud shapes obtained by the volume-based visualization. (Arranged in the clockwise direction from the left top.)




(a) Common 2D visualization.




(b) Our 3D visualization.

Figure 4: Comparison between 2D and 3D visualizations.

순서에 따라서 순차적으로 재생할 경우에는 인접 프레임 간의 시각적 연속성이 보장되지 않는다는 한계도 갖는다.

본 연구에서는 원본 데이터로부터 거시적인 구름의 형성 및 변화 과정을 추정하여 표현하는 체적(volume) 기반 가시화 방식을 추가적으로 제공함으로써 입자 기반 가시화 방식의 한계를 보완하도록 하였다 (그림 3). 체적 기반 가시화 방식은 구름이 분포할 수 있는 전체 공간에 많은 수의 투명한 입자들을 무작위로 배치한 후, 매 프레임마다 현재 시점의 관측자료의 구름의 위치에 가까운 입자들을 좀더 불투명하게 하거나 반대의 경우에는 좀더 투명하게 변화시키는 과정을 반복한다. 좀더 구체적으로, 먼저 운고계 관측 자료에 포함된 모든 구름 관측 위치를 포괄하는 최소 경계 상자(bounding box)를 구하고, 이 경계상자 내부에서 3차원 위치 $(x, y, z)$를 무작위로 추출하여 불투명도(opaqueness) $\alpha$가 0.0인 초기 입자 집합 $\{(x, y, z, \alpha)\}$를 구성한다. 매 프레임마다 현재 시점에 구름이 관측된 각 위치에 대하여 $k$개의 가장 가까운 입자들을 찾고 그와 연관된 불투명도를 일정 수치만큼 증가시킨다. 본 연구의 실험에서 $k$는 전운량에 비례하는 정수 값으로 설정하였고, 불투명도는 1.0 이하의 범위에서 0.005씩 증가되도록 하였다. 모든 관측 위치에 대하여 이 작업을 수행한 다음, 어느 관측 위치로부터도 영향을 받지 않은 나머지 모든 입자에 대하여서는 불투명도를 일정 수치만큼 감소시킨다.

연속된 프레임에 걸쳐서 이 과정을 반복적으로 수행하면 관측된 구름의 위치에 가까운 입자들이 점차 구름을 형성하는 과정이 묘사된다. 특히 관측된 구름의 위치들이 서로 공간적으로 인접할 경우에는 이들을 포괄하는 구름 군집이 자연스럽게 형성되는 과정이 드러난다. 또한 각 입자의 투명도는 항상 점진적으로 변화하기 때문에, 연속된 프레임에 걸쳐서 애니메이션을 수행할 때뿐 아니라 갑자기 동떨어진 프레임으로 옮기는 경우에도 구름 형상이 연속적으로 변화하는 성질을 만족시킬 수 있다.

## 4. 후방산란 자료 시각화

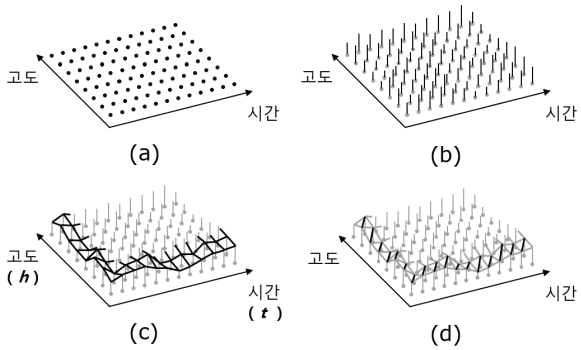



Figure 5: The process of building a 3D triangular mesh from a given 2D height map. (a) Sampling a set of points regularly in a rectangular area on the plane defined by the time and the height axes. (b) Identifying the backscatter energy for each sampled point. (c) Connecting each pair of horizontally or vertically adjacent points to form a rectangular mesh. (d) Subdividing each rectangle along the diagonal direction to form a triangular mesh.

후방산란 자료는 시간과 고도 변수로 매개화된 2차원 평면의 직사각형 영역 안에서 균등한 간격으로 샘플링 된 후방산란량 값들의 집합이다. 간단하게는 각각의 값들을 하나의 색상에 대응시킴으로서 2차원 이미지 형태로 시각화 할 수 있다 (그림 4 (a)). 하지만 2차원 이미지는 시간과 고도에 따른 후방산란량 값이 색상을 통해서만 표시되기 때문에 그 변화 양상을 입체적으로 드러내는데 한계가 있다. 본 논문에서는 후방산란 자료를 컴퓨터그래

픽스 분야에서 널리 사용되는 높이 맵(height map)으로 해석하여 3차원 지형의 형태로 시각화 하는 방법을 제시한다. 3차원 시각화는 색상뿐 아니라 높이, 음영 등의 추가적인 신호를 통하여 후방산란 자료의 시간과 고도에 따른 변화 양상을 다양한 각도에서 조망할 수 있도록 허용하기 때문에 기존 2차원 시각화의 한계를 보완할 수 있다 (그림 4 (b)).

먼저 그림 5에서 설명된 절차에 따라 후방산란 자료의 높이 맵으로부터 삼각형 메쉬 구조의 지형 모델을 구축한다. 이러한 삼각형 메쉬 구조에서는 서로 인접한 삼각형들이 동일한 정점을 최소한 하나 이상 공유한다. 따라서 각 삼각형마다 그에 속한 3개 정점의 위치 정보를 직접 저장할 경우, 동일한 위치 정보가 여러 번 중복되어 저장 공간이 낭비된다. 본 연구의 실험에서는 저장 공간의 크기를 최소화 하고 렌더링 성능을 향상시키기 위하여, 모든 정점의 위치 정보를 1차원 배열 형태로 저장한 뒤, 각 삼각형마다 그에 속한 3개 정점의 인덱스(index)만 저장하는 방식을 취하였다.

높이 맵으로부터 형성된 삼각형 메쉬에 대하여 3차원 렌더링을 수행하기 위하여서는 법선 벡터 정보가 필요하다. 각 정점의 법선 벡터를 그 정점이 속한 하나의 특정 삼각형에 직교하는 법선 벡터로 적용할 경우에는 지형이 다소 각진 형태로 표현되는 문제점이 있다. 본 연구의 실험에서는 각 정점마다 그 정점이 속한 모든 삼각형들의 법선 벡터를 평균 내어 적용함으로써 보다 부드러운 지형 표현을 얻을 수 있었다 (그림 6).

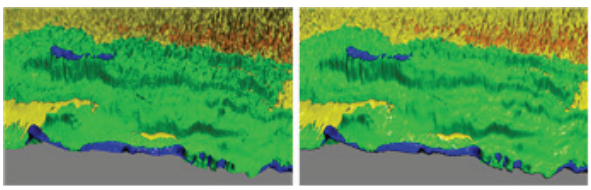


Figure 6: (Left) Applying face normals. (Right) Applying vertex normals.

3차원 지형에 대하여 원근 투영(perspective projection) 및 퐁 쉐이딩(Phong shading)을 포함하는 기본적인 렌더링 절차를 수행하면 원근감과 음영의 차이를 통하여 지형의 굴곡이 표현된다. 사용자는 이들 깊이 단서(depth cues)만으로도 상대적인 후방산란량의 변화 양상을 파악할 수 있으나, 지형의 높이를 정확하게 인식하여 절대적인 후방산란량 값을 파악하기에는 시각적 정보가 부족하다. 이를 보완하기 위하여, 추가적으로 후방산란량의 범위에 따라 서로 다른 색상을 부여함으로써 후방산란량의 절대 등급을 보다 명확히 구분해 줄 수 있도록 한다 (그림 7).

후방산란 자료의 높은 해상도는 후방산란량의 미세한 변화를 정밀하게 포착할 수 있다는 측면에서는 장점으로 작용하지만, 반면 지나치게 많은 양의 정보로 인하여 한 눈에 전체 양상을 파악하기에는 어려움을 야기하는 단점이 있기도 하다. 먼 거리에서 전체 자료를 한꺼번에 관찰하고자 할 경우에는 세밀한 변화가 오히려 잡음과 같이 인식될 수 있는 것이다. 사용자가 가까운 시점

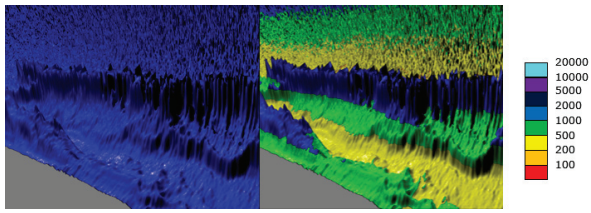



Figure 7: (Left) Phong shading. (Right) Phong shading combined with color grading.

에서 정밀한 해상도로 관찰하거나 먼 시점에서 축약된 해상도로 관찰하는 것을 모두 허용하기 위하여, 후방산란 자료의 해상도를 원하는 만큼 감소시키거나 다시 원래 해상도로 복원할 수 있는 대화형 인터페이스를 제공한다 (그림 8).

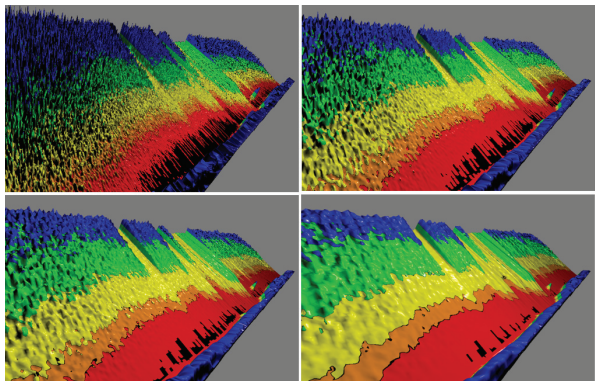


Figure 8: Reducing the level-of-detail of the original data iteratively.

후방산란 자료의 3차원 시각화는 시점과 시선 방향을 제어함으로써 후방산란량의 변화 양상을 다양한 각도에서 원하는 정밀도로 해석할 수 있도록 허용한다. 본 연구의 실험에서는 3차원 시각화 프로그램에 익숙하지 않은 사용자도 마우스 휠의 조작과 드래그(drag) 인터페이스를 이용하여 손쉽게 카메라 줌-인/아웃과 3차원 회전을 제어할 수 있도록 한다.

## 5. 실험 결과

본 논문에서 제안하는 운고계 자료의 대화형 시각화 기법을 실제 관측 자료와 연계하여 다양한 실험을 진행하였다. 운고 및 운량 자료는 전국 총 92개 지점에서 2015년 1월 1일부터 12월 31일까지 매 1분 간격으로 측정된 자료를 이용하였다. 후방산란 자료는 전라남도 보성 지역에서 2015년 1월 3일부터 12월 31일까지 최저 고도 10미터부터 최고 고도 4,500미터 범위에서 매 36초 간격으로 1일 2,400회 측정된 CL51 운고계 자료를 이용하였다. 추가적으로, 운고 및 운량 자료의 시각화에서는 자연과학분야 GIS DB

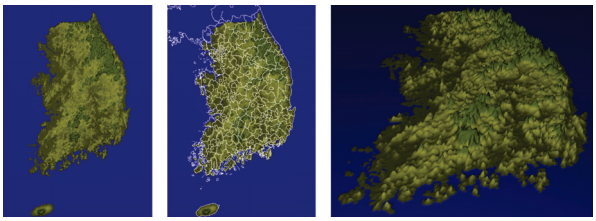


Figure 9: (Left) 3D terrain. (Center) 3D terrain combined with 2D borderlines. (Right) 3D terrain from another view.

웹사이트에서 제공하는 지형-DEM 자료를 함께 활용하였다 (그림 9).

제안된 방법의 유용성을 확인하기 위한 약식 검증 방법으로서, 운고계 자료 처리 알고리즘을 개발하는 기계학습 분야의 전문가에게 두 가지 시각화 기법을 활용하도록 요청한 후 그 효용성에 대한 의견을 청취하였다. 먼저 운고자료 가시화 결과의 경우, 다수의 운고계에서 독립적으로 측정된 운고자료의 일관성 파악 및 해당 자료에 대한 품질관리 결과의 정확도 검증에 유용하게 활용될 수 있다는 의견을 들을 수 있었다. 또한 후방산란자료 가시화 결과의 경우, 후방산란자료에 내재된 잡음 제거 및 날씨 등에 따라 달라지는 대기 상태에 따른 대기경계층 고도 산출 결과의 정확도 검증에 효과적으로 활용될 수 있다는 의견을 들을 수 있었다.

## 5.1 운고 및 운량 시각화

대규모 운고계 관측자료를 어디에서나 편리하게 관찰할 수 있도록 하기 위하여, 먼저 전체 관측자료를 웹 서버와 연동된 데이터베이스에 일괄적으로 저장한 후, 클라이언트 측 웹 어플리케이션에서 필요에 따라 원격으로 데이터를 전송 받아서 실시간에 가시화하는 프로그램을 제작하였다. 서버 측 구현을 위하여 아파치(Apache) 웹 서버와 몽고(Mongo) DB, 그리고 Node.js 라이브러리를 활용하였고, 클라이언트 측 구현을 위하여 자바스크립트 언어 기반의 HTML5 Canvas API, WebGL API(Three.js), jQuery 라이브러리 등을 활용하였다.

3차원 지형을 표시하기 위하여, 대한민국 영토의 DEM(Digital Elevation Model) 형식 데이터를 다각형 메쉬 형태로 변환한 후 자체 제작한 GLSL 기반 버텍스 쉐이더(vertex shader)와 프래그먼트 쉐이더(fragment shader)를 통하여 렌더링 하였다. 버텍스 쉐이더는 기본적인 변환(transformation)만 담당하고, 프래그먼트 쉐이더는 널리 쓰이는 퐁 쉐이딩(Phong shading) 기법과 지형 고저 표현을 위한 5단계 색상 배합(color blending)을 결합하여 최종 색상을 계산한다. 추가적으로, 3차원 지형 및 구름 분포를 원하는 방향에서 자유롭게 관찰할 수 있도록, 마우스를 드래그하여 시야를 회전시키는 가상 트랙볼(virtual trackball) 방식의 인터페이스를 제공하였다 (그림 9).

본 논문에서 제안한 입자 및 체적 기반 가시화 방법은 기본적으로 운고계 관측자료 원본을 그대로 재현하지만, 추가적으로 품질검사 기법으로 판정된 오류를 표시하거나 혹은 오류가 제거된 자료를 가시화 함으로써 운고계 관측자료의 품질검사 기법 연구 등에 효과적으로 활용될 수 있다 (그림 10). 입자 기반 가시화 방식에서는 운고계 관측자료 결과에 따라서 특정 일시의 각 관측 지점마다 저층운고, 중층운고, 층운고, 전운량의 오류 코드를 해당 관측 지점 혹은 구름의 색상에 대응시켜 표시하도록 하였다. 또한 체적 기반 가시화 방식에서는 오류를 제거하기 전과 후를 비교할 수 있도록 오류 제거 여부를 선택할 수 있도록 구현하였다.

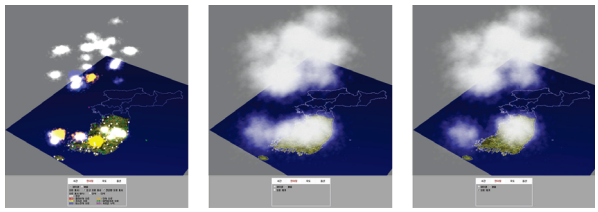


Figure 10: (Left) Coloring error codes in the particle-based visualization. (Center) Volume-based visualization with the errors included. (Right) Volume-based visualization with the errors removed.

## 5.2 후방산란 자료 시각화

후방산란 자료의 3차원 시각화 실험을 위하여 C++ 언어와 OpenGL API 기반의 GLFW 라이브러리를 이용하여 윈도우즈 운영체제에서 동작하는 데스크탑 응용프로그램을 제작하였다. 기본적인 시각화 방법에 기초하여, 운고계 자료와 연관된 두 가지 보조자료를 같은 공간에 함께 시각화 하는 실험을 수행하였다. 먼저 후방산란 자료로부터 추정된 대기경계층(PBL) 고도 자료를 지형 위에 투영하여 중첩 표시하는 방식을 구현하였고, 이를 원본 자료(BL-view) 및 보정 자료에 적용하여 그 결과를 확인하였다 (그림 11). 꺾은선 그래프를 지형 위에 중첩시켜 표현한 결과 이미지에서는 그래프와 지형의 구분이 명료하게 드러나지 않는 문제점이 발견되었다. 이를 보완하기 위하여 꺾은선 그래프가 포함된 반투명 단면을 함께 시각화 하는 방법을 추가적으로 구현하였고, 결과적으로 후방산란 자료와 대기경계층 고도 정보가 보다 명확히 구분됨을 시각적으로 확인할 수 있었다 (그림 12).

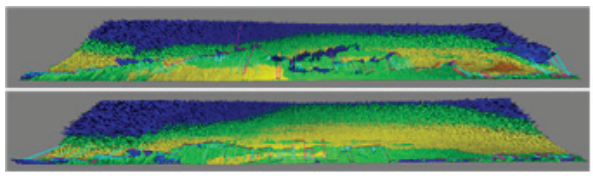


Figure 11: Overlaying the line graph of PBL. (Purple: BL-view, Green: Error corrected.)

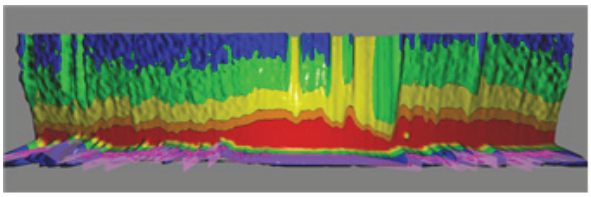


Figure 12: Adding translucent cross sections along the line graph.

다음으로 시간별 강우 여부를 나타내는 보조 자료를 후방산란 자료와 함께 시각화 하는 방법을 구현하였다. 강우가 발생한 각각의 구간에 대하여 전체 고도를 포괄하는 직육면체 형태의 반투면 경계상자(bounding box)를 덧씌우는 형식으로 표현함으로써 강우 구간을 쉽게 식별할 수 있음을 확인하였다 (그림 13).

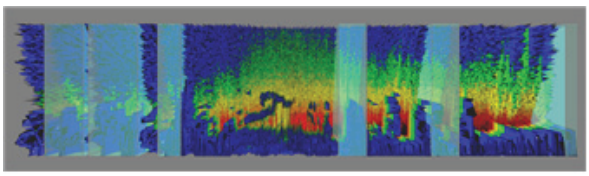


Figure 13: Overlaying a translucent bounding box for each rainfall interval.

다른 한 편으로, 3차원 시각화는 3차원 공간을 2차원 평면으로 원근 투영하는 과정에서 왜곡을 발생시키기 때문에 특정 시간 혹은 고도에서 나타나는 후방산란량의 변화를 사용자가 정확히 인지하기 어렵게 만든다. 2차원 시각화와 3차원 시각화의 장점을 융합하는 방법으로서, 본 연구의 실험에서는 특정 시간과 고도에 대응하는 후방산란량 변화를 2차원 단면의 꺾은선 그래프 형식으로 가시화 하는 추가 인터페이스를 구현하였다(그림 14). 사용자는 3차원 지형으로 표현된 전체 자료를 조망하는 동시에 관심 영을 클릭하여 그 단면을 정확히 관찰할 수 있기 때문에, 이러한 대화형 탐색 과정을 통하여 자료에 대한 통합적 이해도를 한층 증진시킬 수 있다.

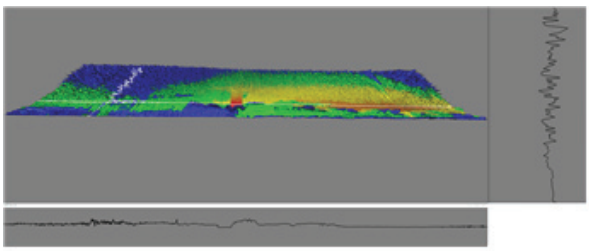


Figure 14: 2D line graph obtained from the cross section. (Right) The change of backscatter energy with respect to the change of height. (Bottom) The change of backscatter energy with respect to the change of time.

## 6. 결론

본 논문은 운고계를 이용하여 관측된 운고 및 운량 자료, 후방산란 자료 등을 대화형 인터페이스를 이용하여 탐사적으로 시각화하는 방법을 제시하였다. 운고 및 운량 자료에 대하여 원본 자료를 정확하게 표시하는 입자 기반 시각화 방법과 전체적인 구름의 분포 및 움직임을 근사적으로 모사하는 체적 기반 시각화의 두 가지 방법을 제안하였다. 또한 후방산란 자료에 대하여서는 높이 맵에 기초한 3차원 지형 형태의 시각화 방법을 개발하였고, 등급별 색상 표현, 대화형 상세도 조정, 대기경계층 고도와 강우 자료의 중첩 가시화, 2차원 단면 그래프의 병행 시각화 등 탐사적 시각화를 보조하는 다양한 추가 기법을 구현하고 실험하였다. 제안된 시각화 방법은 운고계 관측자료의 오류 검출과 보정을 위한 기술 개발에 활용된 바 있고, 향후 기상 예측 모형의 개발이나 분석 혹은 과거 기상 정보의 열람 등을 위한 목적으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다. 본 논문에서 제안한 방법들은 기본적으로 운고계 자료의 시각화로 응용이 제한되나, 후방산란자료의 시각화 방법은 향후 유사한 3차원 지형 구조를 갖는 다른 기상 자료에도 일반화 시킬 수 있을 것이다. 또한 제안된 방법의 유용성을 확인하기 위하여 전문가 의견 청취라는 약식 검증을 수행하였으나, 보다 엄밀한 평가를 위하여서는 향후 다수 사용자를 대상으로 한 정식 사용자 실험이 수반되어야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 기상청 국립기상과학원 주요사업 '기상업무지원기술개발(NIMS-2016-3100)'의 일환으로 수행되었음. 이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1D1A1A01059596). 또한 이 논문은 2016년도 광운대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

## References

[1] T. V. Papathomas, J. A. Schiavone, and B. Julesz, "Applications of computer graphics to the visualization of meteorological data," *SIGGRAPH Comput. Graph.*, vol. 22, no. 4, pp. 327–334, June 1988. [Online]. Available: http://doi.acm.org/10.1145/378456.378538

[2] F. Ladstädter, A. K. Steiner, B. C. Lackner, B. Pirscher, G. Kirchengast, J. Kehrer, H. Hauser, P. Muigg, and H. Doleisch, "Exploration of climate data using interactive visualization," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 27, no. 4, pp. 667–679, April 2010. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1175/2009JTECHA1374.1

[3] Y. Q. Wang, “Gis software for meteorological data visualization and analysis,” *meteorological applications*, vol. 21, no. 2, pp. 360–368, April 2014. [Online]. Available: https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/met.1345

[4] 장봉주, 임상훈, 이석환, 문광석, V. Chandrasekar, and 권기룡, “다양한 gis 플랫폼을 위한 고해상도 기상레이더 정보 시각화 기법,” *멀티미디어학회논문지*, vol. 16, no. 11, pp. 1239–1249, nov 2013. [Online]. Available: http://www.dbpia.co.kr/Journal/ArticleDetail/NODE02343236

[5] N. Eresmaa, A. Karppinen, S. M. Joffre, J. Räsänen, and H. Talvitie, “Mixing height determination by ceilometer,” *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 6, no. 6, pp. 1485–1493, 2006. [Online]. Available: https://www.atmos-chem-phys.net/6/1485/2006/

[6] 조요한, 이용희, 안광득, and 정관영, “운고계 자료를 이용한 구름분석 및 강수 예측성능 실험,” *한국기상학회 학술대회논문집*, pp. 378–379, 2012. [Online]. Available: http://www.dbpia.co.kr/Journal/ArticleDetail/NODE020098206

[7] 여희동, 이철규, 이은혜, 신동현, and 김상우, “운고계를 통한 대기경계층 높이 및 운저고도 산출,” *한국기상학회 학술대회논문집*, pp. 153–154, 2016. [Online]. Available: http://www.dbpia.co.kr/Journal/ArticleDetail/NODE020098206

[8] 하지훈, 김용혁, and 이용희, “운고계를 통한 대기경계층 높이 및 운저고도 산출,” *한국지능시스템학회논문지*, pp. 302–309, 2017. [Online]. Available: http://www.dbpia.co.kr/Journal/ArticleDetail/NODE07227290

[9] M. J. Harris and A. Lastra, “Real-time cloud rendering,” *The Eurographics Association and Blackwell Publishers 2001*, vol. 20, no. 3, pp. 76–85, 2001. [Online]. Available: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/1467-8659.00500

[10] M. J. Harris, W. V. Baxter, T. Scheuermann, and A. Lastra, “Simulation of cloud dynamics on graphics hardware,” in *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Conference on Graphics Hardware*, ser. HWWS ’03. Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland: Eurographics Association, 2003, pp. 92–101. [Online]. Available: http://dl.acm.org/citation.cfm?id=844174.844189

[11] 정석철, 정서원, 김종용, and 박상훈, “지구환경 데이터를 위한 멀티플랫폼 가시화 시스템,” *컴퓨터그래픽스학회논문지*, vol. 21, no. 3, pp. 36–45, 2015. [Online]. Available: http://www.dbpia.co.kr/Journal/ArticleDetail/NODE06383235

[12] T. Umenhoffer, L. Szirmay-Kalos, and G. Szijártó, “Spherical billboards and their application to rendering explosions,” in *Proceedings of Graphics Interface 2006*, ser. GI ’06. Toronto, Ont., Canada, Canada: Canadian Information Processing Society, 2006, pp. 57–63. [Online]. Available: http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1143079.1143089

## 〈저자소개〉

**이 준 혁**
- 2013년 광운대학교 컴퓨터소프트웨어학과 학사
- 2017년 광운대학교 컴퓨터과학과 석사
- 2018년 ~ 현재 광운대학교 컴퓨터과학과 박사
- 관심분야 : 컴퓨터 그래픽스, 컴퓨터 애니메이션, 컴퓨터 게임

**하 완 수**
- 2017년 광운대학교 컴퓨터소프트웨어학과 학사
- 2017년~현재 광운대학교 컴퓨터과학과 석사
- 관심분야 : 컴퓨터 애니메이션, 휴먼 컴퓨터 인터페이스, 컴퓨터 게임, VR

**김 용 혁**
- 1999년 서울대학교 전산과학전공 학사
- 2001년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사
- 2005년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
- 2005년~2007년 서울대학교반도체공동연구소 연구원
- 2007년~2017년 광운대학교 컴퓨터소프트웨어학과 조교수/부교수
- 2013년 기상청 국립기상연구소 방문연구원
- 2017년~현재 : 광운대학교 소프트웨어학부 교수
- 관심분야 : 최적화, 진화연산, 지식공학

**이 강 훈**
- 2000년 서울대학교 컴퓨터공학과 학사
- 2002년 서울대학교 컴퓨터공학부 석사
- 2007년 서울대학교 컴퓨터공학부 박사
- 2008년~2013년 광운대학교 컴퓨터소프트웨어학과 조교수
- 2014년 미국 UCLA 방문연구원
- 2014년~현재 광운대학교 소프트웨어학부 부교수
- 관심분야: 컴퓨터 애니메이션, 휴먼 컴퓨터 인터페이스, 컴퓨터 게임