

전천 카메라 영상을 이용한 자동 운량 분석

김윤미 · 김 준* · 조희구

연세대학교 대기과학과 대기복사연구실

(2007년 8월 11일 접수; 2008년 1월 26일 승인)

Development of Objective Algorithm for Cloudiness using All-Sky Digital Camera

Yun Mi Kim, Jhoon Kim* and Hi Ku Cho

Department of Atmospheric Science, Yonsei University, Seoul, Korea

(Manuscript received 11 August 2007; in final form 26 January 2008)

Abstract

The cloud amount, one of the basic parameter in atmospheric observation, have been observed by naked eyes of observers, which is affected by the subjective view. In order to ensure reliable and objective observation, a new algorithm to retrieve cloud amount was constructed using true color images composed of red, green and blue (RGB). The true color image is obtained by the Skyview, an all-sky imager taking pictures of sky, at the Science Building of Yonsei University, Seoul for a year in 2006. The principle of distinguishing clear sky from cloudy sky lies in the fact that the spectral characteristics of light scattering is different for air molecules and cloud. The result of Skyview's algorithm showed about 77% agreement between the observed cloud amount and the calculated, for the error range, the difference between calculated and observed cloudiness, within ± 2 . Seasonally, the best accuracy of about 83% was obtained within ± 2 range in summer when the cloud amounts are higher, thus better signal-to-noise ratio. Furthermore, as the sky turbidity increased, the error also increased because of increased scattering which can explain the large error in spring. The algorithm still need to be improved in classifying sky condition more systematically with other complimentary instruments to discriminate thin cloud from haze to reduce errors in detecting clouds.

Key words: cloudiness, sky imager, objective algorithm, aerosol optical depth

1. 서 론

구름은 기상 현상에 있어 강수 뿐 아니라 대기 복사 수지에도 영향을 미치는 중요한 기후 요소이다. 세계 기상 기구 (World Meteorological Organisation, WMO) 보고서 (Kerr *et al.*, 2003)는 지표에 도달하는 자외선 입사량의 변화에 구름이 미치는 영향을 비중 있게 다루

었으며, 대기 중 에어로솔의 직 · 간접적인 영향은 구름의 형성과 밀접한 관련을 이루고 있어 (Twomey, 1977) 기후 변화 요소로서 주목 받고 있다.

이렇듯 구름에 대한 중요성과 늘어나는 관심으로 인해 수많은 연구가 시도 되었으나, 그 이해 정도는 아직 까지 다른 요소들에 비해 부족한 편이다. 복사 수지와 운량에 대한 일련의 연구는 매개변수화된 구름을 필요로 하는데, 이에 지속적이고 정확도 높으며 객관적인 구름 관측 자료의 구축은 현업이나 연구에 있어 필수적이다. 그러나 현재 관측은 관측자의 목적으로 수행되어 주관적인 판단을 배제할 수 없어 개인 차이에 의한 이질성이 발생하며, 시간적 · 공간적으로 제한이 있다 (Sutter *et al.*, 2004).

그리하여 이를 대체하고 자동으로 운량을 관측하고자 하는 연구가 끊임없이 요구되어 왔다. 대표적인 장

*Corresponding Author: Jhoon Kim, Rm. 545, Global Environment Laboratory Department of Atmospheric Sciences College of Science, Yonsei University 134 Sinchon-dong, Seodaemun-gu Seoul 120-749, Rep. of Korea.

Phone : +82-2-2123-5682, Fax : +82-2-365-5163

E-mail: jkim2@yonsei.ac.kr

비는 인공위성에 탑재된 영상기 (imager)로서 복사에너지를 이용하여 특정 파장과 물질의 상호 과정 (흡수, 산란, 방출)에 따른 정보를 얻고 이를 구름과 구분하는데 사용한다. 단파 채널로 반사도를 구분하여 구름을 탐지하거나, 물체에서 방출되는 장파 복사의 온도를 통해 구름의 유무와 고도, 유형도 더불어 알 수 있다. 이 방법은 지구를 원거리 대기 상공에서 관측하므로 지상 관측 방법과 다르게 동 시간에 넓은 면적의 자료를 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 지표에 쌓인 눈, 안개가 있는 지역은 단일 채널로는 이 둘을 구분하기 어렵다. 또 해상도가 넓어서 국지적인 운량 산출에 어렵고, 지표가 다양한 표면 상태로 인해 복잡한 반사도를 가지므로 오차가 크게 발생하는 단점이 있다. 이러한 문제점들로 인해 인공위성은 높은 활용도에도 불구하고 아직까지 구름을 탐지하는 일은 그 정확도와 해상도 부분에서 목측을 대신하기에는 불충분하다고 Sutter *et al.* (2004)와 Feister *et al.* (2000)은 밝히고 있다.

그러므로 지상에서의 운량 자동 관측법의 개발은 현재의 목측을 대신하고 위성의 한계를 보충하기 위해 필요하다. 이 연구에서는 현재 가장 활발히 연구되고 있고 일부 현업에서 기상정보로 제공되는 방법 중 하나인 전천사진을 통한 자동 운량 분석 방법을 시도하였다. 전천카메라가 고정된 장소에서 계획된 시간 마다 일정 범위의 전천사진을 찍으므로 이를 통해 얻은 자료는 균일하고 안정성을 갖는 장점이 있다. 또 카메라에서 측정된 에너지의 절대값에 의존하지 않고 파장별 비율을 사용하기 때문에 절대보정 (absolute calibration)이 필요 없어, 어떤 컬러카메라에도 적용가능하다.

전천 영상을 이용한 운량 분석은 디지털 카메라와 저장 매체들과 같은 일련의 장비들의 성능 향상과 지속된 개발 때문에 가능할 수 있었다. 기존의 은염 필름을 쓰는 카메라를 장착한 장비는 그 속도가 느리고, 자료의 수집 도중 질이 낮아지거나 자료가 소실되는 경우가 많았다. 그러나 최근에 출시되는 천공 사진기는 대부분 CCD (charged device coupled)를 사용하여 렌즈로부터 들어오는 빛을 전자로 변환시키기 때문에 쉽게 기록, 저장, 전송하는 기능을 수행할 수 있다. 초기 모델이 사진에서 구름이 천공에 대해 상대적으로 보이는 양을 주관적으로 기록하기 위해 사용되었다면 (Borkowski *et al.*, 1977; Schafer *et al.*, 1996) 이후 태양을 가리는 장비의 개발로 화소의 밝기나 적색 명암의 구분을 통해 구름 관측이 실시되었다 (Goodman *et al.*, 1998; Wooldridge, 1993; Davis *et al.*, 1992). 태양 중심 전천 카

메라 시스템 (sun-centered sky camera (SCSC) system)과 같은 장비는 전천 영상을 찍으면서 동시에 복사계를 이용한 태양복사 에너지 관측도 가능하며 (Sabburg and Wong, 1997) Whole Sky Image (WSI, the University of California, San Diego's Marine Physical Laboratory)와 Total Sky Imager (TSI, Yankee Environment System 사)들은 대기 복사 측정 (Atmospheric Radiation Measurement, ARM)에서 사용 중이다.

본 연구는 서울 중심부에 위치한 연세대학교에 설치된 전천 사진기 Skyview (Prede 사, 모델 PCV-100e)를 이용하여 자동 운량 계산 알고리즘을 개발하고 그 결과의 정확도를 분석하였다. 아직까지 Skyview 자체의 운량 알고리즘은 개발되지 않았고 그 이용은 각종 사례별 분석에서 하늘의 상태를 보여주는 근거로 제시되는 수준으로 한정되어 있다. 그래서 이번 연구에서는 Skyview를 위한 자동 운량 계산 프로그램을 만들기 위해서 과거 연구와 타 천공 사진기들의 알고리즘의 이론을 응용하였고, 불충분한 부분은 일련의 사진 분석 과정을 통해 새롭게 알고리즘을 보완 개발하였다. 알고리즘의 성능 결과를 확인하기 위해서는 목측과 정량적인 비교를 실시하였으며 결과에 대한 오차 분석과 함께 알고리즘의 개선점들을 찾고 앞으로의 연구방향을 모색하였다. 본 연구에서 소개하는 알고리즘은, 어떤 전천 영상기에도 적용가능하며, 현재까지 국내에서 시도되지 않은 새로운 분야이고, 아직 개발 단계이기 때문에 약 1년의 초기결과를 보이고자 한다. 하지만 워낙 자동화에 대한 필요성이 매우 큰 분야이고 발달하는 관측 장비의 수준에 맞추어 보다 객관적인 알고리즘 구축은 매우 의미 있는 문제이므로, 향후 지속적인 알고리즘 개선과 정확도 향상을 위한 연구가 요구된다.

2. 측기 및 자료

Skyview PSC-100은 일정시간마다 하늘을 촬영하고, 그 영상을 JPEG 압축파일형식으로 PC에 자동적으로 저장하는 장치이다. 2005년 11월에 연세대학교 대기복사연구실에서 구입하여 이과대학 옥상에 설치된 이후 계속 작동하고 있다. Skyview의 실제 모습을 Fig. 1, 촬영된 사진이 컴퓨터에 저장되는 소프트웨어의 모습을 Fig. 2에 나타냈다. Skyview는 기본적으로 본체와 본체 정상부에 유리 돔, 그리고 돔에서 약 5센티미터 높이에 설치된 차폐판으로 이루어져 있다. 디지털 카메라 CCD (charge-coupled device)는 본체 정상부 유리 돔



Fig. 1. Skyview located on the roof of the Science Hall in Yonsei University.

안에 설치되어 하늘 방향으로 전천 사진을 찍는데 이때 유리 돔은 비나 눈 등의 습기로부터 카메라를 보호하고 곤충의 침입을 방해하는 역할을 한다. 차폐판은 태양을 따라 자동적으로 움직이면서 태양이 사진에 찍히는 것을 막는다. 차폐판으로 인해라 카메라 시야의 일부를 그 너비만큼 가리는 문제가 발생하지만 차폐판이 없을 경우 태양이 그대로 사진에 찍혀 과도한 반사의 유입이 생기기 때문에 이를 막기 위한 필수적인 구조물이라 할 수 있다.

카메라의 시야는 태양 천칭각 75° 이하의 범위로서 총 150°이며, 사진에는 천정의 모습이 원의 형태로 중앙에 자리하고 원 주변은 돔을 둘러싼 검은색 구조물의 일부와 함께 전체적으로 검게 찍힌다. 사진은 24 bit 천연색 영상이며 640×480 해상도를 갖는다. 적색 (687±63 nm), 녹색 (545±25 nm), 청색 (465±25 nm) (RGB) 세 종류의 명암은 혼합하여 명도를 조절하며 (가산혼합) 각각 0에서 255의 값을 가지므로 256×256×256의 합성을 통해 약 16만개의 색을 표현한다. Skyview 결과는 표준 RGB로 표현되어 JPG로 산출되므로 파장에 대한 특별한 센서는 존재하지 않는다. 하루 중 처음 사진을 찍는 시각과 마치는 시각, 찍는 간격은 임의로 조절할 수 있는데 연세대학교에서는 10분마다 촬영하도록 설정하였다.

사용한 자료는 2006년 1월1일부터 12월 31일 까지 일 년 간, 오전 8시부터 오후 5시까지 하루 10개 한 시간마다의 자료이며 총 3282개에 해당한다. 3개월씩 계절별로는 겨울 (12,1,2)월에 850개, 봄 (3,4,5)에 660개, 여름 (6,7,8)에 866개, 가을 (9,10,11)에 906개에 해당하



Fig. 2. The main software of Skyview and the stored pictures.

는 자료이다. 자료수가 일 년 전체에 못 미치는 이유는 4월 10일부터 19일까지 10일 간 전력 문제로 기계가 작동하지 않았으며, 4월 8일 같은 경우 황사가 무척 심해 목측으로도 구름을 판별하기 어려웠던 특수한 경우는 자료에서 제거하였기 때문이다.

자동 운량 계산 알고리즘을 통해 산출된 운량은 동일 시각에 연세대학교에서 동쪽으로 약 3 km 떨어진 기상청 기상관측소의 운량과 비교하였다. 목측은 숙련된 관측 전문가에 의해 이루어지나 주관적 관측에 의지한 값이다. 기상관측소의 운량은 구름이 없는 맑은 날을 0으로 두고 하늘이 구름으로 모두 덮이면 10으로 기입되기 때문에 백분율로 계산되는 운량 계산 알고리즘은 기상청의 값과 비교하기 위하여 기상청 기상관측값과 같은 기준으로 변환하였다.

3. 알고리즘

3.1 자동 운량 산출 알고리즘과 구름 분리 신호

기본적으로 Skyview 전천 사진이 하늘 영상을 구현하는 방법은 우리가 맨눈으로 하늘을 봤을 때 색을 구분하는 원리와 같다. 하늘이 파랗게 보이는 이유는 분자 산란이 발생할 때 가시 영역의 청색 파장이 두드러지기 때문인데 실제로 전천 사진을 읽으면 청색 명암이 크다. 이 때 이 화소의 청색을 적색으로 나누면 그 값 (R/B)은 작다. 이와 다르게 구름에서는 청색 파장은 물론 적색파장의 산란도 크게 늘어나므로 이 둘의 차이가 감소하여 구름의 R/B는 높다. Fig. 3는 구름이 없을 때

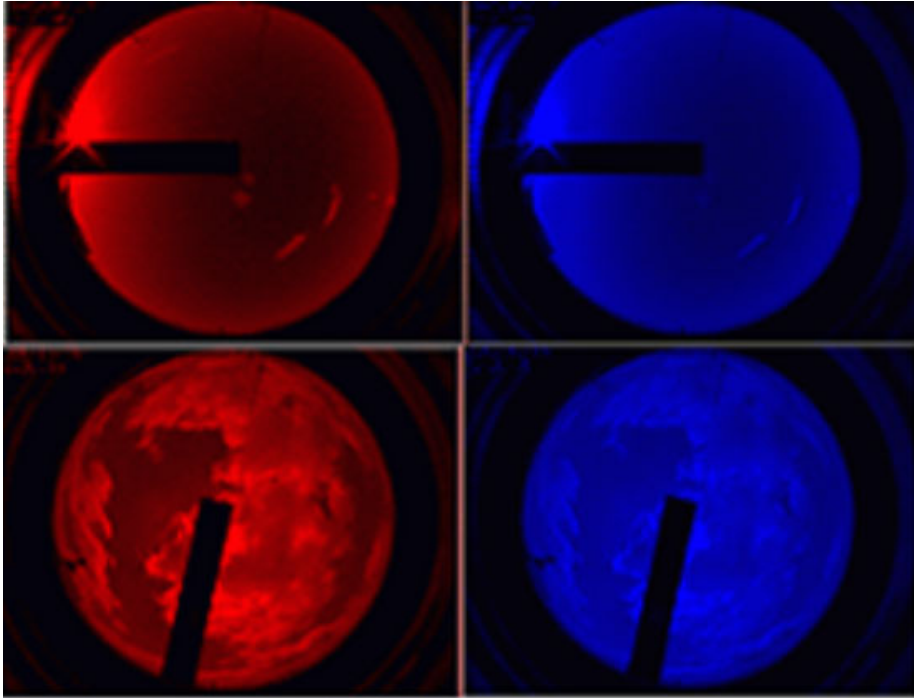


Fig. 3. Red images (left) of clear sky (upper) and cloudy sky (lower) and blue images (right) of the same.

(위)와 있을 때 (아래)의 전천 사진을 적색 명암만으로 (왼쪽), 청색 명암만으로 (오른쪽) 나타낸 것이다. Fig. 3의 적색 명암 사진을 살펴보면 적색 파장의 산란 정도가 맑은 하늘과 구름에서 크게 차이가 나므로 사진에서도 이 둘을 뚜렷하게 구분하여 표현한다. 반면, 청색 파장은 두 대기에서 산란되는 정도의 차이가 작기 때문에 청색 명암만으로 표현된 사진으로는 구름과 하늘을 구분하기 힘들다. 즉 구름을 나타내는 화소는 R/B가 크고, 맑은 하늘의 화소는 R/B가 작게 나타나므로 이러한 특성을 통해 하늘의 물체를 구분할 수 있는 일종의 신호로 사용할 수 있었다.

이 방법은 전천 사진에서 구름을 식별하는데 쓸 수 있는 경험적 분석 방법의 일부로서 많은 시도들 가운데 하나이다. 특히 적색 파장의 산란 정도에 따른 명암의 뚜렷한 변화 때문에 단색 분석에 대한 시도가 가능하다. 하지만 이는 단색의 밝기에만 의존하므로 영상을 식별하는데 있어 세 가지 색을 혼합하였을 때의 경우의 수보다 한정 된다. 또한 투과도가 높은 적색 파장은 태양천정각의 위치에 따라 대기 경로를 통과하는데 산란 정도가 달라지므로 모든 영상에 대한 일반적인 경계값을 설정하기가 어렵다. 이러한 한계들을 고려하여 이

연구는 R/B 값에 따른 물체 구분과 세 가지 색의 합성 방법을 사용하였다.

이 연구에서는 지상에서 바라본 반구의 운량과 상공에서 지상을 보고 관측하는 평행 대기의 운량과의 차이에 대한 연구는 시도하지 않았다. 이에 관련한 연구는 Goodman and Henderson-Sellers (1988)이나 Kassianov *et al.* (2005)에서 분석된 바 있는데, 두 운량 분석의 차이는 반구의 시야에서 발생하는 어안렌즈 왜곡현상 때문이다 (5.2절 참조). 이 때문에 지상 관측값을 상공 관측값으로 변환시키기 위해 식을 유도한 연구가 진행되고 있으며 이에 필요한 구름의 고도 정보가 주어진다면 지상에서 평행 대기의 운량으로 산출하는 방법도 차후 가능할 것으로 예측된다.

Fig. 4에 구름이 낀 날 (아래)과 맑은 날 (위)을 일례로 들어 화소의 세 가지 색의 명암의 변화와 R/B의 변화를 나타냈다. 색상은 지정된 9개 화소의 평균값이고 그래프의 가로축은 하루 동안의 시간 변화로서 관측 시간 동안 운량이 변하지 않았던 날을 예로 들었다. 가운데 그래프에서 알 수 있듯이 맑은 날의 값은 청색이 두 색에 비해 일정하게 높은 값을 나타내고 있음을 보여준다. 이에 반해 구름 낀 날의 것은 적색과 녹색의 명암이

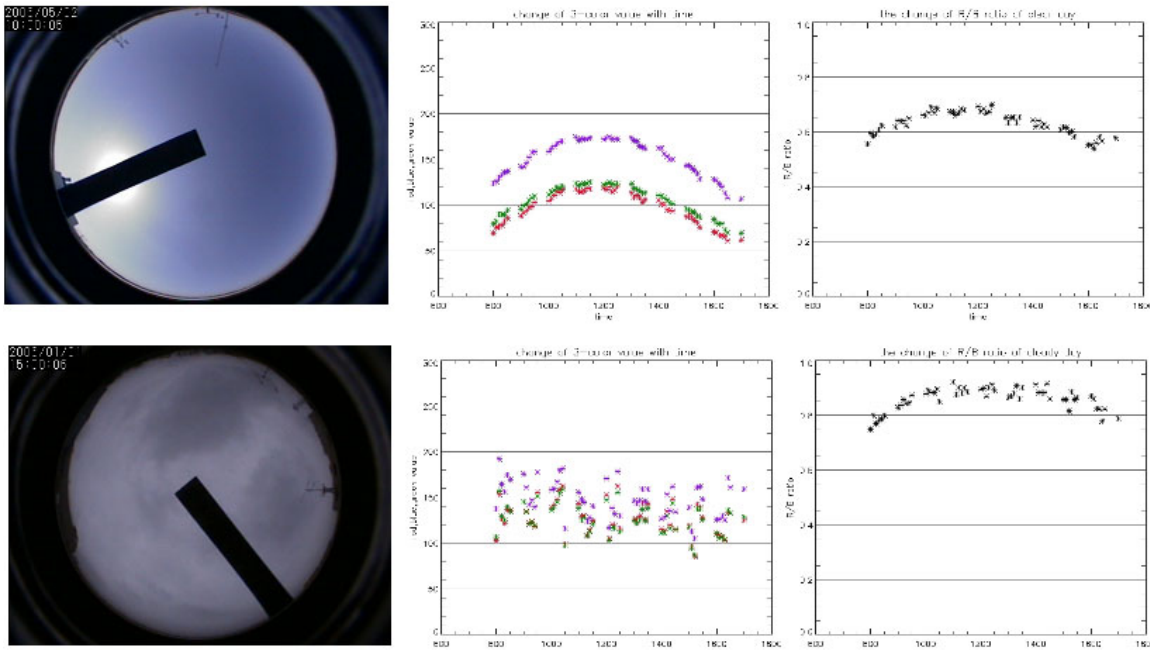


Fig. 4. the images (left) of clear sky (upper) cloudy sky (lower). The time series of the each 3 color pixel and those of the between Red pixel and Blue one.

크게 늘어나 세 색들 간의 명암 차이가 크게 줄었다. 두 대기 상태의 R/B를 구한 결과 맑은 하늘의 것은 약 0.63로 나타났고 구름은 약 0.86 이었다. 이 값은 그 날의 조도나 대기의 투명도에 따라 변하기 때문에 구름을 구분하는 절대적인 수치로 볼 수 없지만 구름과 맑은 하늘을 구분하기에는 충분하다고 할 수 있다.

3.2 운량 계산

운량은 구형의 1에서 전천 화면 면적에서 푸른 하늘의 면적의 비를 뺀 나머지의 백분율로 나타낸다. 면적은 관심 영역의 화소의 개수로 구한다.

$$\text{cloud (\%)} = 100 \left(1 - \frac{N_{\text{bluesky}}}{N_{\text{wholesky}}} \right) \quad (1)$$

N_{bluesky} 는 푸른 하늘 화소의 개수를 의미하고, N_{wholesky} 는 화면에 보이는 둥근 전천 면적의 화소를 의미한다. 운량의 면적 대신 푸른 하늘 면적의 화소를 계산하는 이유는 구름에 대한 경계값보다 푸른 하늘에 대한 경계값 설정이 더 용이하고 안정적인 경험적 분석에 의한 것이다. 구름의 화소는 같은 구름인 경우에도 조도나 두께에 따라 그 값이 매우 가변적이고 전천 화면

에서는 구름 외에도 구름으로 오인할 만한 현상들이 종종 발생하므로 구름과 이들을 분리하는 과정은 추가로 진행된다. 이 내용은 3.3.2 절에서 다루어질 것이다.

3.3 구름 외 현상의 제거

3.3.1 반사 제거 알고리즘

전천 사진의 일부는 구름이 아님에도 밝게 보여서 높은 R/B 값을 갖는 화소들이 존재한다. 이는 태양의 직달광이 사진에 직접 찍히거나 돤에 반사될 때, 또는 구름의 가장자리나 연무가 있을 때 빛이 반사되는 경우로 나타났다. 태양의 직달광이 사진에 찍히는 것은 차폐판이 태양과 태양 주위의 강한 직달광을 가릴 만큼 충분한 면적을 가지지 못하기 때문이다. 이러한 태양 직달광은 전천 사진에서 흰색으로 나타나고 R/B 값도 높게 나타난다.

이를 구름과 구분하기 위해서는 우선 대기의 상태에 따라 푸른 하늘에 대한 경계값을 유연하게 설정해야 한다. 대기에 부유물질이 적어 푸르게 보이는 하늘은 상대적으로 강한 직달광이 비추고 하늘색 또한 짙다. 이때에는 구름과 푸른 하늘의 R/B 값의 차이가 크기 때문에 일반적인 푸른 하늘의 경계값보다 낮추어 제한을 둔

다. 그러나 연무 등으로 인해 전체적으로 하늘이 뿌연 대기는 일반적인 푸른 하늘의 경계값에 해당되지 않기 때문에 R/B의 값을 높게 많은 면적을 푸른 하늘에 포함 시킨다. 그리고 후에 구름과 반사된 화소의 구분하기 위한 알고리즘을 통해 이들을 분리 한다.

대기의 상태를 결정하고 구름과 연무를 구분 하는 데는 화소들 간의 표준편차나 구름과 반사 사이에 있는 R/B 값의 차이로 결정하였다. 전천 영상에서 표준편차가 크다는 것은 대기 중에 다양한 상태가 공존하는 것이다. 위에서 언급된 구름이나 반사 또는 연무 등이 대기에 함께 존재하면 균질성에 따른 차이가 있다고 판단 되므로 이를 통해 상태를 구분하게 된다.

먼저 둥근 전천 영역만을 선택하여야 하는데 이는 0

Table 1. The conversion table of percent into 11 class of the cloud amount.

Skyview cloud fraction	Tenth
< 5	0
5 ~ 15	1
15 ~ 25	2
25 ~ 35	3
35 ~ 45	4
45 ~ 55	5
55 ~ 65	6
65 ~ 75	7
75 ~ 85	8
85 ~ 95	9
≥ 95	10

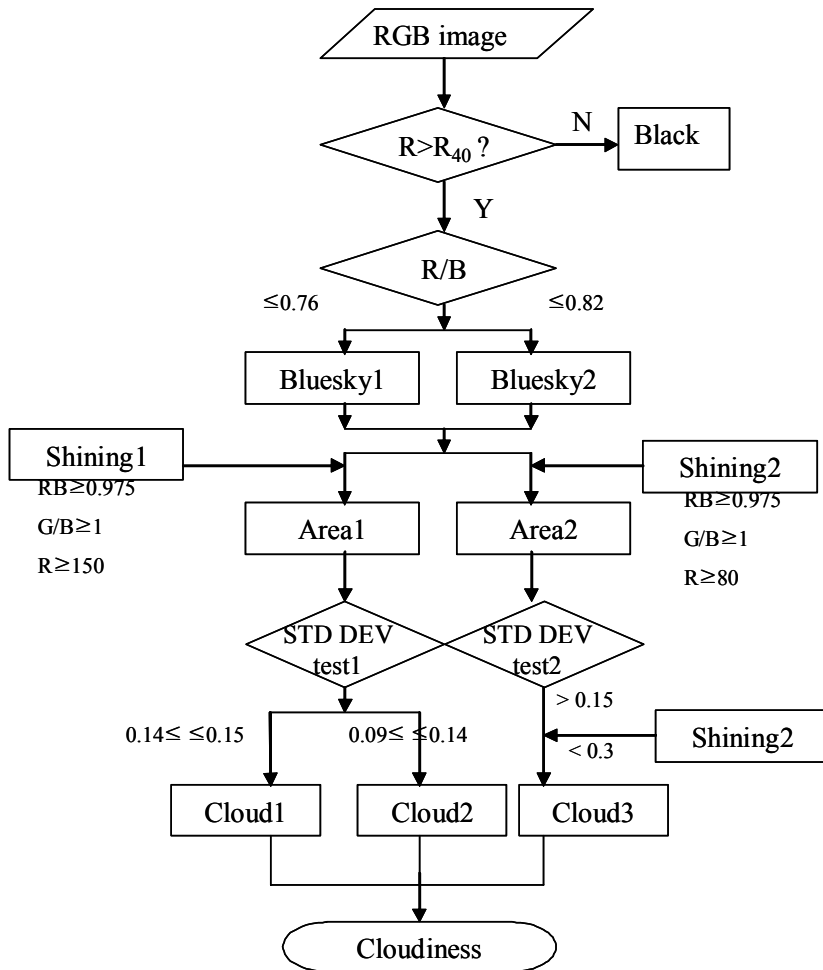


Fig. 5. The automatic algorithm for calculating cloudiness. 'Bluesky' means default of clear pixel, 'Shining' means that of reflected pixel, 'Area' means interest area subtracted reflected pixel. According to standard deviation, 'STD DEV test', cloudiness is determined.

에서 255 사이의 명암 크기 중에서 적색 명암이 40이상 되는 화소로 설정하면 쉽게 분리할 수 있다. 이들 화소들 간의 표준편차는 전천 영역 안의 모든 화소에 대한 전체적인 변형 정도를 식별하는 기준이 된다. 결과 청정 대기는 직달광에 의한 오염이 심해지면 R/B가 구름 조건에 있는 화소의 개수는 크지 않으나 푸른 하늘과 직달광 영역의 대비가 크기 때문에 일반 대기보다 표준편차가 큰 것으로 나타났다. 이때에는 직달광을 제거하는데 초점을 둔 알고리즘을 사용하였는데 이를 ‘반사제거 알고리즘’으로 명칭 하였다. 참고로 반사 제거 알고리즘은 위에 예로 든 직달광이 강할 때 외에도 옅은 구름의 민감한 변화를 감지할 때도 쓰인다. 반사 제거 알고리즘은 푸른 하늘과 뚜렷히 구분되는 구름과 구름 외 현상들을 분리하여서 전체 면적에서 제거하는데 목적이 있다.

직달광과 구름의 화소는 그 동안 사용하지 않던 녹색의 명암으로 구분하였다. 여러 전천 사진들을 판독한 결과 전천 사진의 거의 모든 화소는 녹색이 적색보다 높은 값을 가졌다 (Fig. 4 참고). 그러나 구름에서는 적색의 산란이 크게 증가하므로 두 색의 차이가 거의 없거나 같은 값을 나타냈고 반사 및 직달광의 화소에서는 녹색 명암이 컸다. 푸른 하늘은 기본적으로 단색 이미지 값들이 낮기 때문에 이 알고리즘에서는 적색 카운트 175를 기준으로 반사와 구분이 가능하다. 또 반사와 직달광 영역은 세 색의 명암이 모두 200을 넘는 경우가 많으므로 이 또한 경계조건에 포함하였다.

3.3.2 구름 중심 알고리즘

표준 편차는 연무나 박무의 경우와 구름을 구분하는 경우에도 사용된다. 본래 목측에서도 부유물질에 의해 산란이 심해지는 연무와 구름을 구분하는 일은 쉽지 않다. 더욱이 본 연구에서와 같이 2차원 평면의 결과물만을 가지고 분석할 때는 입체적인 연직 구조를 참고할 수 없기 때문에 절대적으로 불리하다. 그럼에도 불구하고 이 둘을 분류하기 위해 사용한 방법은 일부 면적의 표준편차를 구해서 비교하였다. 연무는 하늘 전체에서 빛의 산란이 발생하는 상태이므로 R/B의 표준편차만 본다면 구름에 비해 균일하다. 이에 반해 구름은 운량 10이어서 하늘을 모두 덮지 않는 한 연무와 같이 빛의 분배가 균일하게 이루어지지 않으므로 균질성 면에서 연무와 다르게 된다. 만약 구름이 10이어서 균질성이 낮다면 이때는 구름에 의해 반사된 면적이 작게 되므로 연무와 구분할 수 있다.

4. 산출 결과

자동 운량 계산 알고리즘으로 구한 Skyview의 운량 값은 기상청에서 관측한 목측 자료와 직접 비교하고 그 신뢰도를 평가하기 위하여 두 값의 차이를 운량 분석 결과의 정확도를 나타내는 지표로 설정하였다. 현재 지상에서 이루어지는 운량 관측은 기상청에서 실시하는 목측이 유일하기도 하지만 전문인에 의해 실시된 것이고 사진과 같이 정각에 관측되는 값이기 때문에 비교 가능하다고 판단된다. 지표의 절대값이 작을수록 계산 값이 목측을 잘 반영한다는 것을 의미한다.

Fig. 6은 그 결과로 계산운량과 관측운량 사이의 차이 값을 전체 자료수의 백분율로 표시한 것이다. 운량 차이가 없는 절대 값 0에서 36%의 가장 높은 확률 76.4%로 나타났다. 전체적으로는 오차 0의 우측에 더 많은 횟수가 분포하여, Skyview에 의한 관측이 육안관측보다 많은 운량을 보이는 경향이 있다. 목측에서 관찰자의 판단에 따라 운량 결정이 다르고 관측 시간과 장소의 불일치를 감안한다면 비교적 잘 들어맞는 결과라고 판단된다.

Fig. 7은 계산값에 대한 운량값을 산포도로 나타낸 것으로 일치하는 자료의 개수가 가장 많았던 경우를 1로 두고 (운량 계산의 결과가 계산 값 10, 관측 값 10일 때) 나머지 운량의 자료는 상대적인 크기와 색으로 표현하였다. 결과에 따르면 목측의 결과가 운량 0과 10일 때 일치 확률이 높은 반면 절대값 8이상의 높은 오차 (목측이 맑게 관측되고 계산이 운량 8이상으로 관측된 부분이나 그 반대)를 나타내는 영역이 존재하여 이 부

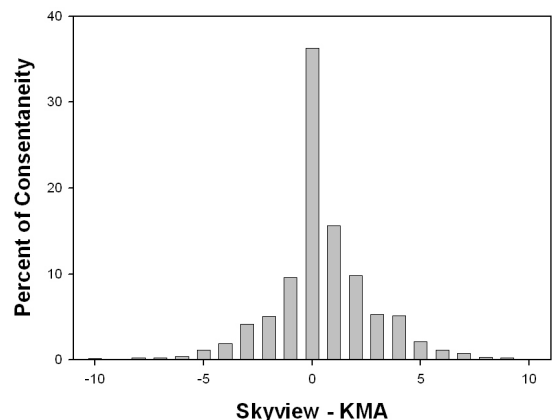


Fig. 6. The distribution of occurrence probability of the difference between the calculated cloud amount and observed cloud amount.

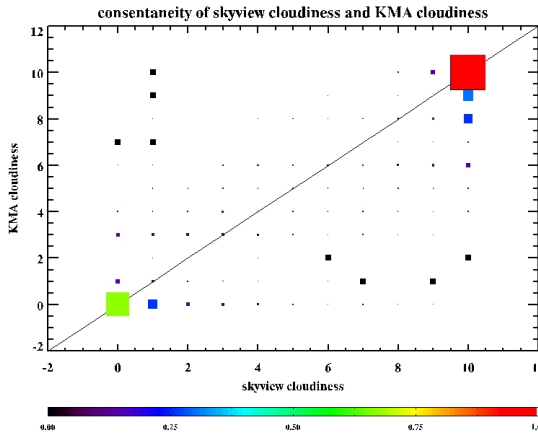


Fig. 7. The comparison of the calculated cloud amount from Skyview algorithm to the observed cloud amount from KMA.

분이 정확도를 떨어뜨리는 주요한 원인이 되고 있는 것도 확인할 수 있다. 이러한 오차가 발생한 원인은 다음의 장에서 살펴보았다.

4.1 계절에 따른 결과 분석 및 오차

Fig. 6의 전반적인 정확도를 계절별로 분류하고 Fig. 8에 나타냈다. 계절별 분류한 이유는 우리나라의 사계절은 뚜렷하기 때문에 날씨만큼이나 하늘 상태 또한 일정한 패턴을 보이며 변화할 것이라 예측되기 때문이다. 계절별 정확도의 차이를 분석하고 하늘 특성에 따른 경계값의 설정을 하도록 근거를 찾는 것이 목적이다.

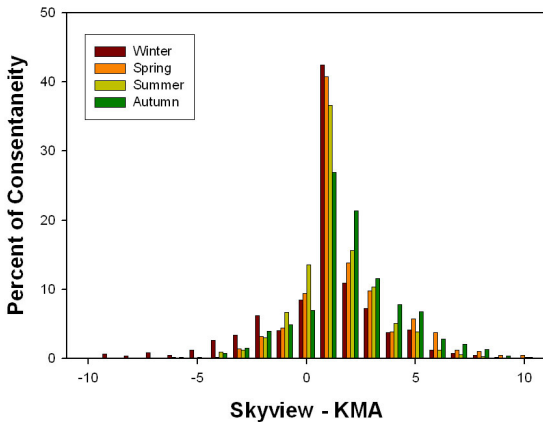


Fig. 8. The seasonal distribution of occurrence probability of the difference between the calculated and observed cloud amount.

Table 2. The seasonal probability of agreement between the calculated and the observed cloud amount.

	winter	spring	summer	autumn	mean
-2	4.1	4.4	6.7	4.9	5.3
-1	8.5	9.4	13.6	7	9.8
0	42.5	40.8	36.6	26.9	36.4
1	10.9	14	15.6	21.4	16
2	7.3	9.8	10.4	11.6	9.8
sum	73.3	78.3	82.9	71.8	76.6

Fig. 8의 결과에 따르면 관측 값과 계산 값 일치 정도는 계절마다 달라지고 있음을 확인할 수 있다. 네 계절 모두 계산 값과 관측 값의 차이가 절대 값 0일 때가 가장 높은 확률로 나타나고 있는데 계절마다 각각 겨울이 약 42%, 봄은 약 41%, 여름은 37%, 가을은 약 27%로 나타났다. 오차허용범위를 넓히면 (절대 값 2 이내) 여름이 약 83%의 일치를 보이며 가장 높은 값을 보였고 봄, 겨울, 가을의 순서를 보였다. 즉 여름의 경우는 자료의 약 83%가 신뢰 값에 들어감으로써 오차 2 내에서는 비교적 안정된 결과를 내고 있다. 이를 정리한 Table 2를 보면, 정확도는 신뢰구간에서 보충, 또는 감소되고 있다. 이는 일정 구름 패턴에 대한 알고리즘의 반응 정도 차이에 의한 것으로 예상되며 5.1에서 이에 대한 분석을 하였다.

5. 분석 및 토의

5.1 계절 변동과 알고리즘

앞선 알고리즘 절에서 설명했듯이 Skyview의 자동 운량 계산 프로그램은 맑은 하늘과 구름을 구분하고, 또한 반사와 구름을 구분하기 위해 하늘의 혼탁정도에 따라 각기 다른 경계 값을 설정하여 계산하였다. 대체적으로 맑은 날에는 직달광선에 의한 반사가 강해지므로 이를 천공영역에서 제거하여 구름 경계 안에 들어가지 않도록 알고리즘을 구성하였고, 구름이 많은 영상은 정확한 운량의 산출에 초점을 두었다. 결국 하늘상태는 계절마다 일정한 경향을 가지므로 알고리즘은 계절에 따라 구분하여 각기 사용하게 된다. 본 연구에서는 겨울과 봄의 전천 영상에 대해 반사 제거 중심 알고리즘을 쓰고 여름과 가을에는 구름 중심 알고리즘을 사용하였다. 여기서 중심 알고리즘이란 운량 계산에 기본적으로 반사제거와 구름 구분 과정이 들어있지만 하늘의 상태에 따라 이 둘의 사용 비율을 조절 한 것임을 의미한다.

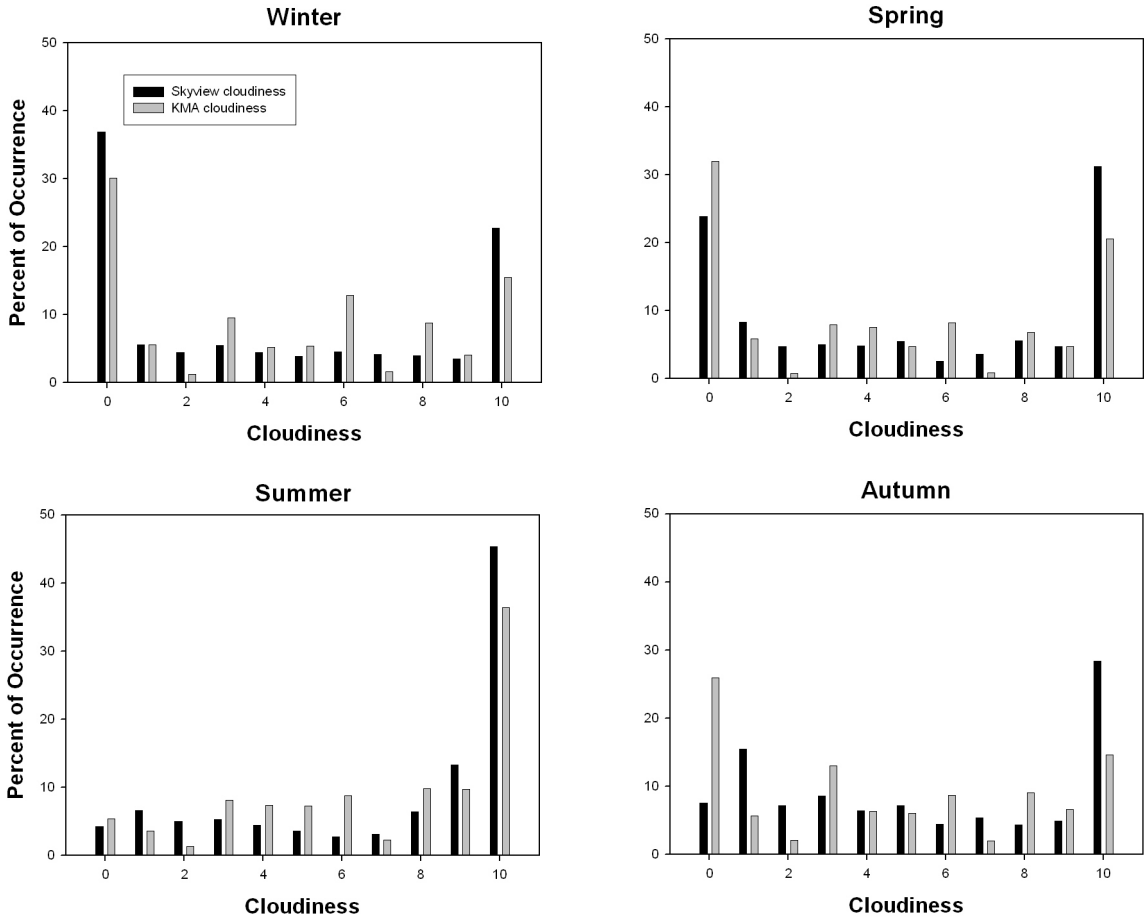


Fig. 9. The percent of occurrence of cloudiness from Skyview (dark bar) and KMA (light bar), for different seasons.

대기 중에 부유물이 상대적으로 많은 봄에 대해서 겨울과 같이 반사제거 알고리즘을 쓰는 것이 논리적으로 맞지 않음에도 사용하게 된 것은 두 알고리즘을 모두 적용하여 나온 결과를 비교하였을 때 더 높은 일치도를 보인 알고리즘을 선정하였기 때문이다. 겨울과 봄은 반사제거 중심 알고리즘을 쓸 때 구름 중심 알고리즘의 결과보다 각각 1.2%, 2% 두 운량의 일치도가 높게 나타났고, 여름과 가을은 구름 중심 알고리즘을 사용할 때 약 0.46%, 2.5% 높았다.

이렇게 계산한 운량은 관측 운량과 함께 발생 확률을 계절별로 분리해 Fig. 9에 나타냈다. 가장 두드러지는 운량은 맑은 날과 (운량 0) 구름이 천공을 모두 덮은 날 (운량 10)로 모든 계절에서 발생할 확률이 높았다. 관측값에 따르면 겨울과 봄에 운량 0인 하늘 상태가 많이 나타난 반면, 여름에는 비구름을 동반하는 날씨의

영향으로 운량이 늘어나 운량 10이 자주 나타났으며 Skyview 알고리즘의 산출 결과도 기상청의 목측 경향과 비슷하게 나타났다. 그러나 계절마다 이 두 운량들에 대한 계산값의 관측값에 대한 일치 정도는 달랐다. 겨울과 여름에 비해 봄과 가을에 이 두 운량에 대한 일치 정도가 떨어졌고 특히 가을에는 두 운량에 대한 계산값의 경향이 크게 벗어나고 있는 것을 확인하였다. 이를 5.2절과 5.3절의 오차 분석에서 다루었다.

5.2 운량에 따른 결과

Fig. 10은 기상관측소의 목측 운량이 발생할 확률과 신뢰도 범위 안에 계산값과 일치할 확률이다. 운량 2이하이거나 8이상일 때 운량 3이상 7이하일 때보다 두 배 정도 좋은 값을 나타낸다. 목측 운량이 10일 때 Skyview

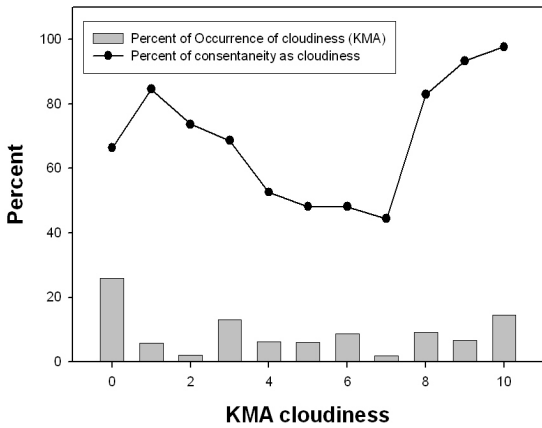


Fig. 10. The probability distribution of the occurrence of cloudiness (bar) and the degree of agreement in percentage (solid line with dots).

의 계산 값은 약 98%가 일치해 가장 높은 값을 가졌고 운량 7일 때 약 44%의 일치함을 보여 가장 낮은 값을 나타냈다. 이는 구름 없는 맑은 영상과 구름으로 덮인 영상은 중간량의 구름에 비해서 비교적 운량계산이 뚜렷하기 때문으로 분석된다. 구름 산출 과정에서 구름이 없을 때에는 반사된 부분만 제거하면 되므로 구름과 혼동되는 일이 없어져 정확도가 높아지고, 구름으로 덮인 경우는 대부분의 경우가 경계값 분리만으로 잘 맞으므로 좋은 결과가 나오게 된다.

위 결과를 근거로 하면 가을에 운량 산출 정확도가 떨어지는 이유도 설명할 수 있다. 가을에 중간량의 구름이 발생할 확률은 36%로 가을을 제외한 다른 계절들 보다 평균 3.4% 가량 높다. 이를 개선하기 위해서는 운량을 정확히 계산하는 동시에 반사 지역을 구름과 분리시키는 정밀한 작업이 요구된다. 하지만 이들 구름은 개인별 시각 차이에 의해 일치되는 확률이 떨어질 것이라 예상되기 때문에 이때의 정확도를 높이는 일은 매우 어렵다.

5.3 대기 혼탁도의 영향

Fig. 10에서 가을과 함께 오차가 두드러지는 계절은 봄이다. 다른 계절과 달리 정확도가 높다고 여겨지는 운량 0과 10에 대해서도 낮은 정확도를 보이고 있다. 이는 앞선 Fig. 7의 산포도에서 오차가 크게 발생하여 확인되었던 부분이다. Skyview의 이미지 확인 결과 이러한 오차가 나타날 때의 하늘 상태는 대기에 연무가 끼

거나 얇은 구름이 천공을 덮어 구름의 유무를 판단하기 힘든 상태로 드러났다. 대기에 부유물질이 증가해 혼탁도가 커지고 입사하는 태양 복사 휘도를 크게 산란시키면 Skyview의 결과가 목측과 달라지거나 심하면 아예 상반되는 결과를 냈다. 예를 들어 태양주위에 연무가 발생하면 구름으로 오인하여 운량을 9이상씩 높게 산출했고, 반대로 얇은 권운이나 층운이 덮인 경우에는 지표면에 입사하는 일사량에 큰 차이가 나지 않으면서 반사된 부분이 함께 존재해 Skyview의 2차원 이미지 분석만으로는 구분하기 어려워진다. 이렇게 연무와 얇은 구름일 때 생기는 오차는 크기가 크다는 특징이 있다. 즉 연무임에도 구름으로 덮인 것으로 산출하여 구름 10으로 결과를 낸다거나 얇은 구름은 반사된 부분을 제거하면서 과감히 구름도 제거되는 경우가 생겨 구름이 적게 산출되는 것이다.

연무가 구름을 과하게 산출하게 되는 원인이 된다는 현상을 확인하기 위해 앞서 보인 Figure 7에 대해서 각 오차에 해당하는 시각의 에어러솔 광학 깊이 (Aerosol Optical Depth, AOD)를 평균하여 Fig. 11에 함께 나타내었다. AOD는 같은 장소에 설치된 Skyradiometer (PREDE, POM-02)로 산출된 결과로서 구름의 효과를 제거한 500nm에서의 AOD를 표시하였다.

Fig. 11는 오차가 양수일 때 (Skyview의 운량이 과하게 산출되었을 때) 오차가 점차 커질수록 AOD도 높음을 보였다. 운량 오차가 10일 때 AOD의 값이 낮아진 것은 자료 개수가 충분치 않아 발생한 오차라고 여겨지므로 이를 제외하고는 전반적으로 운량 오차와 AOD는 양의 상관 관계를 보였다. 즉, 오차에 대기 중의 부유물질이 영상에 직접적으로 영향을 미쳐 에어러솔에 의한

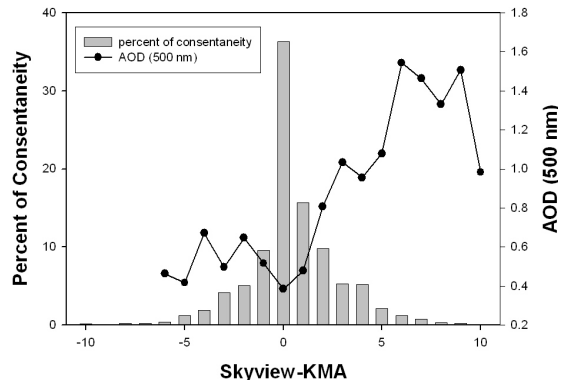


Fig. 11. The distribution of occurrence probability of the difference between the retrieved and observed cloud amount (bar), AOD observed from Skyradiometer at the same location.

산란 효과가 구름에 의한 오염만큼 시각적 혼돈을 준다는 사실을 알 수 있다. 특히 대기의 에어러솔이 많은 경우, 국지적인 응결과 결합한 구름과 달리 에어러솔은 전 하늘을 덮기 때문에 영상으로 보면 전체 푸른 화소가 오염되어 큰 오차를 양산하는 원인이 되고 있었다. 이와는 달리 구름이 과소 측정된 경우의 AOD 정보는 과대 측정된 경우보다 전체적으로 낮은 AOD를 보였으나 뚜렷한 경향은 갖지 않으므로 이는 다른 원인으로 고려되어야 한다. 즉, 대기 중 에어러솔이 있는 경우, Skyview가 구름으로 오인하는 확률이 높아진다. 이러한 전천 영상에 대해서 연무와 에어러솔을 구름과 구분하는 정밀한 알고리즘이 개발되어야 하겠지만 이를 위해서는 현재의 시각적 구분은 한계가 있기 때문에 가시 파장 외의 다른 파장 (예: 적외선)의 영상기의 동시 활용이나 입자의 성분 분석과 같은 다른 성격의 연구가 병행되어야 할 것으로 보인다.

이와는 반대로 하늘에 부유물질이 적어서 하늘이 짙은 청색을 띠는 경우는 구름이 같이 있을 때 반사와 구름을 동시에 고려해야 하기 때문에 정확히 운량을 산출하기가 어렵다. 가을이 이에 해당되는데 가을은 Fig. 10 결과처럼 운량 0을 비롯한 맑은 대기 상태가 나타날 확률이 크기 때문에 반사제거 중심 알고리즘을 사용하는 것이 합리적일 수 있다. 그러나 여유 있는 경계값 설정 때문에 중간량의 구름은 탐지되지 못하고 과소평가되는 문제가 생겼고, 그로 인해 전체 자료의 일치도율도 낮아지는 결과를 낳았다. 청명한 가을 하늘이 나타나는 확률이 높긴 하지만 구름 또한 발생하는 확률이 크다는 것을 간과할 수 없기 때문에 구름 중심 알고리즘을 사용한 것이다. 그렇다보니 동시에 강한 태양빛을 갖는 가을은 반사도도 커지게 되어 하늘에 구름이 같이 존재하면, 구름에서의 산란이 발생해 구름과 함께 더욱 강한 반사, 산란 작용이 일어나게 되므로 이때 오차가 발생하게 되었다. 이 또한 반사와 구름 둘 중 하나를 중심으로 짜여진 알고리즘으로 인해 한쪽에 뚜렷한 경향을 가지지 못해 정확도가 떨어지는 경우라 할 수 있다.

5.4 관측 시야의 설정과 곡률효과

자동 운량 분석 결과가 관측값과 일치하지 않는 데에는 관측자의 주관적 판단의 차이에도 기인한다. 목적의 경우도 관측 범위가 Skyview와 촬영가능 범위와 다르다면 관측되는 구름의 포함 여부를 결정하는데 큰 영향을 주게 될 것이다. 현재 Skyview의 시야는 천정각 75도 이내에 해당 된다. 만약 목적으로 고도각 15도 이하에

존재하는 구름을 운량 계산에 포함시킨다면 Skyview의 계산된 운량은 목적과 다른 결과를 낳게 될 것이다.

또한 Skyview가 한 곳에 고정되어 있기 때문에 일정한 영역을 촬영하는 점은 좋은 장점이라고 할 수 있겠으나 지표에서 반구의 하늘을 쳐다보며 발생하게 되는 곡률 효과는 일부 구름의 변형을 가져와 경우에 따라 운량 결과를 다르게 만들 여지가 있다. 사람의 목적도 지표에서 천구의 반원을 올려다보는 점이라는 점은 Skyview 관측과 같지만 곡률 효과의 정도는 둘 사이에 차이가 있을 것으로 예상된다. Skyview와 같은 전천 사진기로 전천 영상을 찍을 경우에 의한 곡률효과에 대해 Kassianov *et al.* (2005)의 연구에서 밝혀진 바 있다. Kassianov *et al.*은 전천 사진기로 지상에서 구름을 관측하여 구한 운량 ($N_{\text{hemisphere}}$)으로부터 이를 관계식을 통해 평행대기에서 보이는 운량 (N_{nadir})을 구하고 이 둘을 비교하여 변형 정도를 보였다. 영상의 중앙에 구름이 몰려 있을 때와 가장자리에 있을 때 구름이 차지하는 면적을 천정각의 변화에 따라 보았는데 구름이 적거나 중간정도 되는 경우는 평행대기의 운량과 비교했을 때 더 큰 값을 냈고 구름이 시야의 가장자리에 존재하게 되면 훨씬 더 작은 값을 가짐을 보였다. 이는 지상에서 운량 관측을 할 때 구름이 시야의 어디에 존재하는가에 따라 그 크기를 판단함에 있어서 영향을 미치고 있다는 것을 보여준다.

위와 같은 사실을 이용하면 N_{nadir} 를 위성으로 관측하고 이를 지상에서 구한 평행대기 운량과 비교하는 방법도 가능하다 (Oh *et al.*, 2006). 그렇게 되면 오직 목적에만 의존하는 비교 대상의 부재의 한계를 벗어날 수 있고 하나의 기준된 계산방법으로 일정한 시간에 제공되는 자료라는 점에서 Skyview와 같은 자동 분석 방법과 공통점을 갖게 된다. 이를 위해서는 실제 지상에서 관측되는 수평거리와 위성에서 관측하는 공간 범위가 같아야 하므로 고해상의 위성자료가 필요하며 계산을 위해서는 구름의 고도에 대한 정보가 필요하다. 하지만 다양하게 생산된 자료들과 더 많이 비교할수록 객관적이고 균형 있는 비교가 가능하기 때문에 다양한 시도가 필요하다.

5.5 일조량과 오차

앞에서 운량에 따라 비교를 한 것과 마찬가지로 이번에는 관측 시간에 따른 정확도 (오차 ± 2)의 변화를 살펴보았다. 하루 동안의 운량 자료가 안정되게 생산되는지를 확인하기 위해 오전 8시부터 오후 5시까지 자료를

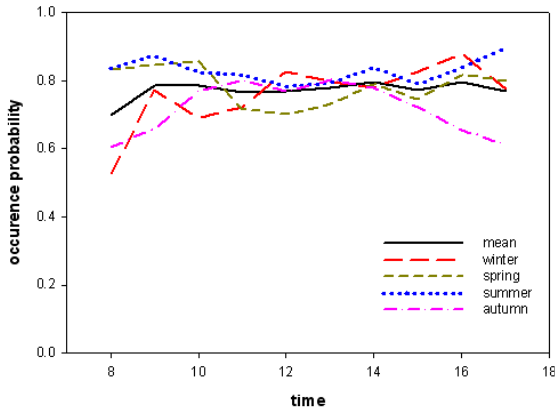


Fig. 12. The change of the agreement between the retrieved and the observed cloud amount with time variation.

각 계절별로 분류한 동시에 평균값도 함께 Fig. 12에 표시하였다.

평균값의 변화에 따르면 정확도는 시간 변화에 큰 영향 없이 일정한 값을 유지하고 있으나 오전 8시와 오후 5시에 다소 떨어지고 있었다. 이른 오전과 늦은 오후에 정확도가 떨어지는 것은 주로 겨울과 가을에 나타나고 있었는데, 이는 일사량 부족 효과와 태양 천정각이 커질 때의 곡률효과가 연관이 있는 것으로 보인다.

겨울은 해 뜨는 시간이 늦어지면 충분한 일사량을 받지 못하므로 전천 영상이 어둡게 찍히게 되는데 이때에는 물체 자체의 구분이 어려워진다. 구름의 존재여부를 떠나서 물체구분이 어려워지는 상태가 되므로 충분한 일사가 제공받지 못하는 환경에서는 경계값 설정이 무의미하게 된다. 그래서 구름이 많이 낀 상태임에도 불구하고 어둡거나 푸르게 보여 구름으로 탐지하지 못하는 경우가 자주 발생하였다. Fig. 13은 운량이 10으로 관측된 2006년 1월1일, 다른 시간에서의 Skyview의 영상을 비교하는 것인데 두 사진이 찍힌 시간이 모두 운량 10임에도 불구하고 일사량의 차이에 의해 구름의 색이 달라 보인다. 구름의 색이 달라 보인다는 것은 적색/청색의 비율이 달라진다는 것을 의미한다.

6. 결론

본 연구는 현재 관측자의 육안으로만 이루어지고 있는 운량 관측이 관측자의 주관적인 판단으로 결정되고 시간과 공간적으로 균일성이 떨어져 정확하고 객관적인 자료 수집이 힘들다는 점에 착안하여 이를 보완하고자 RGB 컬러영상으로부터 자동으로 운량을 계산하는

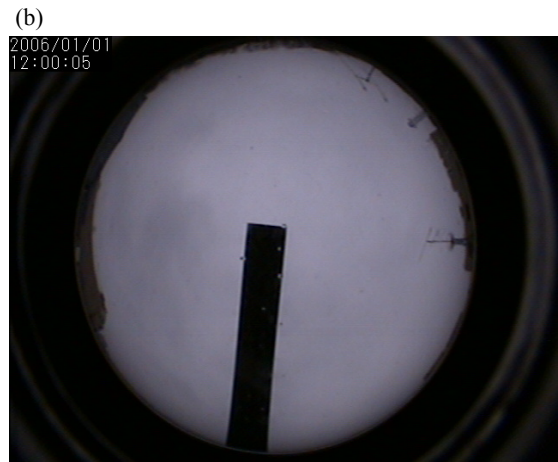
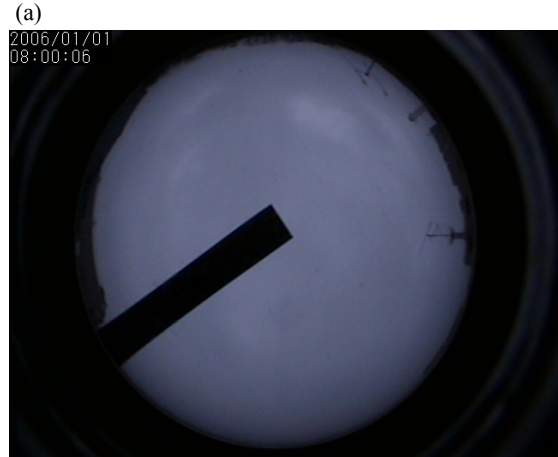


Fig. 13. The comparison of selected images on the overcast days with cloud amount of 10, but at different time.

알고리즘 개발을 목적으로 수행되었다. 이를 위하여 육안대신 고정된 장소에서 일정한 시간에 전천 영상을 찍는 전천 카메라를 사용하였고 사진의 면적에 대해 구름이 차지하는 비율을 구하여 운량을 계산하였다. 전천 카메라는 PREDE사에서 제작된 Skyview로 연세대학교 서울캠퍼스 이과대학 건물 옥상에 설치되어 있으며 한 시간 마다 제공되는 목적 결과와 비교하기 위해 약 11개월간 같은 시간 정각에 생산된 사진을 분석 대상으로 삼았다.

구름과 구름이 없는 하늘을 구분하는 방법은 산란을 시키는 매질에 따라 빛이 산란하는 특성이 다르다는 점을 이용하였다. 즉, 구름이 없는 하늘은 적색광보다 청색광이 더 산란을 잘 일으키고 구름에서는 적색과 청색이 비슷한 정도로 산란을 한다는 점을 사진 분석에 적

용하는데, 각 픽셀을 빛의 삼원색으로 분리하고 각각의 픽셀의 적색/청색 비율을 구해 구름을 결정할 경계값을 설정하였다. 구름의 양은 전천 영상의 원 면적에 대해 구름의 면적의 비를 백분율로 구하고 이를 목측의 분류 기준인 11단계로 바꾸었다.

Skyview의 알고리즘으로 사진을 분석한 결과 목측과의 오차가 ± 2 이내에 드는 경우에는 자료의 약 77%가 이 범위 안에 있는 것으로 나타났다. 계절별로 보면 오차 없이 정확하게 산출된 비율이 겨울이 46%로 가장 높고 봄 41%, 여름 37% 가을 27%로 나타나 겨울에 높은 정확도를 가지고 있음을 알 수 있으나 오차를 ± 2 이내까지 확대하면 여름이 83%의 정확도를 보이고 봄, 겨울, 가을 순으로 나타나 계절에 따라 알고리즘에 반응하는 정도가 다름을 알 수 있었다. 이는 계절마다 주로 발생하는 하늘 상태의 특성으로 알고리즘이 특정 대기에 대한 반응도가 달라질 경우 계절의 정확도로 이어진다는 것을 의미한다.

정확도가 가장 낮았던 가을의 오차 원인은 중간량의 구름 발생 확률이 높은 가을에 대해 알고리즘이 잘 구현하지 못 한다는 점과 구름이 있음에도 태양 빛이 강할 때 반사된 부분과 구름을 구분하는데 어려움이 있기 때문이었다. 또한 대기 중의 부유물질이 많아져 산란이 증가하면 하늘이 부영계 보여 옅은 구름이 낀 것과 같은 시각적 오류가 일어나 오차가 발생하는 것으로 분석 결과 드러났는데 이는 봄에 나타나는 큰 오차를 설명해 준다. 겨울에 오차가 생기는 원인 중 하나는 비교적 해가 늦게 뜨는 계절적 특징에 의해 이른 시간 찍힌 사진에 충분하게 일조량이 나타나지 않으면 구름이 있어도 이를 구분하지 못하는 문제가 있었다.

이와 같이 오차를 분석해 볼 때 현재까지 진행된 Skyview의 운량 계산 알고리즘은 아직 목측을 대신할 만큼 구축되었다고 볼 수는 없다. 앞으로 더 체계적이고 논리적으로 하늘 상태를 분리해내는 알고리즘이 필요하며 혼탁도와 구름을 효과적으로 구분하기 위해서 에어러솔 관측 장비 등을 결합한 다중 자동 관측을 진행할 필요가 있다. 또한 본 연구는 천공의 모습에서 구름을 구분하는데 초점을 두고 운량을 계산하였지만 사진의 각 화소는 실제로 대기에서 산란되는 정도를 보여 주고 있는 것이므로 화소의 파장별 신호 세기에 더 초점을 둔다면 대기 광학 깊이와의 관계 등을 추가로 연구할 가능성이 있다. 이렇듯 발전된 디지털 카메라 기술에 힘입어 관측자의 육안을 대신할 관측 장비들이 개발되고 있는 시점에서 현재의 목측도 자동 운영될 필요

성은 더욱 커지므로 이에 대한 연구는 시급하게 요구되고 있어, 지속적인 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업 (CATER2006-3203) 및 2차년도 BK21 연구 프로그램의 지원으로 수행되었습니다. 본 논문의 연구과정에서 조언을 준 안명환박사와 심사위원께 감사의 뜻을 포함합니다.

참고문헌

- Borkowski, J., Chai, A-T., Mo, T. & Green, A.E.O., 1997: Cloud effects on middle ultraviolet global radiation, *Acta Geophysica Polonica*, **vol.XXV**, **no.4**, 287-301.
- Davis, G. B., D. J. Griggs, and G. D. Sullivan, 1992: Automatic estimation of cloud amount using computer vision, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **9**, 81-85.
- Dürr, B., and R. Philipona, 2004: Automatic cloud amount detection by surface longwave downward radiation measurements, *J. Geophys. Res.*, **109**, D05201.
- Feister, U., J. E. Shields, M. E. Karr, R. W. Johnson, K. Dehne, and M. Woldt, 2000: Ground-based cloud images and sky radiances in the visible and near infrared region from whole sky imager measurements, *presented at the Climate Monitoring--Satellite Application Facility Training Workshop*, Dresden, Germany, **November 20-22**.
- Goodman, A. H., and A. Henderson-Sellers, 1988: Cloud detection and analysis: A review of recent progress. *Atmos. Res.*, **21**, 203-228.
- Kassianov, E. I., C. N. Long, and M. Ovtchinnikov, 2005: Cloud sky cover versus cloud fraction: Whole-sky simulations and observations, *J. Appli. Meteor.*, **44**, 86-98.
- Kerr, J.B., and G. Seckmeyer (Lead Authors), A.F. Bais, G. Bernhard, M. Blumthaler, S.B. Diaz, N. Krotkov, D. Lubin, R.L. McKenzie, A.A. Sabziparvar, and J. Verdebot, 2003: Surface ultraviolet radiation: Past and future, Chapter 5 in *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002*, Global Ozone Research and Monitoring Project—Report **No. 47**, World Meteorological Organization, Geneva.
- Long, C. N., and T. P. Ackerman, 2000: Identification of clear skies from broadband pyranometer measurements and calculation of downwelling shortwave cloud effects, *J. Geophys. Res.*, **105(D12)**, 15609-15626.
- _____, D. W. Slater, and T. Tooman, 2001: Total Sky Imager (TSI) model 880 status and testing results. *Atmospheric Radiation Measurement Program Tech. Rep. ARM*

- TR-006**, 36 pp.
- Oh, H.-R., Y.-S. Choi, C.-H. Ho and M.-H. Ahn, 2006: Development of Sky Cover Retrieval Algorithm for the Communication, Ocean and Meteorological Satellite (COMS) Imagery, *Journal of the Korean Meteorology Society*, **Vol. 42**, No. 6.
- Sabburg, J., and J. Wong, 1997: Development of a sun centered sky camera for use in UV measurements. *Proc. Int. Workshop (IAIF'97)*, Adelaide, Australia, Cooperative Research Centre for Sensor Signal and Information Processing (CSSIP), 113-118.
- _____, J. 1999: Evaluation of a Ground-Based Sky Camera System for Use in Surface Irradiance Measurement, *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **16(6)**, 752-759.
- Schafer, J. S., V. K. Saxena, and J. J. De Luisi, 1996: Observed influence of clouds on ultraviolet-B radiation. *Geophys. Res. Lett.*, **23(19)**, 2625-2628.
- Shields, J. E., M. E. Karr, T. P. Tooman, D. H. Sowle, and S. T. Moore, 1998: The Whole Sky Imager – A Year of Progress, *Proceedings of Eighth Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Science Team Meeting*.
- Sutter, M., B. Dürr, and R. Philipona, 2004: Comparison of two radiation algorithms for surface-based cloud-free sky detection, *J. Geophys. Res.*, **109**, D17202.
- Twomey, S. A., 1997: The influence of pollution on the short-wave albedo of clouds, *J. Atmos. Sci.*, **34**, **Issue 7**, 1149-1154.
- Wooldridge, C., 1993: The development and evaluation of a digital whole-sky cloud monitoring system. Ph.D. thesis, Macquarie University, 303 pp.